

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska



Mgr inż. Janusz Dąbrowski

ROZPRAWA DOKTORSKA

**WPLYW WARUNKÓW SPALANIA
WYBRANYCH GRUP ODPADÓW
NA EMISJĘ SZKODLIWYCH SUBSTANCJI**

Praca wykonana w Katedrze
Techniki Wodno-Mułowej
i Utylizacji Odpadów

Promotor:
prof. dr hab. inż. Tadeusz Piecuch

Koszalin 2010

Spis treści

1. Wstęp – cel, zakres i teza pracy	7
2. Studium literaturowe	12
2.1. Odpady i ich unieszkodliwianie	12
2.2. Chemia spalania	19
2.3. Produkty spalania	23
2.3.1. Tlenki azotu	23
2.3.2. Tlenki siarki	34
2.3.3. Tlenek węgla(II)	41
2.4. Współspalanie osadów ściekowych	43
2.5. Inne aspekty procesu spalania	48
3. Badania własne	52
3.1. Metoda punktu centralnego	52
3.2. Proces spalania i współspalania	58
3.2.1. Opis stanowiska badawczego	58
3.2.2. Materiały użyte do badań	63
3.2.3. Proces spalania	86
3.2.3.1. Metodyka badań	86
3.2.3.2. Zestawienie wyników badań procesu spalania osadów ściekowych	88
3.2.3.2.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2	88
3.2.3.2.2. Stężenie tlenków azotu NO_x	91
3.2.3.2.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO	92
3.2.3.3. Zestawienie wyników badań procesu spalania miazgi węglowej	94
3.2.3.3.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2	94
3.2.3.3.2. Stężenie tlenków azotu NO_x	95
3.2.3.3.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO	96
3.2.3.4. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów farbiarskich	98
3.2.3.4.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2	98
3.2.3.4.2. Stężenie tlenków azotu NO_x	99
3.2.3.4.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO	100

3.2.3.5. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów gumowych _____	102
3.2.3.5.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	102
3.2.3.5.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	103
3.2.3.5.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	104
3.2.3.6. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliestry _____	106
3.2.3.6.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	106
3.2.3.6.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	107
3.2.3.6.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	109
3.2.3.7. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliolefiny _____	110
3.2.3.7.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	110
3.2.3.7.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	111
3.2.3.7.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	113
3.2.3.8. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliwinyle _____	114
3.2.3.8.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	114
3.2.3.8.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	115
3.2.3.8.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	116
3.2.3.9. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych po procesie spalania _____	118
3.2.3.10. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces spalania _____	136
3.2.4. Proces współspalania _____	141
3.2.4.1. Metodyka badań _____	141
3.2.4.2. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym _____	149
3.2.4.2.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	149
3.2.4.2.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	150
3.2.4.2.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	152

3.2.4.3. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi _____	153
3.2.4.3.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	153
3.2.4.3.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	155
3.2.4.3.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	156
3.2.4.4. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi _____	158
3.2.4.4.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	158
3.2.4.4.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	159
3.2.4.4.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	161
3.2.4.5. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliestry _____	163
3.2.4.5.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	163
3.2.4.5.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	164
3.2.4.5.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	166
3.2.4.6. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliolefiny _____	167
3.2.4.6.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	167
3.2.4.6.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	169
3.2.4.6.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	170
3.2.4.7. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliwinyle _____	172
3.2.4.7.1. <i>Stężenie tlenku siarki(IV) SO₂</i> _____	172
3.2.4.7.2. <i>Stężenie tlenków azotu NO_x</i> _____	173
3.2.4.7.3. <i>Stężenie tlenku węgla(II) CO</i> _____	175
3.2.4.8. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych po procesie współspalania _____	177

3.2.4.9. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces współspalania	193
3.3. Oczyszczanie spalin po procesie spalania	197
3.3.1. Odsiarczanie spalin metodą wapniową	197
3.3.1.1. Opis stanowiska badawczego	197
3.3.1.2. Metodyka badań	200
3.3.1.3. Zestawienie wyników badań odsiarczania spalin metodą wapniową	203
3.3.1.4. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia tlenku siarki(IV) SO ₂ po procesie odsiarczania spalin metodą wapniową	205
3.3.1.5. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces odsiarczania spalin metodą wapniową	207
3.3.2. Usuwanie tlenków azotu NO _x metodą selektywnej redukcji katalitycznej	210
3.3.2.1. Opis stanowiska badawczego	210
3.3.2.2. Metodyka badań	213
3.3.2.3. Zestawienie wyników badań redukcji tlenków azotu NO _x	215
3.3.2.4. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia tlenków azotu NO _x po procesie ich redukcji	217
3.3.2.5. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces usuwania tlenków azotu NO _x metodą selektywnej redukcji katalitycznej	218
3.3.3. Adsorpcyjne oczyszczanie spalin	221
3.3.3.1. Opis stanowiska badawczego	221
3.3.3.2. Metodyka badań	222
3.3.3.3. Zestawienie wyników badań adsorpcyjnego oczyszczania spalin	228
3.3.3.3.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO ₂	228
3.3.3.3.2. Stężenie tlenków azotu NO _x	229

3.3.3.4. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych po procesie ich adsorpcyjnego oczyszczania	230
3.3.3.5. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces adsorpcyjnego oczyszczania spalin	233
4. Kompleksowy zapis modelu matematycznego	236
5. Podsumowanie	241
6. Wykaz użytych symboli	243
7. Literatura	245

1. Wstęp – cel, zakres i teza pracy

Rozwój przemysłu i postęp cywilizacyjny stanowi poważne zagrożenie dla naturalnego środowiska człowieka. Obecnie najważniejszym problemem jest ochrona tego środowiska. Każdego roku na całym świecie obserwuje się nieustanny wzrost liczby odpadów pochodzących z różnych gałęzi gospodarki i przemysłu. Najczęściej trafiają one na składowiska odpadów.

Istotne miejsce wśród odpadów przemysłowych zajmują odpady polimerowe (tworzywa sztuczne), odpady gumowe i odpady z przemysłu lakierniczego [67, 70, 117].

Narastający problem stanowią odpady z materiałów polimerowych i gumy, bowiem ich recykulacja przebiega w sposób złożony i często mało opłacalny; dotyczy to zwłaszcza przemysłu gumowego. Z punktu widzenia ochrony środowiska największym zagrożeniem są opony samochodowe, których udział w produkcji przemysłu gumowego wynosi w różnych krajach 60÷70%. Obecne zapasy zużytych opon na świecie ocenia się na kilkanaście mln ton, przy czym w krajach Unii Europejskiej w roku 2004 powstało ponad 3 mln tych odpadów. W Polsce, wg szacunków Instytutu Przemysłu Gumowego, ilość zużytych w roku 2003 opon wynosiła około 150 tys. ton, podczas gdy w roku 2005 liczba ta wzrosła do 170 tys. ton [68].

Klasycznie rozumiane odpady lakiernicze to odpady takie jak: mieszaniny różnorodnych pozostałości farb i lakierów czy rozpuszczalników gromadzonych w różnych pojemnikach oraz kożuchy i szlamy zbierane z kanałów i kabin malarskich, pyły lakiernicze czy grupa odpadów, która powstaje na zawieszkach i hakach malarskich, które to okresowo usuwa się zwiększając w ten sposób ilość odpadów [71].

Obecne w życiu codziennym tworzywa sztuczne są użyteczne, ale mogą być także źródłem zagrożeń dla szeroko rozumianego środowiska naturalnego. Po spełnieniu swojej funkcji użytkowej zwykle trafiają na składowiska odpadów. Ponieważ w ogromnej większości nie ulegają biodegradacji, stanowią poważniej-

1. Wstęp – cel, zakres i teza pracy

szy problem. GUS w lutym tego roku opublikował dane dotyczące produkcji niektórych surowców. Jeśli chodzi o tworzywa sztuczne, ich zbiorcza produkcja za okres dwóch miesięcy tego roku przekroczyła 355 tys. ton – tabela 1.1.

Tabela 1.1. Produkcja ważniejszych wyrobów przemysłowych I-II 2010 r. [67]

WYROBY wg Polskiej Klasyfikacji Wyrobów i Usług (PKWiU 2008) / PRODPOL	2010	
	II	I-II
	Liczby bezwzględne, tys. t	
Tworzywa sztuczne	170,0	355,0
Farby, lakiery i podobne środki pokrywające	65,2	127,0
Wyroby z gumy (opony ogółem)	30,4	59,7

Dlatego też, obecnie utylizacja odpadów stała się ogromnym problemem zarówno ze względu na olbrzymią ilość produkowanych odpadów, jak i na ich składowanie, gdyż często zawierają one materiały bardzo szkodliwe dla środowiska. Wprowadzenie segregacji i przetwarzania odpadów jest szansą na znaczne ich ograniczenie, ale wciąż przecież odpady będą trafiać na składowiska.

Polska zalicza się do tych państw UE, które składają na składowiskach około 98% wytwarzanych rocznie odpadów. Brak innych alternatywnych technologii zagospodarowania odpadów komunalnych i przemysłowych powoduje, że aby dotrzymać standardów unijnych i unijnej hierarchii postępowania do 2020 roku należy zagospodarować 4400 tys. odpadów organicznych rocznie [49].

Wprowadzenie termicznych technologii utylizacji odpadów daje możliwość wydłużenia czasu eksploatacji istniejących składowisk, których w Polsce jest obecnie ponad 1000 [94] a także wykorzystania odpadów jako cennych produktów energetycznych.

Najpowszechniej stosowaną metodą utylizacji odpadów jest spalanie. Proces spalania pozwala z jednej strony pozbyć się znacznych ilości odpadków ze składowisk odpadów, a jednocześnie wyzwala się pewne ilości energii, z drugiej jednak strony stanowi poważne zagrożenie dla środowiska naturalnego ze

względu na substancje toksyczne emitowane do otoczenia podczas jego przebiegu.

Do najbardziej uciążliwych z różnych powodów produktów spalania odpadów należą: CO, SO₂, NO_x oraz CO₂, ale przede wszystkim grupa związków, w skład której wchodzi polichloro- i polibromo- pochodne dibenzodioksyny i dibenzofuranu (PCDDs i PCDFs). Obecnie są to najgroźniejsze, znane w świecie, trucizny stanowiące pewien bardzo niewielki, ale z dużą „siłą rażenia” ułamek sumy węglowodorów C_xH_y, które znajdują się w gazach spalinowych. Inne produkty wydzielające się podczas spalania odpadów to na przykład: fosgen, HBr, nitrozwiązki, alkohole, aldehydy. Mają one silne własności toksyczne jednak ich udział procentowy w produktach spalania tworzyw sztucznych, odpadów gumowych czy z przemysłu lakierniczego jest niewielki i dlatego nie są zaliczane do podstawowych produktów termicznego rozkładu i spalania tego typu materiałów.

Należy wspomnieć, że Katedra Techniki Wodno-Mułowej i Utylizacji Odpadów Politechniki Koszalińskiej od wielu lat zajmuje się problematyką termicznej utylizacji odpadów różnych grup odpadów przemysłowych i komunalnych [56÷60]. Konsekwencją tak bogatych doświadczeń w tej tematyce jest podjęcie przez Autora problemu optymalnych warunków spalania i współspalania wybranych grup odpadów wraz z ostateczną próbą oceny możliwości oczyszczania (wybranymi metodami) głównych składników zanieczyszczeń gazów spalinowych powstałych w wyniku tych procesów.

Praca ta ma charakter głównie pracy badawczej. Badania procesu spalania były realizowane na wybranych grupach odpadów pochodnych przemysłu chemii organicznej. Odpady te są zatem w swojej grupie w miarę jednorodne o znanej strukturze chemicznej i można je potraktować jako materiał tzw. modelowy. Pozwala to określić te badania jako badania częściowo także o charakterze podstawowym.

Z drugiej jednak strony przyjęte do badań grupy odpadów są jak najbardziej typowe i powszechnie spotykane w praktycznej konieczności ich likwidacji i ewentualnej utylizacji.

1. Wstęp – cel, zakres i teza pracy

Zatem uprawnione jest spostrzeżenie, że tego typu badania będą miały charakter również aplikacyjny.

Wobec powyższego w niniejszej dysertacji zamierza się udowodnić następującą tezę:

ISTNIEJĄ RÓŻNE PARAMETRYCZNE WARUNKI OPTIMALNEGO SPALANIA WYBRANYCH GRUP ODPADÓW W ODNIESIENIU DO GŁÓWNYCH SKŁADNIKÓW ZANIECZYSZCZEŃ SPALIN ORAZ MOŻLIWOŚCI ICH OCZYSZCZANIA WYBRANYMI METODAMI.

Udowodnienie powyższej tezy lub także jej odrzucenie pozwoli odpowiedzieć na zasadnicze pytania, a mianowicie takie, czy przyjęte do badań w ramach tej dysertacji trzy różne, bardzo typowe i najczęściej spotykane grupy odpadów będące pochodnymi przemysłu chemii organicznej (a mianowicie: odpady farbiarskie, gumowe i z tworzyw sztucznych), można spalać łącznie (razem wprowadzać do pieca spalarni) i nie ma to wpływu dla oczyszczania pochodzących stąd spalin.

Biorąc wszystko powyższe pod uwagę w przypadku tak metodycznie (badawczo) ustawionej realizacji tej pracy, każda odpowiedź na powyższe pytanie będzie ważną informacją aplikacyjną.

Oczywiście w miarę istniejących możliwości w trakcie prowadzenia badań laboratoryjnych zostały podjęte próby wyjaśnienia mechanizmów przyczynowo-skutkowych stwierdzonych zależności. Zostało to poparte analizą własnych wyników badań z nawiązaniem do literatury w temacie tej dysertacji.

Niniejsza rozprawa zawiera 7. rozdziałów. W części literaturowej Autor zaprezentował ogólne zagadnienia termicznych metod unieszkodliwiania i utylizacji grup odpadów komunalnych i przemysłowych oraz metod oczyszczania powstałych w tych procesach spalin. W tej części praca ta ma charakter poznawczo-teoretyczny. W części badawczej, praktycznej, przedstawiono wyniki badań pozyskanych w trakcie prowadzenia eksperymentów laboratoryjnych z zakresu

1. Wstęp – cel, zakres i teza pracy

termicznej destrukcji różnych grup odpadów (komunalnych i przemysłowych). Ostatecznie, dysponując określonymi wynikami poszczególnych etapów badań laboratoryjnych, został opracowany model matematyczno-empiryczny, tworzący kryterium określające optymalne warunki parametryczne spalania wybranych grup odpadów w odniesieniu do głównych składników zanieczyszczeń spalin oraz możliwości ich oczyszczania wybranymi metodami. Wszystkie obliczenia prowadzące do uzyskania opracowanego modelu matematycznego zostały dokonane przy pomocy programu komputerowego STATISTICA 8.0 oraz Microsoft Office Excel 2007. Politechnika Koszalińska jest użytkownikiem tych programów i posiada na nie aktualną licencję.

Niniejsza praca została wykonana w ramach grantu promotorskiego Nr N N523 0216 33 finansowanego ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy.

2. Studium literaturowe

Literatura dotycząca problematyki termicznej utylizacji odpadów jest bardzo obszerna i streszczenie jej w jakimkolwiek krótkim teksie jest niemożliwe. Dlatego też w tym rozdziale, poza podstawowymi definicjami i pojęciami z zakresu termicznej utylizacji odpadów komunalnych i przemysłowych, podaje się jedynie informacje sygnalne dotyczące prac (w odniesieniu do naszego kraju) o zespołach, które tym zagadnieniem się zajmują.

2.1. Odpady i ich unieszkodliwianie

Zgodnie z Ustawą o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. Nr 62, poz. 628 z późn. zmianami) odpady to wszystkie substancje stałe, a także nie będące ściekami substancje ciekłe powstałe w wyniku bytowej i gospodarczej działalności człowieka, nieprzydatne w miejscu i w czasie, w którym powstały oraz uciążliwe dla środowiska naturalnego. Zgodnie z obowiązującą nomenklaturą prawną odpady oznaczają każdą substancję lub przedmiot należący do jednej z kategorii określonych z załącznikiem nr 1 do tej ustawy. Za odpady uważa się również osady ściekowe [3, 70, 90, 91].

Ze względu na ich rodzaj, odpady można podzielić na: komunalne, przemysłowe, osady ściekowe; ze względu na konsystencję: stałe, ciekłe; oraz ze względu na inne cechy np.: niebezpieczne, inne niż niebezpieczne [117].

Odpady komunalne to odpady powstające w gospodarstwach domowych a także odpady niezawierające odpadów niebezpiecznych, pochodzących od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych (Dz.U. z 2001 r. Nr 62, poz. 628). Odpady komunalne mają zmieniający się heterogeniczny charakter, który zależy od wielu czynników.

Odpady przemysłowe to aż 90% wszystkich odpadów, jakie powstają w Polsce (dane z 2004 roku) [48]. Są one ubocznym produktem działalności ludzkiej, są niepożądane w miejscach ich powstawania, a powstają na terenach

zakładów przemysłowych, są uciążliwe i szkodzą środowisku. Zaliczamy do nich: opakowania, popiół, żużel, oleje, mineralne i metaliczne odpady. Ich skład jest bardziej jednorodny niż w przypadku komunalnych odpadów.

Największe ilości odpadów (wg stanu na rok 2006) powstają w przemyśle wydobywczym – 58,3% całości wytwarzanych odpadów, w przemyśle energetycznym – 23%, rolno-spożywczym – 7,3% oraz instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów z oczyszczalni ścieków oraz uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych – 4,7% [68].

Przemysłowe odpady możemy podzielić ze względu na dominujący składnik na:

- metaliczne, które są prawie że w 100% zagospodarowane,
- mineralne, które są wykorzystywane w przemyśle budowlanym oraz rolnictwie,
- niemetaliczne, pochodzące:
 - ze spożywczego przemysłu (tłuszcze, kości),
 - z produkcji hodowlano-rolnej (włosie, pierze, słoma zbożowa i roślin oleistych),
 - z chemicznego przemysłu (guma, tworzywa sztuczne, petrochemiczne odpady),
 - z przemysłu budowlanych materiałów (szklana stłuczka),
 - z przemysłu lekkiego (tekstylium, skóra, włókno),
 - z przemysłu papierowego oraz drzewnego,
- komunalne.

Specyficzną grupą przemysłowych odpadów są odpady niebezpieczne, które stanowią około 3,5% całkowitej masy przemysłowych odpadów. W roku 1997 polski przemysł wytworzył blisko 4 mln ton tego typu odpadów, co w przeliczeniu oznacza 103 kg niebezpiecznych odpadów przypadające na jednego mieszkańca. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w roku 1998 ponad 2 mld ton przemysłowych odpadów, w tym 400 mln ton niebezpiecznych od-

padów, zalegało na składowiskach. Ich masa ciągle wzrasta, ponieważ rocznie wytwarzane jest około 130 mln ton nowych odpadów, np. w roku 2000 wytworzono ich 125,5 mln ton, przy czym niebezpiecznych odpadów było 1,6 mln ton. Największy stopień wykorzystania tych odpadów, bo ponad 97%, przypada na stałe odpady pochodzące z metody wapniowej odsiarczania paliw (w roku 2000 wykorzystano ich 97,7%) [48].

Odpady jako stałe paliwa alternatywne to „odpady palne rozdrobnione o jednorodnym stopniu wymieszania, powstałe w wyniku zmieszania odpadów innych niż niebezpieczne, z udziałem lub bez udziału paliwa stałego, ciekłego lub biomasy, które w wyniku przekształcenia termicznego nie powodują przekroczenia poziomów emisji substancji zanieczyszczających, określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 4 sierpnia 2003 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. Nr 163, poz. 1584) odnoszących się do procesu współspalania odpadów”. Według definicji: „Paliwo alternatywne jest to paliwo uzyskane w procesie odzysku odpadów posiadających wartość opałową. Stosowane jest w przemyśle, jako zamiennik węgla kamiennego i mazutu”. Paliwa te przybierają następujące formy [89]:

- paliwo stałe rozdrobnione (PAS-r) powstające w wyniku rozdrabniania odpadów do określonej przez odbiorców granulacji. Paliwa alternatywne stałe zastępujące węgiel, miął węglowy itd. w tym paliwa suche z odpadów rozdrobnionych (czyściwa, plastiki, guma, drewno i inne) są wytwarzane w procesie technologicznym, na który składa się segregacja i mielenie wybranych odpadów oraz separowanie odpadów nieprzydatnych. Produktem końcowym jest granulata o średnicy do 70 mm i parametrach fizykochemicznych spełniających wymagania odbiorcy. Wartość opałowa może osiągać 18-23 MJ/kg.
- paliwo stałe impregnowane (PAS-i), powstające w wyniku mieszania odpadów płynnych z substancjami o właściwościach chłonnych. Paliwa półsuche z odpadów płynnych gęstych (smary, smoły, szlamy, odpady farb i lakierów i inne) otrzymuje się w drodze impregnacji na podłożu nasiąkliwym (trociny, pył tytoniowy, tekstylia, itd.) przez mieszanie ich w specjalnych urządzeniach. Pro-

duktem końcowym jest granulata o parametrach fizykochemicznych spełniających wymagania odbiorcy. Wartość opałowa 8-11 MJ/kg.

- paliwo płynne, powstające w wyniku mieszania odpadów płynnych. Paliwa alternatywne płynne, zastępujące ciężkie oleje opałowe powstają z odpadów olejowych i rozpuszczalnikowych przez oczyszczanie, mieszanie i uśrednianie zgodnie z zapotrzebowaniem odbiorcy. Są to paliwa wysokoenergetyczne a ich wartość opałowa sięga 30-36 MJ/kg [89].

Unieszkodliwianie odpadów polega na poddaniu odpadów procesom przekształceń biologicznych, fizycznych lub chemicznych w celu doprowadzenia ich do stanu, który nie stwarza zagrożenia dla życia, zdrowia ludzi lub dla środowiska. Do procesów unieszkodliwiania odpadów zalicza się m.in. składowanie na składowiskach, obróbkę w glebie i ziemi, retencję powierzchniową (np. umieszczanie odpadów na poletkach osadowych lub lagunach), termiczne przekształcanie odpadów [23, 30, 61, 64, 117].

Przez termiczne przekształcanie odpadów rozumie się następujące procesy utleniania odpadów [61, 64]:

- spalanie,
- odgazowanie (piroliza),
- zgazowanie,
- spalanie w plazmie.

Procesy te prowadzone są w przeznaczonych do tego instalacjach lub urządzeniach (m.in. spalarniach odpadów) na zasadach określonych w przepisach szczegółowych.

W ostatnich latach coraz bardziej udoskonalano sposoby spalania odpadów. Tego rodzaju forma przekształcania odpadów ma tę przewagę nad uporządkowanym składowaniem, że pod budowę spalarni nie trzeba wielkich terenów, natomiast ciepło odlotowe, które powstaje podczas spalania w nowoczesnych zakładach wykorzystywane jest do wytwarzania energii elektrycznej

i ogrzewania budynków. Jednak spalanie odpadów jest nadal bardzo dyskusyjne, ze względu na emisję zanieczyszczeń, które stanowią bezpośrednie zagrożenie dla ludzi na stanowiskach pracy i w najbliższej okolicy a ponadto z racji przeniesienia tych zanieczyszczeń na duże odległości, stanowi również problem w skali regionalnej i globalnej.

Zużycie energii oznacza wzrost szkodliwego wpływu na środowisko. Jak pisze A. Szkarowski [77], działalność ekologiczna potrzebuje urządzeń, paliwa, wody, reagentów chemicznych i innych środków zużywanych oraz wykonywania funkcji kontroli i sterowania automatycznego. Wg A. Szkarowskiego, energetyczno-ekologiczna analiza stanu środowiska naturalnego oraz działalności ekologicznej jest systemem metodologicznym polegającym na ujawnieniu wszystkich związków elementów środowiska, a również na kontrolowaniu wszystkich zmian, wnoszonych do procesu technologicznego aż do ostatecznych zaburzeń, spowodowanych przez te zmiany w istniejącym energetyczno-ekologicznym bilansie. System ten działa w oparciu o kilka dość prostych reguł wymagających obowiązkowego zastosowania:

- wzrost zużycia energii (zarówno bezpośredni, jak i pośredni) oznacza bezpośrednio podwyższenie niekorzystnego wpływu na środowisko naturalne,
- zastosowanie dodatkowego sprzętu i zużycie środków ma swój ścisły odpowiednik energetyczny i również powoduje negatywne oddziaływanie,
- podstawą dla bezwarunkowej kwalifikacji technologii, jako rozwiązania naturoochronnego może być tylko zmniejszenie samego pierwotnego tworzenia się szkodliwych składników, lecz nie idące w ślad za tym ich usunięcie [77].

Unieszkodliwianie odpadów poprzez poddanie ich przekształceniu termicznemu, zgodnie z ustawą o odpadach, musi spełniać określone warunki. Istotny jest czas przetrzymania spalin w komorze spalania, który powinien wynosić co najmniej 2 sekundy, a temperatura w komorze spalania nie może być niższa od 850°C podczas spalania odpadów o zawartości chloru w związkach organicznych nie przekraczających 1% suchej masy odpadów. W przypadku zawar-

tości chloru w związkach organicznych powyżej 1% suchej masy temperatura ta nie powinna być niższa od 1100°C. Natomiast, minimalną zawartość tlenu w gazach spalinowych ustalono na poziomie 6%. W przypadku przekształcania termicznego wykorzystującego proces pirolizy gazy z rozkładu powinny być wykorzystane w postaci paliwa pomocniczego w paleniskach kotłowni grzewczych, przy czym zawartość w parach i gazach odlotowych organicznych związków chlorowców nie może przekraczać wartości 0,5 mg/m³. Dopuszczono spalanie w pochodniach jedynie wtedy, gdy nie istnieje możliwość innego wykorzystania tych gazów [61, 64].

Do spalania odpadów o różnorodnej strukturze, z powodzeniem nadają się piece obrotowe (w tym do wypalania klinkieru cementowego, wapna, dolomitu czy gipsu) [1, 2, 66, 83]. Piece te stwarzają wręcz idealne warunki do termicznej destrukcji odpadów, gdyż panują w nich bardzo wysokie temperatury, wynikające z potrzeby podgrzania materiałów wsadowych do około 1450°C (temperatura płomienia zwykle przekracza 2000°C). W procesie produkcji cementu wykorzystywane są m.in. odpady palne częściowo zastępujące paliwa zasadnicze, przez co uzyskuje się istotną oszczędność w zużyciu energii. Piec obrotowy współpracuje zwykle z komorą dopalania spalin przedłużającą czas przebywania gazów odlotowych w strefie wysokich temperatur do ponad 2 s, a w zależności od długości i rodzaju pieca, nawet 6÷10 s. Stosowanie w cementowniach paliwa zastępczego w postaci palnych produktów odpadowych przynosi korzyści ekonomiczne, wynikające ze zmniejszenia zużycia znacznie droższych konwencjonalnych paliw technologicznych. W porównaniu z budową nowej spalarni odpadów nakłady związane z przystosowaniem istniejących pieców cementowych do bezpiecznego spalania produktów odpadowych (w tym niebezpiecznych) są znacznie niższe i zwykle zwracają się w 12÷18 miesięcy.

Obok procesu spalania klasycznego, drugim procesem termicznej utylizacji odpadów jest piroliza, czyli rozkład substancji organicznej w wysokiej temperaturze (250÷900°C) bez dostępu tlenu [61, 64, 66, 90]. W takim przedziale tempera-

tur, substancje organiczne (lotne) są odgazowywane, a węglowodory wyższe rozkładane termicznie do niższych. Wg J.W. Wandrasza proces pirolizy prowadzony w niższej temperaturze (poniżej 600°C), nosi nazwę wytlewania, a w wysokiej (powyżej 600°C) – odgazowania [90]. Masa osadów poddana pirolizie zostaje przekształcona ostatecznie w [70]:

- fazę gazową, tzw. gaz pirolityczny (wytlewny), który tworzą para wodna, wodor, metan, etan i ich pochodne, wyższe węglowodory alifatyczne, tlenek i ditlenek węgla, a także inne związki gazowe, takie jak siarkowodor, chlorowodor, fluorowodor; gaz pirolityczny można absolutnie bezpiecznie pod względem ekologicznym spalić nie zanieczyszczając atmosfery [70].
- fazę stałą, zawierającą węgiel (tzw. koks pirolityczny), substancje nieaktywne, pyły ze znaczną zawartością metali ciężkich,
- fazę płynną, zawierającą kondensaty wodne i oleiste oraz składniki organiczne (kwasy i alkohole).

Wzajemne proporcje poszczególnych faz, podobnie jak skład gazu, jak już wspomniano, są funkcją temperatury, w której proces jest prowadzony. Największy udział zawsze ma faza ciekła (około 60%), niezależnie od temperatury, natomiast wzrost temperatury pociąga za sobą wzrost udziału fazy gazowej przy spadku udziału fazy stałej. Piroliza jest procesem, do którego zapoczątkowania lub prawidłowego przebiegu konieczne jest dostarczenie energii. Jest więc w odróżnieniu od procesu spalania procesem wysokoendotermicznym [60, 62, 63, 84].

Piroliza to jedna z możliwości utylizacji odpadowych poliolefin [45, 84÷86]. A. Tokarska i A. Mianowski badali ten sposób degradacji w instalacji do pirolizy odpadowych poliolefin pod ciśnieniem normalnym, w temperaturze około 400°C. Pierwotnie proces przebiegał w obecności dodatków nieorganicznych zwanych potocznie katalizatorami, którymi były minerały glinokrzemianowe. Dalszy rozwój technologii zgłoszony do ochrony patentowej [45] polegał na zastosowaniu własnego granulatu polietylenowego i dodawaniu do reaktora oleju technologicznego o określonych właściwościach. Surowcami do badań były: odpadowy poliety-

len w formie granulatu, stanowiący wsad do reaktora, olej technologiczny, katalizator – addytyw glinokrzemianowy. Jako substancje katalityczne stosowane były również dodatki wysokokrzemowe (zwane dalej katalizatorami, które były przedmiotem zgłoszenia patentowego) oraz w celach porównawczych, cement portlandzki. Stopień konwersji tworzywa wynosił ponad 90% mas, a uzysk produktów ciekłych przewyższa 80%. Badania procesu wykazały, że na ilość i charakter produktów ma wpływ dobór surowca, a także stosowanych w procesie addytywów nieorganicznych. Szczegółowe wyniki badań w tym zakresie były przedstawione na dwóch Ogólnopolskich Konferencjach Naukowych pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska” organizowanych przez prof. T. Piecucha w 1999 i 2001 roku [84, 85]. Autorzy pracy prowadzili też pirolizę mieszaniny polipropylenu i olejów pochodzenia naftowego. Uzyskiwane produkty charakteryzowały się nieco niższą zawartością składników nienasyconych, ale użycie olejów pochodzenia naftowego skutkowało pojawieniem się związków siarki, dlatego też produkty te wymagały uszlachetnienia. Jedną z możliwości uszlachetnienia produktów z pirolizy poliolefin jest ich uwodornienie. Badania nad tą możliwością zaowocowały pracą [86] opublikowaną w roku 2003 również w ramach materiałów Konferencji Naukowej pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”. Dla produktów pirolizy polipropylenu ustalono optymalne parametry procesu uwodornienia: temperatura 350°C, ciśnienie 7 MPa i obciążenie katalizatora 1h^{-1} . Uwodornienie dwóch frakcji powodowało ich głębokie odsiarczenie z zawartości 0,25% do poziomu 0,01% i 0,415% do poziomu 0,03%.

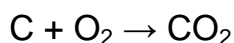
2.2. Chemia spalania

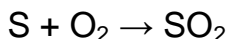
Analizowanie procesu spalania jednoznacznie związane jest z chemią spalania, gdyż podstawę procesu spalania stanowią przemiany chemiczne. Spalanie jest kontrolowaną reakcją chemiczną – utlenianiem substancji organicznej w wysokiej temperaturze. W przemianach tych zwykle uczestniczą dwie grupy związków – paliwa i utleniacze. Wystąpienie reakcji chemicznych staje się możliwe

wówczas, gdy dojdzie do kontaktu między cząsteczkami tych związków. Jest to znacznie ułatwione w fazie gazowej i dlatego większość procesów spalania przebiega w tej fazie [10, 32, 34].

Dla wyjaśnienia wpływu zmian badanych w niniejszej pracy, wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych powstałych w procesach spalania konieczne jest wcześniejsze wyjaśnienie procesów powstawania podstawowych składników zanieczyszczeń gazów spalinowych, tj. grupy związków nieorganicznych jakimi są tlenki niemetali (C, S, N) – związków chemicznych powstałych jako produkty reakcji utleniania tych pierwiastków.

Oczywistym jest [27, 32], że cząsteczka powstaje, gdy dwa lub więcej atomów łączy się ze sobą wiązaniem chemicznym, które polega na wzajemnym oddziaływaniu elektronów z powłok walencyjnych sąsiadujących atomów. Nakładają się na siebie wtedy stosowne orbitale i zwiększa się gęstość elektronowa w obszarze wiązania. Wiązanie chemiczne to wspólna dla obu atomów para elektronów, z przeciwnymi spinami. Wiązania mogą być pojedyncze, podwójne i potrójne. Reakcje wyższych rzędów występują rzadko, ze względu na znikome prawdopodobieństwo jednoczesnego zderzenia większej liczby cząsteczek. Większość reakcji w procesach spalania to reakcje dwucząsteczkowe. W przypadku reakcji utleniania pierwiastków elementarnych w procesie spalania, wiązaniem chemicznym, które dominuje w tej grupie tlenków jest wiązanie kowalencyjne – elektrony wspólne mogą pochodzić z obu atomów. Wiążące się atomy osiągają najkorzystniejszą konfigurację elektronową, gdy wszystkie elektrony są sparowane. Poniżej pokazano przykładowe, schematyczne reakcje utleniania pierwiastków elementarnych, gdzie produktami są składniki gazów spalinowych.





Ogólną reakcję chemiczną można zapisać w postaci równania [26, 32, 34]:



gdzie:

A, B – cząsteczki substratów,

C, D – cząsteczki produktów.

Szybkość reakcji chemicznej może wyrażać zarówno szybkość ubytku substratów A i B, jak i szybkość powstawania produktów C i D. W wielu reakcjach, ważnych z punktu widzenia procesu spalania szybkość reakcji k jest pod dominującym wpływem temperatury. Reakcja łączenia się substratów A i B jest możliwa jeśli mają one odpowiednią wartość energii kinetycznej. Reakcja ta zachodzi jednak tylko wtedy, gdy energia zderzających się cząsteczek jest większa od pewnej wielkości krytycznej, noszącej nazwę energii aktywacji E . W reakcji łączenia się substratów, przebiegającej z wydzielaniem ciepła, wartość energii aktywacji jest stosunkowo mała, podczas gdy energia niezbędna do rozpadu cząsteczki jest od niej większa o ciepło spalania. W miarę przebiegu reakcji łączenia się cząsteczek A i B jej szybkość ulega zmniejszeniu wskutek sukcesywnego zmniejszania się liczby zderzeń tych cząsteczek. W tym samym czasie wzrasta szybkość reakcji rozkładu wskutek wzrostu liczby zderzeń cząsteczek produktów reakcji [26].

W efekcie musi dojść do stanu, w którym szybkości reakcji w obu kierunkach są jednakowe. Wtedy średni stan chemiczny mieszaniny ustali się, chociaż będą w niej zachodzić równocześnie obie reakcje. Stan powstałej równowagi chemicznej ma charakter dynamiczny. W przypadku zwiększenia temperatury

mieszaniny gazowej, liczba cząsteczek o większym zasobie energii wzrośnie, co spowoduje zwiększenie szybkości rozkładu produktów reakcji. Temperatura mieszaniny gazów wpływa na jej skład w taki sposób, że przy jej wzroście w mieszaninie wzrasta zawartość produktów rozkładu, na wytworzenie których jest tracona pewna ilość ciepła [26].

Zależność pomiędzy szybkością reakcji chemicznej, temperaturą procesu a energią aktywacji opisuje równanie Arrheniusa [26, 32, 34, 87]:

$$k = C \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.2)$$

gdzie:

- k – szybkość reakcji,
- E – energia aktywacji,
- R – uniwersalna stała gazowa,
- T – temperatura bezwzględna,
- C – tzw. współczynnik częstości.

Z równania Arrheniusa wynika, że szybkość reakcji chemicznych zależy zarówno od właściwości substratów (E) jak i również od temperatury procesu. Charakter wykładniczy równania wskazuje na szybki przebieg reakcji spalania spowodowany przyspieszającym działaniem temperatury [26, 32].

Efektami cieplnymi reakcji spalania lub ciepłami spalania nazywamy ilość ciepła, jaka wydzieliła się przy całkowitym i zupełnym spalaniu jednostki paliwa (do ostatecznych produktów utleniania) [77]. Jak pisze A. Szkarowski, dla paliw gazowych najczęściej stosuje się ciepło spalania odniesione do 1 m³ w warunkach normalnych fizycznych (0 °C; 101325 Pa). Odróżnia on ciepło spalania wyższe (górne) i niższe (dolne). Wyższe (górne) ciepło spalania Q_g uzyskuje się w warunkach, przy których woda będąca produktem spalania w całości doprowadza się do postaci cieczości, a temperatura produktów spalania równa się temperaturze gazu i powietrza przed spalaniem. W praktyce skraplanie pary wodnej

spalin zachodzi stosunkowo rzadko – przy kontaktowym podgrzewaniu wody i w kotłach kondensacyjnych. Niższe (dolne) ciepło spalania Q_d odpowiada warunkom, przy których woda będąca produktem spalania występuje w spalinach w postaci pary. Zatem niższe ciepło spalania jest zawsze mniejsze od wyższego o wartość utajonego ciepła parowania (skroplenia) pary wodnej powstałej w wyniku reakcji spalania (blisko 2,5 MJ na każdy kilogram pary wodnej uwzględniając pewne schłodzenie powstałego kondensatu). Wg A. Szkarowskiego, w potocznym języku technicznym krajowym przyjęło się górne ciepło spalania określać mianem ciepło spalania, zaś dolne ciepło spalania – mianem wartość opałowa [77].

2.3. Produkty spalania

Głównymi produktami spalania paliw (kopalnych i odpadowych) to przede wszystkim CO_2 i H_2O . Ale paliwa pochodzenia organicznego, oprócz węgla i wodoru, zawierają jednak wiele innych pierwiastków, np. tlen, azot, siarka. Z tego względu, wśród zanieczyszczeń znajdujących się w gazach spalinowych wyróżnia się zanieczyszczenia:

- główne (CO_2),
- uboczne (NO_x , SO_2),
- śladowe (substancje organiczne – TOC, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne – WWA, lotne związki organiczne – LZO, dioksyny i furany – PCDDs i PCDFs oraz metale ciężkie).

Najważniejsze zanieczyszczenia w spalinach to zanieczyszczenia spowodowane obecnością w paliwach pierwiastków elementarnych (NO_x i SO_2) oraz pośredni produkt niedoboru powietrza do spalania (CO).

2.3.1. Tlenki azotu

Tlenki azotu, emitowane do atmosfery głównie w wyniku spalania paliw oraz procesów metalurgicznych i chemicznych (produkcja kwasu azotowego,

nawozów sztucznych), należą do najgroźniejszych zanieczyszczeń powietrza. Działają szkodliwie na organizmy żywe i powodują korozję tworzyw konstrukcyjnych. Jak podaje T. Paryczak, w wyniku reakcji fotochemicznych z lotnymi związkami organicznymi tworzą smog fotochemiczny oraz przyczyniają się do zwiększenia stężenia ozonu w przy powierzchniowych warstwach atmosfery. Jednocześnie reakcje NO z ozonem w stratosferze prowadzą do ubytku warstwy ozonowej, co przyczynia się do obecności silniejszego promieniowania ultrafioletowego na powierzchni Ziemi [51, 52]. Problemem stężeń ozonu w powietrzu atmosferycznym w wielu swoich publikowanych pracach zajmował się J. Zwoździak. M.in. w pracy [111] wyodrębnił parametry meteorologiczne istotne dla prognozowania stężeń ozonu w powietrzu. Następnie zbadał korelacje między wybranymi zmiennymi, zarówno dla średnich dobowych, jak i dla wartości chwilowych, potwierdzając silny związek między warunkami atmosferycznymi i stężeniami ozonu oraz występowanie autokorelacji szeregów stężeń chwilowych z wielu stacji monitoringu atmosfery. Natomiast w pracy [115] J. Zwoździak omówił różnice w stężeniach O_3 w powietrzu dla warunków bezchmurnych i zachmurzenia całkowitego, w powietrzu w chmurach oraz na początku i końcu epizodu chmurowego. Badania terenowe przeprowadzono na Szrenicy w Karkonoszach w lipcu 1999 i 2000 roku, gdzie monitorowano stężenia SO_2 , NO_2 , O_3 i H_2O_2 oraz zawartość wody w chmurach. Analiza korelacji pomiędzy tymi parametrami wykazała istnienie zależności w szerokim zakresie współczynników korelacji. Najwyższe stwierdzono pomiędzy H_2O_2 i O_3 oraz NO_2 i SO_2 . W warunkach zachmurzenia stężenia H_2O_2 były odwrotnie proporcjonalne do stężeń NO_2 . W przypadku ozonu, wykazywał on ujemną korelację z zawartością wody w chmurach. Badania terenowe nie dostarczyły dowodów na znaczące zmiany stężeń NO_2 i SO_2 w powietrzu podczas przemieszczania się chmur. Wyniki potwierdzają, że na zmiany stężeń O_3 wpływają głównie procesy fizyczne w chmurach, a zwłaszcza na początku i końcu epizodu chmurowego. Również w Karkonoszach J. Zwoździak prowadził pomiary H_2O_2 , których wyniki opublikowano w [116]. Zmierzone stężenia H_2O_2 mieściły się w granicach stężeń notowanych

w innych górskich częściach Europy, a najwyższe wartości obserwowano w godzinach nocnych.

Powstające podczas spalania tlenki azotu to tlenek azotu(II) NO i tlenek azotu(IV) (diltlenek azotu) NO₂ i tlenek azotu(I) (tlenek diazotu) N₂O. Ważnym pojęciem jest NO_x, oznaczające sumę NO i NO₂ w przeliczeniu na NO₂. W sumie NO_x największy udział ma tlenek azotu(II), z niewielkim udziałem (5÷10%) diltlenku azotu NO₂ [2, 4, 10, 17, 32, 61, 62, 64, 79, 90].

Tlenki azotu powstają podczas spalania z udziałem skomplikowanych mechanizmów chemicznych. Pierwotnym produktem jest zawsze tlenek azotu(II) NO, a tlenek azotu(IV) NO₂ jest produktem wtórnym. Źródłem azotu do powstawania NO jest N₂ z powietrza oraz związki azotowe zawarte w paliwie. Można więc wyróżnić trzy najważniejsze mechanizmy powstawania NO_x w procesach spalania [4, 32, 36, 61, 62, 64]:

- termiczny,
- szybki (zwany także płomieniowym),
- paliwowy.

Termiczne i szybkie NO_x powstają z azotu z powietrza, natomiast paliwowe NO_x są wynikiem utlenienia związków azotowych w paliwie, najczęściej nazywanych azotem paliwowym. Reakcję powstawania tlenku azotu(II) z tlenu i azotu cząsteczkowego można określić równaniem stechiometrycznym:



Rzeczywisty mechanizm, uwzględniający reakcje elementarne, jest bardziej złożony i wyznaczają go 3. reakcje zaproponowane w 1946 r. przez Y.B. Zeldowicza. Taki mechanizm, zwany obecnie mechanizmem Zeldowicza lub mechanizmem termicznym zakłada, że zerwaniu ulega słabsze wiązanie O₂:

2. Studium literaturowe



gdzie M jest stabilną cząstką dostarczająca energię do zerwania wiązania w O_2 [2, 4, 32, 34]. „Uwolnione” atomy O mogą reagować z N_2 w stosunkowo wolnej reakcji:



a „uwolnione” w tej reakcji atomy N szybko reagują z cząsteczką O_2



Duża energia aktywacji odzwierciedla silną zależność temperaturową procesu powstawania NO zgodnie z tym mechanizmem.

Szybki mechanizm powstawania NO ma miejsce w bogatych płomieniach węglowodorowych, gdzie występują nie tylko rodniki O, H, OH, ale też wiele rodników węglowodorowych (CH , CH_2 , CH_3 i inne). One także mają zdolność reagowania z N_2 , dając w odpowiednich warunkach wkład do wytwarzania tlenków azotu w płomieniu. Fenimore wysunął hipotezę, że reakcje właśnie tych rodników z N_2 są odpowiedzialne za wcześniejsze pojawienie się NO w płomieniu niż wynika to z mechanizmu Zeldowicza. Proponowany przez niego mechanizm powstawania tlenków azotu w strefie reakcji zwykle nazywa się szybkim, lub też płomieniowym [2, 4, 10, 26, 34, 80, 90].

Azot związany chemicznie w paliwie jest głównym źródłem emisji NO_x podczas spalania paliw kopalnych. Stopień przemiany tego azotu w tlenek azotu(II) ściśle zależy od współczynnika nadmiaru powietrza i w mniejszym stopniu od temperatury spalania. Udział NO w ogólnej emisji NO_x zwiększa się ze wzrostem udziału paliwa w mieszaninie palnej.

Analiza mechanizmów powstawania tlenków azotu wskazuje, że udział NO_x w spalinach zależy przede wszystkim od udziału azotu paliwowego w pali-

wie, temperatury spalania i nadmiaru powietrza. W związku z powyższym znaczenie tych czynników staje się zasadnicze przy redukowaniu tlenków azotu NO_x w spalinach tzw. metodami pierwotnymi ograniczenia emisji NO_x [2, 4, 10, 26, 34, 90]. W metodach tych można znacznie ograniczyć emisję NO_x dzięki reorganizacji procesu spalania. Należą do nich:

- obniżenie temperatury spalania:
 - dodanie wody lub pary do powietrza, paliwa lub płomienia,
 - recyrkulacja spalin,
 - zwiększanie zdolności radiacyjnych płomienia,
 - umieszczenie w płomieniu powierzchni ogrzewalnych,
 - zmiana składu palnej mieszanki,
- kontrolowanie nadmiaru powietrza – spalanie stopniowe,
- stopniowanie paliwa – dopalanie.

Wg W. Kordylewskiego, największy udział w całkowitej emisji tlenków azotu mają paliwowe NO_x podczas spalania węgla i w przypadku spalania ciężkich olejów opałowych. Natomiast podczas spalania lekkich olejów i gazu ziemnego, termiczne NO_x [32].

W Zespole Spalania Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej w Gliwicach pod kierunkiem R. Wilka prowadzono badania nad techniką czystego spalania z zastosowaniem technologii HTAC (High Temperature Air Combustion) [105]. Jest to technologia opierająca się na wysokim, wstępnym podgrzaniu powietrza i jego doprowadzeniu do strefy reakcji z dużą prędkością przy zachowaniu znacznej recyrkulacji wewnętrznej (>30%) i opóźnieniu procesu mieszania paliwa z powietrzem. Do tej pory prawie wszystkie komercyjne zastosowania technologii HTAC wykorzystują, jako paliwo głównie gaz ziemny. W pracy [105] autorzy przedstawiają wyniki eksperymentalnych badań spalania oleju opałowego lekkiego oraz biopaliwa przy zastosowaniu technologii HTAC. Przeprowadzone badania eksperymentalne w skali półtechnicznej wykazały znaczne ograniczenie emisji tlenku azotu, przy zachowaniu niskiej emisji tlenku węgla, sadzy

oraz WWA. W zespole R. Wilka opracowano model obliczeń numerycznych powstawania tlenku węgla(II) w technologii spalania oleju opałowego lekkiego przy wysokiej temperaturze powietrza (HTAC). Wcześniejsze przykłady modelowania tego procesu, dosyć dobrze oddawały naturę zjawiska z wykorzystaniem gazu ziemnego, jednakże analiza procesu z użyciem oleju opałowego była jak dotąd niepełna. Przeprowadzone obliczenia i równoczesne eksperymenty na stanowisku, w którego skład wchodziły: ceramiczna komora spalania o mocy 50-100 kW, zasilana olejem opałowym lekkim poprzez palnik z rozpylaczem wirowym oraz podgrzanym powietrzem dostarczany przez elektryczny podgrzewacz, przy użyciu zaazotowanego paliwa wykazały zbliżony poziom i tendencję zmian emisji końcowej NO. Wzrost udziału masowego azotu w paliwie skutkuje zwiększeniem emisji NO, jednakże zauważalny jest równoczesny spadek stopnia konwersji. Przyczynia się do tego fakt, iż tworzenie NO przebiega tym intensywniej im bardziej jego stężenie oddala się od stężenia równowagowego. Duża zawartość azotu w paliwie powoduje, iż stężenie tlenku azotu występujące w płomieniu zbliża się do wartości równowagowych. W konsekwencji, azot zawarty w paliwie coraz intensywniej przekształca się w azot cząsteczkowy w spalinach [105].

W innej pracy [107] R. Wilk i zespół potwierdzają, że istotą technologii HTAC jest podgrzanie powietrza spalania powyżej temperatury zapłonu paliwa, wytworzenie silnych wirów recyrkulacyjnych spalin wewnątrz komory spalania oraz osobne doprowadzenie substratów. W rezultacie silnej turbulencji, w odróżnieniu od tradycyjnych technologii, spalanie przebiega w całej objętości komory spalania przy bardzo wyrównanych profilach stężeń reagentów oraz temperatury. Charakteryzuje się również wysoką sprawnością energetyczną, przy jednocześnie niskiej emisji substancji szkodliwych. Według danych literaturowych emisja NO_x i tlenku węgla(II) jest na poziomie 30 ppm, a oszczędność energii waha się w granicach od 5 do 34% w zależności od stopnia rekuperacji.

W Politechnice Koszalińskiej analizą problemu zanieczyszczenia atmosfery tlenkami azotu zajmuje się A. Szkarowski. Logiczny cykl publikacji poświęcił współczesnemu wizerunkowi teorii powstania tlenków azotu przy spalaniu paliwa

organicznego [79] i nowoczesnym metodom zmniejszenia ich emisji do atmosfery [81]. W pracy [81] A. Szkarowski zdefiniował pojęcie tzw. stref decydującego wpływu (SDW) w płomieniu palącego się paliwa w oparciu o czterostrefową temperaturowo-geometryczną strukturę płomienia. Teoria ta dzieli płomień na cztery następujące strefy:

- strefa A1 – od wylotowej krawędzi otworu palnika do przekroju paleniska o temperaturze 1650K (jest to temperatura przy której według „termicznej” teorii Zeldowicza stężenie NO osiąga 1 mg/m^3),
- strefa A2 – od wymienionego wyżej przekroju do przekroju z maksymalną temperaturą, gdzie intensywność utleniania azotu powietrza osiąga maksimum,
- strefa B – od przekroju z maksymalną temperaturą do przekroju o „krytycznej” temperaturze 1650K, gdzie przeważnie kończy się spalanie składników palnych, a stężenia „powietrznego” NO osiąga maksimum,
- strefa C – od wymienionego wyżej przekroju do wyjścia z paleniska, gdzie już nie zachodzi istotna zmiana koncentracji (pod warunkiem, że w płomieniu nie ma powodujących te zmiany czynników nie związanych z paleniem).

A. Szkarowski określił w płomieniu dwie strefy decydującego wpływu, które odróżniają się udziałem różnych mechanizmów powstania tlenku azotu NO:

- SDW-I – znaczna część strefy A1, oddziaływanie na którą może wywierać istotny wpływ na wytwarzanie się NO głównie według „niecieplnych” dróg mechanizmu łańcuchowego,
- SDW-II – strefa maksymalnych temperatur na styku stref A2 i B, oddziaływanie na którą wyznacza możliwości zdławienia „termicznego” mechanizmu utleniania azotu powietrznego [76].

Temperaturowe warunki i koncentracje komponentów reakcji chemicznych w tych strefach definitywnie wyznaczają intensywność powstawania tlenków azotu (NO_x) i ich końcowe stężenie w spalinach. Dokładne określenie oddziaływania

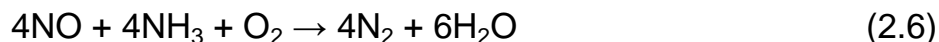
na SDW pozwala prawidłowo konstruować nowe palniki lub polepszać ekologiczne wskaźniki zużycia paliwa w urządzeniach istniejących. Dla uzyskania najlepszych wyników aktywnego oddziaływania na SDW przy spalaniu gazowego paliwa najbardziej nadaje się metoda dozowanego skierowanego balastowania płomienia (DSB). W odróżnieniu od wcześniej stosowanego integralnego balastowania płomienia, dokładnie dozowany i precyzyjnie skierowany wtrysk wodnego balastu w SDW pozwala zmniejszyć emisję NO_x nie pogarszając wskaźników efektywności zużycia paliwa [76].

W odróżnieniu od pierwotnych metod zmniejszania emisji tlenków azotu, metody z wprowadzeniem dodatkowych czynników redukujących do kotła lub metody katalityczne –nieselektywna redukcja katalityczna (*nonselective catalytic reduction* – NCR) oraz selektywna redukcja katalityczna (*selective catalytic reduction* – SCR) nazywa się metodami wtórnymi [2, 4, 31, 62, 64]. W każdej z tych metod chodzi o doprowadzenie do rozbicia wiązań tlenków azotu i uwolnienie wolnego azotu. W procesach NCR jako reduktory mogą być stosowane wodór, tlenek węgla, metan i inne węglowodory. Katalizatorami procesu są tlenki metali przejściowych i naniesione na różne nośniki metale szlachetne, przede wszystkim zaś platyna. W pracy [52] T. Paryjczak wspomina, że zasadniczą wadą omawianych procesów jest to, że oprócz pożądanego produktu redukcji, azotu, powstają również inne, szkodliwe związki azotu, takie jak podtlenek azotu, amoniak i cyjanowodór. Ponadto stosowane w tej metodzie reduktory wykazują powinowactwo z tlenem znacznie większe niż z tlenkami azotu, wobec czego metoda NCR może być stosowana jedynie wtedy, gdy stężenie tlenu w gazach odlotowych jest niskie; konieczny jest także znaczny nadmiar reduktora. Szersze zastosowanie mają metody selektywnej redukcji katalitycznej SCR. Technologie SCR, oparte na wykorzystaniu układów tlenkowych, przede wszystkim V₂O₅/TiO₂ oraz V₂O₅-WO₃/TiO₂, jako katalizatorów (temperatura, w której przebiega proces, wynosi 573÷723K) są obecnie powszechnie stosowane.

Spośród ww. metod najbardziej powszechna jest metoda wprowadzenia amoniaku NH₃ za filtrem pyłowym, co prowadzi do określonego zespołu reakcji

2. Studium literaturowe

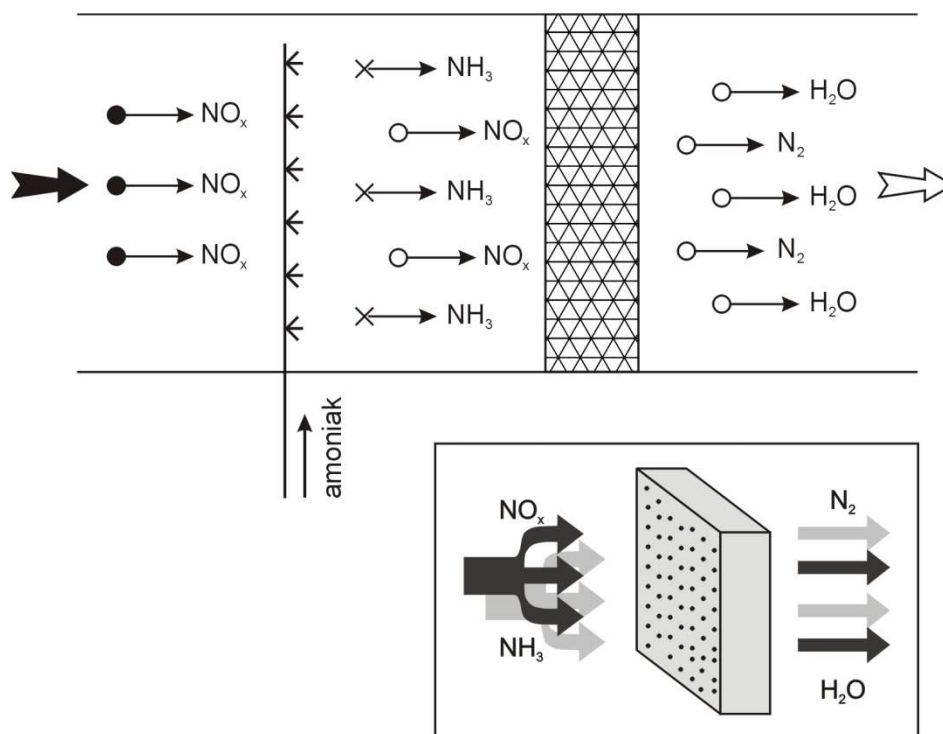
chemicznych, które mogą zachodzić w temperaturze niższej tj. 300÷400°C, o ile zastosujemy katalizatory [31].



Katalizatorami mogą być tlenki wolframu WO_3 , wanadu V_2O_5 oraz tytanu TiO_2 . Oczywiście są to katalizatory bardzo drogie, gdyż w polskich złożach metali kolorowych nie występują rudy wolframu, wanadu, i tytanu jako złoża do gospodarczo uzasadnionej eksploatacji (tylko jako tlenki tych metali towarzyszące rudom miedzi, cynku i ołowiu). Dlatego tego rodzaju katalizatory musimy importować [64].

Katalizatory te są wmontowywane w kolumnę stanowiącą węzeł redukcji tlenków azotu NO_x w instalacji ochrony atmosfery w spalarni. Tych pokładów (przegród umocowanych na określonych poziomach) katalizatorów jest kilka – najczęściej 3 lub 4 [31, 64].

Połączone strumienie amoniaku oraz spalin zawierających NO_x – jak to pokazano za Lorberem pogładowo na schemacie (rysunek 1.1) – przechodzą przez porowate przegrody katalizatorów. Po przejściu przez katalizatory, w wyniku reakcji chemicznych tlenki azotu w spalinach zostają przekształcone w wolny azot N_2 oraz parę wodną H_2O .



Rys. 2.1. Przejście połączonych strug amoniaku i spalin przez przegrodę porowatą katalizatora (wg Lorbera – Austria) [64]

Według Lorbera [64], na instalacjach ochrony atmosfery zarówno w Szwajcarii jak i Austrii redukcja tlenków azotu NO_x z użyciem katalizatorów jest wyższa niż 90%. Redukcja tlenków azotu NO_x bez użycia katalizatorów może zachodzić tylko w temperaturze znacznie wyższej, tj. 850÷1000°C. Wymaga to ponownego podgrzania spalin, które zostały schłodzone, przechodząc po wyjściu z pieca spalarni przez wymienniki ciepła i inne węzły oczyszczania spalin. To oczywiście wymaga pewnych dodatkowych nakładów inwestycyjnych przy budowie węzła redukcji tlenków azotu. Energię cieplną możemy bowiem pobrać do tego węzła bezpośrednio ze spalin wychodzących z pieca spalarni a ściśle z komory dopalania poprzez poprowadzenie tzw. odbojnicy przesyłającej gorące spaliny dla podgrzania wnętrza pojemnika, w którym następuje redukcja tlenków azotu [64].

Znacznie tańszą metodą od metod katalitycznych jest proces polegający na utlenianiu części zawartego w spalinach NO do NO₂, N₂O₃ i usuwaniu powstałych tlenków azotu w mokrych, półsuchych i suchych instalacjach odsiarcz-

nia spalin zaproponowany przez M.A. Gostomczyka i W. Kordylewskiego przedstawiony w pracy [17]. Proces utleniania następuje w wyniku iniekcji gazowych lub ciekłych utleniaczy do spalin przed absorberem. Autorzy sprawdzili, że w temperaturze mniejszej od 170°C stosowane utleniacze praktycznie nie utleniają S(O)₂. Z kolei wytworzone wyższe tlenki azotu, takie jak: NO₂, N₂O₃, po obniżeniu temperatury spalin poniżej 72°C tworzą krople HNO₃. Łatwość utleniania NO w powietrzu przekłada się na znacznie efektywniejszy proces przy zastosowaniu aktywnych utleniaczy, takich jak: O₃, H₂O₂. Produkty utleniania NO zostaną, zaabsorbowane w mokrych i półsuchych instalacjach odsiarczania spalin, w których temperatura procesu w skrubkach jest równa 50÷70°C. Wprowadzenie do spalin wody utlenionej zainicjuje reakcję utleniania NO, która przebiega wg równania:



Wg autorów zaproponowanej instalacji, za technologią usuwania NO_x ze spalin drogą utleniania NO_x przemawia utrzymanie stężenia NO_x w spalinach oczyszczonych na dowolnie niskim poziomie poprzez sterowanie iniekcją wody utlenionej lub ozonu do spalin przed instalacją oczyszczania spalin. A także proporcjonalność kosztów eksploatacyjnych układu iniekcji wody utlenionej lub ozonu do stężenia NO_x (NO) w spalinach oraz ich spadek wraz z obniżeniem stężenia NO w spalinach metodami pierwotnymi (np. 80% kosztów eksploatacyjnych to koszt wody utlenionej) [17].

W pracach [51÷54] T. Paryjczaka bardzo dużo miejsca zajmuje problematyka likwidowania skutków degradacji środowiska i jej zapobieganie poprzez katalityczne spalanie paliw w turbinach gazowych. T. Paryjczak uważa, że zasadniczą cechą różniącą spalanie katalityczne paliw, przede wszystkim gazowych, od innych zastosowań katalizy w ochronie środowiska, jest to, że spalanie katalityczne zapobiega emisji szkodliwych substancji, głównie NO_x. Można więc w tym

wypadku mówić o likwidacji przyczyn zanieczyszczania atmosfery, a nie jego skutków. Zastosowanie katalizatora umożliwi obniżenie temperatury spalania do wartości poniżej 1773K, a więc do temperatury, w której reakcja tworzenia NO_x jest zminimalizowana. Podstawowym problemem, pozostającym do rozwiązania przy projektowaniu układów katalizatorów do spalania katalitycznego, jest konieczność uzyskania katalizatora o dużej odporności termicznej. Głównym składnikiem paliw stosowanych w turbinach gazowych jest metan, który ze względu na trwałość cząsteczki bardzo trudno utlenia się, nawet w obecności katalizatorów. Z tego powodu potencjalne katalizatory muszą charakteryzować się zdolnością do krótkotrwałego znoszenia temperatury sięgającej nawet 1573÷1673K. Materiały kordierytowe stosowane jako nośniki monolityczne katalizatorów topią się w temperaturze około 1573 K, tak więc nie mogą być wykorzystywane. Jak pisze T. Paryczak rozwiązaniem jest proces kontrolowany w taki sposób, aby nie dopuścić do wzrostu temperatury powyżej 1273 K. W tym celu stosuje się tzw. spalanie hybrydowe, polegające na stopniowym dozowaniu paliwa. Inne rozwiązanie polega na konstruowaniu monolitów metalowych zawierających tzw. bierne kanały [52]. Reakcja przebiega w kanałach, których ścianki są pokryte katalizatorem, a część ciepła wydzielanego w czasie reakcji zostaje przeniesiona przez ścianki metalu do kanałów biernych (nie zawierających katalizatora) pełniących funkcję wymienników ciepła. Stwierdzono, że najaktywniejszy w procesie wysokotemperaturowego spalania metanu przy jednocześnie stosunkowo niskiej temperaturze zapłonu katalizatora jest PdO.

2.3.2. Tlenki siarki

Siarka występuje zwykle w paliwie pod postacią różnych związków zanieczyszczających [26, 31, 92÷94]. Np. w węglu siarka występuje głównie w trzech związkach, a mianowicie w pirycie (FeS₂), w związkach organicznych i w nieznacznych ilościach w siarczanach (CaSO₄, FeSO₄, NaSO₄). Siarka organiczna pochodzi z siarki zawartej w roślinach i jest równomiernie rozmieszczona w węglu. Tlenki siarki występują w spalinach prawie wyłącznie w postaci dwu gazów:

SO₂ i SO₃. W procesie spalania z nadmiarem powietrza siarka ulega utlenieniu do dwutlenku siarki SO₂, i tylko ilość 1÷3% SO₂ podlega dalszemu utlenieniu do SO₃. Siarka ulega całkowitemu utlenieniu i dlatego można z góry przewidzieć całkowitą ilość emisji SO_x. Dytlenek siarki w atmosferze utlenia się do SO₃ i poprzez wiązanie się z wodą w kwas siarkowy(VI) powoduje kwaśne deszcze [26]. W pracy [114] zostały opublikowane przez J. Zwoździaka wyniki rocznego monitoringu stężeń ditlenku siarki w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych na terenie tzw. Worka Żytawskiego (zwanego też turoszowskim). Wyniki tych badań pozwoliły na oszacowanie wartości, określającej maksymalne dopuszczalne stężenie 30-minutowe. Natomiast w [112] J. Zwoździak zaprezentował wyniki pomiarów stężeń podstawowych zanieczyszczeń atmosfery, w tym SO₂ i NO₂, z dwóch stacji monitoringu atmosfery, tj. Czerniawy i Cieplic z okresu 1996÷2008. Pomimo zmniejszenia emisji zanieczyszczeń w regionie w ciągu ostatniego dziesięciolecia, zaobserwowano fakt, że obszary miejskie wciąż poddane są oddziaływaniu nagłych wzrostów stężeń wielu substancji w powietrzu. Pojawianie się inwersji temperatury i zmiany w wysokości warstwy mieszania są zbieżne z najwyższymi stężeniami zanieczyszczeń rejestrowanymi w Cieplicach i głównie te czynniki wydają się być odpowiedzialne za dużą zmienność koncentracji substancji pochodzenia motoryzacyjnego i z procesów spalania paliw stałych. Powietrze w Czerniawie okresowo jest poddawane oddziaływaniu źródeł regionalnych, kiedy rejestrowano wyraźne krótkotrwałe wzrosty stężeń SO₂ w powietrzu [112].

Atmosferę można chronić przed nadmierną emisją dwutlenku siarki zasadniczo w dwojaki sposób [31, 32]:

- przez tzw. odsiarczanie paliwa konwencjonalnego np. węgla,
- przez proces wiązania SO₂ występującego w spalinach metodą chemiczną.

Stosunkowo najłatwiej jest usunąć siarkę z gazu ziemnego (siarkowodór) i produktów naftowych, istnieją bowiem sprawdzone metody zapewniające skuteczność ponad 99% odsiarczania [32, 92].

Znacznie trudniej jest usunąć siarkę paliwową z węgla. Istnieją mechaniczne, chemiczne oraz biologiczne metody odsiarczania węgla. W mechanicznych metodach usuwania siarki z węgla korzysta się z dużej różnicy gęstości pirytu i substancji organicznej węgla. W krajowym górnictwie węgla kamiennego rozpowszechniła się technologia wzbogacania węgla, w której grawitacyjnie odziera się substancję mineralną od węgla [32]. Tym sposobem usuwa się 30÷50% siarki pirytowej z węgla, ale nie można usunąć siarki organicznej, która może być usunięta z węgla dopiero metodami chemicznymi i biologicznymi.

Wg W. Blaschke, odsiarczanie spalin jest najbardziej kosztowne, stanowi ponad 66% kosztu inwestycji, mających na celu zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin [7]. W elektrowniach i elektrociepłowniach nieposiadających dotychczas odpowiednich instalacji problem redukcji emisji tlenków siarki, ze względu na wysokie koszty budowy tych instalacji, będzie musiał być rozwiązany poprzez spalanie węgla niskosiarkowego; pozostaje więc problem odsiarczania węgla energetycznego. Piryt jako forma występowania siarki w węglu jest minerałem kruchym. Ulega w procesie urabiania i transportu kruszeniu stąd największą jego koncentrację obserwuje się w ziarnach drobnych. Tak więc w przypadku przemysłu węglowego problem odsiarczania węgla sprowadza się do odsiarczania miazgi. Problem odsiarczania grubych sorbentów dotyczy tylko kopalń o podwyższonej zawartości siarki [7].

Stosowane w warunkach przemysłowych sposoby odsiarczania węgla opierają się na wzbogacaniu grawitacyjnym. Jeśli siarka jest związana głównie ze skałą płonną, to wg W. Blaschke i Z. Blaschke, można razem z nią odprowadzić około 60% siarki całkowitej, w tym przypadku odsiarczanie odbywa się równocześnie ze wzbogacaniem węgla. Jeżeli siarka związana jest głównie z masą węglową, z odpadami odprowadza się około 5% siarki. Aby taki węgiel odsiarczyć należy koncentrat skruszyć do uziarnienia, przy którym jest rozluźniony piryt i skruszony materiał poddać procesom odsiarczania. Jeżeli węgiel odznacza się podwyższoną zawartością siarki, to w procesie trójproduktowego wzbogacania można uzyskać koncentraty o zawartości popiołu poniżej 10% i około 0,9%

siarki całkowitej. Produkt pośredni należy rozkruszyć i ponownie wzbogacić. W takim procesie około 70% siarki zostaje odprowadzone z odpadami [8].

Podczas wzbogacania grawitacyjnego nie ma możliwości całkowitego usunięcia siarki z węgla. Z tego powodu prowadzi się badania nad innymi metodami odsiarczania węgla:

- proces chemicznego usuwania siarki polegający na ługowaniu jej z węgla w środowisku kwaśnym lub zasadowym przy podwyższonej temperaturze a często także pod ciśnieniem,
- metody termiczne – powolna piroliza węgla w temperaturze 400÷1000°C pod wpływem, której następuje redukcja pirytu oraz uwolnienie siarki z połączeń organicznych,
- separacja magnetyczna – metoda mało efektywna ze względu na niską podatność magnetyczną pirytu.

Jak podaje W. Blaschke, ze względu na zbyt wysokie koszty, żadna z opracowanych metod nie znalazła przemysłowego zastosowania [8].

W 2000 roku Z. Blaschke przedstawiła wyniki badań nad zastosowaniem techniki wzbogacania grawitacyjnego, przy użyciu wzbogacalników strumieniowych zwojowych (spiral) w procesie odsiarczania mułów węglowych [8]. Zastosowanie wzbogacalników zwojowych pozwala na skuteczne wydzielanie pirytu oraz kamienia z drobnych klas ziarnowych. Z nadawy o zawartości popiołu 29,36% A^a i siarki całkowitej 0,94% S_t^a uzyskano koncentrat o zawartości popiołu 9,95% A^a i siarki 0,64% S_t^a oraz odpady o zawartości 75% A^a i 1,80% S_t^a . Zawartość siarki zmniejszyła się również w produkcie pośrednim, co świadczy o bardzo dużej skuteczności odsiarczania węgla na spiralach. Z. Blaschke uważa, że na nowoczesnych wzbogacalnikach (spiralach) można uzyskać dużą dokładność rozdziału wówczas, gdy są dotrzymane warunki prowadzenia procesu tj. stałe natężenie przepływu i uśredniona nadawa (zagęszczenie, skład ziarnowy, skład densymetryczny).

Odsiarczanie spalin czyli proces wiązania tlenu siarki(IV) może być prowadzony trzema metodami [1, 2, 64]:

- metodą suchą,
- metodą półsuchą,
- metodą moką.

Metoda sucha polega na przeciwprądowym rozpyleniu proszku kalcytu CaCO_3 i dolomitu $\text{CaCO}_2\text{MgCO}_3$ w strumień zasiarczonych gazów spalinowych. Oczywiście SO_2 wchodzi w reakcję z węglanami tworząc częściowo (głównie na ich powierzchni) gips CaSO_4 .

Zaletą rozwiązania jest stosunkowo niski koszt inwestycyjny takiego przedsięwzięcia a powstały gips CaSO_4 ma dobre własności wiążące w aspekcie tworzenia zapraw murarskich.

Natomiast wadą metody suchej jest niska sprawność oczyszczania, która waha się w granicach 20÷60%. W tej metodzie konieczne jest użycie kalcytu oraz dolomitu jako sorbentów w nadmiarze a to oznacza, iż relatywnie do efektów odsiarczania (stosunkowo niskich) powstaje znaczna ilość gipsu CaSO_4 .

Metoda półsucha polega na przeciwprądowym rozpyleniu zawiesiny wodorotlenku wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$. W wyniku spotkania gorących spalin z wodorotlenkiem wapnia powstaje suchy gips, który wypada z instalacji w postaci proszku. Do zalet tej metody należy fakt, że powstały jako wtórny odpad gips jest suchy a koszty inwestycyjne takiej instalacji są niższe niż w odniesieniu do kolejnej metody, tzw. mokrej. Natomiast do wad metody półsuchej należy zaliczyć używanie sorbentu czyli tu wodorotlenku wapnia w nadmiarze a ponadto wodorotlenek wapnia jest odczynnikiem droższym niż naturalny proszek kalcytu i dolomitu stosowany w metodzie suchej. Równocześnie powstały gips w metodzie półsuchej jest bardziej niejednorodny, bowiem powstają też siarczany metali, co zmniejsza jego wartość użytkową w zastosowaniu do mieszanek betonowych [64, 92, 93].

Najlepszą metodą jakościowego wiązania dwutlenku siarki występującego w spalinach jest trzecia z wymienionych metod tzn. metoda mokra. Metoda mo-

kra polega na przepuszczaniu strugi spalin przez roztwór wodorotlenku wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$. W wyniku takiego zadziałania wytraca się gips, niestety w formie zawiesiny – a taka zawiesina jest trudno transportowalna i łatwo zatyka przewody, zakleja zawory i zasuwy a więc stwarza poważne kłopoty eksploatacyjne. Największą natomiast zaletą tej metody jest bardzo wysoka sprawność uławiania dwutlenku siarki ze spalin przekraczająca 99%, co wynika z naturalnej pełnej stechiometrii tej metody. Stechiometryczne zużycie wodorotlenku wapnia do reakcji z dwutlenkiem siarki daje relatywnie, w stosunku do dwóch poprzednich metod, minimalną ilość powstałego gipsu odpadowego [36, 64, 92, 93].

Kontakt gazów odlotowych zawierających zanieczyszczenia gazowe i pyłowe z cieczą zachodzi w aparatach zwanych płuczkami (odpylanie gazów) lub absorberami (absorpcja składników gazowych). Zarówno płuczki, jak i absorbery zwykle nazywa się skrubkami. Różnią się one rozwiązaniami konstrukcyjnymi i sposobem rozwijania powierzchni kontaktu międzyfazowego gaz-ciecz.

Spośród skrubków wieloma cechami wyróżniają się aparaty natryskowe. Ich zastosowanie w technologiach oczyszczania gazów odlotowych jest bardzo wszechstronne. Stosuje się je między innymi w procesach [16, 36, 92]:

- odpylania gazów,
- absorpcji szkodliwych dla środowiska naturalnego składników gazów odlotowych,
- wstępnego schładzania i nawilżania gazów odlotowych przed ich oczyszczaniem.

Stosowane w instalacjach skrubki natryskowe to przede wszystkim aparaty pionowe o przeciwnieprądowym lub współprądowym przepływie faz. Rzadziej, ze względu na ograniczenia wynikające z braku odpowiedniej powierzchni pod zabudowę, stosuje się poziome skrubki natryskowe. Właśnie przy użyciu tego typu absorberów, w roku 2005, M. Głomba opublikował wyniki badań nad kinetyką wnikania masy w fazie gazowej w procesie odsiarczania gazów spalinowych w roztworze NaOH. Badania wykonano w warunkach przeciwnieprądowego

i współprądowego przepływu gazu w skruberze względem kierunku rozpylania cieczy. Z prowadzonych badań wynika, między innymi, że skuteczność usuwania SO_2 z fazy gazowej w roztworze NaOH , o $\text{pH} > 11$, a tym samym i szybkość absorpcji, są stałe i nie zależą od stosowanego w badanym zakresie stężenia SO_2 na wlocie do skrubera. M. Głomba określił także, że skuteczność usuwania SO_2 jest tym większa, im mniejsza jest prędkość przepływu fazy gazowej i większa gęstość zraszania. Dodatkowo, badania absorpcji SO_2 wykazały, że w poziomych współprądowych, i przeciwprądowych skruberach natryskowych, przy odpowiednio dobranej prędkości fazy gazowej, gęstości zraszania i stopnia rozpylenia oraz stężenia roztworu NaOH , proces odsiarczania można prowadzić z dużą, nawet ponad 90% skutecznością a wartości objętościowego współczynnika wnikania masy i współczynnika wnikania masy odniesionego do jednostki powierzchni międzyfazowej podczas absorpcji zwiększają się wraz z prędkością fazy gazowej i gęstością zraszania [16].

Do metod bezodpadowych odsiarczania należą metody adsorpcyjne, w których tlenek siarki(IV) jest adsorbowane na powierzchni ciała stałego, głównie na węglach aktywnych. Technologia oczyszczania gazów spalinowych przy użyciu sorbentów węglowych jest stosunkowo prosta. Oczyszczany gaz przepływa przez złożę sorbentu a cały proces adsorpcji ditlenku siarki, tlenu i pary wodnej zachodzi na powierzchni sorbentu z równoczesnym utworzeniem kwasu siarkowego, który gromadzi się w porach sorbentu.

Oczyszczanie gazów spalinowych za pomocą sorbentów węglowych posiada w stosunku do mokrych metod oczyszczania gazów odlotowych wiele istotnych zalet [31, 93]:

- proces prowadzony jest w stosunkowo wysokiej temperaturze (powyżej 100°C), dzięki czemu nie jest konieczne schładzanie olbrzymich ilości gazów spalinowych oraz podgrzewanie gazów już oczyszczonych,

- jest to metoda praktycznie bezodpadowa; otrzymany z regeneracji ditlenek siarki może być użyty jako surowiec do produkcji kwasu siarkowego lub siarki elementarnej, stanowiących produkty handlowe,
- w jednym procesie usuwane są zarówno ditlenek siarki jak i tlenki azotu, a wskaźniki oczyszczenia gazu są bardzo wysokie – tlenek siarki(IV) usuwany jest prawie całkowicie, zaś tlenki azotu w ponad 60%,
- podczas prowadzenia procesu nie występuje zarastanie i zatykanie instalacji przez osady produktów odsiarczania podczas jej pracy, co stanowi istotny problem metod mokrych,
- do konstrukcji instalacji można użyć zwykłej stali z uwagi na brak środowiska korozyjnego.

Adsorpcyjne oczyszczanie może być również procesem realizowanym równocześnie z procesem suszenia odpadów i odpylania gazów spalinowych. Przykładem tego jest metoda opracowana w zespole J. Hehlmanna, zajmującym się m.in. problematyką odsiarczania gazów spalinowych [19, 20, 22÷24]. W metodzie tej wykorzystuje się ciepło spalin do suszenia specjalnie preparowanego złoża, które oczyszcza spaliny z pyłów i składników gazowych, a następnie podlega współspalaniu z odpadami, przyczyniając się do podwyższenia ich wartości opałowej oraz stabilizacji procesu spalania [23]. Zasadniczym elementem instalacji spalania odpadów jest aparat z przesuwym złożeń, który jest zlokalizowany bezpośrednio za kotłem, zastępując filtr tkaninowy. Aparatu ten zaprojektowano jako urządzenie hybrydowe, realizujące równocześnie proces suszenia odpadów, odpylania gazów spalinowych jak i ich częściowego adsorpcyjnego oczyszczania. Sorbent, w postaci mączki kamienia wapiennego oraz paliwo dodatkowe – alternatywnie biopaliwo, jest dozowane do strumienia rozdrobnionych odpadów kierowanych do dwóch stref filtracyjnych aparatu. Jak pisze J. Hehlmann, ustalenie właściwej proporcji strumienia odpadów surowych i recyrkulowanych, pozwala na poprawę sprawności energetycznej kotła oraz poprawę relacji ekonomiczno–ekologicznych instalacji oczyszczania spalin [23].

2.3.3. Tlenek węgla(II)

Tlenek węgla(II) CO jest produktem pośrednim spalania wszystkich paliw i zwykle występuje w spalinach powstałych ze spalania tych paliw [26, 34].

Węgiel C, jako pierwiastek zawarty w paliwie spalając się, przechodzi przez stadium tlenku węgla CO. Tak więc, jak pisze J. Jarosiński [26], wysiłki mające na celu zmniejszenie zawartości tlenku węgla w spalinach zacierają raczej do przyspieszenia jego utlenienia do obojętnego toksycznie tlenku węgla(IV) CO₂, niż zapobieganie jego tworzeniu się w procesie spalania. Tlenek węgla(II) powstaje w dużych ilościach w tych miejscach obszaru spalania, w których występuje niedobór tlenu niezbędny do dokończenia reakcji utleniania węgla do CO₂. Tlenek węgla(II) może pojawić się również w zwiększonych ilościach w miejscach obszaru spalania, w których lokalny skład mieszanki jest bliski stechiometrycznemu, a odpowiadająca mu temperatura spalania bliska maksymalnej. W miejscach tych CO powstaje wskutek dysocjacji CO₂ [26].

Podstawowymi reakcjami przy wysokotemperaturowym utlenianiu węgla są reakcje:



Reakcje te przyjęto się nazywać reakcjami pierwotnymi [34]. Równocześnie z nimi w pobliżu powierzchni spalanego węgla w obszarze nadmiaru tlenu zachodzi dopalanie tlenku węgla(II):



a na samej powierzchni redukcja wytworzonego ditlenku węgla, zgodnie ze schematem:



Całkowite i zupełne spalanie paliwa jest możliwe tylko wówczas, gdy do strefy spalania dostarczone zostanie powietrze (tlen) w ilości większej niż teoretycznie potrzebnej (stechiometrycznej). Jak pisze A. Szkarowski, w końcowej fazie spalania cząsteczki paliwa i tlenu będą na tyle rozdzielone poprzez masę powstałych już produktów spalania, że nie potrafią spotkać się i zareagować chemicznie, mimo że ogólna ich ilość odpowiada równaniom stechiometrycznym. Powstałe zjawisko niezupełnego spalania A. Szkarowski nazywa niedopałem chemicznym [77]. Całkowity brak produktów niedopału chemicznego w spalinach bynajmniej nie świadczy o wysokiej sprawności i ekologiczności spalania paliwa w agregatach kotłowych. A. Szkarowski uważa, że nieprawidłowe jest opinia mówiąca o tym, że minimalny niedopał odpowiada maksymalnej sprawności zużycia paliwa w kotłach. W swoich badaniach opublikowanych w 2009 roku [78], wykazał, że maksimum sprawności, jak również minimalną toksyczność spalin w większości przypadków w praktyce nastawiania kotłów notuje się przy stężeniu CO w spalinach na poziomie 200÷400 mg/m³. Zaś zbliżenie się ku strefie z zupełnym spalaniem skutkuje zauważalnym obniżeniem sprawności kotła i istotnym pogorszeniem ekologicznych wskaźników spalania – tlenki azotu, które powstają w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku niedopału, są substancjami dużo bardziej toksycznymi niż tlenek węgla(II). Już w roku 2003 A. Szkarowski sformułował opinię, że największy efekt stosowania metody regulowanego resztkowego niedopału chemicznego osiągnąć przy bieżącej analizie gazowej przy wykorzystaniu mikroprocesorowych systemów sterowania jakością spalania paliwa. W tym przypadku nie ma potrzeby stosowania pojęcia „krytycznego” stężenia CO czy „asekuracyjnego” zapasu nadmiaru powietrza. Układy tego typu w sposób ciągły utrzymują tryb spalania i całej pracy kotła w strefie maksymalnie bliskiej optimum, które korygowane jest w zależności od kaloryczności paliwa, stanu technicznego kotła, warunków klimatycznych i innych czynników wpływu.

2.4. Współspalanie osadów ściekowych

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. Nr 112, poz. 1206), ustabilizowane komunalne osady ściekowe zakwalifikowano pod oznaczeniem kodowym 19 08 05, jako odpady inne niż niebezpieczne a proces współspalania osadów ściekowych z węglem kamiennym jest procesem przekształcania termicznego odpadów, natomiast instalacja przemysłowa, w której proces ten zachodzi jest instalacją współspalania odpadów.

Zagospodarowanie osadów ściekowych jest aktualnie jednym z najpoważniejszych problemów ekologicznych w Polsce. W pracy [106] autorzy określili zwięzły przegląd termicznych metod utylizacji osadów. Wyróżnili 3. główne sposoby termicznej przeróbki osadów ściekowych: spalanie, współspalanie i procesy alternatywne, takie jak piroliza i zgazowanie (lub hybrydy tych procesów). Ilość wytwarzanych w kraju komunalnych osadów ściekowych w roku 2006 przekroczyła 500 tys. Mg s.m. [98]. Ze względu na swoją charakterystykę fizykochemiczną, osady ściekowe mogą służyć jako paliwo do odzysku energii w różnych instalacjach termicznych. Ze względu na brak instalacji termicznego przekształcania osadów ściekowych, współspalanie osadów w istniejących instalacjach energetycznych jest obecnie jedyną szansą na istotne zwiększenie udziału termicznych metod wśród innych metod zagospodarowania tych odpadów stosowanych w Polsce.

W materiałach XV Konferencji „Osady ściekowe, biomasa – czy tylko” w 2008 roku zostały przedstawione przez S. Stelmacha z Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze [98] krytyczne analizy regulacji prawnych obowiązujących dla procesu współspalania komunalnych osadów ściekowych z węglem w instalacjach energetycznych w Polsce. Autor wymienia podstawowe przepisy rangi ustawowej a także rozporządzenia wykonawcze, odnoszące się do przedmiotowego zagadnienia współspalania osadów ściekowych w instalacjach energetycznych. Z przepisów tych wynika, że prowadzenie współspalania wysuszo-

nych, ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych o kodzie 19 08 05, nawet w ilości tylko do 1% masowego udziału w paliwie powoduje, że zakład podejmujący współspalanie jest traktowany jako współspalarnia odpadów innych niż niebezpieczne. Jest to istotna zmiana dotychczasowego statusu instalacji energetycznej. Zwraca na to uwagę również T. Piecuch wraz zespołem w [59] nad możliwością współspalania osadami ściekowymi i odpadami poliestrowymi wraz z miałem węglowym. Jeśli chodzi o wymagania techniczne współspalania w instalacjach energetycznych, ze względu na to, że zawartość chloru w komunalnych osadach ściekowych jest niższa niż 1%, współspalania osadów ściekowych nie dotyczy warunek utrzymania spalin w temperaturze $>1100^{\circ}\text{C}$ przez co najmniej 2 s, a tylko na poziomie nie niższym niż 850°C (współspalanie osadów ściekowych musi być prowadzone zgodnie z wymaganiami rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002 roku w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów (Dz. U. Nr 37, poz. 339 z późn. zm.)). Najistotniejszą rolę, z punktu widzenia podmiotów prowadzących instalacje współspalania odpadów, odgrywa Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 roku w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. Nr 260, poz. 2181). W rozporządzeniu tym, w rozdziale 2, §16 ustęp 3 zapisano, że jeżeli w instalacji wraz z paliwami spalane są odpady inne niż niebezpieczne w ilości nie większej niż 1% masy tych paliw, to do instalacji tej nie stosuje się przepisów dotyczących niniejszego rozdziału. Oznacza to w praktyce możliwość stosowania dla takich instalacji dotychczas stosowanych standardów emisyjnych dla paliw, jakie w niej spalano. Przepis ten jednak nie ma swojego odpowiednika w Dyrektywie 2000/76/EC i może z tego powodu zostać w przyszłości odrzucony ze względu na konieczność unifikacji przepisów krajów członkowskich UE [1, 2].

Pierwsze w kraju przemysłowe testy współspalania wysuszonych komunalnych osadów ściekowych z węglem kamiennym przeprowadzono w Elektrociepłowni Wybrzeże w Gdańsku przy udziale Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze [74]. W kotle pyłowym OP-230 podczas kilkudniowych badań

2. Studium literaturowe

spalono około 25 Mg osadów ściekowych, pochodzących z Oczyszczalni Ścieków „Gdańsk-Wschód”, wysuszonych do poziomu zawartości wilgoci poniżej 10%. Testy energetyczno-emisyjne przeprowadzono porównawczo dla spalania węgla oraz mieszanki paliwowej zawierającej około 1% m/m wysuszonych osadów ściekowych, przy zbliżonych obciążeniach kotła.

Podczas badań nie stwierdzono zasadniczych problemów technicznych w pracy układu dozowania osadów oraz kotła. Minimalny poziom temperatury gazów spalinowych, wynoszący 850°C, był dotrzymany z dużym nadmiarem w całym rozpatrywanym obszarze komory spalania. Jednocześnie jednak średnie wartości czasów przebywania spalin w strefie po ostatnim doprowadzeniu powietrza nie spełniały wymaganego legislacyjnie warunku (minimum 2 s). Uzyskane wartości były praktycznie o połowę mniejsze i wynikały ze zbyt krótkiego odcinka drogi przepływu spalin.

Badany kocioł spełniał aktualne standardy emisyjne dla wszystkich zanieczyszczeń objętych decyzją o dopuszczalnej emisji, zarówno przy spalaniu węgla, jak i przy jednoprocentowym udziale osadów ściekowych w paliwie (tabela 2.1). Spadek sprawności kotła podczas współspalania osadów ściekowych był przy tym praktycznie niezauważalny.

Tabela 2.1. Wyniki testów emisyjnych współspalania osadów ściekowych w kotle pyłowym OP-230 EC Wybrzeże w Gdańsku [74]

	Wartości emisji zanieczyszczeń, mg/m ³ _n	
	0% osadów ściekowych	1% osadów ściekowych
NO _x	476,7	471,8
SO ₂	1305,5	1144,6
CO	14,9	13,6

W pracy [47] U. Miller stwierdziła, że doświadczenia zdobyte ze współspalania biomasy z węglem kamiennym mogą być wykorzystane przy ewentualnym zastosowaniu współspalania z miałem węglowym paliw alternatywnych wytworzonych z odpadów, takich jak tworzywa sztuczne, guma, wysegregowane odpa-

dy komunalne. Badania ze współspalania biomasy z miałem węglowym przeprowadziła w IV kwartale 2007 roku przy użyciu kotła WR-10 na ciepłowni DPM w Koszalinie. Do transportu biomasy do zasobnika kotła wykorzystywano ten sam taśmociąg, którym dostarczany był miał węgla kamiennego. Zasobnik kotła został powiększony i podzielony na dwie części. Do jednej części dostarczana była biomasa do drugiej miał węgla kamiennego. Zastosowano kosz węglowy dwubębnowy umożliwiający podawanie oddzielnie obu paliw z możliwością ustawienia grubości warstwy każdego z paliw. Ze względu na zmierzone parametry technologiczne, miał węglowy określono jako paliwo optymalne dla kotłów rusztowych. Natomiast duża zawartość wilgoci zarówno zrębów drzewnych, jak również wierzby energetycznej stanowił kłopot eksploatacyjny. Ze względu na znikomą ilość siarki w biomasie jej stosowanie obniża zawartość SO_2 w spalinach. Negatywem tej technologii jest wyraźne obniżenie wartości opałowej mieszanki. Biorąc pod uwagę, że kotły projektowane są pod konkretne wartości opałowe stosowanych w nich paliw, ważnym parametrem przy współspalaniu jest wartość opałowa spalanego w nim miału.

W 1997 roku w Instytucie Inżynierii Wody i Ścieków Politechniki Śląskiej w Gliwicach wspólnie z Instytutem Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze wykonano pracę badawczą nad możliwością utylizacji osadów z miejskiej oczyszczalni ścieków przez współspalanie z miałem węglowym w elektrociepłowni [15]. Zakres badań obejmował:

- określenie techniczno-technologicznych warunków suszenia osadu,
- ocenę właściwości energetycznych osadów wysuszonych,
- badania emisji spalin ze spalania osadów i samego miału węglowego,
- badania emisji spalin i ciepła spalania mieszaniny osadowo-węglowej, dla ustalenia proporcji wagowych mieszaniny,
- określenie zmian wpływu oddziaływania na środowisko elektrociepłowni przy spalaniu mieszaniny osadowo-węglowej [15].

Próby spalania prowadzono w instalacji ułamkowo-technicznej symulującej spalanie w kotłach z rusztem mechanicznym. Wsad do kotła wynosił 200 kg mieszaniny osadu i miazła węglowego. W celu określenia emisji zanieczyszczeń gazowych do powietrza dokonywano pomiarów składu CO, SO₂, NO w spalinach.

Z bilansu suchej masy osadu i zapotrzebowaniu elektrociepłowni na węgiel wynikało, że maksymalny udział suchej masy osadu w mieszaninie nie przekroczy 5%.

Podsuszenie osadu do stężenia suchej masy 50% oraz uzyskanie struktury granulatu, ułatwia dozowanie i mieszanie osadu z miazłem węglowym, nie zachodzi natomiast konieczność suszenia osadu do uzyskania 90% koncentracji suchej masy.

Przeprowadzona analiza właściwości paliw miazła i mieszaniny miazłowo-osadowej (przy 5% udziale osadu) nie wykazała istotnych różnic jakości paliw. Przykładowo wartość opałowa samego miazła o wilgotności 10,7% wynosiła 22,07 MJ/kg, osadu o wilgotności 46,3% – 12,87 MJ/kg, a mieszaniny o wilgotności 12,9% – 21,67 MJ/kg. Zwiększyły się w mieszaninie zawartości siarki i azotu [15].

Analiza spalin [15] wykazała, że ze wszystkich wskaźników emisji najbardziej znaczące zmiany, w stosunku do wartości uzyskanych przy spalaniu samego miazła, wystąpiły dla tlenków siarki (wzrost o 20%) i tlenków azotu (wzrost o 50%). Autorzy stwierdzili, że zaobserwowany wzrost emisji SO_x i NO_x oraz pyłów nie stanowią zagrożenia w warunkach eksploatacyjnych pełnej skali technicznej. Lepsze warunki spalania oraz instalacje odpylania i odsiarczania gazów odlotowych wpłyną na znaczne ograniczenie rzeczywistej emisji tych zanieczyszczeń do środowiska.

2.5. Inne aspekty procesu spalania

Problematyką termicznej utylizacji odpadów procesie klasycznego spalania zaczął zajmować się już pod koniec lat 70. ubiegłego wieku w Politechnice Śląskiej J. Wandrasz wraz z zespołem. W tej problematyce opublikował około 200 artykułów i referatów w materiałach konferencyjnych, a podsumowaniem jego

własnych badań jest książka pt. „Paliwa formowane” [90]. W pracy tej przedstawiono proces tworzenia paliwa formowanego, które opiera się na mieszaniu różnych kompozytów w proporcjach gwarantujących uzyskanie założonego efektu, a także poddawaniu ich działaniu różnych czynników prowadzących do przekształcenia struktury w odpowiednią formę wymaganą przez odbiorcę. Autor uważa, że można założyć i uzyskać określoną i gwarantowaną wartość opałową, dysponując kilkoma składnikami o określonej wartości opałowej każdego z nich i podobnie dobierając skład chemiczny oraz zawartość substancji toksycznych i niebezpiecznych uzyskać produkt spełniający wymagania emisyjne, a nawet dobrać takie warunki procesu spalania, które gwarantują niskoemisyjność jego przebiegu. Każde paliwo powinno być przeznaczone dla określonego typu paleniska, posiadać odpowiednią nazwę nadawaną przez producenta i potwierdzone w wyniku badań właściwości. Paliwo formowane nie jest i nie może być klasyfikowane jako odpad, gdyż nie odpowiada wymogom prawa. Fakt posiadania przez substancję właściwości palnych nie czyni z niej paliwa a to samo dotyczy substancji uznanej za odpad. W odniesieniu do powszechnie stosowanych paliw energetycznych paliwa formowane mogą charakteryzować się obniżoną zawartością popiołu, siarki, chloru. J. Wandrasz jest z wykształcenia inżynierem energetykiem i studiując jego prace łatwo zauważyć i wyciągnąć jeden ogólny wniosek, że do problemu spalania odpadów podchodzi on od strony inżyniera energetyka, a nie ekologa (inżyniera w zakresie inżynierii środowiska). Można zauważyć, że w treści jego prac przewija się chęć przede wszystkim spalenie wszystkiego co jest możliwe (dot. odpadów) a dopiero na drugim miejscu jest rozważenie negatywnych skutków tego procesu dla środowiska a w szczególności dla ochrony powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin.

Koncepcją paliwa formowanego w jednej z wielu swoich prac zajmował się również J. Hehlmann z Politechniki Śląskiej. W pracy [25] autorzy przedstawili możliwości formowania paliw kompozytowych z udziałem zasobów lokalnych, przy czym zwrócili uwagę na metodyczny dobór komponentów z uwzględnieniem ich kinetyki spalania, wielkości emisji oraz walorów użytkowych. Przedstawili tak-

że metodę wytwarzania formowanego paliwa, która może być zastosowana w wytwórni dowolnej wielkości, co jest istotne z punktu widzenia ich dyslokacji w różnych rejonach kraju. Dodatkowo omówiono metody badań wytrzymałości paliw formowanych, sposoby ich suszenia i obliczenia suszarki. Przedstawiono walory zaproponowanego paliwa, obszar jego aplikacji oraz metodę poszerzenia receptur o materiały bioodtwarzalne i komponenty odpadowe, szczególnie w odniesieniu do zorganizowanych spalarni odpadów komunalnych i przemysłowych.

Kolejnym zespołem zajmującym się problematyką spalania odpadów jest zespół L. Pawłowskiego z Politechniki Lubelskiej, który specjalizuje się głównie w problematyce likwidacji odpadów w piecach cementowych [13, 33, 55].

Określone prace od wielu lat w problematyce utylizacji odpadów prowadzi także zespół T. Piecuch. W tym zakresie opublikował kilka podręczników, m.in. [61, 62, 64], a także wiele artykułów, m.in. [56÷60, 63]. Właśnie w podręcznikach T. Piecucha można znaleźć ponad 200 cytowanych artykułów w wykazie literatury, w tym także prace J. Wandrasza i L. Pawłowskiego.

T. Piecuch w swych pracach m.in. [62, 64] bardzo krytycznie odnosi się do publikacji T. Pająka, w których zwraca uwagę, iż nie każdą substancję organiczną można efektywnie spalać i takim przykładem szczególnym jest spalarnia odpadów w dzielnicy Targówek w Warszawie, gdzie do spalania odpadów dosypuje się koncentraty węglowe.

Analizując prace T. Pająka z AGH Kraków, który także jest inżynierem energetykiem, podobnie jak prof. Wandrasz, można zauważyć jego promowanie spalania odpadów niemal za każdą cenę, co jest tym bardziej zrozumiałe, że uzyskując tzw. statut euroinżyniera w połowie lat 90. stał się lobbystą zachodnio-europejskich koncepcji technologicznych spalarni odpadów (dotyczy preferowania wdrożeń spalarni z instalacjami ochrony atmosfery, w których brakuje ważnych węzłów oczyszczania spalin).

W kilku ośrodkach naukowych w Polsce prowadzi się także badania nad zastosowaniem plazmy do likwidacji odpadów (przede wszystkim w Politechnice

Łódzkiej, Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, Politechnice Częstochowskiej i Politechnice Wrocławskiej).

Technologia likwidacji odpadów w plazmie jest bezsprzecznie najlepszą pod względem ekologicznym (brak w spalinach gazów toksycznych) oraz pozostawia minimalne ilości po tym procesie tzw. wtórny odpad, którego ilość wynosi poniżej 1% masy wsadu i jest to odpad wysoce bezpieczny i odporny na działanie czynników zewnętrznych (można go składować).

Najczęściej spotykanym w przyrodzie i technice rodzajem spalania jest spalanie dyfuzyjne gazów. Tak uważa K. Wilk, który zajmuje się w swoich pracach [99÷104] optymalizacją spalania w aspekcie dopływu strugi gazu do palnika oraz optymalną proporcją gazu i powietrza w tej strudze. Istotą spalania dyfuzyjnego jest to, że mieszanina palna nie jest doskonale wymieszana, lecz paliwo i utleniacz występują początkowo osobno a następnie mieszają się wskutek dyfuzji. Działalność naukową prowadzi w ramach budowy i eksploatacji maszyn oraz techniki cieplnej, zaś jego zainteresowania naukowo-badawcze dotyczą procesów spalania paliw (w piecach grzewczych i silnikach spalinowych). Już wiele lat temu zajmował się badaniami dyfuzyjnych palników gazowych [102, 104]. Zaproponowane przez K. Wilka liczby kryterialne używane były w badaniach nad gazowymi płomieniami dyfuzyjnymi gazowych palników przemysłowych. Była to m.in. tzw. efektywna liczba Reynoldsa, która zawiera informacje o wymiarach komory spalania, o rodzaju paliwa oraz o wielkości pól przekrojów wylotowych, czyli o najistotniejszych cechach konstrukcyjnych komory spalania. Inna liczba kryterialna charakteryzująca zależność energii kinetycznej od pełnej entalpii strugi, zawiera dane o wartości opałowej paliwa, o stopniu podgrzania i prędkościach wypływu substratów. Problematyka termicznej utylizacji odpadów stała się modna i aktualna na początku lat 90. ubiegłego wieku w Europie praktycznie we wszystkich państwach Unii Europejskiej, a krajem wiodącym stały się Niemcy. Charakterystykę spalarni w wybranych krajach Unii Europejskiej można znaleźć m.in. w podręcznikach T. Piecucha [61, 62, 64].

3. Badania własne

3.1. Metoda punktu centralnego

Podstawowym celem każdego badania naukowego jest poszukiwanie zależności między zmiennymi, tj. wielkościami, które są mierzone, kontrolowane lub które są manipulowane przez badacza w jakiś sposób w trakcie badań. Relacji przyczynowej między zmiennymi mogą efektywnie dowieść wyłącznie tylko badania typu eksperymentalnego, gdy badacz zmienia niektóre zmienne, a następnie mierzy wpływ tych manipulacji na inne zmienne [12].

Zmiennymi niezależnymi nazywa się te spośród zmiennych, których wartość można zmieniać, podczas gdy zmienne zależne są jedynie mierzone lub rejestrowane [12].

Badanie związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną można dokonać, stosując aproksymację. Celem aproksymacji jest znalezienie funkcji $F(x)$, która będzie pokrywać się z pewną funkcją $f(x)$ określoną w postaci punktów (x_i, y_i) . Oczywiście przybliżenie takie powoduje pojawienie się błędów, zwanych błędami aproksymacji (przybliżenia). Problem oszacowania tych błędów oraz ich wielkość mają istotny wpływ na wybór metody aproksymacyjnej.

Zazwyczaj dla przedstawienia zależności pomiędzy badanymi zmiennymi wykorzystuje się aproksymację metodą najmniejszych kwadratów. Mówiąc ogólnie, estymacja metodą najmniejszych kwadratów zmierza do minimalizacji sumy kwadratów odchyłeń wartości obserwowanych zmiennej zależnej od wartości przewidywanych przez model. Termin najmniejsze kwadraty został po raz pierwszy użyty przez Legendre'a w roku 1805. W metodzie tej wynik kolejnego pomiaru y_j można uważać za sumę wielkości x (nieznanej) oraz błędu pomiarowego ε_j , $y_j = x + \varepsilon_j$. Dobierając następnie tak wielkość błędu pomiarowego ε_j , aby suma kwadratów ε_j była najmniejsza:

3. Badania własne

$$\sum_j \varepsilon_j^2 = \sum_j (x - y_j)^2 = \min. \quad (3.1)$$

Badanie związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną w niniejszej pracy dokonano stosując aproksymację metodą punktu centralnego. Jest to metoda opracowana przez prof. T. Piecucha, promotora niniejszej dysertacji. Prof. T. Piecuch po raz pierwszy zastosował ją w swojej pracy habilitacyjnej w roku 1975. Metoda ta została dokładnie opisana w pracy doktorskiej A.M. Anielak (Politechnika Śląska 1982) oraz w pracy doktorskiej J. Piekarskiego [65], a także w pracach doktorskich T. Dąbrowskiego [12] i J. Juraszki [29], których promotorem był prof. Tadeusz Piecuch.

Jest to metoda, w której problem obliczeniowy, jaki należy rozwiązać, polega na dopasowaniu krzywej będącej obrazem graficznym poszukiwanej funkcji do zbioru punktów pomiarowych. Zależności funkcyjne pomiędzy rozpatrywanymi zmiennymi określane są wstępnie poprzez aproksymację metodą najmniejszych kwadratów.

Otrzymana funkcja na pierwszym stopniu aproksymacji, zgodnie z tą metodą, ma jedną z poniższych postaci:

$$\text{funkcji wykładniczej } y(x_1) = a + \exp(b + c \cdot x_1), \quad (3.2)$$

$$\text{funkcji logarytmicznej } y(x_1) = a + b \cdot \log(c + x_1), \quad (3.3)$$

$$\text{funkcji wielomianowej } y(x_1) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot x_1^i, \quad (3.4)$$

$$\text{funkcji prostej } y(x_1) = a + b \cdot x_1. \quad (3.5)$$

gdzie:

$y(x_1)$ – wielkość wyjściowa zależna na pierwszym stopniu aproksymacji,

a, b, c, a_i – współczynniki funkcji aproksymacyjnej,

x_1 – wielkość wejściowa niezależna.

3. Badania własne

Następnie, zakładając współrzędne centralnego punktu aproksymacji $C(x_{1c}, y_{1c})$, wyznacza się stałą na pierwszym stopniu aproksymacji dla tego punktu:

$$C^{x^1} = y(x_{1c}) \quad (3.6)$$

gdzie:

C^{x^1} – wartość stałej aproksymacji na pierwszym stopniu aproksymacji,

X_{1c} – wielkość wejściowa niezależna x_1 w punkcie centralnym.

Na drugim stopniu aproksymacji, równanie wyznacza się w sposób opisany poprzednio, natomiast zakładając współrzędne centralnego punktu aproksymacji $C(x_{2c}, y_{2c})$, wyznacza się stałą na drugim stopniu aproksymacji dla tego punktu:

$$C^{x^1x^2} = y(x_{1c}, x_{2c}) \quad (3.7)$$

gdzie:

$C^{x^1x^2}$ – wartość stałej aproksymacji na drugim stopniu aproksymacji,

X_{1c} – wielkość wejściowa niezależna x_1 w punkcie centralnym.

X_{2c} – wielkość wejściowa niezależna x_2 w punkcie centralnym.

Ogólne równanie po aproksymacji na pierwszym i drugim stopniu aproksymacji przyjmuje postać:

$$y = y(x_1) + y(x_2) - C^{x^1} \quad (3.8)$$

gdzie:

$y(x_1)$ – równanie na pierwszym stopniu aproksymacji,

$y(x_2)$ – równanie na drugim stopniu aproksymacji,

C^{x^1} – wartość stałej aproksymacji na pierwszym stopniu aproksymacji.

3. Badania własne

Wzór dla równania po trzecim stopniu aproksymacji uzyskuje się analogicznie, przy czym zakładając współrzędne centralnego punktu aproksymacji $C(x_{3c}, y_{3c})$, wyznacza się stałą na trzecim stopniu aproksymacji dla tego punktu:

$$C^{x_1 x_2 x_3} = y(x_{1c}, x_{2c}, x_{3c}) \quad (3.9)$$

gdzie:

$C^{x_1 x_2 x_3}$ – wartość stałej aproksymacji na trzecim stopniu aproksymacji,

x_{1c} – wielkość wejściowa niezależna x_1 w punkcie centralnym.

x_{2c} – wielkość wejściowa niezależna x_2 w punkcie centralnym.

x_{3c} – wielkość wejściowa niezależna x_3 w punkcie centralnym.

Ogólne równanie po aproksymacji na pierwszym, drugim i trzecim stopniu aproksymacji przyjmuje postać:

$$y = y(x_1) + y(x_2) + y(x_3) - (C^{x_1} + C^{x_1 x_2}) \quad (3.10)$$

gdzie:

$y(x_1)$ – równanie na pierwszym stopniu aproksymacji,

$y(x_2)$ – równanie na drugim stopniu aproksymacji,

$y(x_3)$ – równanie na trzecim stopniu aproksymacji,

C^{x_1} – wartość stałej aproksymacji na pierwszym stopniu aproksymacji.

C^{x_2} – wartość stałej aproksymacji na drugim stopniu aproksymacji.

Ostatecznie, wzory równań po kolejnych stopniach aproksymacji uzyskuje się w sposób analogiczny.

Po zakończonej pełnej serii badań, zgodnie z metodą punktu centralnego, otrzymuje się pewną abstrakcyjną przestrzeń matematyczną pęku krzywych:

$$y = \sum_{i=1}^n y_n - \sum_{i=1}^{n-1} C^n \quad (3.11)$$

gdzie:

y_n – aproksymowany wielomian na n -tym stopniu aproksymacji,

C^n – wartość stałej na n -tym stopniu aproksymacji,

x_1, x_2, x_n – wielkości zmiennych niezależnych.

Charakterystyczną cechą tej metody jest to, że wszystkie krzywe przebiegają zawsze przez jeden wspólny centralny punkt i ograniczone są przedziałami zmian, w których poszczególne zmienne niezależne x_1, x_2, \dots, x_n były zadawane. Można zatem przyjąć, że te poszczególne przebiegi tworzą między sobą pewną przestrzeń, w której otrzymane w konsekwencji takiej aproksymacji równania są często wystarczająco dokładne [12, 29, 65].

Trzeba też zaznaczyć, że w zastosowanej tu metodzie aproksymacji wobec centralnego punktu przyjęto upraszczające założenie, że badane parametry zmienne niezależne $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ nie posiadają między sobą interakcji, bądź też ewentualne ich interakcje między sobą są tak dalece mało istotne w stosunku do efektu zmian na wynik procesu pojedynczego czynnika x_i , iż nie popełniając dużego błędu, można te ewentualne interakcje pominąć. Aby to zweryfikować należało po zakończeniu takiej serii badań, już po ustaleniu końcowych równań matematycznych analityczno-empirycznych, wykonać jeszcze dodatkowo kilka losowych doświadczeń przy zadanych z góry wybranych dowolnie wartościach poszczególnych zmiennych x_1, x_2, \dots, x_n , mieszczących się w badanych poprzednio przedziałach zmian, celowo dobranych w taki sposób, aby nie kojarzyły się te wartości z punktem centralnym aproksymacji, lecz tylko z przestrzenią wokół tego punktu – a więc przestrzenią, w której przyjmuje się, iż otrzymane równania można stosować [12, 29, 65]. Temu służy weryfikacja (testowanie) hipotez statystycznych, która jest podstawowym rodzajem wnioskowania statystycznego.

Weryfikacja hipotezy statystycznej odbywa się przez zastosowanie testu statystycznego, który jest regułą postępowania, według której każdej możliwej próbie losowej (tj. każdemu punktowi przestrzeni próby) przyporządkowuje decyzję przyjęcia lub odrzucenia sprawdzanej hipotezy. W zależności od postaci hipotezy zerowej (tzn. bezpośrednio sprawdzanej) oraz postaci hipotezy alternatyw-

nej (tzn. konkurencyjnej w stosunku do hipotezy zerowej), sposób budowy testu jest różny. Testy istotności, pozwalające jedynie odrzucać sprawdzaną hipotezę zerową (z określonym, małym ryzykiem popełnienia błędu pierwszego rodzaju) są w ogromnej większości przypadków zupełnie wystarczające dla potrzeb praktyki [12].

Test-t jest najbardziej powszechnie stosowaną metodą oceny różnic między średnimi w dwóch grupach. Teoretycznie test-t może być stosowany także w małych próbkach.

Jeśli populacja generalna ma rozkład normalny $N(m, \sigma)$, przy czym odchylenie standardowe σ populacji nie jest znane, wtedy, w oparciu o wyniki małej, n -elementowej próby losowej można zweryfikować hipotezę $H_0: m = m_0$, wobec hipotezy alternatywnej $H_1: m \neq m_0$. Test istotności dla powyższej hipotezy H_0 jest następujący: z wyników próby oblicza się średnią arytmetyczną \bar{x} oraz odchylenie standardowe z próby s , a następnie wartość statystyki t według wzoru:

$$t = \frac{\bar{x} - m_0}{s} \sqrt{n - 1}$$

Statystyka ta, przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 , ma rozkład Studenta o $n-1$ stopniach swobody. Z tablicy tego rozkładu, dla ustalonego poziomu istotności α i dla $n-1$ stopni swobody, odczytuje się taką wartość t_α , że $P\{|t| \geq t_\alpha\} = \alpha$. Nierówność $|t| \geq t_\alpha$ określa obszar krytyczny (dwustronny) w tym teście. Wystarczy więc porównać obliczoną z próby według powyższego wzoru wartość zmiennej t z wartością krytyczną t_α , odczytaną z tablic rozkładu Studenta. Jeżeli zajdzie nierówność $|t| \geq t_\alpha$, to hipotezę H_0 należy odrzucić na korzyść hipotezy H_1 , natomiast gdy zajdzie nierówność przeciwna $|t| < t_\alpha$, to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 [12].

Równania opisujące poszczególne parametry zmiennych niezależnych badanych procesów spalania, współspalania oraz oczyszczania spalin zostały poddane weryfikacji w rzeczywistych warunkach laboratoryjnych. Do weryfikacji wybrano część równań przedstawionych w rozdziale 4. Weryfikacja polegała na wy-

konaniu serii siedmiu prób w warunkach laboratoryjnych, dla dowolnie wybranych wartości poszczególnych parametrów zmiennych, które nie są wartościami punktu centralnego i należą do zakresów, na podstawie których wyznaczono testowane równania.

W niniejszej pracy w formie załączników podano zestaw tabel wyników badań mających na celu wyznaczenie równań analityczno-empirycznego modelu matematycznego opisującego badane procesy w układzie spalanie – oczyszczanie spalin. Dodatkowo, również jako załącznik, przedstawiono zestaw wykresów opisujących wyniki badań wpływu zmian parametrów zmiennych niezależnych na stężenie wybranych szkodliwych gazów spalinowych powstających w procesie spalania badanych paliw, spalania mieszanek paliwowych oraz procesów oczyszczania badanych gazów spalinowych z zastosowaniem wybranych metod. Do obliczania zależności między zestawem zmiennych niezależnych a zmienną zależną zastosowano nieliniową metodę najmniejszych kwadratów: algorytm Levenberga-Marquardta, używając programu STATISTICA 8.0. Współczynnik regresji równań osiągał wartości nie mniejsze niż $R = 0,98$, przy poziomie ufności: 95,0% ($\alpha = 0,050$). Równolegle przy każdym wykresie przebiegu zmiennych pokazano dodatkowy wykres ramkowy, charakteryzujący zakresy zmienności wybranej zmiennej rysowane osobno dla określonych punktów wykresu, z których każdy był średnią wartością z 20. wyników pomiarów prowadzonych w identycznych warunkach. Miarą tendencji centralnej była średnia a zmienności – odchylenie standardowe, obliczane dla każdej grupy wyników.

3.2. Proces spalania i współspalania

3.2.1. Opis stanowiska badawczego

Badania procesu spalania i współspalania poprowadzone zostały w instalacji badawczej przedstawionej na zdjęciu 3.1 oraz schematycznie na rysunku 3.1. Zasadniczymi elementami instalacji był piec rurowy (1) oraz analizator spalin (5).

Piec PRC 20 HM to laboratoryjny jednostrefowy piec rurowy z poziomym układem grzejnym o maksymalnej temperaturze pracy ciągłej równej 1473K, przy

3. Badania własne

dokładności regulacji temperatury $\pm 5\text{K}$ przedstawiony wraz z dynamiką nagrzewania na zdjęciu 3.2. Do pomiaru, regulacji i programowania temperatury urządzeń grzewczych służy mikroprocesorowy programator temperatury MRT-4.



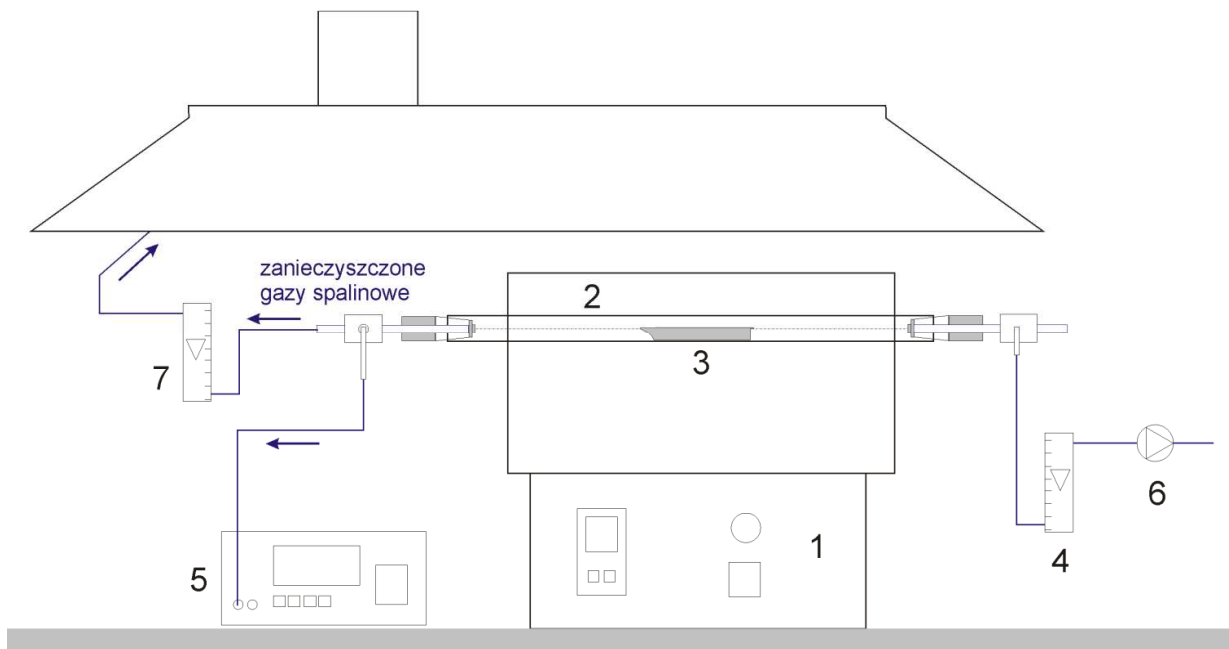
Zdjęcie 3.1. Instalacja do badania procesu spalania i współspalania odpadów

Proces spalania przeprowadzano w reaktorze, którym jest rura kwarcowa o wymiarach: $\phi 25 \times 2,5 \times 710 \text{ mm}$ (2). Próbkę materiału przeznaczonego do spalania równomiernie rozkładano w porcelanowej kuwecie (3), a następnie całość umieszczano w rurze kwarcowej pieca (2), przy czym strefa spalania, o długość 200 mm, znajduje się w centralnej części tej rury. Proces przeprowadzany był w atmosferze powietrza, które doprowadzano do układu pompką przeponową (6) poprzez rotametr stołowy ROS-06 (4) mierzący natężenie jego przepływu w zakresie $0,5 \div 8,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Strumień gazów spalinowych wydostający się z reaktora pieca, którego natężenie przepływu mierzył rotametr stołowy ROS-06 (7), poddawany był analizie za pomocą analizatora spalin typu MADUR GA-21 *plus* firmy „Eljack Electronics” sp. c. z siedzibą w Zgierzu. Analizator ten jest wielofunkcyjnym urządzeniem,

3. Badania własne

w którym do pomiarów koncentracji gazów wykorzystuje się czujniki elektrochemiczne i czujniki pracujące w podczerwieni. Urządzenie wyposażone jest w czujniki elektrochemiczne gazów: O_2 , CO , NO , SO_2 , NO_2 oraz czujnik IR – CO_2 .

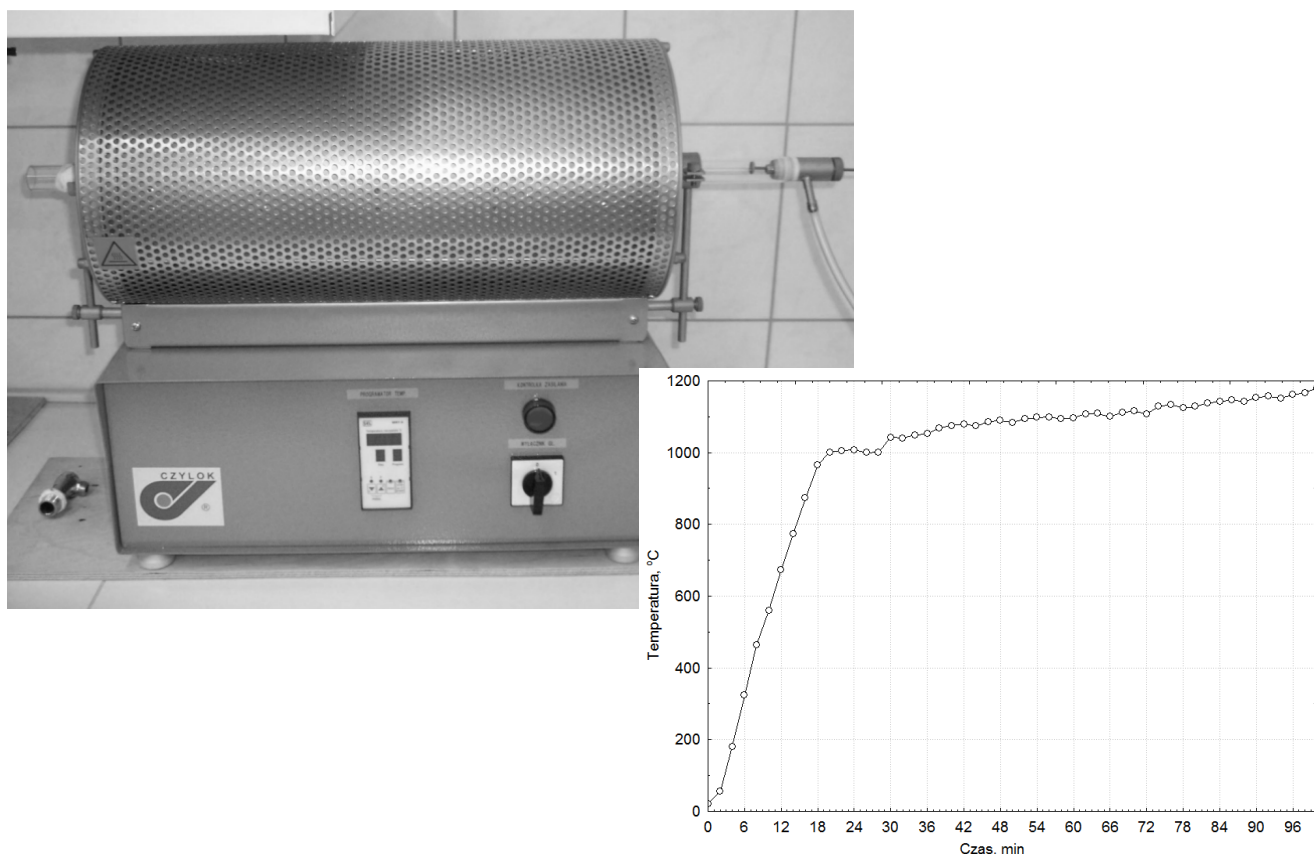


Rys. 3.1. Schemat stanowiska badawczego do procesu spalania odpadów; 1 – piec rurowy, 2 – reaktor, 3 – kuweta ceramiczna, 4, 7 – rotametry stołowe, 5 – analizator spalin, 6 – pompka przeponowa

Przepływ analizowanego gazu przez komory czujników umożliwia wewnętrzna pompa analizatora. Sensory wykorzystywane w analizatorze posiadają wzorcowania wykonane zgodnie z procedurą określoną przez producenta i zostały odniesione do gazów kalibracyjnych. Wyniki przeprowadzonych cyklicznych wzorcowań Politechnika Koszalińska, jako użytkownik analizatora, otrzymuje w formie Świadectwa Wzorcowania wydane przez producenta.

Wyniki analiz spalin zbierane są przez cały okres pomiarowy w pamięci EEPROM analizatora a następnie przetwarzane przy wykorzystaniu komputera przy pomocy oprogramowania dostarczonego przez producenta analizatora.

3. Badania własne



Zdjęcie 3.2. Piec rurowy laboratoryjny PRC 20 HM wraz z jego dynamiką nagrzewania

Stężenia gazów spalinowych mierzone przez analizator GA-21 *plus* są bezwzględnymi objętościowymi stężeniami podawanymi z pomiaru wyrażanymi w ppm, co oznacza, że objętość zanieczyszczenia stanowi 10^{-6} części objętościowych gazów spalinowych. Jednak podstawowymi jednostkami stężenia zanieczyszczeń gazowych są bezwzględne stężenia masowe $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, określające, ile mg danego gazu występuje w 1 m^3 gazów spalinowych w warunkach normalnych, tj. przy ciśnieniu 1013 hPa i temperaturze 273,15K. Dlatego, ostatecznie objętościowe wartości stężeń gazów spalinowych przeliczane były na masowe (dla warunków normalnych) korzystając z prawa Avogadra tworząc następujący wzór obliczeniowy:

$$c(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{c(\% \text{ obj.}) \cdot M \cdot 10^4}{22,4} = c(\% \text{ obj.}) \cdot A \quad (3.12)$$

3. Badania własne

gdzie:

A – współczynnik przeliczeniowy właściwy dla poszczególnych gazów spalinowych zgodnie z tabelą 3.1.

Tabela 3.1. Współczynnik przeliczeniowy wyników stężeń gazów spalinowych z wartości objętościowych na masowe

Gaz spalinowy	Współczynnik A, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
CO	1,250
NO	1,340
SO ₂	2,860
NO _x	2,056

Stężenie masowe tlenków azotu NO_x obliczane jest przez analizator przy użyciu współczynnika dla ditlenku azotu NO₂, co jest zgodne z przyjętymi normami. Stężenia masowe obliczane przez analizator GA-21 *plus* mogą być porównywalne z wynikami uzyskanymi innymi metodami (na innych analizatorach) wyłącznie wtedy, gdy obu przeliczeń dokonano przyjmując jednakowe warunki umowne (w analizatorze GA-21 *plus* objętościowe wartości stężeń gazów spalinowych przeliczane były na masowe dla warunków normalnych).

Dla ułatwienia orientacji i możliwości porównywania wyników wszystkie stężenia zanieczyszczeń gazów spalinowych przeliczono na standardowe warunki umowne spalania przy zawartości 11% O₂ w spalinach. W zależności od zastosowanej wartości umownej tlenu (3%, 6%), w celu porównania z innymi wynikami, należy skorygować wartość emisji granicznej mnożąc przez odpowiedni przelicznik. Przykładowo, jeżeli stężenie NO_x w spalinach zmierzono przy zawartości O₂ równej wartości a%, to należy je przeliczyć na wartość stężenia NO_x przy zawartości tlenu 11%, stosując następujące przeliczenie (udział tlenu w powietrzu wynosi 20,95%):

$$\text{NOx}_{11\%} = \text{NOx}_{a\%} \cdot \frac{(20,95 - 11\%)}{(20,95 - a\%)}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.13)$$

gdzie:

$\text{NOx}_{11\%}$ – wartość stężenia NOx przy przeliczonej zawartości 11% O₂ w spalinach,

$\text{NOx}_{a\%}$ – wartość stężenia NOx przy mierzonej zawartości a% O₂ w spalinach,

O powyższych zależnościach należy pamiętać przy interpretacji wyników pomiarów wszystkich stężeń gazów spalinowych w przypadku zarówno spalania, jak i współspalania odpadów.

3.2.2. Materiały użyte do badań

Opisując materiały użyte do badań własnych niniejszej dysertacji, której tematem są warunki spalania wybranych grup odpadów, celowym jest zdefiniowanie pojęcia substancji palnej oraz pojęcie paliwa.

Substancją palną jest materia składająca się ze związków chemicznych pierwiastków elementarnych tworzących substancje organiczne, jakimi są: węgiel, wodór, tlen, siarka, azot, fosfor i inne oraz substancje traktowane jako balast, takie jak substancje mineralne (popiół) i wilgoć [90].

Natomiast paliwa definiowane są jako substancje chemiczne lub ich mieszaniny stosowane jako źródło energii cieplnej lub pośrednio energii mechanicznej i elektrycznej. Energia ta jest wykorzystywana do celów przemysłowych, technologicznych, transportowych lub bytowych [90].

Zależnie od stanu skupienia rozróżnia się paliwa stałe, ciekłe i gazowe, a zależnie od pochodzenia – naturalne lub formowane w sposób sztuczny, natomiast wartość energetyczna dzieli paliwa na nisko-, średnio i wysokokaloryczne [90].

W badaniach własnych niniejszej rozprawy użyto materiały klasyfikowane jako paliwa stałe, tzn. ciała stałe o własnościach palnych pochodzenia naturalnego lub otrzymywane sztucznie zdolne do wytwarzania energii cieplnej w wyni-

3. Badania własne

ku reakcji chemicznych zachodzących w konwencjonalnych paliwach stałych. Do naturalnych paliw stałych zalicza się drewno, torf, węgiel brunatny, węgiel kamienny, antracyt. Do sztucznych paliw stałych należy węgiel drzewny, koks, paliwa odpadowe w tym również komunalne osady ściekowe oraz biopaliwa czy koks pirolityczny [32, 90].

Ostatecznie do badań spalania i współspalania wyodrębniono następujące paliwa stałe:

- **węgiel kamienny** – paliwo pochodzenia naturalnego,
- **osady ściekowe** – paliwo odpadowe komunalne,
- **tworzywa sztuczne** – paliwo odpadowe zarówno przemysłowe, stanowiące także fragment w odpadach komunalnych,
- **odpady farbiarskie** – paliwo odpadowe przemysłowe,
- **odpady gumowe (zużyte opony)** – paliwo odpadowe przemysłowe.

W dalszej części rozdziału przedstawiono charakterystykę ww. paliw stałych wyodrębnionych do badań własnych przez autora niniejszej pracy.

Standardowo węgiel charakteryzuje się na podstawie analizy technicznej i analizy elementarnej [26, 32, 90]. Podczas analizy technicznej oznacza się udziały: wilgoci W , popiołu A i części lotnych w węglu V , a ponadto oznacza się ciepło spalania Q_s i oblicza wartość opałową W_d . Analiza elementarna obejmuje określenie zawartości podstawowych pierwiastków: węgla (C), wodoru (H_2), tlenu (O), siarki (S), azotu (N), w paliwie, a więc pierwiastków z których zbudowana jest jego substancja organiczna (palna).

Wstępnym etapem badań nad spalaniem i współspalaniem było wykonanie analizy technicznej materiałów użytych do badań, polegających na określeniu podstawowych wskaźników charakteryzujących paliwa stałe, mianowicie: oznaczanie zawartości wilgoci (W^a), popiołu (A^a), części lotnych (V^a), ciepła spalania (Q_s^a) dla paliw stałych. Analizy te wykonywano zgodnie z poniższymi normami:

PN-ISO 1213-2:1999 Paliwa stałe. Pobieranie, przygotowanie i analiza próbek.

PN-80/G-04511 Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci.

3. Badania własne

PN-ISO 1171:2002	Paliwa stałe. Oznaczanie popiołu.
PN-80/G-04512	Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu metodą wagową.
PN-G-04516:1998	Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości części lotnych metodą wagową.
PN-ISO 1928:2002	Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.

Paliwa wyodrębnione do badań charakteryzowano standardowo, podając wartości parametrów dla stanu powietrzno-suchego, analitycznego (a), kiedy wilgość paliwa jest w stanie równowagi z wilgocią otoczenia (PN-91/G-04510). Wiadomym jest, że wilgość w paliwach dzieli się na wilgość przemijającą i higroskopijną (analityczną). Wilgość przemijająca, która nie jest związana z substancją organiczną, może być usunięta z paliwa przez suszenie w temperaturze pokojowej (stan bez wilgoci przemijającej nazywa się powietrzno-suchym (a)). Wilgość higroskopijna jest związana z substancją organiczną, można ją usunąć, podgrzewając paliwo do temperatury $105 \pm 110^{\circ}\text{C}$ i przetrzymać w niej przez minimum 2 godziny (stan bez wilgoci higroskopijnej nazywa się suchym (d)). Norma PN-91/G-04510 przewiduje jeszcze stan roboczy (r) dotyczący paliwa wydobywanego, załadowywanego lub użytkowanego, z którego pobiera się próbkę oraz stan suchy, bezpopiołowy (daf) – umowny stan paliwa niezawierającego wilgoci całkowitej i popiołu. Oczywiście łatwo przeliczyć wartości wyznaczonych parametrów paliwa z jednego stanu na inny, wychodząc z równań bilansu masy, korzystając z zależności podanych w tabeli 3.2.

3. Badania własne

Tabela 3.2. Przeliczanie wyników parametrów analizy technicznej paliw zgodnie z PN-91/G-04510

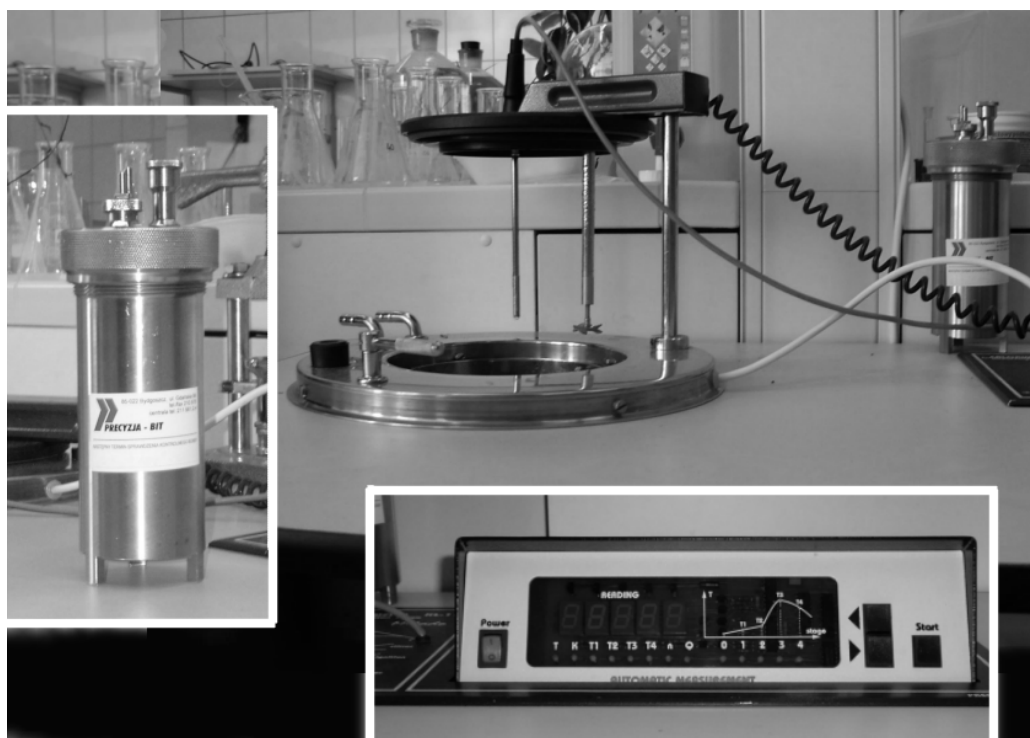
Charakter przeliczenia	na stan:			
	roboczy (r)	analityczny (a)	suchy (d)	bezpopiołowy (daf)
Ze stanu roboczego (r)	1	$\frac{1}{1 - W^r - W^a}$	$\frac{1}{1 - W^r}$	$\frac{1}{1 - W^r - A^r}$
Ze stanu analitycznego (a)	$\frac{1 - W^r + W^a}{1}$	1	$\frac{1}{1 - W^a}$	$\frac{1}{1 - W^a - A^a}$
Ze stanu suchego (d)	$\frac{1 - W^r}{1}$	$\frac{1 - W^a}{1}$	1	$\frac{1}{1 - A^d}$
Ze stanu bezpopiołowego (daf)	$\frac{1 - W^r - A^r}{1}$	$\frac{1 - W^a - A^a}{1}$	$\frac{1 - A^d}{1}$	1

Własności energetyczne paliw stałych ocenia się przy pomocy dwóch wskaźników: wartości opałowej W_d i ciepła spalania Q_s , zwanego również entalpią spalania. Różnice obu wielkości wynikają z ich definicji.

Wartość opałowa W_d (MJ/kg, kJ/kmol, kJ/m³) jest ilością ciepła jaką uzyskuje się w procesie spalania całkowitego i zupełnego jednostki masy paliwa, przy czym produkty zostają ochłodzone do temperatury substratów, a zawarta w spalinach para wodna nie ulega wykropleniu.

Ciepło spalania Q_s (MJ/kg, kJ/kmol, kJ/m³) jest ilością ciepła powstałą w takich samych warunkach jak wartość opałowa powiększona o ciepło całkowitego wykroplenia pary wodnej zawartej w paliwie i powstałej w wyniku utleniania wodoru. Spaliny zostają bowiem ochłodzone do temperatury substratów, a powstała para wodna ulega wykropleniu. Tak więc ciepło spalania jest sumą wartości opałowej i ciepła wykroplenia pary wodnej.

Pomiary ciepła spalania materiałów przeznaczonych do spalania i współspalania w niniejszej pracy wykonano przy zastosowaniu mikroprocesorowego kalorymetru KL-11 „Mikado” przedstawionego na zdjęciu 3.3. Kalorymetr przeznaczony jest do pomiaru ciepła spalania paliw stałych lub niewybuchowych, palnych substancji organicznych.



Zdjęcie 3.3. Kalorymetr KL-11 „Mikado”

Zasady pomiaru ciepła spalania reguluje norma PN-ISO 1928:2002. W celu wyznaczenia ciepła spalania paliwa pobierana była próbka analityczna (paliwo w stanie powietrzno-suchym). Pomiar polegał na całkowitym spalaniu próbki paliwa w atmosferze tlenu technicznego pod ciśnieniem w bombie kalorymetrycznej zanurzonej w wodzie i na pomiarze przyrostu temperatury tej wody. Ciepło spalania paliwa wyliczane jest w sposób automatyczny i przedstawione na cyfrowym wyświetlaczu kalorymetru – zdjęcie 3.3.

Węgiel kamienny

Węgiel kamienny to naturalne paliwo stałe pochodzenia organicznego, głównie roślinnego, składające się z mniej więcej jednakowej ilości atomów węgla i wodoru [27, 32, 87, 90]. Substancja organiczna palna wchodząca w skład węgla jest mieszaniną rozmaitych związków organicznych [32], w których skład wchodzi zaledwie kilka pierwiastków: węgiel, wodór i tlen, ponadto w mniejszych ilościach azot, siarka oraz w śladowych ilościach fosfor.

3. Badania własne

Do celów energetycznych stosuje się niskouwęglony węgiel kamienny: płomienny, gazowo-płomienny i gazowy (typy 31÷33 wg klasyfikacji zgodnie z norma PN-82/G-97002).

W tabelach 3.3÷3.7 zestawiono średni skład elementarny węgla kamiennych z polskich kopalń.

Tabela 3.3. Analiza techniczna wybranych polskich węgla energetycznych wydobywanych w kopalni „Wujek”, „Wieczorek”, „Mysłowice” wg bezpośredniego dostawcy: Skład Opałowy, Zgierz [44]

Typ węgla	32
Uziarnienie, mm	25,0÷50,0 (orzech)
Wartość opałowa, W_d , MJ/kg	27,0÷29,0
Zawartość popiołu, A^r , %	3,0÷7,0
Zawartość siarki, s^r , %	0,4÷0,6
Zawartość wilgoci, W^r , %	7,0÷9,0
Zawartość części lotnych V^r , %	34,0

Tabela 3.4. Analiza techniczna wybranych polskich węgla energetycznych wydobywanych w kopalni „Chwałowice” wg bezpośredniego dostawcy: EWGOR Bis z Gliwic – autoryzowany sprzedawca Kompanii Węglowej S.A. w Katowicach [41]

Typ węgla	32	32	32
Uziarnienie, mm	0÷5,0 (miał)	5,0÷25,0 (ekogroszek)	8,0÷31,0 (groszek)
Wartość opałowa, W_d , MJ/kg	28,0	28,0	28,0
Zawartość popiołu, A^r , %	6,0	5,0	5,0
Zawartość siarki, s^r , %	0,6	0,6	0,8
Zawartość wilgoci, W^r , %	9,0	7,0	7,0

3. Badania własne

Tabela 3.5. Analiza techniczna węgla kamiennego niskouwęglonego z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego [90] oraz Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. [42]

Rodzaj węgla	Jaworznicki	Mikołowski	Dąbrowsko-siemianowski	Katowicko-chorzowski	Rybnicki	Lubelski
Wartość opałowa, W_d , MJ/kg	18,0	20,0	22,0	23,5	20,0	19,0
Zawartość popiołu, A^r , %	20,0÷24,0	20,0	20,0	20,0	20,0÷27,0	25,0
Zawartość siarki, s^r , %	1,3÷1,5	1,5,0	0,6	0,8	0,7÷1,3	1,2
Zawartość wilgoci, W^r , %	16,0÷20,0	12,0	8,0	5,0	9,0	9,0
Rodzaj węgla	Kopalnia węgla kamiennego					
	„Borynia”	„Jas-Mos”	„Krupiński”	„Pniówek”	„Zofiówka”	
Wartość opałowa, W_d , MJ/kg	29,5	29,6	28,6	29,6	29,4	
Zawartość popiołu, A^d , %	7,5	6,9	7,8	6,5	7,6	
Zawartość siarki, s^d , %	0,62	0,53	0,72	0,68	0,64	
Zawartość wilgoci, W^r , %	9,7	9,0	7,5	9,0	9,5	
Zawartość części lotnych V^{daf} , %	2,5,0	21,5	37,8	28,3	24,2	

Tabela 3.6. przedstawia wyniki analizy elementarnej węgla kamiennego przeprowadzonej przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze [95].

3. Badania własne

Tabela 3.6. Charakterystyka elementarna i wartość opałowa węgla kamiennego [95]

Analiza elementarna					wartość opałowa W_d^r , MJ/kg
węgiel c^a , %	wodór h , %	tlen o , %	azot n , %	siarka s , %	
84,00	7,00	7,90	0,40	0,50	27,00

Natomiast tabela 3.7 pokazuje wyniki analizy fizykochemicznej węgla kamiennego przeprowadzonej przez Katedrę Chemii i Technologii Nieorganicznej Politechniki Śląskiej w Gliwicach [46].

Tabela 3.7. Charakterystyka elementarna i techniczna węgla kamiennego [46]

Analiza elementarna				zawartość wilgoci W_{ex}^r , %	zawartość popiołu A^d , %	ciepło spalania Q_s^a , MJ/kg	wartość opałowa W_d^r , MJ/kg
węgiel c^a , %	wodór h , %	azot n , %	siarka s_t , %				
64,70	4,16	1,11	0,46	4,3	21,2	22,39	21,56

Średnie parametry polskiego węgla kamiennego, energetycznego wg W. Blaschke są następujące [6]:

wartość opałowa W_d^r , MJ/kg: 20,0÷29,0 (śr. – 23,0)

zawartość popiołu A^r , %: 8,0÷24,1 (śr. – 19,0)

zawartość siarki s^r , %: 0,45÷1,22 (śr. – 0,83)

zawartość wilgoci W^r , %: 0,5÷11,2 (śr. – 0,9)

Charakterystykę węgla kamiennego jako paliwa klasycznego użytego do badań przedstawiono w tabeli 3.8. Wyniki wskazują na niską zawartość wilgoci, która mogła wpływać pozytywnie na efektywność procesu spalania. Duża wartość ciepła spalania i średnia zawartość popiołu zalicza ten surowiec jako dość dobry pod względem energetycznym.

Tabela 3.8. Charakterystyka (analiza techniczna) węgla kamiennego użytego do badań

Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	26,45
Uziarnienie, mm	0,315÷1,25
Zawartość popiołu A^a , %	18,3
Zawartość części lotnych V^a , %	33,72
Zawartość wilgoci W^a , %	8,10

Wartości parametrów analizy technicznej badanego węgla kamiennego porównywalne są ze średnimi wartościami polskiego węgla energetycznego, co kwalifikuje ten materiał do dalszych badań procesu spalania i współspalania.

Osady ściekowe

Osady ściekowe jako osady z komunalnych oczyszczalni ścieków stanowią jeden z trudniejszych problemów gospodarki odpadami. Spowodowane jest to coraz większą ilością osadów do zagospodarowania (J.B. Bień podaje liczbę 2,5÷3,5 mln Mg uwodnionych osadów rocznie w Polsce [2, 3]) oraz dużego uwodnienia osadów ściekowych.

Podstawowym sposobem postępowania z osadami ściekowymi w Polsce jest deponowanie ich na składowiskach, które zgodnie z wymogami Dyrektywy UE jest rozwiązaniem tymczasowym [37].

Przyrodnicze, a szczególnie rolnicze, stosowanie osadów ściekowych możliwe jest przede wszystkim dzięki ich charakterystycznym cechom, do których można zaliczyć: wysokie uwodnienie (średnio około 85% dla osadów surowych), znaczną zawartość związków organicznych (około 75% dla osadów surowych), zawartość związków biogenych (azotu, fosforu i potasu) [2]. Jednak osady ściekowe powstające w dużych oczyszczalniach ścieków w większości zawierają metale ciężkie oraz mikrozanieczyszczenia organiczne czy liczne organizmy patogenne [2, 66].

W obliczu stale rosnącego strumienia osadów ściekowych nieuniknione staje się zastosowanie metod termicznych, w tym głównie spalania. Za możliwo-

3. Badania własne

ścią ich termicznego przekształcania połączonego z odzyskiem energii przemawia duża zawartość substancji organicznych w osadach.

Możliwość wykorzystywania odpadów pochodzenia organicznego, takich jak osady ściekowe dla celów energetycznych, została zauważona w krajach Unii Europejskiej, m.in. Austrii, Belgii, Niemczech i Danii [37, 88]. W Polsce termiczne unieszkodliwianie osadów realizowane jest w bardzo małym stopniu; wg Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2010 [43], tylko 0,3% wytworzonych komunalnych osadów ściekowych jest przekształcane termicznie.

Oczywiście ze spalaniem osadów ściekowych wiążą się ich własności paliwowe, przede wszystkim wilgotność i wartości energetyczne (ciepło spalania). Zawartość wilgoci w osadach ściekowych jest zróżnicowana i zależy od rodzaju procesu, któremu zostały poddane. Wilgotność komunalnych osadów ściekowych zmienia się w następujących zakresach [2, 3, 66]:

- 80÷99% dla osadów surowych
- 55÷70% dla osadów odwodnionych
- około 10% dla osadów wysuszonych.

W tabeli 3.9 podano wyniki badań (analizy technicznej i elementarnej) wykonaną przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze [95], komunalnych osadów ściekowych, które zostały poddane procesowi wstępnego suszenia gorącym powietrzem w instalacji wyposażonej w reaktor ze złoża fluidalnego do zawartości wilgoci około 8%. Wyniki analizy nie odbiegały zasadniczo od składowych chemicznych innych osadów ściekowych prezentowanych w literaturze.

Tabela 3.9. Charakterystyka elementarna i techniczna komunalnych osadów ściekowych badanych przez IChPW w Zabrze [95]

Analiza elementarna				zawartość	zawartość	części	wartość
węgiel	wodór	azot	siarka	wilgoci	popiołu	lotne	opałowa
C ^a , %	h, %	n, %	s _t , %	W, %	A, %	V, %	W _d , MJ/kg
36,6	4,82	4,82	1,34	7,4	36,8	52,03	11,86

3. Badania własne

Grabowski i Oleszkiewicz już w 1998 [18] opracowali nomogram zależności wartości opałowej osadów od udziału substancji mineralnej i zawartości wilgoci. Wynika z niego, że np. osady ściekowe zawierające 40% wilgoci po procesie podsuszenia do wartości 18% wilgotności zwiększają wartość opałową z wartości $W_d = 8,4$ MJ/kg do wartości 12,6 MJ/kg, czyli w dalszym stopniu stosunkowo niską.

Według E.S. Kempy [30], ciepło spalania odwodnionego osadu surowego zawierającego np. 70% substancji lotnych wynosi $16,7 \div 17,2$ MJ/kg, osadu czynnego $14,6 \div 15,5$ MJ/kg, zaś osadu przefermentowanego o zawartości 50% substancji palnych około 10,5 MJ/kg. Dla porównania ciepło spalania klasycznego paliwa jakim jest węgiel kamienny wynosi około 26,0 MJ/kg; o czym wspomniano we wcześniejszej części tego rozdziału pracy.

W tabeli 3.10 podano wyniki badań (analizy technicznej i elementarnej) osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w Białymstoku [90], gdzie osady te zostały poddane procesowi suszenia do zawartości wilgoci około 10%.

Tabela 3.10. Wyniki badań komunalnych osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w Białymstoku przed i po procesie suszenia [90]

	węgiel c^d , %	wodór h^d , %	azot n^d , %	siarka s^d , %	chlor cl^d , %	zawartość popiołu A^d , %	wartość opałowa W_d , MJ/kg
Osady wilgotne	29,75	4,12	3,55	1,32	0,077	42,8	7,56
Osady w stanie suchym	29,84	4,28	3,91	1,82	0,070	41,9	10,73
	30,80	4,66	3,56	1,09	0,079	38,5	10,88

Badania właściwości różnego rodzaju osadów polskich przeznaczonych do procesu spalania lub współspalania zaprezentowano w tabeli 3.11. W wynikach tych można zauważyć dużą zbieżność składu elementarnego [90].

3. Badania własne

Tabela 3.11. Charakterystyka osadów ściekowych suchych z wybranych oczyszczalni ścieków [90]

Oczyszczalnia ścieków	węgiel c^d , %	wodór h^d , %	tlen o^d , %	azot n^d , %	siarka s^d , %	chlor cl^d , %	zawartość popiołu A^d , %	wartość opałowa W_d , MJ/kg
Świecie	40,57	5,36	23,50	4,50	1,20	0,040	24,83	15,10
Racibórz	29,54	4,47	16,27	3,54	1,44	0,270	44,51	11,13
Śląskie oczyszczalnie ścieków	28÷45	4÷5,5	–	3,5÷5,5	1÷1,5	0,03÷0,08	20÷40	7÷15

Charakterystykę komunalnych osadów ściekowych jako paliwa odpadowego użytego do badań niniejszej dysertacji przedstawiono w tabeli 3.12. Wyniki wskazują na wysoką zawartością wilgoci (ponad 60%), która mogła wpływać negatywnie na efektywność procesu spalania (wartości opałowe osadów ściekowych maleją wraz ze wzrostem uwodnienia). Dlatego też, osady zostały wysuszone do uzyskania wilgotności około 10% i następnie rozdrobnione do wielkości ziaren około 1÷2 mm, w celu ujednoczenia wielkości ziaren osadów z rozmiarem ziaren miazgi węglowej, jak i innych materiałów użytych do badań. Ułatwia to dozowanie i mieszanie osadów z innymi paliwami w procesie współspalania.

Tabela 3.12. Charakterystyka osadów ściekowych użytych do badań – analiza techniczna

Parametr		
Zawartość wilgoci W^a , %	Osady uwodnione	64,44
	Osady wysuszone	10,63
Zawartość części lotnych V^a , %	54,34	
Zawartość popiołu A^a , %	32,31	
Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	13,57	

Zwraca się uwagę na ciepło spalania badanych osadów ściekowych, które jest stosunkowo wysokie, jak na tego typu wysuszone paliwa odpadowe. Zawartość popiołu w niewielkim stopniu przewyższa typową wartość dla komunalnych osadów ściekowych, choć dwukrotnie przewyższa zawartość popiołu w próbie węgla kamiennego stosowanego w badaniach własnych tej pracy.

Odpady gumowe (zużyte opony)

Przemysł gumowy generuje znaczne ilości odpadów poprodukcyjnych i użytkowych. Największym problemem są zużyte opony, których łączny tonaż rocznej produkcji to około 22 mln t, co stanowi 60÷70% światowej produkcji przemysłu gumowego [28, 69, 73]. W Polsce roczna produkcja opon to około 180 tys. t [67].

Guma jest produktem wulkanizacji kauczuku naturalnego lub syntetycznego [90]. Surowy kauczuk naturalny ma charakter kruchej masy składającej się z makrocząsteczek poliizoprenu. Aby otrzymać tworzywo typu elastomeru (polimer o własnościach dużej sprężystości), należy poddać go procesowi wulkanizacji. Proces ten polega na usieciowaniu za pomocą atomów siarki. W ten sposób tworzona jest trójwymiarowa sieć makrocząsteczek poliizoprenu połączonych łańcuchami atomami siarki, tworząc w ten sposób tworzywo będące gumą. Właściwości gumy zależą od rodzaju kauczuku, rodzaju i ilości dodatków. Guma z kauczuku naturalnego otrzymywana jest z dodatkiem 1÷5% siarki wobec przyspieszaczy, ponadto zawiera zmiękczacze, napętniacze, barwniki i inne dodatki [28, 69, 73].

Jak podaje Centrum Utylizacji Opon w Warszawie 15% odzyskiwanych w Polsce opon podlega recyklingowi, natomiast reszta jest odzyskiwana, najczęściej w postaci energii cieplnej (odzysk energetyczny). Około 60% wyprodukowanych opon trafia w postaci zużytego ogumienia (w całości lub rozdrobnione) do pieców cementowni i w znacznie mniejszym stopniu, ciepłowni. Cementownie wymagają stosowania w piecach znacznie wyższe temperatur od tych, jakie powstają w piecach ciepłowni; stąd spalanie opon w cementowniach jest ekonomicznie bardziej uzasadnione (mogą być one spalane w całości). Opony w pie-

3. Badania własne

cach cementowni stanowią jednak tylko 10÷20% ogółu spalane go paliwa [39]. Wiąże się to z tym, że wszystkie zakłady produkcyjne muszą spełniać restrykcyjne normy w zakresie emisji szkodliwych gazów, a to wiąże się z koniecznością inwestycji w odpowiednią infrastrukturę oczyszczającą produkty spalania opon.

W tabeli 3.13 podano uśredniony skład elementarny odpadów gumowych traktowanych jako składnik odpadów komunalnych [90].

Tabela 3.13. Wyniki analizy elementarnej i technicznej odpadów gumowych [90]

Analiza elementarna					zawartość	części	zawartość	wartość
węgiel	wodór	tlen	azot	siarka	wilgoci	lotne	popiołu	opałowa
c, %	h, %	o, %	n, %	s, %	W, %	V ^a , %	A, %	W _d , MJ/kg
65,0	5,0	12,6	0,2	1,6	5,0	48,0	11,6	25,79

Według Skalmowskiego opony zawierają 1,3÷2,2% S i około 0,2% Cl [72]. Wyniki analizy technicznej i elementarnej granulatu z zużytych opon przeprowadzonej w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu zostały przedstawione w tabeli 3.14 [96]. Natomiast tabela 3.15 pokazuje podobne wyniki analizy fizykochemicznej rozdrobnionych odpadów z opon samochodowych przeprowadzonej przez Katedrę Chemii i Technologii Nieorganicznej Politechniki Śląskiej w Gliwicach [46].

Tabela 3.14. Charakterystyka elementarna i techniczna granulatu z opon [96]

Analiza elementarna				zawartość	części	zawartość	wartość
węgiel	wodór	azot	siarka	wilgoci	lotne	popiołu	opałowa
c ^a , %	h ^a , %	n ^a , %	s ^a , %	W ^a , %	V ^a , %	A ^a , %	W ^a _d , MJ/kg
87,50	7,06	0,31	1,90	0,6	63,58	5,40	35,12

3. Badania własne

Tabela 3.15. Charakterystyka elementarna i techniczna rozdrobnionych odpadów gumowych z opon samochodowych [46]

Analiza elementarna				zawartość	zawartość	ciepło	wartość
węgiel	wodór	azot	siarka	wilgoci	popiołu	spalania	opałowa
$C^a, \%$	$H, \%$	$N, \%$	$S_t, \%$	$W_{ex}^r, \%$	$A^d, \%$	$Q_s^a,$	$W_d^r, \text{MJ/kg}$
70,25	5,89	1,06	1,11	8,9	11,6	31,96	30,81

Wyniki analizy technicznej i elementarnej ścieru z zużytych opon przeprowadzonej w Dolnośląskim Centrum Zaawansowanych Technologii i Zakładzie Chemii i Technologii Paliw Politechniki Wrocławskiej zostały przedstawione w tabeli 3.16 [95].

Tabela 3.16. Charakterystyka elementarna i techniczna ścieru z odpadów gumowych [95]

siarka	zawartość	zawartość	ciepło spalania	wartość
$S_t, \%$	wilgoci	popiołu	$Q_s^a, \text{MJ/kg}$	opałowa
	$W_t^r, \%$	$A^r, \%$		$W_d^r, \text{MJ/kg}$
1,11	0,5	4,6	38,2	37,4

Z powyższych analiz technicznych i elementarnych wyraźnie wynika, że odpady gumowe (zużyte opony samochodowe) charakteryzują się bardzo wysoką wartością opałową, przede wszystkim przewyższającą własności energetyczne węgla kamiennego (paliwa klasycznego). Badany odpad posiadał też znacznie wyższą zawartość części lotnych. Dodatkowo jednak zauważa się podwyższone wartości siarki i azotu jako pierwiastków paliwowych tych odpadów. Wg Mianowskiego [46] i Chruściela [11], wartości siarki w gumach mogą sięgać nawet wartości 1,2÷1,8%. Zmniejsza to walory odpadów gumowych jako surowiec do spalania lub współspalania energetycznego. Wyjaśnia to fakt, że opony w piecach cementowni stanowią jednak tylko 10÷20% ogółu spalanego paliwa.

3. Badania własne

Charakterystykę odpadów z zużytych opon samochodowych jako paliwa odpadowego użytego do badań niniejszej dysertacji przedstawiono w tabeli 3.17. Zużyte opony są odpadem wielomateriałowym. Ponieważ konstrukcja opon charakteryzuje się tym, że najważniejszą, decydującą o wytrzymałości częścią opony jest osnowa, wykonywana z kordu bawełnianego, wiskozowego lub stalowego, a pomiędzy bieżnikiem a warstwą gumy znajduje się podkład z tkaniny, do badań wyodrębniono wyłącznie warstwę gumy, którą jest naturalny lub sztuczny, wulkanizowany kauczuk. Następnie odpad został rozdrobniony do wielkości miazgi gumowej (>1 mm), w celu ujednoczenia ich wielkości z rozmiarem ziaren materiałów użytych do badań.

Tabela 3.17. Charakterystyka zużytych opon samochodowych użytych do badań – analiza techniczna

Zawartość wilgoci W^a , %	6,3
Zawartość części lotnych V^a , %	58,2
Zawartość popiołu A^a , %	12,3
Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	31,84

Tworzywa sztuczne

Tworzywami sztucznymi określa się w sposób umowny pewną grupę materiałów, których podstawowymi składnikami są: polimer lub polimery i substancje uzupełniające: napelniacze, zmiękczacze (plastyfikatory), stabilizatory, antyutleniające, barwniki, substancje spieniające. To właśnie dodatki do polimerów znacznie utrudniają ich utylizację a szczególnie ich termiczny rozkład, pogarszając warunki procesowe i wzrost emisji szkodliwych gazów [9].

Światowe zużycie tworzyw sztucznych w roku bieżącym może osiągnąć 250 mln t/rok. Wybrane dane wskazują, że jedynie w krajach UE i w USA zużywa się 30÷40 mln ton tworzyw na rok [40]. Utylizacja odpadów tworzyw sztucznych poprzez ich składowanie staje się obecnie niemożliwa ze względu na obowiązujące akty prawne (dyrektywy UE) związane z ochroną środowiska i gospodarką odpadami. Odpady tworzyw sztucznych podobnie jak odpady gumowe (głównie

3. Badania własne

zużyte opony samochodowe) mogą być źródłem energii surowców, z których zostały wyprodukowane. Dlatego, drugą z najczęściej stosowanych metod jest spalanie lub współspalanie z innymi odpadami komunalnymi. Niestety, w ten sposób utylizacji traci się bezpowrotnie możliwość odzyskania monomerów lub surowców, z których polimery zostały wyprodukowane.

Do badań własnych spalania i współspalania grupy odpadów z tworzyw sztucznych autor rozprawy wykorzystał tworzywa uznawane za reprezentatywną próbkę w odpadach komunalnych, mianowicie plastomery, wśród których wyodrębnił:

- PET – politereftalan etylenu (etylenowy), jako przedstawiciel grupy poliestrów,
- PCW – polichlorek winylu, jako przedstawiciel grupy polimerów winylowych,
- PP – polipropylen, jako przedstawiciel grupy poliolefin.

Tabela 3.18 przedstawia wyniki analizy elementarnej i średnia wartość opałowa tworzyw sztucznych opracowane przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu [95].

Tabela 3.18. Charakterystyka elementarna i wartość opałowa tworzyw sztucznych [95]

Analiza elementarna					wartość opałowa W_d^r , MJ/kg
węgiel c^a , %	wodór h, %	tlen o, %	azot n, %	siarka s, %	
74,90	14,10	8,74	0,25	0,15	27,00

Wyniki analizy technicznej i elementarnej folii opakowaniowych, opakowań z grup materiałowych: polipropylen, polietylen, polistyren przeprowadzonej w Dolnośląskim Centrum Zaawansowanych Technologii i Zakładzie Chemii i Technologii Paliw Politechniki Wrocławskiej zostały przedstawione w tabeli 3.19 [95].

3. Badania własne

Tabela 3.19. Charakterystyka elementarna i techniczna odpadów opakowaniowych z poliolefin [95]

siarka s_t , %	zawartość wilgoci W_t^r , %	zawartość popiołu A^r , %	ciepło spalania Q_s^a , MJ/kg	wartość opałowa W_d^r , MJ/kg
0,25	0,3	0,8	42,3	41,4

Natomiast w tabeli 3.20 podano wyniki analizy elementarnej tworzyw sztucznych produkowanych w Polsce [90]. Dane zawarte w tej tabeli wskazują, że wartość opałową powyżej 20 MJ/kg posiadają niemal wszystkie produkty z tworzyw sztucznych. Jeżeli weźmiemy pod uwagę takie polimery jak: polipropylen (PP), czy politereftalan etylenu (PET), to pod względem składu pierwiastkowego, są one bardzo podobne do węgla kamiennego.

Tabela 3.20. Charakterystyka elementarna i techniczna tworzyw sztucznych produkowanych w Polsce [90]

Analiza elementarna					zawartość wilgoci W , %	zawartość popiołu A , %	wartość opałowa W_d , MJ/kg
węgiel c , %	wodór h , %	tlen o , %	azot n , %	siarka s , %			
PET – politereftalan etylenu							
56,40	5,68	33,10	0,44	0,32	≈ 0	2,15	≈ 31
PCW – polichlorek winylu							
37,56	4,94	44,00	0,42	0,71	≈ 0	7,94	≈ 18
PP – polipropylen							
68,99	9,13	14,61	1,82	1,29	≈ 0	2,92	≈ 44

Charakterystykę odpadów z tworzyw sztucznych jako paliwa odpadowego użytego do badań niniejszej dysertacji przedstawiono w tabeli 3.21.

3. Badania własne

Tabela 3.21. Wyniki analizy technicznej odpadów polimerowych wykorzystanych do badań własnych

zawartość wilgoci W^a , %	zawartość popiołu A^a , %	zawartość części lotnych V^a , %	ciepło spalania Q^a_s , MJ/kg
PET – politereftalan etylenu			
0,3	2,6	42,6	23,11
PCW – polichlorek winylu			
0,2	5,3	49,7	25,76
PP – polipropylen			
0,8	3,1	58,4	42,02

Odpady farbiarskie

Istotne miejsce wśród odpadów przemysłowych zajmują odpady farbiarskie (lakiernicze), rozumiane jako mieszaniny różnorodnych rozpuszczalników, pozostałości farb i lakierów gromadzonych w różnych pojemnikach, beczkach oraz kożuchy zbierane z kanałów i kabin malarskich zakładów produkcyjnych, czy wysuszone warstwy farb powstających na zawieszkach malarskich, które okresowo usuwa się z elementów metalowych [71].

W przeprowadzonych badaniach własnych zostały wykorzystane odpady (pozostałości) emalii olejno-ftalowej, tj. rozpuszczalnikowej farby alkidowo-olejnej, jako jednej z najbardziej powszechnie stosowanych do dekoracyjnego i ochronnego malowania powierzchni.

Wyniki analizy technicznej odpadów farbiarskich wykorzystanych do badań własnych przedstawiono w tabeli 3.22.

Tabela 3.22. Wyniki analizy technicznej odpadów farbiarskich wykorzystanych do badań własnych

zawartość wilgoci W^a , %	zawartość popiołu A^a , %	zawartość części lotnych V^a , %	ciepło spalania Q^a_s , MJ/kg
0,8	7,8	18,0	24,91

Zbiorcza analiza badanych paliw

Podsumowując charakterystykę i własności materiałów (paliw) użytych w badaniach własnych niniejszej rozprawy zestawiono wyniki analiz technicznych i elementarnych tych materiałów w zbiorczych tabelach: 3.23 (analiza techniczna wykonana przez autora rozprawy) i 3.24 (uśredniona analiza elementarna zestawiona z wyników literaturowych).

Z analizy wyników przedstawionych w tych tabelach wynika wyraźnie, że własności energetyczne większości paliw są porównywalne z paliwem konwencjonalnym (węglem kamiennym), a nawet przewyższające, jak np. niektóre odpady z tworzyw sztucznych. Jedynie osady ściekowe posiadają znacznie niższe wartości ciepła spalania od węgla kamiennego. Związane jest to z zawartością pierwiastka elementarnego w paliwie, jakim jest węgiel (C). Zawartość procentowa s.m. tego pierwiastka w osadach ściekowych jest najmniejsza.

3. Badania własne

Tabela 3.23. Zestawienie zbiorcze wyników analizy technicznej materiałów (paliw) wykorzystanych do badań własnych

Uziarnienie, mm	zawartość wilgoci W^a , %	zawartość popiołu A^a , %	zawartość części lotnych V^a , %	ciepło spalania Q^a_s , MJ/kg
Węgiel kamienny				
0,315÷1,25	8,10	18,3	33,7	26,45
Osady ściekowe (w stanie suchym)				
0,125÷1,25	10,6	32,3	54,3	13,57
Odpady farbiarskie				
0,35÷1,25	0,8	7,8	18,0	24,91
Odpady gumowe (zużyte opony samochodowe)				
0,35÷1,25	6,3	12,3	58,2	31,84
PET – politereftalan etylenu				
1,0÷2,0	0,3	2,6	42,6	23,11
PCW – polichlorek winylu				
0,35÷1,25	0,2	5,3	49,7	25,76
PP – polipropylen				
0,5÷2,0	0,8	3,1	58,4	42,02

3. Badania własne

Tabela 3.24. Zestawienie zbiorcze (na podstawie wyników literaturowych) analizy elementarnej materiałów (paliw) wykorzystanych w badaniach własnych

węgiel c, %	wodór h, %	tlen o, %	azot n, %	siarka s, %
Węgiel kamienny				
78,0	4,6	9,0	1,5	0,6
Osady ściekowe (w stanie suchym)				
31,0	4,6	18,5	4,1	1,7
Odpady farbiarskie				
47,0	4,7	28,0	0,2	0,2
Odpady gumowe (zużyte opony samochodowe)				
77,0	5,0	12,6	0,3	2,1
PET – politereftalan etylenu				
56,0	7,7	33,0	0,4	0,2
PCW – polichlorek winylu				
37,0	5,1	44,0	0,4	0,7
PP – polipropylen				
69,0	9,1	15,0	0,2	0,2

Analiza zawartości wilgoci w poszczególnych badanych paliwach pokazuje porównywalność wszystkich materiałów; z wyłączeniem plastometrów: tworzyw sztucznych (PP, PCW, PET) i odpadów farbiarskich, a więc tworzyw charakteryzujących się przede wszystkim odpornością na działanie wody, stąd tak niska W^a w tych materiałach.

W większości analizowanych paliw zawartość popiołu była dużo niższa od popiołu w paliwie klasycznym (węglu kamiennym), jedynie komunalne osady ściekowe posiadały znacznie większe wartości tego wskaźnika. Związane jest to

3. Badania własne

z zawartością substancji mineralnych (niepalnych) w paliwie. Wyniki zawartości części lotnych (czyli substancji palnych) w analizowanych paliwach pokazują, że np. badany odpad gumowy posiada znacznie wyższą zawartość części lotnych od węgla kamiennego, przy porównywalnej zawartości popiołu. Tworzywa sztuczne, mimo znacznie niższej zawartości popiołu, posiadają dużo wyższą zawartość części lotnych również w porównaniu do miazgi węglowej, ale już odpady farbiarskie (mimo, że to również plastometry) zawartość substancji lotnych posiadają dużo niższą. Ta analiza porównawcza związane jest przede wszystkim z zawartością substancji organicznych w tych paliwach, a więc analizą pierwiastków elementarnych, takich jak węgiel, azot i siarka, przedstawionych w tabeli 3.24. Tworzywa sztuczne, odpady gumowe, mimo niskich zawartości azotu n^a i siarki s^a , posiadają duże zawartości węgla elementarnego c^a , co ostatecznie powoduje dużo większą zawartość substancji organicznych, a więc lotnych w porównaniu do węgla kamiennego. Niskie zawartości pierwiastków organicznych w odpadach farbiarskich jednoznacznie potwierdzają dużo niższą zawartość substancji lotnych w tym paliwie w porównaniu do tych wartości w węglu kamiennym. Osady ściekowe posiadają znacznie większą zawartość substancji lotnych od węgla kamiennego tylko ze względu na znaczne wartości procentowe pierwiastków elementarnych siarki s^a i azotu n^a .

3.2.3. Proces spalania

3.2.3.1. Metodyka badań

W badaniach procesu spalania paliw użytych do badań, przedstawionych w rozdziale 3.2.2., jako parametry niezależne (zmienne) przyjęto:

X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T , K

X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ ,

X_3 – wskaźnik masy materiału m , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Pierwszy wskaźnik X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T , mierzony był w czasie trwania badań przy pomocy mikroprocesorowego programatora temperatury MRt-4 typu PID, umieszczonego w płaszczu grzewczym konstrukcji pieca. Jest to urządzenie przeznaczone do pomiaru, regulacji i programowania temperatury urządzeń grzewczych z dokładnością $\pm 5\text{K}$.

Drugi wskaźnik X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ , zwany też liczbą nadmiaru powietrza [26, 34], jest jednym z najważniejszych parametrów określających warunki spalania. Definiuje się go następująco:

$$\lambda = \frac{\text{ilość powietrza dostarczona do spalania}}{\text{ilość powietrza teoretycznie potrzebna do spalania}}$$

Każde paliwo potrzebuje odpowiedniej ilości powietrza (tlenu) aby zaszła stechiometryczna zależność (dostarczono dokładnie tyle powietrza, ile jest potrzebne, aby całe paliwo zostało spalone), wtedy współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. W praktyce spalanie następuje gdy $\lambda > 1$, gdyż osiągnięcie całkowitego spalania przy stechiometrycznej ilości tlenu jest niemal niemożliwe.

W badaniach własnych współczynnik nadmiaru powietrza λ wyznaczono poprzez analizę spalin. Ograniczono się do wskazań zawartości O_2 , wyliczając współczynnik λ ze wzoru:

$$\lambda = \frac{20,95}{20,95 - O_{2p}} \quad (3.14)$$

gdzie:

O_{2p} – udział tlenu zmierzonego w spalinach

Powietrze doprowadzane do układu regulowano w ten sposób, aby zawęzić zakres współczynnika λ do wartości stosowanych dla paliw stałych w instalacjach zarówno z rusztami ręcznymi, ($\lambda = 1,3 \div 1,6$) jak i z rusztami mechanicznymi ($\lambda = 1,6 \div 2,1$) [35].

Ostatni parametr – wskaźnik masy materiału m , jest parametrem określającym wielkość próbki badanego paliwa jako wsadu do pieca, w odniesieniu do objętości komory spalania tego pieca.

Natomiast parametry zależne (wynikowe) w badaniach procesu spalania to:

Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2} , $mg \cdot m^{-3}$,

Y_2 – stężenie tlenków azotu c_{NO_x} , $mg \cdot m^{-3}$,

Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) c_{CO} , $mg \cdot m^{-3}$.

W pierwszej serii badań własnych procesu spalania, jako stałe parametry niezależne zostały przyjęte:

X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$,

X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot m^{-3}$.

Wartości te stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji.

Parametr X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T , został przyjęty jako zmienny parametr niezależny. Parametr ten zmieniano w zakresie: $873,15 \div 1443,15K$, zwiększając go co $100K$, przy czym graniczną wartością była temperatura $1443,15K$, gdyż właśnie maksymalnie taką można było uzyskać

w strefie spalania reaktora pieca, z wykorzystaniem którego prowadzono badania własne procesu spalania.

W kolejnym etapie tych badań, parametrami niezależnymi stałymi (które stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji) były:

X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$,

X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Drugi rozpatrywany parametr zmienny niezależny (X_2) tj. współczynnik nadmiaru powietrza λ , zmieniano w przedziale: $1,3 \div 2,0$.

W trzecim etapie badań procesu spalania, parametrami niezależnymi stały były:

X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$,

X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$.

W etapie tym zmieniano parametr X_3 , tj. wskaźnik masy materiału m , którego wartości wynosiły: $1,2, 2,4$ i $3,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.2.3.2. Zestawienie wyników badań procesu spalania osadów ściekowych

3.2.3.2.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych pokazano w tabeli Z1 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z1.

Wykres na rysunku Z1 aproksymowano następującym równaniem:

$$c_{SO_2}(T) = a + b \cdot T \quad (3.15)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

a, b – współczynniki funkcji aproksymacyjnej

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(T) = -402,2 + 0,625079 \cdot T \quad (3.16)$$

przy czym stała aproksymacji dla punktu centralnego $C^T = c_{\text{SO}_2}(1273,15)$ przyjmie wartość $C^T = 393,62$

W tabeli Z2 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z2.

Wykres na rysunku Z2 aproksymowano następującym równaniem:

$$c_{\text{SO}_2}(\lambda) = a + b \cdot \lambda \quad (3.17)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

a, b – współczynniki funkcji aproksymacyjnej

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(\lambda) = 511,23 - 82,25 \cdot \lambda \quad (3.18)$$

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda) = c_{\text{SO}_2}(T) + c_{\text{SO}_2}(\lambda) - C^T \quad (3.19)$$

Równanie to w pełnym zapisie funkcyjnym z uwzględnieniem wartości współczynników stałych przy zmiennych niezależnych przyjmie następującą postać końcową:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda) = 0,625079 \cdot T - 82,25 \cdot \lambda - 284,59 \quad (3.20)$$

3. Badania własne

przy czym stała aproksymacji dla punktu centralnego $C^{T\lambda} = c_{SO_2}(1273,15;1,8)$ przyjmie wartość $C^{T\lambda} = 363,18$

W tabeli Z3 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych. Rysunek Z3 przedstawia zawarte w tabeli Z3 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych.

Wykres na rysunku Z3 aproksymowano równaniem:

$$c_{SO_2}(m) = a + b \cdot m \quad (3.21)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

a, b – współczynniki funkcji aproksymacyjnej

Równanie po trzecim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(m) = 79,222 + 250,012 \cdot m \quad (3.22)$$

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(T,\lambda,m) = c_{SO_2}(T) + c_{SO_2}(\lambda) + c_{SO_2}(m) - (C^T + C^{T\lambda}) \quad (3.23)$$

Powyższe równanie w pełnym zapisie funkcyjnym z uwzględnieniem wartości współczynników stałych przy zmiennych niezależnych przyjmie następującą postać końcową:

$$c_{SO_2}(T,\lambda,m) = 0,625079 \cdot T - 82,25 \cdot \lambda + 250,012 \cdot m - 568,547 \quad (3.24)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.2.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych pokazano w tabeli Z4 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z4.

Wykres na rysunku Z4 aproksymowano następującym równaniem:

$$c_{NO_x}(T) = -798,53 + 0,933049 \cdot T \quad (3.25)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z5 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z5.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu wyznaczone analogicznie jak w rozdziale 3.2.3.2.1, przyjmie następującą postać:

$$c_{NO_x}(T, \lambda) = 0,933049 \cdot T + 100,734 \cdot \ln(-1,1256 + \lambda) - 729,98 \quad (3.26)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z6 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych. Rysunek Z6 przedstawia zawarte w tabeli Z6 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu wyznaczone analogicznie jak w rozdziale 3.2.3.2.1, przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 0,933049 \cdot T + 100,734 \cdot \ln(-1,1256 + \lambda) + 232,76 \cdot m + - 1014,058 \quad (3.27)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.2.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych pokazano w tabeli Z7 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z7.

Wykres na rysunku Z7 aproksymowano następującym równaniem:

$$c_{\text{CO}}(T) = -95,575 + \exp(15,8043 - 0,00871 \cdot T) \quad (3.28)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

3. Badania własne

W tabeli Z8 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z8.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T,\lambda) = \exp(15,8043 - 0,00871 \cdot T) - 10,938 \cdot \lambda - 79,53 \quad (3.29)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z9 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania osadów ściekowych. Na rysunku Z9 przedstawiono, zawarte w tabeli Z9, wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T,\lambda,m) = \exp(15,8043 - 0,00871 \cdot T) - 10,938 \cdot \lambda + \\ + \exp(-0,17473 + 0,700254 \cdot m) - 81,259 \quad (3.30)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.3. Zestawienie wyników badań procesu spalania miazłu węglowego

3.2.3.3.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazłu węglowego pokazano w tabeli Z10 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z10.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(T) = -82,818 + 0,130189 \cdot T \quad (3.31)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z11 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazłu węglowego. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z11.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(T, \lambda) = 0,130189 \cdot T - 63,98 \cdot \lambda + 32,52 \quad (3.32)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z12 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazłu węglowego. Rysunek Z12 przedstawia, zawarte w tabeli Z12, wyniki badań wpływu wskaźnika

masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazłu węglowego.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,130189 \cdot T - 63,98 \cdot \lambda + 57,7363 \cdot m - 33,140 \quad (3.33)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.3.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazłu węglowego pokazano w tabeli Z13 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z13.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T) = -230,99 + 0,287215 \cdot T \quad (3.34)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z14 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazłu węglowego. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z14.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda) = 0,287215 \cdot T + \exp(3,56173 + 0,96152 \cdot \lambda) - 429,71 \quad (3.35)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z15 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miału węglowego. Rysunek Z15 przedstawia, zawarte w tabeli Z15, wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 0,287215 \cdot T + \exp(3,56173 + 0,96152 \cdot \lambda) + 79,7792 \cdot m + - 519,367 \quad (3.36)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.3.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miału węglowego pokazano w tabeli Z16 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z16.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{CO}}(T) = -160,14 + \exp(15,3166 - 0,00804 \cdot T) \quad (3.37)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z17 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miazgu węglowego. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z17.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda) = \exp(15,3166 - 0,00804 \cdot T) - 15,808 \cdot \lambda - 115,91 \quad (3.38)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z18 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania miazgu węglowego. Na rysunku Z18 przedstawiono zawarte w tabeli Z18 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(15,3166 - 0,00804 \cdot T) - 15,808 \cdot \lambda + 4,63542 \cdot m + - 121,604 \quad (3.39)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.4. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów farbiarskich

3.2.3.4.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich pokazano w tabeli Z19 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z19.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(T) = -16,737 + 0,035676 \cdot T \quad (3.40)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z20 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z20.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(T, \lambda) = 0,035676 \cdot T - 5,8452 \cdot \lambda - 4,28 \quad (3.41)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z21 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich.

Rysunek Z21 przedstawia zawarte w tabeli Z21 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,035676 \cdot T - 5,8452 \cdot \lambda + 42,9 \cdot m - 58,114 \quad (3.42)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.4.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich pokazano w tabeli Z22 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z22.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T) = -104,49 + \exp(4,125 + 0,817 \cdot 10^{-3} \cdot T) \quad (3.43)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z23 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z23.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda) = \exp(4,125 + 0,817 \cdot 10^{-3} \cdot T) + \exp(0,80273 + 1,5583 \cdot \lambda) - 139,36 \quad (3.44)$$

gdzie:

- c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,
- T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,
- λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z24 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich. Rysunek Z24 przedstawia zawarte w tabeli Z24 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = \exp(4,125 + 0,817 \cdot 10^{-3} \cdot T) + \exp(0,80273 + 1,5583 \cdot \lambda) + 28,2302 \cdot m - 169,989 \quad (3.45)$$

gdzie:

- c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,
- T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,
- λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.
- m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.4.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich pokazano w tabeli Z25 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z25.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

3. Badania własne

$$c_{CO}(T) = -13,654 + \exp(16,3796 - 0,01024 \cdot T) \quad (3.46)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z26 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z26.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda) = \exp(16,3796 - 0,01024 \cdot T) - 11,584 \cdot \lambda + 0,31 \quad (3.47)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z27 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania odpadów farbiarskich. Na rysunku Z27 przedstawiono, zawarte w tabeli Z27, wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(16,3796 - 0,01024 \cdot T) - 11,584 \cdot \lambda + 4,55729 \cdot m - 5,481 \quad (3.48)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.5. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów gumowych

3.2.3.5.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych pokazano w tabeli Z28 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z28.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T) = -148,89 + \exp(4,69615 + 0,001282 \cdot T) \quad (3.49)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z29 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z29.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda) = \exp(4,69615 + 0,001282 \cdot T) - 26,085 \cdot \lambda - 111,56 \quad (3.50)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z30 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych.

Rysunek Z30 przedstawia zawarte w tabeli Z30 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = \exp(4,69615 + 0,001282 \cdot T) - 26,085 \cdot \lambda + 313,408 \cdot m + - 470,748 \quad (3.51)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.5.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych pokazano w tabeli Z31 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z31.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T) = -596,27 + 107,983 \cdot \log(-549,37 + T) \quad (3.52)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z32 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z32.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda) = 107,983 \cdot \log(-549,37 + T) + 109,428 \cdot \lambda - 394,53 \quad (3.53)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli 33 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych. Rysunek Z33 przedstawia, zawarte w tabeli Z33, wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 107,983 \cdot \log(-549,37 + T) + 109,428 \cdot \lambda + 53,3854 \cdot m - 451,127 \quad (3.54)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.5.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych pokazano w tabeli Z34 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z34.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{CO}(T) = -19,082 + \exp(16,2586 - 0,00994 \cdot T) \quad (3.55)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z35 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z35.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda) = \exp(16,2586 - 0,00994 \cdot T) - 9,9784 \cdot \lambda - 8,73 \quad (3.56)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z36 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania odpadów gumowych. Na rysunku Z36 przedstawiono zawarte w tabeli Z36 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(16,2586 - 0,00994 \cdot T) - 9,9784 \cdot \lambda + 25,0677 \cdot \ln(2,14362 + m) - 38,898 \quad (3.57)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.6. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliestry

3.2.3.6.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych pokazano w tabeli Z37 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z37.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(T) = -4,7113 + 0,012461 \cdot T \quad (3.58)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z38 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z38.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(T, \lambda) = 0,012461 \cdot T - 2615,6 \cdot \log(166,712 + \lambda) + 13406,24 \quad (3.59)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z39 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych. Rysunek Z39 przedstawia zawarte w tabeli Z39 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(T, \lambda, m) = 0,012461 \cdot T - 2615,6 \cdot \log(166,712 + \lambda) + 78,65 \cdot m + 5724,551 \quad (3.60)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.6.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych pokazano w tabeli Z40 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z40.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{NO_x}(T) = -812,17 + 121,754 \cdot \log(0,15795 + T) \quad (3.61)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

3. Badania własne

W tabeli Z41 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z41.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda) = 121,754 \cdot \log(0,15795 + T) + \exp(-0,99791 + 1,83528 \cdot \lambda) - 325,75 \quad (3.62)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,
 T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,
 λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z42 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych. Rysunek Z42 przedstawia zawarte w tabeli Z42 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 121,754 \cdot \log(0,15795 + T) + \exp(-0,99791 + 1,83528 \cdot \lambda) + 13,3701 \cdot \log(m) - 328,04 \quad (3.63)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,
 T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,
 λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna,
 m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.6.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych pokazano w tabeli Z43 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z43.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{CO}(T) = -1,3186 + \exp(20,2737 - 0,01414 \cdot T) \quad (3.64)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z44 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z44.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda) = \exp(20,2737 - 0,01414 \cdot T) - 4,88 \cdot \lambda + 7,84 \quad (3.65)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z45 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania odpadów poliestrowych. Na rysunku Z45 przedstawiono zawarte w tabeli Z45 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(20,2737 - 0,01414 \cdot T) - 4,88 \cdot \lambda + 1204,74 \cdot \ln(m) - 211,808 \quad (3.66)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.7. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliolefiny

3.2.3.7.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych pokazano w tabeli Z46 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z46.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(T) = -12,842 + 0,025382 \cdot T \quad (3.67)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z47 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z47.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda) = 0,025382 \cdot T - 17,259 \cdot \lambda + 16,68 \quad (3.68)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z48 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych. Rysunek Z48 przedstawia zawarte w tabeli Z48 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,025382 \cdot T - 17,259 \cdot \lambda + 9,11625 \cdot m + 5,853 \quad (3.69)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.7.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych pokazano w tabeli Z49 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z49.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T) = 17,6321 + 0,064429 \cdot T \quad (3.70)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z50 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z50.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{NO_x}(T, \lambda) = 0,064429 \cdot T + 72,6874 \cdot \log(-0,54412 + \lambda) + 3,52 \quad (3.71)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z51 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych. Rysunek Z51 przedstawia zawarte w tabeli Z51 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{NO_x}(T, \lambda, m) = 0,064429 \cdot T + 72,6874 \cdot \log(-0,54412 + \lambda) + 19,2187 \cdot m - 9,919 \quad (3.72)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.7.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych pokazano w tabeli Z52 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z52.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{CO}}(T) = -1408,7 + \exp(10,4657 - 0,00152 \cdot T) \quad (3.73)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z53 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z53.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda) = \exp(10,4657 - 0,00152 \cdot T) - 17,259 \cdot \lambda - 5018,04 \quad (3.74)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z54 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania odpadów poliolefinowych. Na rysunku Z54 przedstawiono zawarte w tabeli Z54 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(10,4657 - 0,00152 \cdot T) - 17,259 \cdot \lambda + 945,885 \cdot m - 2638,603 \quad (3.75)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.8. Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliwinyle

3.2.3.8.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych pokazano w tabeli Z55 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z55.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(T) = -973,49 + 154,649 \cdot \log(T) \quad (3.76)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z56 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z56.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda) = 154,649 \cdot \log(T) - 8,8266 \cdot \lambda - 328,89 \quad (3.77)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z57 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych. Rysunek Z57 przedstawia zawarte w tabeli Z57 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 154,649 \cdot \log(T) - 8,8266 \cdot \lambda + 191,304 \cdot \log(m) - 363,308 \quad (3.78)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.2.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych pokazano w tabeli Z58 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z58.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T) = -37,79 + \exp(2,25864 + 0,001627 \cdot T) \quad (3.79)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z59 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z59.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda) = \exp(2,25864 + 0,001627 \cdot T) + 43,0261 \cdot \log(\lambda) - 55,68 \quad (3.80)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z60 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych. Rysunek Z60 przedstawia zawarte w tabeli Z60 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = \exp(2,25864 + 0,001627 \cdot T) + 43,0261 \cdot \log(\lambda) + 11,6594 \cdot m - 55,635 \quad (3.81)$$

gdzie:

c_{NOx} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa,

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.2.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania reaktora w piecu na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych pokazano w tabeli Z61 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z61.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{CO}(T) = 23219,1 - 31,453 \cdot T + 0,010703 \cdot T^2 \quad (3.82)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

W tabeli Z62 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z62.

Równanie po drugim stopniu aproksymacji przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda) = - 31,453 \cdot T + 0,010703 \cdot T^2 - 33,933 \cdot \lambda + 23003,94 \quad (3.83)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

W tabeli Z63 przedstawiono wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania odpadów poliwinylowych. Na rysunku Z63 przedstawiono zawarte w tabeli Z63 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla w procesie spalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = - 31,453 \cdot T + 0,010703 \cdot T^2 - 33,933 \cdot \lambda + 93,5938 \cdot m + 22889,878 \quad (3.84)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

T – temperatura w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna.

m – wskaźnik masy materiału, $kg \cdot m^{-3}$ – wielkość niezależna

3.2.3.9. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych po procesie spalania

W celu analizy wyników badań wpływu zmiennych niezależnych na stężenia badanych gazów spalinowych (SO_2 , NO_x , CO) w procesie spalania wybranych paliw, zestawiono te wyniki w postaci zbiorczych tabel opisujących wpływ parametrów zmiennych na poszczególne stężenia gazów spalinowych. W tabeli 3.25 i graficznie na rysunkach 3.2÷3.5 pokazano wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia gazów spalinowych w procesie spalania badanych paliw przy stałych wartościach następujących parametrów niezależnych: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Następnie w tabeli 3.26 i na wykresach (rysunki 3.6÷3.9) pokazano zależności pomiędzy współczynnikiem nadmiaru powietrza a wybranymi do badań stężeniami gazów spalinowych powstających w procesie spalania badanych paliw przy stałych wartościach następujących parametrów niezależnych: $T = 1273,15\text{K}$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Natomiast tabela 3.27 i rysunki 3.10÷3.13 przed-

3. Badania własne

stawiają wpływ wskaźnika masy materiału na stężenia SO_2 , NO_x , CO powstających w procesie spalania badanych paliw przy stałych wartościach następujących parametrów niezależnych: $T = 1273,15\text{K}$, $\lambda = 1,8$.

Tabela 3.25. Wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie spalania badanych paliw;

stałe parametry niezależne: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Paliwo	Osady ściekowe		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	150,01	42,95	3515,75
973,15	218,08	76,88	1531,94
1073,15	261,40	193,83	493,56
1173,15	326,33	293,05	21,19
1273,15	364,79	416,87	12,63
1373,15	449,88	475,70	2,56
1443,15	528,53	545,30	0,00
Paliwo	Węgiel kamienny		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	30,32	16,81	3779,19
973,15	42,61	43,46	1985,25
1073,15	57,20	80,98	600,88
1173,15	70,21	112,85	18,31
1273,15	86,09	138,17	16,75
1373,15	98,38	166,77	5,06
1443,15	100,67	174,05	0,00
Paliwo	Odpady gumowe		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	187,62	30,85	1939,13
973,15	215,79	41,21	673,38
1073,15	250,54	67,04	325,19
1173,15	317,89	92,56	17,06
1273,15	402,83	118,08	10,13
1373,15	507,36	131,51	0,50
1443,15	566,14	135,40	0,00
Paliwo	Odpady farbiarskie		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	14,59	24,40	1690,25
973,15	17,73	30,85	562,06
1073,15	20,59	40,08	283,00
1173,15	25,45	56,99	11,69
1273,15	30,32	73,49	7,44
1373,15	32,32	88,66	0,31
1443,15	33,75	93,28	0,00

3. Badania własne

Tabela 3.25.cd. Wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie spalania badanych paliw;

stałe parametry niezależne: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Paliwo	Odpady poliestrowe PET		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	5,86	15,68	2762,06
973,15	7,58	21,32	1006,13
1073,15	8,58	32,39	164,56
1173,15	10,01	52,48	30,81
1273,15	11,73	62,42	8,75
1373,15	12,30	69,09	3,63
1473,15	13,30	72,26	1,25
Paliwo	Odpady poliolefinowe PP		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	9,44	72,57	7700,19
973,15	11,58	79,54	6886,00
1073,15	14,87	88,56	5435,25
1173,15	17,02	93,89	4408,00
1273,15	18,73	104,04	3569,81
1373,15	22,02	106,50	2727,56
1473,15	24,88	109,57	2516,06
Paliwo	Odpady poliwinyłowe PCW		
T, K	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
873,15	71,93	5,23	4045,19
973,15	85,23	8,30	2408,88
1073,15	111,25	12,51	1645,06
1173,15	124,55	21,94	740,13
1273,15	135,71	45,20	249,94
1373,15	140,57	57,09	190,81
1473,15	151,01	63,35	158,81

3. Badania własne

Tabela 3.26. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie spalania badanych paliw;

stałe parametry niezależne: $T = 1273,15K$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Paliwo	Osady ściekowe		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	403,26	281,88	18,13
1,5	388,67	359,57	15,25
1,8	364,79	416,87	12,63
2,0	345,35	445,26	10,19
Paliwo	Węgiel kamienny		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	114,69	60,89	24,44
1,5	101,67	80,87	21,06
1,8	86,09	138,17	16,75
2,0	68,35	175,69	13,19
Paliwo	Odpady gumowe		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	414,41	55,35	15,38
1,5	409,55	77,29	12,50
1,8	402,83	118,08	10,13
2,0	395,68	128,54	8,13
Paliwo	Odpady farbiarskie		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	33,46	53,20	13,56
1,5	32,60	57,71	11,31
1,8	30,32	73,39	7,44
2,0	29,46	85,79	5,63
Paliwo	Odpady poliestrowe PET		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	19,31	56,38	11,19
1,5	16,73	57,91	9,50
1,8	11,73	62,42	8,75
2,0	8,29	66,73	6,81
Paliwo	Odpady poliolefinowe PP		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	26,60	65,29	5409,50
1,5	22,74	82,00	4393,88
1,8	18,73	104,04	3569,81
2,0	14,01	112,65	2154,00
Paliwo	Odpady poliwinylowe PCW		
λ	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,3	140,14	30,34	264,63
1,5	137,42	37,11	255,31
1,8	135,71	45,20	249,94
2,0	133,56	49,71	238,81

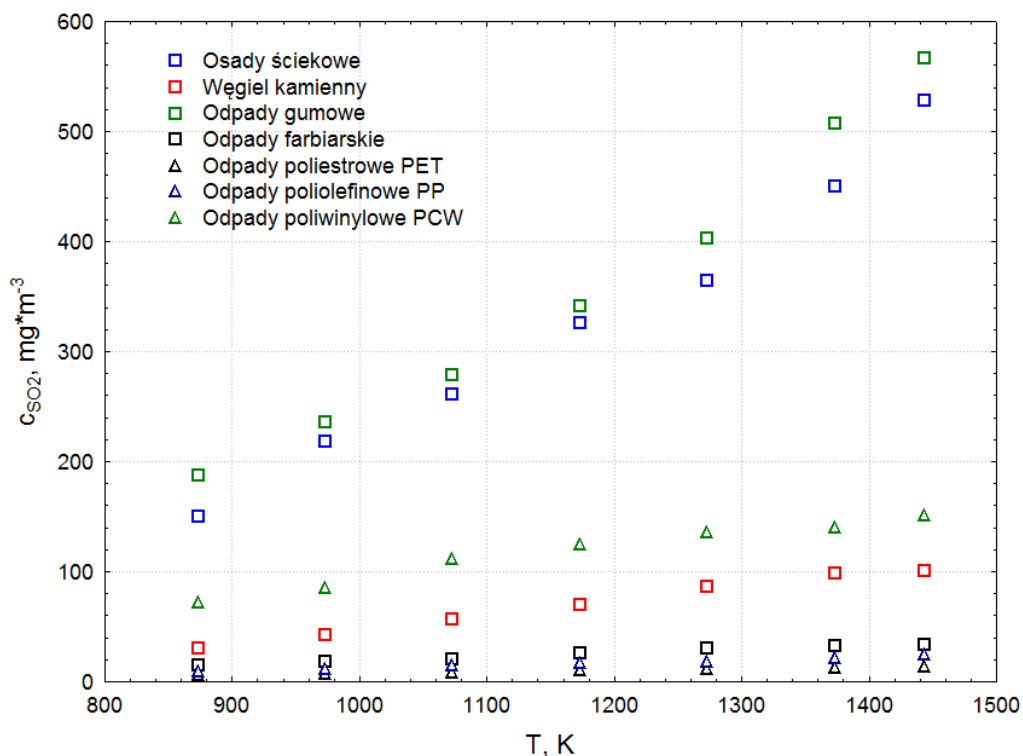
3. Badania własne

Tabela 3.27. Wpływ wskaźnika masy materiału na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie spalania badanych paliw;

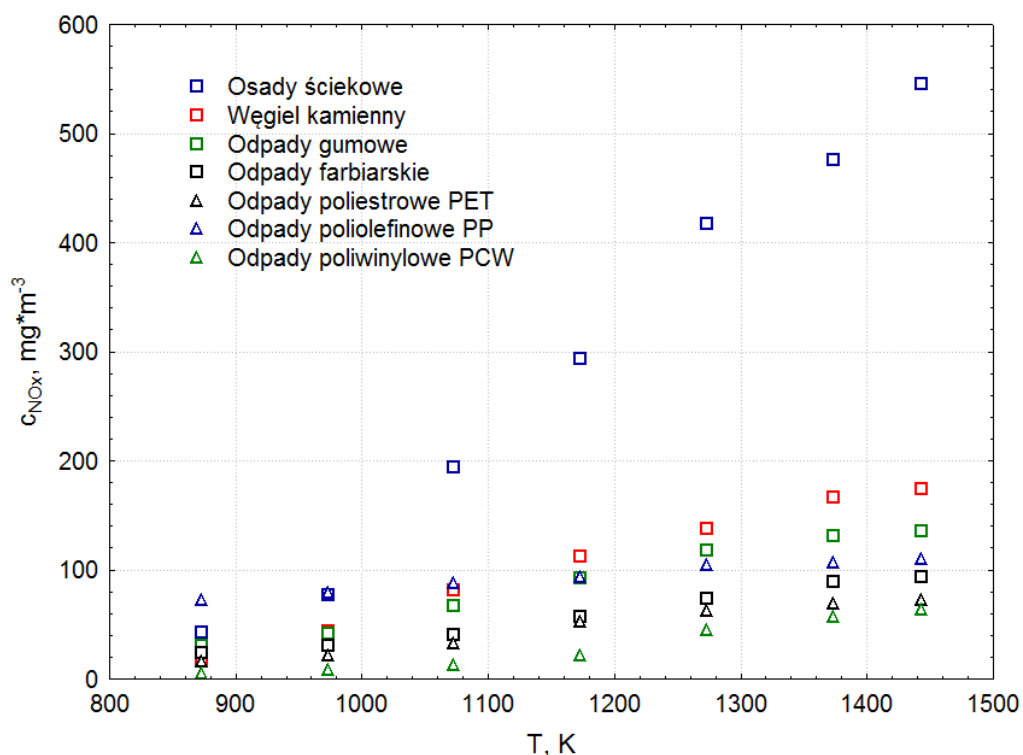
stałe parametry niezależne: $T = 1273,15K$, $\lambda = 1,8$

Paliwo	Osady ściekowe		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	364,79	416,87	12,63
2,4	708,14	753,38	15,19
3,6	964,82	975,49	21,13
Paliwo	Węgiel kamienny		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	86,09	137,97	16,75
2,4	157,30	242,41	21,13
3,6	224,65	329,44	27,88
Paliwo	Odpady gumowe		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	402,83	118,08	10,13
2,4	826,25	183,99	17,81
3,6	1155,01	246,21	23,69
Paliwo	Odpady farbiarskie		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	30,32	73,39	7,44
2,4	75,65	114,60	12,88
3,6	133,28	141,14	18,38
Paliwo	Odpady poliestrowe PET		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	11,73	62,42	8,75
2,4	103,39	71,85	843,81
3,6	200,49	77,08	1185,44
Paliwo	Odpady poliolefinowe PP		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	18,73	104,04	3569,81
2,4	27,60	122,08	4592,75
3,6	40,61	150,16	5839,94
Paliwo	Odpady poliwinylowe PCW		
$m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{SO}_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{NO}_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1,2	135,71	45,20	249,94
2,4	268,84	59,45	348,44
3,6	345,77	73,19	474,56

3. Badania własne

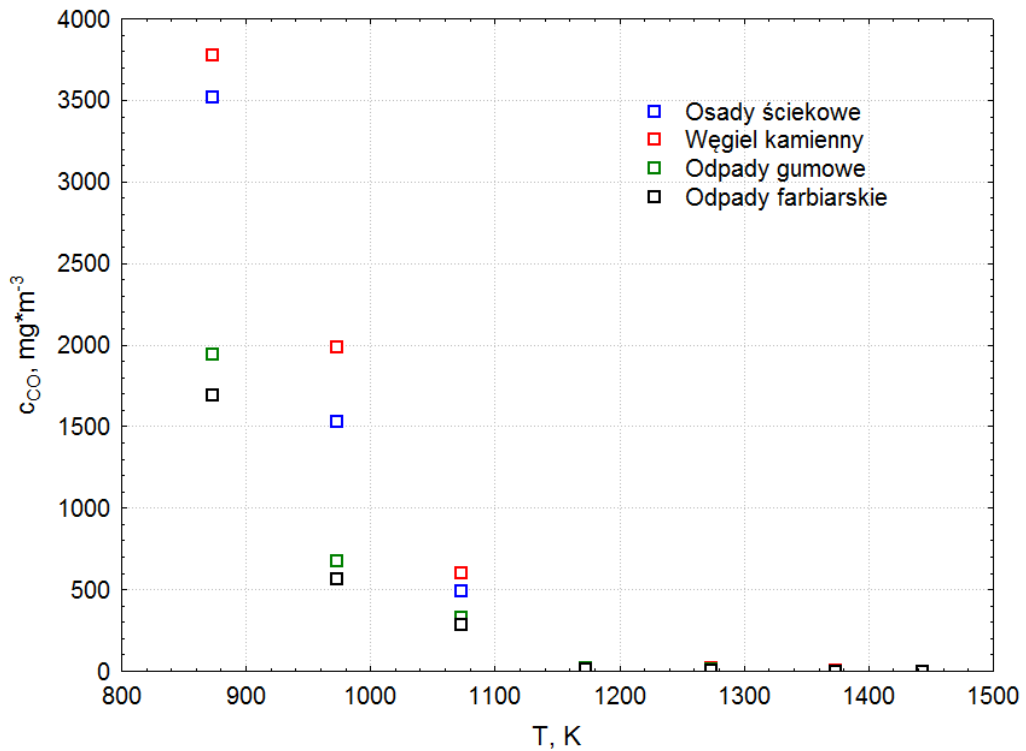


Rys. 3.2. Wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia tlenku siarki(IV) c_{SO_2} powstałego w procesie spalania badanych paliw;
parametry stałe: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

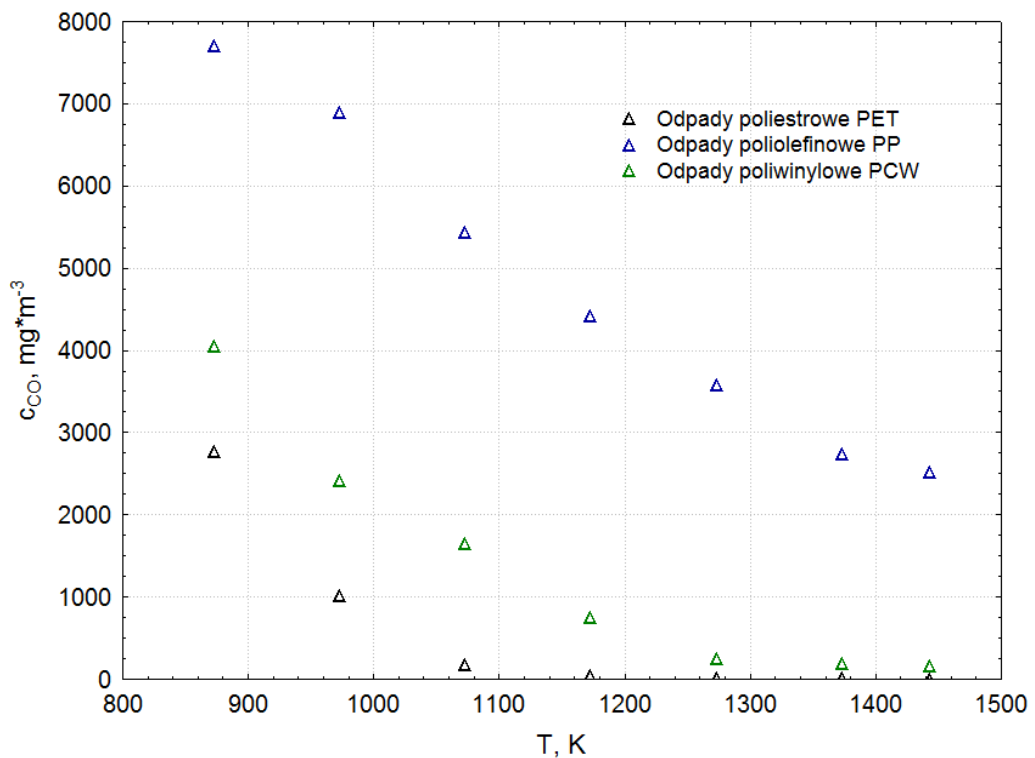


Rys. 3.3. Wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia tlenków azotu c_{NO_x} powstałych w procesie spalania badanych paliw;
parametry stałe: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

3. Badania własne

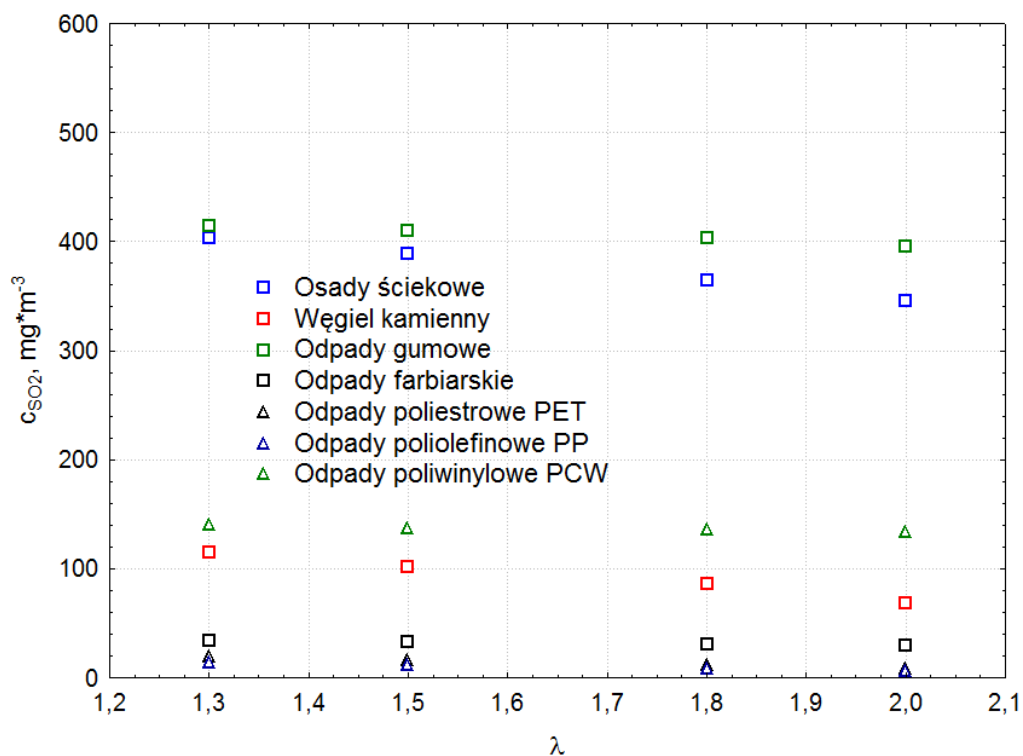


Rys. 3.4. Wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia tlenku węgla(II) c_{CO} powstałego w procesie spalania badanych paliw;
parametry stałe: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

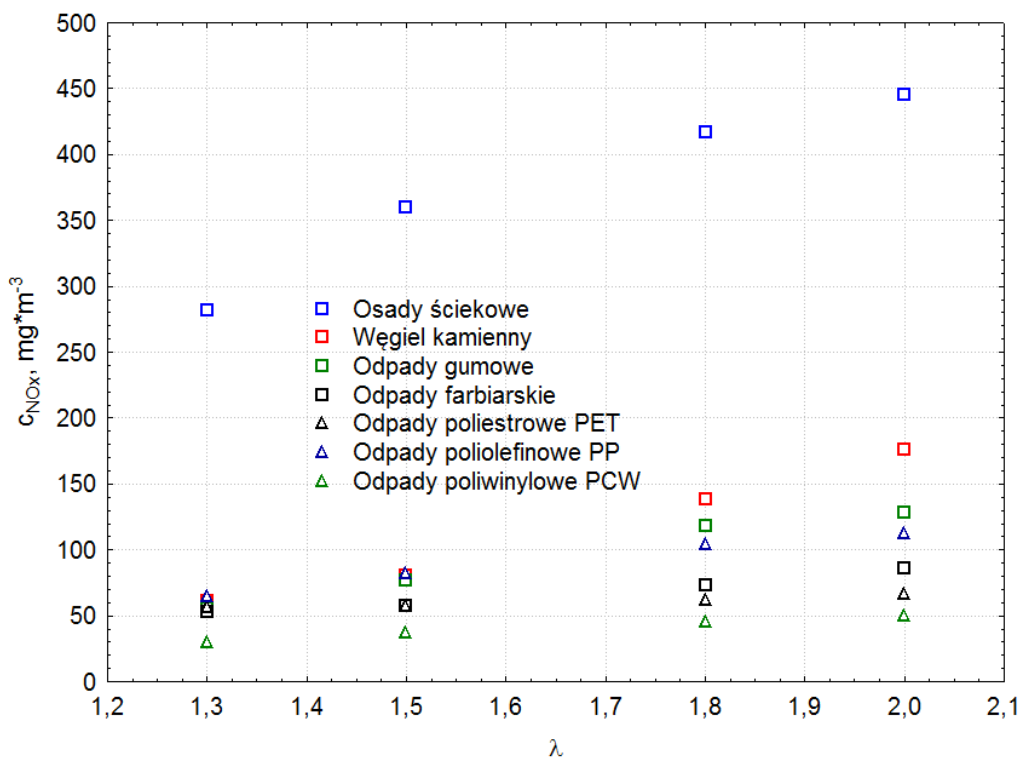


Rys. 3.5. Wpływ temperatury w strefie spalania na stężenia tlenku węgla(II) c_{CO} powstałego w procesie spalania badanych paliw;
parametry stałe: $\lambda = 1,8$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

3. Badania własne

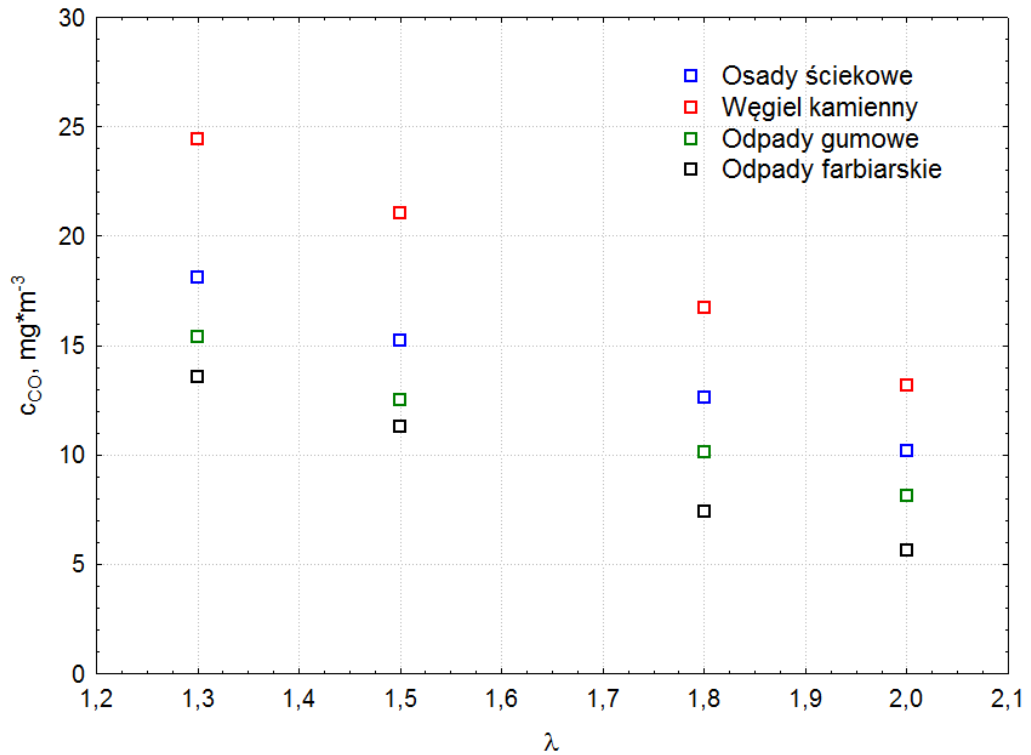


Rys. 3.6. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenku siarki(IV) c_{SO_2} powstałego w procesie spalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15K$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

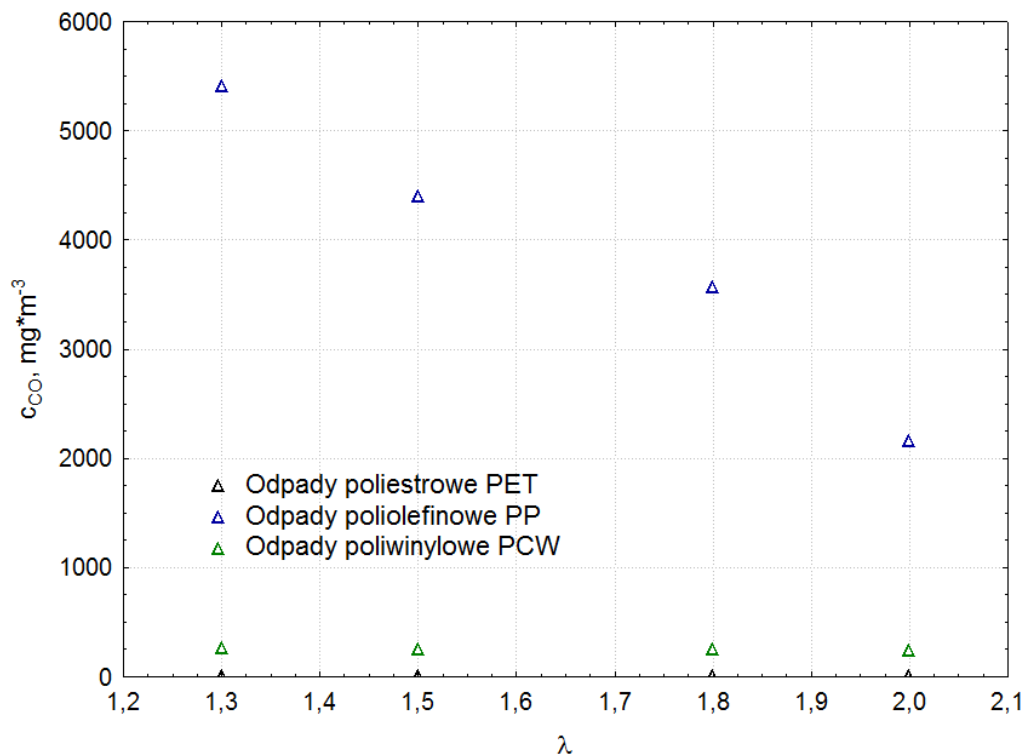


Rys. 3.7. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenków azotu c_{NO_x} powstałych w procesie spalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15K$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

3. Badania własne

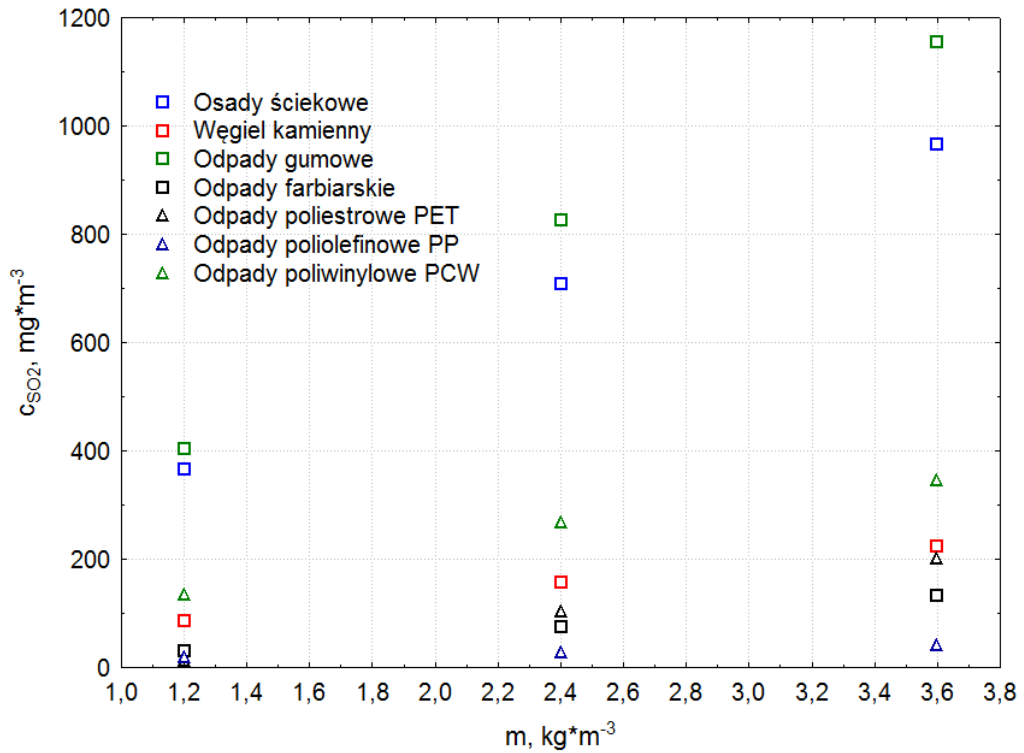


Rys. 3.8. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenku węgla(II) c_{CO} powstałego w procesie spalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15K$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

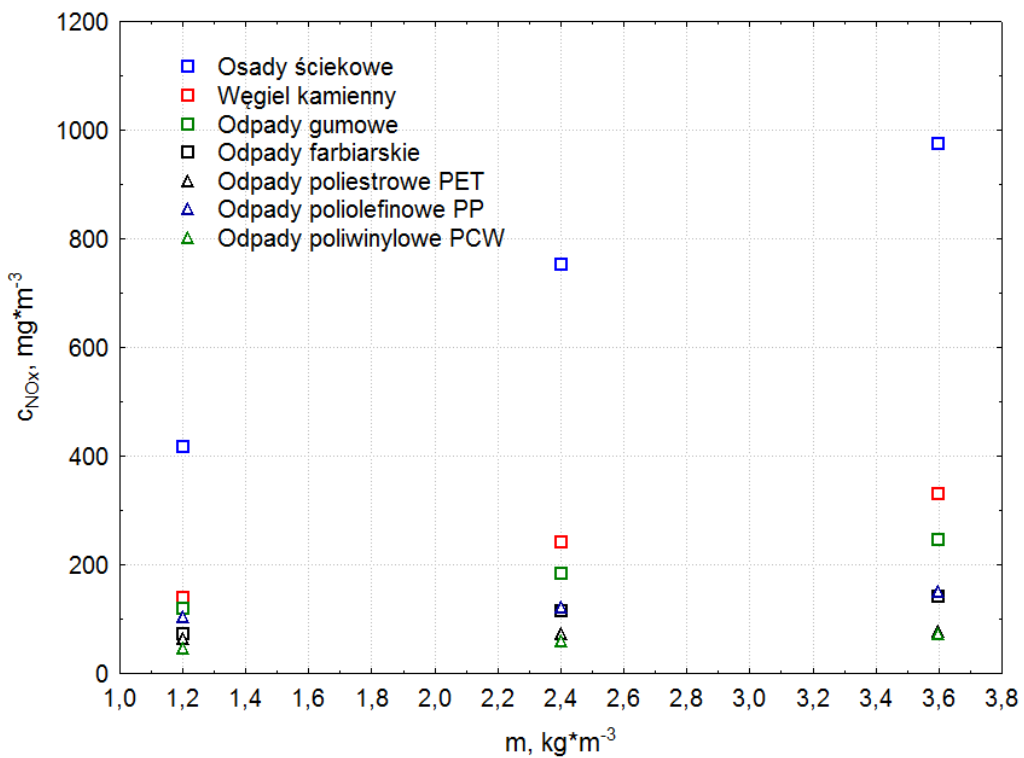


Rys. 3.9. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenku węgla(II) c_{CO} powstałego w procesie spalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15K$, $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

3. Badania własne

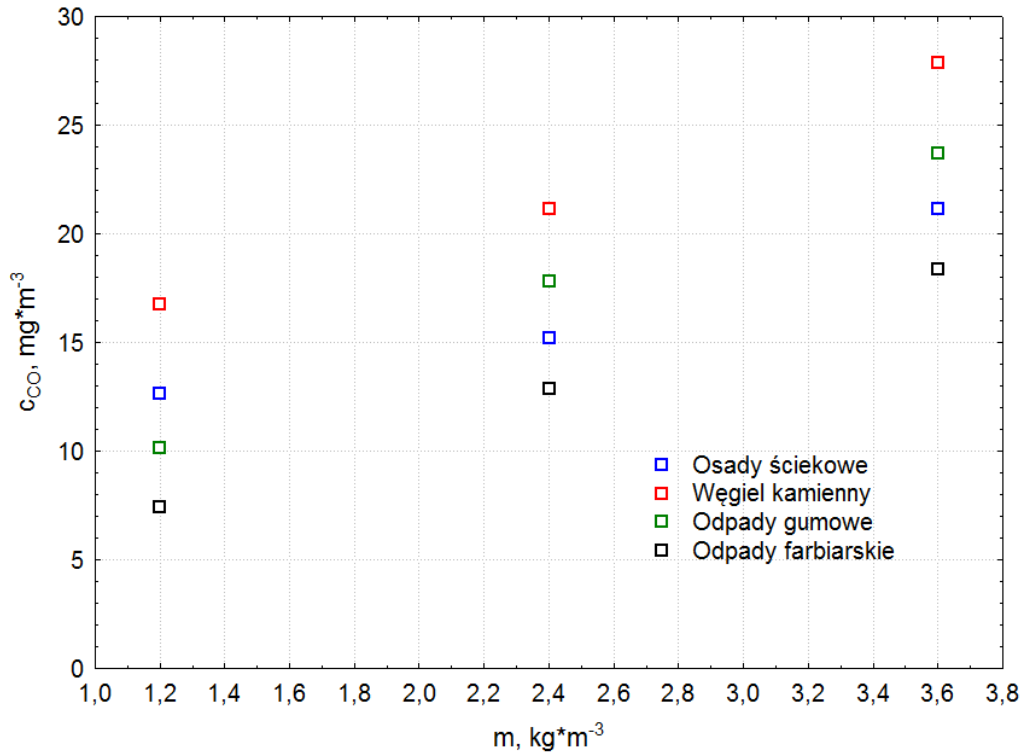


Rys. 3.10. Wpływ wskaźnika masy materiału na stężenia tlenku siarki(IV) c_{SO_2} powstałego w procesie spalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15\text{K}$, $\lambda = 1,8$

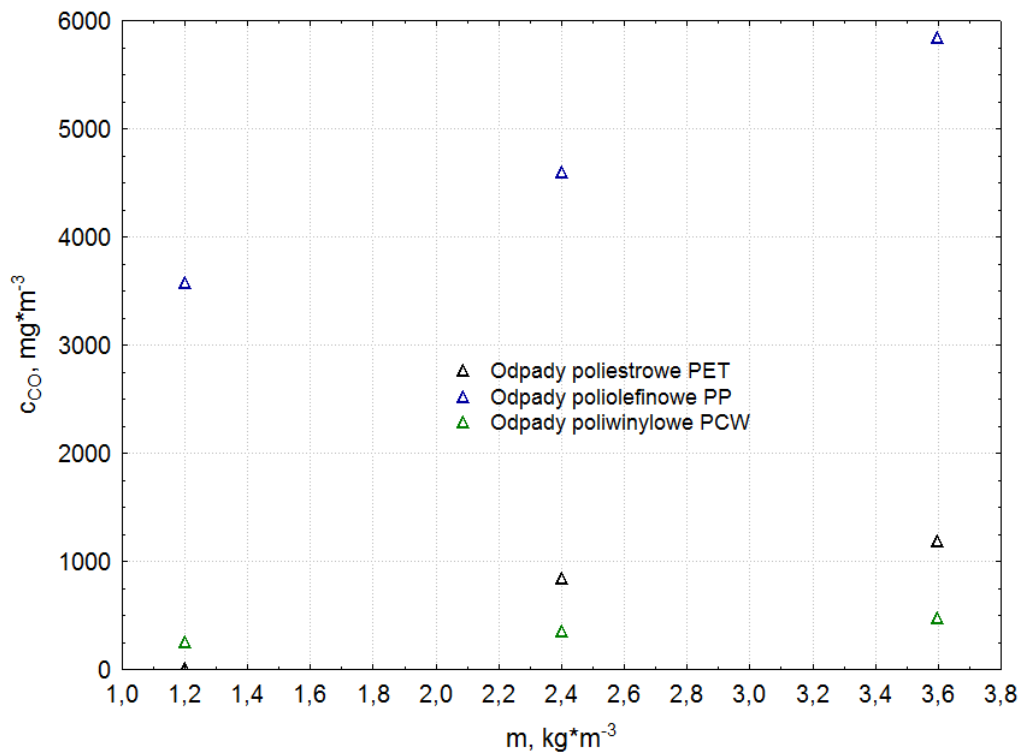


Rys. 3.11. Wpływ wskaźnika masy materiału na stężenia tlenków azotu c_{NO_x} powstałych w procesie spalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15\text{K}$, $\lambda = 1,8$

3. Badania własne



Rys. 3.12. Wpływ wskaźnika masy materiału na stężenia tlenku węgla(II) c_{CO} powstałego w procesie spalania badanych paliw;
parametry stałe: $T = 1273,15\text{K}$, $\lambda = 1,8$



Rys. 3.13. Wpływ wskaźnika masy materiału na stężenia tlenku węgla(II) c_{CO} powstałego w procesie spalania badanych paliw;
parametry stałe: $T = 1273,15\text{K}$, $\lambda = 1,8$

Stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2}

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie SO_2 powstałego w procesie spalania badanych paliw, przedstawionych w tabeli 3.25 i na rysunku 3.2, potwierdza przewidywanie, że wzrost temperatury spalania powoduje wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych paliw. Emisja tlenków siarki (podobnie jak i tlenków azotu) w największym stopniu zależy od rodzaju spalanego paliwa, gdyż źródłem tlenków siarki w spalinach są prawie wyłącznie procesy utleniania siarki zawartej w paliwie, domieszkach i dodatkach.

Zawarta w paliwach siarka podczas spalania jest w ponad 95% utleniana do SO_2 i tylko w nieznaczącej części do SO_3 [26, 32, 34]. Dlatego różnice w zakresach zmian stężenia SO_2 dla poszczególnych badanych paliw należy szukać w ich analizie elementarnej – tabela 3.24. Największe wartości stężeń tlenku siarki(IV) w spalinach zaobserwowano (zgodnie z wykresem na rysunkach 3.2, 3.6, 3.10) w procesie spalania osadów ściekowych i odpadów gumowych. W przypadku tych paliw maksymalne stężenia SO_2 (przy spalaniu w najwyższej temperaturze – 1443,15K) osiągało wartości powyżej $500,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Z zestawienia wyników literaturowych analizy elementarnej paliw przedstawionych w tabeli 3.24 widać wyraźnie, że to właśnie osady ściekowe i odpady gumowe charakteryzują się największą zawartością siarki paliwowej (około 1,7% dla osadów ściekowych i aż około 2,1% dla odpadów gumowych (zużytych opon samochodowych)).

Natomiast, ze względu na bardzo małą (około 0,2%) zawartość siarki elementarnej w paliwie, można zauważyć bardzo niski zakres zmian wartości c_{SO_2} w przypadku spalania plastomerów (odpadów poliolefinowych PP, poliwinylowych PET) oraz odpadów farbiarskich. Wartości tych stężeń osiągają maksymalne wartości rzędu $30,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Jednakże interesujący jest zakres zmian wartości stężeń tlenku siarki(IV) w spalinach zaobserwowany (zgodnie z wykresem na rysunkach 3.2, 3.6, 3.10) w procesie spalania odpadów z PCW. Mimo minimalnej zawartości siarki elementarnej w tym paliwie, zaobserwowano stosunkowo duży wzrost tych stężeń

(od około $70,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ do około $150,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ w całym zakresie zmian temperatury spalania). Można to wyjaśnić tym, że prawdopodobnie przyczyną tak wysokich, jak na ten materiał paliwowy, wartości stężeń SO_2 jest dodawany w przetwórstwie PCW i jego kopolimerów stabilizator termiczny i środek smarny w ilości $1 \div 2\%$ (jako smar – $0,5\%$). Dodatek ten charakteryzuje się stosunkowo dużą zawartością siarki. Ze względu na zawartość siarki nie powinien być on używany razem ze stabilizatorami zawierającymi ołów lub kadm. Tego typu stabilizatory stosowane są również jako impregnaty w produkcji farb i lakierów (podwyższają zawartość siarki w odpadach farbiarskich) oraz w przemyśle tekstylnym [14, 38]. Zawarta w tych środkach siarka podczas spalania może być utleniana do SO_2 i stąd większe stężenia tych gazów w spalinach podczas spalania odpadów z PCW niż innych tworzyw sztucznych.

Analiza zmian wartości stężeń tlenku siarki(IV) w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza (przy stałych wartościach temperatury w komorze spalania równej $1273,15\text{K}$ i stałej masie wsadu paliwa do tej komory), przedstawionych w tabeli 3.26 i pokazanych graficznie na rysunku 3.6 wskazuje jednoznacznie, że w procesie spalania wszystkich badanych paliw następował nieznaczny (kilku lub kilkunasto procentowy) spadek stężeń tlenku siarki(IV). Wynika to z tego, że wzrost zawartości tlenu z dostarczanego powietrza powodował szybsze utlenianie związków siarkowych do SO_3 niż SO_2 . Zaobserwowano znacznie większe wartości c_{SO_2} w przypadku badania procesu spalania osadów ściekowych i odpadów gumowych niż pozostałych badanych paliw. Oczywiście zależność ta jest efektem znacznie większej zawartości siarki paliwowej w osadach ściekowych i odpadach z zużytych opon samochodowych. W przypadku pozostałych paliw (odpadów z tworzyw sztucznych, farbiarskich i węgla kamiennego) liniowość zależności stężeń c_{SO_2} od współczynnika nadmiaru powietrza, podobnie jak temperatury spalania (rysunki 3.2, 3.6, 3.10), oznacza stałą utlenialność siarki paliwowej w badanym zakresie a wpływ tych parametrów nieznaczny.

Przedstawione w tabeli 3.27 i na rysunku 3.10 wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału na wartości stężeń tlenku siarki(IV) są podstawą do

następujących wniosków z analizy tych wyników: wzrost masy wsadu badanych paliw do komory pieca powodował wzrost stężeń c_{SO_2} w przypadku spalania wszystkich tych paliw. Jest to wzrost stały w całym zakresie zmian badanego parametru m . I w tym wypadku, podobnie jak w poprzednich analizach zmian stężeń tlenku siarki(IV), istotny wpływ na wielkość tych stężeń ma zawartość siarki paliwowej w badanym materiale.

Stężenie sumy tlenków azotu c_{NO_x}

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie powstałych w procesie spalania badanych paliw NO_x , przedstawionych w tabeli 3.26 i na rysunku 3.3, wskazuje, że wzrost temperatury spalania powoduje wzrost stężenia sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych paliw.

Należy podkreślić, że podwyższenie temperatury zawsze wywiera korzystny wpływ na szybkość reakcji utleniania. Produktem bezpośredniej reakcji syntezy tlenu zawartego w dostarczonym do komory spalania powietrzu z azotem zawartym w paliwie (a także w powietrzu) jest tlenek azotu(II). Powstaje on we wszystkich procesach wysokotemperaturowych. Im wyższa temperatura, tym reakcja ta jest intensywniejsza. Wskazuje na to przebieg (kształt) krzywych ilustrujących zmiany stężeń NO_x na rysunkach 3.3, 3.7, 3.11. Reakcja powstawania tlenku azotu(IV) przebiega wyłącznie w niższych temperaturach w obecności powietrza. Szybkość tej reakcji jest największa w temperaturze około 372,15K. Dlatego też w warunkach prowadzenia badań do niniejszej rozprawy (873,15÷1443,15K) udział reakcji utleniania NO do NO_2 był znikomy.

Jak wskazują wyniki badań przedstawione na rysunkach 3.3, 3.7 i 3.11 największe stężenia tlenków azotu miały miejsce w procesie spalania osadów ściekowych. Wiąże się to z dużą ilością azotu paliwowego w tym materiale, co obrazują wartości przedstawione w tabeli 3.24.

Jak podają dane literaturowe dotyczące procesów spalania, ze względu na mechanizm powstawania, tlenki azotu tworzące się podczas spalania paliw można podzielić na [26, 32, 34, 77]:

- Tlenki termiczne, które powstają w wyniku połączenia azotu zawartego w powietrzu spalania z tlenem. Ich ilość zależy głównie od temperatury spalania oraz – w mniejszym stopniu – od stężenia tlenu w strefie spalania.
- Tlenki paliwowe, które powstają podczas reakcji azotu związanego chemicznie z paliwem z tlenem. Ich ilość zależy od zawartości azotu w paliwie oraz stężenia tlenu dostarczanego do procesu spalania. W mniejszym stopniu na efektywność ich powstawania wpływa temperatura w komorze spalania pieca.

W związku z powyższym, w procesie spalania osadów ściekowych największy udział w wysokich wartościach c_{NOx} miały tlenki paliwowe, zarówno ze względu na ilość azotu elementarnego w paliwie, jak i ze względu na stosunkowo wysoki współczynnik nadmiaru powietrza ($\lambda = 1,8$), jako parametr niezależny będący parametrem stałym w badaniach wpływu temperatury spalania. Tlenki termiczne pojawiały się dopiero w wysokich temperaturach (powyżej 1000,15K).

Z zestawienia wyników literaturowych analizy elementarnej paliw przedstawionych w tabeli 3.24 widać, że również węgiel kamienny charakteryzuje się stosunkowo dużą zawartością azotu paliwowego. Ale z przebiegu zmian wartości c_{NOx} , w przypadku spalania tego paliwa, pokazanych na rysunku 3.3, wynika wyraźne stwierdzenie, że temperatura spalania w reaktorze pieca wpływa w mniejszym stopniu na efektywność powstawania NOx (nawet w wysokich temperaturach c_{NOx} jest stosunkowo niższe, ale mimo wszystko nieporównywalne z stężeniami NOx w procesie spalania innych badanych paliw). Sugeruje to stwierdzenie, że w procesie spalania węgla kamiennego powstają w większym stopniu tlenki paliwowe niż termiczne.

Wynikiem spalania odpadów z tworzyw sztucznych było powstawanie stosunkowo niskich wartości stężeń NOx, głównie tlenków termicznych, gdyż „czysty” polimer nie zawiera azotu elementarnego. Mimo wszystko, mogą powstawać w małym stopniu również NOx paliwowe, ze względu na antystatyki – substancje dodatkowe, dodawane w celu wyeliminowania zjawiska elektryzowania się powierzchni tworzyw sztucznych. Najczęściej stosowane antystatyki to związki zawierające azot. Prawdopodobnie, właśnie z dodatków w produkcji tworzyw

sztucznych powstają pewne ilości azotu elementarnego w odpadach z tych materiałów. Związki chemiczne, polepszające właściwości tworzyw sztucznych z reguły znacznie utrudniają ich utylizację a szczególnie ich termiczny rozkład, powodując wzrost emisji szkodliwych gazów, np. NO_x.

Ze względu na mechanizm powstawania tlenków azotu (tlenki termiczne i paliwowe) należy porównać zmiany stężeń NO_x w zależności od temperatury spalania (rysunek 3.3) i wielkości powietrza dostarczanego do komory spalania (rysunek 3.7). W przypadku procesu spalania wszystkich badanych paliw przy stałej temperaturze w komorze spalania (wysokiej – 1273,15K) i stałej masie wsadu paliwa do tej komory, obserwowano wzrost stężeń NO_x wraz ze wzrostem przepływu powietrza dostarczanego do reaktora pieca. Wzrost c_{NO_x} posiadał charakter liniowy i zmieniał się w stosunkowo niewielkich zakresach w przypadku wszystkich badanych paliw. Analiza wyników wskazała na największe wartości stężenia NO_x w przypadku procesu spalania osadów ściekowych, co potwierdza poprzednią analizę wyników zmian temperaturowych procesu, gdzie w przypadku tego paliwa największy udział w wysokich wartościach c_{NO_x} miały tlenki paliwowe. Ich ilość zależy od zawartości azotu w paliwie oraz stężenia tlenu dostarczanego do procesu spalania.

Jak wskazują wyniki badań wpływu nadmiaru powietrza dostarczanego do procesu spalania odpadów farbiarskich, są one porównywalne (równie niskie) z wynikami badań tego parametru w przypadku wszystkich odpadów z tworzyw sztucznych. Oczywiście jest to związane z porównywalnie niską procentową zawartością masową azotu elementarnego w tych paliwach.

Stężenie tlenku węgla(II) c_{CO}

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie, powstałego w procesie spalania badanych paliw, tlenku węgla(II), przedstawionych w tabeli 3.25 oraz na rysunku 3.4 i 3.5, wskazuje, że wzrost temperatury spalania powoduje spadek wartości stężenia CO w gazach spalinowych. Spadek ten zaobserwowano dla wszystkich badanych paliw przy stałym wskaźniku masy paliwa i powietrza dostarczanego do komory spalania.

Proces tworzenia tlenku węgla(II) jest pośrednim etapem utleniania do tlenku węgla(IV) (węgiel C, jako pierwiastek zawarty w paliwie spalając się, przechodzi przez stadium CO, który powstaje w bardzo szybkich procesach spalania, podczas gdy, utleniany jest do tlenku węgla(IV) stosunkowo wolniej) [10, 26, 32, 34]. Jednakże, im wyższa temperatura tym jest większa prędkość utleniania CO. Stąd w analizie wyników badań wpływu temperatury procesu spalania na stężenia tlenku węgla(II), przy stałym dopływie powietrza do komory spalania (niezmienny współczynnik nadmiaru powietrza), obserwuje się spadek c_{CO} przy wzroście temperatury w komorze spalania pieca.

W wysokich temperaturach spalania zachodzi reakcja:



a zatem o możliwości przereagowania CO decyduje poziom rodników hydroksylowych OH w spalinach. Jak podaje [32] stężenie rodników OH gwałtownie maleje ze spadkiem temperatury. Powoduje spowolnienie utleniania tlenku węgla(II) do tlenku węgla(IV), który jest już obojętny toksycznie. W niskich temperaturach zachodzi proces utleniania CO zgodnie z poniższą reakcją:



Reakcja ta jest reakcją dużo wolniejszą. Dlatego wysiłki mające na celu zmniejszenie zawartości CO w spalinach zmagają raczej do przyspieszenia jego utlenienia do ditlenku węgla CO_2 , niż zapobieganie jego tworzeniu się w procesie spalania.

Jak wykazała analiza wyników, w przypadku procesu spalania węgla kamiennego, osadów ściekowych, odpadów farbiarskich i gumowych charakter krzywej przebiegu zmian c_{CO} jest w badanym zakresie temperaturowym jest bardzo podobny. Najwyższe wartości stężeń tlenku węgla(II) (dla węgla kamiennego i osadów ściekowych nawet ponad $3500,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, osiągnięto przy najniższych wartościach temperatury spalania (873, 15K). Następnie zaobserwowano

(rysunek 3.4) gwałtowny spadek wartości c_{CO} dla ww. paliw osiągając dla temperatury 1173K bardzo niskie wartości (około $20,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ w przypadku osadów ściekowych i węgla kamiennego oraz poniżej $10,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – odpadów farbiarskich i gumowych). Wynikiem procesu spalania tych paliw w temperaturach powyżej 1373,15K było stężenie tlenku węgla(II) bliskie wartości zerowej.

W przypadku procesu spalania plastomerów (PET, PP, PCW) analiza wyników badań tego procesu wyraźnie wykazała bardzo wysokie (osiągające nawet wartości kilku tysięcy $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) stężenia CO. Prawdopodobnie źródła tak wysokich wartości należy szukać w sposobie przygotowania materiałów do badań. Wiadomym jest, że tworzywa sztuczne są układami heterogenicznymi, wieloskładnikowymi, w których w matrycy polimeru rozproszone są środki pomocnicze, takie jak: napełniacze, dodawane w celu polepszenia własności mechanicznych i chemicznych tworzywa oraz obniżenia kosztów produkcji, zmiękczacze (plastyfikatory), stabilizatory, antyutleniacze, barwniki i pigmenty. Wszystkie te dodatki (np. barwniki i pigmenty) mogą powodować w procesie przygotowania paliwa nierównomierną jego strukturę i w procesie spalania niejednolite cząstki tworzą lokalne zamknięte źródła deficytu tlenu, co w konsekwencji powoduje wzrost wartości stężeń tlenku węgla(II).

Analiza wyników badań wpływu nadmiaru powietrza dostarczanego do procesu spalania odpadów na stężenie tlenku węgla(II), przedstawionych w tabeli 3.26 oraz na rysunku 3.8 i 3.9, potwierdza fakt, że jeżeli wartość współczynnika nadmiaru powietrza zbliża się do jedności, to z reguły obserwuje się zwiększenie udziału tlenku węgla(II) w spalin. Prawidłowość ta występuje dla wszystkich paliw zawierających węgiel elementarny. Z analizy wyników wynika, że przy stałej temperaturze spalania wzrost współczynnika λ (wzrost przepływu powietrza dostarczanego do komory spalania w piecu) powoduje spadek stężenia CO w gazach spalinowych. Spadek ten zaobserwowano dla wszystkich badanych paliw przy stałym wskaźniku masy paliwa i temperaturze w komorze spalania pieca. W przypadku 4. paliw: węgla kamiennego, osadów ściekowych, odpadów farbiarskich i gumowych, spadek był praktycznie o równej wartości – około 50%. W przypadku spalania w stałej temperaturze odpadów z tworzyw sztucznych,

również zaobserwowano obniżkę c_{CO} wraz ze wzrostem dopływu powietrza do reaktora pieca, ale wartości te były znacznie większe. W przypadku spalania odpadów poliolefinowych (zawierających duże ilości dodatków pomocniczych), wartości stężenia ditlenku węgla, w wysokiej temperaturze 1273,15K, obniżyły się z ponad $5000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ dla $\lambda = 1,3$ do około $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ dla $\lambda = 2,0$, czyli do wartości c_{CO} nadal bardzo wysokich. Fakt ten próbowano już wyjaśnić w tym rozdziale przy analizie wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania.

3.2.3.10. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces spalania

W ramach weryfikacji równań opisujących proces spalania wybranych grup odpadów wykonano dodatkowe badania w warunkach laboratoryjnych w instalacji do badania procesu spalania odpadów opisanej w rozdziale 3.2.1. niniejszej pracy.

Na podstawie przyjętych do tych prób laboratoryjnych, parametrów zmiennych niezależnych, obliczono z równań analityczno-empirycznych wartości parametrów wynikowych i porównano z otrzymanymi w wyniku badań procesu spalania. Wyniki te zostały przedstawione w tabeli 3.28.

Dokładność równań oceniono testem t-studenta. Dla $n - 1 = 6$ stopni swobody i przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ z tablic rozkładu t-studenta odczytano wartość graniczną t_{α} wynoszącą:

$$t_{0,05} = 2,447$$

Porównując uzyskane wartości poszczególnych funkcji testowych t z wartością graniczną $t_{0,05}$ widać, że wszystkie te wartości są mniejsze od wartości granicznej. Oznacza to, że nie znajdujemy się w obszarze krytycznym, zatem różnice między wartościami uzyskanymi z doświadczeń a obliczonych wzorami nie są w stosunku do wartości hipotetycznej H_0 statystycznie istotne, tzn. można je usprawiedliwić przypadkiem.

3. Badania własne

W związku z tym należy stwierdzić, że przy 95% ufności, otrzymane w wyniku analizy badań spalania, równania są prawidłowe, a wartości otrzymane na ich podstawie są zgodne z wynikami otrzymanymi w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 3.28. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie spalania wybranych grup odpadów

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{SO_2} Paliwo – osady ściekowe							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	643,38	600,60	42,78	12,33	2239,19	195,79	13,99	2,159
1023,15	1,6	1,8	389,42	377,52	11,90					
1123,15	1,9	2,4	577,26	566,28	10,98					
1223,15	1,4	3,0	830,90	820,82	10,08					
1273,15	1,6	1,8	545,69	549,12	3,43					
1323,15	1,9	2,4	702,28	700,70	1,58					
1413,15	1,4	3,0	949,67	955,24	5,57					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NO_x} Paliwo – osady ściekowe							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	415,30	425,59	10,29	15,61	3180,09	245,71	15,68	2,439
1023,15	1,6	1,8	284,44	279,62	4,824					
1123,15	1,9	2,4	566,77	520,17	46,60					
1223,15	1,4	3,0	695,21	721,66	26,45					
1273,15	1,6	1,8	517,70	522,22	4,52					
1323,15	1,9	2,4	753,38	748,38	4,99					
1413,15	1,4	3,0	872,49	884,08	11,59					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NO_x} Paliwo – węgiel kamienny							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	120,46	123,36	2,90	17,16	4139,12	346,33	18,61	2,259
1023,15	1,6	1,8	82,15	86,35	4,20					
1123,15	1,9	2,4	213,59	205,60	7,99					
1223,15	1,4	3,0	206,63	201,49	5,14					
1273,15	1,8	1,8	188,74	154,20	34,54					
1323,15	1,9	2,4	271,03	257,00	14,03					
1413,15	1,4	3,0	261,20	312,51	51,31					

Tabela 3.28cd. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie spalania wybranych grup odpadów

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{CO} Paliwo – węgiel kamienny							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	2552,59	2376,25	176,34	63,87	55900,87	4557,54	67,51	2,317
1023,15	1,6	1,8	1061,92	940,00	121,92					
1123,15	1,9	2,4	396,74	342,50	54,24					
1223,15	1,4	3,0	110,61	193,75	83,14					
1273,15	1,6	1,8	22,30	31,25	8,95					
1323,15	1,9	2,4	0,00	2,50	2,50					
1413,15	1,8	3,6	0,00	0,00	0,00					
1413,15	1,8	3,6	0,00	0,00	0,00					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NOx} Paliwo – odpady gumowe							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	140,03	106,91	33,12	10,24	1402,37	111,47	10,56	2,375
1023,15	1,6	1,8	108,97	104,86	4,11					
1123,15	1,9	2,4	182,81	172,70	10,11					
1223,15	1,4	3,0	167,66	156,26	11,40					
1273,15	1,6	1,8	128,84	133,64	4,80					
1323,15	1,9	2,4	196,83	193,264	3,57					
1413,15	1,4	3,0	179,31	174,76	4,55					
1413,15	1,4	3,0	179,31	174,76	4,55					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{CO} Paliwo – odpady gumowe							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	1179,12	1252,50	73,38	32,7	16706,54	1536,92	39,2	2,043
1023,15	1,6	1,8	420,29	515,00	94,71					
1123,15	1,9	2,4	143,21	190,00	46,79					
1223,15	1,4	3,0	48,56	61,25	12,69					
1273,15	1,6	1,8	16,26	15,00	1,26					
1323,15	1,9	2,4	2,43	2,50	0,07					
1413,15	1,4	3,0	0,00	0,00	0,00					
1413,15	1,4	3,0	0,00	0,00	0,00					

Tabela 3.28cd. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie spalania wybranych grup odpadów

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{SO_2} Paliwo – odpady poliestrowe PET							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	150,73	148,72	2,01	11,41	1702,19	131,7	11,48	2,435
1023,15	1,6	1,8	56,24	51,48	4,76					
1123,15	1,9	2,4	102,66	74,36	28,30					
1223,15	1,4	3,0	154,47	160,16	5,69					
1273,15	1,6	1,8	59,36	31,46	27,90					
1323,15	1,9	2,4	105,15	100,10	5,05					
1413,15	1,4	3,0	156,83	163,02	6,19					
1413,15	1,4	3,0	156,83	163,02	6,19					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NOx} Paliwo – odpady poliestrowe PET							
T, K	λ	m, kg/m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s ²	test t
923,15	1,4	3,0	44,20	39,06	5,14	5,36	382,74	30,31	5,51	2,383
1023,15	1,6	1,8	48,80	45,23	3,57					
1123,15	1,9	2,4	60,50	63,74	3,24					
1223,15	1,4	3,0	59,07	59,62	0,55					
1273,15	1,6	1,8	60,36	57,57	2,79					
1323,15	1,9	2,4	69,17	74,02	4,85					
1413,15	1,4	3,0	66,71	49,34	17,37					
1413,15	1,4	3,0	66,71	49,34	17,37					

3.2.4. Proces współspalania

3.2.4.1. Metodyka badań

W badaniach procesu współspalania paliw użytych do badań, przedstawionych w rozdziale 3.2.2., jako parametry niezależne (zmiennie) przyjęto:

X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , %.

X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ ,

X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T , K

Natomiast parametry zależne (wynikowe) w badaniach procesu spalania to:

Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2} , $mg \cdot m^{-3}$,

Y_2 – stężenie tlenków azotu c_{NO_x} , $mg \cdot m^{-3}$,

Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) c_{CO} , $mg \cdot m^{-3}$,

W pierwszej serii badań własnych procesu współspalania, jako stałe parametry niezależne zostały przyjęte:

X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ ,

X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T , K

Wartości te stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji.

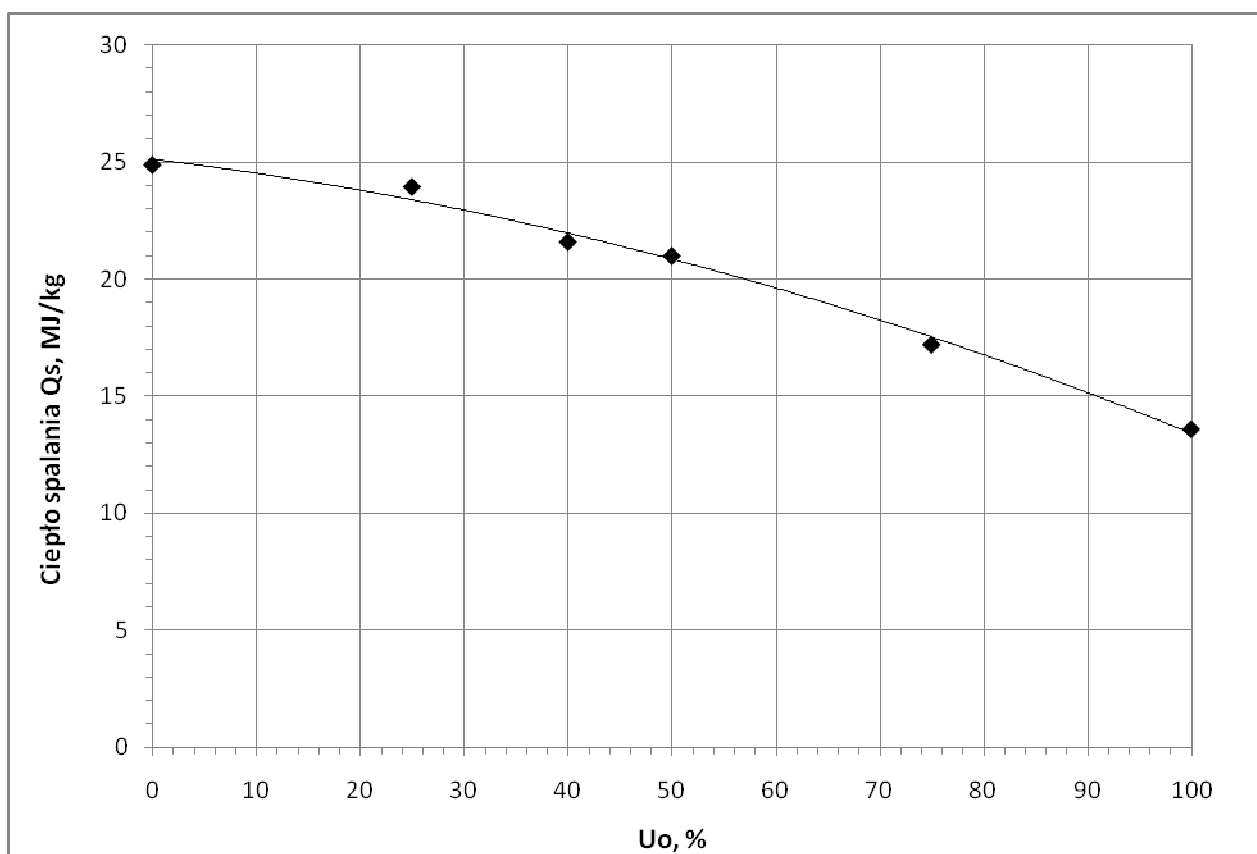
Parametr zmienny niezależny X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , został przyjęty jako zmienny parametr niezależny. Parametr ten zmieniano w zakresie 0÷50%. Zakres ten został określony po przeprowadzeniu serii badań i analizie właściwości energetycznych mieszanek paliwowych z udziałem osadów ściekowych.

Zmiany wartości ciepła spalania w zależności od udziału osadów ściekowych w mieszankach paliwowych użytych do badań własnych przedstawiono w tabelach 3.29÷3.34 oraz na rysunkach 3.14÷3.19.

3. Badania własne

Tabela 3.29. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i odpadów farbiarskich w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o , %	Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s , %
0	24,9	0,00
25	23,96	3,78
40	21,64	13,09
50	21,00	15,66
75	17,24	30,76
100	13,57	45,50

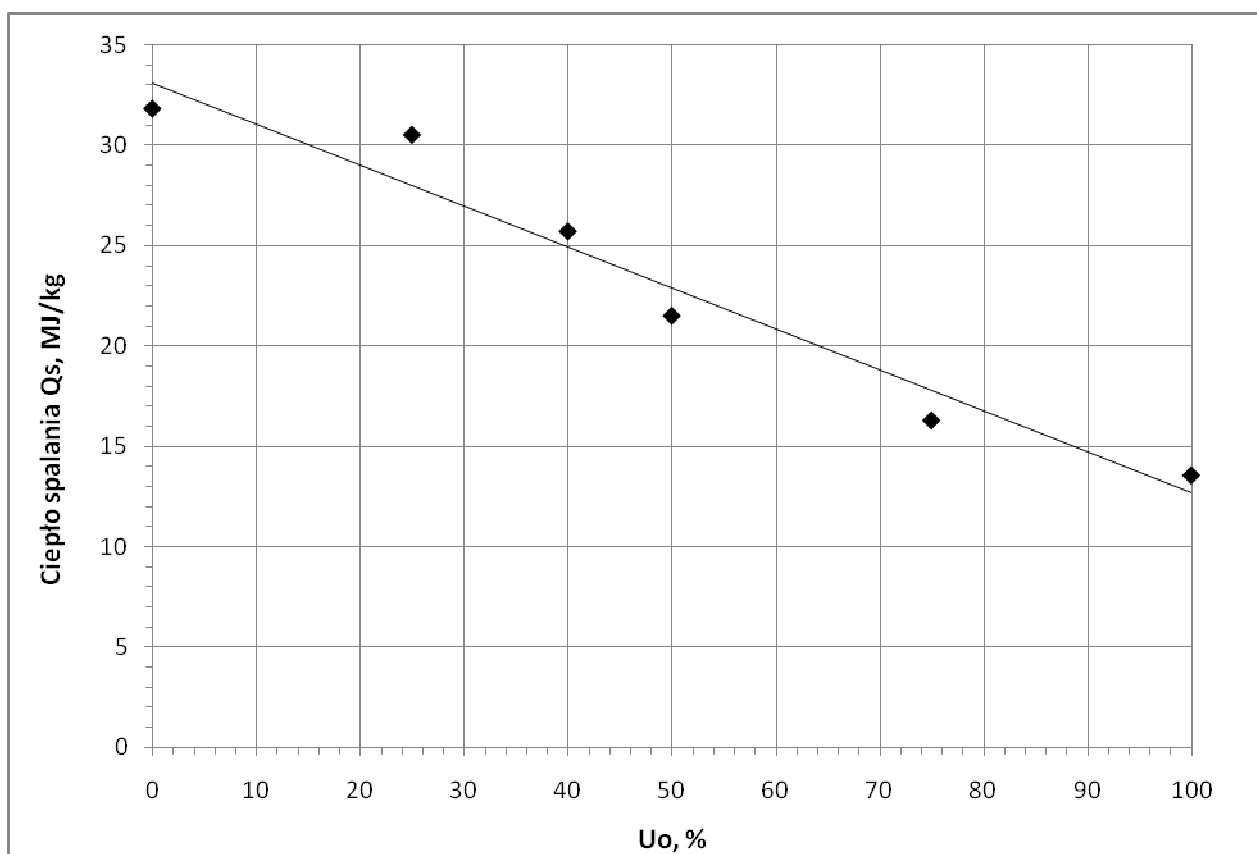


Rys. 3.14. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej z odpadami farbiarskimi

3. Badania własne

Tabela 3.30. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i odpadów gumowych w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o , %	Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s , %
0	31,8	0,00
25	30,52	4,03
40	25,78	18,93
50	21,52	32,33
75	16,34	48,62
100	13,57	57,33

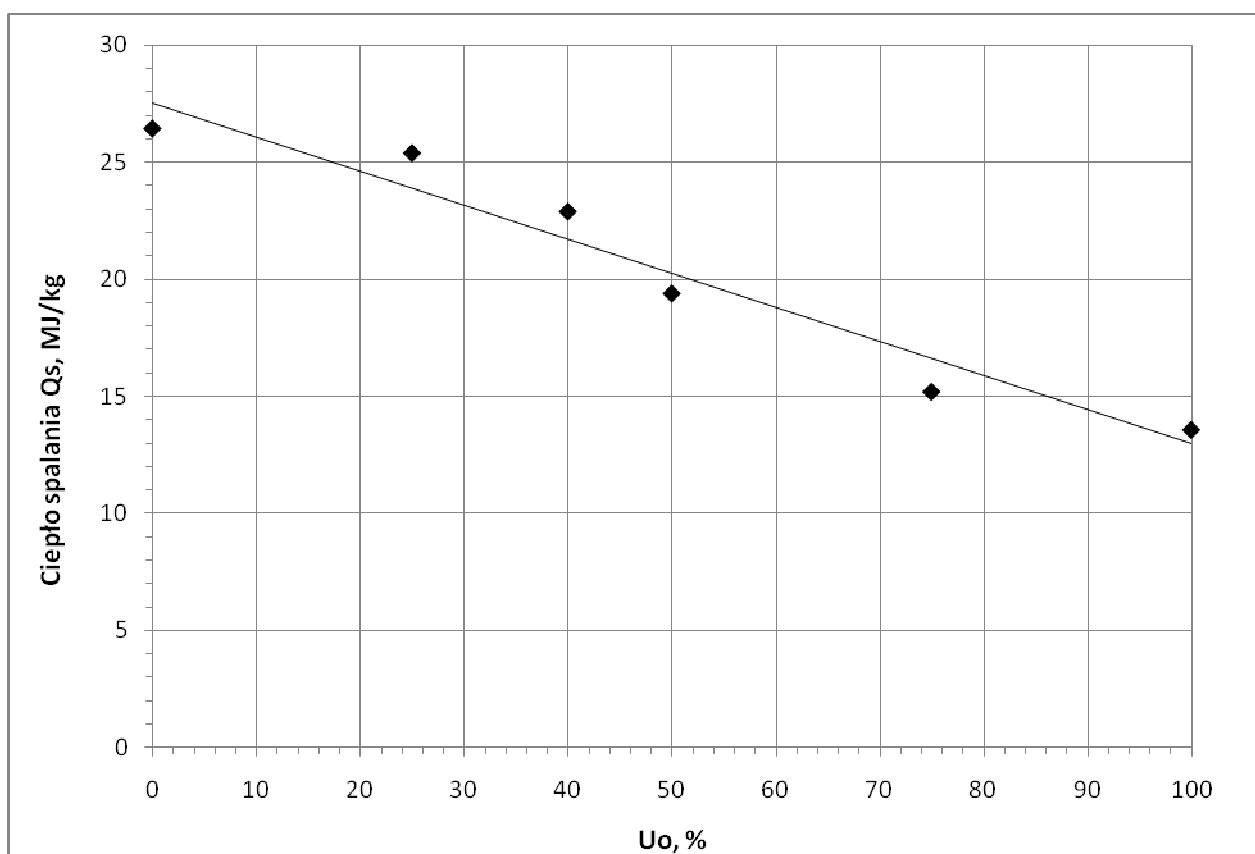


Rys. 3.15. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej z odpadami gumowymi

3. Badania własne

Tabela 3.31. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i miazgu węglowego w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o , %	Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s , %
0	26,45	0,00
25	25,44	3,82
40	22,96	13,19
50	19,45	26,47
75	15,21	42,50
100	13,57	48,70

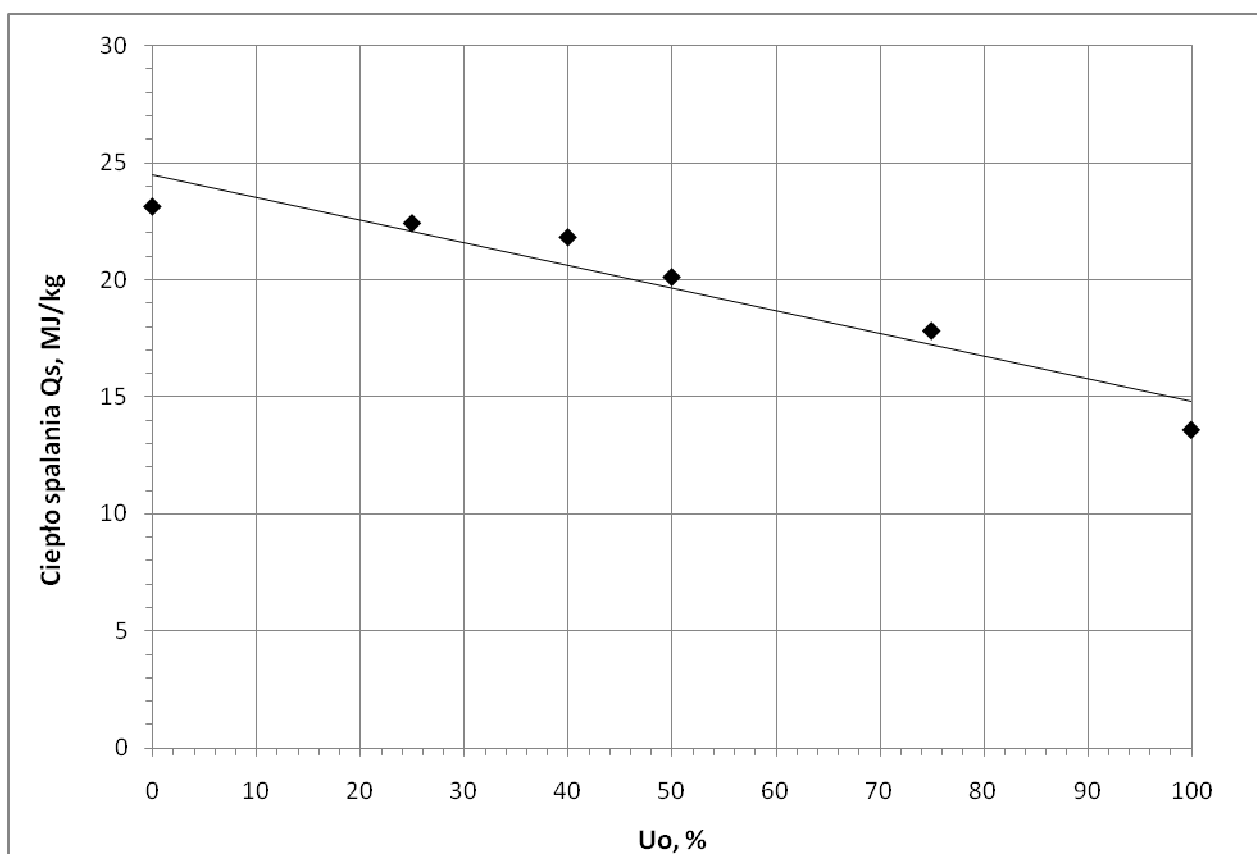


Rys. 3.16. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej z węglem kamiennym

3. Badania własne

Tabela 3.32. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i odpadów poliestrowych (PET) w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o , %	Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s , %
0	23,11	0,00
25	22,45	2,86
40	21,82	5,58
50	20,16	12,77
75	17,84	22,80
100	13,57	41,28

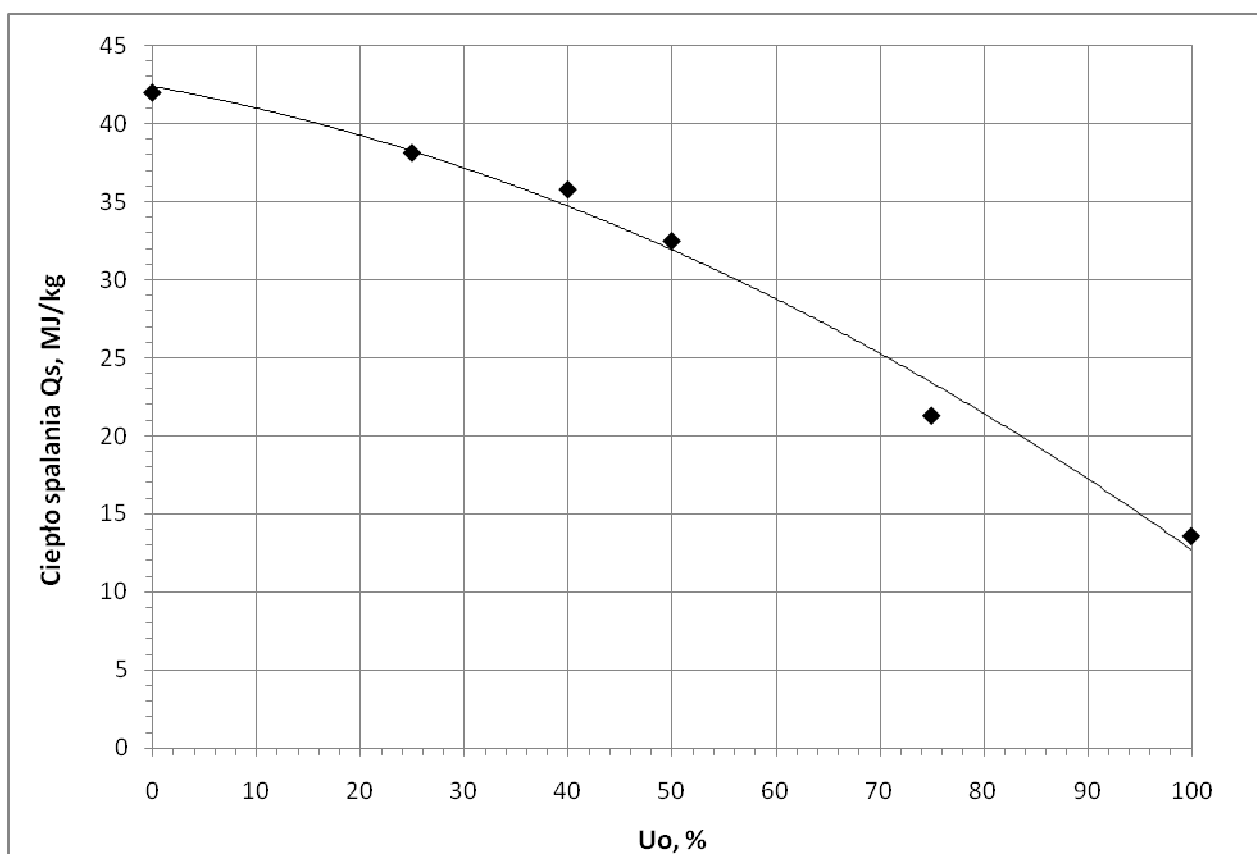


Rys. 3.17. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej z odpadami poliestrowymi (PET)

3. Badania własne

Tabela 3.33. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i odpadów poliolefinowych (PP) w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o , %	Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s , %
0	42,02	0,00
25	38,16	9,19
40	35,81	14,78
50	32,53	22,58
75	21,36	49,17
100	13,57	67,71

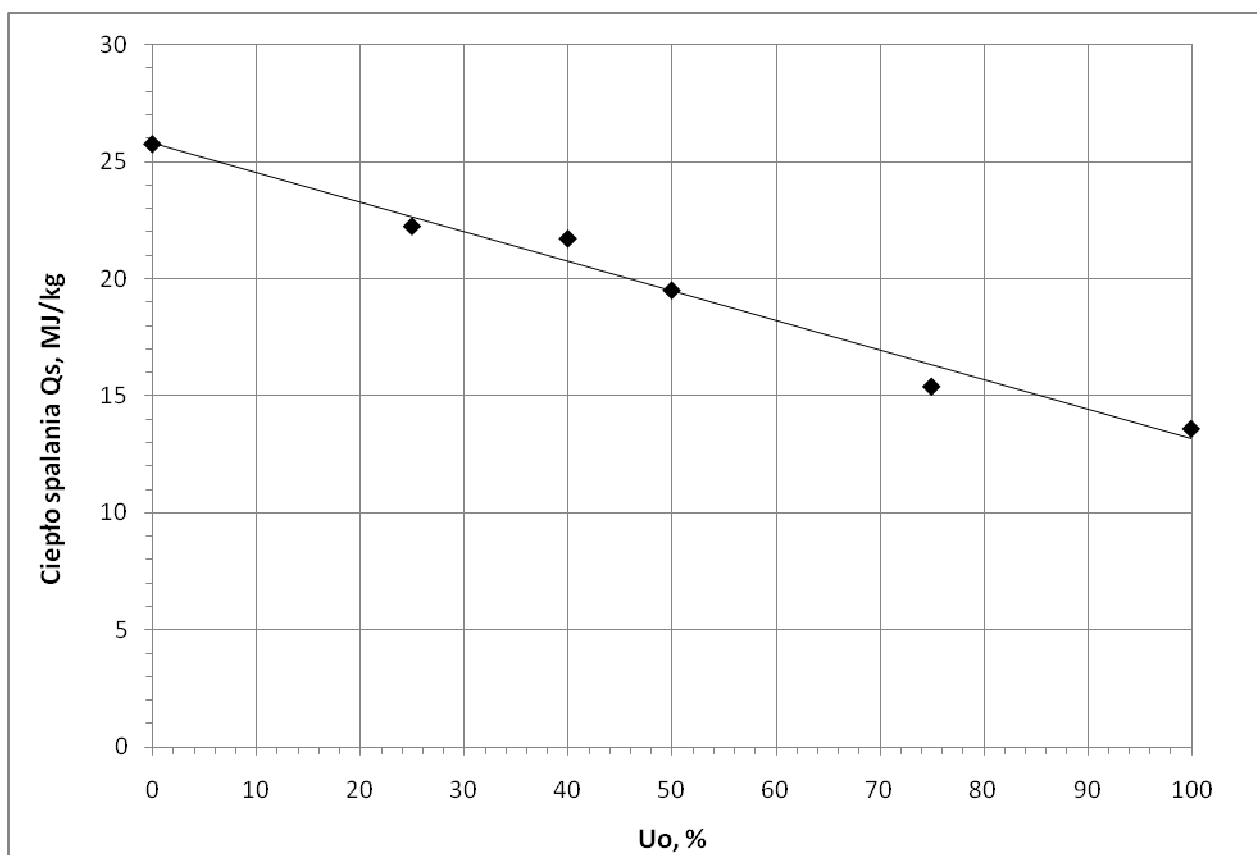


Rys. 3.18. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej z odpadami poliolefinowymi (PP)

3. Badania własne

Tabela 3.34. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i odpadów poliwinylowych (PCW) w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o , %	Ciepło spalania Q_s , MJ/kg	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s , %
0	25,76	0,00
25	22,24	13,66
40	21,71	15,72
50	19,50	24,30
75	15,38	40,30
100	13,57	47,32



Rys. 3.19. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej z odpadami poliwinylowych (PCW)

3. Badania własne

Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału osadów ściekowych w mieszance spadała wartość ciepła spalania wszystkich mieszanek paliwowych. Spadek wartości ciepła spalania w całym zakresie jest stały i zależy od udziału osadów w mieszance paliwowej osiągając ponad 40% przy 100% udziale osadów ściekowych we wszystkich badanych mieszankach paliwowych.

Analiza wykresów pozwala zauważyć również, że maksymalny udział osadów ściekowych w mieszance paliwowej nie powinien przekraczać 50%; to pozwala utrzymać wartości Q_s na stosunkowo dużym poziomie około 21 MJ/kg. Dlatego parametr X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , zmieniano w zakresie 0÷50%.

W kolejnym etapie tych badań, parametrami niezależnymi stałymi (które stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji) były:

X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , %.

X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T , K

Drugi rozpatrywany parametr zmienny niezależny (X_2) tj. współczynnik nadmiaru powietrza λ , zmieniano w przedziale: 1,3÷2,0.

W trzecim etapie badań procesu spalania, parametrami niezależnymi stałymi były:

X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , %.

X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ ,

W etapie tym zmieniano parametr X_3 , tj. temperatura w strefie spalania pieca T . Parametr ten zmieniano w zakresie: 1073,15÷1443,15K, zwiększając go co 100K.

3.2.4.2. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

3.2.4.2.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym pokazano w tabeli Z64 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z64.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(U) = 74,7829 + \exp(2,40958 + 0,038128 \cdot U) \quad (3.87)$$

gdzie:

- c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa
- U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
- % – wielkość niezależna

W tabeli Z65 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z65.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(U, \lambda) = \exp(2,40958 + 0,038128 \cdot U) - 66,816 \cdot \lambda + 6,51 \quad (3.88)$$

gdzie:

- c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa
- U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
- % – wielkość niezależna
- λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z66 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym. Rysunek Z66 przedstawia zawarte w tabeli Z66 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda, T) = \exp(2,40958 + 0,038128 \cdot U) - 66,816 \cdot \lambda + 0,156488 \cdot T - 5,856 \quad (3.89)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – wskaźnik temperatury w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

3.2.4.2.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym pokazano w tabeli Z67 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z67.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U) = 36,5024 + \exp(4,60619 + 0,011073 \cdot U) \quad (3.90)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

3. Badania własne

W tabeli Z68 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z68.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda) = \exp(4,60619 + 0,011073 \cdot U) + \exp(3,70794 + 0,905522 \cdot \lambda) + - 175,60 \quad (3.91)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z69 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym. Rysunek Z69 przedstawia zawarte w tabeli Z69 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = \exp(4,60619 + 0,011073 \cdot U) + \exp(3,70794 + 0,905522 \cdot \lambda) + 0,257962 \cdot T - 503,334 \quad (3.92)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.2.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym pokazano w tabeli Z70 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z70.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{CO}(U) = 16,7619 - 0,04214 \cdot U \quad (3.93)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z71 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z71.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U,\lambda) = - 0,04214 \cdot U - 15,463 \cdot \lambda + 43,73 \quad (3.94)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z72 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z miatem węglowym. Na rysunku Z72 przedstawiono zawarte w tabeli Z72 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = -0,04214 \cdot U - 15,463 \cdot \lambda + \exp(45,1165 - 0,03636 \cdot T) + 34,693 \quad (3.95)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca **T**, K – wielkość niezależna

3.2.4.3. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

3.2.4.3.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi pokazano w tabeli Z73 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z73.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(U) = -20,37 + \exp(3,92021 + 0,017495 \cdot U) \quad (3.96)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

3. Badania własne

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
% – wielkość niezależna

W tabeli Z74 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z74.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda) = \exp(3,92021 + 0,017495 \cdot U) - 12,796 \cdot \lambda + 1,28 \quad (3.97)$$

gdzie:

c_{SO₂} – stężenie tlenku siarki(IV), mg · m⁻³ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z75 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi. Rysunek Z75 przedstawia, zawarte w tabeli Z75, wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda, T) = \exp(3,92021 + 0,017495 \cdot U) - 12,796 \cdot \lambda + 24,8721 \cdot \ln(-652,07 + T) - 157,736 \quad (3.98)$$

gdzie:

c_{SO₂} – stężenie tlenku siarki(IV), mg · m⁻³ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – wskaźnik temperatury w strefie spalania pieca, **K** – wielkość niezależna

3.2.4.3.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi pokazano w tabeli Z76 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z76.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{NO_x}(U) = 43,5012 + \exp(3,33018 + 0,032787 \cdot U) \quad (3.99)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z77 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z77.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{NO_x}(U, \lambda) = \exp(3,33018 + 0,032787 \cdot U) + \exp(1,3994 + 1,33951 \cdot \lambda) - 4,28 \quad (3.100)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z78 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi. Rysunek Z78 przedstawia zawarte w tabeli Z78 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = \exp(3,33018 + 0,032787 \cdot U) + \exp(1,3994 + 1,33951 \cdot \lambda) + 379,911 \cdot \ln(1103,07 + T) - 2957,259 \quad (3.101)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca **T**, K – wielkość niezależna

3.2.4.3.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi pokazano w tabeli Z79 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z79.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{CO}}(U) = 7,41369 + 0,056786 \cdot U \quad (3.102)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z80 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z80.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda) = 0,056786 \cdot U + 34,8588 \cdot \lambda - 14,687 \cdot \lambda^2 - 7,05 \quad (3.103)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z81 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z farbiarskimi. Na rysunku Z81 przedstawiono zawarte w tabeli Z81 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = 0,056786 \cdot U + 34,8588 \cdot \lambda - 14,687 \cdot \lambda^2 + \exp(43,2415 - 0,03493 \cdot T) - 11,435 \quad (3.104)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.4. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

3.2.4.4.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi pokazano w tabeli Z82 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z82.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(U) = 402,279 - 0,24106 \cdot U \quad (3.105)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z83 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z83.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(U, \lambda) = - 0,24106 \cdot U - 26,11 \cdot \lambda + 447,64 \quad (3.106)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z84 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi. Rysunek Z84 przedstawia zawarte w tabeli Z84 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = - 0,24106 \cdot U - 26,11 \cdot \lambda + \\ + \exp(3,73396 + 0,001826 \cdot T) + 27,000 \quad (3.107)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – wskaźnik temperatury w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

3.2.4.4.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi pokazano w tabeli Z85 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z85.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U) = 97,8764 + \exp(3,14104 + 0,02974 \cdot U) \quad (3.108)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa
 U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
% – wielkość niezależna

W tabeli Z86 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z86.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda) = \exp(3,14104 + 0,02974 \cdot U) + \\ + \exp(0,029131 + 1,59006 \cdot \lambda) + 84,51 \quad (3.109)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa
 U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
% – wielkość niezależna
 λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z87 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi. Rysunek Z87 przedstawia zawarte w tabeli Z87 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = \exp(3,14104 + 0,02974 \cdot U) + \exp(0,029131 + 1,59006 \cdot \lambda) + 40,722 \cdot \ln(-956,55 + T) - 152,214 \quad (3.110)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.4.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi pokazano w tabeli Z88 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z88.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{CO}}(U) = 10,0982 + 0,027321 \cdot U \quad (3.111)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z89 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z89.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U,\lambda) = 0,027321 \cdot U - 10,83 \cdot \lambda + 29,80 \quad (3.112)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z90 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi. Na rysunku Z90 przedstawiono zawarte w tabeli Z90 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U,\lambda,T) = 0,027321 \cdot U - 10,83 \cdot \lambda + \\ + \exp(39,4728 - 0,03135 \cdot T) + 22,678 \quad (3.113)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.5. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliestry

3.2.4.5.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi pokazano w tabeli Z91 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z91.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(U) = -454,78 + \exp(6,12938 + 0,008919 \cdot U) \quad (3.114)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z92 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z92.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(U, \lambda) = \exp(6,12938 + 0,008919 \cdot U) - 26,948 \cdot \lambda - 417,09 \quad (3.115)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z93 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi. Rysunek Z93 przedstawia, zawarte w tabeli Z93, wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda, T) = \exp(6,12938 + 0,008919 \cdot U) - 26,948 \cdot \lambda + 0,015158 \cdot T - 435,053 \quad (3.116)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – wskaźnik temperatury w strefie spalania pieca, **K** – wielkość niezależna

3.2.4.5.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi pokazano w tabeli Z94 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z94.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U) = 50,7277 + 5,74586 \cdot U \quad (3.117)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

3. Badania własne

W tabeli Z95 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z95.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda) = 5,74586 \cdot U + \exp(0,958875 + 1,00621 \cdot \lambda) + 18,30 \quad (3.118)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z96 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi. Rysunek Z96 przedstawia zawarte w tabeli Z96 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = 5,74586 \cdot U + \exp(0,958875 + 1,00621 \cdot \lambda) + 46,7601 \cdot \ln(-806,49 + T) - 272,258 \quad (3.119)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca **T**, **K** – wielkość niezależna

3.2.4.5.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi pokazano w tabeli Z97 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z97.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{CO}(U) = 8,64238 + 0,056771 \cdot U \quad (3.120)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), mg · m⁻³ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z98 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza **λ** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z98.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda) = 0,056771 \cdot U - 5,3233 \cdot \lambda + 17,78 \quad (3.121)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), mg · m⁻³ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z99 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi. Na rysunku Z99 przedstawiono zawarte w tabeli Z99 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = 0,056771 \cdot U - 5,3233 \cdot \lambda + \\ + \exp(23,0792 - 0,01668 \cdot T) + 11,438 \quad (3.122)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca **T**, K – wielkość niezależna

3.2.4.6. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliolefiny

3.2.4.6.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi pokazano w tabeli Z100 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z100.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(U) = -342,38 + \exp(5,87321 + 0,010101) \cdot U \quad (3.123)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

3. Badania własne

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
% – wielkość niezależna

W tabeli Z101 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z101.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda) = \exp(5,87321 + 0,010101 \cdot U) - 19,354 \cdot \lambda - 313,64 \quad (3.124)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z102 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi. Rysunek Z102 przedstawia zawarte w tabeli Z102 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda, T) = \exp(5,87321 + 0,010101 \cdot U) - 19,354 \cdot \lambda + \\ + 0,038658 \cdot T - 362,293 \quad (3.125)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – wskaźnik temperatury w strefie spalania pieca, **K** – wielkość niezależna

3.2.4.6.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi pokazano w tabeli Z103 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z103.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{NO_x}(U) = 29,1031 + \exp(4,2653 + 0,019105 \cdot U) \quad (3.126)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z104 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z104.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{NO_x}(U, \lambda) = \exp(4,2653 + 0,019105 \cdot U) + 68,743 \cdot \log(-0,57913 + \lambda) + 9,32 \quad (3.127)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z105 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi. Rysunek Z105 przedstawia zawarte w tabeli Z105 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = \exp(4,2653 + 0,019105 \cdot U) + 68,743 \cdot \ln(-0,57913 + \lambda) + 13,8893 \cdot \ln(-979,91 + T) - 60,954 \quad (3.128)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca **T**, K – wielkość niezależna

3.2.4.6.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi pokazano w tabeli Z106 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z106.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{CO}}(U) = 3546,32 - 9,6448 \cdot U \quad (3.129)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z107 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych odpadami poliolefinowymi. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z107.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda) = - 9,6448 \cdot U - 4467,9 \cdot \lambda + 11291,75 \quad (3.130)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z108 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi. Na rysunku Z108 przedstawiono zawarte w tabeli Z108 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = - 9,6448 \cdot U - 4467,9 \cdot \lambda + \\ + \exp(11,4198 - 0,00281 \cdot T) + 8222,117 \quad (3.131)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.7. Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliwinyle

3.2.4.7.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi pokazano w tabeli Z109 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z109.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{SO_2}(U) = 139,527 + 3,09329 \cdot U \quad (3.132)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z110 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z110.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(U, \lambda) = 3,09329 \cdot U + \exp(6,28644 - 3,038 \cdot \lambda) + 135,69 \quad (3.133)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z111 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi. Rysunek Z111 przedstawia, zawarte w tabeli Z111, wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = 3,09329 \cdot U + \exp(6,28644 - 3,038 \cdot \lambda) + 140,699 \cdot \ln(T) - 870,619 \quad (3.134)$$

gdzie:

c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – wskaźnik temperatury w strefie spalania pieca, K – wielkość niezależna

3.2.4.7.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi pokazano w tabeli Z112 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z112.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{NO}_x}(\text{U}) = 40,7254 + 7,83528 \cdot \text{U} - 0,03772 \cdot \text{U}^2 \quad (3.135)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa
 U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
% – wielkość niezależna

W tabeli Z113 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z113.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(\text{U}, \lambda) = 7,83528 \cdot \text{U} - 0,03772 \cdot \text{U}^2 + 25,7841 \cdot \lambda - 9,06 \quad (3.136)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa
 U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,
% – wielkość niezależna
 λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z114 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi. Rysunek Z114 przedstawia zawarte w tabeli Z114 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = 7,83528 \cdot U - 0,03772 \cdot U^2 + 25,7841 \cdot \lambda + 163,507 \cdot \ln(T) - 1179,492 \quad (3.137)$$

gdzie:

c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.7.3. Stężenie tlenku węgla(II) CO

Wyniki badań wpływu udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi pokazano w tabeli Z115 oraz dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z115.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$c_{\text{CO}}(U) = 251,0 - 0,74875 \cdot U \quad (3.138)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

W tabeli Z116 pokazano wyniki badań wpływu współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi. Dodatkowo wyniki tych badań przedstawiono na wykresie – rysunek Z116.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U,\lambda) = - 0,74875 \cdot U - 41,509 \cdot \lambda + 322,60 \quad (3.139)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

W tabeli Z117 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi. Na rysunku Z117 przedstawiono zawarte w tabeli Z117 wyniki badań wpływu temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla w procesie współspalania.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$c_{CO}(U,\lambda,T) = - 0,74875 \cdot U - 41,509 \cdot \lambda + \\ + \exp(17,7875 - 0,00975 \cdot T) + 178,050 \quad (3.140)$$

gdzie:

c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II), $mg \cdot m^{-3}$ – wielkość zależna, wynikowa

U – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej,

% – wielkość niezależna

λ – współczynnik nadmiaru powietrza – wielkość niezależna

T – temperatura w strefie spalania pieca T , K – wielkość niezależna

3.2.4.8. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych po procesie współspalania

W celu analizy wyników badań wpływu zmiennych niezależnych na stężenia badanych gazów spalinowych (SO_2 , NO_x , CO) w procesie współspalania osadów ściekowych w mieszance paliwowej z węglem kamiennym i wybranymi odpadami, zestawiono te wyniki w postaci zbiorczych tabel opisujących wpływ parametrów zmiennych na poszczególne stężenia gazów spalinowych. W tabeli 3.35 i na rysunkach 3.20÷3.23 pokazano wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw. Następnie w tabeli 3.36 i dodatkowo na rysunkach 3.24÷3.27 zostały przedstawione zbiorcze wyniki wpływu współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw. Natomiast tabela 3.36 i rysunek 3.28÷3.31 przedstawiają zmiany temperatury w strefie spalania reaktora pieca na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw.

3. Badania własne

Tabela 3.35. Wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw;

stałe parametry niezależne: $\lambda = 1,8$, $T = 1273,15K$

Paliwo	Mieszanka paliwowa z węglem kamiennym		
U, %	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
0	86,09	138,17	16,75
10	91,52	146,68	16,31
20	98,67	160,31	16,00
30	107,11	175,07	15,50
40	128,70	196,49	15,00
50	148,86	208,69	14,69
Paliwo	Mieszanka paliwowa z odpadami gumowymi		
U, %	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
0	402,83	118,08	10,13
10	398,97	132,43	10,31
20	397,25	141,76	10,69
30	395,25	152,21	10,94
40	393,68	172,61	11,13
50	389,53	201,11	11,50
Paliwo	Mieszanka paliwowa z odpadami farbiarskimi		
U, %	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
0	30,32	73,49	7,44
10	39,47	79,34	8,94
20	51,62	98,50	8,50
30	62,63	115,93	9,06
40	83,66	150,37	9,75
50	99,67	186,35	10,25

3. Badania własne

Tabela 3.35.cd. Wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw;

stałe parametry niezależne: $\lambda = 1,8$, $T = 1273,15K$

Paliwo	Mieszanka paliwowa z odpadami poliestrowymi PET		
U, %	$c_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{NO_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
0	11,73	62,42	8,75
10	37,75	91,33	9,25
20	90,09	162,16	9,56
30	145,15	224,99	10,25
40	214,50	296,23	11,06
50	255,26	329,13	11,50
Paliwo	Mieszanka paliwowa z odpadami poliolefinowymi PP		
U, %	$c_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{NO_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
0	18,73	104,04	3569,81
10	45,19	110,60	3429,63
20	84,08	130,79	3348,75
30	145,00	158,26	3244,69
40	196,91	184,40	3162,63
50	241,67	212,38	3075,69
Paliwo	Mieszanka paliwowa z odpadami poliwinyłowymi PCW		
U, %	$c_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{NO_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
0	135,71	45,20	249,94
10	170,74	112,24	243,00
20	204,92	172,00	237,44
30	236,09	246,51	230,69
40	263,12	305,35	219,88
50	290,58	330,87	212,75

3. Badania własne

Tabela 3.36. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw;
stałe parametry niezależne: $T = 1273,15K$, $U = 10\%$

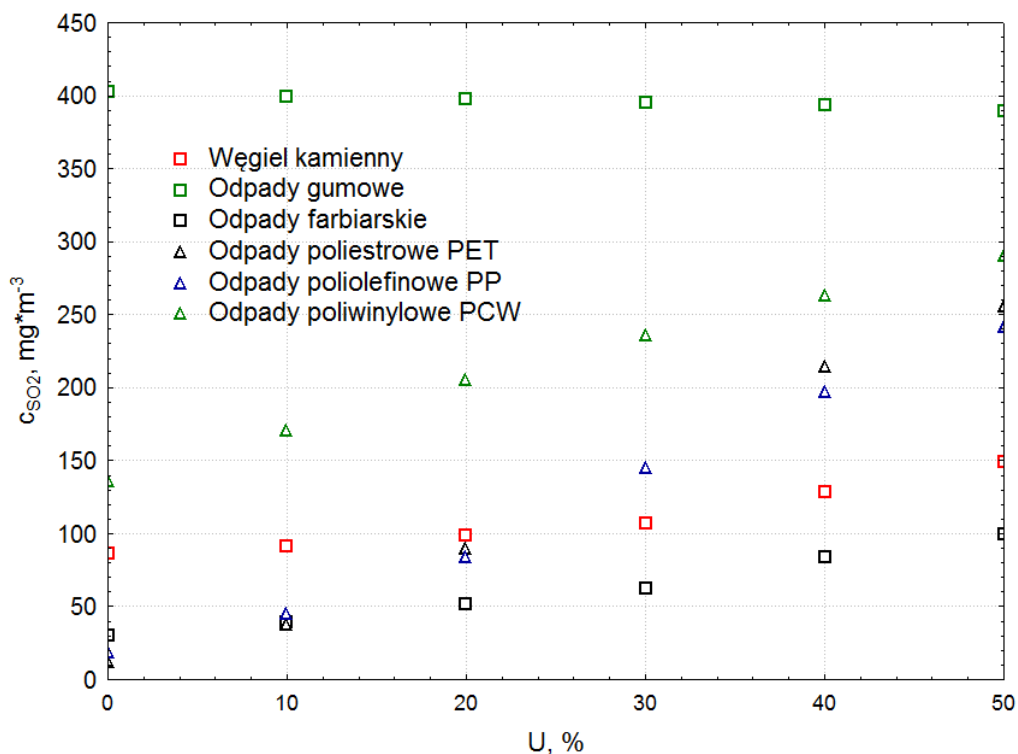
Paliwo	Węgiel kamienny		
λ	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1,3	119,26	69,91	22,88
1,5	107,25	91,94	20,25
1,8	91,52	146,68	16,31
2,0	70,64	184,71	11,75
Paliwo	Odpady gumowe		
λ	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1,3	412,27	122,90	16,13
1,5	404,40	128,54	13,75
1,8	398,97	132,43	10,31
2,0	392,96	140,84	8,63
Paliwo	Odpady farbiarskie		
λ	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1,3	44,33	57,40	14,13
1,5	42,19	65,19	12,50
1,8	39,47	79,34	8,94
2,0	34,89	93,69	4,38
Paliwo	Odpady poliestrowe PET		
λ	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1,3	49,48	85,18	11,50
1,5	44,47	88,05	10,06
1,8	37,75	91,33	9,25
2,0	30,03	95,43	7,44
Paliwo	Odpady poliolefinowe PP		
λ	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1,3	54,63	73,29	5283,38
1,5	49,91	88,87	4527,94
1,8	45,19	110,60	3429,63
2,0	40,61	118,90	2052,13
Paliwo	Odpady poliwinylowe PCW		
λ	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1,3	177,03	98,91	260,13
1,5	172,03	104,24	253,25
1,8	169,31	112,24	243,00
2,0	167,60	116,85	230,13

3. Badania własne

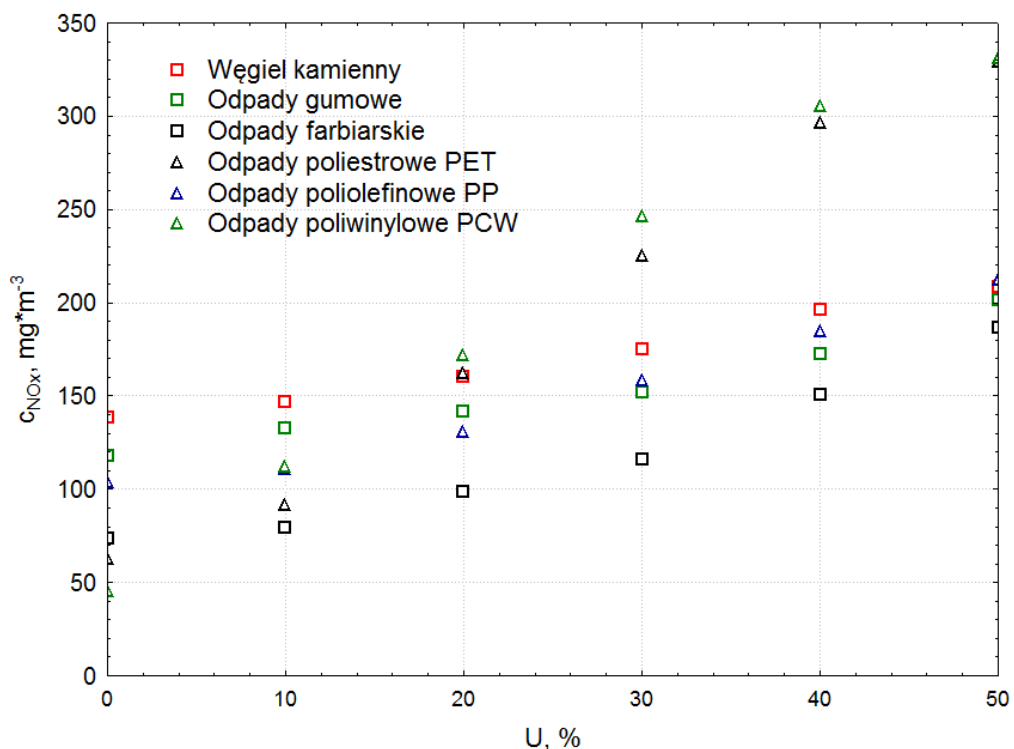
Tabela 3.37. Wpływ temperatury w strefie spalania reaktora pieca na stężenia gazów spalinowych powstających w procesie współspalania badanych paliw;
stałe parametry niezależne: $U = 10\%, 15K, \lambda = 1,8$

Paliwo	Węgiel kamienny		
T, K	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1073,15	55,06	90,71	452,00
1173,15	76,65	121,57	17,69
1273,15	91,52	146,68	16,31
1373,15	104,82	171,69	3,81
1443,15	114,26	186,55	0,00
Paliwo	Odpady gumowe		
T, K	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1073,15	275,70	90,92	344,06
1173,15	334,62	114,90	17,75
1273,15	398,97	132,43	10,31
1373,15	500,50	143,40	1,25
1443,15	557,56	147,91	0,00
Paliwo	Odpady farbiarskie		
T, K	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1073,15	29,60	47,36	319,81
1173,15	34,75	61,71	13,63
1273,15	39,47	79,34	8,94
1373,15	42,76	99,02	3,25
1443,15	45,33	104,04	1,25
Paliwo	Odpady poliestrowe PET		
T, K	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1073,15	34,61	59,55	180,88
1173,15	36,47	80,05	35,88
1273,15	37,75	91,33	9,25
1373,15	38,75	96,04	4,25
1443,15	41,04	101,48	1,75
Paliwo	Odpady poliolefinowe PP		
T, K	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1073,15	37,47	94,20	5244,31
1173,15	41,47	104,04	4177,38
1273,15	45,19	110,60	3429,63
1373,15	49,19	113,47	2503,38
1443,15	51,77	116,54	2482,94
Paliwo	Odpady poliwinylowe PCW		
T, K	$c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$	$c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
1073,15	143,00	81,49	1603,00
1173,15	157,30	96,45	709,38
1273,15	170,74	112,24	243,00
1373,15	179,75	125,26	186,44
1443,15	187,19	131,51	150,25

3. Badania własne

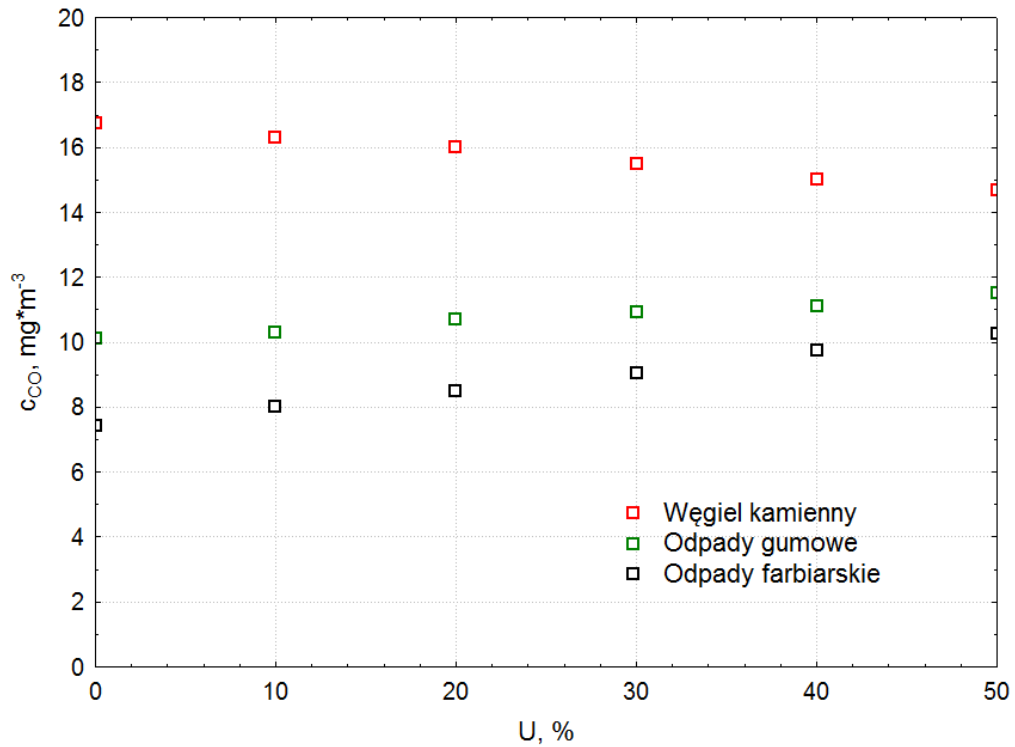


Rys. 3.20. Wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia tlenku siarki(IV) c_{SO_2} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; **parametry stałe:** $T = 1273,15K$, $\lambda = 1,8$

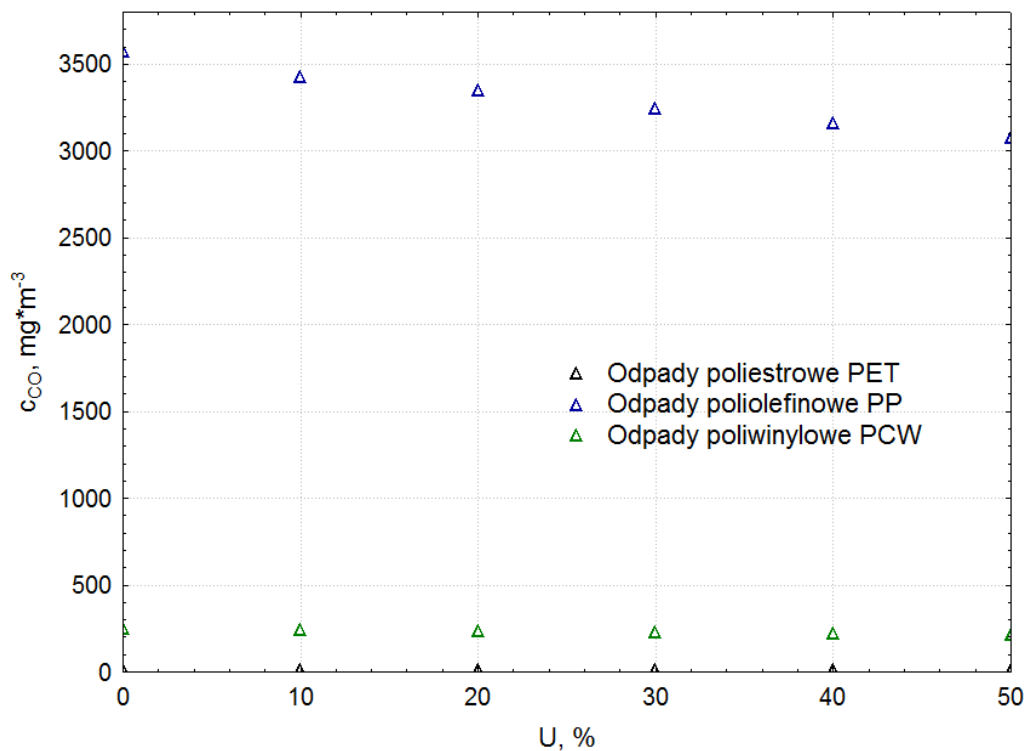


Rys. 3.21. Wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia tlenków azotu c_{NO_x} powstających w procesie współspalania badanych paliw; **parametry stałe:** $T = 1273,15K$, $\lambda = 1,8$

3. Badania własne

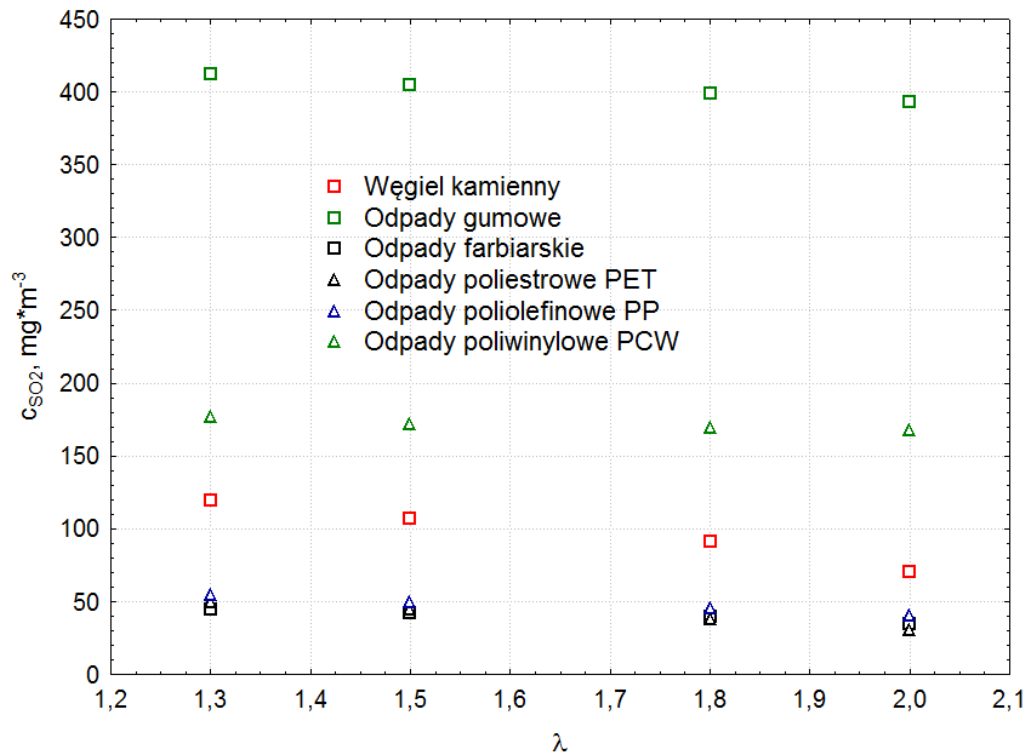


Rys. 3.22. Wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia tlenku węgla (II) c_{CO} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; **parametry stałe:** $T = 1273,15K$, $\lambda = 1,8$

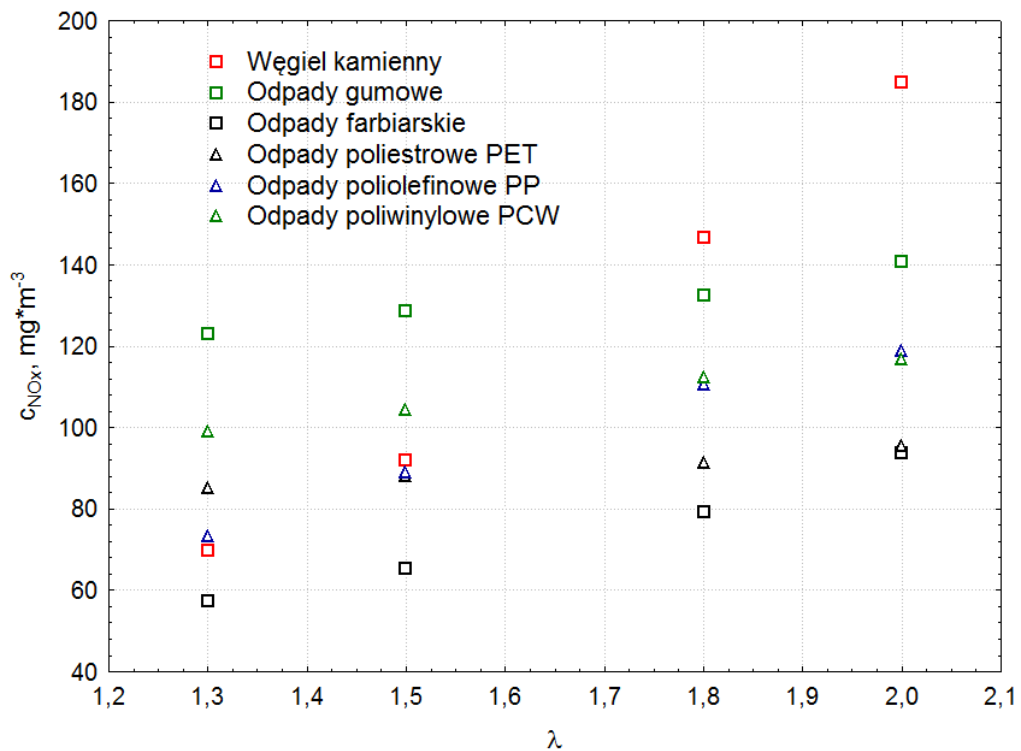


Rys. 3.23. Wpływ parametru udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenia tlenku węgla (II) c_{CO} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; **parametry stałe:** $T = 1273,15K$, $\lambda = 1,8$

3. Badania własne

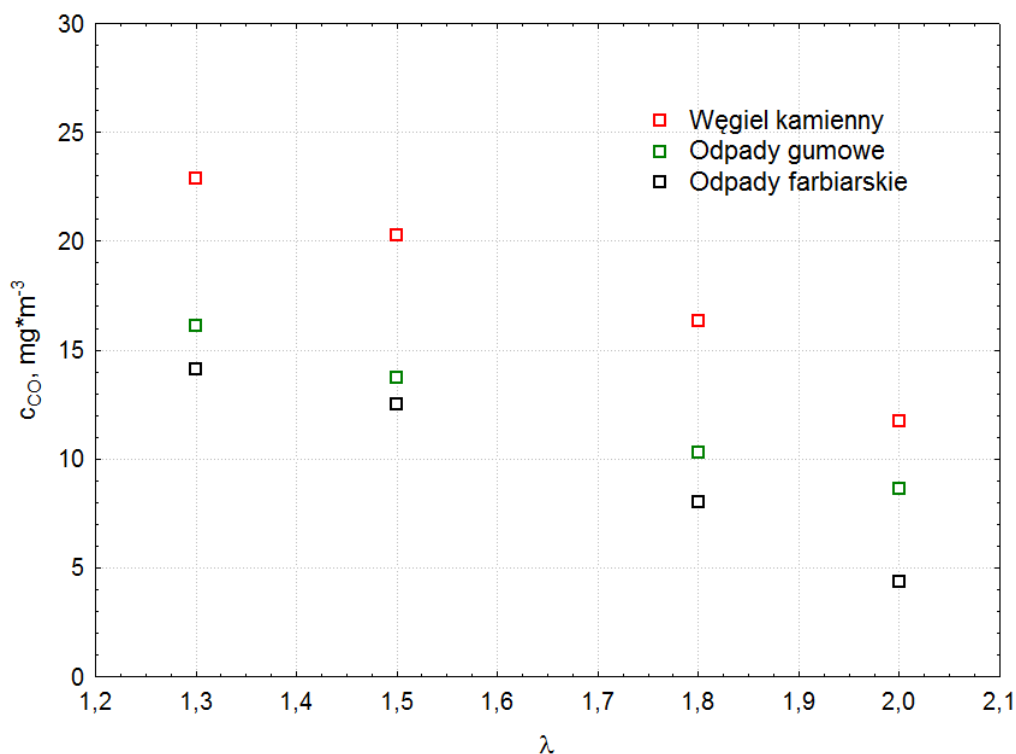


Rys. 3.24. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenku siarki(IV) c_{SO_2} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15K$, $U = 10\%$

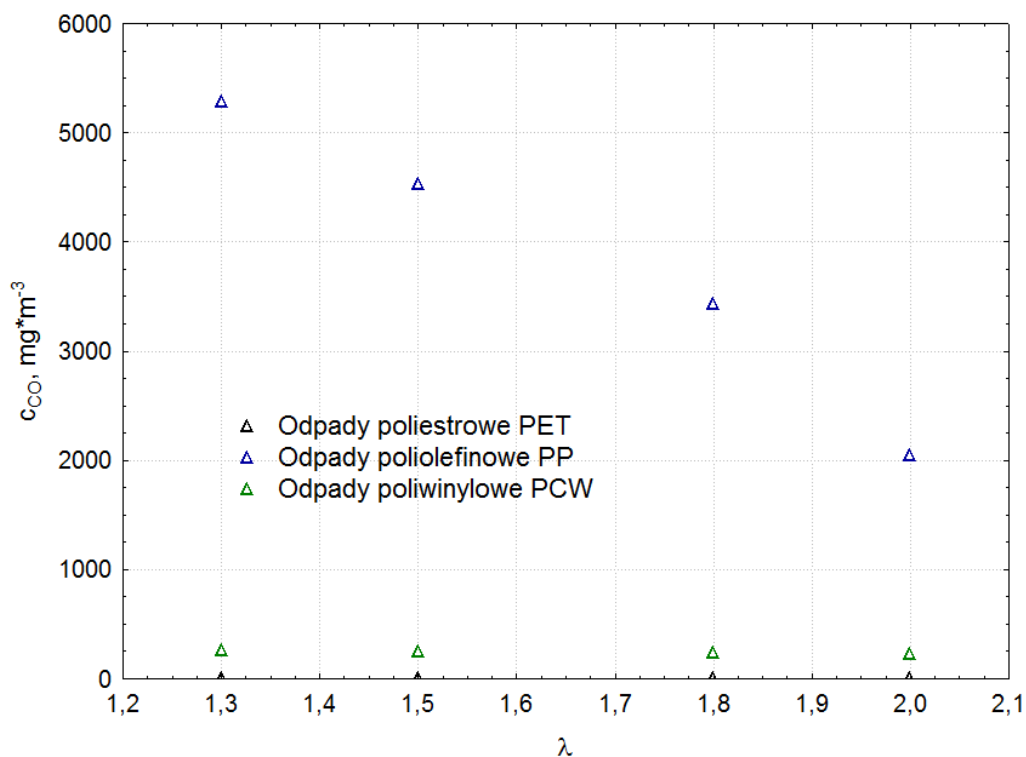


Rys. 3.25. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenków azotu c_{NO_x} powstających w procesie współspalania badanych paliw; parametry stałe: $T = 1273,15K$, $U = 10\%$

3. Badania własne

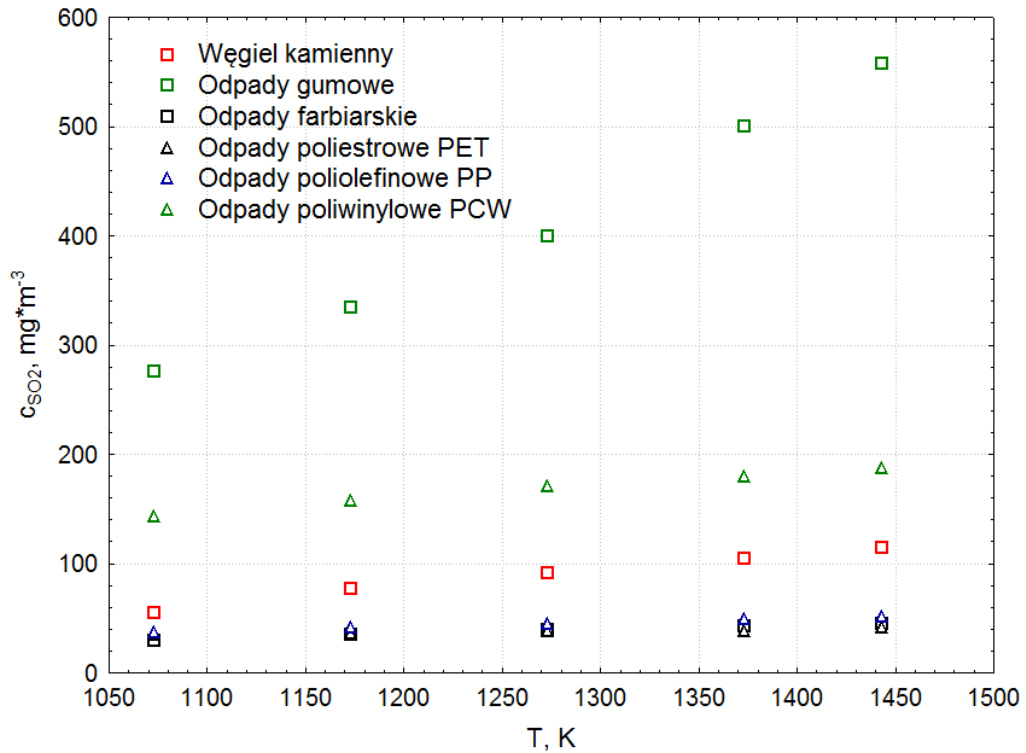


Rys. 3.26. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenku węgla (II) c_{CO} powstającego w procesie współspalania badanych paliw;
parametry stałe: $T = 1273,15K$, $U = 10\%$

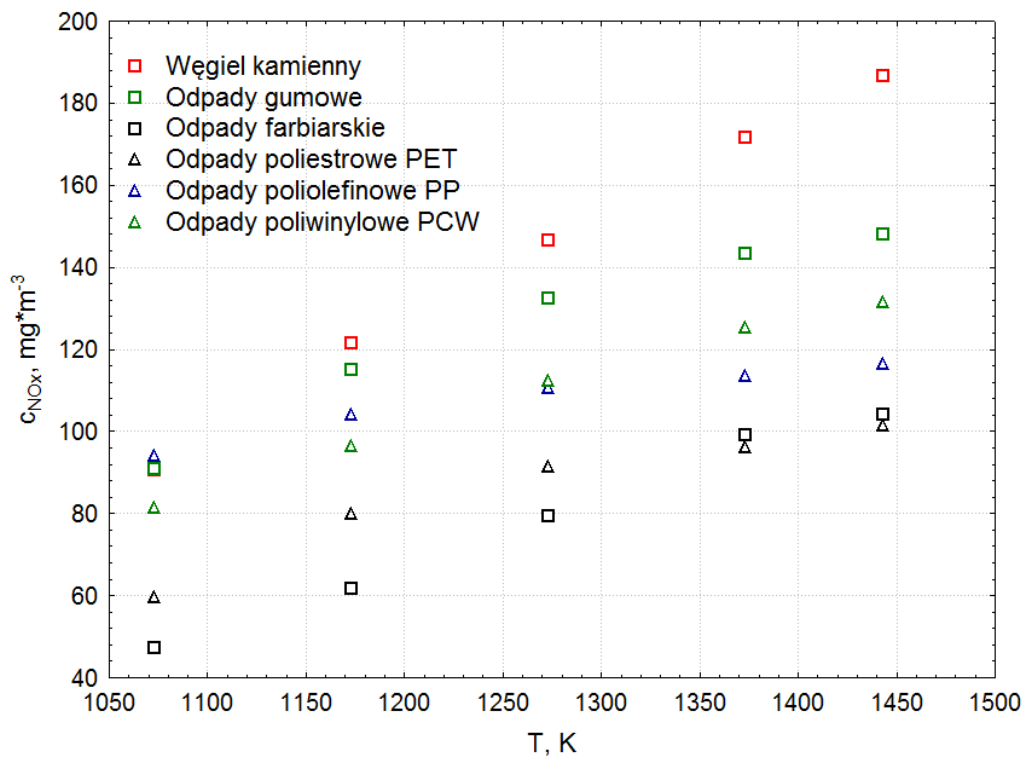


Rys. 3.27. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na stężenia tlenku węgla (II) c_{CO} powstającego w procesie współspalania badanych paliw;
parametry stałe: $T = 1273,15K$, $U = 10\%$

3. Badania własne

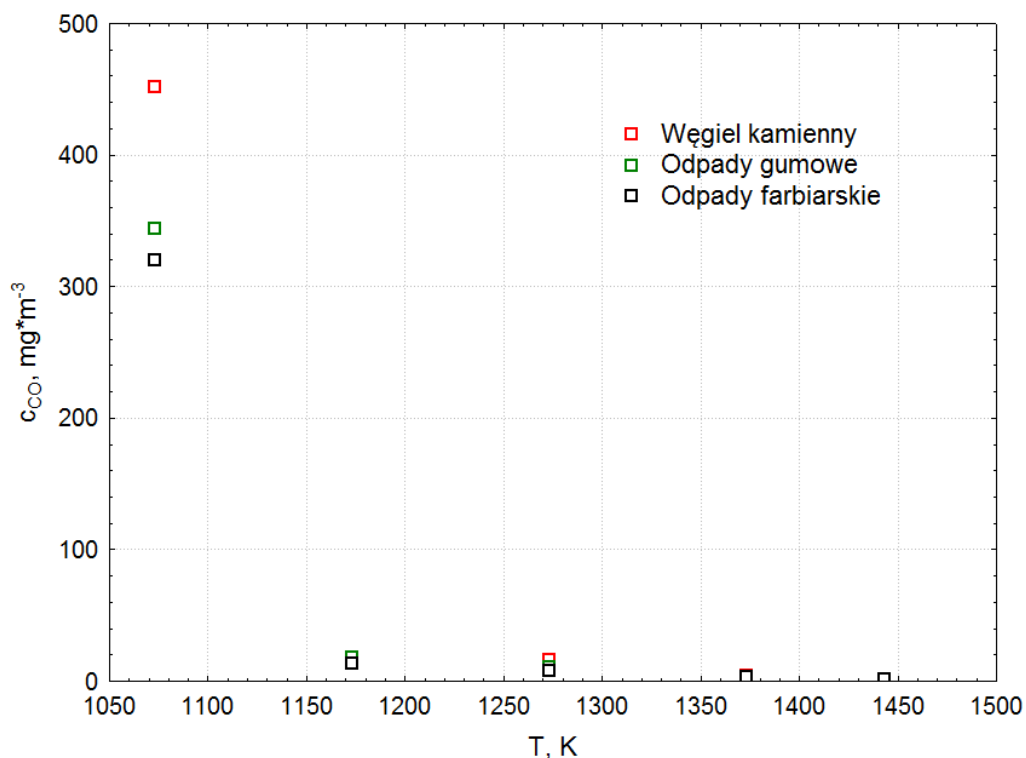


Rys. 3.28. Wpływ temperatury w strefie spalania reaktora pieca na stężenia tlenku siarki(IV) c_{SO_2} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; parametry stałe: $\lambda=1,8$, $U=10\%$

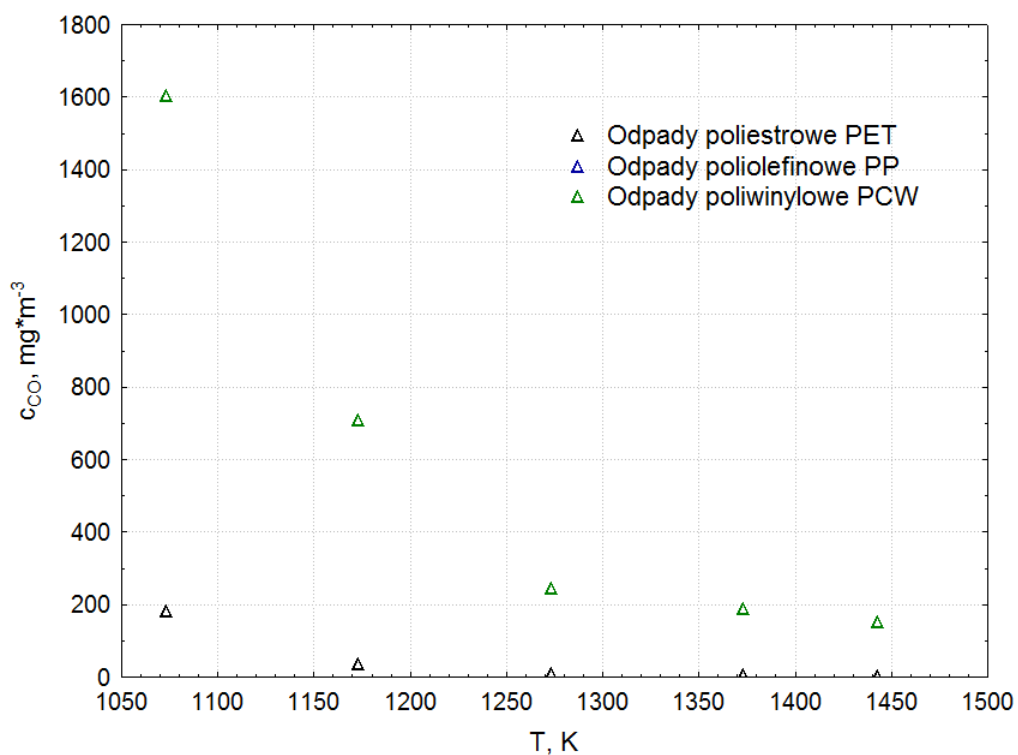


Rys. 3.29. Wpływ temperatury w strefie spalania reaktora pieca na stężenia tlenków azotu c_{NO_x} powstających w procesie współspalania badanych paliw; parametry stałe: $\lambda=1,8$, $U=10\%$

3. Badania własne



Rys. 3.30. Wpływ temperatury w strefie spalania reaktora pieca na stężenia tlenku węgla (II) c_{CO} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; parametry stałe: $\lambda= 1,8$, $U = 10\%$



Rys. 3.31. Wpływ temperatury w strefie spalania reaktora pieca na stężenia tlenku węgla (II) c_{CO} powstającego w procesie współspalania badanych paliw; parametry stałe: $\lambda= 1,8$, $U = 10\%$

Stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2}

Analiza wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie SO_2 powstałego w procesie spalania badanych paliw w temperaturze 1273,15K i przy współczynniku $\lambda = 1,8$, przedstawionych w tabeli 3.35 i na rysunku 3.20, pozwala stwierdzić, że wzrost tego udziału powoduje wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych dla wszystkich badanych paliw, oprócz odpadów gumowych. Związane jest to z wielkością stężeń tlenku siarki(IV) poszczególnych składników mieszanek paliwowych badanych w procesie spalania przy ww. stałych parametrach. Wielkości c_{SO_2} w procesie spalania samych osadów ściekowych w porównaniu do odpadów gumowych w tych samych warunkach są nieznacznie mniejsze, co było przyczyną niewielkiej obniżki stężenia tlenku siarki(IV) z wartości $402,83 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ dla samych odpadów gumowych do wartości 398,97 dla 10% zawartości osadów ściekowych w mieszance z odpadami gumowymi.

W pozostałych przypadkach badań spalania mieszanek paliwowych stwierdzono wzrost stężenia tlenku siarki(IV) w gazach spalinowych. Spalając mieszanki paliwowe węgla kamiennego z osadami ściekowymi zaobserwowano 6% wzrost wielkości c_{SO_2} w przypadku 10% udziału osadów ściekowych. Natomiast już w przypadku mieszanek paliwowych z pozostałymi badanymi odpadami stwierdzono duże wyższe wartości c_{SO_2} – wzrost 30% dla 10% U odpadów farbiarskich, podczas gdy dla 10% U odpadów z tworzyw sztucznych (PET, PP) w mieszance paliwowej, wzrost ten wynosił już ponad 100%. Związane jest to z dużo mniejszą emisją tlenku siarki(IV) w procesie spalania tych paliw w porównaniu z wynikami spalania osadów ściekowych. Oczywiście pośrednio jest to spowodowane zawartością siarki paliwowej w odpadach; o czym autor niniejszej rozprawy zwrócił uwagę w rozdziale 3.2.3.9.

Na podstawie wyników badań zmian wartości stężeń tlenku siarki(IV) w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza (przy stałych wartościach temperatury w komorze spalania równej 1273,15K i stałym (10%) udziale osadów ściekowych we wsadzie paliwa do tej komory), przedstawionych w tabeli 3.36 i pokazanych graficznie na rysunku 3.24 można stwierdzić jednoznacznie

obniżkę wartości c_{SO_2} w miarę zwiększania ilości doprowadzanego tlenu z powietrza dla wszystkich badanych paliw (potwierdza to zależność jaką zaobserwowano w przypadku spalania badanych paliw). Obniżka wartości stężeń tlenku siarki(IV) (przy wzroście współczynnika λ w granicach 1,3÷2,0) okazała się zróżnicowaną w zależności od badanych składników mieszanek paliwowych. Obniżka ta zmieniała się od 5% dla mieszanek osadów ściekowych zarówno z odpadami gumowymi, jak i poliwinylowymi (PCW), do około 40% dla mieszanek paliwowych z węglem kamiennym i mieszanek z odpadami poliestrowymi (PET); w przypadku mieszanek osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi i mieszanek z odpadami poliolefinowymi (PP) obniżka ta wyniosła około 25%. Analiza przebiegu krzywych zmienności stężeń tlenku siarki(IV), pokazanych na rysunku 3.24, stwierdza liniowość tych zmian w badanym zakresie, a wpływ współczynnika nadmiaru powietrza, w przypadku 10% udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej, można określić jako stosunkowo niewielki, podczas gdy wielkość tych wartości zależna jest od wartości zaobserwowano w przypadku spalania badanych paliw.

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie SO_2 powstałego w procesie współspalania mieszanek badanych paliw, przedstawionych w tabeli 3.37 i na rysunku 3.28, potwierdza analizę wyników spalania składników tych mieszanek, że wzrost temperatury spalania powoduje wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych paliw. Emisja tlenków siarki w największym stopniu zależy od rodzaju spalanego paliwa (jak wspomniano we wcześniejszych rozdziałach rozprawy, źródłem tlenków siarki w spalinach są prawie wyłącznie procesy utleniania siarki zawartej w paliwie). Jest to przyczyną największych wartości c_{SO_2} (zakres wzrostu – 245÷557 $mg \cdot m^{-3}$) w przypadku spalania mieszanki osadów ściekowych z odpadami gumowymi – paliwa posiadające największe wartości procentowe siarki paliwowej. Spalając mieszankę o 10% zawartości osadów ściekowych z odpadami zużytych opon samochodowych stwierdzono ponad 120% wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych w badanym zakresie temperatury spalania, natomiast w przypadku takiego samego udziału w mie-

szance z węglem kamiennym wzrost był również stosunkowo duży i wynosił ponad 100%. Podczas gdy spalanie w tych samych warunkach mieszanek osadów ściekowych z pozostałymi badanymi paliwami powodowały dużo mniejszy wzrost wartości c_{SO_2} , np. w przypadku mieszanek z termoplastami był to wzrost około 35%, natomiast z odpadami farbiarskimi – około 50% wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych w badanym zakresie temperatury spalania.

Stężenie sumy tlenków azotu c_{NO_x}

Analiza wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie powstałych w procesie spalania badanych paliw NO_x , przedstawionych w tabeli 3.36 i na rysunku 3.21, wskazuje, że wzrost udziału osadów ściekowych w badanym zakresie (0÷50%) powoduje wzrost stężenia sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych mieszanek paliwowych. Analiza krzywych ilustrujących te przebiegi, pokazanych zbiorczo na rysunku 3.21, wyraźnie wskazuje na bardzo duży wpływ tego udziału na wartość stężeń NO_x , co spowodowane jest dużą różnicą zawartości azotu paliwowego w osadach ściekowych (w tabeli 3.24 podano, zgodnie z wynikami literaturowymi, dla osadów ściekowych wartość około 4%, dla węgla kamiennego wartość ta wynosi 1,5%, w porównaniu z praktycznie niewielką procentową ilością azotu w pozostałych badanych paliwach). Konsekwencją zaobserwowanych w badaniach procesu spalania osadów ściekowych, dużo wyższa wartość stężeń tlenków azotu w porównaniu do wartości tych stężeń w przypadku procesów spalania pozostałych materiałów przeznaczonych do badań, jest fakt, że już przy 10% udziale osadów ściekowych w mieszance paliwowej obserwuje się znaczny wzrost c_{NO_x} w gazach spalinowych. Przykładowo, 10% dodatek osadów ściekowych do mieszanki paliwowej z węglem kamiennym powoduje 6% wzrost stężeń tlenków azotu, podczas gdy, przy tym samym wzroście udziału osadów ściekowych w mieszance z tworzywami sztucznymi zachodzi ponad 100% wzrost c_{NO_x} .

W procesie współspalania osadów ściekowych przyczyną wysokich wartościach c_{NO_x} były zarówno tlenki paliwowe (ze względu na ilość azotu elementar-

nego w paliwie i stosunkowo wysoki współczynnik nadmiaru powietrza ($\lambda = 1,8$), jako parametr niezależny będący parametrem stałym w badaniach współspalania), jak i tlenki termiczne, które pojawiały się w wysokich temperaturach badań procesu spalania mieszanek paliwowych (1273,15K).

Stężenie tlenku węgla(II) c_{CO}

Analiza wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie CO powstałego w procesie spalania badanych paliw w temperaturze 1273,15K i przy współczynniku $\lambda = 1,8$, przedstawionych w tabeli 3.35 i na rysunku 3.22 i 3.23, pozwala stwierdzić, że udział osadów ściekowych w mieszance paliwowej powoduje dużo mniejsze zmiany stężeń tlenku węgla(II) niż miało to miejsce w przypadku poprzednich gazów spalinowych (SO_2 i NO_x). Wzrost parametru U w pełnym zakresie badań (0÷50%) powodował nieprzekraczające 20% zmiany stężeń CO w procesie współspalania z większością badanych paliw, podczas gdy analizując 10% wzrost udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej zaobserwowano niewielkie (od około 2% dla mieszanek z miałem węglowym, odpadami poliwinylowymi i gumowymi, do około 8% w przypadku mieszanki z odpadami farbiarskimi) zmiany tych stężeń. Ze względu na wysoką wartość stałego parametru niezależnego badań udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej, jakim była temperatura procesu spalania tych mieszanek (1273K), wartości stężeń tlenku węgla(II) powstającego w spalin w wyniku tego procesu były stosunkowo niskie i nieprzekraczające wartości $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, w przypadku mieszanek większości paliw. Tylko przy współspalaniu osadów ściekowych wraz odpadami poliolefinowymi i poliwinylowymi zaobserwowano bardzo wysokie stężenia CO w spalinach, wynika to z faktu porównywalnie wysokich stężeń tego gazu spalinowego w przypadku spalania samych odpadów PP i PCW (rysunek 3.13). Przyczynę tak wysokich wartości próbowano wyjaśnić w rozdziale 3.2.3.9. Wzrost udziału osadów ściekowych o 50% w mieszance paliwowej z tymi odpadami powodował około 15% spadek wartości stężenia CO. Spadek stężenia tlenku węgla(II) zaobserwowano też przy analizie wyników badań współspalania osadów ściekowych z węglem kamiennym. Ob-

niżka stężenia również była niewielka i wynosiła 10%. Analizując wyniki badań spalania mieszanek osadów ściekowych z pozostałymi odpadami (gumowymi, farbiarskimi i poliestrowymi) zauważono natomiast, że wzrost parametru U powodował obniżkę c_{CO} w gazach spalinowych z procesu spalania tych mieszanek. Dla 10% wzrostu udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej, wzrost c_{CO} nie przekroczył wartości 40%. Tabela 3.25 pokazuje, że wartości stężeń tlenu węgla(II) powstałych w wyniku spalania poszczególnych odpadów przy takich samych stałych parametrach procesu (temperatura spalania, współczynnik nadmiaru powietrza i masa wsadu do komory pieca) jak w przypadku badań współspalania osadów ściekowych z tymi odpadami, są porównywalne (oczywiście z wyjątkiem odpadów z PP i PCW). Wartości c_{CO} powstałe w wyniku spalania osadów ściekowych były wyższe od c_{CO} zaobserwowanych przy spalaniu odpadów gumowych, farbiarskich i poliestrowych. Dlatego też w procesie współspalania osadów ściekowych w mieszance z tymi odpadami nastąpił wzrost stężeń tlenu węgla(II), ale był on niewielki (kilkuprocentowy przy 10% wzroście udziału osadów ściekowych w mieszance), gdyż różnice stężeń CO powstałych po procesie spalania tych odpadów i osadów ściekowych również były niewielkie.

Analiza wyników badań wpływu nadmiaru powietrza dostarczanego do procesu spalania mieszanek osadów ściekowych z badanymi odpadami na stężenie tlenu węgla(II), przedstawionych w tabeli 3.36 oraz na rysunku 3.26 i 3.27, potwierdza fakt wynikający z analizy procesu spalania tych paliw, że jeżeli rośnie wartość współczynnika nadmiaru powietrza zbliża, to z reguły obserwuje się spadek udziału tlenu węgla(II) w spalinach.

Również analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie, powstałego w procesie współspalania badanych paliw, tlenu węgla(II), przedstawionych w tabeli 3.37 oraz na rysunku 3.30 i 3.31, potwierdza fakt wynikający z analizy procesu spalania tych paliw, że wzrost temperatury spalania powoduje spadek wartości stężenia CO w gazach spalinowych. Obniżkę c_{CO} zaobserwowano dla wszystkich badanych mieszanek paliwowych przy stałym wskaźniku masy paliwa i powietrza dostarczanego do komory spalania.

3.2.4.9. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces współspalania osadów ściekowych wraz wybranymi odpadami

W ramach weryfikacji równań opisujących proces współspalania osadów ściekowych wraz wybranymi odpadami wykonano dodatkowe badania w warunkach laboratoryjnych w instalacji do badania procesu spalania i współspalania odpadów opisanej w rozdziale 3.2.1. niniejszej pracy.

Na podstawie przyjętych do tych prób laboratoryjnych, parametrów zmiennej niezależnej, obliczono z równań analityczno-empirycznych wartości parametrów wynikowych i porównano z otrzymanymi w wyniku badań procesu współspalania. Wyniki te zostały przedstawione w tabeli 3.38.

Dokładność równań oceniono testem t-studenta. Dla $n - 1 = 6$ stopni swobody i przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ z tablic rozkładu t-studenta odczytano wartość graniczną t_{α} wynoszącą:

$$t_{0,05} = 2,447$$

Porównując uzyskane wartości poszczególnych funkcji testowych t z wartością graniczną $t_{0,05}$ widać, że wszystkie te wartości są mniejsze od wartości granicznej. Oznacza to, że nie znajdujemy się w obszarze krytycznym, zatem różnice między wartościami uzyskanymi z doświadczeń a obliczonych wzorami nie są w stosunku do wartości hipotetycznej H_0 statystycznie istotne, tzn. można je usprawiedliwić przypadkiem.

W związku z tym należy stwierdzić, że przy 95% ufności, otrzymane w wyniku analizy badań współspalania osadów ściekowych wraz wybranymi odpadami, równania są prawidłowe, a wartości otrzymane na ich podstawie są zgodne z wynikami otrzymanymi w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 3.38. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie współspalania osadów ściekowych i wybranych odpadów

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{SO_2} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i węgla kamiennego							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	86,70	74,36	12,34	14,45	2725,79	210,74	14,52	2,438
10	1,6	1123,15	79,29	77,22	2,07					
15	1,9	1223,15	78,32	88,66	10,34					
20	1,4	1253,15	120,56	122,98	2,42					
25	1,6	1273,15	115,34	100,10	15,24					
35	1,9	1323,15	116,52	102,96	13,56					
45	1,4	1413,15	183,63	228,80	45,17					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NO_x} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i węgla kamiennego							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	31,88	28,78	3,10	14,79	2958,79	237,88	15,42	2,349
10	1,6	1123,15	71,82	80,18	8,36					
15	1,9	1223,15	158,17	131,58	26,59					
20	1,4	1253,15	89,69	84,30	5,39					
25	1,6	1273,15	130,72	119,25	11,47					
35	1,9	1323,15	213,27	168,59	44,68					
45	1,4	1413,15	170,81	174,76	3,95					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NO_x} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i odpadów gumowych							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	87,27	84,30	2,97	13,83	2582,61	207,36	14,4	2,353
10	1,6	1123,15	100,35	115,14	14,79					
15	1,9	1223,15	132,50	176,82	44,32					
20	1,4	1253,15	131,05	125,42	5,63					
25	1,6	1273,15	144,00	160,37	16,37					
35	1,9	1323,15	174,83	178,87	4,04					
45	1,4	1413,15	194,87	203,54	8,67					

Tabela 3.38. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie współspalania osadów ściekowych i wybranych odpadów

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{CO} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i odpadów gumowych							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	140,48	152,50	12,02	3,94	229,56	20,19	4,49	2,149
10	1,6	1123,15	76,58	85,00	8,42					
15	1,9	1223,15	5,60	5,00	0,60					
20	1,4	1253,15	9,27	6,25	3,02					
25	1,6	1273,15	6,68	5,00	1,68					
35	1,9	1323,15	3,19	3,75	0,56					
45	1,4	1413,15	8,75	10,00	1,25					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NOx} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i odpadów farbiarskich							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	27,05	30,84	3,79	11,15	1659,82	131,59	11,47	2,381
10	1,6	1123,15	44,46	43,17	1,28					
15	1,9	1223,15	85,15	94,57	9,43					
20	1,4	1253,15	72,95	67,85	5,10					
25	1,6	1273,15	93,87	98,69	4,82					
35	1,9	1323,15	143,48	164,48	21,00					
45	1,4	1413,15	166,27	133,64	32,63					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{SO2} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i odpadów farbiarskich							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	31,38	34,32	2,94	9,88	1292,11	101,37	10,07	2,403
10	1,6	1123,15	34,93	40,04	5,11					
15	1,9	1223,15	41,37	42,90	1,53					
20	1,4	1253,15	55,03	51,48	3,55					
25	1,6	1273,15	59,82	68,64	8,82					
35	1,9	1323,15	72,84	91,52	18,68					
45	1,4	1413,15	100,14	128,70	28,56					

Tabela 3.38. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie współspalania osadów ściekowych i wybranych odpadów

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NOx} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i odpadów poliwinylowych							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	30,81	26,73	4,08	15,43	3228,11	260,24	16,13	2,343
10	1,6	1123,15	75,25	67,85	7,40					
15	1,9	1223,15	131,39	141,86	10,47					
20	1,4	1253,15	155,04	150,09	4,95					
25	1,6	1273,15	193,47	209,71	16,24					
35	1,9	1323,15	263,23	277,56	14,33					
45	1,4	1413,15	309,27	359,80	50,53					
Parametry niezależne			Parametr wynikowy c_{NOx} Paliwo – mieszanka osadów ściekowych i odpadów poliolefinowych							
U, %	λ	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
5	1,4	1103,15	27,05	31,46	4,41	15,33	3089,86	240,65	15,51	2,421
10	1,6	1123,15	43,32	40,04	3,28					
15	1,9	1223,15	61,75	65,78	4,03					
20	1,4	1253,15	94,01	102,96	8,95					
25	1,6	1273,15	113,44	143,00	29,56					
35	1,9	1323,15	158,19	171,60	13,41					
45	1,4	1413,15	225,14	268,84	43,70					

3.3. Oczyszczanie spalin po procesie spalania

3.3.1. Odsiarczanie spalin metodą wapniową

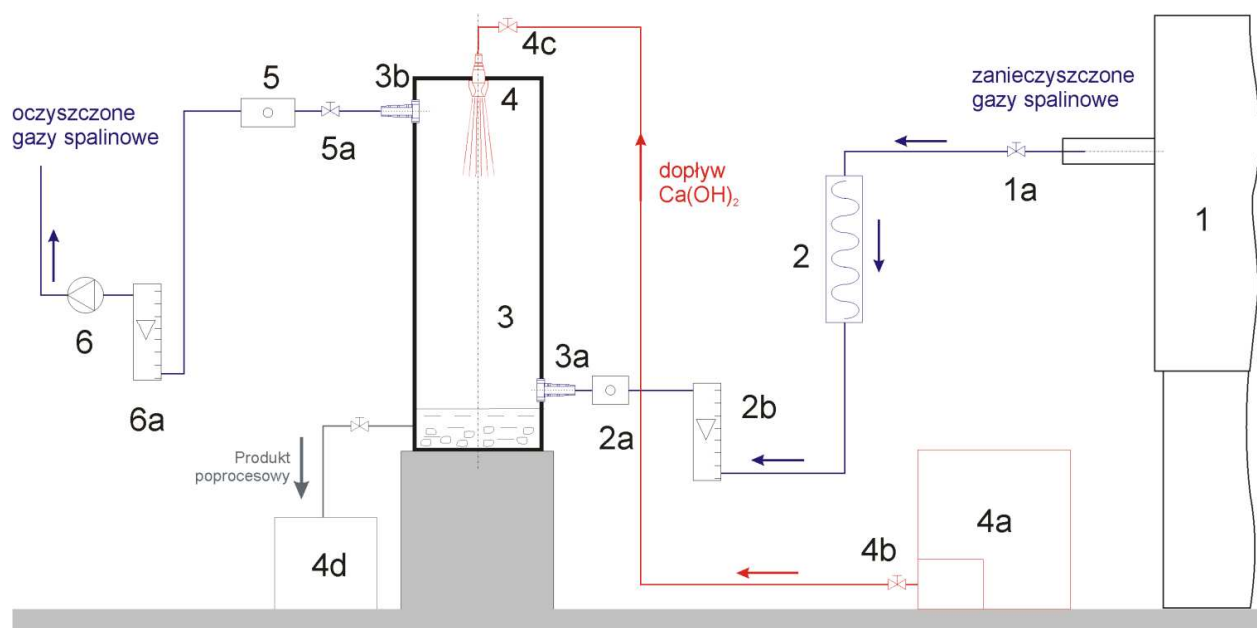
3.3.1.1 Opis stanowiska badawczego

Do przeprowadzenia badań skuteczności usuwania tlenku siarki(IV) SO_2 metodą wapniową służyła instalacja badawcza przedstawiona na zdjęciu 3.4 oraz schematycznie na rys. 3.32. W skład instalacji wchodziły układy: absorpcyjny, chłodzenia spalin na wylocie z reaktora pieca, przygotowania i transportu wodnego roztworu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oraz układu pomiarowego stężeń SO_2 w oczyszczonych gazach spalinowych.

Gazy spalinowe powstałe po procesie spalania w piecu (1) zanieczyszczone tlenkiem siarki(IV), poprzez zawór (1a), po uprzednim ochłodzeniu do odpowiedniej temperatury (regulowanej czasem przebywania spalin w układzie chłodzącym (2) i mierzonej za pomocą termopary w punkcie pomiaru tej temperatury (2a)) kontaktowały się w skruberze natryskowym (3) z rozpylonym za pomocą rozpylacza (4) nasyconym (0,17%) wodnym roztworem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ze zbiornika (4a). Przepływ spalin do skrubera króćcem wlotowym (3a) mierzony był przy pomocy rotametu stołowego (2b). Ciecz ze skrubera odpływała grawitacyjnie do zbiornika (4d). Kierunek przepływu faz w skruberze był przeciwwprądowy. Strumień objętości rozpylanej cieczy absorpcyjnej ustalano korzystając z zaworów (4b, 4c).



Zdjęcie. 3.4. Instalacja do badania procesu odsiarczanie spalin metodą wapniową; obok zestaw skruberów



Rys. 3.32. Schemat stanowiska badawczego do procesu odsiarczania spalin metodą wapieniową; 1 – piec rurowy, 2 – układ chłodzący gazy spalinowe, 3 – skrubler, 4 – układ rozpylający ciecz adsorpcyjną, 5 – miejsce pomiarowe stężenia tlenku siarki (IV) przy pomocy sondy analizatora spalin, 6 – pompka przeponowa

Odsiarczone gazy spalinowe opuszczające skrubler jego górnym króćcem wylotowym (3b), poprzez zawór (5a) analizowane były poprzez oznaczanie w nich stężenia SO_2 . W punkcie pomiarowym (5) umieszczana była sonda analizatora spalin mierzącego wartości tych stężeń, opisanego już wcześniej w rozdziale 3.2.1. Przepływ spalin ze skrubera (3) regulowany pompką przeponową (6) mierzony był przy pomocy rotametr stołowego (6a).

Badania procesu odsiarczania spalin metodą wapieniową prowadzono przy następujących stałych dodatkowych parametrach spalania klasycznego paliwa, jakim był węgiel kamienny scharakteryzowany w rozdziale rozprawy o materiałach przeznaczonych do badań:

- temperatura w strefie spalania pieca $T = 1373,15\text{K}$,
- współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$,
- wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.3.1.2. Metodyka badań

W badaniach procesu odsiarczania spalin metodą wapniową jako parametry niezależne (zmienne) przyjęto:

X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym Ca(OH)_2 $L_{\text{Ca(OH)}_2}$, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

X_2 – wysokość skrubera H_{skr} , m,

X_3 – iloraz L/G , dm^3/m^3 ,

X_4 – temperatura spalin T_s , K.

Pierwszy parametr niezależny – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym Ca(OH)_2 wynikał z zależności:

$$L_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{\dot{V}_c}{A}, \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.141)$$

gdzie:

\dot{V}_c – strumień objętości cieczy absorpcyjnej, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

A – powierzchnia przekroju absorbera, m^2 .

Pomiar strumienia objętości cieczy absorpcyjnej (objętościowego natężenia przepływu cieczy absorpcyjnej) regulowano odpowiednimi zaworami w zraszaczu i został wycechowany za pomocą cylindra miarowego i czasomierza. Ilość cieczy zraszającej była odnoszona do powierzchni przekroju kolumny absorbera i ostatecznie oznaczana jako gęstość zraszania $L_{\text{Ca(OH)}_2}$. W układzie stanowiska badań procesu odsiarczania spalin metodą wapniową instalowano kilka kolumn skrubera o różnych powierzchniach przekroju i gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym oznaczano przy stałym strumieniu jego objętości.

Drugi parametr niezależny – wysokość skrubera był parametrem, którego zmienność wynikała z tego, że w układzie stanowiska badawczego zmieniano kolumny skrubera o różnych wysokościach (w przypadku badań ze zmiennym parametrem gęstości zraszania dodatkowo zmieniano powierzchnie przekroju tych kolumn).

Iloraz L/G, jako trzeci parametr niezależny to wskaźnik ilustrujący zależność strumieni objętościowych cieczy (L) absorpcyjnej, dm^3 i gazu (G) oczyszczanego, m^3 . W literaturze opisującej przepływy strumieni cieczy i gazu (ich przeniesienia) spotyka się też formułę \dot{V}_L/\dot{V}_G [92, 94].

Ostatni parametr niezależny – temperatura spalin, mierzony był w punkcie wlotu zanieczyszczonych gazów spalinowych do skrubera natryskowego za pomocą miernika temperatury EMT-50-K firmy CZAKI Thermo-Product z termoelementem NiCr-NiAl o zakresie mierniczym $-100\div+1200^\circ\text{C}$ i dokładności $\pm 1^\circ\text{C}$.

Natomiast parametr zależny (wynikowy) w badaniach odsiarczania spalin metodą wapniową to:

Y_1 – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) SO_2 η_{SO_2} , %

Skuteczność procesu odsiarczania spalin metodą wapniową wynika z następującej zależności:

$$\eta_{\text{SO}_2} = \frac{c_{\text{SO}_2}^0 - c_{\text{SO}_2}}{c_{\text{SO}_2}^0} \cdot 100\%$$

gdzie:

$c_{\text{SO}_2}^0$, c_{SO_2} oznaczają odpowiednio stężenie SO_2 w gazach spalinowych na wlocie do absorbera i w ostatnim punkcie pomiarowym (w gazach opuszczających skrubler).

W pierwszej serii badań własnych procesu odsiarczania spalin metodą wapniową, jako stałe parametry niezależne zostały przyjęte:

X_2 – wysokość skrubera $H_{\text{skr}} = 0,12$ m,

X_3 – iloraz $L/G = 2,2$ dm^3/m^3 ,

X_4 – temperatura spalin $T_s = 408,15$ K.

Wartości te stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji.

3. Badania własne

Parametr X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{Ca(OH)_2}$, został przyjęty jako zmienny parametr niezależny. Wartości tego parametru wynosiły: $0,61 \cdot 10^{-4}$, $0,95 \cdot 10^{-4}$, $2,40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

W kolejnym etapie tych badań, parametrami niezależnymi stałymi (które stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji) były:

X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

X_3 – iloraz $L/G = 2,2 \text{ dm}^3/\text{m}^3$,

X_4 – temperatura spalin $T_s = 408,15\text{K}$.

Jako drugi rozpatrywany parametr zmienny niezależny przyjęto (X_2) tj. wysokość skrubera H_{skr} , która wynosiła 0,12, 0,20, 0,28 m.

W trzecim etapie badań procesu odsiarczania spalin metodą wapniową, parametrami niezależnymi stałymi były:

X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

X_2 – wysokość skrubera $H_{skr} = 0,12 \text{ m}$,

X_4 – temperatura spalin $T_s = 408,15\text{K}$.

W etapie tym zmieniano parametr X_3 , tj. iloraz L/G , którego wartości wynosiły: 2,2, 2,4 i 2,9 dm^3/m^3 .

W ostatnim etapie badań procesu odsiarczania spalin metodą wapniową, parametrami niezależnymi stałymi były:

X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

X_2 – wysokość skrubera $H_{skr} = 0,12 \text{ m}$,

X_3 – iloraz $L/G = 2,2 \text{ dm}^3/\text{m}^3$.

W etapie tym zmieniano parametr X_4 , tj. temperatura spalin T_s . Parametr ten zmieniano w zakresie: $398,15 \div 413,15\text{K}$, zwiększając go co 5K.

3.3.1.3. Zestawienie wyników badań odsiarczania spalin metodą wapniową

W tabeli Z118 pokazano wyniki badań wpływu gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową. Dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z118.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$\eta_{\text{SO}_2}(L_{\text{Ca(OH)}_2}) = 170,172 + 8,92419 \cdot \log(0,453 \cdot 10^{-4} + L_{\text{Ca(OH)}_2}) \quad (3.142)$$

gdzie:

η_{SO_2} – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV), % – wielkość zależna, wynikowa

$L_{\text{Ca(OH)}_2}$ – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

W tabeli Z119 pokazano wyniki badań wpływu wysokości skrubera na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z119.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$\eta_{\text{SO}_2}(L, H_{\text{skr}}) = 176,978 + 8,92419 \cdot \ln(0,453 \cdot 10^{-4} + L) + 15,4484 \cdot \ln(0,52358485 + H_{\text{skr}}) \quad (3.143)$$

gdzie:

η_{SO_2} – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV), % – wielkość zależna, wynikowa

$L_{\text{Ca(OH)}_2}$ – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

H_{skr} – wysokość skrubera, m – wielkość niezależna

3. Badania własne

Wyniki badań wpływu ilorazu L/G na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową pokazano w tabeli Z120. Rysunek Z120 przedstawia, zawarte w tabeli Z120 wyniki badań wpływu ilorazu L/G na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$\eta_{\text{SO}_2}(L, H_{\text{skr}}, L/G) = 180,589 + 8,92419 \cdot \ln(0,453 \cdot 10^{-4} + L) + \\ + 15,4484 \cdot \ln(0,52358485 + H_{\text{skr}}) + 2,9123 \cdot \ln(-1,9105895 + L/G) \quad (3.144)$$

gdzie:

η_{SO_2} – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV), % – wielkość zależna, wynikowa

$L_{\text{Ca(OH)}_2}$ – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

H_{skr} – wysokość skrubera, m – wielkość niezależna

L/G – iloraz natężenia przepływu roztworu absorpcyjnego i natężenia przepływu spalin, dm^3/m^3 – wielkość niezależna

Wyniki badań wpływu temperatury spalin T_s na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową pokazano w tabeli Z121. Rysunek Z121 przedstawia, zawarte w tabeli Z121, wyniki badań wpływu zmian temperatury spalin T_s na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim, trzecim i czwartym stopniu przyjmie następującą postać:

$$\eta_{\text{SO}_2}(L, H_{\text{skr}}, L/G, T_s) = 167,79 + 8,92419 \cdot \ln(0,453 \cdot 10^{-4} + L) + \\ + 15,4484 \cdot \ln(0,52358485 + H_{\text{skr}}) + 2,9123 \cdot \ln(-1,9105895 + L/G) + \\ + 4,2416 \cdot \ln(-387,71153574 + T_s) \quad (3.145)$$

gdzie:

η_{SO_2} – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV), % – wielkość zależna, wynikowa

$L_{\text{Ca(OH)}_2}$ – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

H_{skr} – wysokość skrubera, m – wielkość niezależna

L/G – iloraz natężenia przepływu roztworu absorpcyjnego i natężenia przepływu spalin, dm^3/m^3 – wielkość niezależna

T_s – temperatura spalin, K – wielkość niezależna

3.3.1.4. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia tlenku siarki(IV) SO_2 po procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Wyniki badań wpływu zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową pokazano w tabeli Z118 i dodatkowo na rysunku Z118. Badania przeprowadzono przy stałej wysokości skrubera i przepływu gazów spalinowych oraz ich stałej temperaturze. Analiza wyników tych badań wskazuje, że wraz ze wzrostem gęstości zraszania obniża się wartość stężenia SO_2 w spalinach opuszczających absorber (wzrasta skuteczność ich oczyszczania z tlenku siarki(IV)). Dla wartości gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{\text{Ca(OH)}_2}$ wynoszącym $0,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ określono skuteczność odsiarczania równą około 89%, podczas gdy 4-krotny wzrost wartości tego parametru zwiększa skuteczność odsiarczania do ponad 97%. Zwiększenie skuteczności oczyszczania gazów spalinowych z SO_2 powodowana jest wzrostem powierzchni kontaktu fazy gazowej i stałej (w absorberach natryskowych jest ona proporcjonalna do gęstości zraszania). Na podstawie kształtu krzywej przedstawionej na wykresu Z118 można przypuszczać, że dalsze zwiększenie gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{\text{Ca(OH)}_2}$ może poprawić skuteczności odsiarczania, ale w bardzo małym stopniu (maksymalnie do 98% skuteczności).

Analiza wyników badań wpływu zmian wysokości skrubera na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową przedstawionych w tabeli Z119 i na rysunku Z119 wykazała, że wraz z wydłużeniem długości drogi kontaktu zanieczyszczonych gazów spalinowych z cieczą adsorpcyjną rosła wartość skuteczności oczyszczania spalin z SO₂. Prawie 2,5-krotne zwiększenie wysokości absorbera powodowało wzrost skuteczności z około 89% do około 92%. Liniowy charakter krzywej zależności przedstawionych na rysunku Z119 wskazuje na to, że w badanym zakresie zmian H_{skr} , skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) ze spalin jest stała i dalsze zwiększanie wysokości skrubera natryskowego może poprawić efekt oczyszczania spalin. Badania przeprowadzono przy stałej gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym i przepływu gazów spalinowych oraz ich stałej temperaturze.

W tabeli Z120 i graficznie na rysunku Z120 przedstawiono wyniki badań wpływu ilorazu L/G na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową. Wpływ ilorazu L/G, a więc zależności objętościowych przepływów cieczy absorpcyjnej i gazów spalinowych (im mniejszy przepływ spalin, tym większy iloraz L/G), sprowadzał się do zależności wpływu strumienia spalin na skuteczność odsiarczania. Badania przeprowadzono przy stałej gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym i wysokości skrubera natryskowego oraz stałej temperaturze gazów spalinowych. Analiza tych wyników wskazuje na wzrost efektywności oczyszczania gazów spalinowych tlenku siarki(IV) wraz ze wzrostem ilorazu L/G. Im wolniejszy przepływ gazów spalinowych, tym dłuższy czas kontaktu fazy ciekłej i gazowej, a co za tym idzie, możliwość zwiększenia ilości cząsteczek gazu dyfundujących do cieczy absorpcyjnej. Kształt krzywej wskazuje na przepuszczenie, że dalsze zmniejszanie przepływu gazów spalinowych może tylko w niewielkim stopniu poprawić skuteczność odsiarczania spalin (prawdopodobnie tylko do około 93% skuteczności).

Na stan równowagi w układzie absorpcyjnym gaz–ciecz dodatkowo ma wpływ temperatura procesu, regulowana temperaturą gazów spalinowych. Wpływ temperatury spalin T_s na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową pokazuje tabela Z121 i przedstawia

rysunek Z121. Badania przeprowadzono przy stałej gęstość zraszania roztworem cieczy absorpcyjnej i wysokości skrubera natryskowego oraz stałym ilorazie L/G. Na podstawie analizy wyników można stwierdzić niewielki wzrost skuteczności odsiarczania z wartości około 86% przy temperaturze spalin równej 398,15K do stosunkowo niskiej wartości około 89% skuteczności odsiarczania przy temperaturze 413,15K. Logarytmiczny charakter krzywej pozwala sądzić, że dalszy wzrost temperatury spalin nie spowoduje istotnej zmiany skuteczności procesu oczyszczania tych spalin z tlenku siarki(IV). Optymalną temperaturą procesu odsiarczania w przypadku metody wapniowej wydaje się temperatura spalin około 410,15K. W przypadku takich warunków temperaturowych, dalszego wzrostu skuteczności odsiarczania spalin należy szukać w możliwościach zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym, gdyż to właśnie ten parametr ma największy wpływ na polepszenie usuwania SO₂ z gazów spalinowych.

3.3.1.5. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces odsiarczania spalin metodą wapniową

W ramach weryfikacji równań opisujących proces odsiarczania spalin metodą wapniową wykonano dodatkowe badania w warunkach laboratoryjnych w instalacji do badania tego procesu, opisanej w rozdziale 3.3.1.1. niniejszej pracy.

Na podstawie przyjętych do tych prób laboratoryjnych, parametrów zmiennych niezależnych, obliczono z równań analityczno-empirycznych wartości parametrów wynikowych i porównano z otrzymanymi w wyniku badań procesu odsiarczania spalin metodą wapniową. Wyniki te zostały przedstawione w tabeli 3.39.

Dokładność równań oceniono testem t-studenta. Dla $n - 1 = 6$ stopni swobody i przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ z tablic rozkładu t-studenta odczytano wartość graniczną t_{α} wynoszącą:

$$t_{0,05} = 2,447$$

Porównując uzyskane wartości poszczególnych funkcji testowych t z wartością graniczną $t_{0,05}$ widać, że wszystkie te wartości są mniejsze od wartości granicznej. Oznacza to, że nie znajdujemy się w obszarze krytycznym, zatem różnice między wartościami uzyskanymi z doświadczeń a obliczonych wzorami nie są w stosunku do wartości hipotetycznej H_0 statystycznie istotne, tzn. można je usprawiedliwić przypadkiem.

W związku z tym należy stwierdzić, że przy 95% ufności, otrzymane w wyniku analizy badań odsiarczania spalin metodą wapniową, równania są prawidłowe, a wartości otrzymane na ich podstawie są zgodne z wynikami otrzymanymi w warunkach laboratoryjnych.

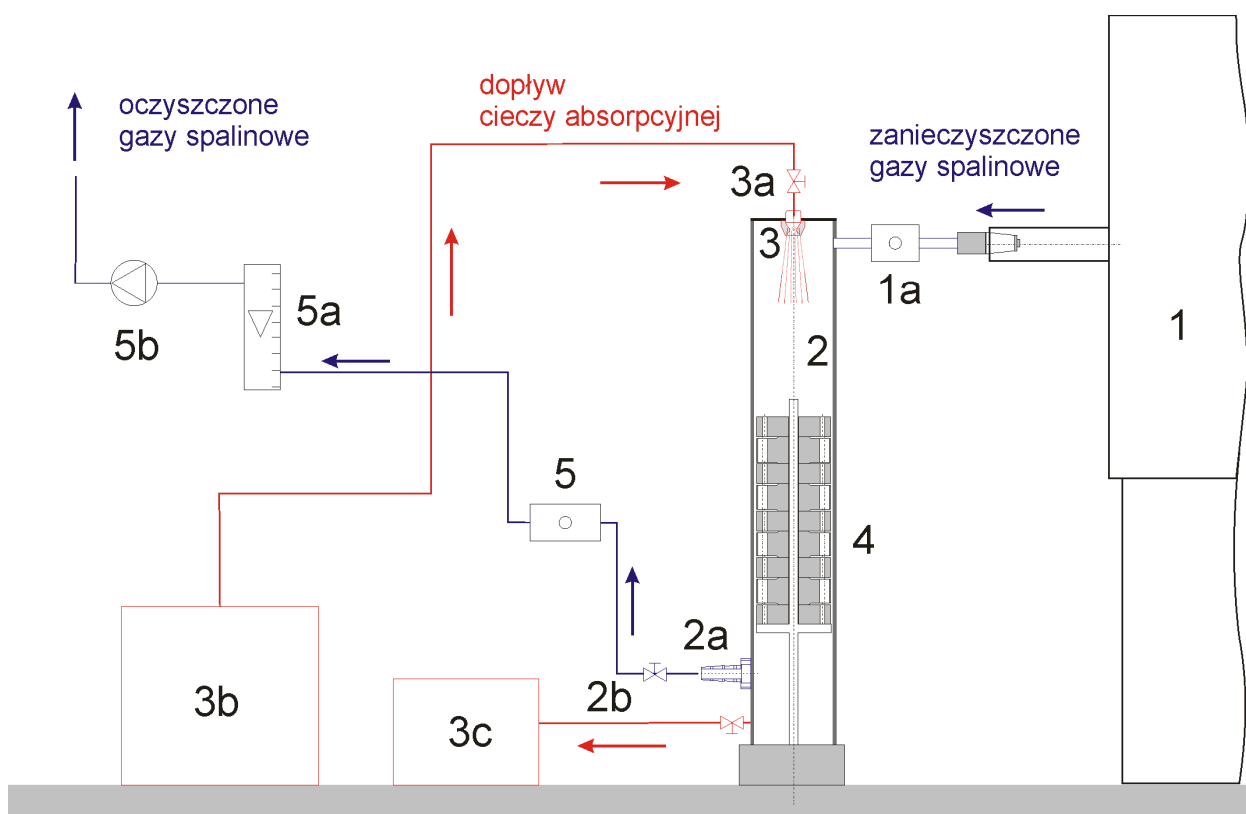
Tabela 3.39. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Parametry niezależne				Parametr wynikowy C_{SO_2}							
L, $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	H, m	L/G, dm^3/m^3	T, K	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
$6,10 \cdot 10^{-5}$	0,2	2,5	408,15	92,40	92,60	0,20	0,64	5,45	0,42	0,65	2,412
$8,70 \cdot 10^{-5}$	0,2	2,5	403,15	93,16	93,33	0,17					
$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,2	2,5	405,15	94,52	93,02	1,50					
$6,10 \cdot 10^{-5}$	0,2	2,5	407,15	92,19	91,86	0,33					
$8,70 \cdot 10^{-5}$	0,2	2,5	408,15	94,35	92,75	1,60					
$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,2	2,5	410,15	95,59	94,91	0,68					
$6,10 \cdot 10^{-5}$	0,2	2,5	411,15	92,98	93,01	0,03					

3.3.2. Usuwanie tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej

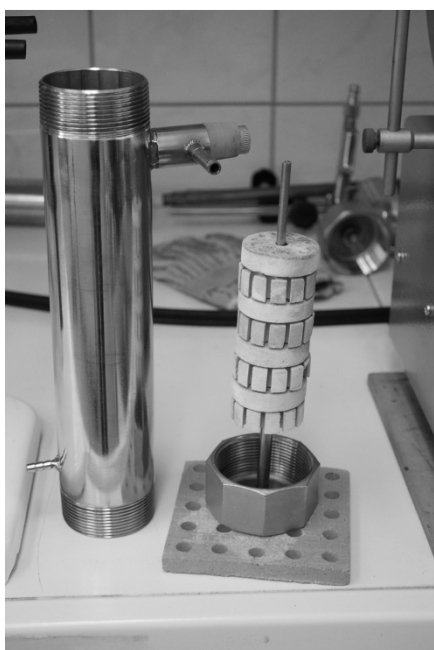
3.3.2.1 Opis stanowiska badawczego

Schemat instalacji doświadczalnej badań nad usuwaniem tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej przedstawiono na zdjęciu 3.5 i schematycznie na rysunku 3.33. Instalacja ta składała się z trzech podstawowych węzłów: przygotowania dozowania roztworu cieczy absorpcyjnej (redukcującej), reaktora do katalitycznej redukcji tlenków azotu, układu pomiarowego stężeń tlenków azotu.



Rys. 3.33. Schemat stanowiska badawczego do procesu usuwania NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej; 1 – piec rurowy, 2 – skrubier natryskowy, 3 – układ zraszacza cieczy adsorpcyjnej, 4 – układ katalizatorów, 5 – miejsce pomiaru stężeń NO_x przy pomocy sondy analizatora spalin

3. Badania własne



Zdjęcie. 3.5. Instalacja do badania procesu usuwania NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej; obok układ katalizatorów

W metodzie selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) jako czynnik redukujący stosuje się amoniak NH₃. Jednakże zgodnie z kartą charakterystyki 25% wodnego roztworu amoniaku klasyfikowany jest jako produkt niebezpieczny, gdyż odczynnik ten jest substancją silnie toksyczną, trująca i żrącą. Dodatkowo istnieje ryzyko wybuchu (mieszanka z powietrzem w zakresie zawartości amo-

niaku 15÷27% jest wybuchowa) lub tworzenia toksycznych gazów z wieloma substancjami, w tym nawet z ditlenkiem węgla, tlenem. Dlatego też, do badań, jako ciecz absorpcyjną zdecydowano się zastosować 32,5% wodny roztwór mocznika otrzymywanego z technicznie czystego mocznika i wody zdemini-
zowanej. Jest to substancja nietoksyczna i bezpieczna dla środowiska i tylko przechowywanie tego roztworu w temperaturze powyżej 30°C może spowodować jego rozpad z utworzeniem amoniaku. Roztwór mocznika z powodzeniem znajduje zastosowanie przy selektywnej redukcji katalitycznej jako czynnik redukujący.

Iniekcja roztworu mocznika odbywała się za pomocą rozpylacza (3) pokrywającego mgłą roztworu cały przekrój kanału spalin w skruberze natryskowym (2). Tam następowała jego reakcja z gazami spalinowymi zanieczyszczonymi tlenkami azotu, powstałymi w procesie spalania w piecu rurowym (1), po uprzednim niewielkim ochłodzeniu do odpowiedniej temperatury mierzonej za pomocą termopary w układzie pomiaru temperatury spalin (1a) (proces SCR optymalnie przebiega w temperaturze gazów spalinowych w zakresie 423÷673K [10, 32, 93]). Strumień objętości rozpylanej cieczy absorpcyjnej ustalano korzystając z zaworów (3a) ze zbiornika (3b). Produkt poprocesowy służył grawitacyjnie do zbiornika (3c).

Kierunek przepływu faz w skruberze był współprądowy. Skruber posiadał formę kanału wypełnionego katalizatorem, przez który przepływają spaliny z dodatkiem roztworu mocznika, który jest wtryskiwany do gorących spalin (w których odparowuje) przed katalizatorem. Układ katalizatora (4) zbudowany jest z sześciu bloków w usytuowaniu pionowym, podobnie jak pionowy w dół jest przepływ gazów spalinowych. Katalizator tworzą ceramiczne elementy, na których została napylna substancja aktywna (właściwy reaktor katalityczny), którą w tej instalacji badawczej są tlenki wanadu V_2O_5 . Katalizatory z napylną warstwą aktywną V_2O_5 wykonał prof. Witold Gulbiński z Instytutu Mechatroniki Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej

Gazy spalinowe po procesie redukcji NO_x opuszczające skruber jego dolnym króćcem wylotowym (2a), poprzez zawór (2b) analizowane były poprzez

oznaczanie w nich stężenia sumy NO_x. W punkcie pomiarowym (5) umieszczana była sonda analizatora spalin mierzącego wartości tych stężeń, opisanego już wcześniej w rozdziale 3.2.1. Przepływ spalin ze skrubera (2) regulowany pompką przeponową (5b) mierzony był przy pomocy rotametu stołowego (5a).

3.3.2.2. Metodyka badań

W badaniach procesu usuwania tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej jako parametry niezależne (zmienne) przyjęto:

X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym L_{NH_3} , $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

X_2 – przepływ spalin v_s , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

X_3 – temperatura spalin T_s , K.

Pierwszy parametr niezależny – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym wynikał z zależności:

$$L_{\text{NH}_3} = \frac{\dot{V}_c}{A}, \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.146)$$

gdzie:

\dot{V}_c – strumień objętości cieczy absorpcyjnej, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

A – powierzchnia przekroju absorbera, m^2 .

Pomiar strumienia objętości cieczy absorpcyjnej (objętościowego natężenia przepływu cieczy absorpcyjnej) regulowano odpowiednimi zaworami w zraszaczu i został wycechowany za pomocą cylindra miarowego i czasomierza. Ilość cieczy zraszającej jest odnoszona do powierzchni przekroju kolumny absorbera i ostatecznie oznaczana jako gęstość zraszania L_{NH_3} . W układzie stanowiska badań procesu usuwania tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej zainstalowano pojedynczy skruber i dlatego gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym oznaczano przy zmiennym strumieniu jego objętości i stałym przekroju kolumny absorbera.

Kolejny parametr niezależny – przepływ spalin – mierzony był w punkcie wylotu oczyszczonych gazów spalinowych ze skrubera natryskowego. Parametr ten mierzony był z udziałem rotametu stołowego ROS-06 mierzącego natężenie przepływu gazów spalinowych w zakresie $0,5 \div 8,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Ostatni parametr niezależny – temperatura spalin, mierzony był w punkcie wlotu zanieczyszczonych gazów spalinowych do skrubera natryskowego za pomocą miernika temperatury opisanego w rozdziale 3.3.1.2.

Badania procesu redukcji tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej prowadzono przy następujących stałych, dodatkowych parametrach spalania klasycznego paliwa, jakim był węgiel kamienny scharakteryzowany w rozdziale rozprawy o materiałach przeznaczonych do badań:

- temperatura w strefie spalania pieca $T = 1373,15\text{K}$,
- współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$,
- wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Natomiast parametr zależny (wynikowy) w badaniach usuwania tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej to:

Y_1 – skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x η_{NO_x} , %

Skuteczność procesu usuwania tlenków azotu z gazów spalinowych wynika z następującej zależności:

$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{c_{\text{NO}_x}^0 - c_{\text{NO}_x}}{c_{\text{NO}_x}^0} \cdot 100\% \quad (3.147)$$

gdzie:

$c_{\text{NO}_x}^0$, c_{NO_x} oznaczają odpowiednio stężenie sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych na wlocie i wylocie z absorbera.

3. Badania własne

W pierwszej serii badań własnych procesu usuwanie tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej, jako stałe parametry niezależne zostały przyjęte:

$$X_2 - \text{przepływ spalin } \mathbf{v_s} = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1},$$

$$X_3 - \text{temperatura spalin } \mathbf{T_s} = 463,15\text{K}.$$

Wartości te stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji.

Parametr X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $\mathbf{L_{NH_3}}$, został przyjęty jako zmienny parametr niezależny. Wartości tego parametru wynosiły: $5,90 \cdot 10^{-5}, 6,77 \cdot 10^{-5}, 7,64 \cdot 10^{-5}, 8,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

W kolejnym etapie tych badań, parametrami niezależnymi stałymi (które stanowiły jednocześnie centralny punkt aproksymacji) były:

$$X_1 - \text{gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym } \mathbf{L_{NH_3}} = 8,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$X_3 - \text{temperatura spalin } \mathbf{T_s} = 463,15\text{K}.$$

Jako drugi rozpatrywany parametr zmienny niezależny przyjęto (X_2) tj. przepływ spalin $\mathbf{v_{sp}}$, który wynosił: $1,20 \cdot 10^{-5}, 2,80 \cdot 10^{-5}, 6,10 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

W trzecim etapie badań procesu usuwanie tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej, parametrami niezależnymi stałymi były:

$$X_1 - \text{gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym } \mathbf{L_{NH_3}} = 8,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$X_2 - \text{przepływ spalin } \mathbf{v_s} = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1},$$

W etapie tym zmieniano parametr X_3 , tj. temperatura spalin $\mathbf{T_s}$, którego wartości wynosiły: 433,15, 463,15, 523,15, 573,15K.

3.3.2.3. Zestawienie wyników badań redukcji tlenków azotu NO_x

W tabeli Z122 pokazano wyniki badań wpływu gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej. Dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z122.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

3. Badania własne

$$\eta_{\text{NOX}}(L_{\text{NH}_3}) = 0,912596 + 970552,0 \cdot L_{\text{NH}_3} \quad (3.148)$$

gdzie:

η_{NOX} – skuteczność usuwania NOx, % – wielkość zależna, wynikowa

L_{NH_3} – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

W tabeli Z123 pokazano wyniki badań wpływu przepływu spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z123.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$\eta_{\text{NOX}}(L_{\text{NH}_3}, v_s) = -8,821 + 970552 \cdot L_{\text{NH}_3} + \exp(3,4314 - 1,02580076 \cdot 10^{-5} \cdot v_s) \quad (3.149)$$

gdzie:

η_{NOX} – skuteczność usuwania NOx, % – wielkość zależna, wynikowa

L_{NH_3} – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

v_s – przepływ spalin, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

Wyniki badań wpływu temperatury spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej pokazano w tabeli Z124. Rysunek Z124 przedstawia, zawarte w tabeli Z124, wyniki badań wpływu temperatury spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej.

Ostateczne równanie aproksymacyjne po pierwszym, drugim i trzecim stopniu przyjmie następującą postać:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{NOx}}(L_{\text{NH}_3}, v_s, T_s) = & -745,036 + 970552 \cdot L_{\text{NH}_3} + \\ & + \exp(3,4314 - 1,02580076 \cdot 10^{-5} \cdot v_s) + \\ & - 2,883 \cdot 10^{-3} \cdot T_s^2 + 2,925 \cdot T_s \end{aligned} \quad (3.150)$$

gdzie:

η_{NOx} – skuteczność usuwania NOx, % – wielkość zależna, wynikowa

L_{NH_3} – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

v_s – przepływ spalin, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – wielkość niezależna

T_s – temperatura spalin, K – wielkość niezależna

3.3.2.4. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia tlenków azotu NOx po procesie ich redukcji

Analiza wyników badań wpływu zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej przedstawionych w tabeli Z122 i na rysunku Z122 wykazała, że skuteczność redukcji tlenków azotu tą metodą jest tym większa, im większa jest gęstość zraszania roztworem wody amoniakalnej. Istotna jest liniowa charakterystyka krzywej przebiegu tej zależności w badanym przedziale zmian, pokazująca, że dalsze zwiększanie gęstości zraszania będzie powodowało dalszy wzrost skuteczności redukcji NOx. Zaobserwowano stosunkowo niską skuteczność procesu w badanym zakresie gęstości zraszania wodą amoniakalną przy stałym przepływie i temperaturze spalin, wynoszącą około 57% przy najmniejszej wartości badanego parametru zmiennego L_{NH_3} i tylko 82% przy maksymalnej wartości tego parametru. Może to być spowodowane wciąż zbyt małym przepływem cieczy absorpcyjnej (roztworu wody amoniakalnej) przez układ skrubera.

Drugim badanym parametrem mającym istotny wpływ na skuteczność redukcji NOx był przepływ spalin, którego zmienność badano przy stałej temperaturze gazów spalinowych i stałej gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym. Z analizy wyników przedstawionych w tabeli Z123 i dodatkowo na rysunku Z123 wynika, że wzrost przepływu fazy gazowej w układzie powoduje pogorszenie

skuteczności usuwania tlenków azotu w spalinach, co jest oczywiste, gdyż wzrost przepływu spalin przez układ powoduje zmniejszenie czasu kontaktu fazy gazowej z kroplami cieczy absorpcyjnej. Kształt przebiegu krzywej zależności przedstawionej na rysunku Z123 wskazuje, że dodatkowe obniżenie prędkości przepływu gazów spalinowych przez skrubler natryskowy nie wpłynie w istotny sposób na wartość skuteczności redukcji NO_x, ale też zwiększanie przepływu spalin ponad wartość badaną nie pogorszy skuteczności usuwania NO_x osiągalnej w układzie.

Jak wskazują wyniki badań (przedstawionych w tabeli Z124 i na rysunku Z124) wpływu temperatury gazów spalinowych na skuteczność usuwania z nich tlenków azotu, wzrost temperatury w badanym zakresie (433,15÷573,15K) powoduje około 14% zwiększenie skuteczności redukcji NO_x do maksymalnej wartości około 88%. Charakter przebiegu zmian badanego parametru pozwala sądzić, że dalsze zwiększanie temperatury spalin nie spowoduje znacznego wzrostu stopnia redukcji NO_x.

Badania wpływu zmiany temperatury spalin prowadzono przy stałej, maksymalnej w zakresie badań, gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym i przy stałym przepływie gazów spalinowych, który był minimalną wartością zmienną w układzie badawczym. W związku z powyższym, osiągnięta wartość ponad 88% skuteczności usuwania NO_x jest wartością największą, jaką można było uzyskać zmieniając założone parametry zmienne w układzie badania selektywnej metody redukcji katalitycznej NO_x.

3.3.2.5. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces usuwania tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej

W ramach weryfikacji równań opisujących proces usuwania tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej wykonano dodatkowe badania w warunkach laboratoryjnych w instalacji do badania tego procesu, opisanej w rozdziale 3.3.2.1. niniejszej pracy.

Na podstawie przyjętych do tych prób laboratoryjnych, parametrów zmiennych niezależnych, obliczono z równań analityczno-empirycznych wartości pa-

rametrów wynikowych i porównano z otrzymanymi w wyniku badań procesu redukcji NO_x. Wyniki te zostały przedstawione w tabeli 3.40.

Dokładność równań oceniono testem t-studenta. Dla $n - 1 = 6$ stopni swobody i przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ z tablic rozkładu t-studenta odczytano wartość graniczną t_{α} wynoszącą:

$$t_{0,05} = 2,447$$

Porównując uzyskane wartości poszczególnych funkcji testowych t z wartością graniczną $t_{0,05}$ widać, że wszystkie te wartości są mniejsze od wartości granicznej. Oznacza to, że nie znajdujemy się w obszarze krytycznym, zatem różnice między wartościami uzyskanymi z doświadczeń a obliczonych wzorami nie są w stosunku do wartości hipotetycznej H_0 statystycznie istotne, tzn. można je usprawiedliwić przypadkiem.

W związku z tym należy stwierdzić, że przy 95% ufności, otrzymane w wyniku analizy badań usuwania tlenków azotu, równania są prawidłowe, a wartości otrzymane na ich podstawie są zgodne z wynikami otrzymanymi w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 3.40. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie redukcji tlenków azotu NO_x

Parametry niezależne			Parametr wynikowy c _{NO_x}							
L _{NH₃} , m ³ · m ⁻² · s ⁻¹	v _s , m ³ · s ⁻¹	T, K	Równanie	Laboratorium	ldl	\bar{d}	Σd ²	s	s ²	test t
8,45·10 ⁻⁵	1,20·10 ⁻⁵	453,15	79,46	79,68	0,22	0,67	5,9	0,46	0,68	2,413
7,00·10 ⁻⁵	2,00·10 ⁻⁵	483,15	67,10	68,23	1,13					
7,50·10 ⁻⁵	2,50·10 ⁻⁵	553,15	65,97	66,15	0,18					
8,00·10 ⁻⁵	3,30·10 ⁻⁵	453,15	67,11	67,01	0,10					
6,50·10 ⁻⁵	4,10·10 ⁻⁵	483,15	58,73	60,23	1,50					
7,00·10 ⁻⁵	5,00·10 ⁻⁵	553,15	58,92	58,86	0,06					
7,50·10 ⁻⁵	5,50·10 ⁻⁵	453,15	61,32	62,83	1,51					

3.3.3. Adsorpcyjne oczyszczanie spalin

3.3.3.1 Opis stanowiska badawczego

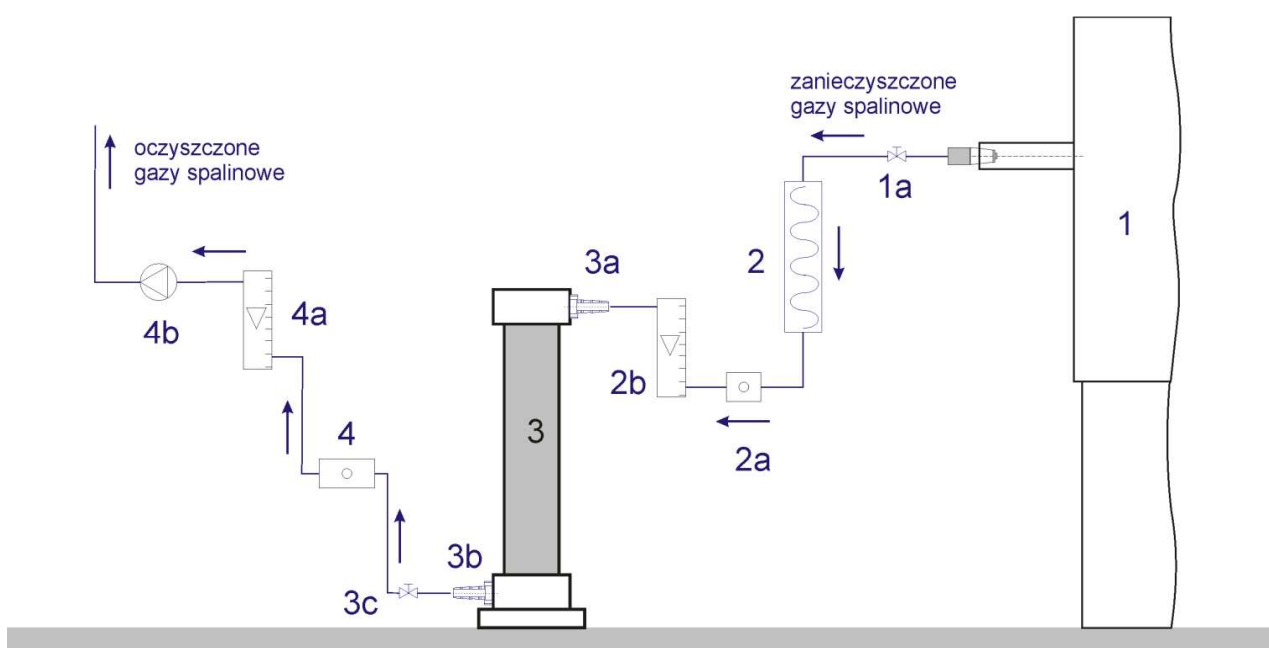
Do przeprowadzenia badań skuteczności usuwania tlenku siarki(IV) SO_2 i tlenków azotu NO_x metodą adsorpcyjną z użyciem koksu aktywnego jako adsorbentu służyła instalacja badawcza przedstawiona na zdjęciu 3.5 oraz schematycznie na rys. 3.34. W skład instalacji wchodziły: zasadniczy element jakim była kolumna adsorpcyjna (adsorber), układ chłodzenia spalin na wylocie z reaktora pieca oraz układu pomiarowego stężeń ww. gazów spalinowych w oczyszczonych gazach spalinowych.



Zdjęcie. 3.6. Instalacja do badania procesu adsorpcyjnego oczyszczanie spalin

Zanieczyszczone gazy spalinowe powstałe po procesie spalania w piecu (1) po uprzednim ochłodzeniu do odpowiedniej temperatury (regulowanej czasem przebywania spalin w układzie chłodzącym (2) i mierzonej za pomocą termopary w punkcie pomiaru temperatury (2a)), wprowadzana była do adsorbera (3) wypełnionego koksem aktywnym. Złoże adsorbentu było umieszczane na

ruszcie siatkowym i wymieniane każdorazowo po jednorazowej próbie spalania w piecu instalacji badawczej. Stężenia oczyszczonych gazów spalinowych opuszczających kolumnę sorpcyjną króćcem (3b) poprzez zawór (3c) mierzone były w punkcie pomiarowym (4), gdzie umieszczana była sonda analizatora spalin mierzącego wartości tych stężeń, opisanego już wcześniej w rozdziale 3.2.1. Oczyszczone gazy spalinowe poprzez rotametr (4a), mierzący strumień oczyszczanych gazów, których przepływ regulowano i odprowadzano na zewnątrz układu badawczego przy użyciu pompy przeponowej (4b).



Rys. 3.34. Schemat stanowiska badawczego do procesu adsorpcyjnego oczyszczanie spalin; 1 – piec rurowy, 2 – układ chłodzący zanieczyszczone gazy spalinowe, 3 – adsorber, 4 – miejsce pomiarowe stężeń oczyszczonych gazów spalinowych przy pomocy sondy analizatora spalin

3.3.3.2. Metodyka badań

W badaniach procesu oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym jako parametry niezależne (zmiennie) przyjęto:

X_1 – średnie uziarnienie sorbentu d_{60} , mm

X_2 – objętość złoża adsorpcyjnego V_z , m³

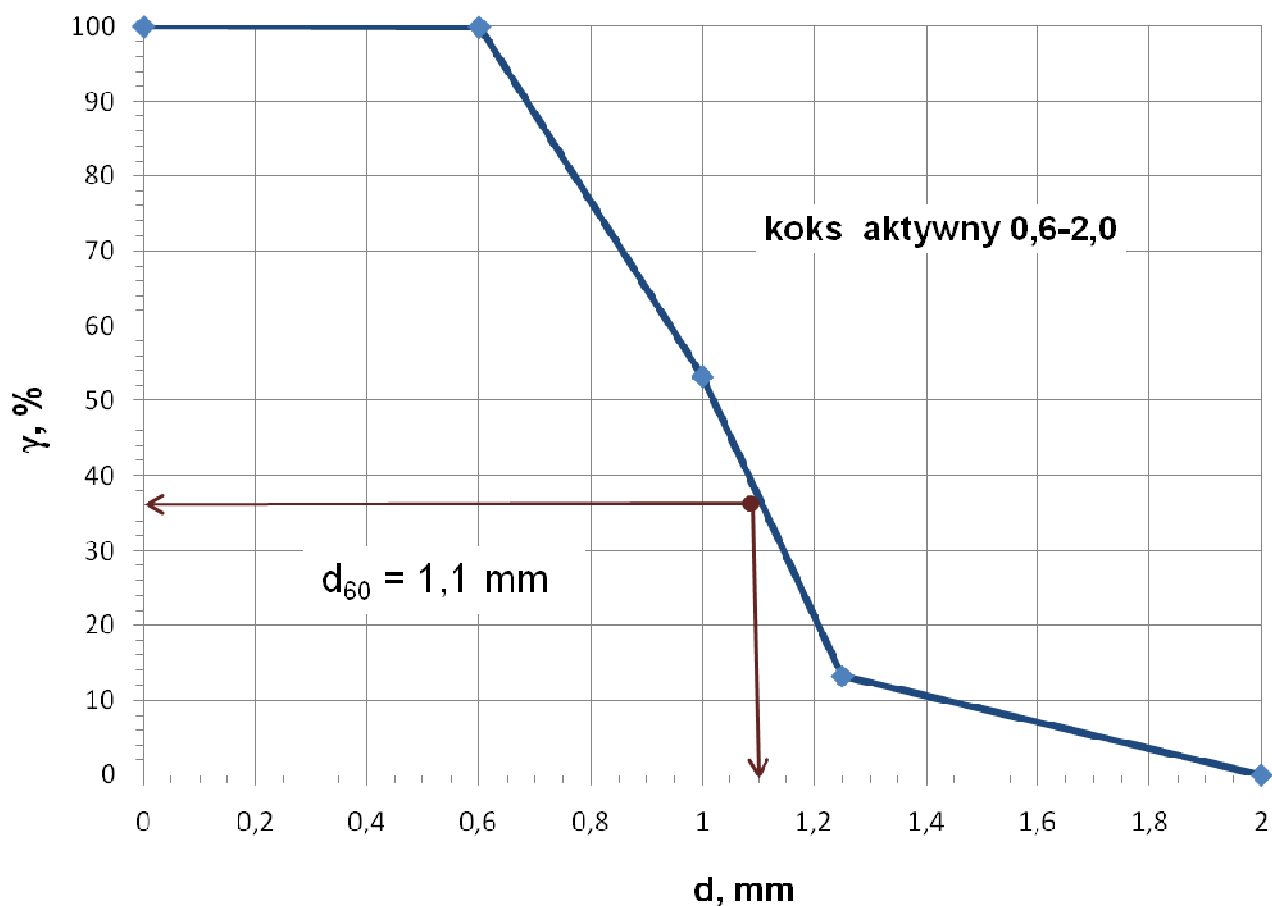
Pierwszy parametr niezależny – średnie uziarnienie sorbentu d_{60} , to wielkość charakteryzująca materiał sorpcyjny. Jest on wynikiem przeprowadzonej analizy sitowej tych materiałów. Na podstawie wyników tej analizy wykreślono krzywe ziarnowe, z których odczytano średnie uziarnienie d_{60} poszczególnych sorbentów.

Na rysunkach 3.35, 3.36 i 3.37, powstałych na podstawie danych zawartych w tabelach 3.42÷3.44, przedstawiono charakterystykę granulometryczną złóż adsorpcyjnych przeznaczonych do badań, jakim był koks aktywny ziarnisty o charakterystyce pokazanej w tabeli 3.41. Koks aktywny stanowi jeden z odpadów paleniskowych tworzących się podczas spalania węgla brunatnego w kotle pyłowym. Jest to specyficzny adsorbent, w którym struktura porowata charakteryzuje się równomiernym rozkładem porów – mikropory, mezopory i makropory biorą równomierny udział w masie adsorbentu. Producentem ww. materiału jest „Elbar-Katowice” sp. z o.o., oddział „Carbon” w Raciborzu. Produkt ten posiada Świadectwo Jakości nr 124/2006 i 126/206 z dnia 09.06.06 wystawione dla Politechniki Koszalińskiej.

Tabela 3.41. Podstawowa charakterystyka jakościowa koksu aktywnego ziarnistego użytego do badań

Parametr	Wartość		
Stopień rozdrobnienia, mm	0,6÷2,0	2,0÷3,15	3,15÷5,0
Zawartość wilgoci, %	3,5	5,0	5,0
Zawartość popiołu, %	9,3	6,0	6,0
pH wyciągu wodnego	9,2	9,2	9,2
Gęstość nasypowa, $g \cdot dm^{-3}$	430,0	360,0	360,0
Zawartość frakcji właściwej, %	98,0	90,0	90,0

3. Badania własne

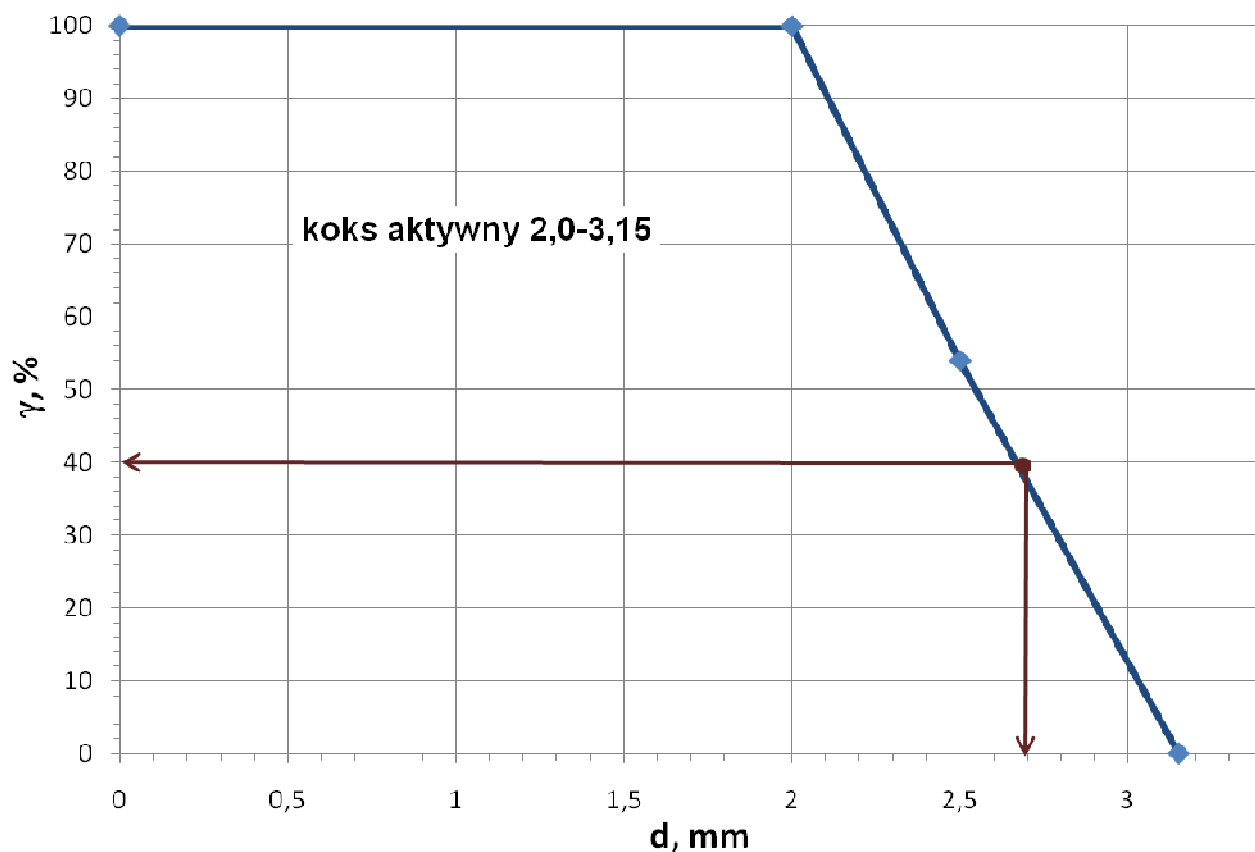


Rys. 3.35. Krzywa składu ziarnowego dla koksu aktywnego frakcji 0,6÷2,0 mm

Tabela 3.42. Analiza granulometryczna złoża adsorpcyjnego frakcji 0,6÷2,0 mm

Wymiar oczka sita, %	Masa, g	γ , %	$\Sigma\gamma$, %
<0,6	0,01	0,05	100
0,6-1,0	2,64	13,20	99,95
1,0-1,25	8,00	40,00	53,25
1,25-2,0	9,34	46,70	13,25
>2,0	0,01	0,05	0,05
	$\Sigma = 20,00$	$\Sigma = 100,00$	0,00

3. Badania własne

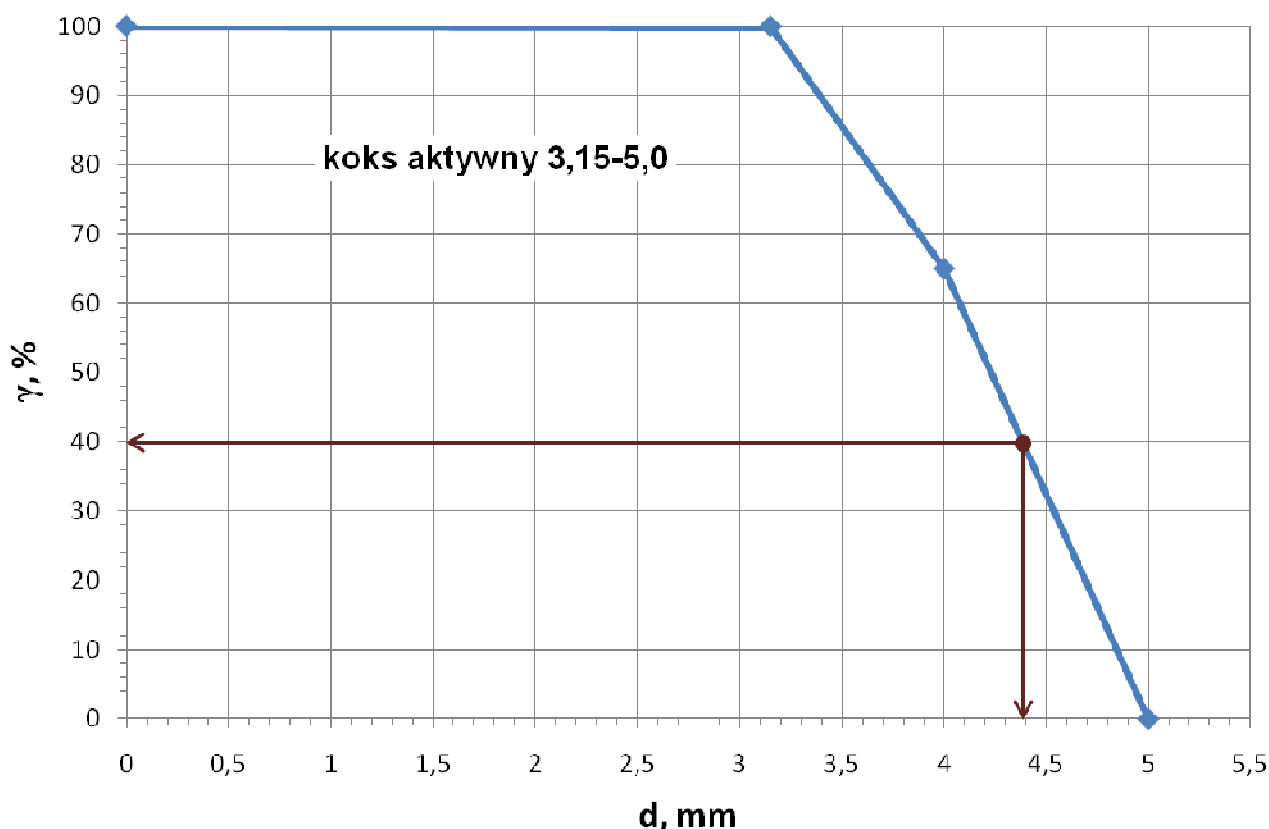


Rys. 3.36. Krzywa składu ziarnowego dla koksu aktywnego frakcji 2,0÷3,15 mm

Tabela 3.43. Analiza granulometryczna złoża adsorpcyjnego frakcji 2,0÷3,15 mm

Wymiar oczka sita, %	Masa, g	γ , %	$\Sigma\gamma$, %
<2,0	0,01	0,05	100
2,0-2,5	10,79	53,95	99,95
2,5-3,15	9,19	45,95	54,00
>3,15	0,01	0,05	0,05
	$\Sigma = 20,00$	$\Sigma = 100,00$	0,00

3. Badania własne



Rys. 3.37. Krzywa składu ziarnowego dla koks aktywny frakcji 3,15÷5,0 mm

Tabela 3.44. Analiza granulometryczna złoża adsorpcyjnego frakcji 3,15÷5,0 mm

Wymiar oczka sita, %	Masa, g	γ , %	$\Sigma\gamma$, %
<3,15	0,01	0,05	100
3,15-4,0	13,00	64,97	99,95
4,0-5,0	6,99	34,93	65,02
>5,0	0,01	0,05	0,05
	$\Sigma = 20,00$	$\Sigma = 100,00$	0,00

Drugi parametr niezależny – objętość złoża adsorpcyjnego, stanowi jednorazowa porcja koks aktywny wprowadzana do kolumny adsorpcyjnej o stałej średnicy i umieszczana na ruszcie siatkowym w tej kolumnie.

Badania procesu adsorpcyjnego oczyszczania spalin prowadzono przy następujących stałych, dodatkowych parametrach spalania klasycznego paliwa, jakim był węgiel kamienny scharakteryzowany w rozdziale rozprawy o materiałach przeznaczonych do badań:

3. Badania własne

- temperatura w strefie spalania pieca $T = 1373,15\text{K}$,
- współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$,
- wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Natomiast parametr zależny (wynikowy) w badaniach odsiarczania spalin metodą adsorpcji na węglu aktywnym to:

Y_1 – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) SO_2 η_{SO_2} , %

Y_2 – skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x η_{NO_x} , %

Skuteczność procesu odsiarczania spalin metodą adsorpcji na węglu aktywnym wynika z następującej zależności:

$$\eta_{\text{SO}_2} = \frac{c_{\text{SO}_2}^0 - c_{\text{SO}_2}}{c_{\text{SO}_2}^0} \cdot 100\% \quad (3.151)$$

gdzie:

$c_{\text{SO}_2}^0$, c_{SO_2} oznaczają odpowiednio stężenie SO_2 w gazach spalinowych na wlocie do kolumny adsorpcyjnej i w gazach opuszczających tę kolumnę.

Skuteczność procesu usuwania tlenków azotu z gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym wynika z następującej zależności:

$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{c_{\text{NO}_x}^0 - c_{\text{NO}_x}}{c_{\text{NO}_x}^0} \cdot 100\% \quad (3.152)$$

gdzie:

$c_{\text{NO}_x}^0$, c_{NO_x} oznaczają odpowiednio stężenie sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych na wlocie i wylocie z kolumny adsorpcyjnej.

W pierwszej serii badań własnych procesu oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym, jako stały parametr niezależny został przyjęty:

X_2 – objętość złoża adsorpcyjnego $V_z = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$.

Wartość ta stanowiła jednocześnie centralny punkt aproksymacji.

Parametr X_1 – średnie uziarnienie sorbentu d_{60} , mm, został przyjęty jako zmienny parametr niezależny. Wartości tego parametru wynosiły: 1,1, 2,7, 4,4 mm.

W kolejnym etapie tych badań, parametrem niezależnym stałym (który stanowił jednocześnie centralny punkt aproksymacji) był:

X_1 – średnie uziarnienie sorbentu $d_{60} = 1,1 \text{ mm}$.

Jako drugi rozpatrywany parametr zmienny niezależny przyjęto (X_2) tj. objętość złoża adsorpcyjnego V_z , którą zmieniano w granicach: $2,5 \cdot 10^{-6} \div 1,0 \cdot 10^{-4}$.

3.3.3.3. Zestawienie wyników badań adsorpcyjnego oczyszczania spalin

3.3.3.3.1. Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

W tabeli Z125 pokazano wyniki badań wpływu średniego uziarnienia sorbentu na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym. Dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z125.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$\eta_{SO_2}(d_{60}) = 98,7986 - 0,0155 \cdot d_{60} - 0,0261 \cdot d_{60}^2 \quad (3.153)$$

gdzie:

η_{SO_2} – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV), % – wielkość zależna, wynikowa

d_{60} – średnie uziarnienie sorbentu, mm – wielkość niezależna

W tabeli Z126 pokazano wyniki badań wpływu objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z126.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$\eta_{\text{SO}_2}(d_{60}, V_z) = 74,227 - 0,0155 \cdot d_{60} - 0,0261 \cdot d_{60}^2 + 6,61812852 \cdot 10^{-6} \cdot V_z + 6,1856 \cdot 10^{-11} \cdot V_z^2 + 1,996 \cdot 10^{-16} \cdot V_z^3 \text{ dla } V_z < 2 \cdot 10^{-6}, 1 \cdot 10^{-5}>$$

oraz

$$\eta_{\text{SO}_2}(d_{60}, V_z) = 101,321 - 0,0155 \cdot d_{60} - 0,0261 \cdot d_{60}^2 + 0,238 \cdot \log(V_z) \text{ dla } V_z < 1 \cdot 10^{-5}, 1,1 \cdot 10^{-4}> \quad (3.154)$$

gdzie:

η_{SO_2} – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV), % – wielkość zależna, wynikowa

d_{60} – średnie uziarnienie sorbentu, mm – wielkość niezależna

V_z – objętość złoża adsorpcyjnego, m³ – wielkość niezależna

3.2.3.3.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

W tabeli Z127 pokazano wyniki badań wpływu średniego uziarnienia sorbentu na skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym. Dodatkowo wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z127.

Aproksymowane równanie na pierwszym stopniu przyjmie postać:

$$\eta_{\text{NO}_x}(d_{60}) = 42,338 - 0,07243 \cdot d_{60} - 0,69757 \cdot d_{60}^2 \quad (3.155)$$

gdzie:

η_{NO_x} – skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x, % – wielkość zależna, wynikowa

d_{60} – średnie uziarnienie sorbentu, mm – wielkość niezależna

W tabeli Z128 pokazano wyniki badań wpływu objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność usuwania tlenków azotu NOx w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym. Natomiast graficznie wyniki te przedstawiono na wykresie – rysunek Z128.

Ogólne równanie aproksymacyjne po pierwszym i drugim stopniu przyjmie następującą postać:

$$\eta_{\text{NOx}}(d_{60}, V_z) = 166,175 - 0,07243 \cdot d_{60} - 0,69757 \cdot d_{60}^2 + 11,9127 \cdot \log(V_z) \quad (3.156)$$

gdzie:

η_{NOx} – skuteczność usuwania tlenków azotu NOx, % – wielkość zależna, wynikowa

d_{60} – średnie uziarnienie sorbentu, mm – wielkość niezależna

V_z – objętość złoża adsorpcyjnego, m³ – wielkość niezależna

3.3.2.4. Opis i analiza wyników badań wpływu zmian wybranych zmiennych niezależnych na stężenia gazów spalinowych po procesie ich adsorpcyjnego oczyszczania

Analiza wyników badań (pokazanych w tabeli Z125 i na rysunku Z125) wpływu zmian średniego uziarnienia badanego adsorbentu (koks aktywny) na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym, wskazuje, że wzrost średniego uziarnienia sorbentu (koks aktywny) w zakresie 1,1÷4,4 mm powoduje niewielką obniżkę skuteczności usuwania SO₂. W całym zakresie zmian uziarnienia koks aktywny, stopień redukcji tlenku siarki(IV) wynosił powyżej bardzo wysokiej wartości 98%. Wartość ta kwalifikuje badany adsorbent jako materiał wysoce przydatny w metodzie adsorpcyjnego odsiarczania spalin. Zdolność ad-

sorpcyjna sorbentu w największym stopniu zależy od stanu rozwinięcia jego powierzchni właściwej, gdyż adsorpcja zarówno fizyczna, jak i chemiczna występuje na powierzchni adsorbentu. Powierzchnia właściwa jest liczona jako powierzchnia porowatych ziaren w przeliczeniu na masę adsorbentu. Jest ona odwrotnie proporcjonalna do rozmiaru ziarna adsorbentu. Wyniki wpływu uziarnienia koksu aktywnego na skuteczność odsiarczania gazów spalinowych potwierdzają pośrednią zależność tego parametru od stopnia usuwania tlenku siarki(IV).

Analizując pokazane w tabeli Z127 i na rysunku Z127 wyniki badań wpływu zmian średniego uziarnienia badanego koksu aktywnego na skuteczność usuwania tlenków azotu w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji, należy zwrócić uwagę na znacznie mniejsze wartości skuteczności redukcji NO_x przy zastosowaniu badanego adsorbentu w tych samych warunkach, w porównaniu do skuteczności redukcji SO₂. Zwiększając parametr d₆₀ w granicach 1,1÷4,4 mm, obserwowano spadek stopnia redukcji NO_x w zakresie około 41÷20%. Świadczy to, o dużo mniejszej przydatności badanego sorbentu w procesie oczyszczania gazów z tlenków azotu metodą adsorpcji na węglu aktywnym. Spowodowane jest to, tym, że adsorpcja z fazy gazowej nie stanowi głównego zastosowania węgla aktywnych; w tym koksu aktywnego (główne zastosowanie to adsorpcja z fazy ciekłej). Znaczna skuteczność redukcji szkodliwych substancji z gazów spalinowych w procesie adsorpcji występuje tylko w przypadku niskich stężeń adsorbentu i niskich temperatur procesu. Ze względu na dużo niższe stężenia tlenku siarki(IV) niż tlenków azotu w badanych strumieniach gazów spalinowych, specyfika procesu powodowała w pierwszej kolejności adsorpcję SO₂. Adsorpcję umożliwiają siły działające na powierzchni adsorbentu zlokalizowanych wokół atomów powierzchniowych stanowiących centra adsorpcji. Gdy następnie zadziałały mechanizmy redukcji NO na powierzchni koksu, odpowiednie wolne (aktywne) centra adsorpcji zajmowane zostawały przez atomy azotu i tlenu. Gdy wszystkie centra zostały zajęte, adsorpcja ustawała. Stąd aż około 98% skuteczności redukcji tlenku siarki(IV) przy średnio około 30% skuteczności usunięcia NO_x w badanych warunkach procesu adsorpcji na koksie aktywnym.

Przykładem właściwego zastosowania koksu aktywnego w procesie usuwania NO_x, w którym skuteczność byłaby dużo wyższa, jest technologia redukcji NO_x amoniakiem (wodą amoniakalną) w obecności koksu aktywnego, który jest w tym wypadku tylko katalizatorem powodującym, że proces ten może się odbywać w niskich zakresach temperaturowych 363÷463K. W tym wypadku istnieje możliwość zastosowania koksu aktywnego do jednoczesnego usuwania SO₂ i NO_x ze spalin w jednym układzie, w którym koks aktywny spełniałby rolę adsorbentu i katalizatora.

Z analizy wyników badań przedstawionych w tabeli Z126, wpływu na skuteczność odsiarczania drugiego badanego parametru – objętości złoża adsorpcyjnego, przy stałym średnim uziarnieniu tego złoża – wynika, że przy wzroście tego parametru w badanym zakresie następuje wzrost skuteczności redukcji SO₂. Kształt krzywej opisującej przebieg zależności pokazanej na rysunku Z126 wskazuje na fakt, że w założonych warunkach badań wzrost objętości złoża adsorpcyjnego powyżej $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ nie powoduje znacznych zmian skuteczności redukcji tlenku siarki(IV) a wartość ta pozostaje na bardzo wysokim poziomie około 99% skuteczności. Tak wysoka wartość, podobnie jak i w wypadku badań uziarnienia sorbentu, jest wynikiem specyficznego charakteru koksu aktywnego jakim jest porowatość ziaren, co zwiększa wielkość powierzchni właściwej tego materiału.

Biorąc pod uwagę wyniki badań wpływu na skuteczność odsiarczania średniego uziarnienia badanego koksu aktywnego można wnioskować, że przy założeniu głównych parametrów warunków spalania, oczyszczanie powstałego strumienia gazów spalinowych metodą adsorpcji na złożu koksu aktywnego o minimalnej objętości równej $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ i uziarnieniu adsorbentu poniżej 1 mm zapewnia 99% skuteczności oczyszczania spalin z tlenku siarki(IV).

W tabeli Z128 i na wykresie przedstawionym na rysunku Z128, pokazano wyniki badań zmian objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność redukcji NO_x w procesie oczyszczania spalin metodą adsorpcji na węglu aktywnym. Analiza tych wyników potwierdza dużo niższą skuteczność redukcji NO_x przy zastosowaniu metody adsorpcji przy udziale koksu aktywnego. Najwyższa redukcja NO_x,

wynosząca około 60%, miała miejsce przy największej objętości złoża adsorpcyjnego ($1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$). Z kształtu krzywej przebiegu zależności pokazanej na rysunku Z128 wynika wniosek, że mimo dalszego zwiększania objętości złoża adsorpcyjnego, skuteczność redukcji NO_x nie wzrośnie powyżej wartości około 60%. Świadczy to o niskiej przydatności badanego sorbentu w procesie oczyszczania gazów z tlenków azotu metodą adsorpcji na węglu aktywnym.

3.3.2.5. Weryfikacja równań modelu matematycznego opisującego proces adsorpcyjnego oczyszczania spalin

W ramach weryfikacji równań opisujących proces adsorpcyjnego oczyszczania spalin, wykonano dodatkowe badania w warunkach laboratoryjnych w instalacji do badania tego procesu, opisanej w rozdziale 3.3.3.1. niniejszej pracy.

Na podstawie przyjętych do tych prób laboratoryjnych, parametrów zmiennych niezależnych, obliczono z równań analityczno-empirycznych wartości parametrów wynikowych i porównano z otrzymanymi w wyniku badań procesu adsorpcyjnego oczyszczania spalin. Wyniki te zostały przedstawione w tabeli 3.45.

Dokładność równań oceniono testem t-studenta. Dla $n - 1 = 6$ stopni swobody i przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ z tablic rozkładu t-studenta odczytano wartość graniczną t_{α} wynoszącą:

$$t_{0,05} = 2,447$$

Porównując uzyskane wartości poszczególnych funkcji testowych t z wartością graniczną $t_{0,05}$ widać, że wszystkie te wartości są mniejsze od wartości granicznej. Oznacza to, że nie znajdujemy się w obszarze krytycznym, zatem różnice między wartościami uzyskanymi z doświadczeń a obliczonych wzorami nie są w stosunku do wartości hipotetycznej H_0 statystycznie istotne, tzn. można je usprawiedliwić przypadkiem.

3. Badania własne

W związku z tym należy stwierdzić, że przy 95% ufności, otrzymane w wyniku analizy badań adsorpcyjnego oczyszczania spalin, równania są prawidłowe, a wartości otrzymane na ich podstawie są zgodne z wynikami otrzymanymi w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 3.45. Analiza statystyczna istotności parametrów wynikowych uzyskanych na podstawie doświadczenia w warunkach rzeczywistych i obliczonych na podstawie równań analityczno-empirycznych w procesie adsorpcyjnego oczyszczania spalin

Parametry niezależne		Parametr wynikowy c_{SO_2}							
d_{60} , mm	V_z , m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
1,1	$3,00 \cdot 10^{-5}$	98,79	98,74	0,05	0,34	1,7	0,15	0,38	2,192
2,7	$2,00 \cdot 10^{-5}$	98,51	98,97	0,46					
4,4	$1,50 \cdot 10^{-5}$	98,10	96,96	1,14					
1,1	$4,00 \cdot 10^{-5}$	98,86	98,51	0,35					
2,7	$3,00 \cdot 10^{-6}$	88,82	88,87	0,05					
4,4	$4,50 \cdot 10^{-6}$	92,73	92,87	0,14					
1,1	$7,00 \cdot 10^{-6}$	97,04	97,24	0,20					
Parametry niezależne		Parametr wynikowy c_{NO_x}							
d_{60} , mm	V_z , m ³	Równanie	Laboratorium	Idl	\bar{d}	Σd^2	s	s^2	test t
2,7	$3,50 \cdot 10^{-6}$	11,24	12,58	1,34	0,57	4,27	0,34	0,58	2,407
2,7	$3,50 \cdot 10^{-6}$	11,24	11,01	0,23					
4,4	$5,00 \cdot 10^{-6}$	6,94	7,06	0,12					
1,1	$4,00 \cdot 10^{-5}$	44,62	44,70	0,08					
2,7	$4,00 \cdot 10^{-5}$	40,26	41,16	0,90					
4,4	$4,00 \cdot 10^{-5}$	31,72	32,98	1,26					
1,1	$6,00 \cdot 10^{-5}$	49,45	49,41	0,04					

4. Kompleksowy zapis modelu matematycznego

Proces spalania

Osady ściekowe

$$c_{SO_2}(T, \lambda, m) = 0,625079 \cdot T - 82,25 \cdot \lambda + 250,012 \cdot m - 568,547$$

$$c_{NO_x}(T, \lambda, m) = 0,933049 \cdot T + 100,734 \cdot \log(-1,1256 + \lambda) + 232,76 \cdot m - 1014,058$$

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(15,8043 - 0,00871 \cdot T) - 10,938 \cdot \lambda + \exp(-0,17473 + 0,700254 \cdot m) - 81,259$$

Węgiel kamienny

$$c_{SO_2}(T, \lambda, m) = 0,130189 \cdot T - 63,98 \cdot \lambda + 57,7363 \cdot m - 33,284$$

$$c_{NO_x}(T, \lambda, m) = 0,287215 \cdot T + \exp(3,56173 + 0,96152 \cdot \lambda) + 79,7792 \cdot m - 519,367$$

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(15,3166 - 0,00804 \cdot T) - 15,808 \cdot \lambda + 4,63542 \cdot m - 121,604$$

Odpady farbiarskie

$$c_{SO_2}(T, \lambda, m) = 0,035676 \cdot T - 5,8452 \cdot \lambda + 42,9 \cdot m - 58,114$$

$$c_{NO_x}(T, \lambda, m) = \exp(4,125 + 0,817 \cdot 10^{-3} \cdot T) + \exp(0,80273 + 1,5583 \cdot \lambda) + 28,2302 \cdot m - 169,989$$

$$c_{CO}(T, \lambda, m) = \exp(16,3796 - 0,01024 \cdot T) - 11,584 \cdot \lambda + 4,55729 \cdot m - 5,481$$

Odpady gumowe

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = \exp(4,69615 + 0,001282 \cdot T) - 26,085 \cdot \lambda + 313,408 \cdot m - 470,748$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 107,983 \cdot \log(-549,37 + T) + 109,428 \cdot \lambda + 53,3854 \cdot m - 451,127$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = \exp(16,2586 - 0,00994 \cdot T) - 9,9784 \cdot \lambda + 25,0677 \cdot \ln(2,14362 + m) - 38,898$$

Odpady z tworzyw sztucznych – poliestry

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,012461 \cdot T - 2615,6 \cdot \log(166,712 + \lambda) + 78,65 \cdot m + 5724,551$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 121,754 \cdot \log(0,15795 + T) + \exp(-0,99791 + 1,83528 \cdot \lambda) + 13,3701 \cdot \log(m) - 328,04$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = \exp(20,2737 - 0,01414 \cdot T) - 4,88 \cdot \lambda + 1204,74 \cdot \ln(m) - 211,808$$

Odpady z tworzyw sztucznych – poliolefiny

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,025382 \cdot T - 17,259 \cdot \lambda + 9,11625 \cdot m + 5,853$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 0,064429 \cdot T + 72,6874 \cdot \log(-0,54412 + \lambda) + 19,2187 \cdot m - 9,919$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = \exp(10,4657 - 0,00152 \cdot T) - 17,259 \cdot \lambda + 945,885 \cdot m - 2638,603$$

Odpady z tworzyw sztucznych – poliwinyle

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 154,649 \cdot \log(T) - 8,8266 \cdot \lambda + 191,304 \cdot \log(m) - 363,308$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = \exp(2,25864 + 0,001627 \cdot T) + 43,0261 \cdot \log(\lambda) + 11,6594 \cdot m - 55,635$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = -31,453 \cdot T + 0,010703 \cdot T^2 - 33,933 \cdot \lambda + 93,5938 \cdot m + 22889,878$$

Proces współpalania osadów ściekowych w mieszankach paliwowych

Współpalanie osadów ściekowych z miatem węglowym

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = \exp(2,40958 + 0,038128 \cdot U) - 66,816 \cdot \lambda + 0,156488 \cdot T - 5,856$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = \exp(4,60619 + 0,011073 \cdot U) + \exp(3,70794 + 0,905522 \cdot \lambda) + 0,257962 \cdot T - 503,334$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = -0,04214 \cdot U - 15,463 \cdot \lambda + \exp(45,1165 - 0,03636 \cdot T) + 34,693$$

Współpalanie osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = \exp(3,92021 + 0,017495 \cdot U) - 12,796 \cdot \lambda + 24,8721 \cdot \ln(-652,07 + T) - 157,736$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = \exp(3,33018 + 0,032787 \cdot U) + \exp(1,3994 + 1,33951 \cdot \lambda) + 379,911 \cdot \ln(1103,07 + T) - 2957,259$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = 0,056786 \cdot U + 34,8588 \cdot \lambda - 14,687 \cdot \lambda^2 + \exp(43,2415 - 0,03493 \cdot T) - 11,435$$

Współpalanie osadów ściekowych z odpadami gumowymi

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = -0,24106 \cdot U - 26,11 \cdot \lambda + \exp(3,73396 + 0,001826 \cdot T) + 27,000$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = \exp(3,14104 + 0,02974 \cdot U) + \exp(0,029131 + 1,59006 \cdot \lambda) + 40,722 \cdot \ln(-956,55 + T) - 152,214$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = 0,027321 \cdot U - 10,83 \cdot \lambda + \exp(39,4728 - 0,03135 \cdot T) + 22,678$$

Współpalanie osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliestry

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = \exp(6,12938 + 0,008919 \cdot U) - 26,948 \cdot \lambda + 0,015158 \cdot T - 435,053$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = 5,74586 \cdot U + \exp(0,958875 + 1,00621 \cdot \lambda) + 46,7601 \cdot \ln(-806,49 + T) - 272,258$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = 0,056771 \cdot U - 5,3233 \cdot \lambda + \exp(23,0792 - 0,01668 \cdot T) + 11,438$$

Współspalanie osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliolefiny

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda, T) = \exp(5,87321 + 0,010101 \cdot U) - 19,354 \cdot \lambda + 0,038658 \cdot T - 362,293$$

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = \exp(4,2653 + 0,019105 \cdot U) + 68,743 \cdot \ln(-0,57913 + \lambda) + 13,8893 \cdot \ln(-979,91 + T) - 60,954$$

$$c_{\text{CO}}(U, \lambda, T) = -9,6448 \cdot U - 4467,9 \cdot \lambda + \exp(11,4198 - 0,00281 \cdot T) + 8222,117$$

Współspalanie osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliwinyle

$$c_{\text{SO}_2}(U, \lambda, T) = 3,09329 \cdot U + \exp(6,28644 - 3,038 \cdot \lambda) + 140,699 \cdot \ln(T) - 870,619$$

$$c_{\text{NO}_x}(U, \lambda, T) = 7,83528 \cdot U - 0,03772 \cdot U^2 + 25,7841 \cdot \lambda + 163,507 \cdot \ln(T) - 1179,492$$

$$c_{\text{CO}}(U, \lambda, T) = -0,74875 \cdot U - 41,509 \cdot \lambda + \exp(17,7875 - 0,00975 \cdot T) + 178,050$$

Oczyszczanie spalin po procesie spalania

Odsiarczanie spalin metodą wapniową

$$\eta_{\text{SO}_2}(L, H_{\text{skr}}, L/G, T_s) = 167,79 + 8,92419 \cdot \ln(0,453 \cdot 10^{-4}) + L) + 15,4484 \cdot \ln(0,52358485 + H_{\text{skr}}) + 2,9123 \cdot \ln(-1,9105895 + L/G) + 4,2416 \cdot \ln(-387,71153574 + T_s)$$

Usuwanie tlenków azotu NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej

$$\eta_{\text{NO}_x}(L_{\text{NH}_3}, V_s, T_s) = -745,036 + 970552 \cdot L_{\text{NH}_3} + \exp(3,4314 - 1,02580076 \cdot 10^5 \cdot v_s) - 2,883e-3 \cdot T_s^2 + 2,925 \cdot T_s$$

Adsorpcyjne oczyszczanie spalin

$$\eta_{\text{SO}_2}(d_{60}, V_z) = 74,227 - 0,0155 \cdot d_{60} - 0,0261 \cdot d_{60}^2 + 6,61812852 \cdot 10^{-6} \cdot V_z - 6,1856 \cdot 10^{-11} \cdot V_z^2 + 1,996 \cdot 10^{-16} \cdot V_z^3 \text{ dla } V_z < 2 \cdot 10^{-6}, 1 \cdot 10^{-5} >$$

oraz

$$\eta_{\text{SO}_2}(d_{60}, V_z) = 101,321 - 0,0155 \cdot d_{60} - 0,0261 \cdot d_{60}^2 + 0,238 \cdot \log(V_z) \text{ dla } V_z < 1 \cdot 10^{-5}, 1,1 \cdot 10^{-4} >$$

$$\eta_{\text{NO}_X}(d_{60}, V_z) = 166,175 - 0,07243 \cdot d_{60} - 0,69757 \cdot d_{60}^2 + 11,9127 \cdot \log(V_z)$$

5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań i ich analizy można przedstawić następujące ogólne wnioski:

1. Badane w ramach tej dysertacji parametry procesowe zmiennych niezależnych, dotyczące zarówno warunków spalania i ich wpływu na emisję zanieczyszczeń (SO_2 , NO_x , CO), jak i dotyczące warunków oczyszczania spalin z tych zanieczyszczeń w procesach ich likwidacji, takich jak: odsiarczanie metodą wapniową, redukcja NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej oraz sorpcja na węglu aktywnym, udowodniły postawioną na wstępie tezę pracy, iż istnieją różne wartości tych parametrów (tzw. warunki spalania wybranych grup odpadów), dla których to, oczyszczanie spalin jest dobre i coraz lepsze ze wzrostem ich wartości a równocześnie coraz gorsze dla innych zanieczyszczeń.
2. Wzrost temperatury spalania, jako parametru zmiennego niezależnego poprawia jakość spalania, zmniejszając stężenia tlenku węgla(II) ale jednocześnie zwiększa emisje tlenku siarki(IV) oraz tlenków azotu NO_x . Wzrost zawartości tlenu wraz z powietrzem dostarczanym do komory spalania powodował znaczną obniżkę stężenia tlenku węgla(II) i dużo mniejszą obniżkę tlenku siarki(IV), przy równoczesnym wzroście emisji tlenków azotu NO_x . Zależności te zaobserwowano dla wszystkich badanych paliw.
3. W procesie odsiarczania spalin metodą wapniową wzrost wartości gęstości zraszania roztworem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w badanym przedziale powodował zwiększenie skuteczności procesu do wysokiej wartości 97%, podczas gdy, wzrost tej skuteczności do wartości 93% był wynikiem zwiększenia wysokości skrubera oraz zmniejszenia przepływu gazów spalinowych w badanym zakresie.

4. Osiągnięta wartość ponad 88% skuteczności usuwania NO_x jest wartością największą, jaką można było uzyskać zmieniając założone parametry zmienne niezależne w układzie badania selektywnej metody redukcji katalitycznej NO_x.
5. W procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na koksie aktywnym, zmiany wybranych parametrów zmiennych niezależnych pozwoliły otrzymać bardzo wysoką skuteczność oczyszczania spalin z tlenku siarki(IV) wynoszącą około 98%, podczas gdy, w przypadku skuteczności redukcji NO_x miała miejsce dużo niższa wartość wynosząca około 60% przy największej objętości złoża adsorpcyjnego w badanym zakresie.
6. Proces spalania badanych odpadów, współspalania osadów ściekowych wraz z tymi odpadami oraz oczyszczania spalin w typowych węzłach technologicznych: odsiarczania metodą wapniową, redukcji NO_x metodą selektywnej redukcji katalitycznej oraz sorpcji na węglu aktywnym, można opisać równaniami analityczno-empirycznymi, które tworzą model matematyczny takiego zespolonego procesu: spalanie – oczyszczanie spalin.
7. Konieczne są dalsze badania procesu spalania badanych odpadów, współspalania osadów ściekowych oraz oczyszczania spalin pod kątem analizy wpływu chloru zawartego w strukturze odpadów stanowiących wsad do pieca spalarni oraz pod kątem oceny zawartości węglowodorów w spalinach i możliwości ich usuwania; takie badania są już realizowane przez doktoranta jako kontynuacja badań wynikających z pracy doktorskiej.

6. Wykaz użytych symboli

\dot{V}_c	– strumień objętości cieczy absorpcyjnej, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
c_{NO_x}	– stężenie sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych na wylocie z absorbera, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
$c_{\text{NO}_x}^0$	– stężenie sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych na wlocie do absorbera, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
c_{SO_2}	– stężenie SO_2 w gazach spalinowych w ostatnim punkcie pomiarowym (w gazach opuszczających skrubler), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
$c_{\text{SO}_2}^0$	– stężenie SO_2 w gazach spalinowych na wlocie do absorbera, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
A	– powierzchnia przekroju absorbera, m^2 ,
A	– zawartość popiołu, %,
C	– stała aproksymacji dla punktu centralnego
c	– węgiel elementarny, %,
c_{CO}	– stężenie tlenku węgla(II), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
c_{NO_x}	– stężenie tlenków azotu, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
c_{SO_2}	– stężenie tlenku siarki(IV), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,
d_{60}	– średnie uziarnienie sorbentu, mm
h	– wodór elementarny, %,
H_{skr}	– wysokość skrubera, m,
L/G	– wskaźnik ilustrujący zależności strumieni objętościowych cieczy (L) absorpcyjnej i gazu (G) oczyszczanego, dm^3/m^3 ,
$L_{\text{Ca(OH)}_2}$	– gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym Ca(OH)_2 , $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,
L_{NH_3}	– gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym NH_3 , $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,
m	– wskaźnik masy materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
n	– azot elementarny, %,
o	– tlen elementarny, %,
O_{2p}	– udział tlenu zmierzonego w spalinach, %,
Q_s	– ciepło spalania, MJ/kg,

6. Wykaz użytych symboli

s	– siarka elementarna, %,
T	– temperatura w strefie spalania pieca, K,
T_s	– temperatura spalin, K,
T_s	– temperatura spalin, K,
U	– udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej, %.
V	– zawartość części lotnych, %,
v_s	– przepływ spalin, $m^3 \cdot s^{-1}$,
V_z	– objętość złoża adsorpcyjnego, m^3 ,
W	– zawartość wilgoci, %,
W_d	– wartość opałowa, MJ/kg,
ΔQ_s	– obniżka wartości ciepła spalania, %
η_{NOx}	– skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x , %,
η_{SO_2}	– skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) SO_2 , %
λ	– współczynnik nadmiaru powietrza.

Literatura

1. **Bień J.B., Bień J.D.:** *Unieszkodliwianie osadów ściekowych za pomocą metod termicznych*. Konferencja N-T nt. Osady ściekowe w praktyce. Częstochowa 1998.
2. **Bień J.B., Wystalska K.:** *Przekształcanie osadów ściekowych w procesach termicznych*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki. Warszawa 2009.
3. **Bień J.B.:** *Osady ściekowe – teoria i praktyka*. Wyd. II. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2007.
4. **Bistroń S.:** *Metody przeciwdziałania emisji tlenków azotu ze źródeł przemysłowych do powietrza atmosferycznego*. Wydawnictwo PAN. Wrocław 1978.
5. **Blaschke W.:** *Przyszłość węgla kamiennego przeznaczonego dla użytkowania w energetyce*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2005.
6. **Blaschke W., Gawlik L., Lorenz U.:** *Węgiel kamienny energetyczny – ekonomia i ekologia*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2005.
7. **Blaschke W., Nycz R.:** *Problemy produkcji czystych energetycznych węgla kamiennych*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2003.
8. **Blaschke Z.:** *Ocena skuteczności wzbogacania i odsiarczania mułów węglowych we wzbogacalnikach zwojowych*. Inżynieria Mineralna. Kraków 2000.
9. **Błędzki A.K.:** *Recykling materiałów polimerowych*. WNT. Warszawa 1997.
10. **Chomiak J.:** *Podstawowe problemy spalania*. PWN. Warszawa 1977.
11. **Chruściel R., Owczarek A.:** *Energetyczna utylizacja zużytych opon samochodowych na przykładzie ciepłowni C-3 w Wałbrzychu*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna Energetyków – Kierunki i sposoby oszczędzania energii. Katowice 2002.

12. **Dąbrowski T.:** *Oczyszczanie ścieków z zakładu przetwórstwa ryb*. Praca doktorska, promotor prof. dr hab. inż. Tadeusz Piecuch. Politechnika Warszawska. Warszawa 2004.
13. **Dudzińska M. R., Kozak Z.:** *PCDF/D Emission from Waste Utilisation in Cement Kilns*. Thermal Solid waste utilisation in regular and industrial facilities. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York 2000.
14. **Florianczyk Z., Penczek S.:** *Chemia polimerów*. Tom III. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1997.
15. **Fukas-Płonka Ł., Zielewicz-Madej E.:** *Możliwości współspalania osadów ściekowych w elektrociepłowniach miejskich*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Inżynieria Środowiska. Białystok 2001.
16. **Głomba M.:** *Oczyszczanie gazów odlotowych w poziomych skrubkach natryskowych*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2005.
17. **Gostomczyk M.A., Kordylewski W.:** *Usuwanie NO_x w instalacji odsiarczania spalin*. IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-techniczna „Elektrownie Ciepłe”. Stok 2009.
18. **Grabowski Z., Oleszkiewicz J.:** *Materiały Międzynarodowego Seminarium Szkoleniowego nt. Podstawy oraz praktyka przeróbki i zagospodarowania osadów*. Kraków 1998.
19. **Hehlmann J., Jodkowski M.:** *Badania wpływu stopnia rozdrobnienia kamienia wapiennego na jego reaktywność w procesie mokrego odsiarczania spalin*. Przemysł Chemiczny rok: 2008.
20. **Hehlmann J., Jodkowski M.:** *Badania procesu mokrego rozdrabniania mączki kamienia wapiennego oraz wpływu rozdrobnienia na efektywność odsiarczania spalin*. Rocznik Ochrony Środowiska Tom 10. Rok 2009.
21. **Hehlmann J., Kujawska E., Kiraga K.:** *Problemy utylizacji gazów odlotowych z instalacji syntezy chemicznej*. Archiwum Ochrony Środowiska. 1999.
22. **Hehlmann J., Mokrosz, W., Bandrowski J.:** *Odsiarczanie gazów spalinowych w reaktorze przepływowym o pneumatycznym transporcie sorbentu*. Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów. 2001.

23. **Hehlmann J., Pietrasik E., Kujawska E., Bania D.:** *Aparat hybrydowy ze złożem ziarnistym w instalacji spalania odpadów.* Rocznik Ochrony Środowiska Tom 11. Rok 2009.
24. **Hehlmann J., Zaremba T., Mokrosz W., Stapiński G., Szwalikowska A.:** *Otrzymywanie i właściwości spoiw siarczynowych i anhydrytowych z odpadów z półsuchej metody odsiarczania spalin.* Gospodarka Surowcami Mineralnymi. 2008.
25. **Helmann J., Pietrasik E.:** *Ekologiczne paliwa formowane – Wybrane aspekty inżynierii produktu.* Monografia. Gliwice 2005.
26. **Jarosiński J.:** *Techniki czystego spalania.* WNT. Warszawa 1996.
27. **Jasieńko S.:** *Chemia i fizyka węgla.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1995.
28. **Jasiewicz M.:** *Sposoby granulowania i recyklingu zużytych opon. Kompleksowe zarządzanie gospodarką odpadami.* Praca zbiorowa pod red. T. Marcinkowskiego. Wydawnictwo PZITS Oddz. Wielkopolski. Poznań 2009.
29. **Juraszka B.:** *Oczyszczanie ścieków przemysłowych pochodzących z klejenia w produkcji drzwi i okien drewnianych.* Praca doktorska, promotor prof. dr hab. inż. Tadeusz Piecuch. Politechnika Koszalińska. Koszalin 2007.
30. **Kempa E.S.:** *Gospodarka odpadami miejskimi.* Wydawnictwo Arkady. Warszawa 1983.
31. **Koniecznyński J.:** *Ochrona powietrza przed szkodliwymi gazami.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2004.
32. **Kordylewski W. i inni:** *Spalanie i paliwa.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2008.
33. **Kotowski M., Pawłowski L., Czechowska A., Kotowska U.:** *Utilisation of Sewage Sludge in Cement Kilns.* Thermal Solid waste utilisation in regular and industrial facilities. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York 2000.
34. **Kowalewicz A.:** *Podstawy procesów spalania.* WNT. Warszawa 2000.

35. **Kruczek S.:** *Kotły parowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2001.
36. **Kuropka J.:** *Oczyszczanie gazów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2000.
37. **Latosińska J., Żygadło M.:** *Współspalanie osadów ściekowych – wymogi, korzyści, zagrożenia*. Inżynieria i Ochrona Środowiska. Tom 11, Nr 2. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2008.
38. **Łużny W.:** *Wstęp do nauki o polimerach*. Wydawnictwo AGH. Kraków 1999.
39. Materiały informacyjne Centrum Utylizacji Opon w Warszawie
<http://www.utyliczacjaopon.pl/>
40. Materiały informacyjne
<http://www.boryszewerg.com.pl/Produkty/Chemia/Ergoplasty/>.
41. Materiały informacyjne <http://www.ewgor.pl/>
42. Materiały informacyjne Jastrzębska Spółka Węglowa – Parametry węgla. 2008.
43. Materiały informacyjne Ministerstwa Środowiska. Krajowy plan gospodarki odpadami 2010. <http://www.mos.gov.pl/>.
44. Materiały informacyjne www.targalski.4b.pl/
45. **Mianowski A, Tokarska A, Kałyniak P.:** *Addytyw do termicznego rozkładu odpadowych poliolefin*. Zgłoszenie patentowe nr P-341494
46. **Mianowski A., Radko T., Koszorek A.:** *Współspalanie miazgi węglowej i zużytych opon*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2007.
47. **Miller U.:** *Praktyczne aspekty spalania biomasy w kotłach rusztowych. Doświadczenia eksploatacyjne na przykładzie współspalania biomasy w kotle WR-10 w Ciepłowni DPM w Koszalinie*. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 11, Rok 2009.
48. Ochrona Środowiska 2004, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2004.
49. Ochrona Środowiska 2009. Informacje i opracowania statystyczne. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2009.

50. **Pająk T.:** *Termiczne przekształcanie i współspalanie odpadów komunalnych i osadów ściekowych*. III Międzynarodowa Konferencja „Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych”. Wisła 2005.
51. **Paryjczak T., Lewicki A.:** *Kataliza w zielonej chemii*. Przemysł Chemiczny 2006.
52. **Paryjczak T., Rynkowski J.:** *Kataliza w ochronie środowiska*. Przemysł Chemiczny. Tom 77. 1998.
53. **Paryjczak T.:** *Rola „zielonej chemii” w ochronie środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 2002.
54. **Paryjczak T.:** *Zielona chemia – podstawą ochrony środowiska XXI wieku*. VII Ogólnopolska Konferencja Naukowa.
55. **Pawłowski L.:** *Neutralisation of Wastes in a Cement Kiln*. Thermal Solid waste utilisation in regular and industrial facilities. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York 2000.
56. **Piecuch T., Dąbrowski J., Dąbrowski T.:** *Badania laboratoryjne nad możliwością termicznej utylizacji poprodukcyjnych odpadów poliestrowych*. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 11, Rok 2009, Część 1; 2009.
57. **Piecuch T., Dąbrowski J., Dąbrowski T.:** *Laboratory Investigations and Preliminary Project of Installation for Utilization of Waste from Polyester Forming*. Polish Journal of Environmental Studies, Volume 5: Series of Monographs; HARD, 2009.
58. **Piecuch T., Dąbrowski T., Dąbrowski J., Lubierski M., Juraszka B., Kościerzyńska-Siekan G., Jantos K.:** *Analiza pracy spalarni odpadów Szpitala Wojewódzkiego w Koszalinie – spaliny, ścieki, wtórny odpad*. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 5. Rok 2003. Wydawnictwo Środkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego Ochrony Środowiska. Koszalin 2003.
59. **Piecuch T., Dąbrowski T., Dąbrowski J., Winiecki M.:** *Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania miazgi węglowej wraz z osadami ściekowymi i odpadami poliestrowymi*. Inżynieria i Ochrona Środowiska Tom 11, nr 2, 2008.

60. **Piecuch T., Dąbrowski T., Hryniewicz T., Żuchowicki W.:** *Polish Made Pyrolytic Convective Waste Utilizer of WPS Type. Structure Principle of Operation and Evaluation. Problems of Residue Management After Thermal Waste Utilization.* The Journal of Solid Waste Technology and Management. Volume 26, Novembers 3/4, Editor: Iraj Zandi, University of Pensylwania and Editor: Ronald L. Mersky, University Widener – USA.
61. **Piecuch T., Juraszka B., Dąbek L.:** *Spalanie i piroliza odpadów oraz ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin.* Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2002.
62. **Piecuch T.:** *Termiczna utylizacja odpadów i ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin.* Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 1998.
63. **Piecuch T.:** *The Pyrolytic Convective Waste Utiliser.* Thermal Solid waste utilisation in regular and industrial facilities. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York 2000.
64. **Piecuch T.:** *Zarys metod termicznej utylizacji odpadów.* Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2006.
65. **Piekarski J.:** *Opracowanie technologii oczyszczania ścieków przemysłowych pochodzących z produkcji płyt wiórowych.* Praca doktorska, promotor prof. dr hab. inż. Tadeusz Piecuch. Politechnika Warszawska. Warszawa 2000.
66. **Podedworna J., Umiejewska K.:** *Technologia osadów ściekowych.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2008.
67. *Produkcja ważniejszych wyrobów przemysłowych I-II 2010 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2010.
68. *Rocznik Statystyczny Ochrony Środowiska 2006,* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2006.
69. **Rodzinkiewicz-Rudzińska J.:** *Guma.* Poradnik Inżyniera i Technika. Wydawnictwo-Naukowo Techniczne. Warszawa 1981.
70. **Rosik-Dulewska Cz.:** *Podstawy gospodarki odpadami.* PWN. Warszawa 2005.

71. **Sikora A., Sykaczewska K.:** *Urządzenie do oczyszczania zawieszek i kratek malarskich metodą pirolizy*. II Ogólnopolskim Sympozjum „Spalanie odpadów przemysłowych - technologie i problemy”. Łódź 1995.
72. **Skalmowski K.:** *Poradnik gospodarowania odpadami*. Wyd. Verlag-Dashöfer, Warszawa, 2007.
73. **Sobiecki M.:** *Rozwój systemu gospodarki odpadami po oponach samochodowych w Polsce. Kompleksowe zarządzanie gospodarką odpadami*. Praca zbiorowa pod red. T. Marcinkowskiego. Wydawnictwo PZITS Oddz. Wielkopolski. Poznań 2009.
74. **Stelmach S., Wasielewski R., Zuwała J., Sobolewski A.:** *Komunalne osady ściekowe jako paliwo odnawialne – droga do współspalania w energetyce zawodowej*. Czysta Energia Nr 11, Wydawnictwo ABRYŚ, Poznań 2006.
75. **Stelmach S., Wasielewski R.:** *Preliminary results of Sewage Sludge and Coal Co-Combustion in Combined Heat and Power Plant*. Inżynieria i Ochrona Środowiska Tom 10 Nr 2. 2007.
76. **Szkarowski A.:** *Zasady obliczeń zdławienia NO_x metodą dozowanego skierowanego wtrysku balastu wodnego*. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 4. Koszalin 2002.
77. **Szkarowski A.:** *Spalanie gazów*. Monografia nr 167 Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2009.
78. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Optymalizacja pracy kotłów metodą sterowanego poziomu niezapełności spalania*. Polityka Energetyczna. Tom 12. Zeszyt 1. 2009.
79. **Szkarowski A., Łatowski L.:** *Analiza problemu zanieczyszczenia atmosfery tlenkami azotu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Koszalińskiej. Nr 21. Koszalin 2002.

80. **Szkarowski A., Nowikow O.N., Okatjew A.N., Kociergin M.A.:** Intelktualny system sterowania jakością spalania paliwa. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Nr 21. Koszalin 2003.
81. **Szkarowski A.:** Technologia redukcji emisji NO_x metodą dozowanego skierowanego balastowania płomienia. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 3. Koszalin 2001.
82. **Szymański K.:** *Gospodarka odpadami – stan i perspektywy*. Gospodarka odpadami komunalnymi, Tom II. Koszalin 2006.
83. **Środa B.:** *Współspalanie osadów ściekowych w cementowniach*. Wodociągi – Kanalizacja 2007.
84. **Tokarska A.:** *Analiza fizykochemiczna produktów ciekłych z pirolizy odpadowych poliolefin*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej nr15. Koszalin 1999.
85. **Tokarska A.:** *Badanie procesu pirolizy odpadowego polietylenu*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2001.
86. **Tokarska A.:** *Wodorowe uszlachetnienie produktów ciekłych z pirolizy odpadowych poliolefin*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2003.
87. **Tomeczek J.:** *Spalanie węgla*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1992.
88. **Wadrasz J.W., Koziół M.:** *Możliwości współspalania osadów z oczyszczalni ścieków z węglem w kotłach energetycznych*. Gospodarka paliwami i energią Nr 8. 2000.
89. **Walendziewski J., Kułazyński M., Surma A.:** *Określenie potencjału odpadów i ich rodzajów do produkcji stałych paliw alternatywnych*. Opracowanie w ramach Projektu Z/2.02/II/2.6/06/05. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2007.
90. **Wandrasz J.W., Wandrasz A.J.:** *Paliwa formowane*. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki”. Warszawa 2006.

91. **Wandrasz W. J.:** *Gospodarka odpadami medycznymi*. Wyd. PZliTS. Poznań 2000.
92. **Warych J.:** *Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura*. WNT, Warszawa 1998.
93. **Warych J.:** *Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych*. WNT, Warszawa 1994.
94. **Warych J.:** *Procesy oczyszczania gazów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
95. **Wasielowski R., Sobolewski A.:** *Utylizacja odpadów tworzyw sztucznych przez wkoksovanie – przemysłowe próby koksovania mieszanki węglowej z dodatkiem przetworzonych OTS*. Karbo-Energochemia-Ekologia. 1998.
96. **Wasielowski R., Matuszek K.:** *Wybrane aspekty współpalania odpadów gumowych*. VI międzynarodowa Konferencja „Paliwa z Odpadów” Gliwice 2007.
97. **Wasielowski R., Sobolewski A., Polaczek J.:** *Energetyczna waloryzacja odpadowych tworzyw sztucznych*. INSTAL. 1999.
98. **Wasielowski R., Stelmach S.:** *Uwarunkowania formalno-prawne dla odzysku energii z komunalnych osadów ściekowych*. XV Konferencja „Osady ściekowe, biomasa – czy tylko”. Ustroń 2008.
99. **Wilk K., Gustof P., Maćkowski J.:** *Obliczanie parametrów cieplnych i składu spalin dla silnika ZI zasilanego paliwem ciekłym i gazowym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. 1996.
100. **Wilk K., Kobryń J.:** *Analiza liczb kryterialnych podobieństwa pod kątem ich zastosowania w bilansie energii silnika spalinowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. 2004.
101. **Wilk K., Kobryń J.:** *Analiza możliwości zastosowania liczb podobieństwa opisujących gazowe płomienie dyfuzyjne do oceny zjawisk zachodzących w silniku ZS*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. 2005.
102. **Wilk K.:** *Badania dyfuzyjnych palników gazowych*. Monografia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. 1984.

103. **Wilk K.:** *Energetyka a środowisko naturalne*. V Konferencja N-T. „Ochrona powietrza – zmniejszenie zanieczyszczeń”. STiTPCH. Gliwice 1998.
104. **Wilk K.:** *Teoretyczno doświadczalny model procesu spalania w dyfuzyjnym płomieniu gazowym*. III Konferencja „Problemy Badania Energetyki Ciepłej”. Tom III. Warszawa 1997.
105. **Wilk R., Misztal T.:** *Modelowanie powstawania NO w technologii spalania oleju opałowego lekkiego przy wysokiej temperaturze powietrza (HTAC)*. II Kongres Inżynierii Środowiska Tom 2. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Vol. 33. Lublin 2005.
106. **Wilk R.K., Werle S.:** *Energetyczne wykorzystanie osadów ściekowych*. III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska. Tom 1. Lublin 2009.
107. **Wilk R., Szlęk A., Malczyk K., Misztal T.:** *Niskoemisyjna technologia spalania oleju w powietrzu o wysokiej temperaturze*. Karbo 1/2004
108. **Zwoździak J.:** *Człowiek, środowisko, zagrożenie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2002.
109. **Zwoździak J., Szymanek A., Walawska B.:** *Uboczne produkty spalania: surowce niedoceniane*. Chemik. Vol. 62. Nr 4. Rok 2009.
110. **Zwoździak J., Walawska B.:** *Źródła oraz metodyka szacowania wielkości emisji zanieczyszczeń*. Chemik. Vol. 61. Nr 3. Rok 2008.
111. **Zwoździak J., Gzella A.:** *Przestrzenno-czasowe zależności stężeń ozonu w regionie Czarnego Trójkąta*. Archiwum Ochrony Środowiska. Vol. 27, No. 1. Rok 2001.
112. **Zwoździak A., Sówka I., Zwoździak J.:** *Trendy zmian stężeń zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego w wybranych uzdrowiskach Dolnego Śląska po modernizacji największych zakładów przemysłowych w regionie*. IX Konferencja POL-EMIS 2008. Aktualne problemy w ochronie powietrza atmosferycznego. Karpacz 2008.
113. **Zwoździak J., Walawska B.:** *Metody oceny jakości środowiska*. Chemik Vol. 59. Nr 3. Rok 2006.

114. **Zwoździak J., Szalińska W.:** *Ocena zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego na podstawie statystycznych rozkładów prawdopodobieństwa.* Archiwum Ochrony Środowiska. Vol. 27, No. 1. Rok 2001.
115. **Zwoździak J., Zwoździak A., Kmieć G., Sówka I.:** *Zmiany stężeń ozonu, nadtlenu wodoru, dwutlenku azotu i dwutlenku siarki w powietrzu podczas epizodów chmurowych.* Archiwum Ochrony Środowiska. Vol. 30, No. 3. Rok 2004.
116. **Zwoździak J., Sówka I., Zwoździak A., Wieprecht W.:** *Oznaczanie stężeń nadtlenu wodoru w powietrzu.* Archiwum Ochrony Środowiska. Vol. 25, No. 2. Rok 1999.
117. **Żygadło M.:** *Gospodarka odpadami komunalnymi.* Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej. Kielce 1999.

Zestawienie wyników badań procesu spalania osadów ściekowych

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z1. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	150,01
		973,15	218,08
		1073,15	261,40
		1173,15	326,33
		1273,15	364,79
		1373,15	449,88
		1473,15	528,53

Tabela Z2. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	403,26
		1,5	388,67
		1,8	364,79
		2,0	345,35

Tabela Z3. Wyniki badań wpływu zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	364,79
		2,4	708,14
		3,6	964,82

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z4. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	42,95
		973,15	76,88
		1073,15	193,83
		1173,15	293,05
		1273,15	416,87
		1373,15	475,70
		1473,15	545,30

Tabela Z5. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	281,88
		1,5	359,57
		1,8	416,87
		2,0	445,26

Tabela Z6. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	416,87
		2,4	753,38
		3,6	975,49

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z7. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	3515,75
		973,15	1531,94
		1073,15	493,56
		1173,15	21,19
		1273,15	12,63
		1373,15	2,56
		1473,15	0,00

Tabela Z8. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	18,13
		1,5	15,25
		1,8	12,63
		2,0	10,19

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z9. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	12,63
		2,4	15,19
		3,6	21,13

Zestawienie wyników badań procesu spalania miąłu węglowego

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z10. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miąłu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	30,32
		973,15	42,61
		1073,15	57,20
		1173,15	70,21
		1273,15	86,09
		1373,15	98,38
		1473,15	100,67

Tabela Z11. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazgu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	114,69
		1,5	101,67
		1,8	86,09
		2,0	68,35

Tabela Z12. Wyniki badań wpływu zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazgu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	86,09
		2,4	157,30
		3,6	224,65

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z13. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazgu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	16,81
		973,15	43,46
		1073,15	80,98
		1173,15	112,85
		1273,15	137,97
		1373,15	166,77
		1473,15	174,05

Tabela Z14. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazgu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	60,89
		1,5	80,87
		1,8	137,97
		2,0	175,69

Tabela Z15. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazgi węglowej

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	137,97
		2,4	242,41
		3,6	329,44

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z16. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miazgi węglowej

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	3779,19
		973,15	1985,25
		1073,15	338,56
		1173,15	18,31
		1273,15	16,75
		1373,15	5,06
		1473,15	0,00

Tabela Z17. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miazgu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	24,44
		1,5	21,06
		1,8	16,75
		2,0	13,19

Tabela Z18. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miazgu węglowego

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	16,75
		2,4	21,13
		3,6	27,88

Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów farbiarskich

Stężenie tlenu siarki(IV) SO_2

Tabela Z19. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	14,59
		973,15	17,73
		1073,15	20,59
		1173,15	25,45
		1273,15	30,32
		1373,15	32,32
		1473,15	33,75

Tabela Z20. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15\text{K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	33,46
		1,5	32,60
		1,8	30,32
		2,0	29,46

Tabela Z21. Wyniki badań wpływu zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$
		1,2
		2,4
		3,6
		Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		30,32
		75,65
		133,28

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z22. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K
		873,15
		973,15
		1073,15
		1173,15
		1273,15
		1373,15
		1473,15
		Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		24,40
		30,85
		40,08
		56,99
		73,39
		88,66
		93,28

Tabela Z23. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe			
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	53,20
		1,5	57,71
		1,8	73,39
		2,0	85,79

Tabela Z24. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe			
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	73,39
		2,4	114,60
		3,6	141,14

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z25. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	1690,25
		973,15	562,06
		1073,15	283,00
		1173,15	11,69
		1273,15	7,44
		1373,15	0,31
		1473,15	0,00

Tabela Z26. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	13,56
		1,5	11,31
		1,8	7,44
		2,0	5,63

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z27. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	7,44
		2,4	12,88
		3,6	18,38

Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów gumowych

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z28. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	187,62
		973,15	215,79
		1073,15	250,54
		1173,15	317,89
		1273,15	402,83
		1373,15	507,36
		1473,15	566,14

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z29. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	414,41
		1,5	409,55
		1,8	402,83
		2,0	395,68

Tabela Z30. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	402,83
		2,4	826,25
		3,6	1155,01

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z31. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	30,85
		973,15	41,21
		1073,15	67,04
		1173,15	92,56
		1273,15	118,08
		1373,15	131,51
		1473,15	135,40

Tabela Z32. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	55,35
		1,5	77,29
		1,8	118,08
		2,0	128,54

Tabela Z33. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	118,08
		2,4	183,99
		3,6	246,21

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z34. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	1939,13
		973,15	673,38
		1073,15	325,19
		1173,15	17,06
		1273,15	10,13
		1373,15	0,50
		1473,15	0,00

Tabela Z35. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	15,38
		1,5	12,50
		1,8	10,13
		2,0	8,13

Tabela Z36. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	10,13
		2,4	17,81
		3,6	23,69

Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliestry

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z37. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	5,86
		973,15	7,58
		1073,15	8,58
		1173,15	10,01
		1273,15	11,73
		1373,15	12,30
		1473,15	13,30

Tabela Z38. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	19,31
		1,5	16,73
		1,8	11,73
		2,0	8,29

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z39. Wyniki badań wpływu zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$
		1,2
		2,4
		3,6
		Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		11,73
		103,39
		200,49

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z40. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K
		873,15
		973,15
		1073,15
		1173,15
		1273,15
		1373,15
		1473,15
		Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		15,68
		21,32
		32,39
		52,48
		62,42
		69,09
		72,26

Tabela Z41. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	56,38
		1,5	57,91
		1,8	62,42
		2,0	66,73

Tabela Z42. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	62,42
		2,4	71,85
		3,6	77,08

Stężenie tlenu węgla(II) CO

Tabela Z43. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenu węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenu węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	2762,06
		973,15	1006,13
		1073,15	164,56
		1173,15	30,81
		1273,15	8,75
		1373,15	3,63
		1473,15	1,25

Tabela Z44. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenu węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	11,19
		1,5	9,50
		1,8	8,75
		2,0	6,81

Tabela Z45. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	8,75
		2,4	843,81
		3,6	1185,44

Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliolefiny

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z46. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $c_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	9,44
		973,15	11,58
		1073,15	14,87
		1173,15	17,02
		1273,15	18,73
		1373,15	22,02
		1473,15	24,88

Tabela Z47. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	26,60
		1,5	22,74
		1,8	18,73
		2,0	14,01

Tabela Z48. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	18,73
		2,4	27,60
		3,6	40,61

3.2.3.7.2. Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z49. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	72,57
		973,15	79,54
		1073,15	88,56
		1173,15	93,89
		1273,15	104,04
		1373,15	106,50
		1473,15	109,57

Tabela Z50. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	65,29
		1,5	82,00
		1,8	104,04
		2,0	112,65

Tabela Z51. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, kg \cdot m^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,2	104,04
		2,4	122,08
		3,6	150,16

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z52. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		873,15	7700,19
		973,15	6886,00
		1073,15	5435,25
		1173,15	4408,00
		1273,15	3569,81
		1373,15	2727,56
		1473,15	2516,06

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z53. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	5409,50
		1,5	4393,88
		1,8	3569,81
		2,0	2154,00

Tabela Z54. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	3569,81
		2,4	4592,75
		3,6	5839,94

Zestawienie wyników badań procesu spalania odpadów z tworzyw sztucznych – poliwinyle

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z55. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe			
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	71,93
		973,15	85,23
		1073,15	111,25
		1173,15	124,55
		1273,15	135,71
		1373,15	140,57
		1473,15	151,01

Tabela Z56. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe			
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	140,14
		1,5	137,42
		1,8	135,71
		2,0	133,56

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z57. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2
		2,4
		3,6
		Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		135,71
		268,84
		345,77

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z58. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca T, K
		873,15
		973,15
		1073,15
		1173,15
		1273,15
		1373,15
		1473,15
		Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		5,23
		8,30
		12,51
		21,94
		45,20
		57,09
		63,35

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z59. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	30,34
		1,5	37,11
		1,8	45,20
		2,0	49,71

Tabela Z60. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Y_1 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2	45,20
		2,4	59,45
		3,6	73,19

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z61. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T, \text{ K}$	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		873,15	4045,19
		973,15	2408,88
		1073,15	1645,06
		1173,15	740,13
		1273,15	249,94
		1373,15	190,81
		1473,15	158,81

Tabela Z62. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15 \text{ K}$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{\text{CO}}, \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,3	264,63
		1,5	255,31
		1,8	249,94
		2,0	238,81

Tabela Z63. Wyniki badań wpływu zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – wskaźnik masy materiału $m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
		1,2
		2,4
		3,6
		Y_1 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
		249,94
		348,44
		474,56

Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Stężenie tlenu siarki(IV) SO_2

Tabela Z64. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe			
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		0	86,09
		10	91,52
		20	98,67
		30	107,11
		40	128,70
		50	148,86

Tabela Z65. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe			
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	119,26
		1,5	107,25
		1,8	91,52
		2,0	70,64

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z66. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	
		Y ₁ – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	
		1073,15	55,06
		1173,15	76,65
		1273,15	91,52
		1373,15	104,82
1473,15	114,26		

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z67. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	
		Y ₂ – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	
		0	138,17
		10	146,68
		20	160,31
		30	175,07
		40	196,49
		50	208,69

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z68. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	69,91
		1,5	91,94
		1,8	146,68
		2,0	184,71

Tabela Z69. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	90,71
		1173,15	121,57
		1273,15	146,68
		1373,15	171,69
		1473,15	186,55

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z70. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe			
X ₂ – współczynnik nadmiaru powietrza λ = 1,8	X ₃ – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X ₁ – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y ₃ – stężenie tlenku węgla(II) C_{co}, mg · m⁻³
		0	16,75
		10	16,31
		20	16,00
		30	15,50
		40	15,00
		50	14,69

Tabela Z71. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza **λ** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe			
X ₁ – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U = 10%	X ₃ – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X ₂ – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y ₃ – stężenie tlenku węgla(II) C_{co}, mg · m⁻³
		1,3	22,88
		1,5	20,25
		1,8	16,31
		2,0	11,75

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z72. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z miazem węglowym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	452,00
		1173,15	17,69
		1273,15	16,31
		1373,15	3,81
		1473,15	0,00

Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z73. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		0	30,32
		10	39,47
		20	51,62
		30	62,63
		40	83,66
		50	99,67

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z74. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	44,33
		1,5	42,19
		1,8	39,47
		2,0	34,89

Tabela Z75. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	29,60
		1173,15	34,75
		1273,15	39,47
		1373,15	42,76
		1473,15	45,33

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z76. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$
		0
		10
		20
		30
		40
		50
		Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		73,49
		79,34
		98,50
		115,93
		150,37
		186,35

Tabela Z77. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ
		1,3
		1,5
		1,8
		2,0
		Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		57,40
		65,19
		79,34
		93,69

Tabela Z78. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe			
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	47,36
		1173,15	61,71
		1273,15	79,34
		1373,15	99,02
		1473,15	104,04

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z79. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe			
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		0	7,44
		10	8,00
		20	8,50
		30	9,06
		40	9,75
		50	10,25

Tabela Z80. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	14,13
		1,5	12,50
		1,8	8,00
		2,0	4,38

Tabela Z81. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	319,81
		1173,15	13,63
		1273,15	8,00
		1373,15	3,25
		1473,15	1,25

Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Stężenie tlenu siarki(IV) SO_2

Tabela Z82. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		0	402,83
		10	398,97
		20	397,25
		30	395,25
		40	393,68
		50	389,53

Tabela Z83. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	412,27
		1,5	404,40
		1,8	398,97
		2,0	392,96

Tabela Z84. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X ₁ – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U = 10%	X ₂ – współczynnik nadmiaru powietrza λ = 1,8	X ₃ – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y ₁ – stężenie tlenku siarki(IV) C_{SO2}, mg · m⁻³
		1073,15	275,70
		1173,15	334,62
		1273,15	398,97
		1373,15	500,50
		1473,15	557,56

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z85. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X ₂ – współczynnik nadmiaru powietrza λ = 1,8	X ₃ – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X ₁ – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y ₂ – stężenie tlenków azotu C_{NOx}, mg · m⁻³
		0	118,08
		10	132,43
		20	141,76
		30	152,21
		40	172,61
		50	201,11

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z86. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszanke paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	122,90
		1,5	128,54
		1,8	132,43
		2,0	140,84

Tabela Z87. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszanke paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	90,92
		1173,15	114,90
		1273,15	132,43
		1373,15	143,40
		1443,15	147,91

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z88. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		0	10,13
		10	10,31
		20	10,69
		30	10,94
		40	11,13
		50	11,50

Tabela Z89. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U = 10%	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	16,13
		1,5	13,75
		1,8	10,31
		2,0	8,63

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z90. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	344,06
		1173,15	17,75
		1273,15	10,31
		1373,15	1,25
		1473,15	0,00

Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliestry

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z91. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		0	11,73
		10	37,75
		20	90,09
		30	145,15
		40	214,50
		50	255,26

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z92. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszanke paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	49,48
		1,5	44,47
		1,8	37,75
		2,0	30,03

Tabela Z93. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszanke paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	34,61
		1173,15	36,47
		1273,15	37,75
		1373,15	38,75
		1473,15	41,04

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z94. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$
		0
		10
		20
		30
		40
		50
		Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		62,42
		91,33
		162,16
		224,99
		296,23
		329,13

Tabela Z95. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ
		1,3
		1,5
		1,8
		2,0
		Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		85,18
		88,05
		91,33
		95,43

Tabela Z96. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K
		1073,15
		1173,15
		1273,15
		1373,15
		1473,15
		Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		59,55
		80,05
		91,33
		96,04
		101,48

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z97. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %
		0
		10
		20
		30
		40
		50
		8,75
		9,25
		9,56
		10,25
		11,06
		11,50

Tabela Z98. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	11,50
		1,5	10,06
		1,8	9,25
		2,0	7,44

Tabela Z99. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	180,88
		1173,15	35,88
		1273,15	9,25
		1373,15	4,25
		1473,15	1,75

Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliolefiny

Stężenie tlenu siarki(IV) SO_2

Tabela Z100. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		0	18,73
		10	45,19
		20	84,08
		30	145,00
		40	196,91
		50	241,67

Tabela Z101. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenu siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	54,63
		1,5	49,91
		1,8	45,19
		2,0	40,61

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z102. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	37,47
		1173,15	41,47
		1273,15	45,19
		1373,15	49,19
		1473,15	51,77

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z103. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NO_x}, mg \cdot m^{-3}$
		0	104,04
		10	110,60
		20	130,79
		30	158,26
		40	184,40
		50	212,38

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z104. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszanke paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	73,29
		1,5	88,87
		1,8	110,60
		2,0	118,90

Tabela Z105. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszanke paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	94,20
		1173,15	104,04
		1273,15	110,60
		1373,15	113,47
		1473,15	116,54

Stężenie tlenu węgla(II) CO

Tabela Z106. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenu węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y_3 – stężenie tlenu węgla(II) $c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		0	3569,81
		10	3429,63
		20	3348,75
		30	3244,69
		40	3162,63
		50	3075,69

Tabela Z107. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U = 10%	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_3 – stężenie tlenu węgla(II) $c_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	5283,38
		1,5	4527,94
		1,8	3429,63
		2,0	2052,13

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z108. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe			
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) c_{CO}, mg · m⁻³
		1073,15	5244,31
		1173,15	4177,38
		1273,15	3429,63
		1373,15	2503,38
		1473,15	2482,94

Zestawienie wyników badań procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami z tworzyw sztucznych – poliwinyle

Stężenie tlenku siarki(IV) SO_2

Tabela Z109. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe			
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2}, mg · m⁻³
		0	135,71
		10	170,74
		20	204,92
		30	236,09
		40	263,12
		50	290,58

Tabela Z110. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	177,03
		1,5	172,03
		1,8	170,74
		2,0	167,60

Tabela Z111. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_1 – stężenie tlenku siarki(IV) $C_{SO_2}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	143,00
		1173,15	157,30
		1273,15	170,74
		1373,15	179,75
		1473,15	187,19

Stężenie tlenków azotu NO_x

Tabela Z112. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U, \%$	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		0	45,20
		10	112,24
		20	172,00
		30	246,51
		30	305,35
		40	330,87

Tabela Z113. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_2 – stężenie tlenków azotu $C_{NOx}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	98,91
		1,5	104,24
		1,8	112,24
		2,0	116,85

Tabela Z114. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X ₁ – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U = 10%	X ₂ – współczynnik nadmiaru powietrza λ= 1,8	X ₃ – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y ₂ – stężenie tlenków azotu C_{NOx}, mg · m⁻³
		1073,15	81,49
		1173,15	96,45
		1273,15	112,24
		1373,15	125,26
		1473,15	131,51

Stężenie tlenku węgla(II) CO

Tabela Z115. Wyniki badań wpływu zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej **U** na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X ₂ – współczynnik nadmiaru powietrza λ= 1,8	X ₃ – temperatura w strefie spalania pieca T = 1273,15K	X ₁ – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U, %	Y ₃ – stężenie tlenku węgla(II) C_{CO}, mg · m⁻³
		0	249,94
		10	243,00
		20	237,44
		30	230,69
		40	219,88
		50	212,75

Tabela Z116. Wyniki badań wpływu zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca $T = 1273,15K$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza λ	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1,3	260,13
		1,5	253,25
		1,8	243,00
		2,0	230,13

Tabela Z117. Wyniki badań wpływu zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej $U = 10\%$	X_2 – współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$	X_3 – temperatura w strefie spalania pieca T, K	Y_3 – stężenie tlenku węgla(II) $C_{CO}, mg \cdot m^{-3}$
		1073,15	1603,00
		1173,15	709,38
		1273,15	243,00
		1373,15	186,44
		1473,15	150,25

Zestawienie wyników badań odsiarczania spalin metodą wapniową

Tabela Z118. Wyniki badań wpływu zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Parametr niezależny			Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe		Parametr zmienny		
X ₂ – wysokość skrubera H _{skr} = 0,12 m	X ₃ – iloraz L/G = 2,2 dm ³ /m ³	X ₄ – temperatura spalin T _s = 408,15K	X ₁ – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym L _{Ca(OH)₂} , m ³ ·m ⁻² ·s ⁻¹	Y ₁ – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) η _{so₂} , %
			0,61·10 ⁻⁴	88,52
			0,95·10 ⁻⁴	91,00
			2,40·10 ⁻⁴	97,33

Tabela Z119. Wyniki badań wpływu zmian wysokości skrubera na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Parametr niezależny			Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe		Parametr zmienny		
X ₁ – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym L _{Ca(OH)₂} = 0,61·10 ⁻⁴ m ³ ·m ⁻² ·s ⁻¹	X ₃ – iloraz L/G = 2,2 dm ³ /m ³	X ₄ – temperatura spalin T _s = 408,15K	X ₂ – wysokość skrubera H _{skr} , m	Y ₁ – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) η _{so₂} , %
			0,12	88,52
			0,20	90,33
			0,28	91,95

Zestaw tabel wyników badań

Tabela Z120. Wyniki badań wpływu ilorazu **L/G** na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Parametr niezależny			Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe				
X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	X_2 – wysokość skrubera $H_{skr} = 0,12 \text{ m}$	X_4 – temperatura spalin $T_s = 408,15 \text{ K}$	X_3 – iloraz L/G , dm^3/m^3	Y_1 – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) $\eta_{SO_2}, \%$
			2,2	88,52
			2,4	90,05
			2,9	92,10

Tabela Z121. Wyniki badań wpływu temperatury spalin T_s na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Parametr niezależny			Parametr zmienny	Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe				
X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	X_2 – wysokość skrubera $H_{skr} = 0,12 \text{ m}$	X_3 – iloraz L/G = $2,2 \text{ dm}^3/\text{m}^3$	X_4 – temperatura spalin $T_s, \text{ K}$	Y_1 – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) $\eta_{SO_2}, \%$
			398,15	85,67
			403,15	87,33
			408,15	88,52
			413,15	89,38

Zestawienie wyników badań redukcji tlenków azotu NOx

Tabela Z122. Wyniki badań wpływu zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_2 – przepływ spalin $V_s = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	X_3 – temperatura spalin $T_s = 463,15\text{K}$	X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{\text{NH}_3}, \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Y_1 – skuteczność usuwania NOx $\eta_{\text{NO}_x}, \%$
		$5,90 \cdot 10^{-5}$	56,88
		$6,77 \cdot 10^{-5}$	68,56
		$7,64 \cdot 10^{-5}$	75,13
		$8,45 \cdot 10^{-5}$	82,22

Tabela Z123. Wyniki badań wpływu zmian przepływu spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym $L_{\text{NH}_3} = 8,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	X_3 – temperatura spalin $T_s = 463,15\text{K}$	X_2 – przepływ spalin $v_s, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Y_1 – skuteczność usuwania NOx $\eta_{\text{NO}_x}, \%$
		$1,20 \cdot 10^{-5}$	82,22
		$2,80 \cdot 10^{-5}$	74,94
		$6,10 \cdot 10^{-5}$	73,25

Tabela Z124. Wyniki badań wpływu temperatura spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)	
Parametry stałe	Parametr zmienny		
X_1 – gęstość zraszania roztworem adsorbującym $L_{NH_3} = 8,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	X_2 – przepływ spalin $V_s = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	X_3 – temperatura spalin $T_s, \text{ K}$	Y_1 – skuteczność usuwania NOx $\eta_{NOx}, \%$
		433,15	72,00
		463,15	82,22
		523,15	87,09
		573,15	88,60

Zestawienie wyników badań adsorpcyjnego oczyszczania spalin

Stężenie tlenu siarki(IV) SO₂

Tabela Z125. Wyniki badań wpływu zmian średniego uziarnienia sorbentu na skuteczność usuwania tlenu siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – objętość złoża adsorbacyjnego $V_z = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$	X_1 – średnie uziarnienie sorbentu $d_{60}, \text{ mm}$	Y_1 – skuteczność usuwania tlenu siarki(IV) $\eta_{SO_2}, \%$
	1,1	98,75
	2,7	98,57
	4,4	98,23

Tabela Z126. Wyniki badań wpływu zmian objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – średnie uziarnienie sorbentu $d_{60} = 1,1 \text{ mm}$	X_2 – objętość złoża adsorpcyjnego $V_z, \text{ m}^3$	Y_1 – skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) $\eta_{\text{so}_2}, \%$
	$2,5 \cdot 10^{-6}$	87,17
	$5,0 \cdot 10^{-6}$	94,30
	$1,0 \cdot 10^{-5}$	98,46
	$2,5 \cdot 10^{-5}$	98,75
	$5,0 \cdot 10^{-5}$	98,98
	$1,0 \cdot 10^{-4}$	99,08

Stężenie tlenków azotu NO_x

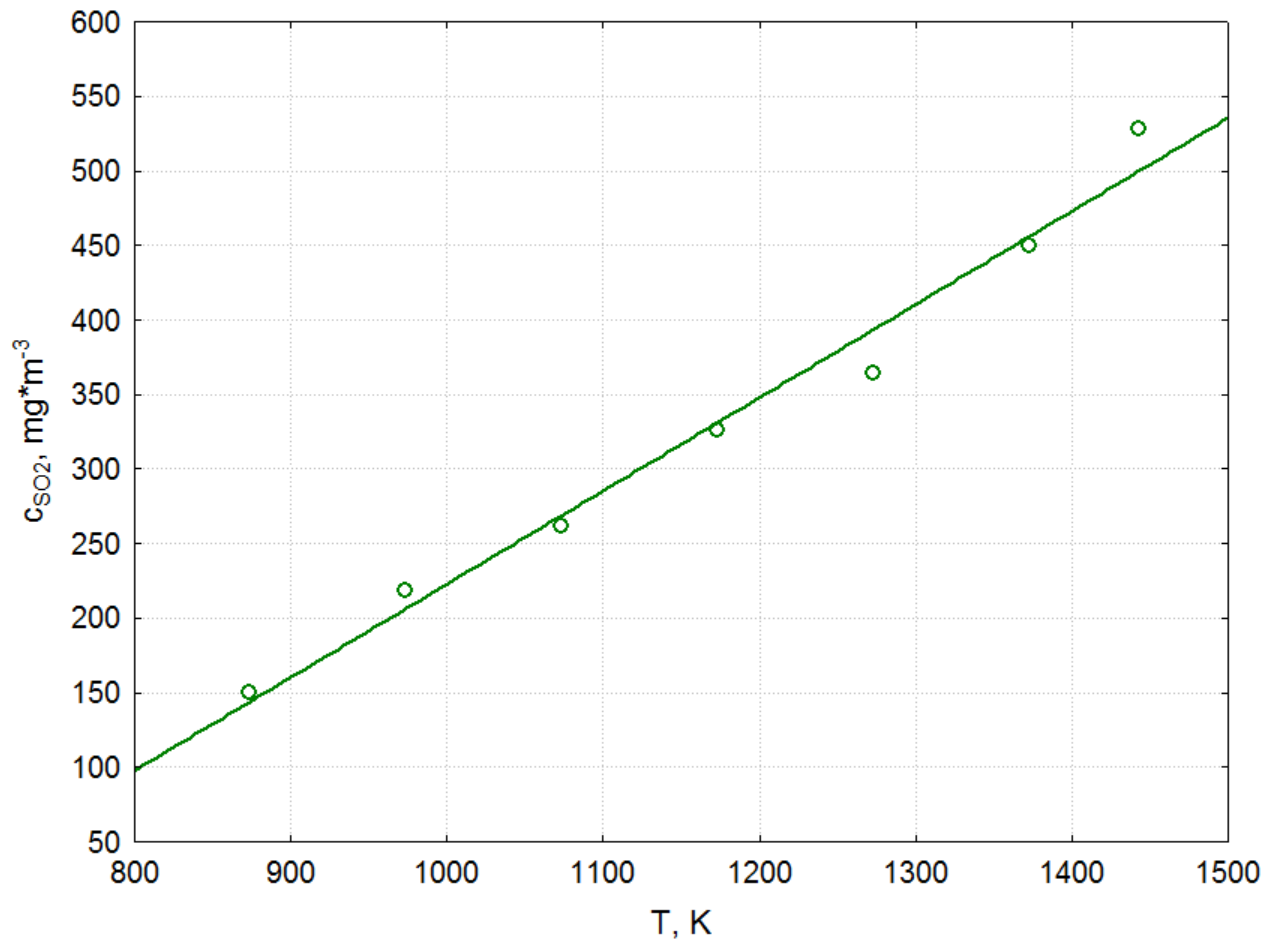
Tabela Z127. Wyniki badań wpływu zmian średniego uziarnienia sorbentu na skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_2 – objętość złoża adsorpcyjnego $V_z = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$	X_1 – średnie uziarnienie sorbentu $d_{60}, \text{ mm}$	Y_1 – skuteczność usuwania tlenków azotu NO_x $\eta_{\text{NO}_x}, \%$
	1,1	41,41
	2,7	37,06
	4,4	28,51

Tabela Z128. Wyniki badań wpływu zmian objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność usuwania tlenków azotu NOx w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym

Parametr niezależny		Parametr zależny (wynikowy)
Parametry stałe	Parametr zmienny	
X_1 – średnie uziarnienie sorbentu $d_{60} = 1,1 \text{ mm}$	X_2 – objętość złoża adsorpcyjnego $V_z, \text{ m}^3$	Y_1 – skuteczność usuwania tlenków azotu NOx $\eta_{\text{NOx}}, \%$
	$2,5 \cdot 10^{-6}$	14,50
	$5,0e^{-06}$	19,97
	$1,0e^{-05}$	29,50
	$2,5e^{-05}$	41,41
	$5,0e^{-05}$	48,36
	$1,0e^{-04}$	57,60

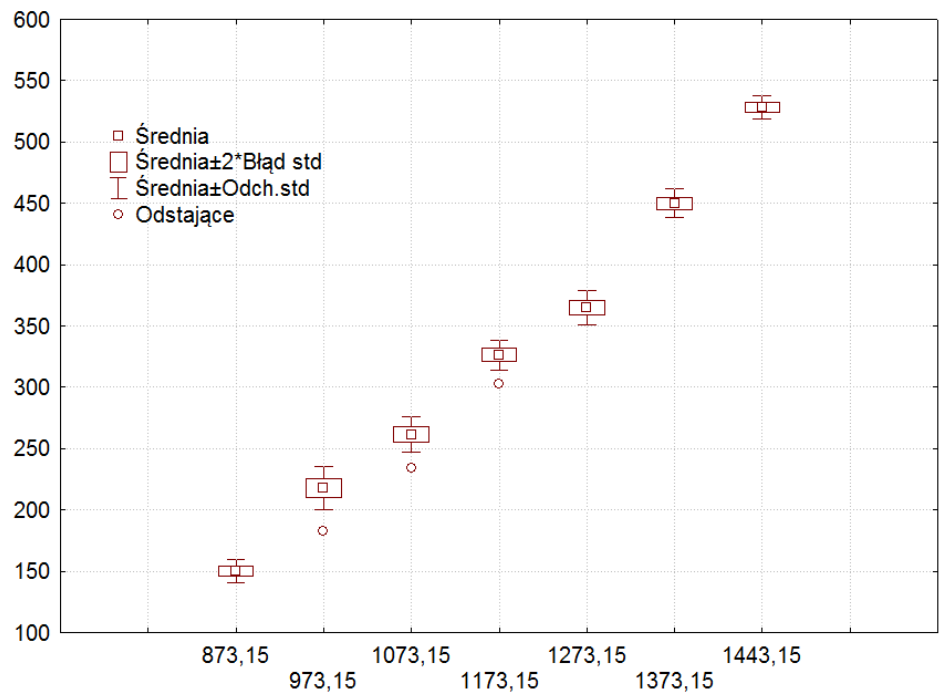
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

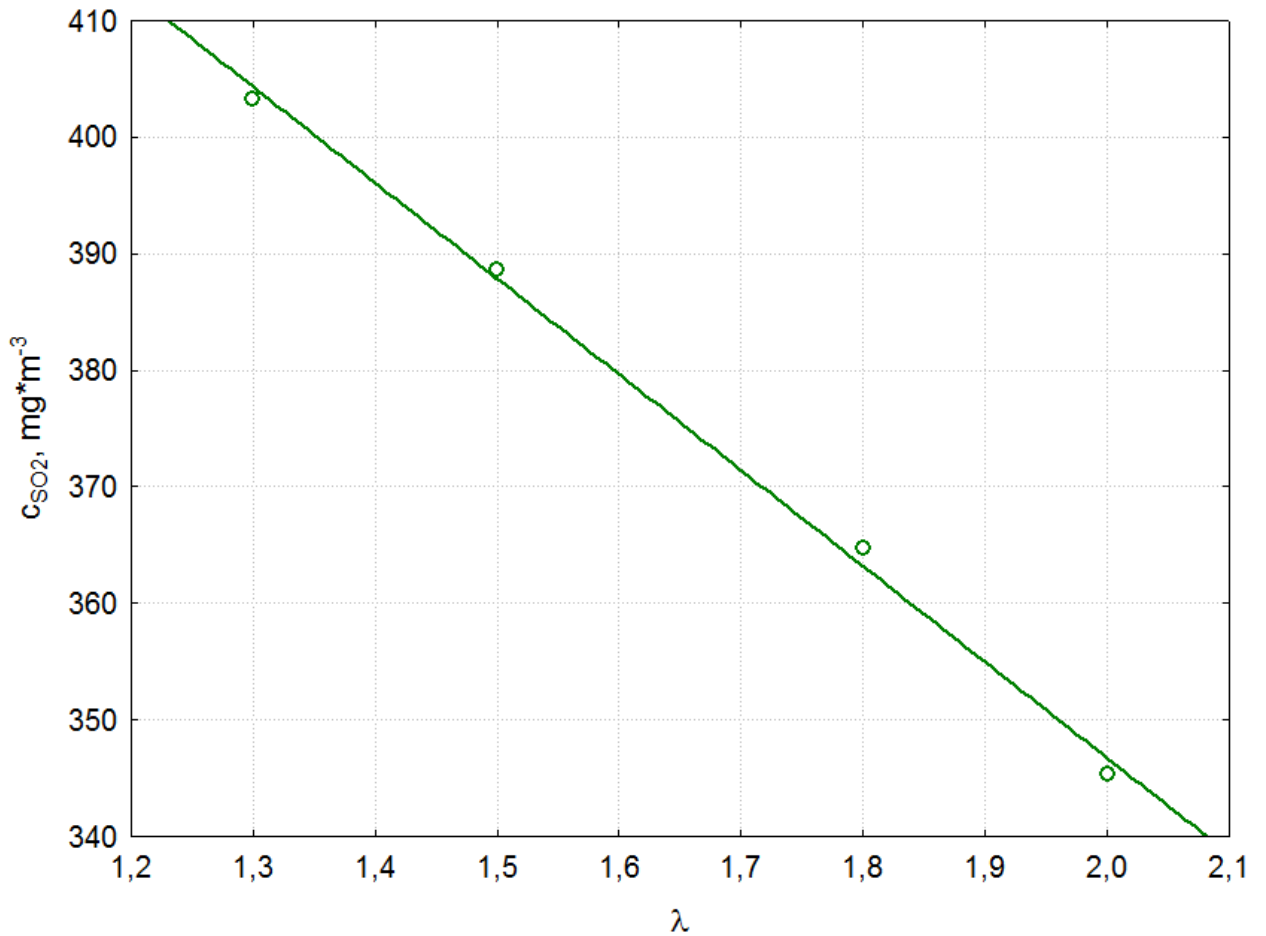
$$\lambda = 1,8$$

$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

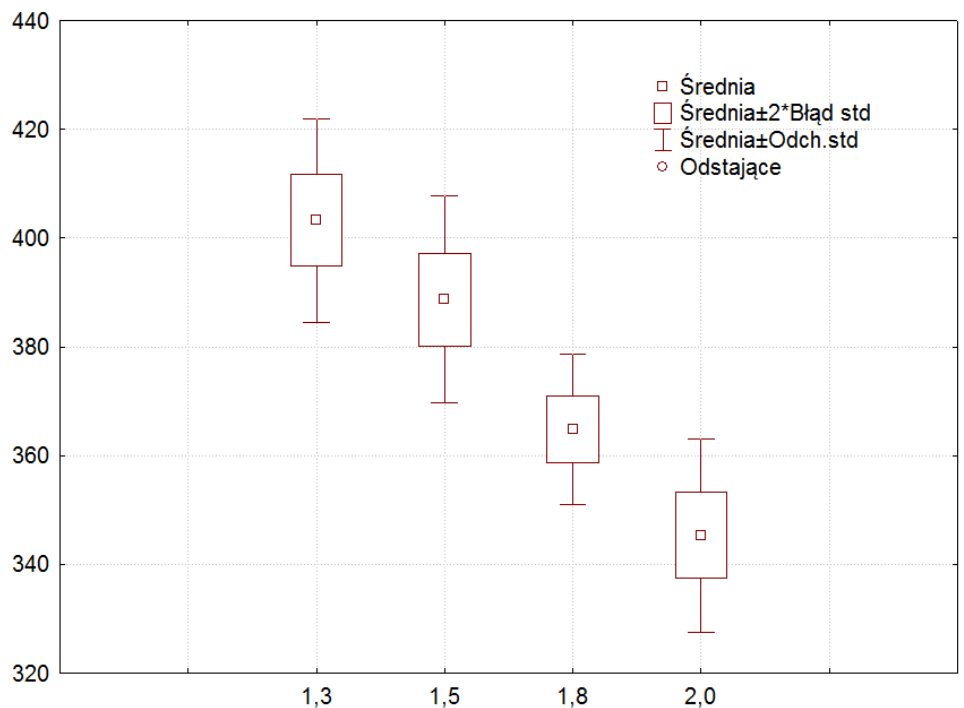


Rys. Z1. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych

Zestaw wykresów

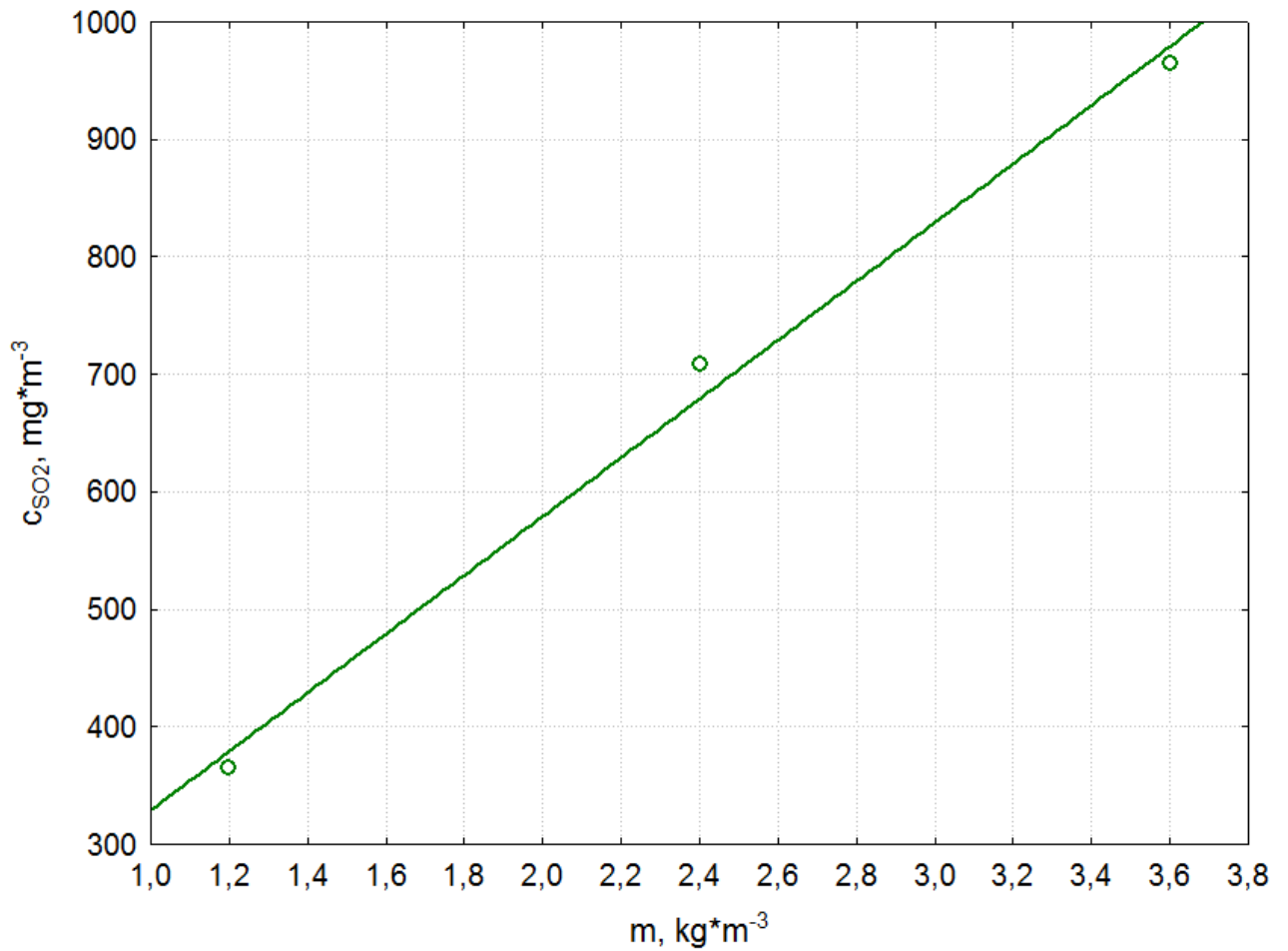


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$

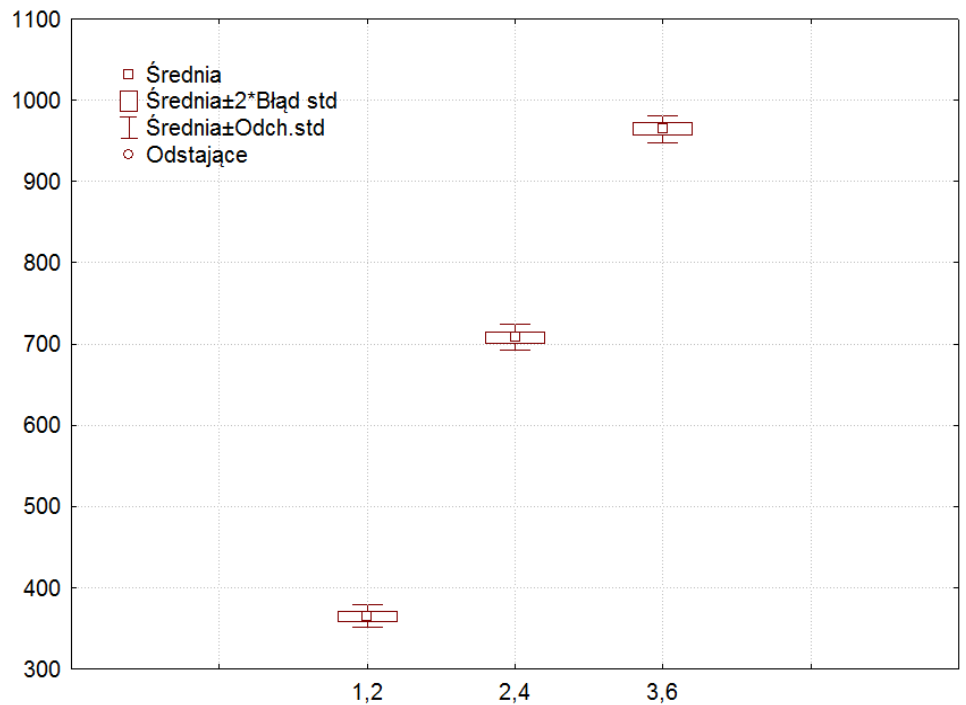


Rys. Z2. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych

Zestaw wykresów

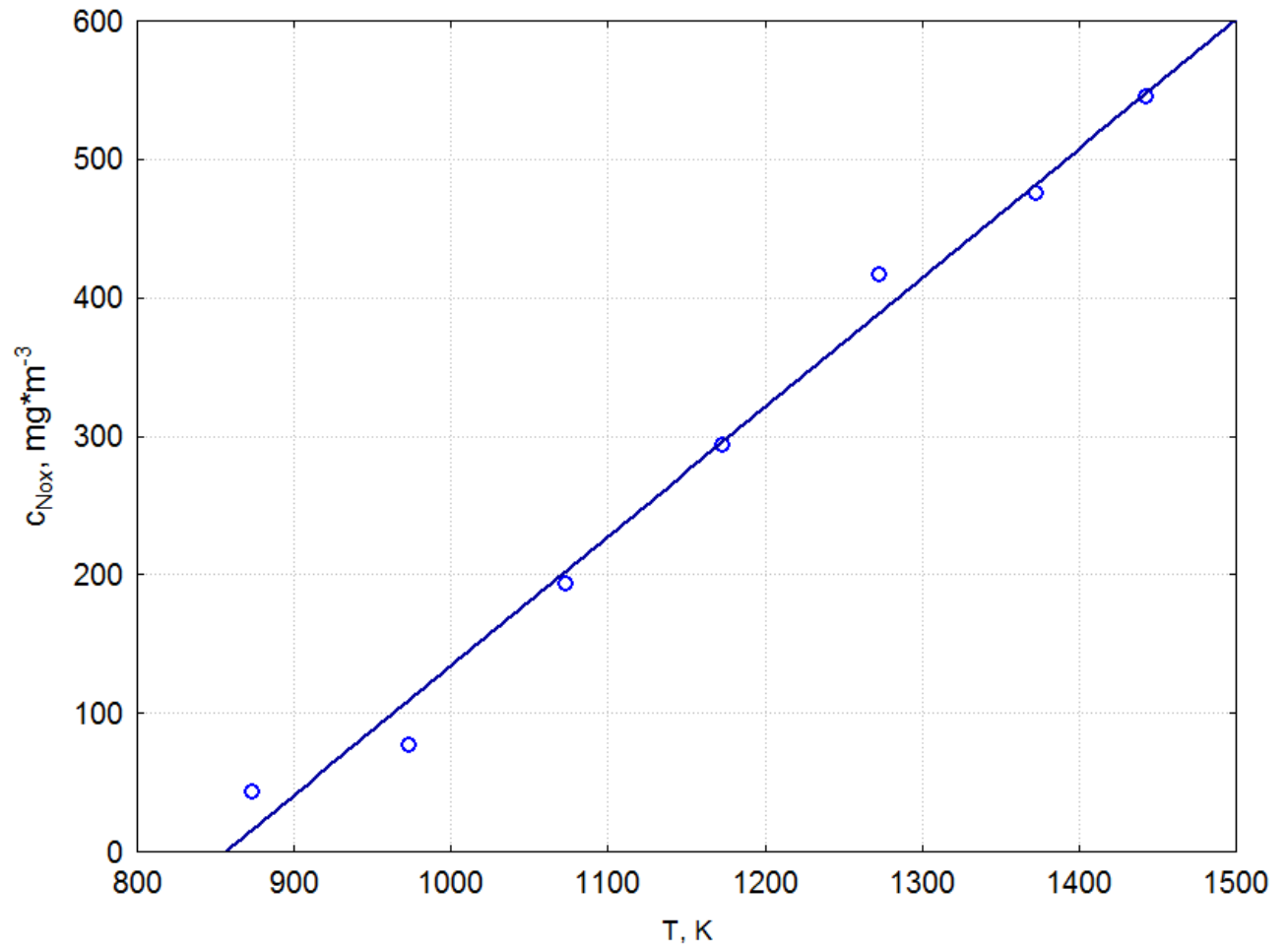


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z3. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania osadów ściekowych

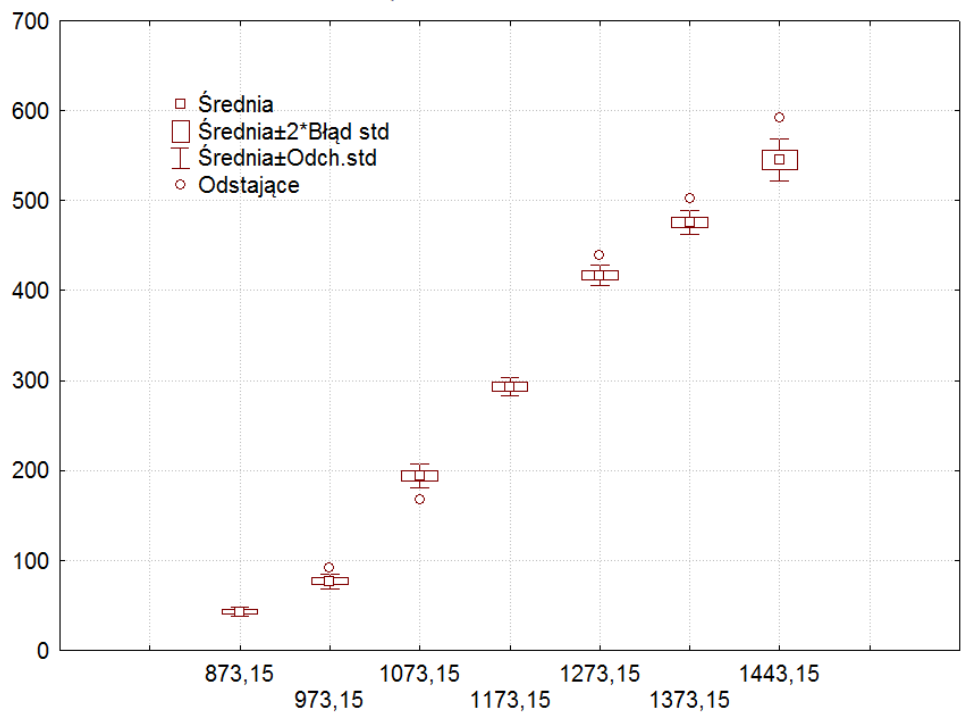
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

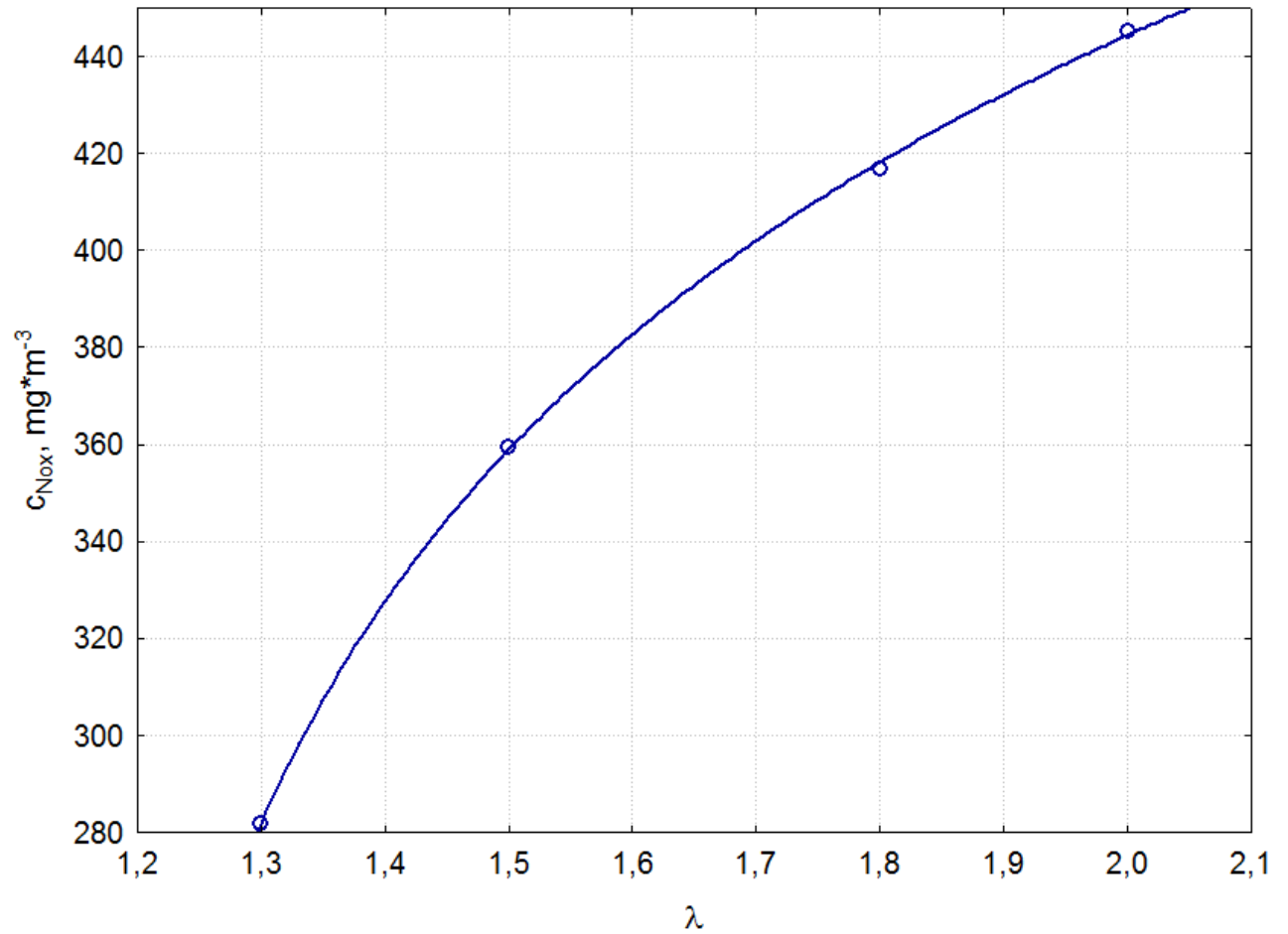
$$\lambda = 1,8$$

$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

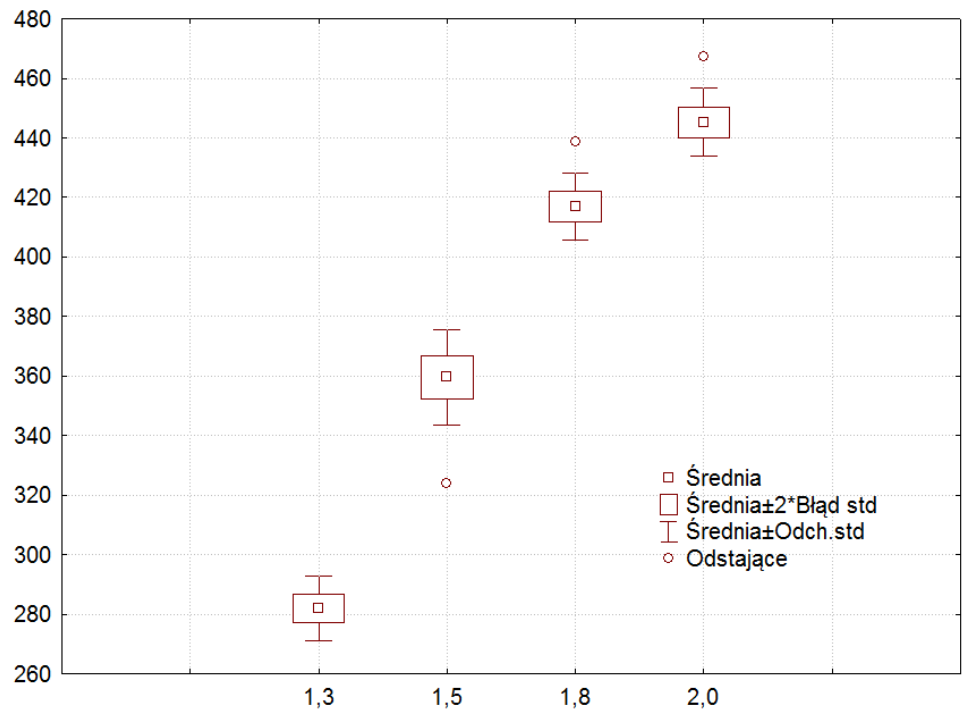


Rys. Z4. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych

Zestaw wykresów

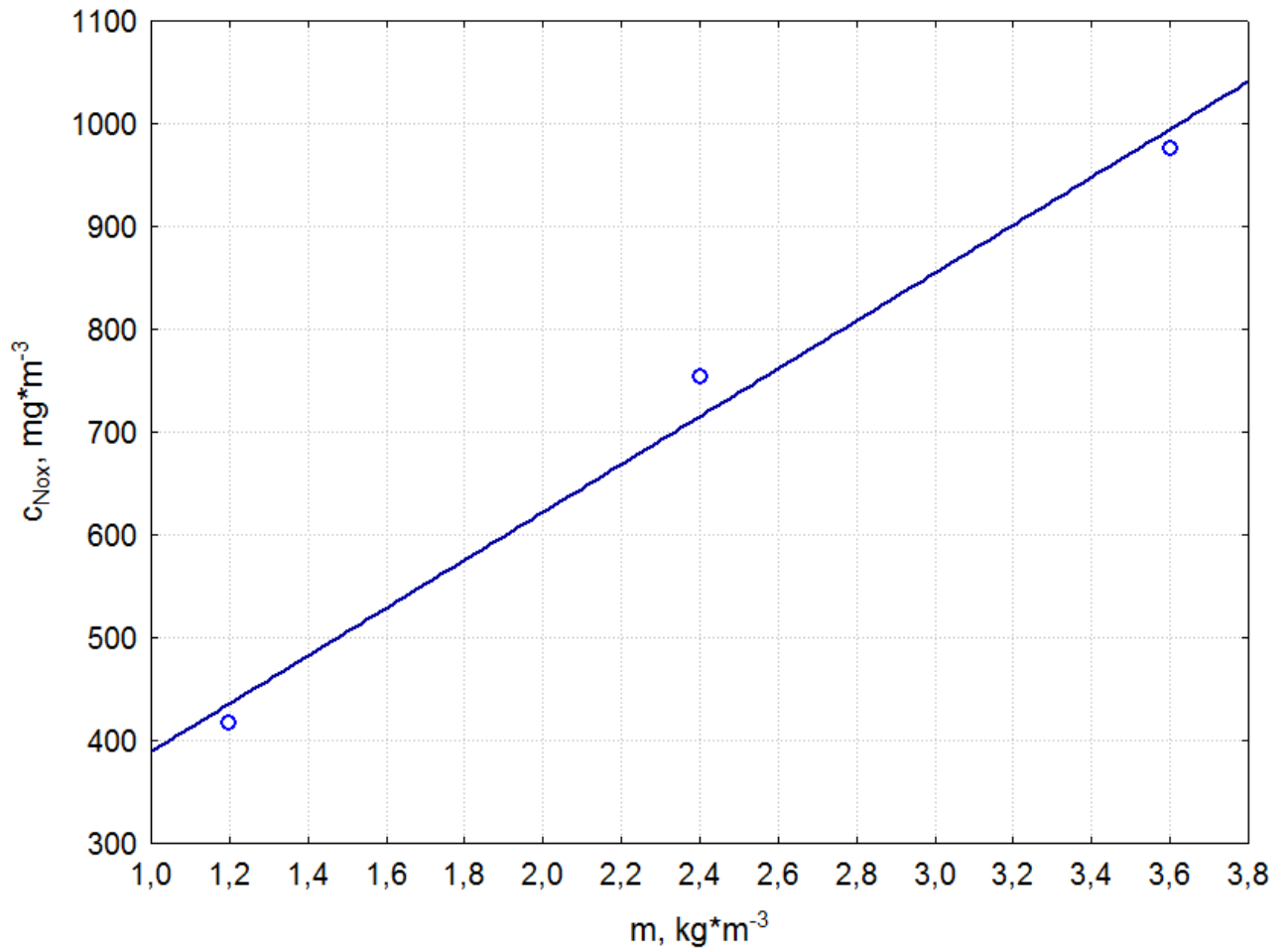


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

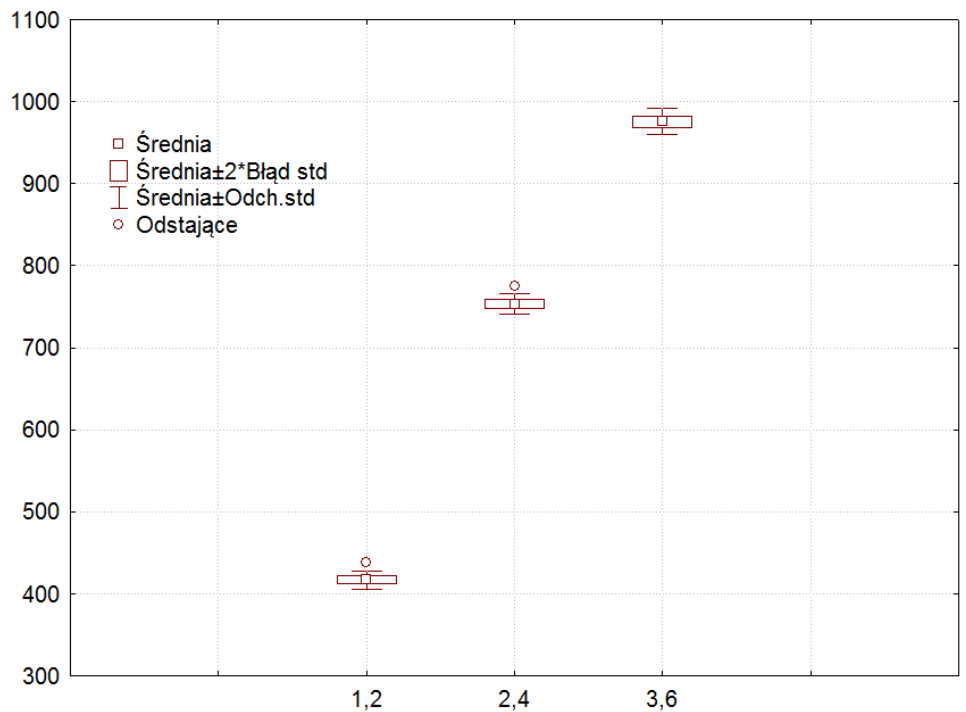


Rys. Z5. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych

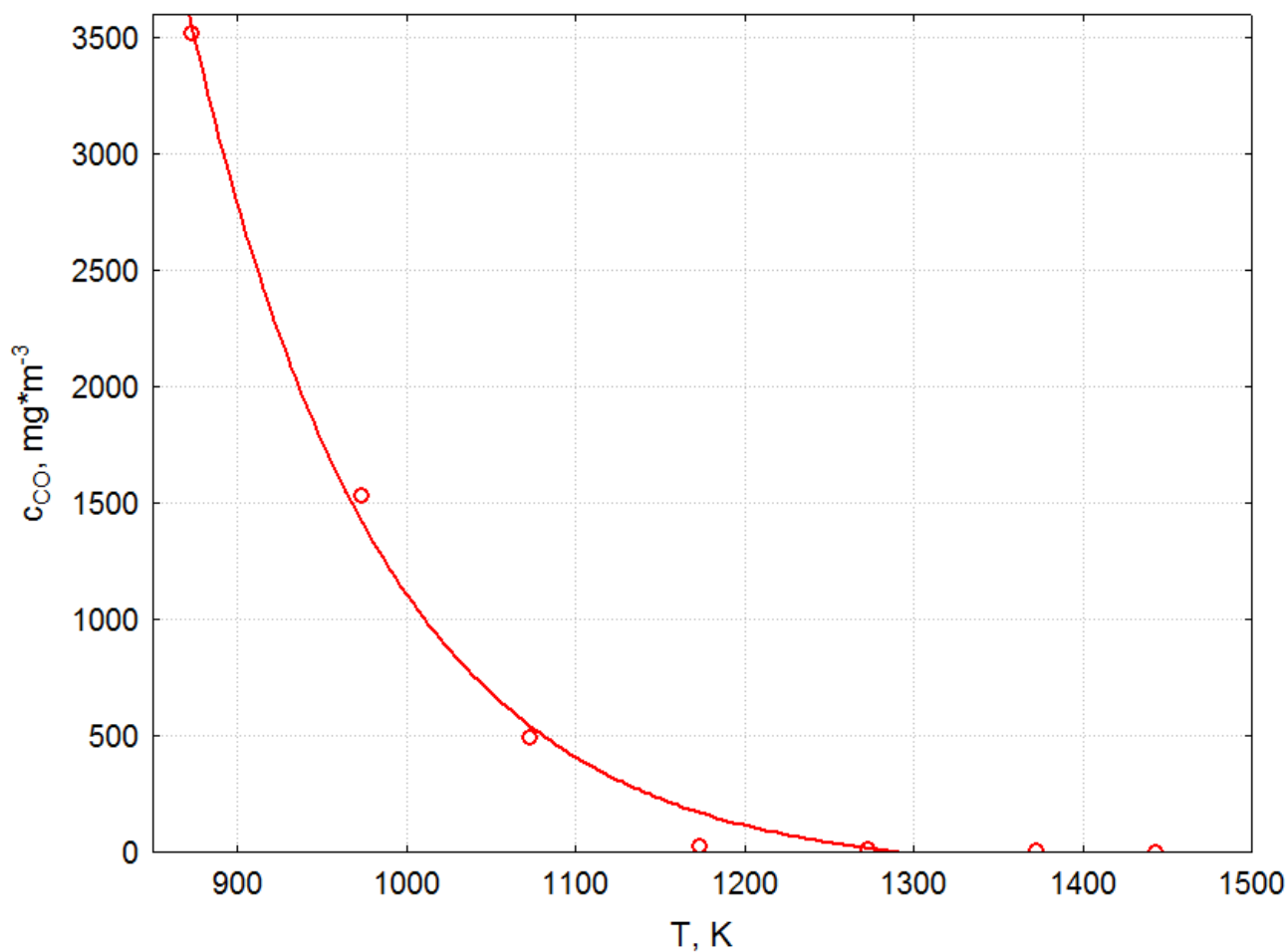
Zestaw wykresów



Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



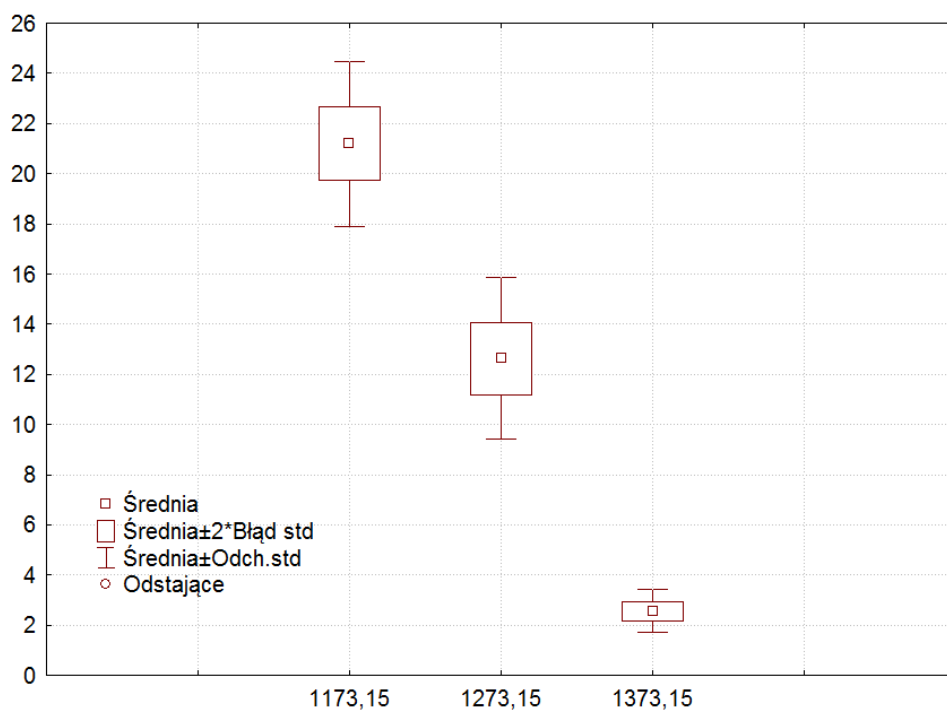
Rys. Z6. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania osadów ściekowych



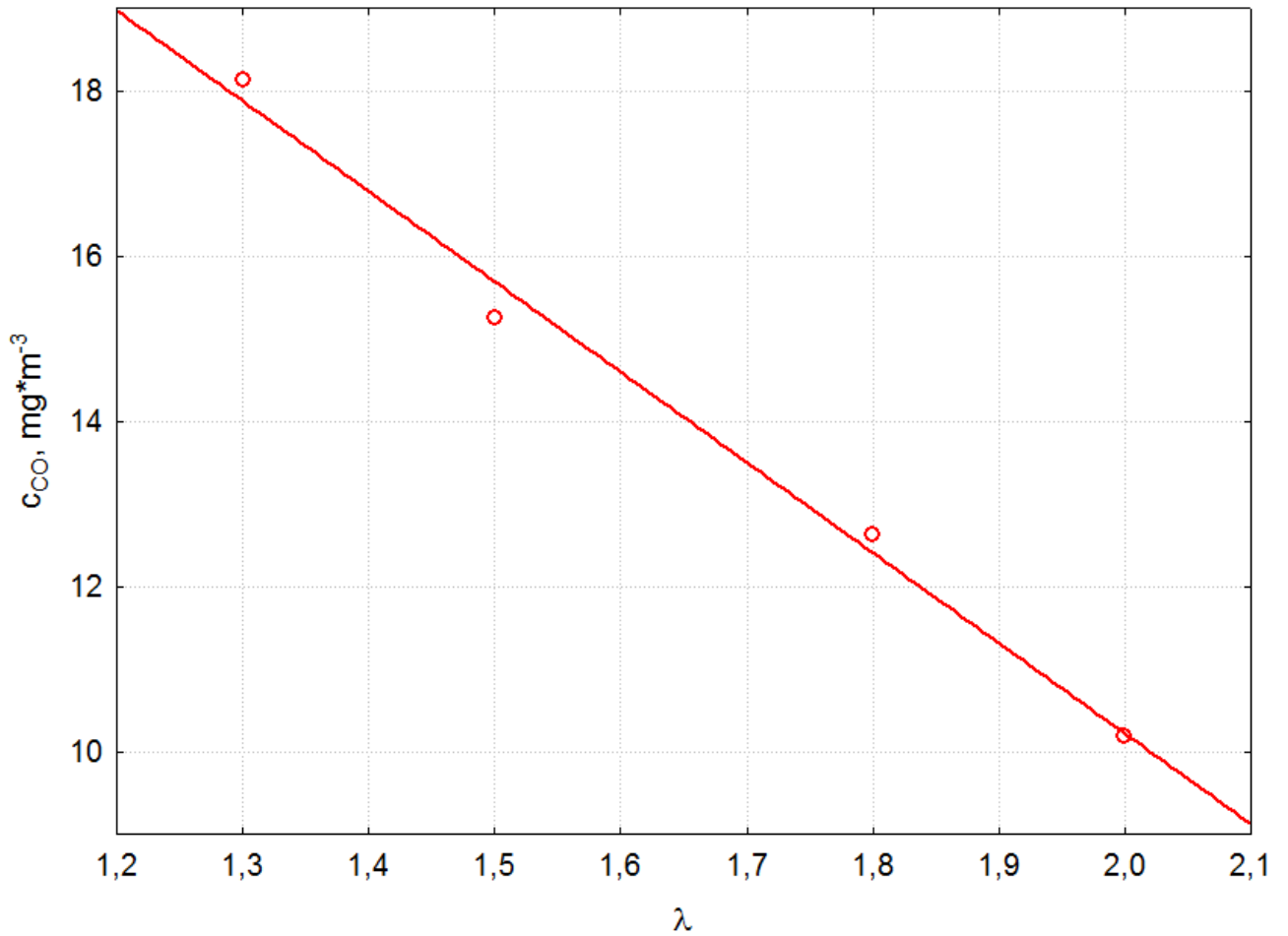
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

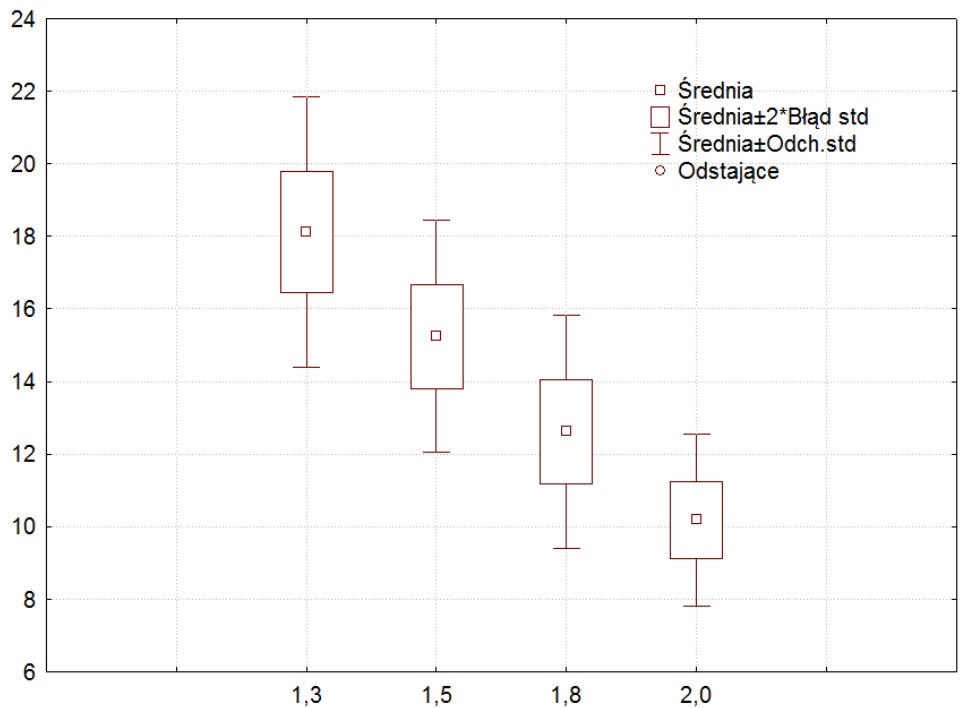
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



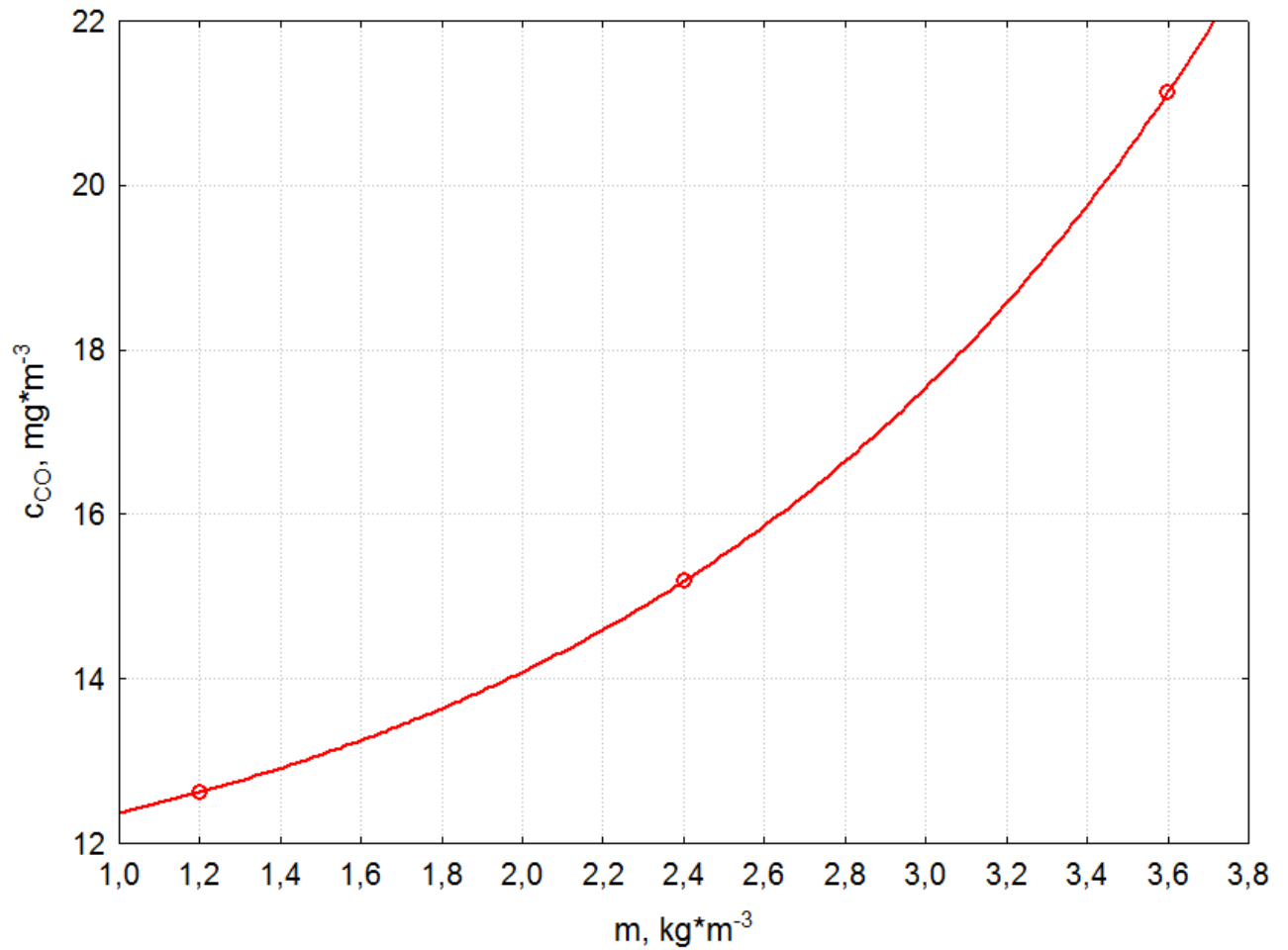
Rys. Z7. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych



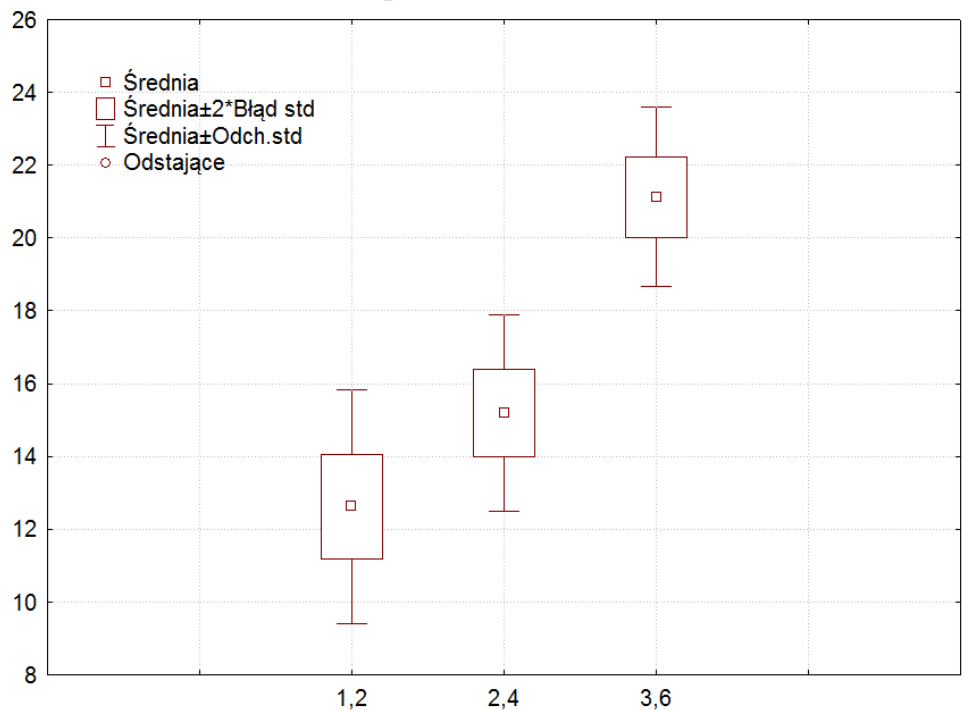
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Rys. Z8. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych

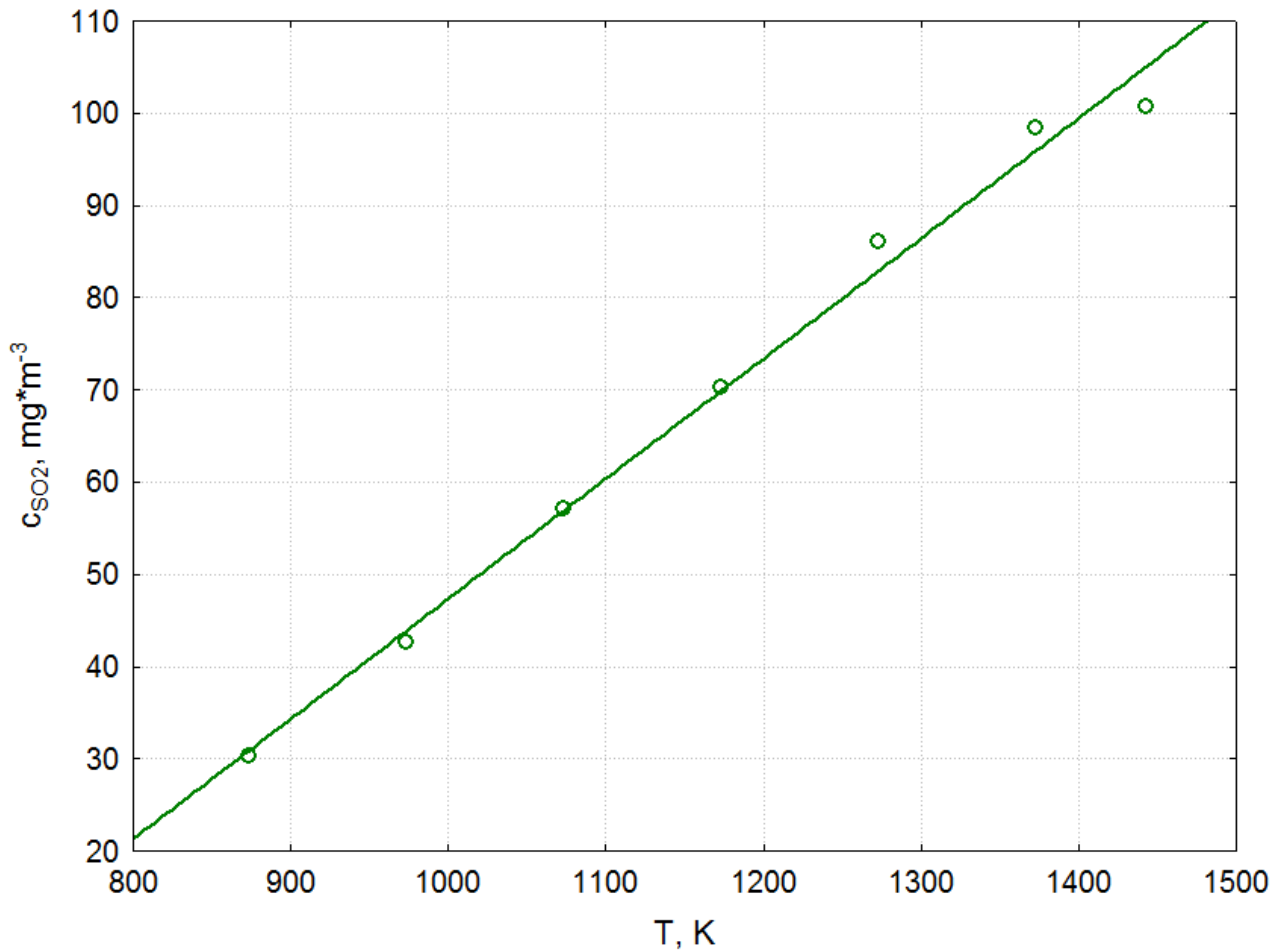


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z9. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania osadów ściekowych

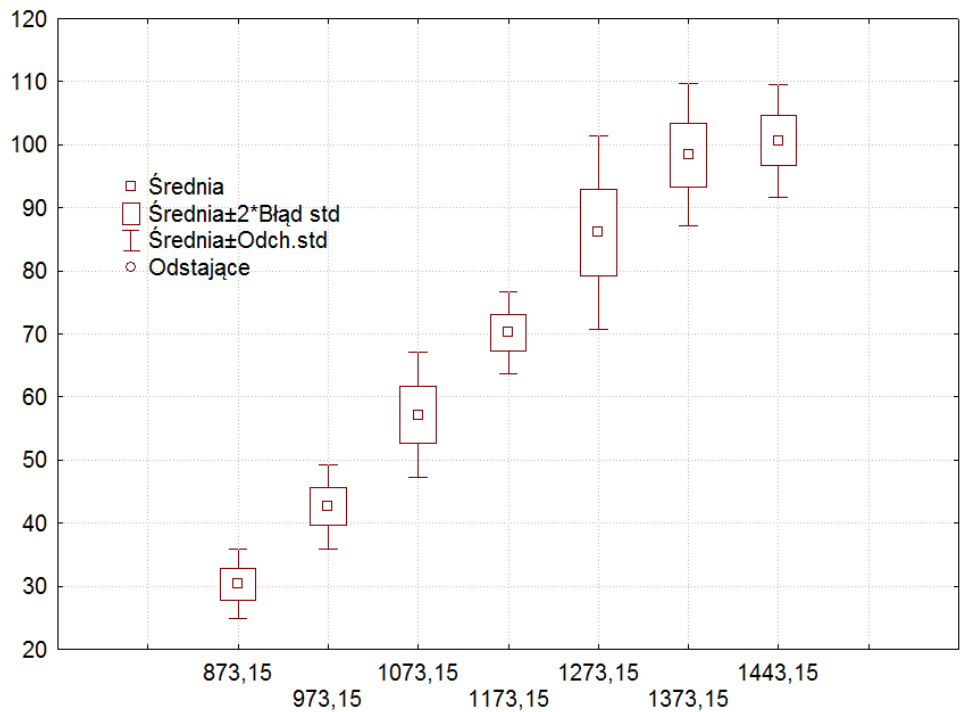
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

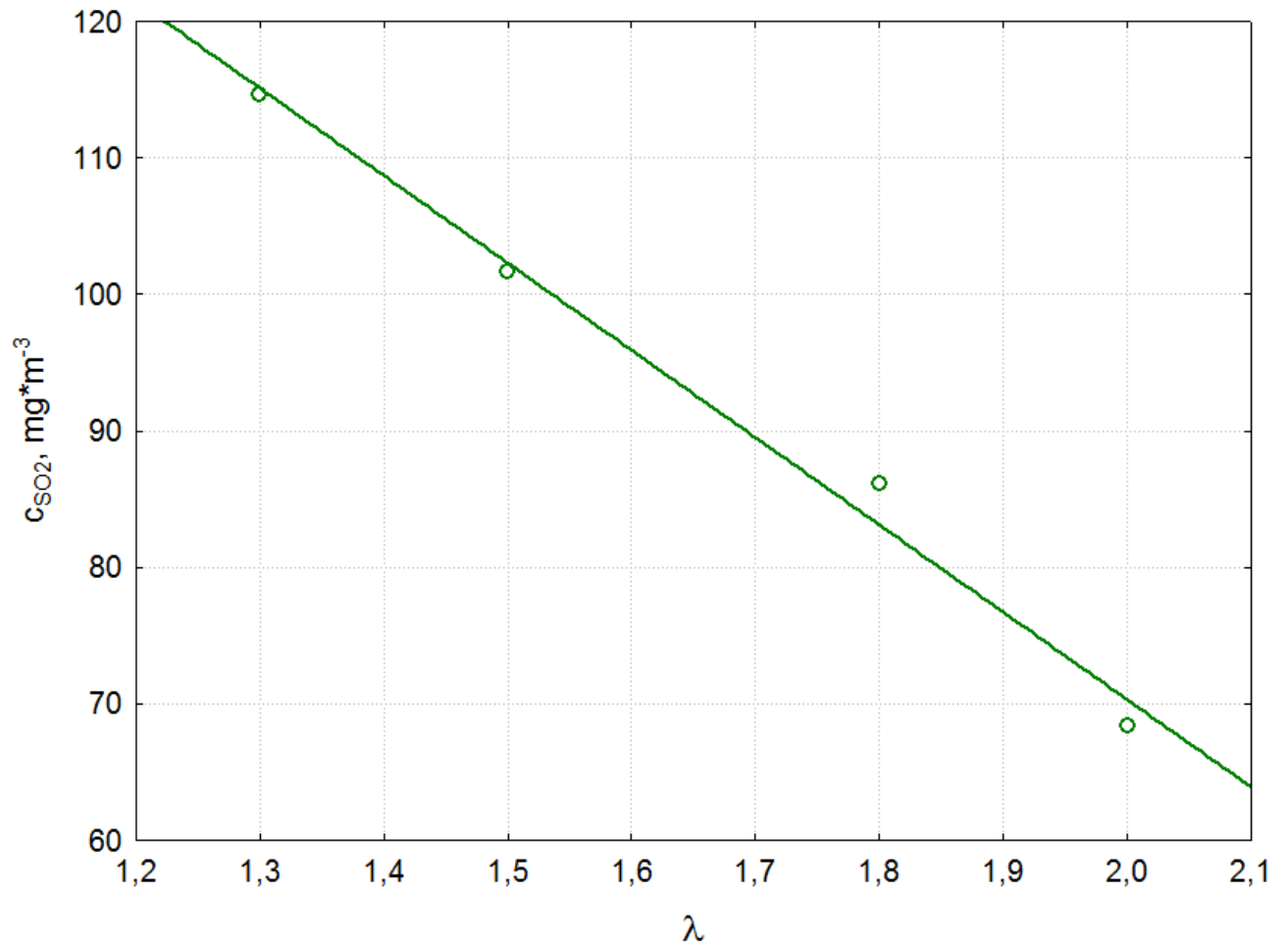
$$\lambda = 1,8$$

$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

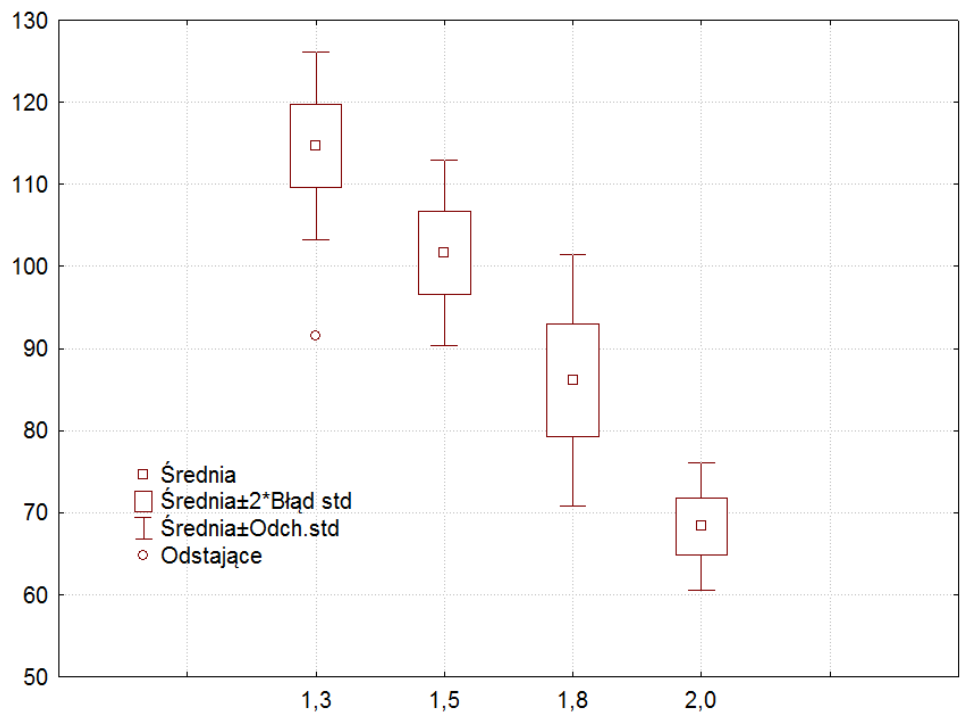


Rys. Z10. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania mięła węglowego

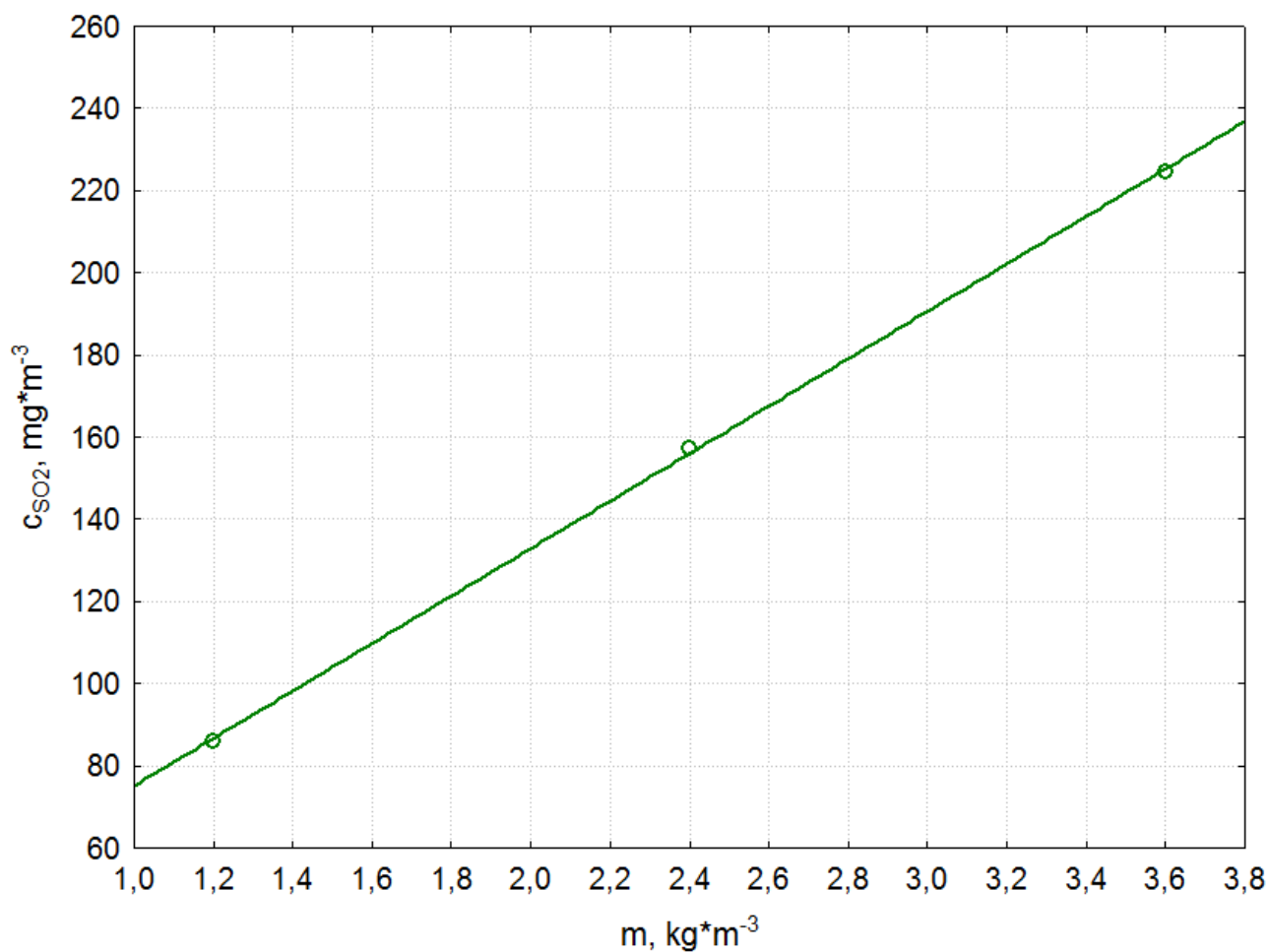
Zestaw wykresów



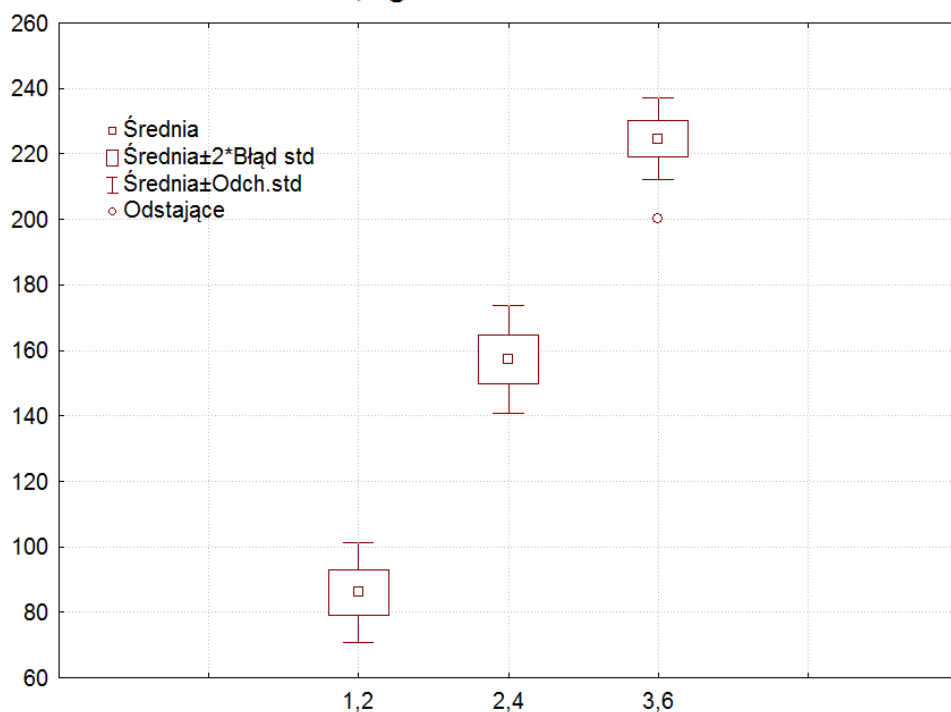
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Rys. Z11. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania mialu węglowego

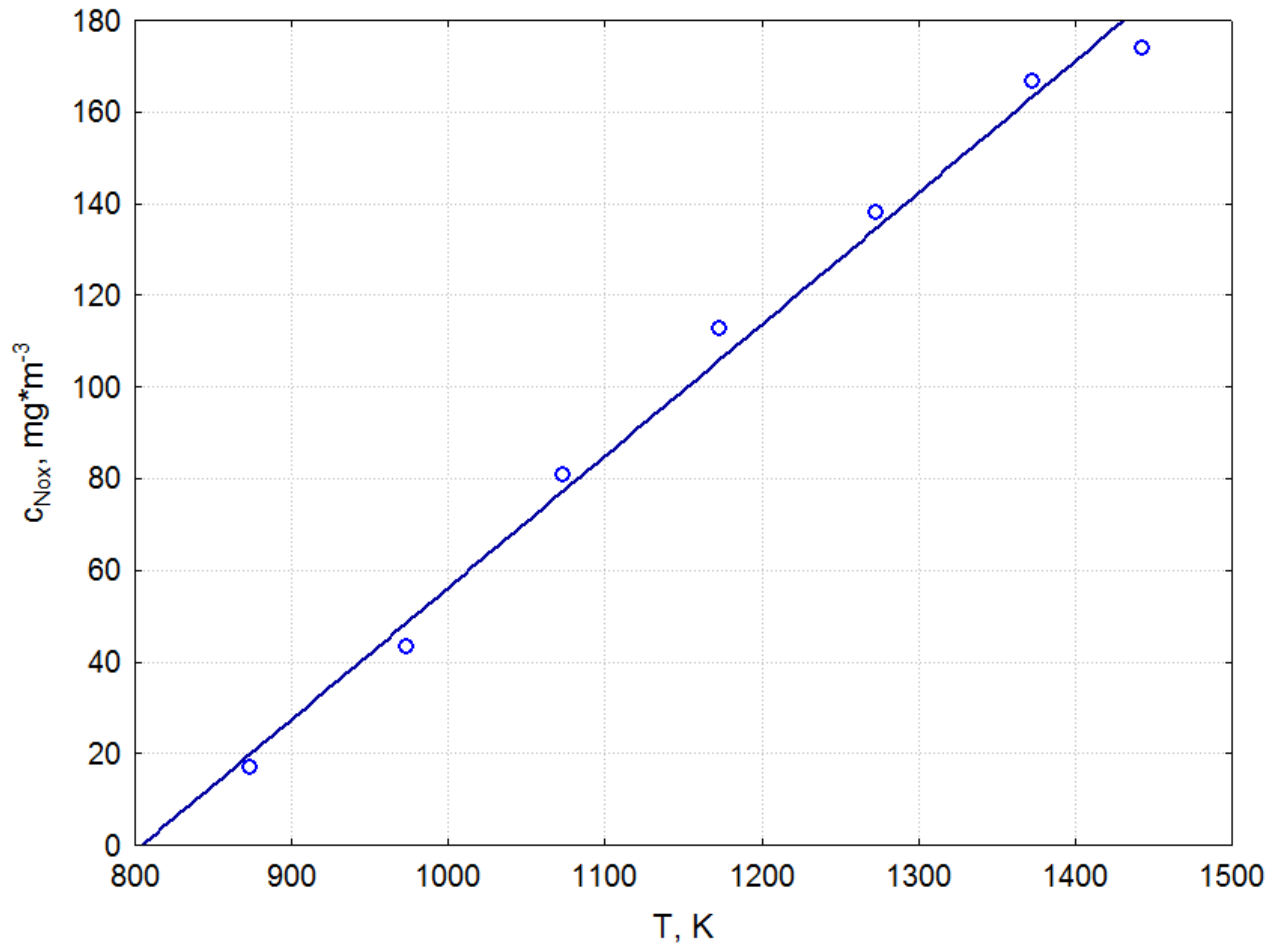


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$

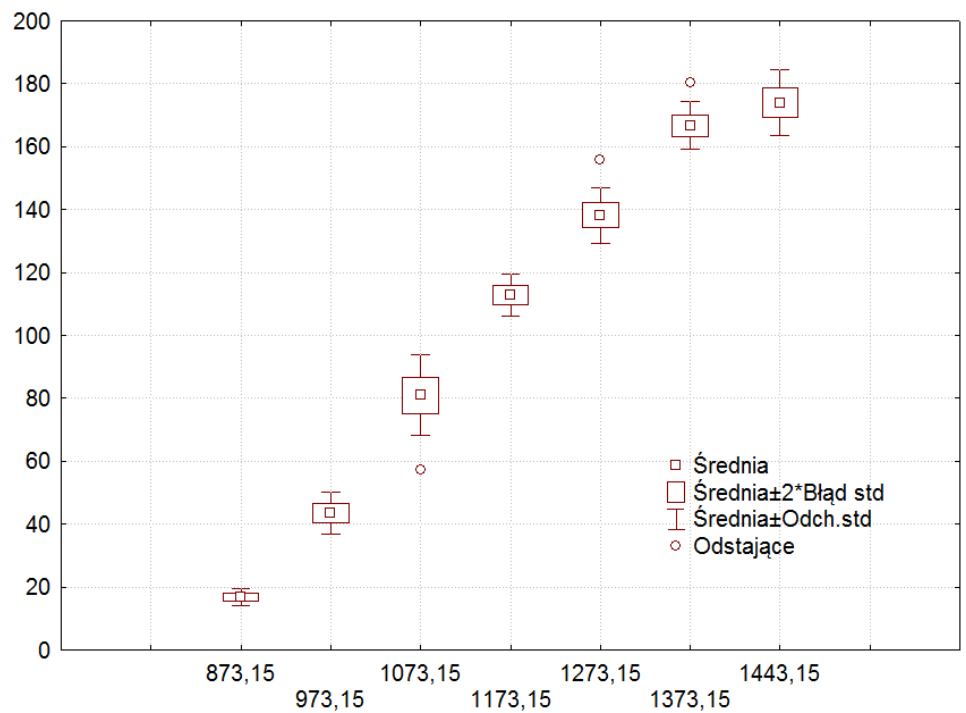


Rys. Z12. Wpływ zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania miazgu węglowego

Zestaw wykresów

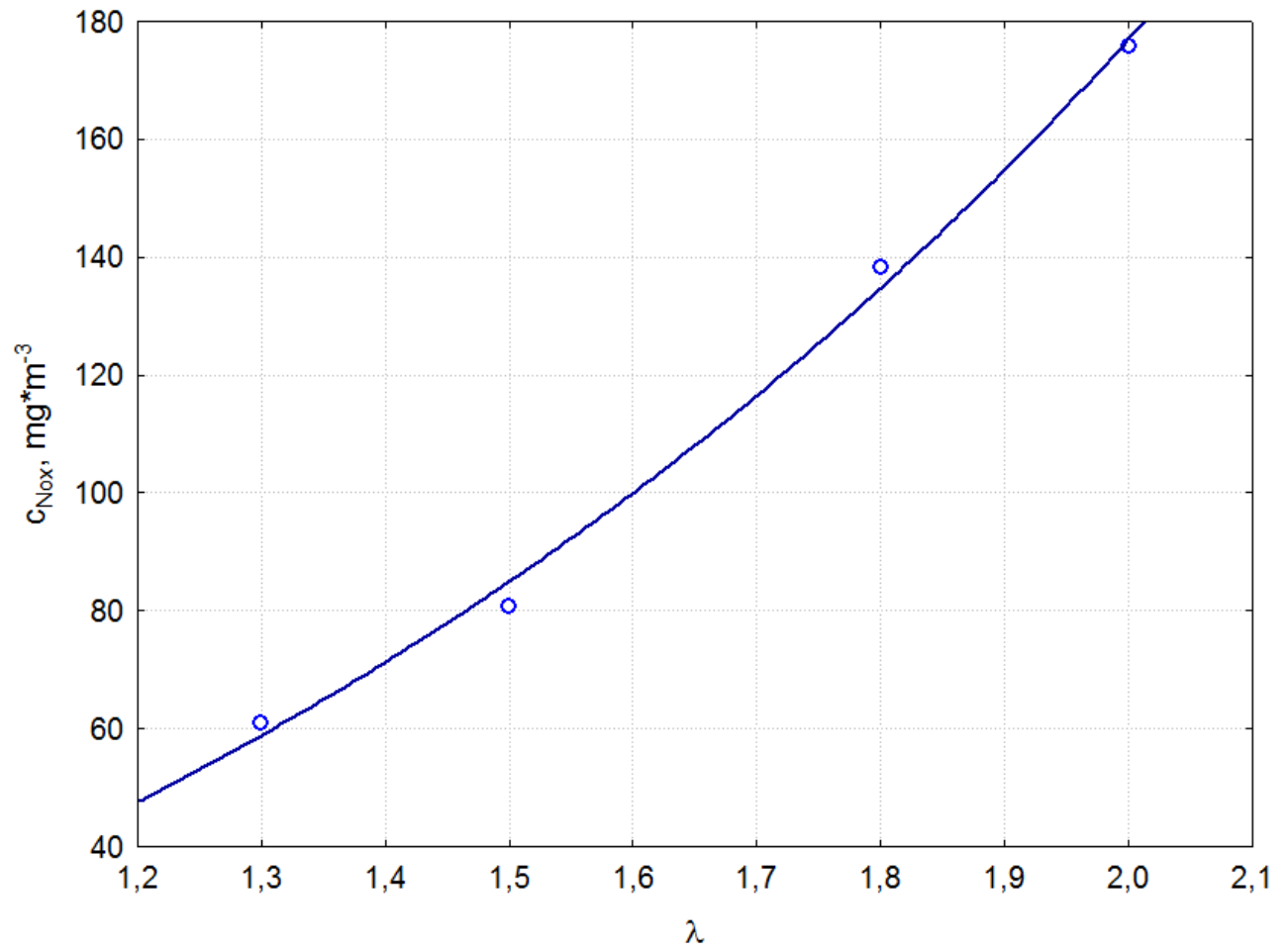


Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

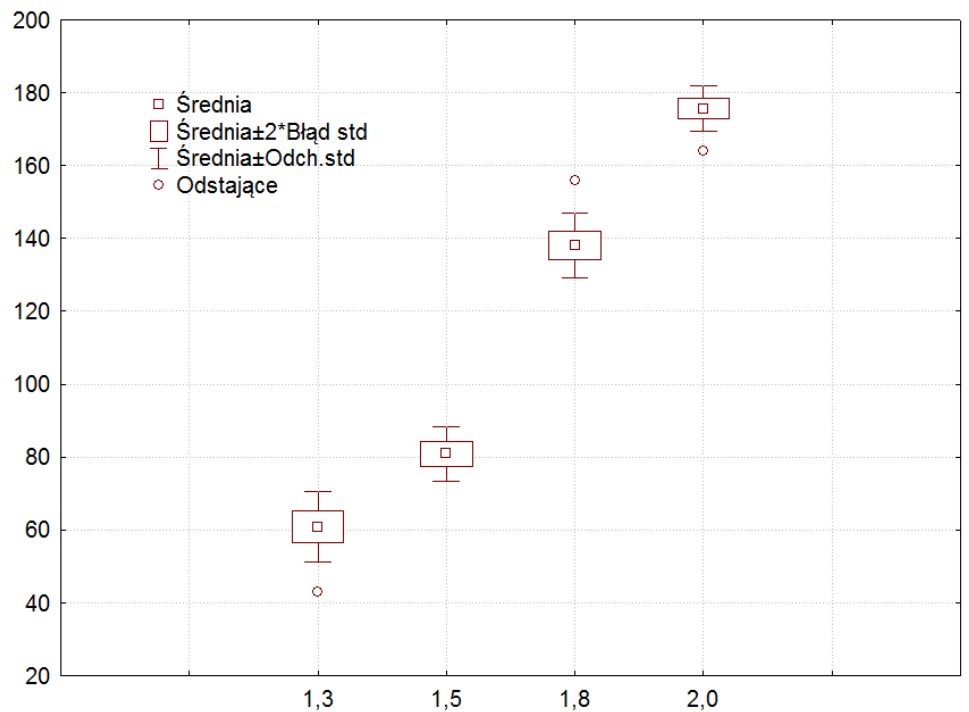


Rys. Z13. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazgi węglowej

Zestaw wykresów

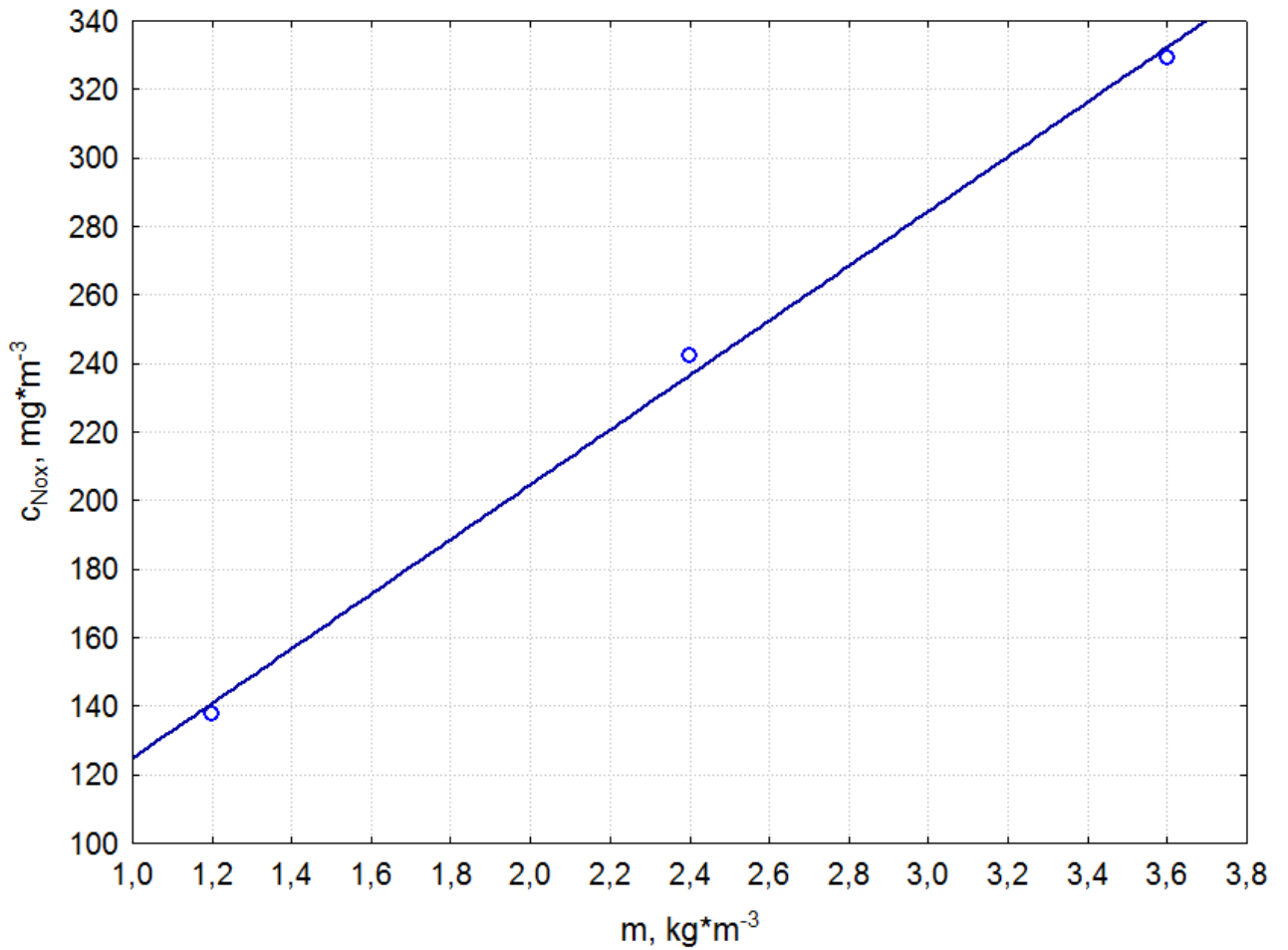


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

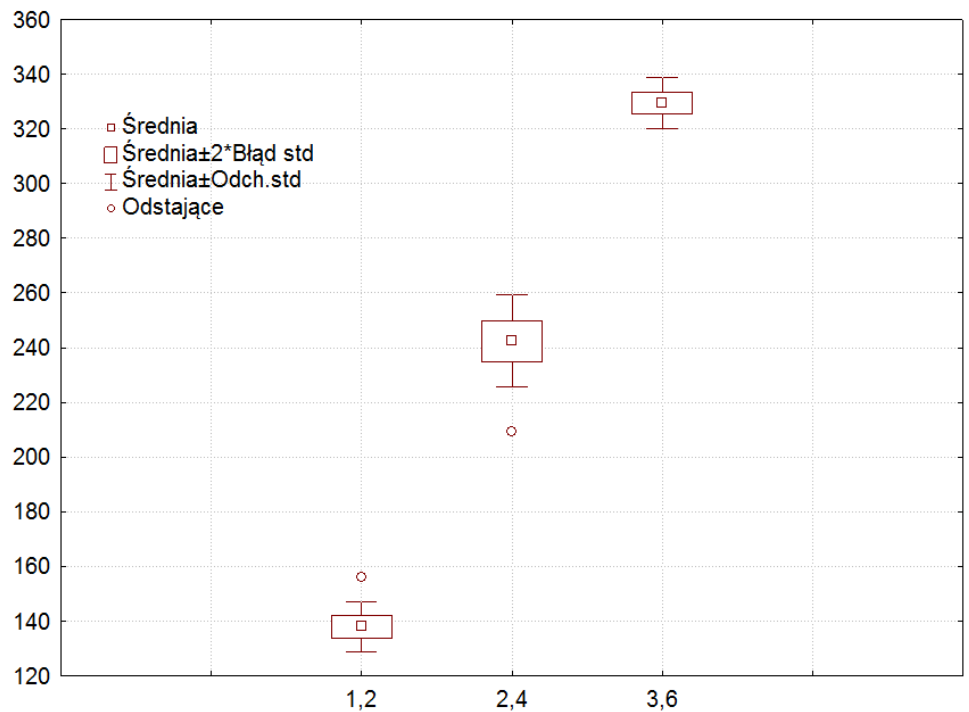


Rys. Z14. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania mialu węglowego

Zestaw wykresów

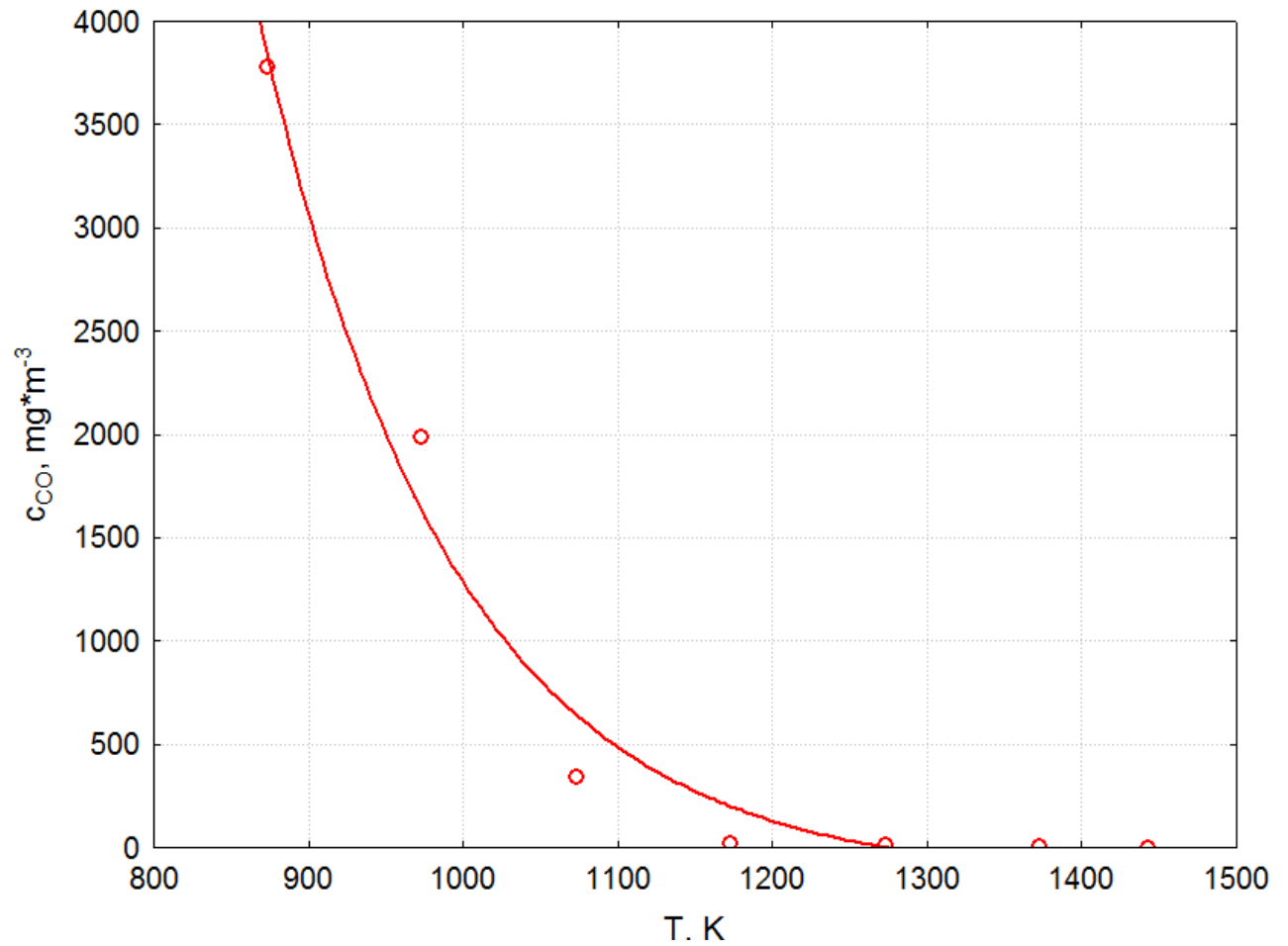


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

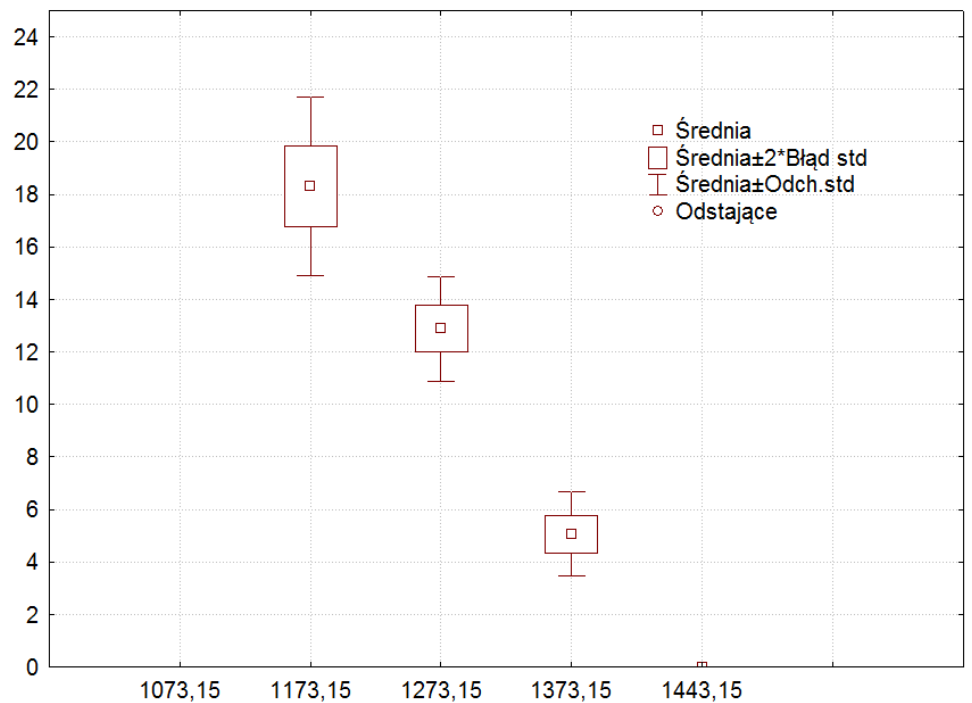


Rys. Z15. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania miazgi węglowej

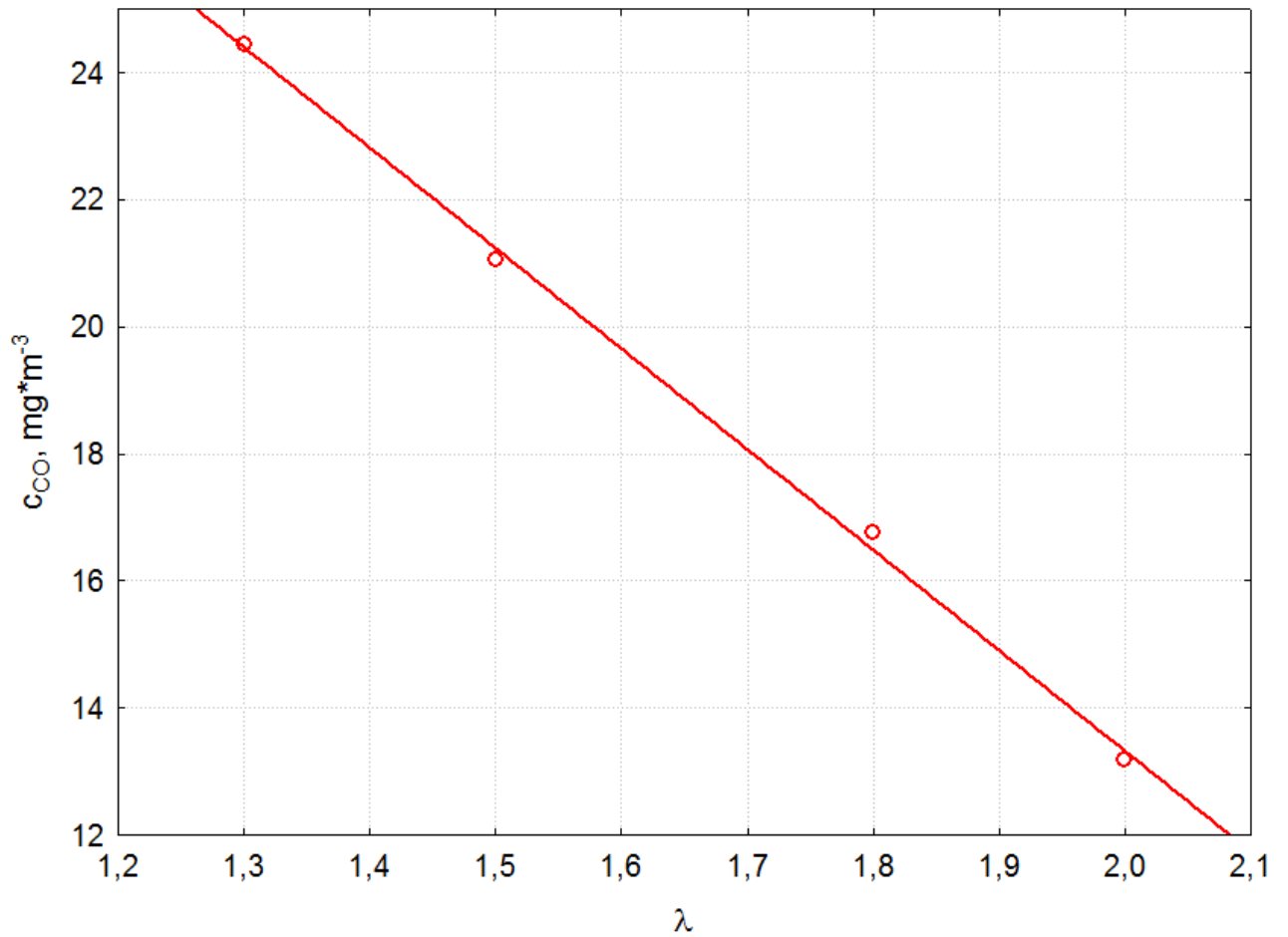
Zestaw wykresów



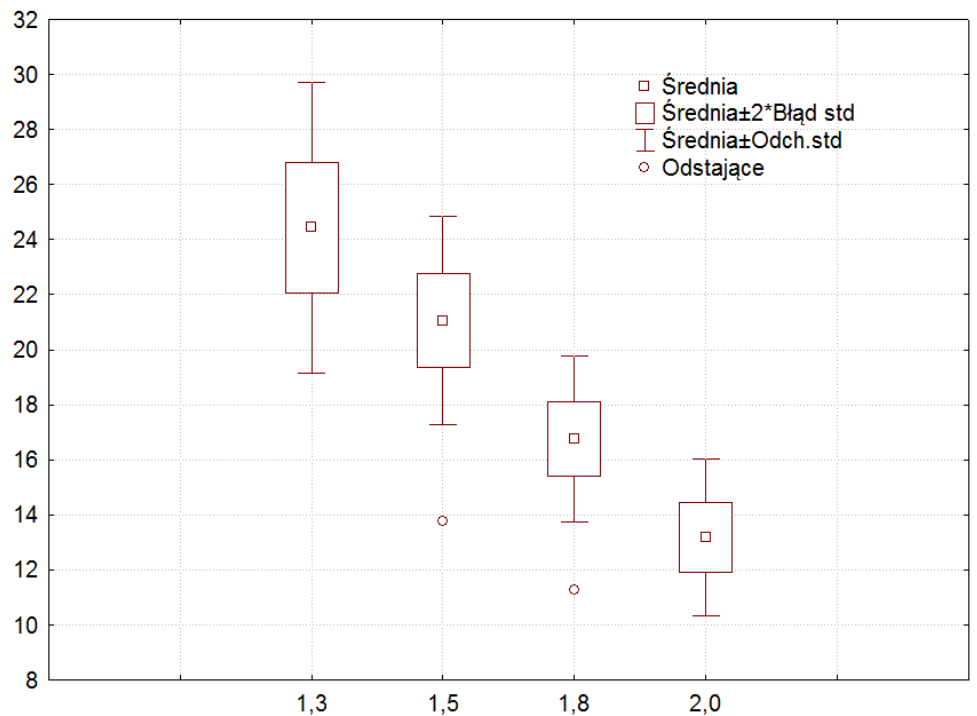
Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



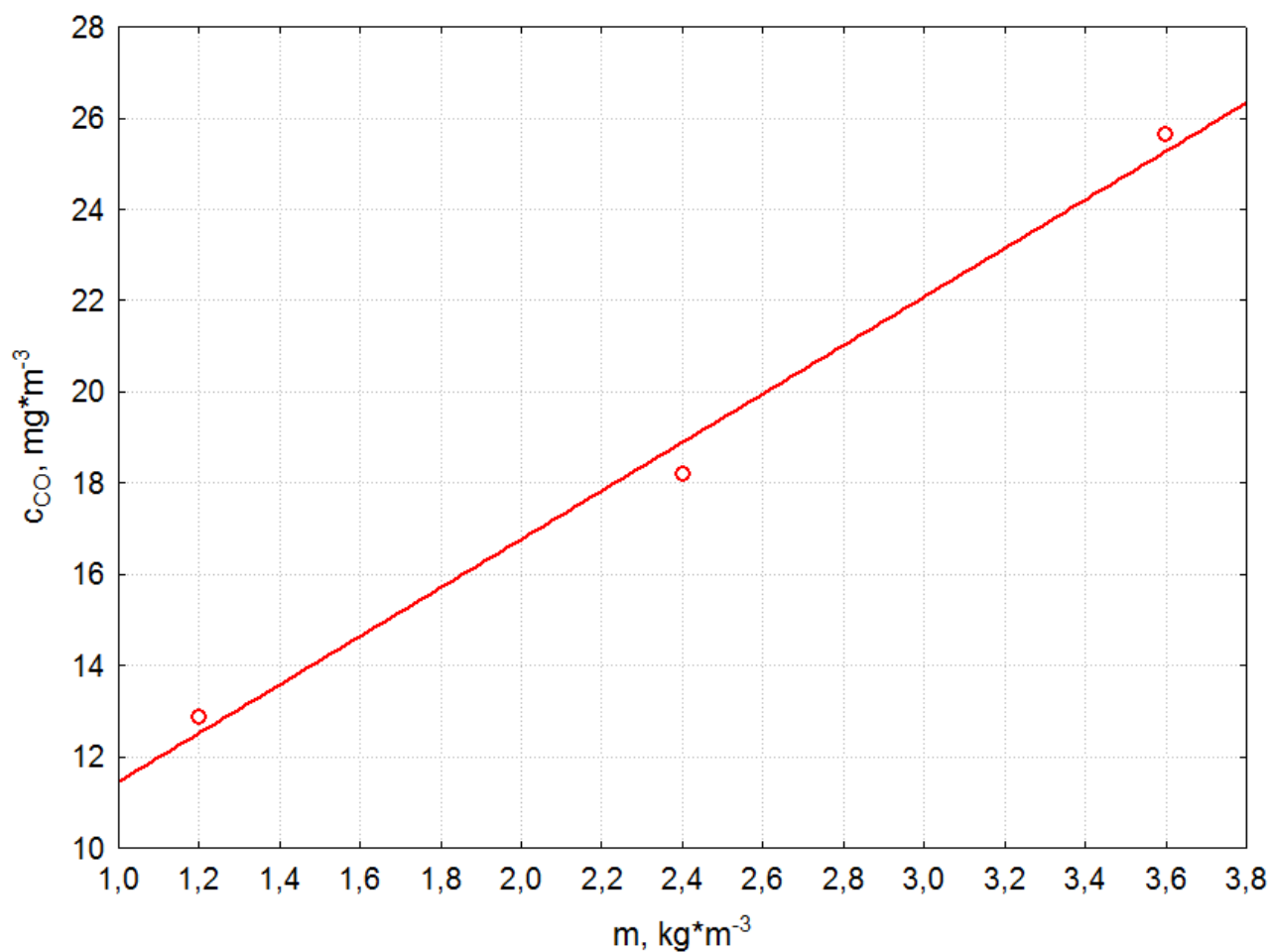
Rys. Z16. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miazgu węglowego



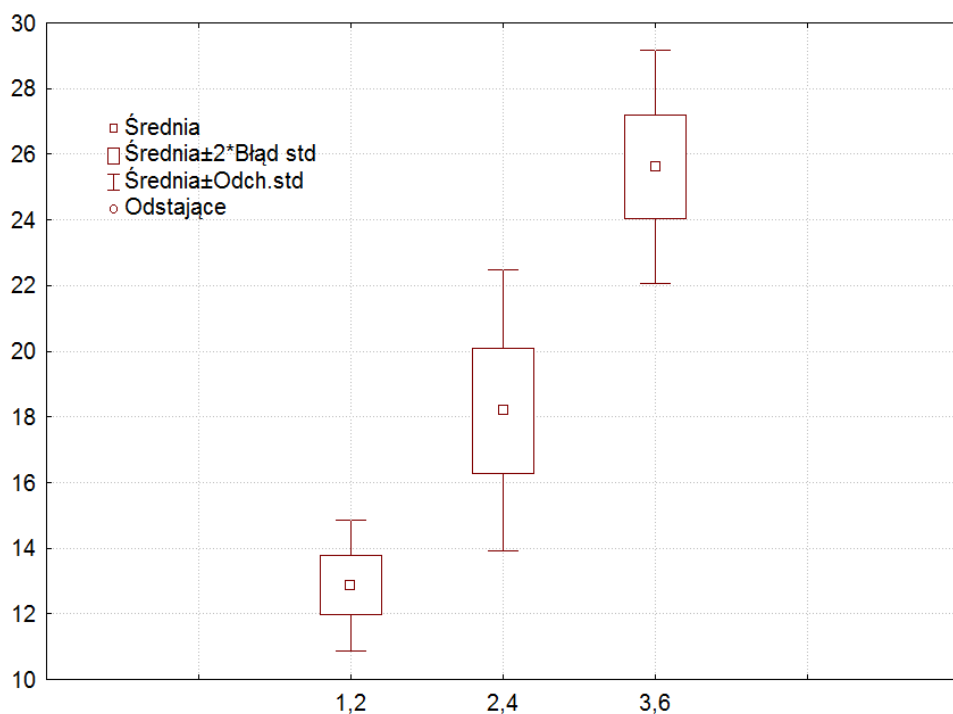
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Rys. Z17. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania mialu węglowego

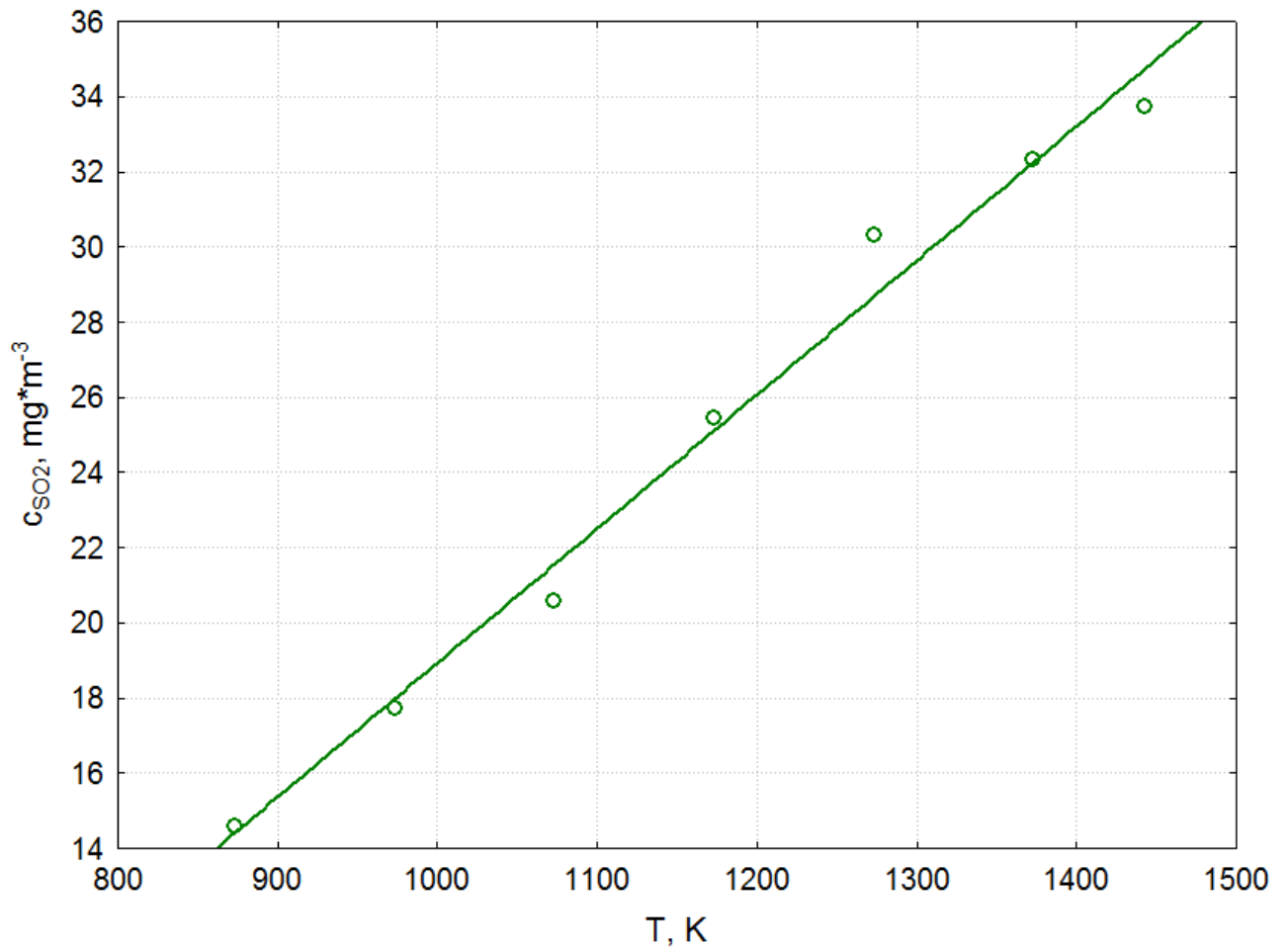


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z18. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania miálu węglowego

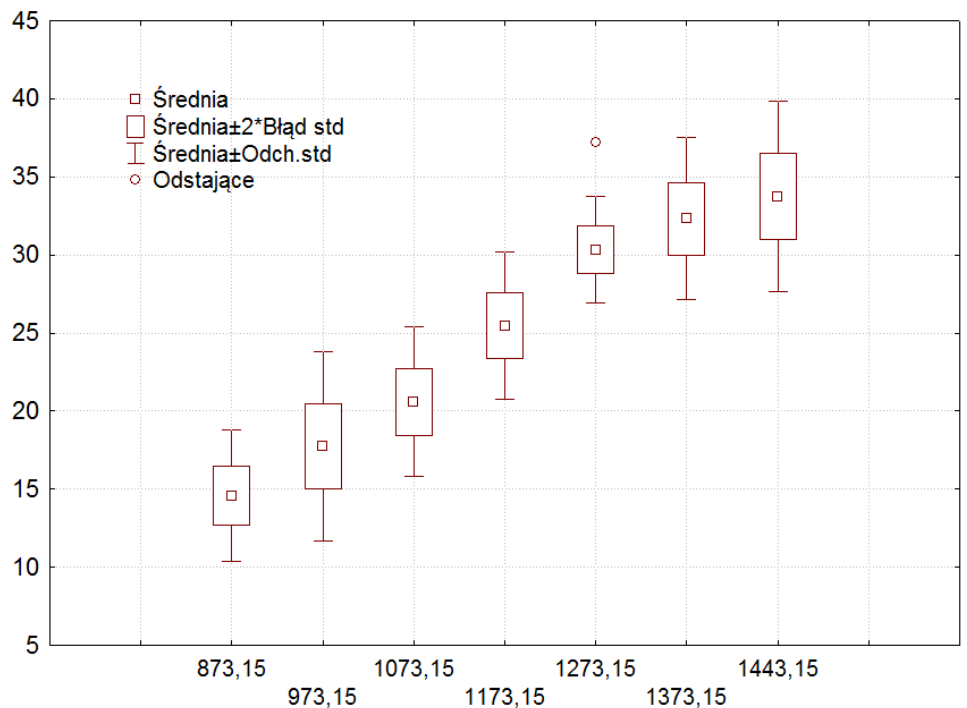
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

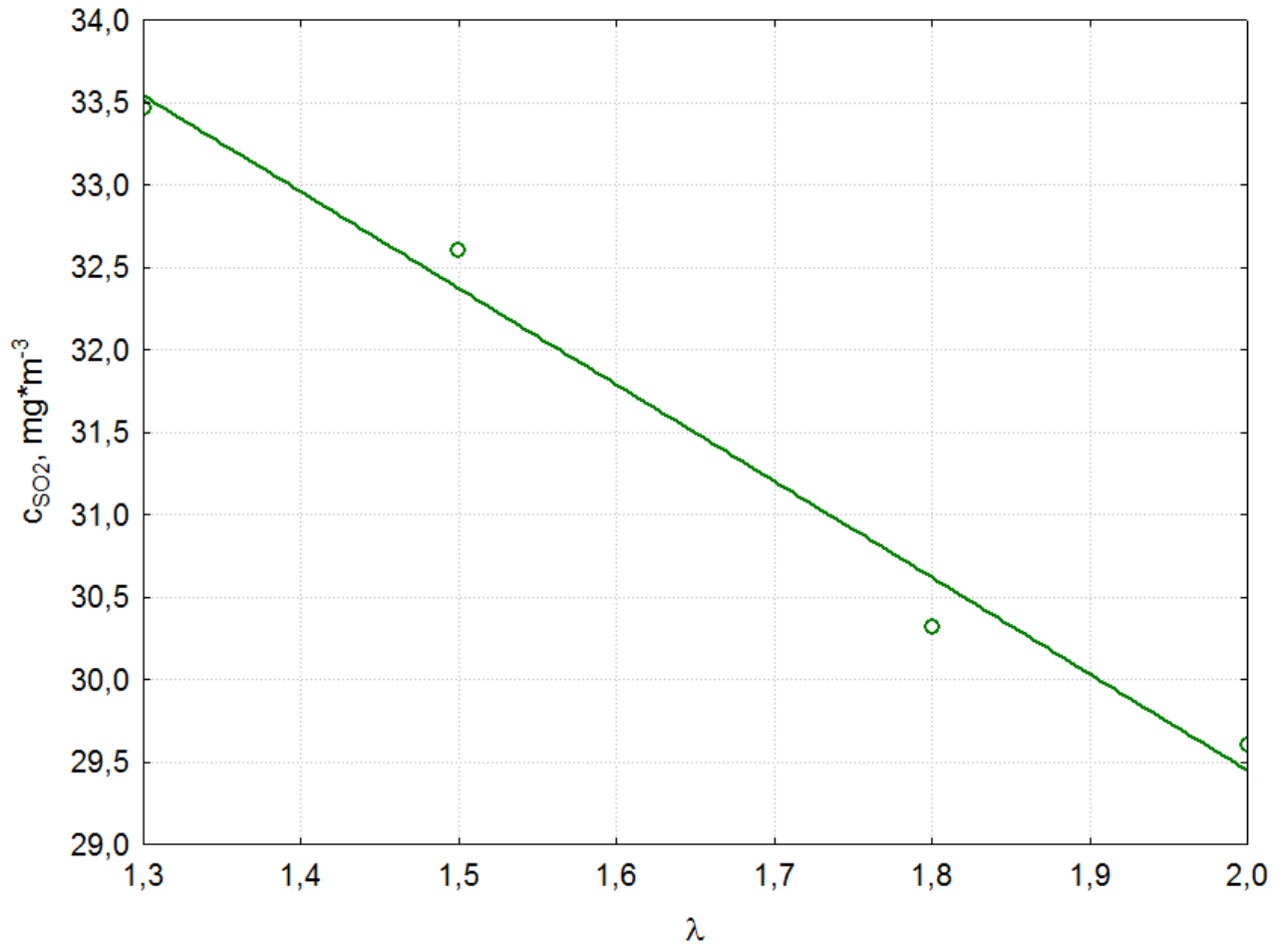
$$\lambda = 1,8$$

$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

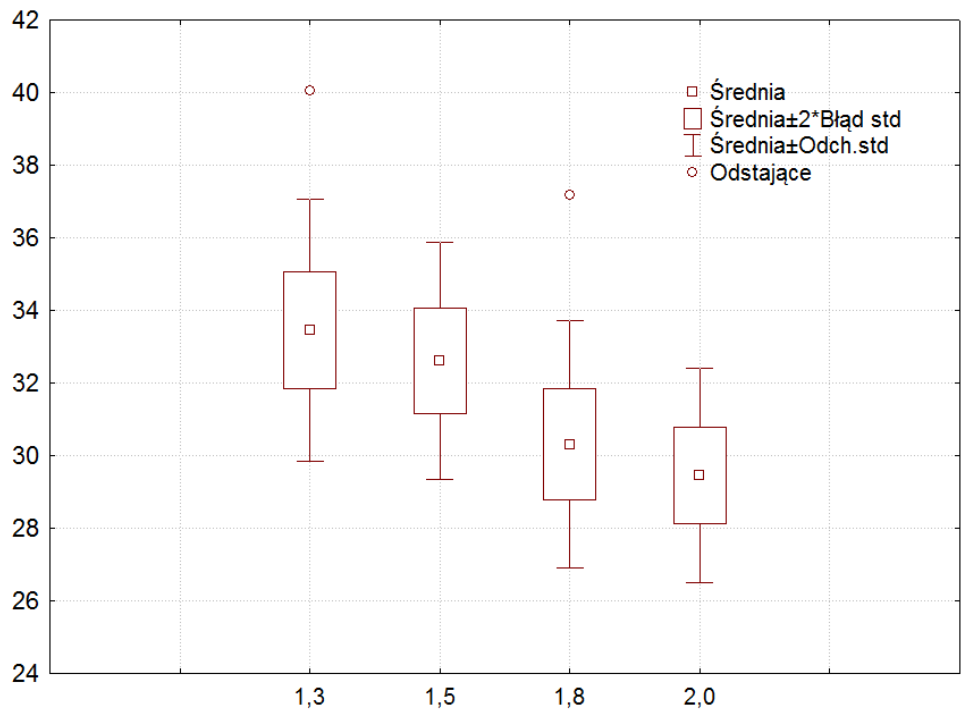


Rys. Z19. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Zestaw wykresów

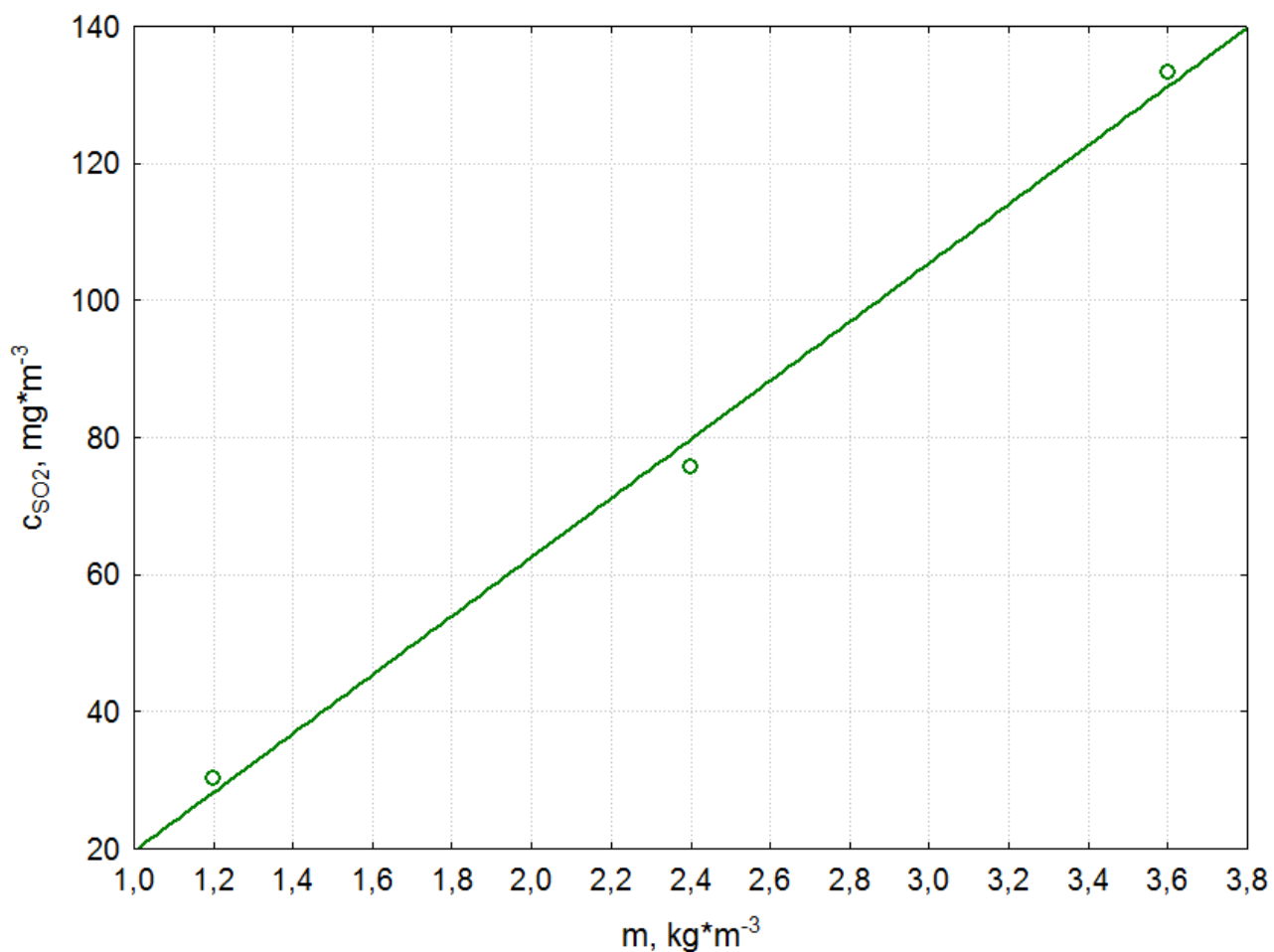


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$

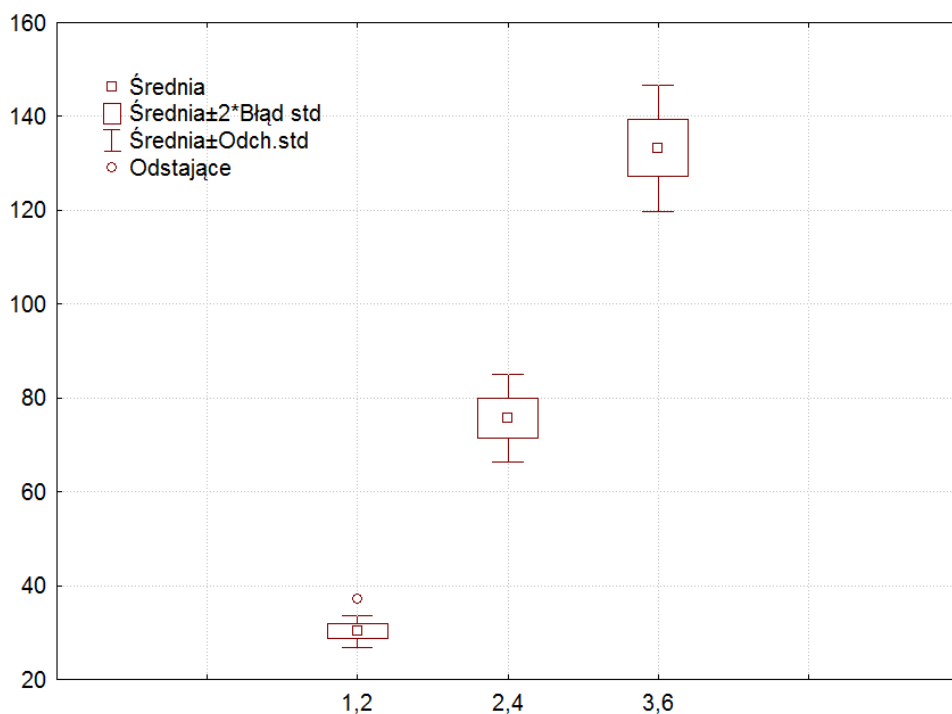


Rys. Z20. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Zestaw wykresów

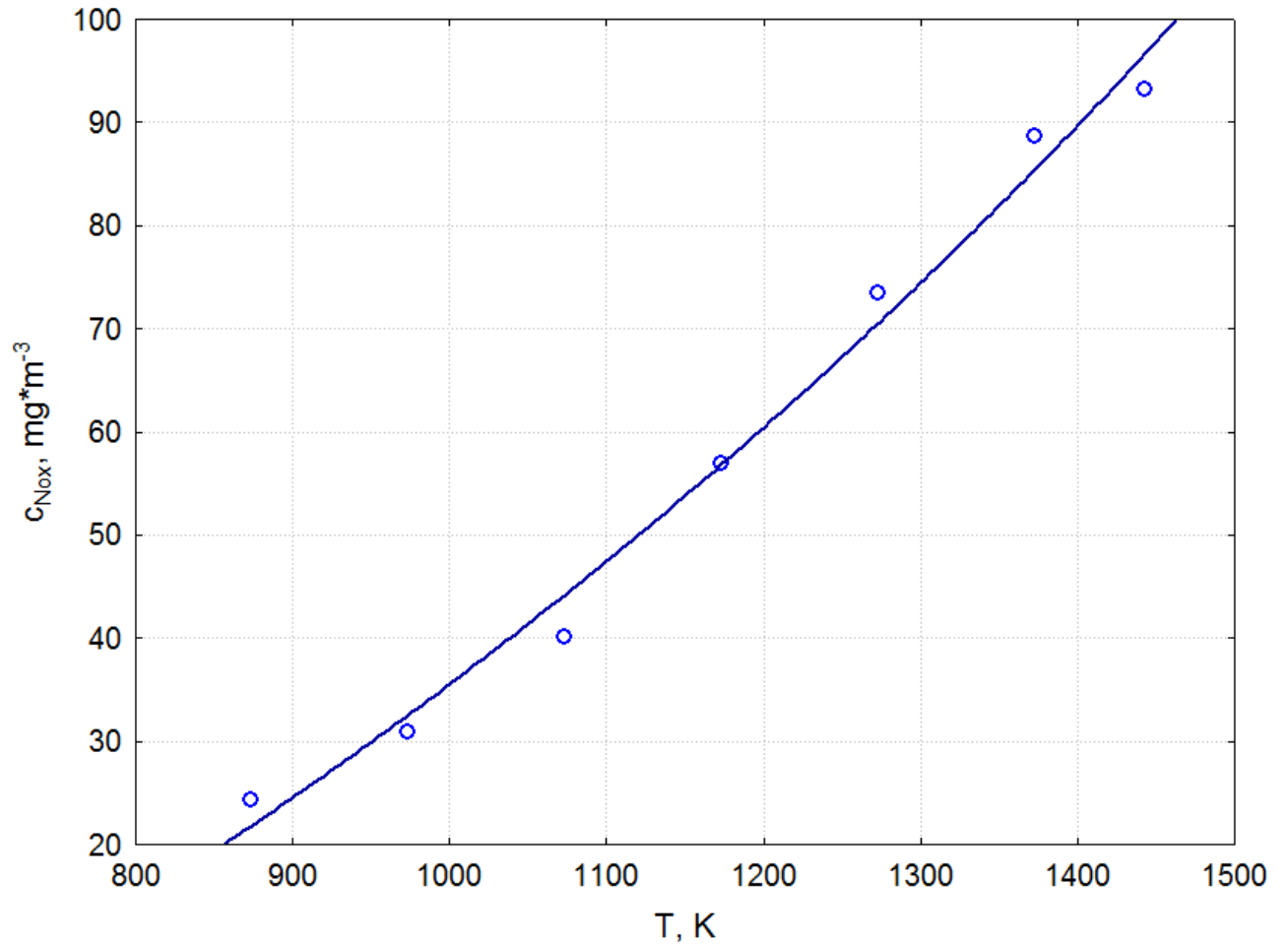


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z21. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów farbiarskich

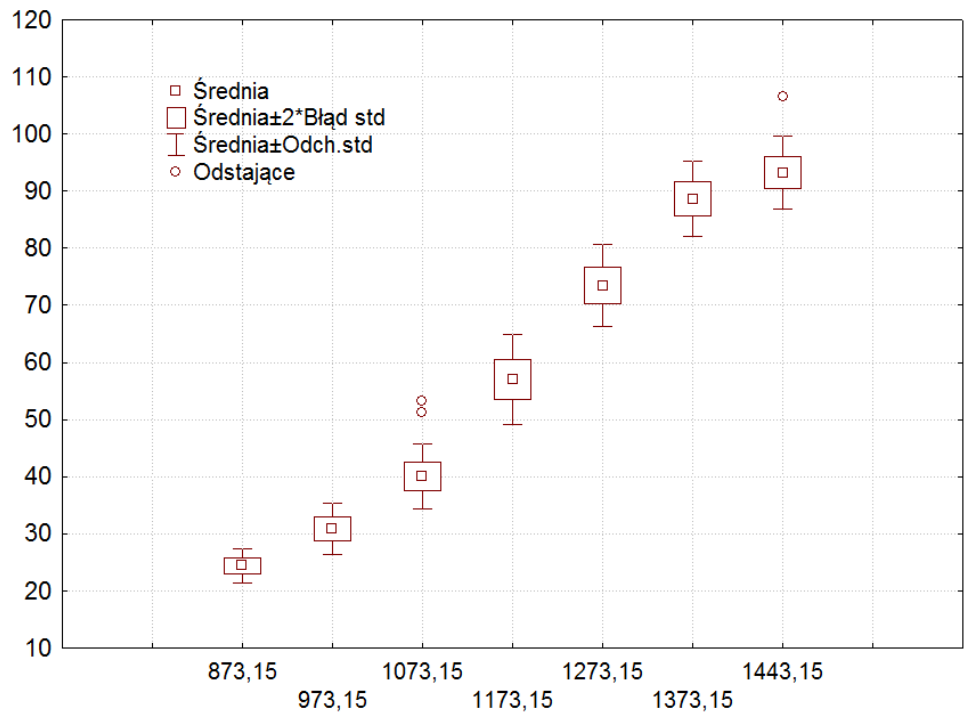
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

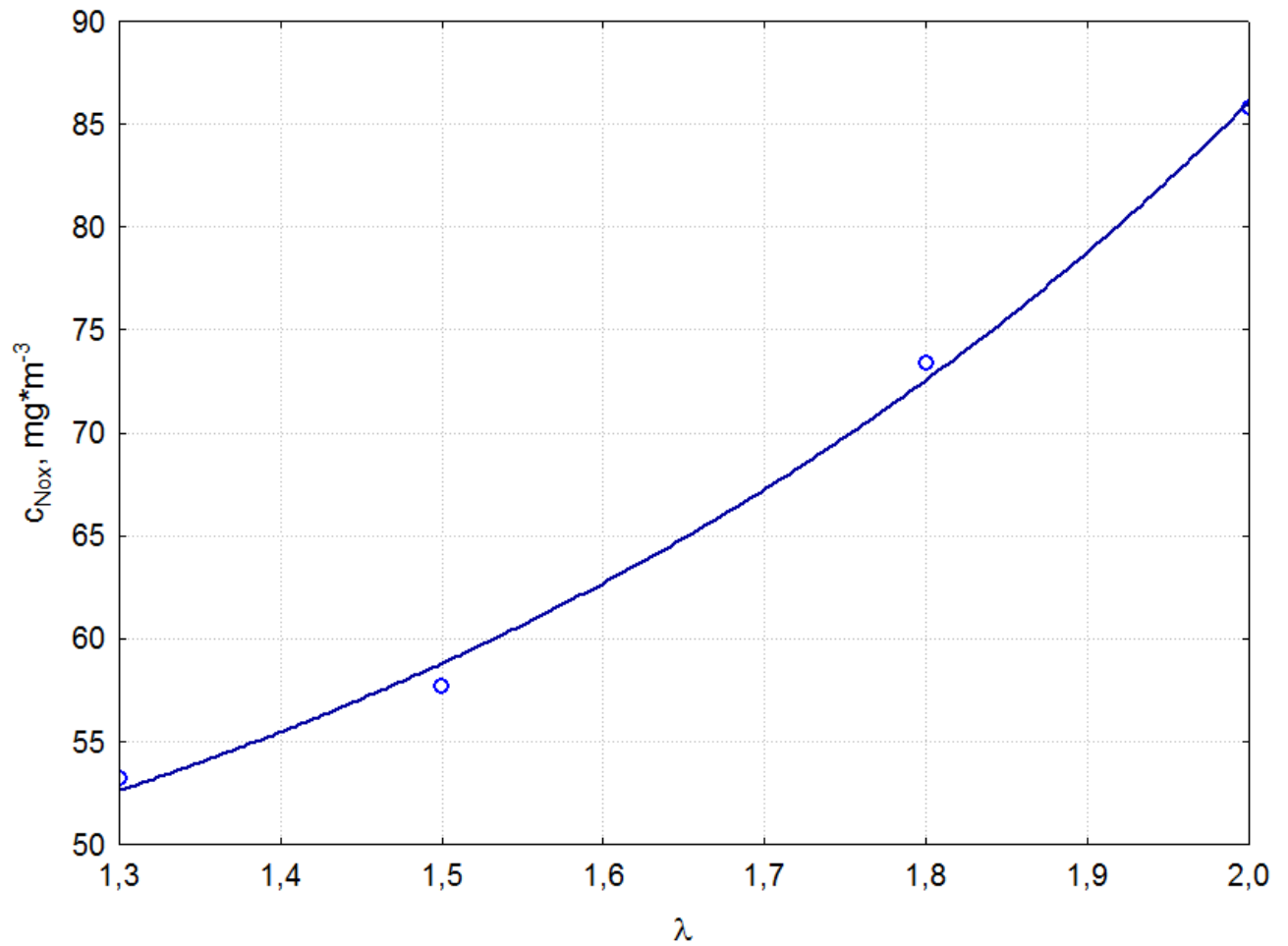
$$\lambda = 1,8$$

$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

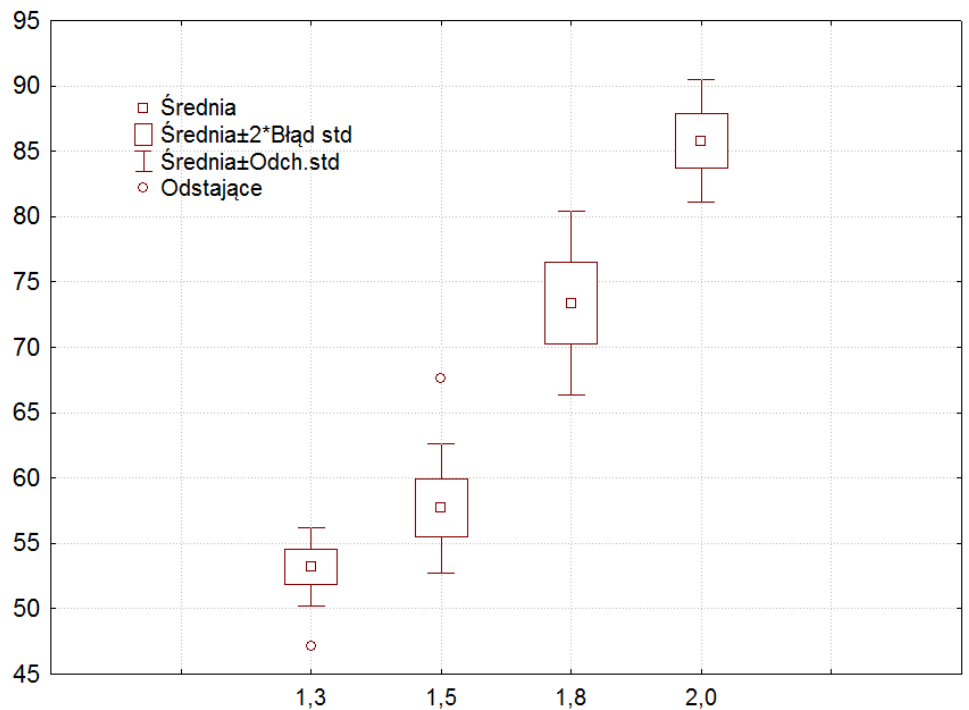


Rys. Z22. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich

Zestaw wykresów

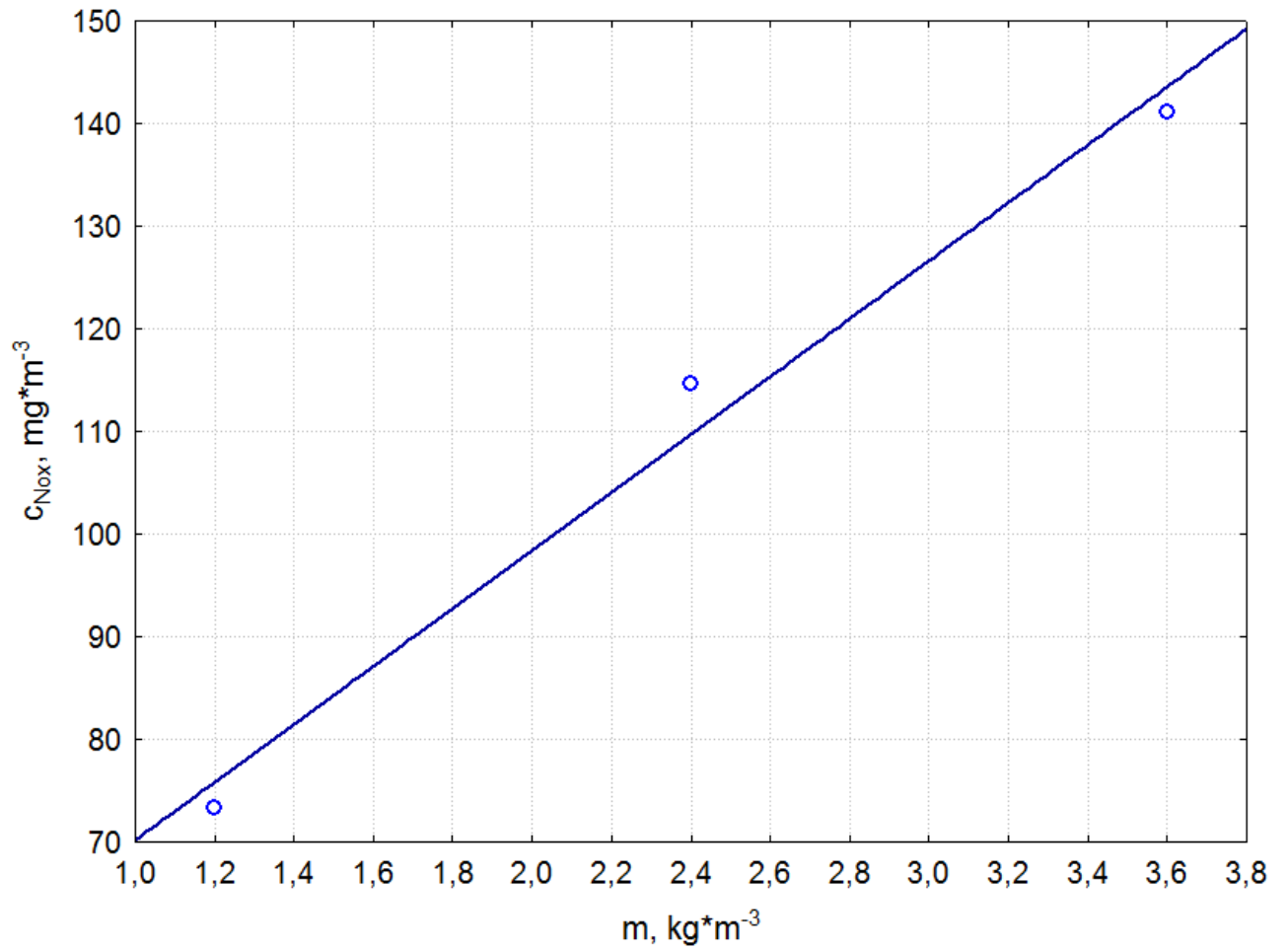


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

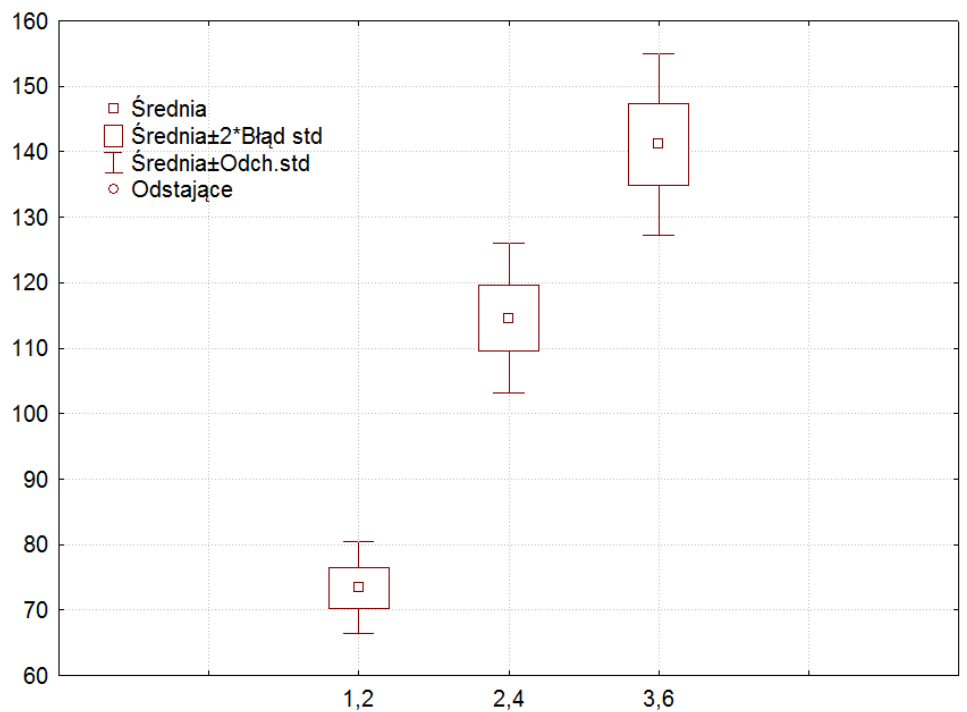


Rys. Z23. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich

Zestaw wykresów

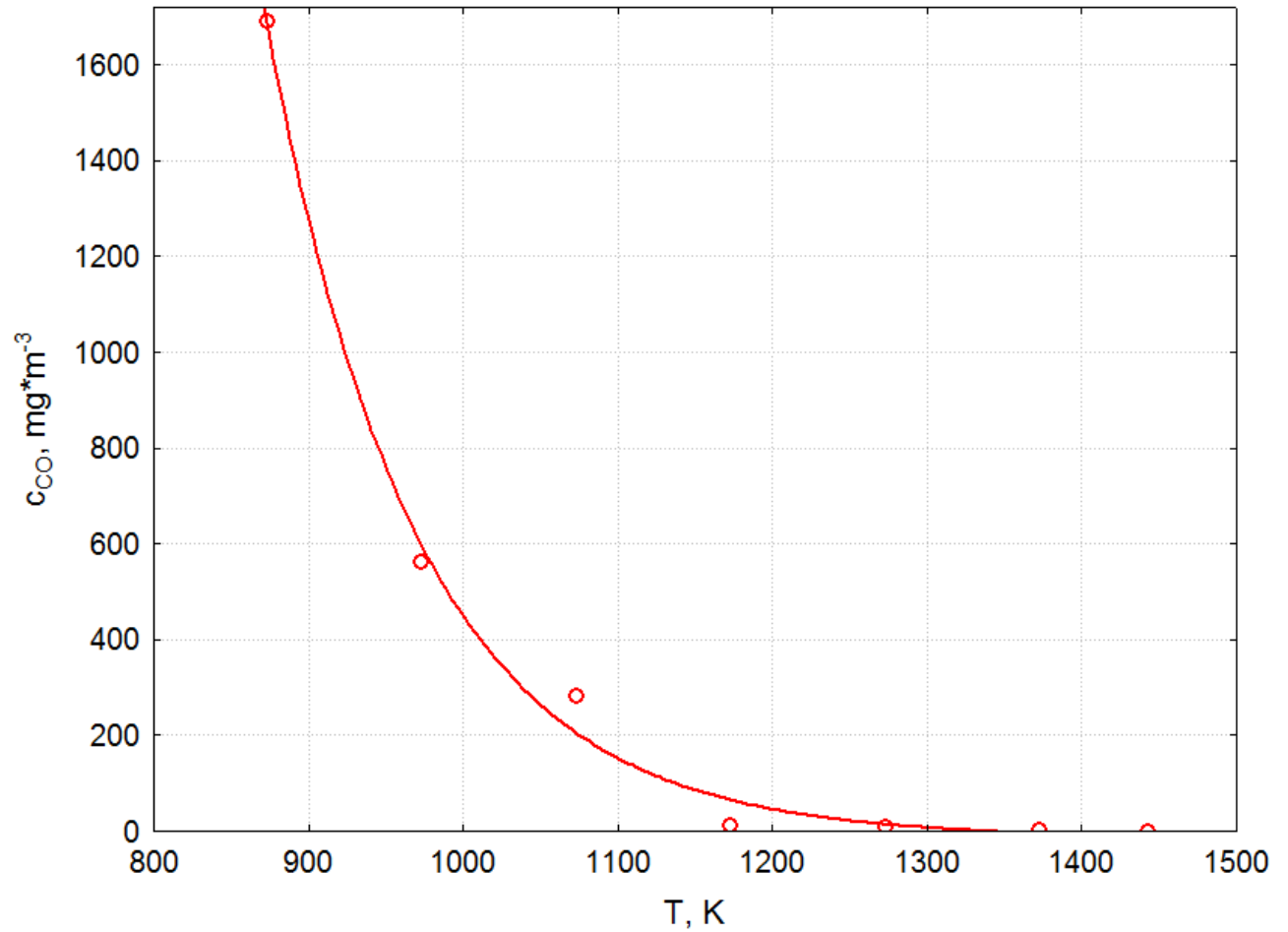


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z24. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów farbiarskich

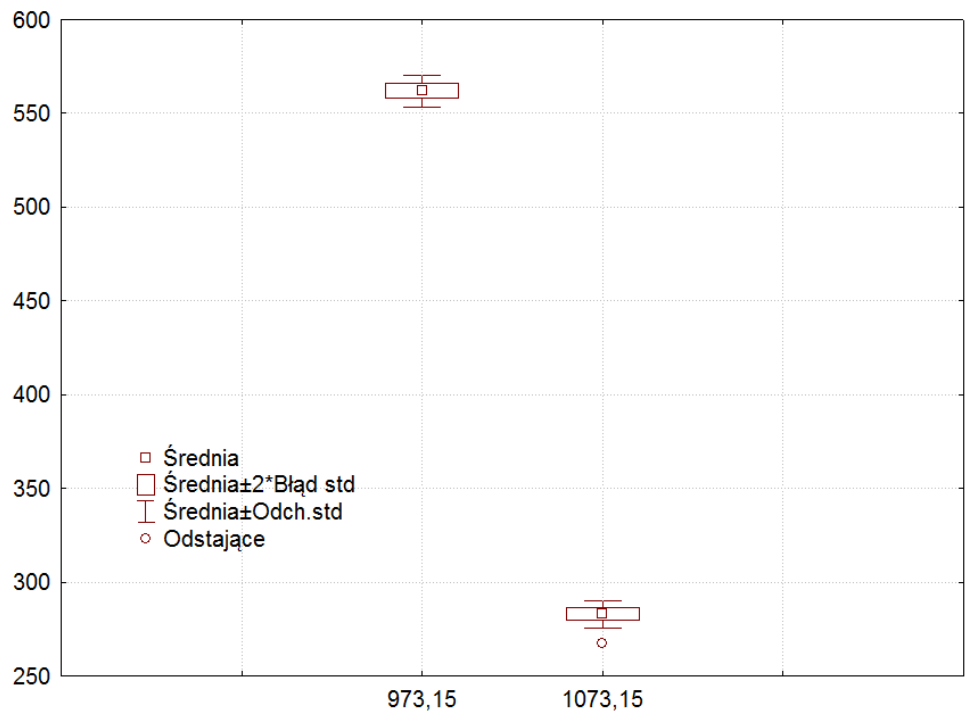
Zestaw wykresów



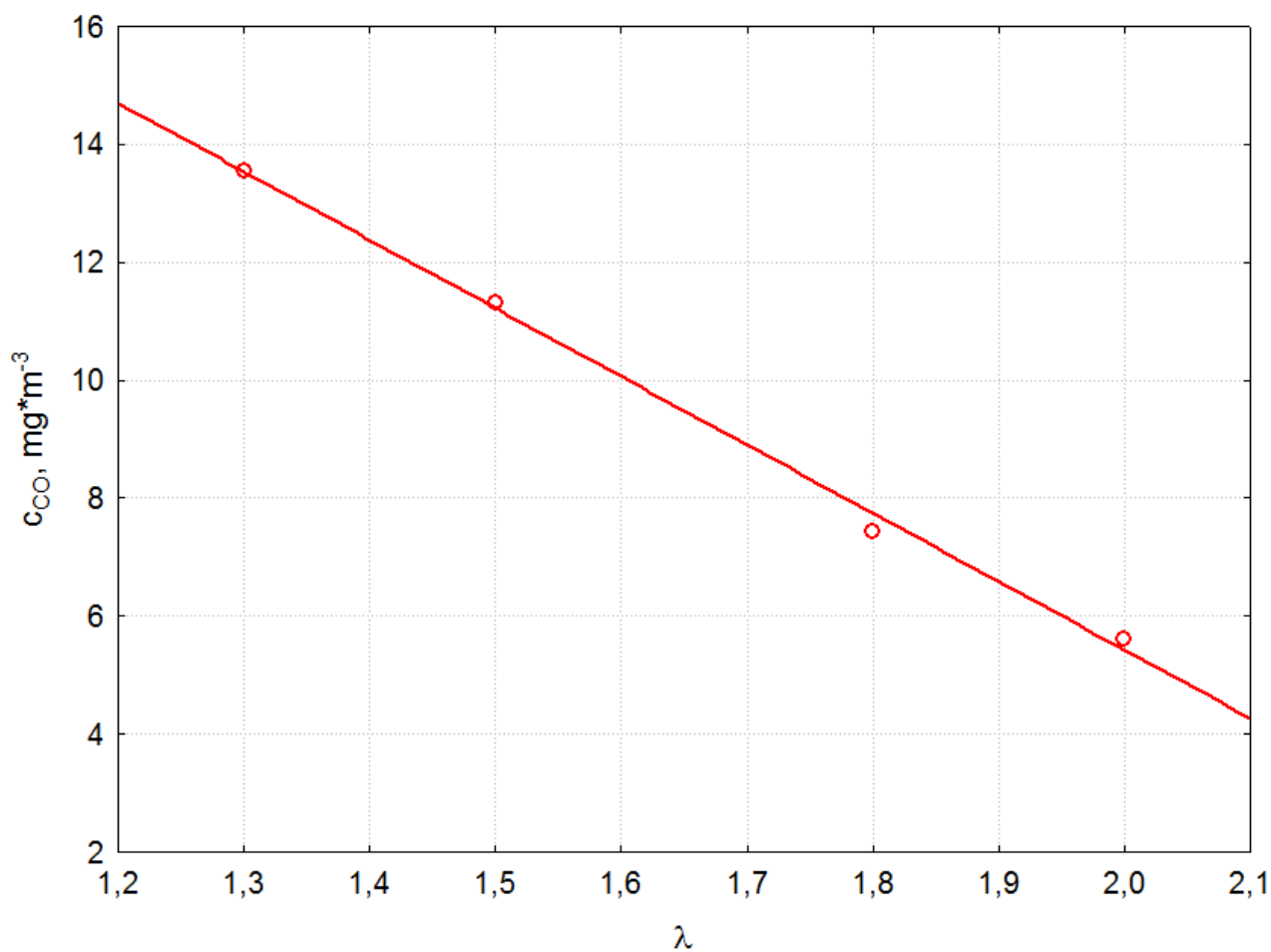
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

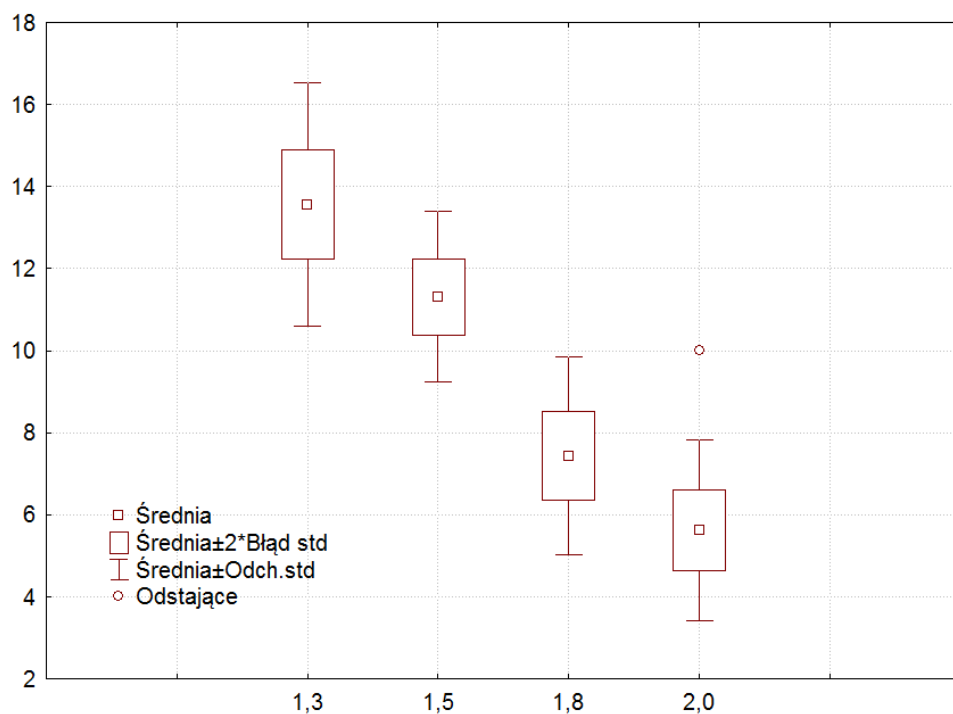
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z25. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich

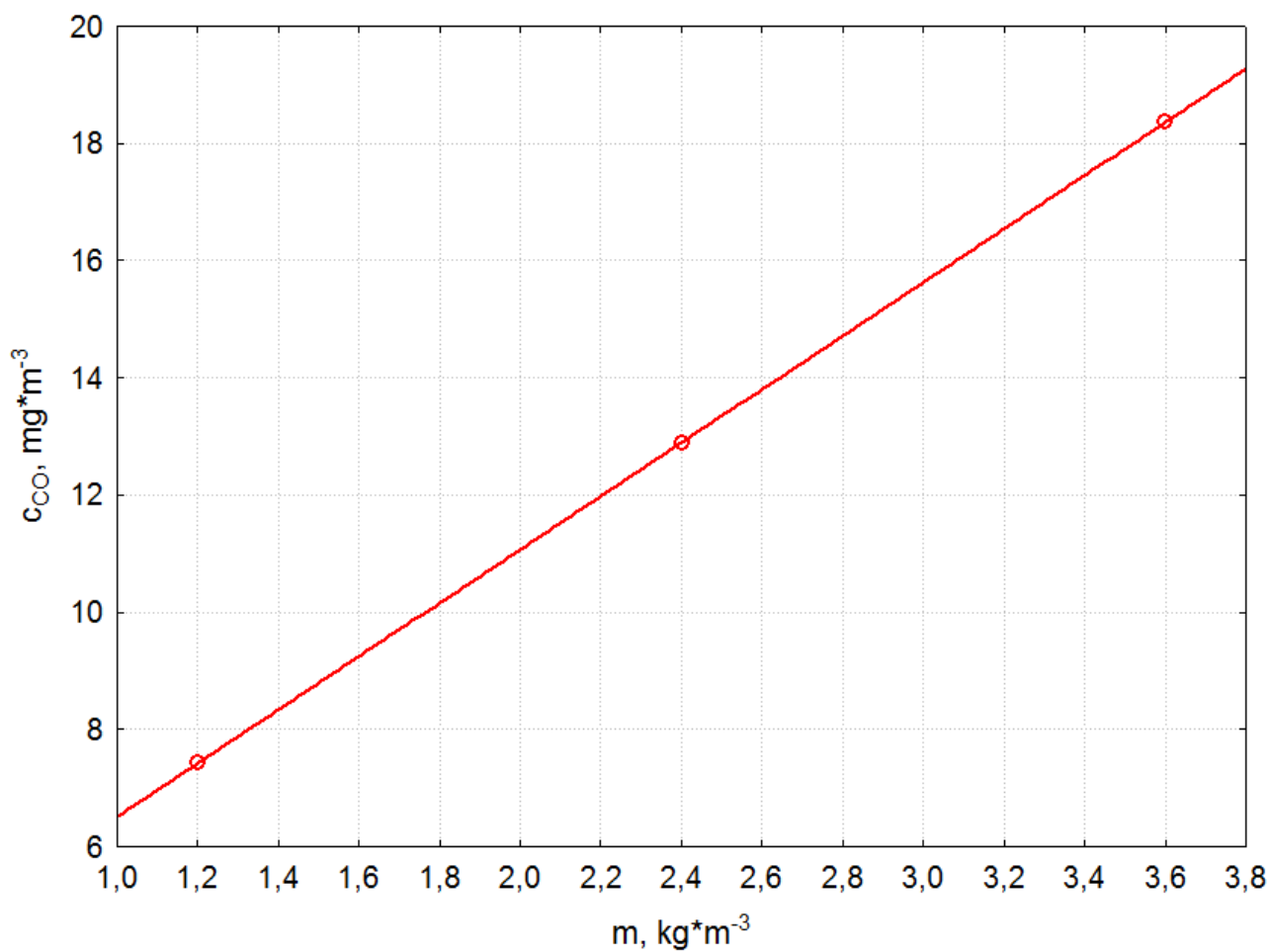


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

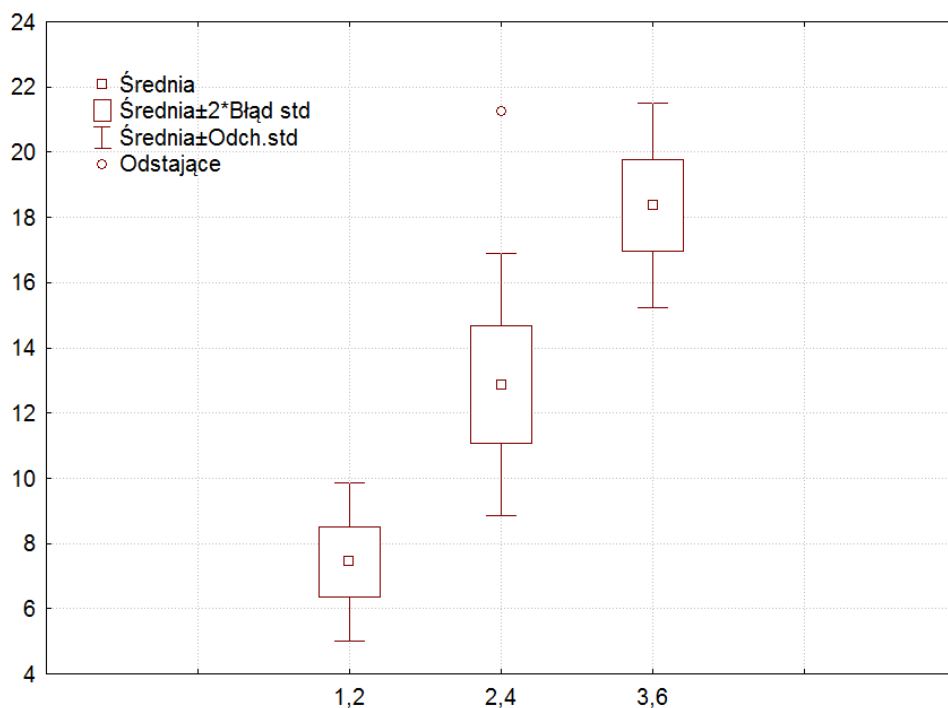


Rys. Z26. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich

Zestaw wykresów

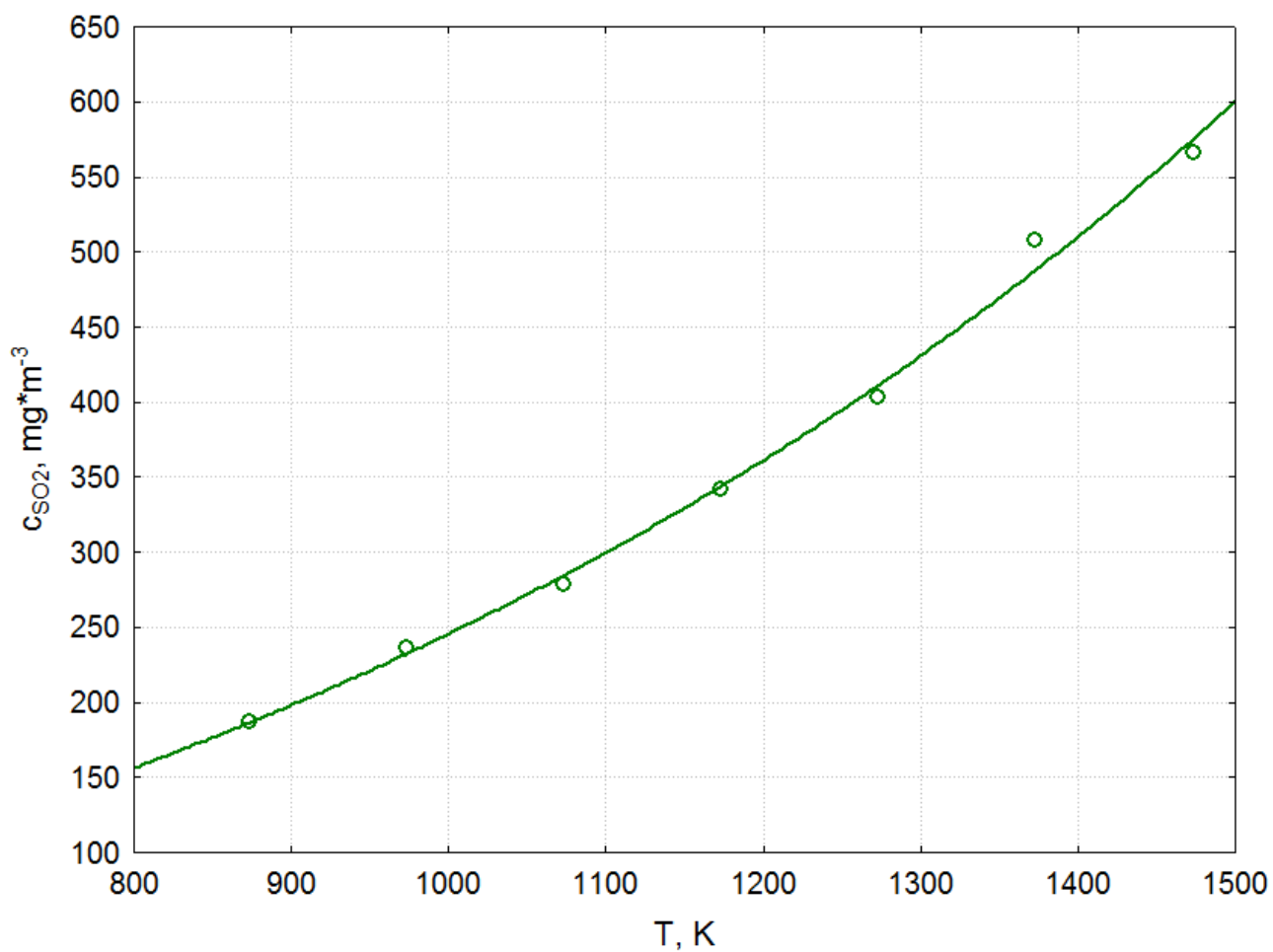


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z27. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów farbiarskich

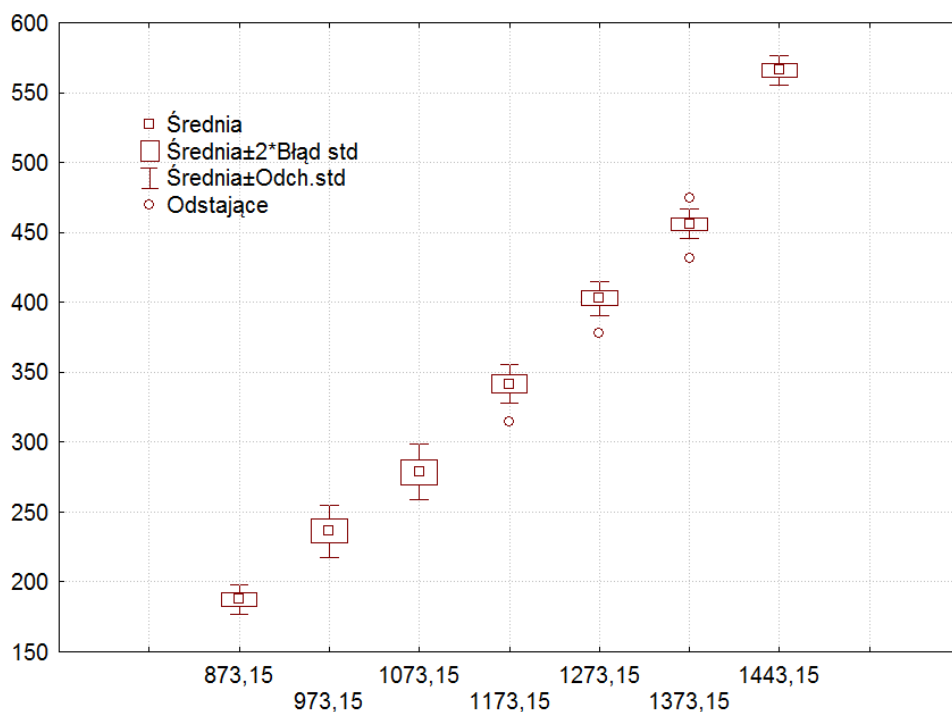
Zestaw wykresów



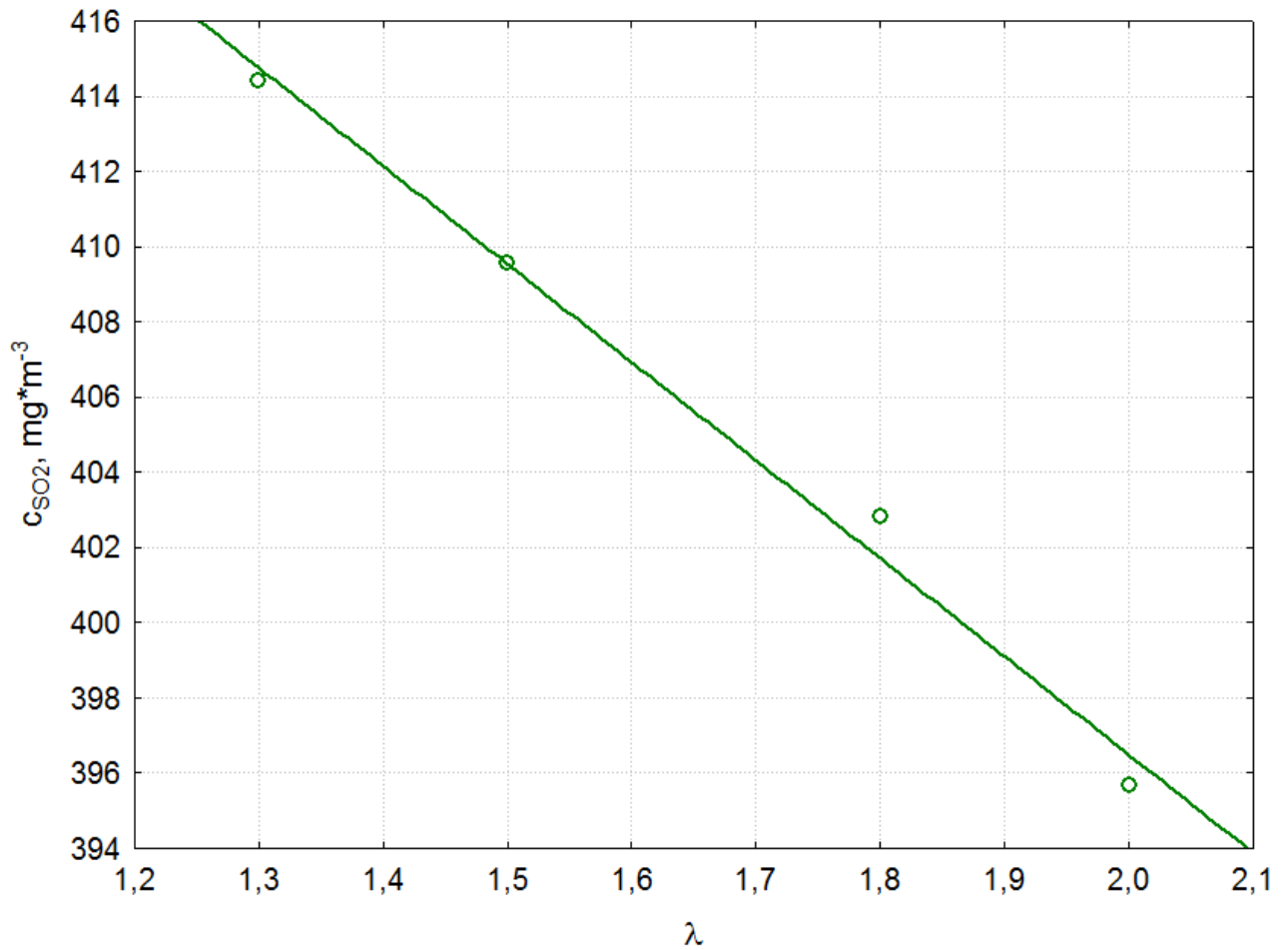
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

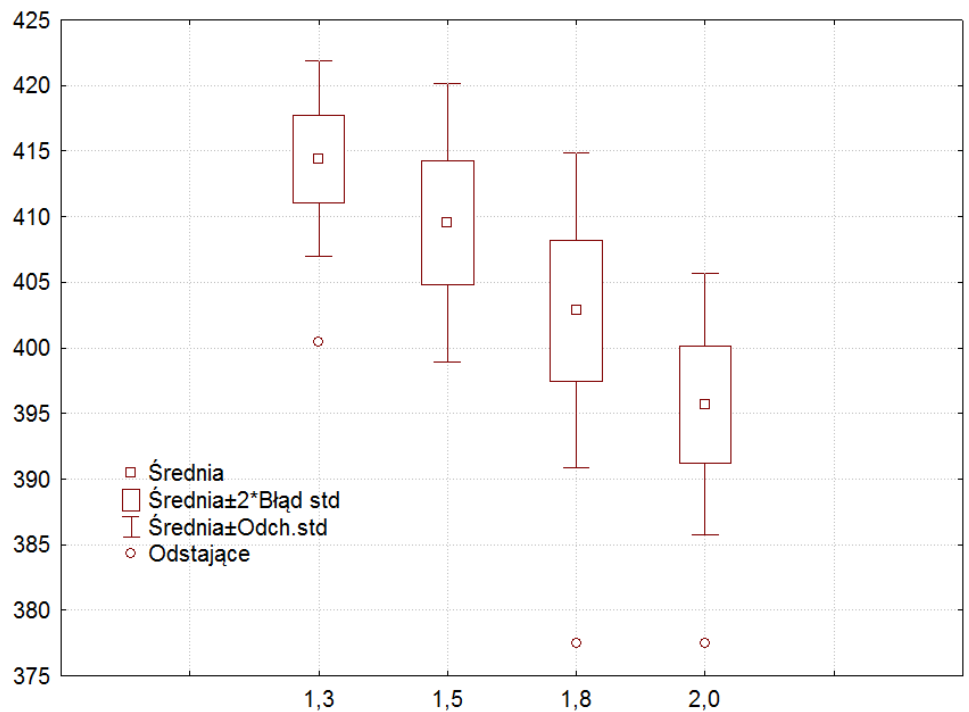
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z28. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych

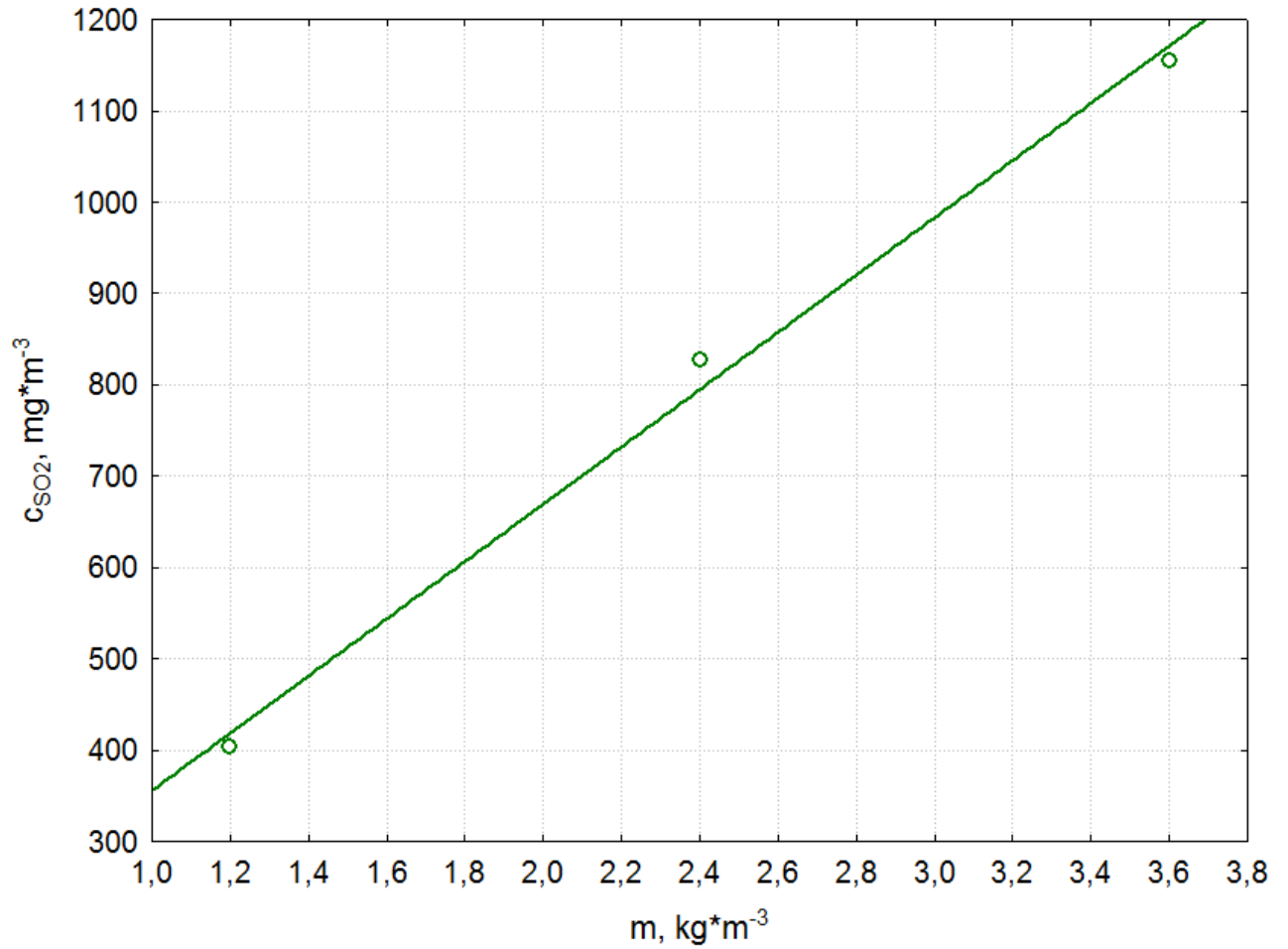


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

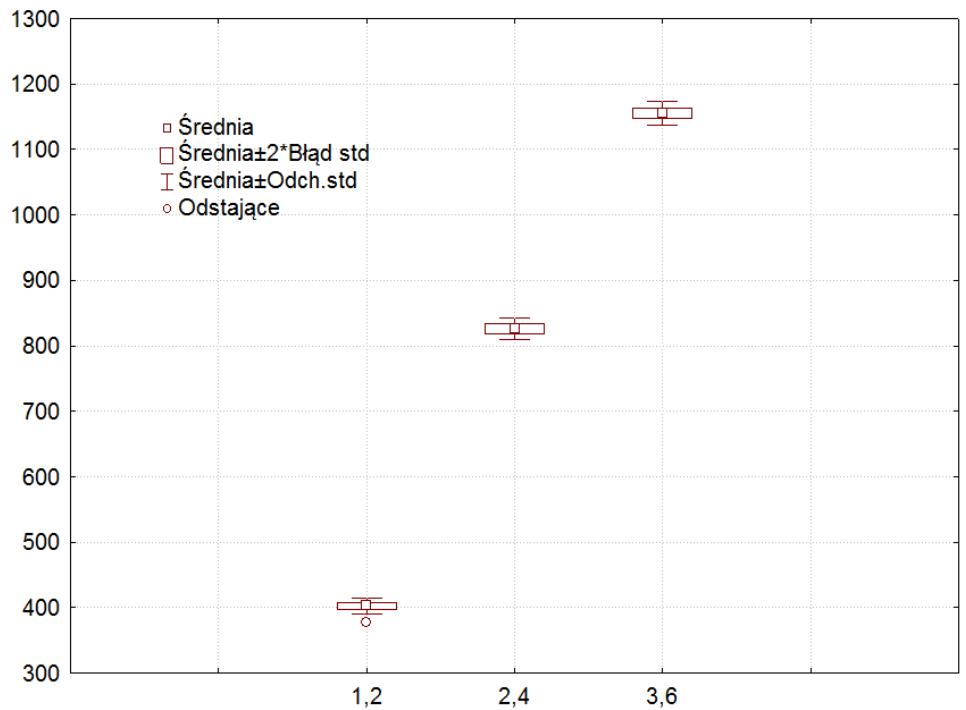


Rys. Z29. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych

Zestaw wykresów

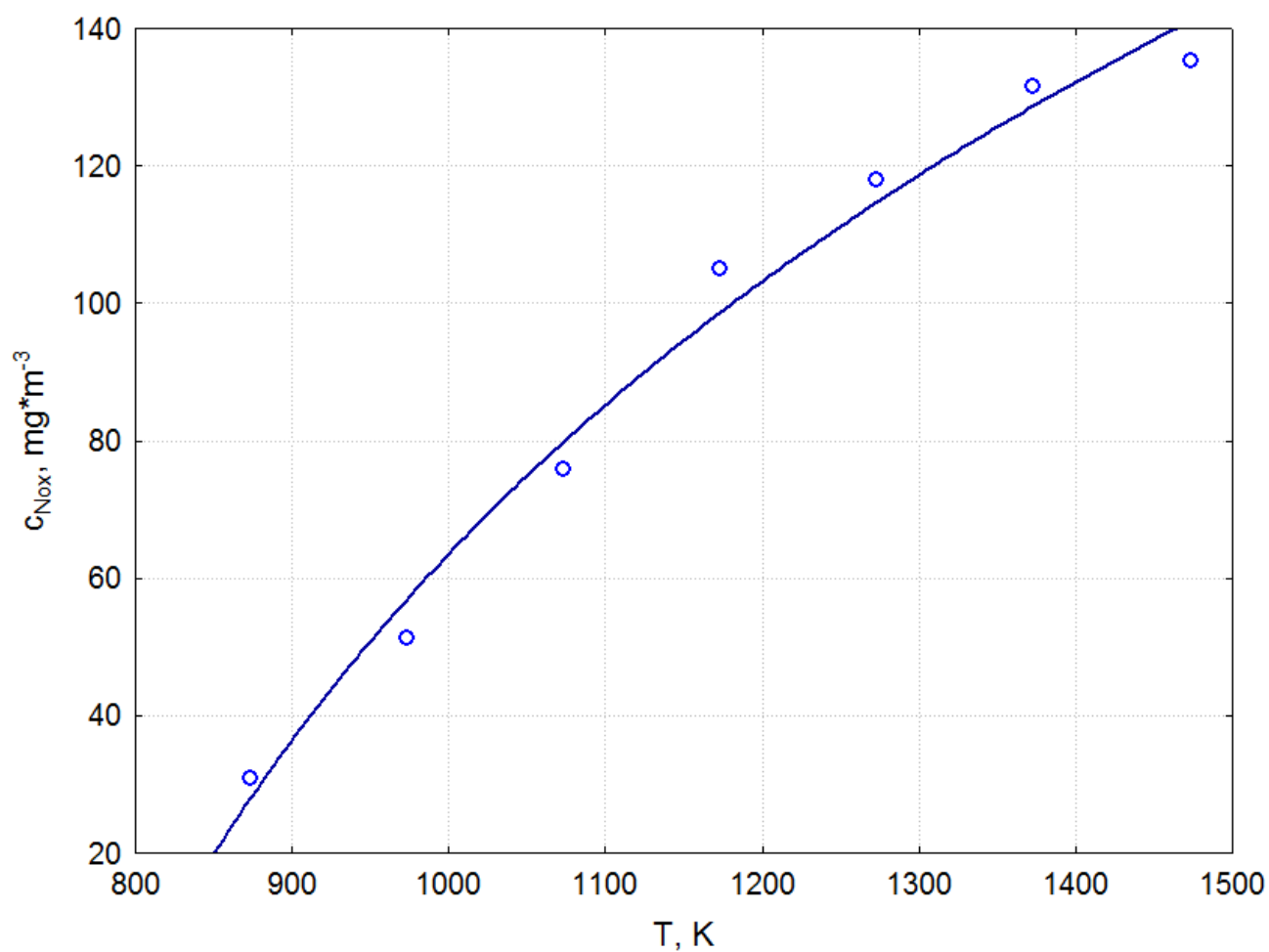


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z30. Wpływ zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów gumowych

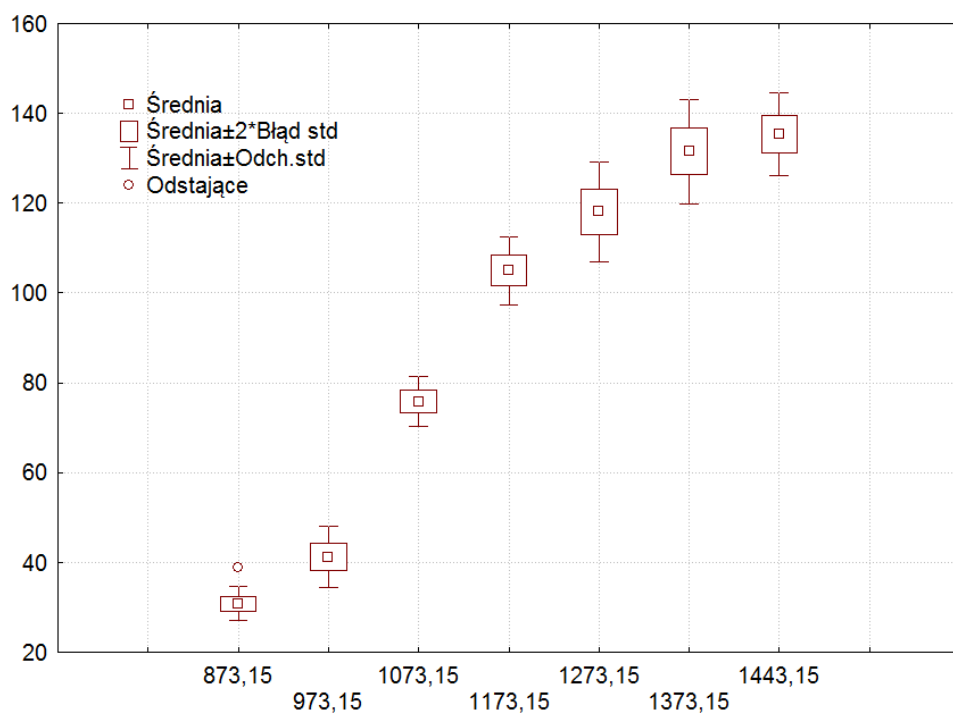
Zestaw wykresów



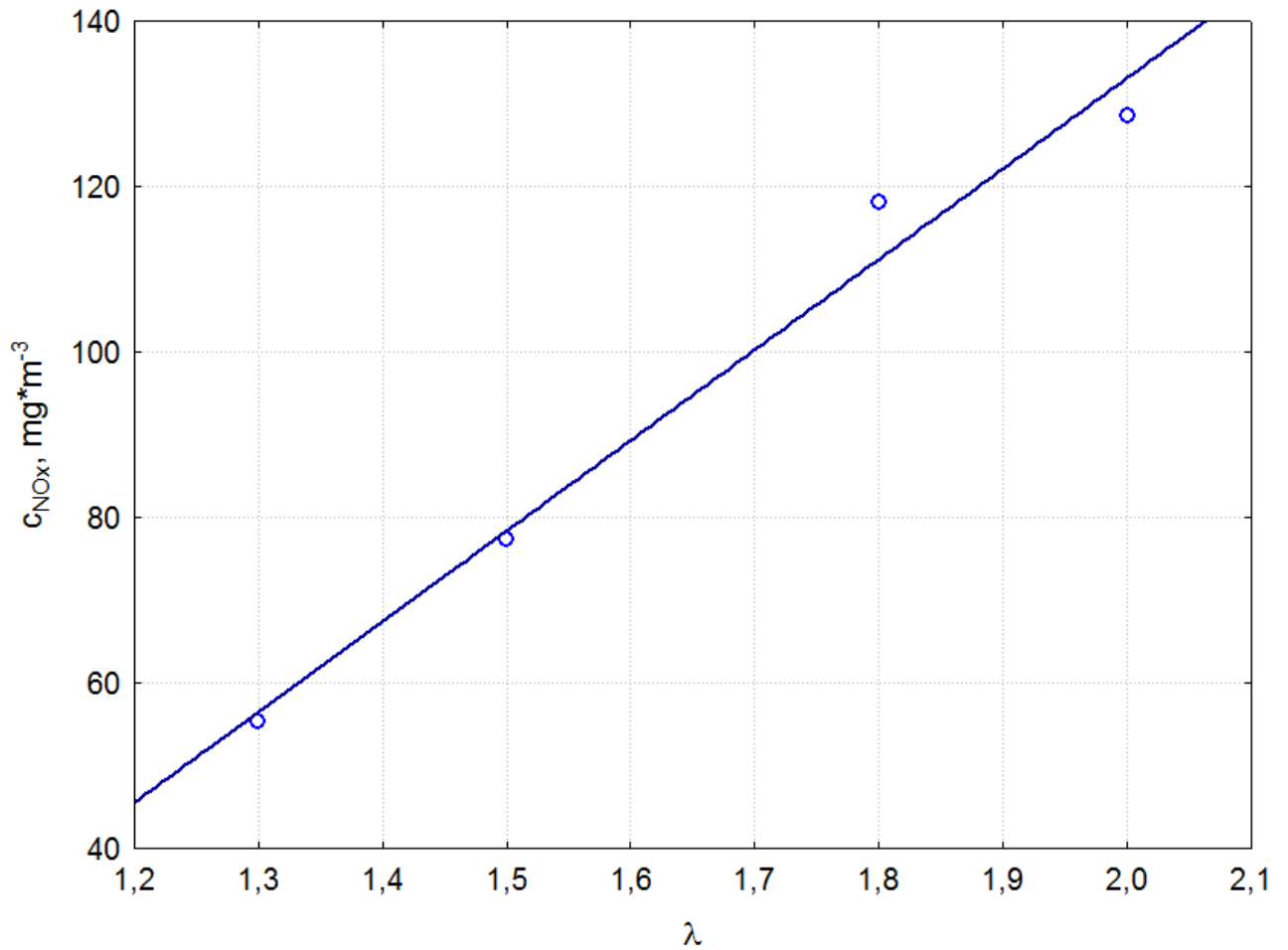
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

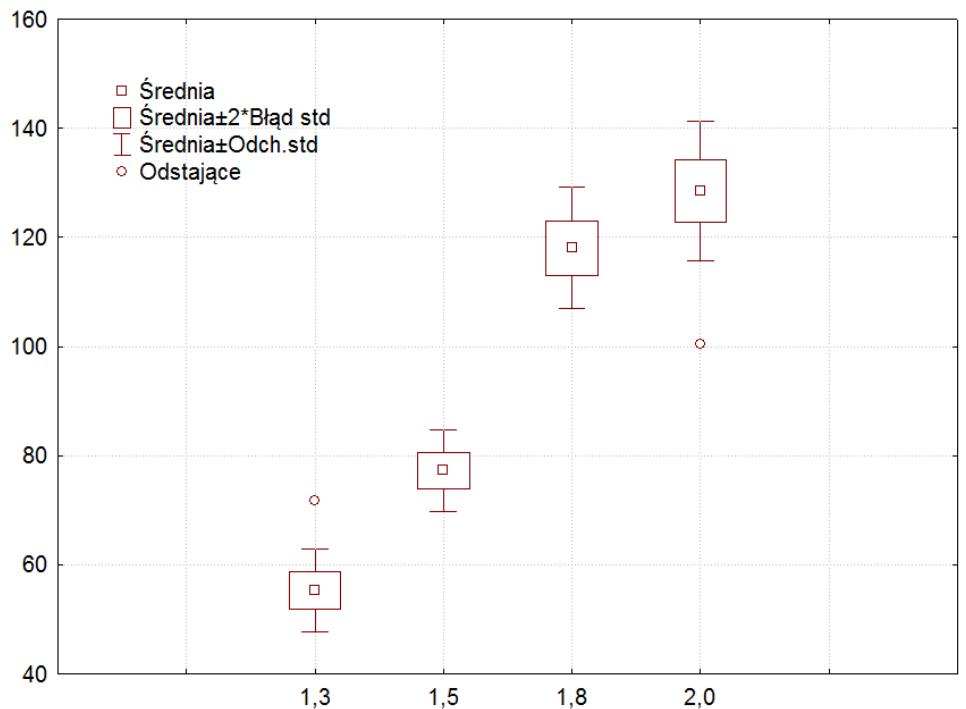
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z31. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych

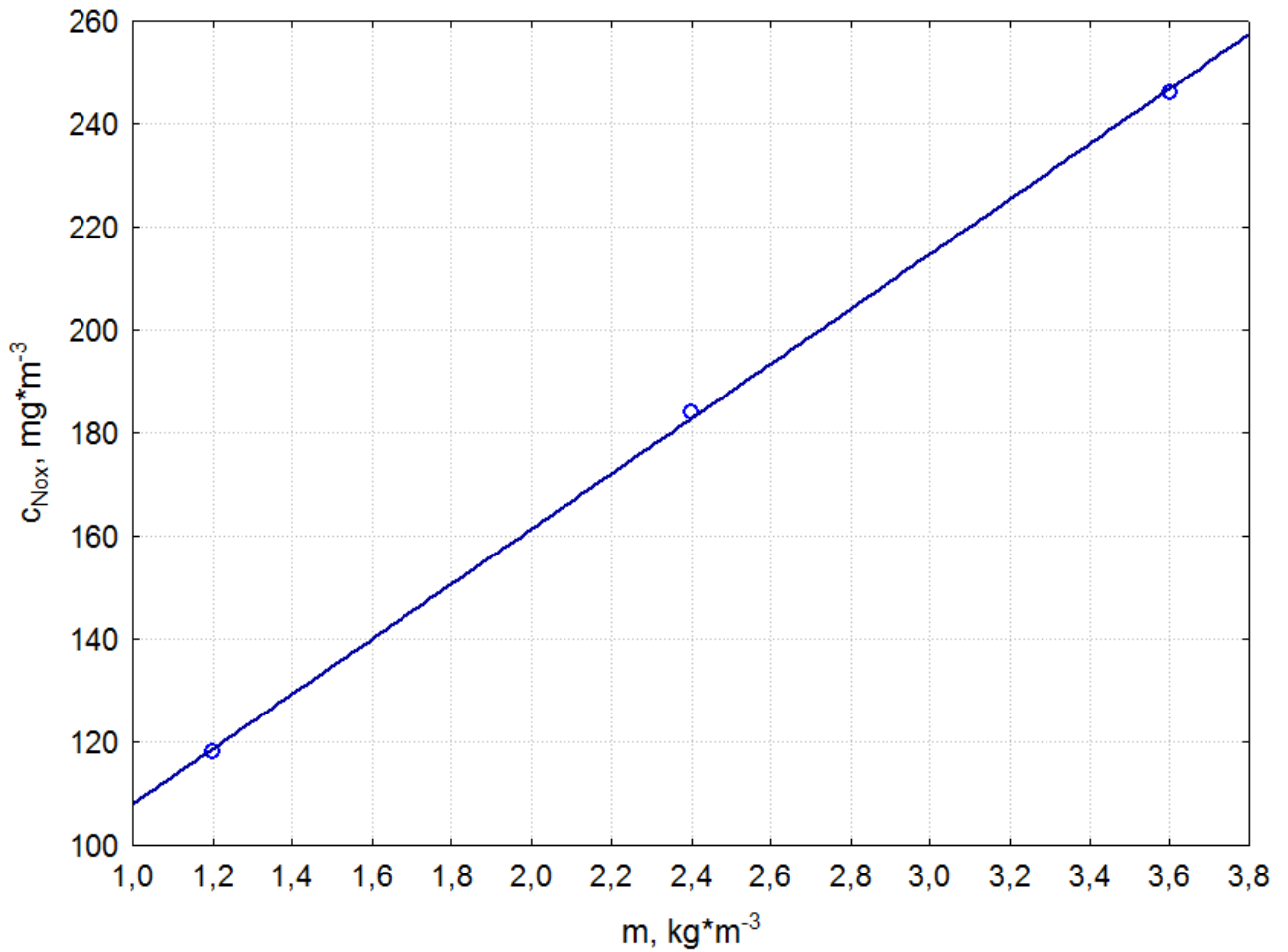


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

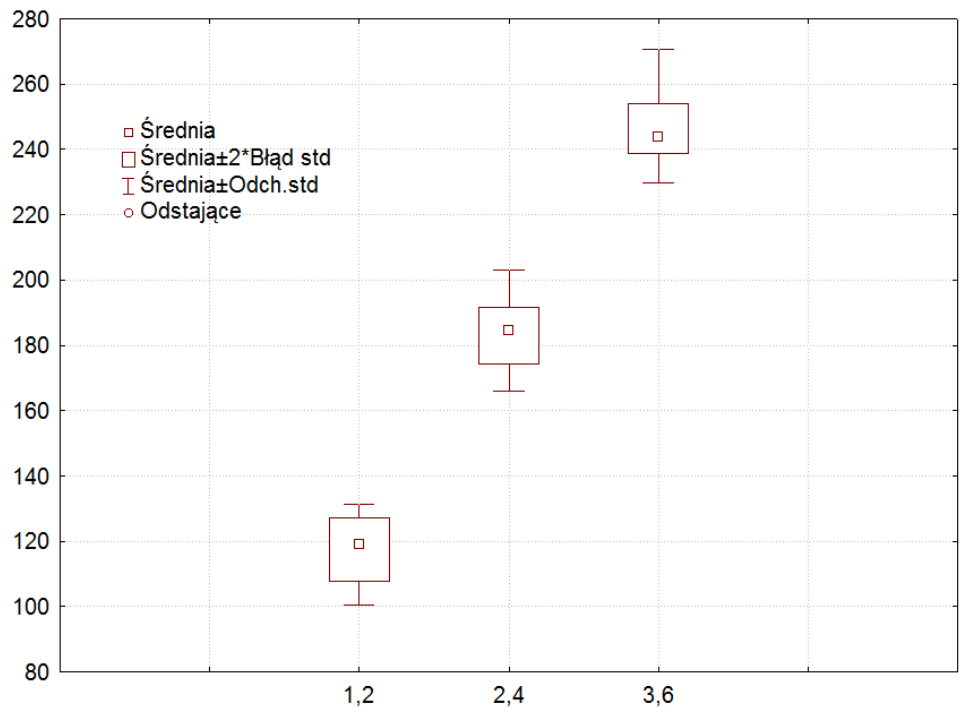


Rys. Z32. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych

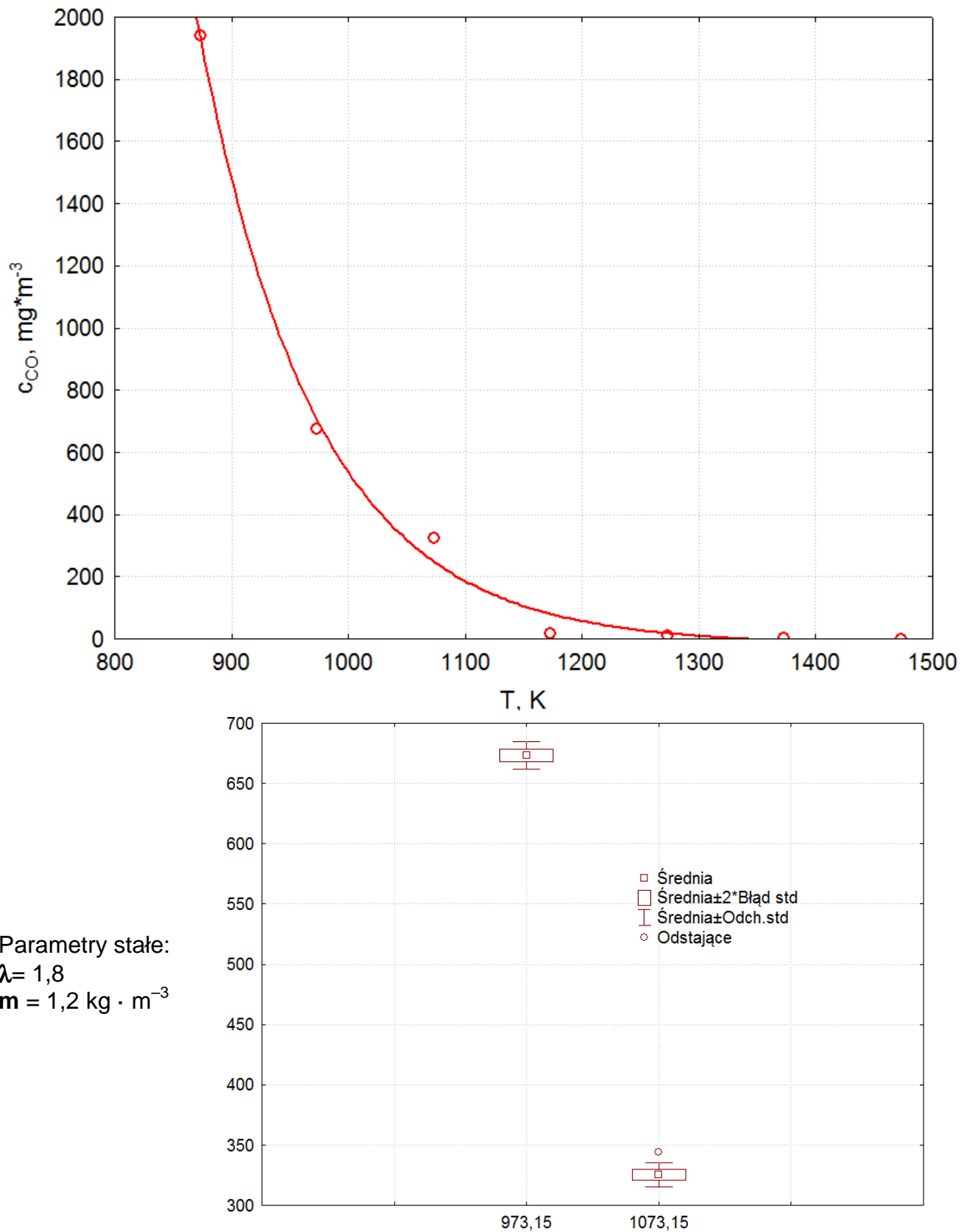
Zestaw wykresów



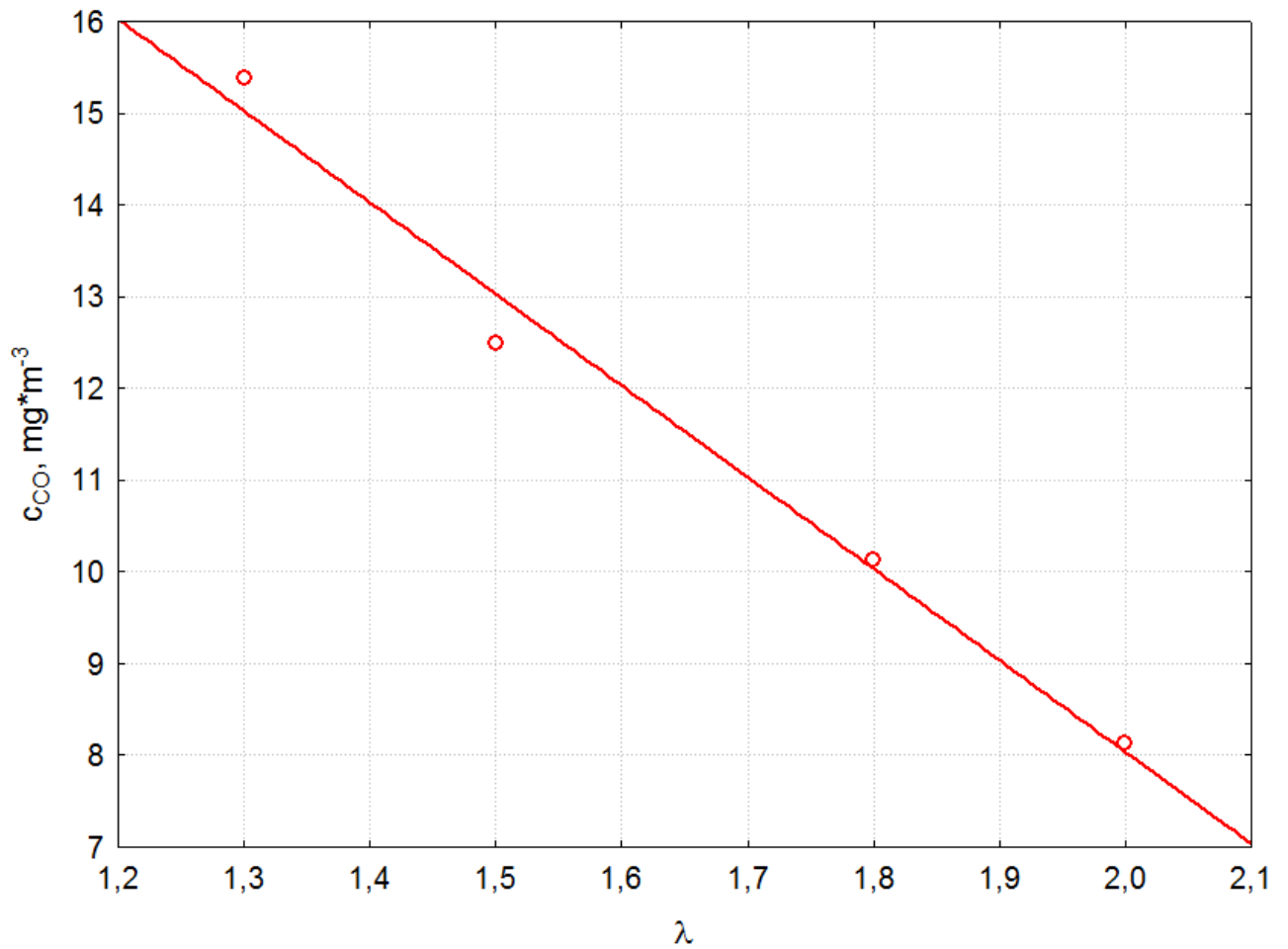
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



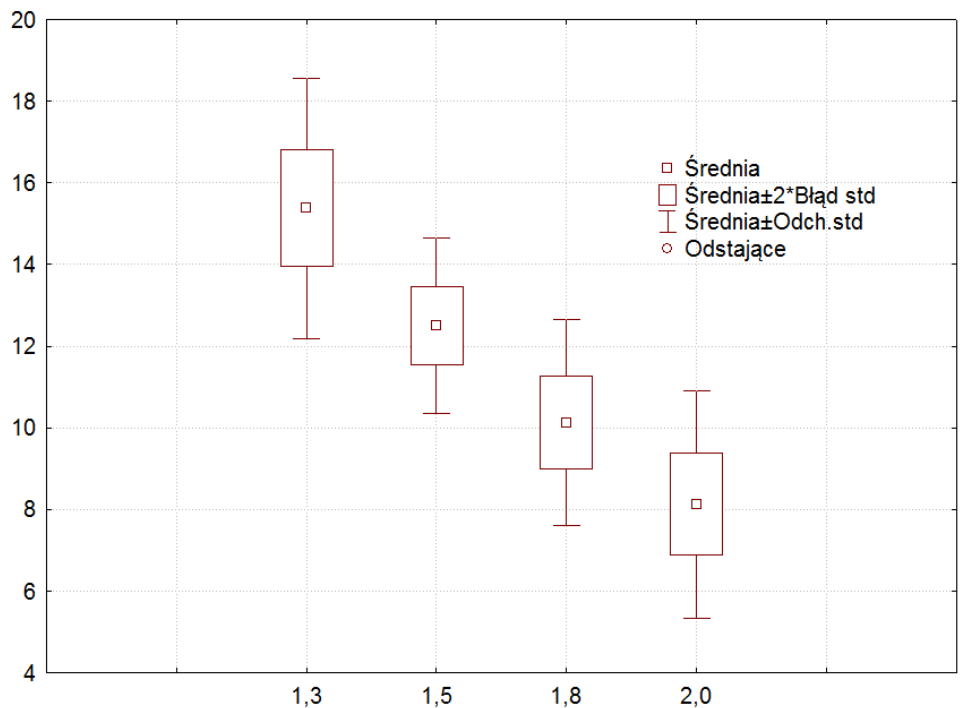
Rys. Z33. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów gumowych



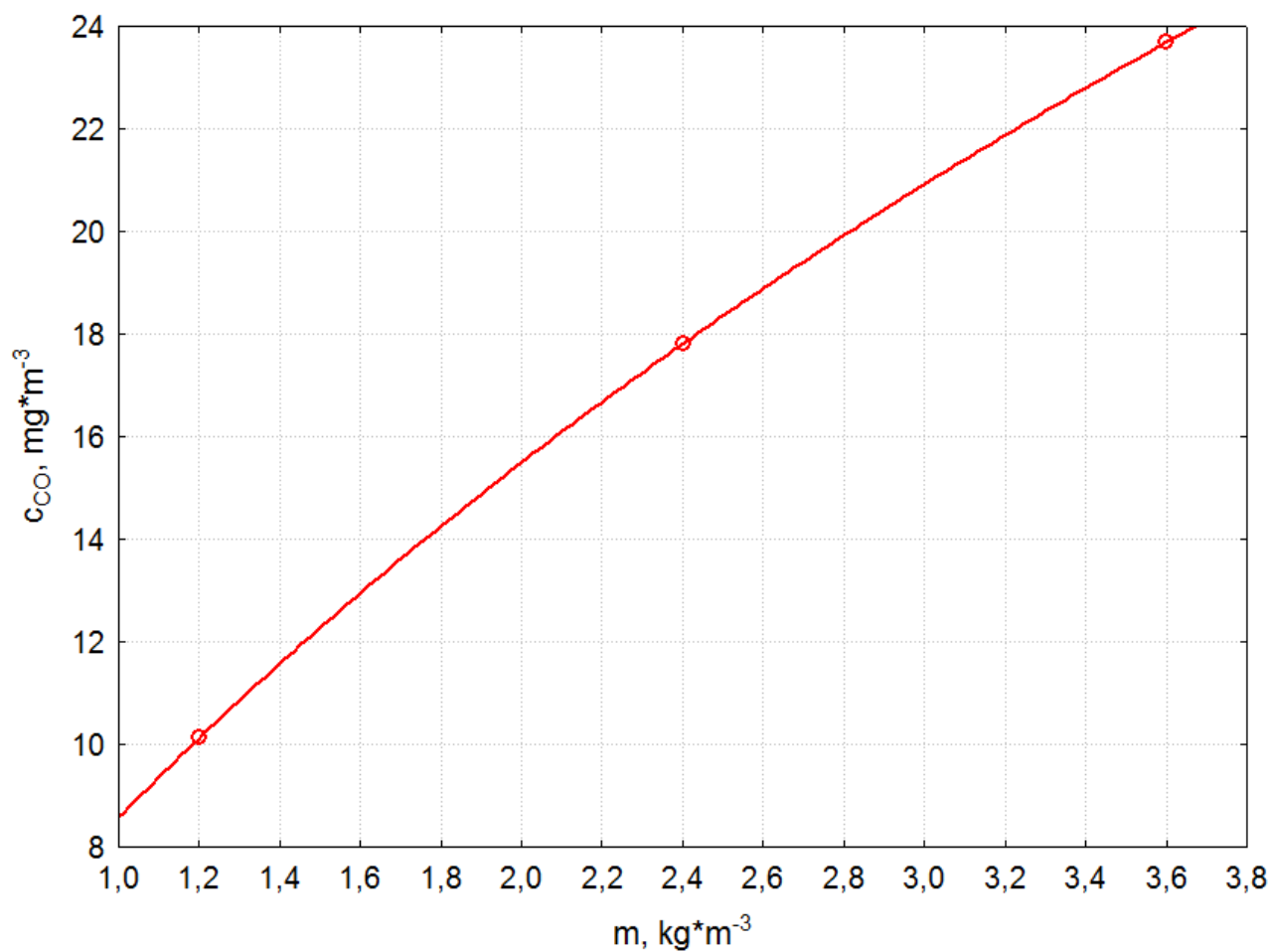
Rys. Z34. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych



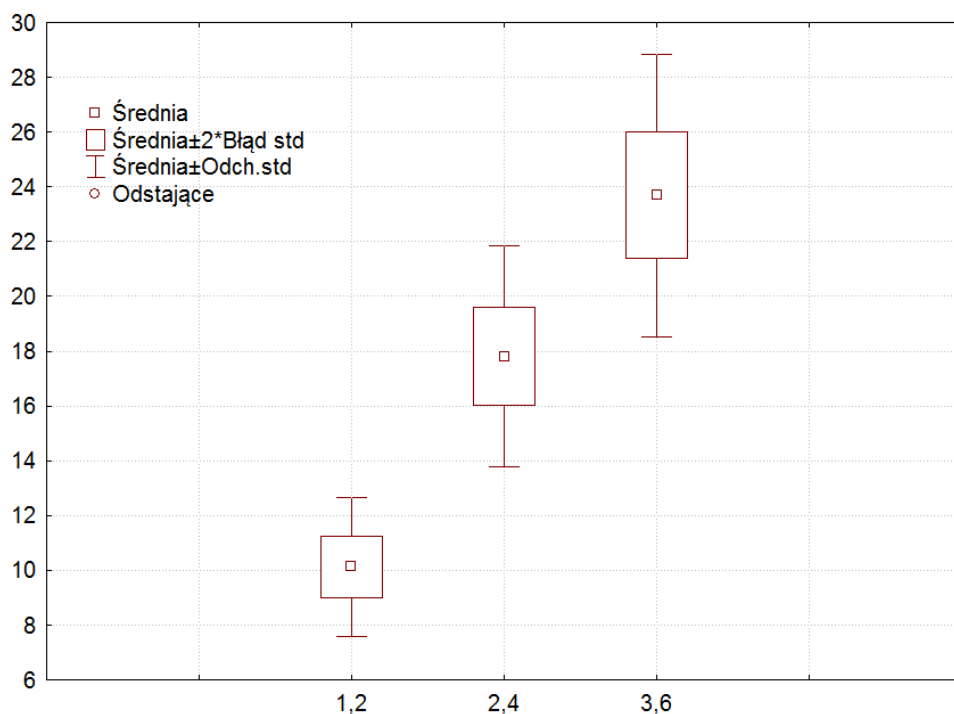
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Rys. Z35. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych

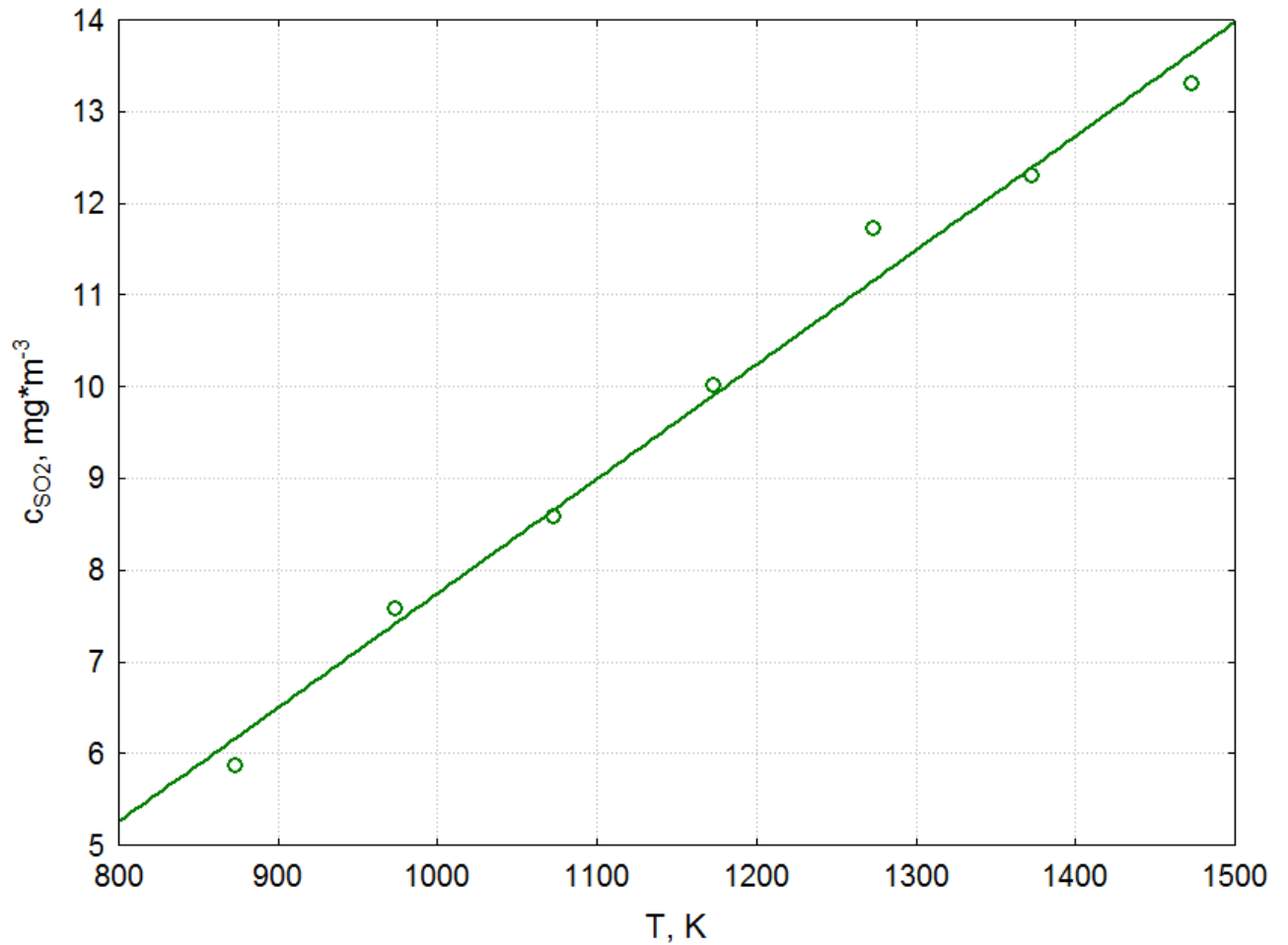


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

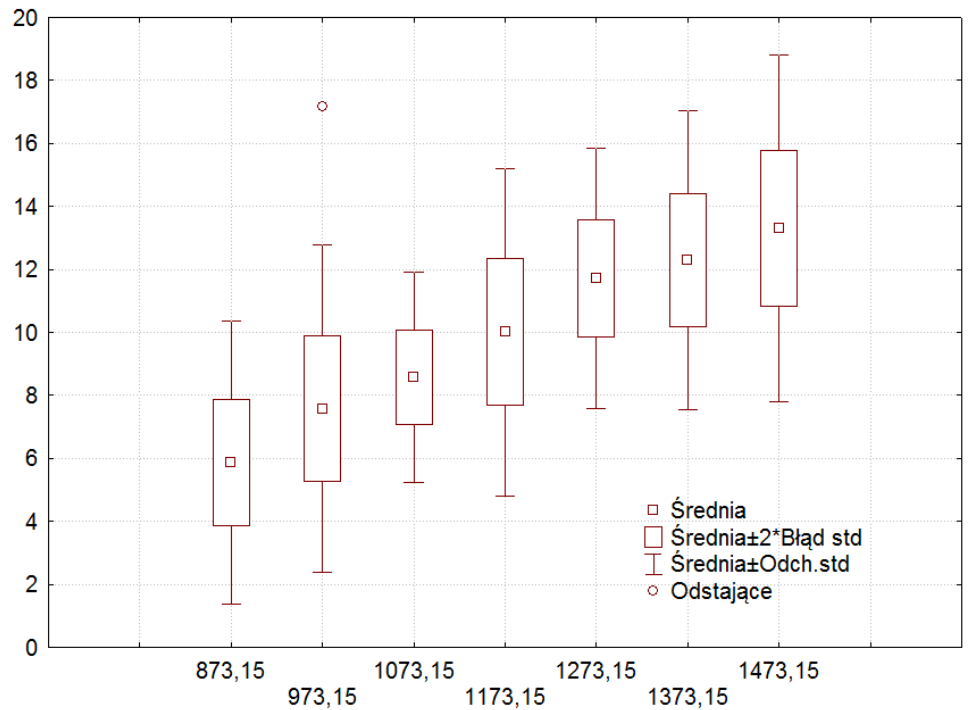


Rys. Z36. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów gumowych

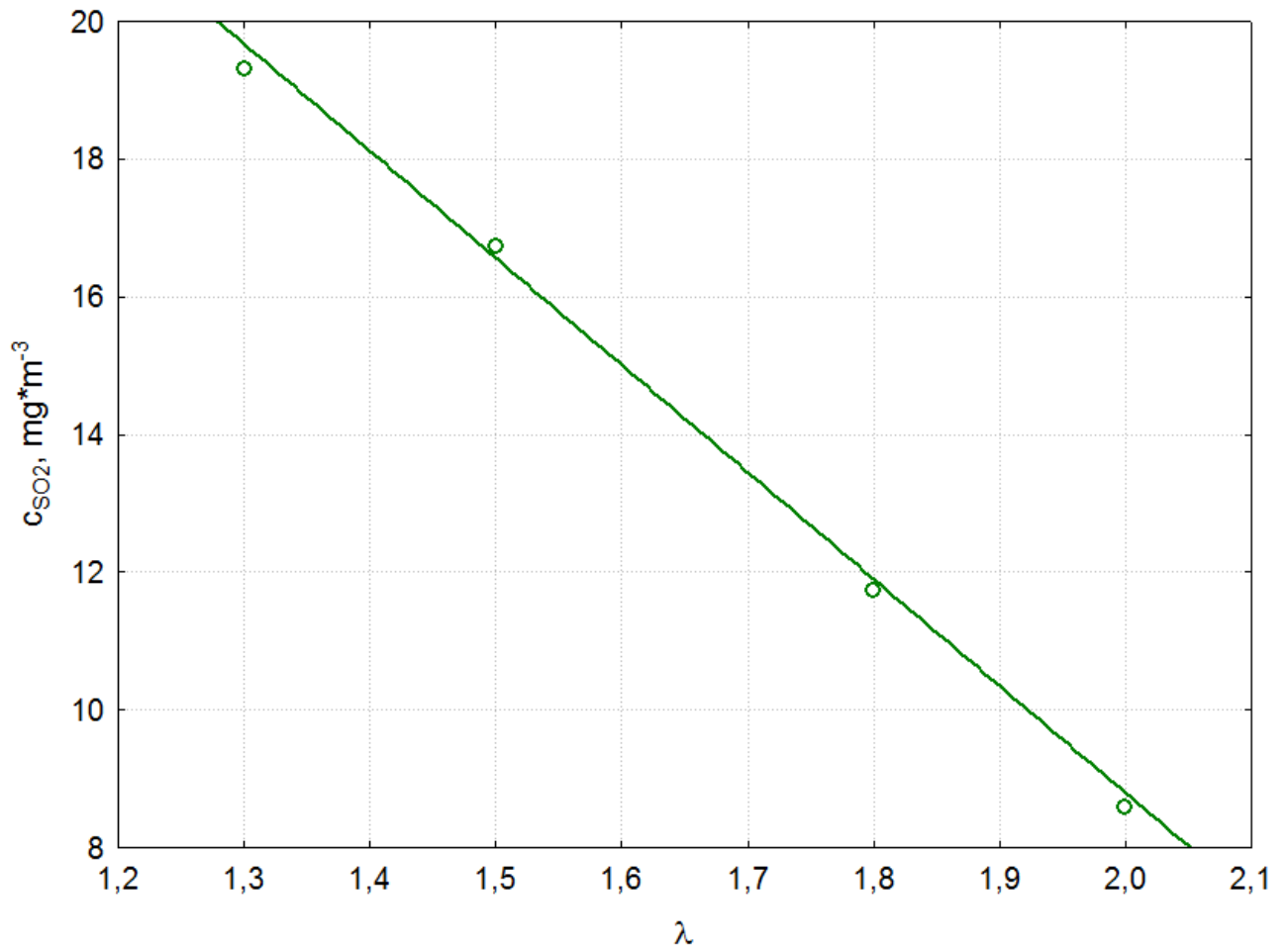
Zestaw wykresów



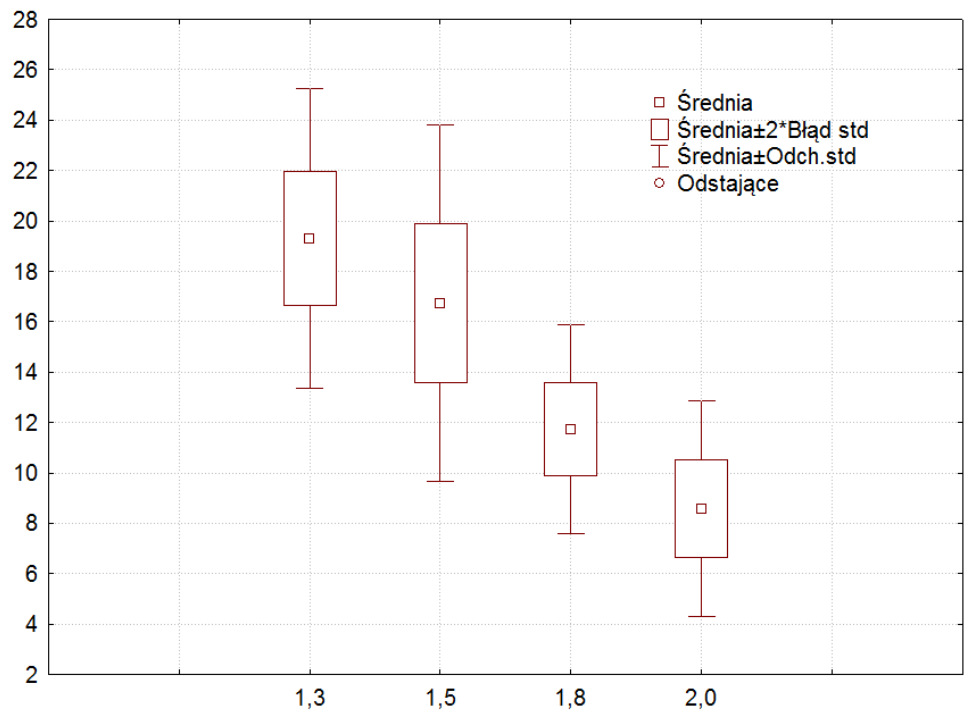
Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



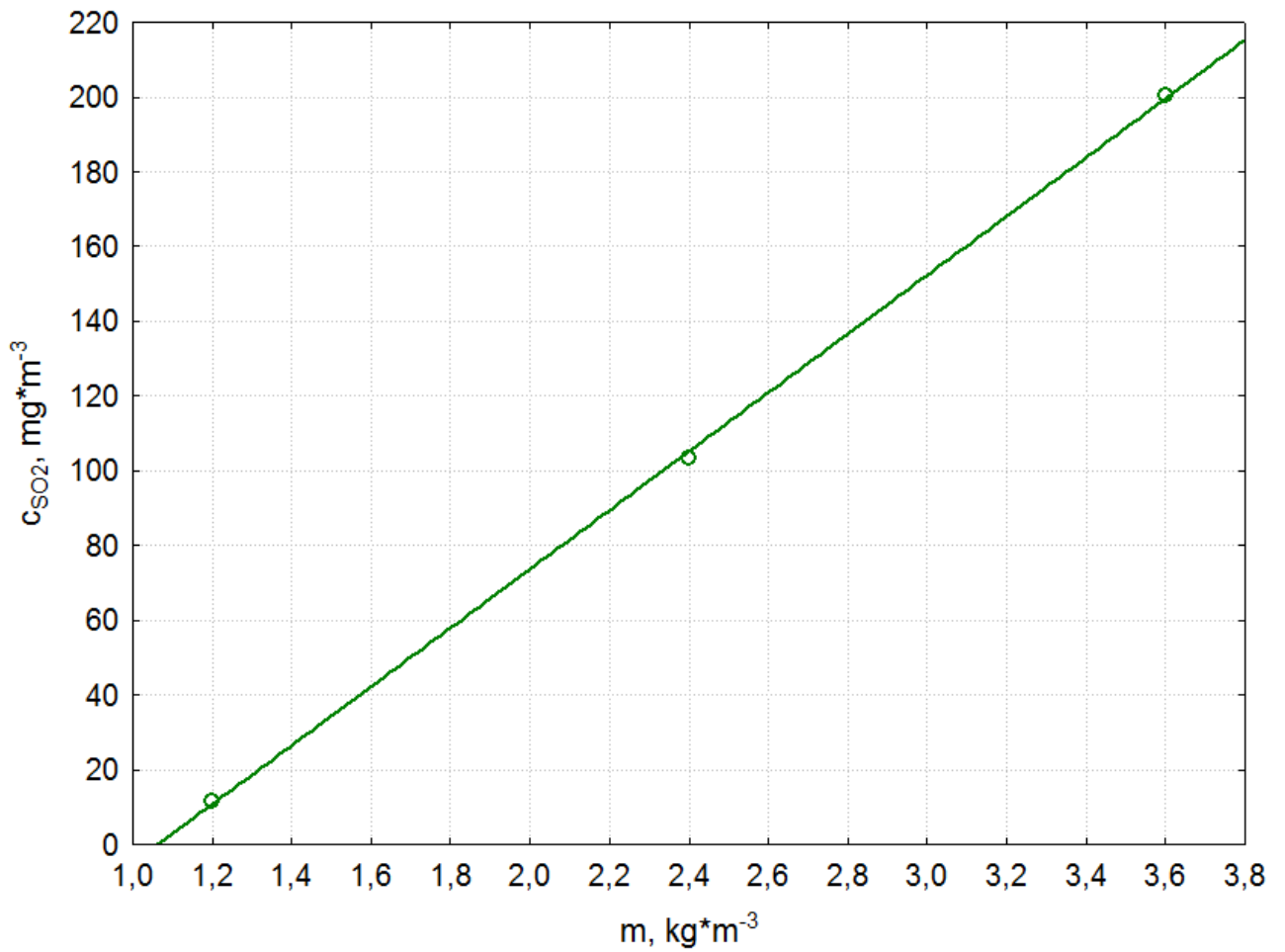
Rys. Z37. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych



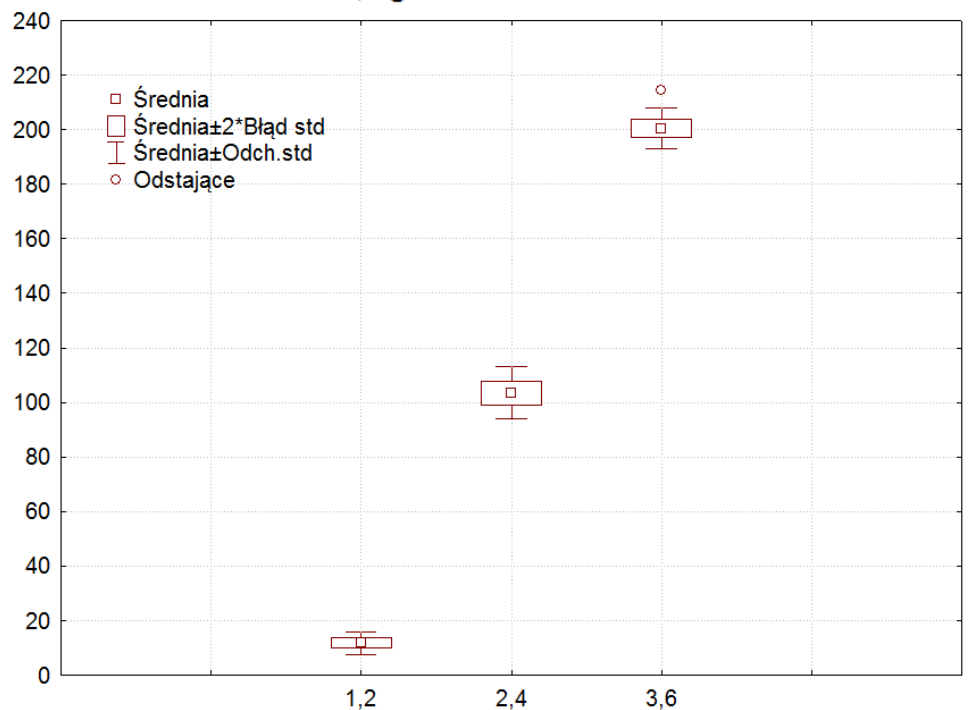
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Rys. Z38. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych

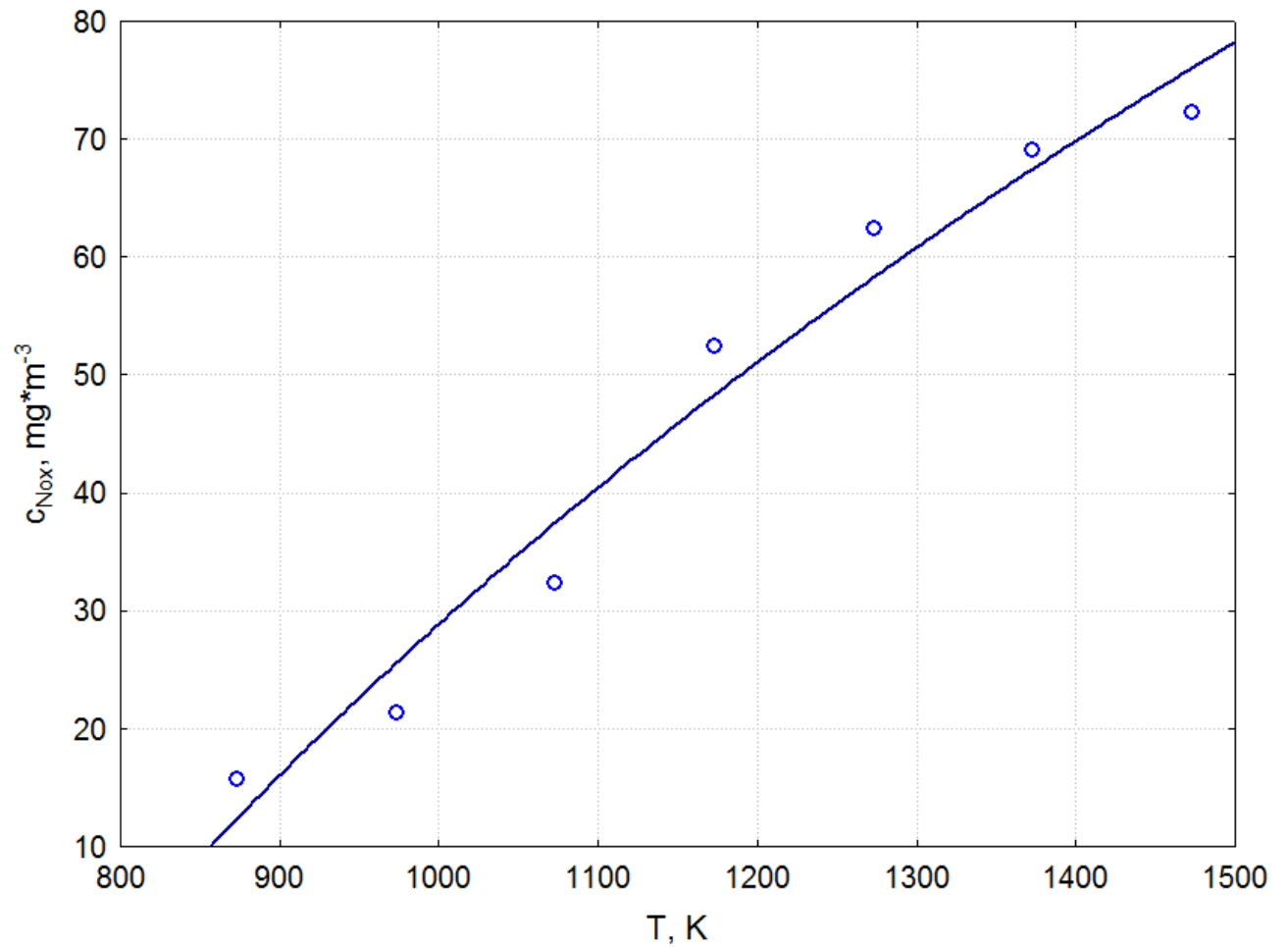


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z39. Wpływ zmian masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliestrowych

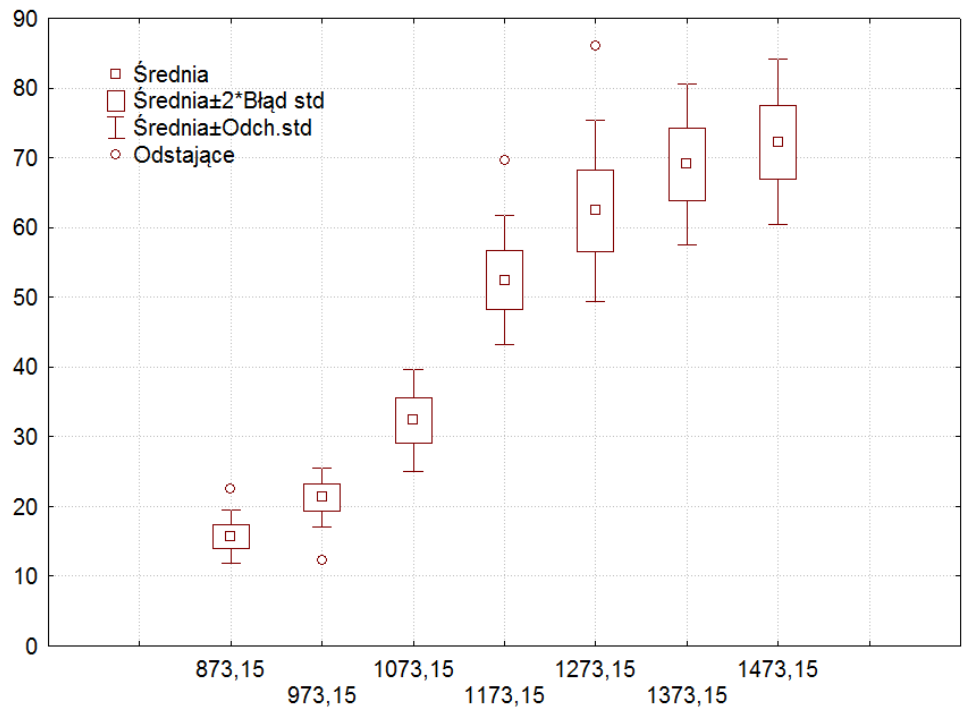
Zestaw wykresów



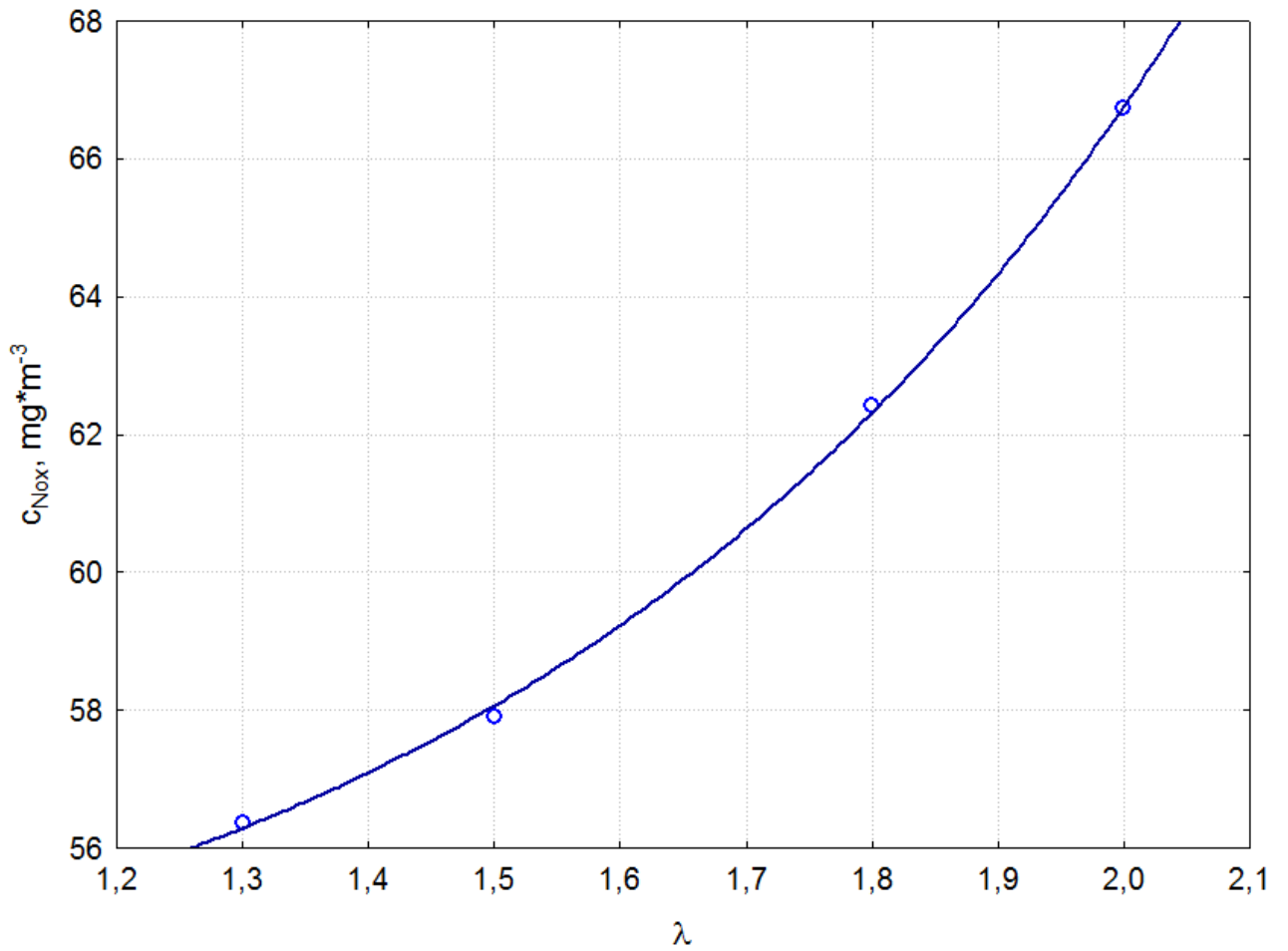
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

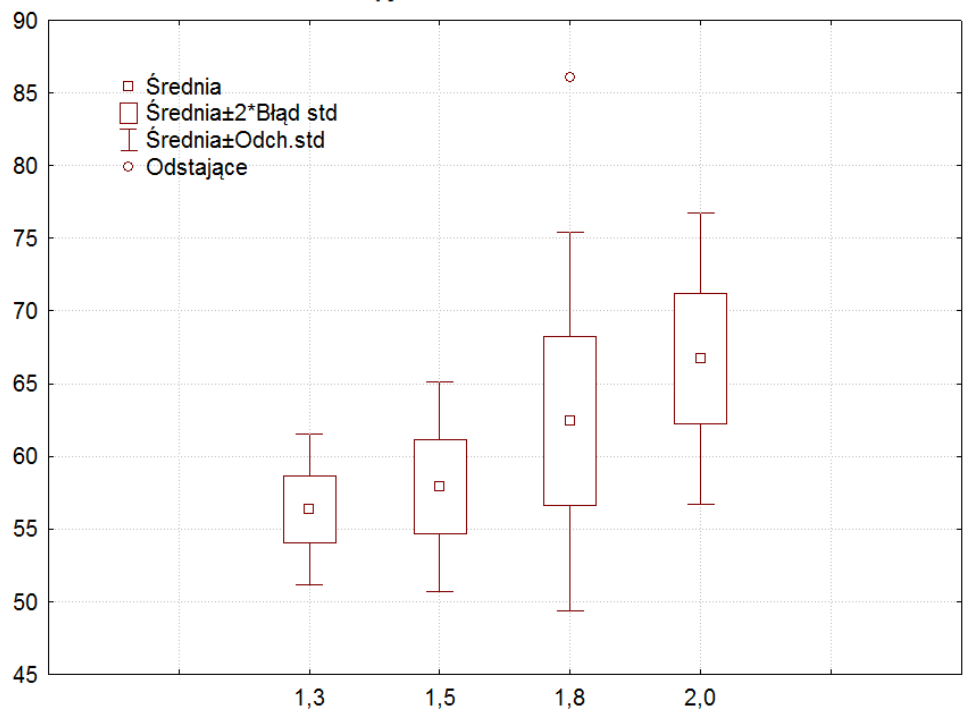
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z40. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych

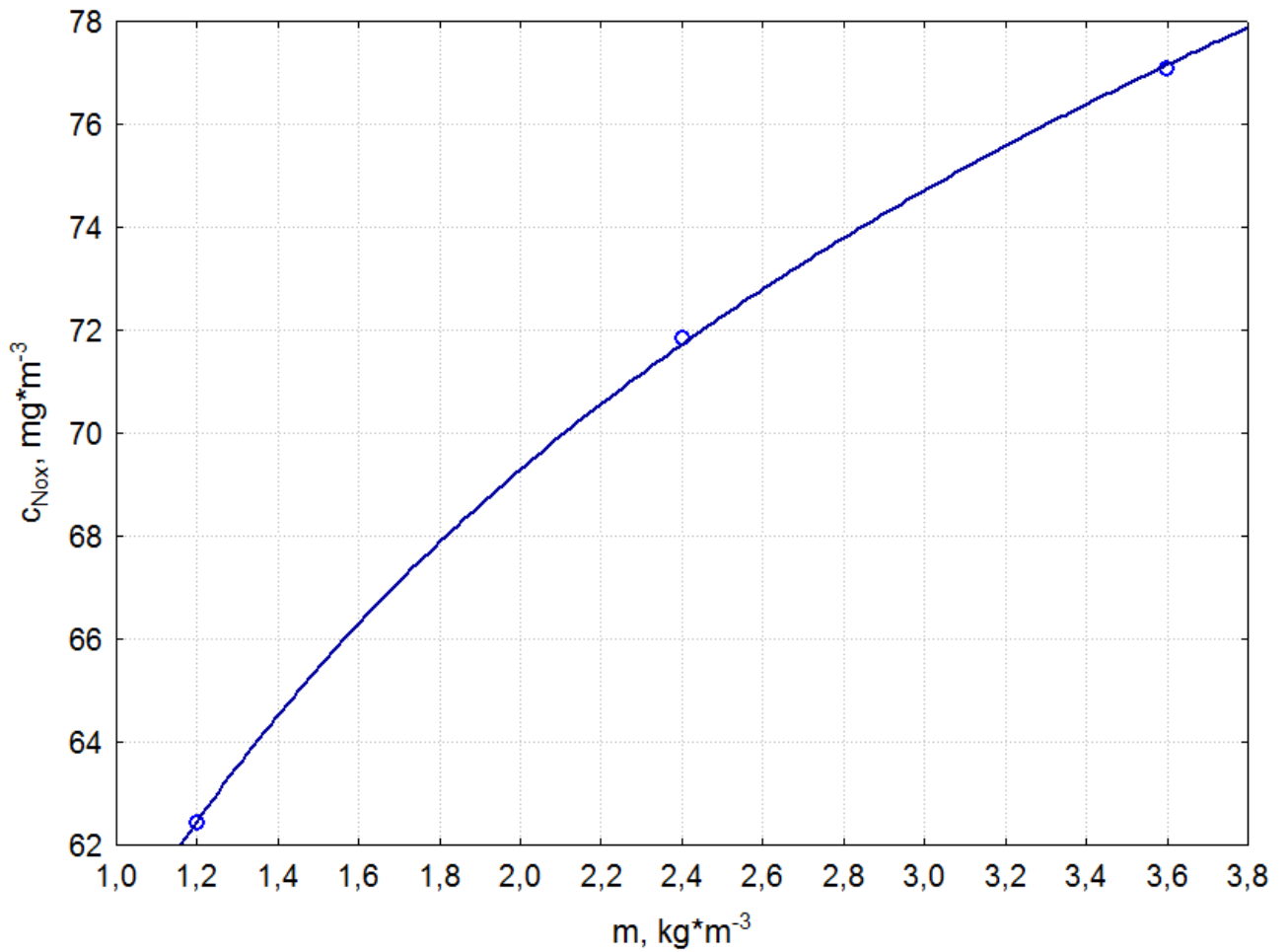


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

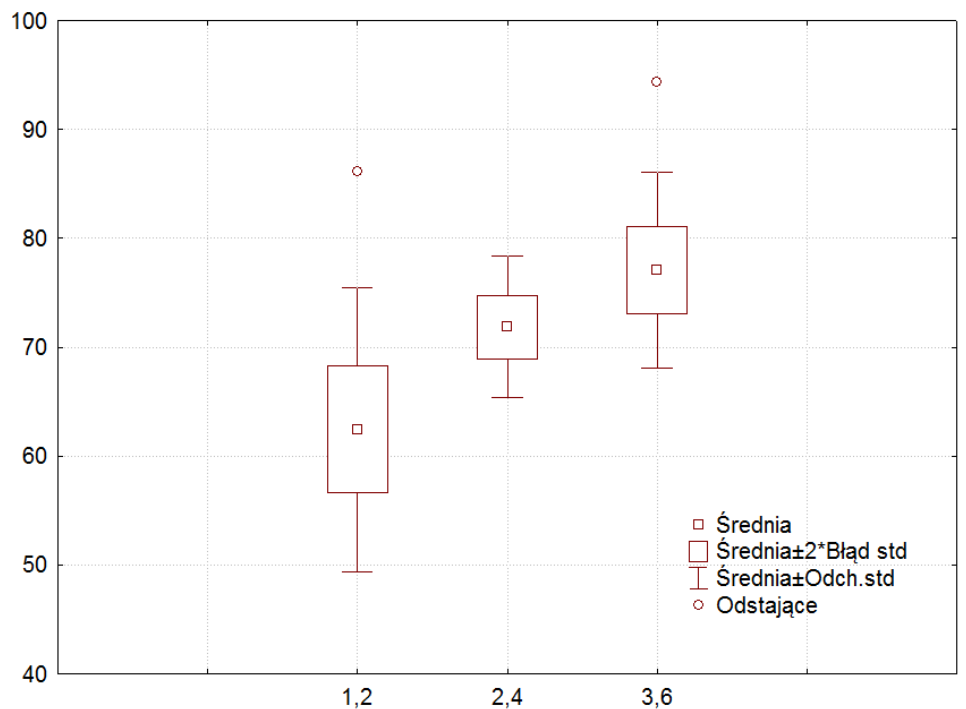


Rys. Z41. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych

Zestaw wykresów

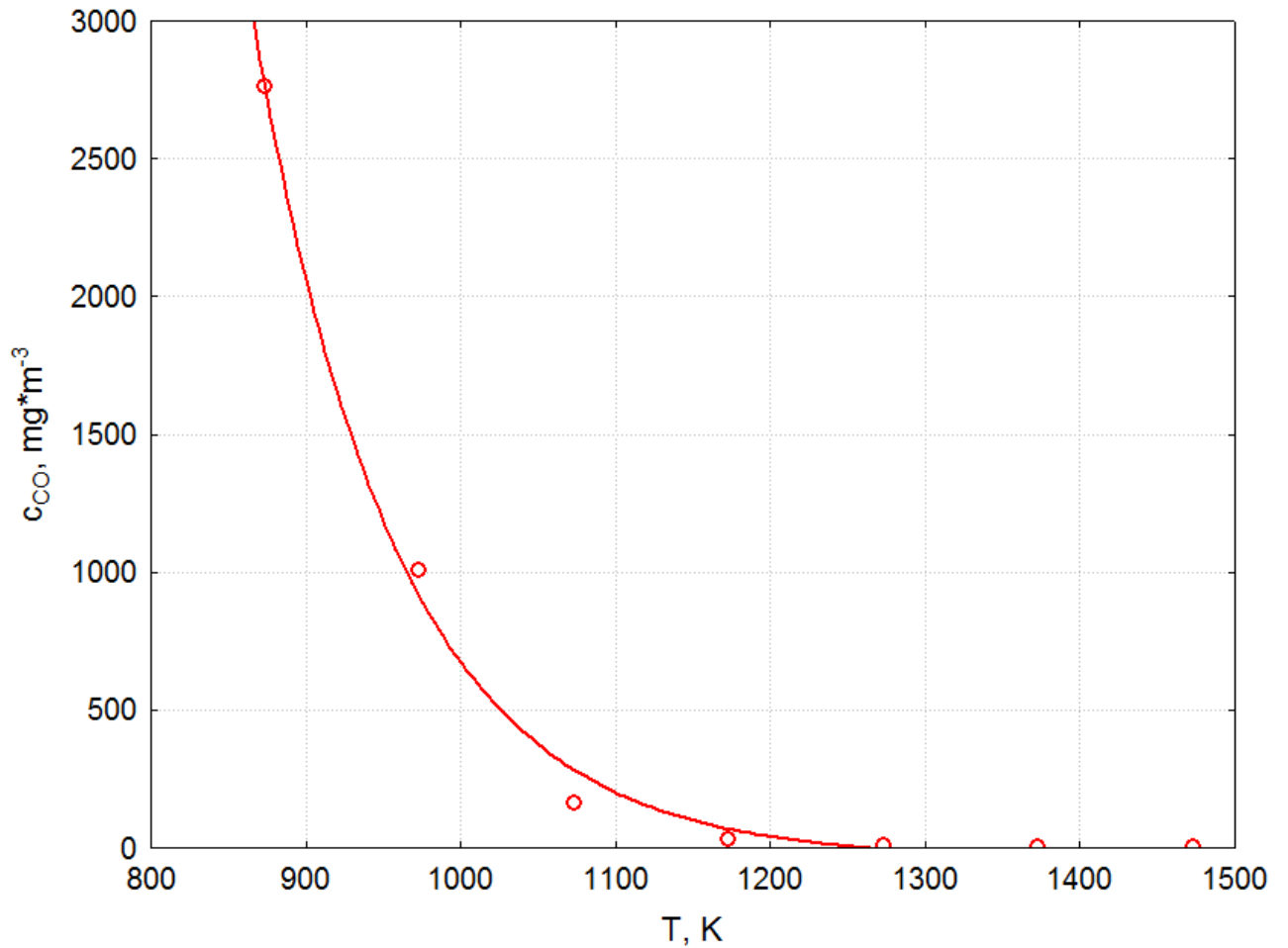


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z42. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliestrowych

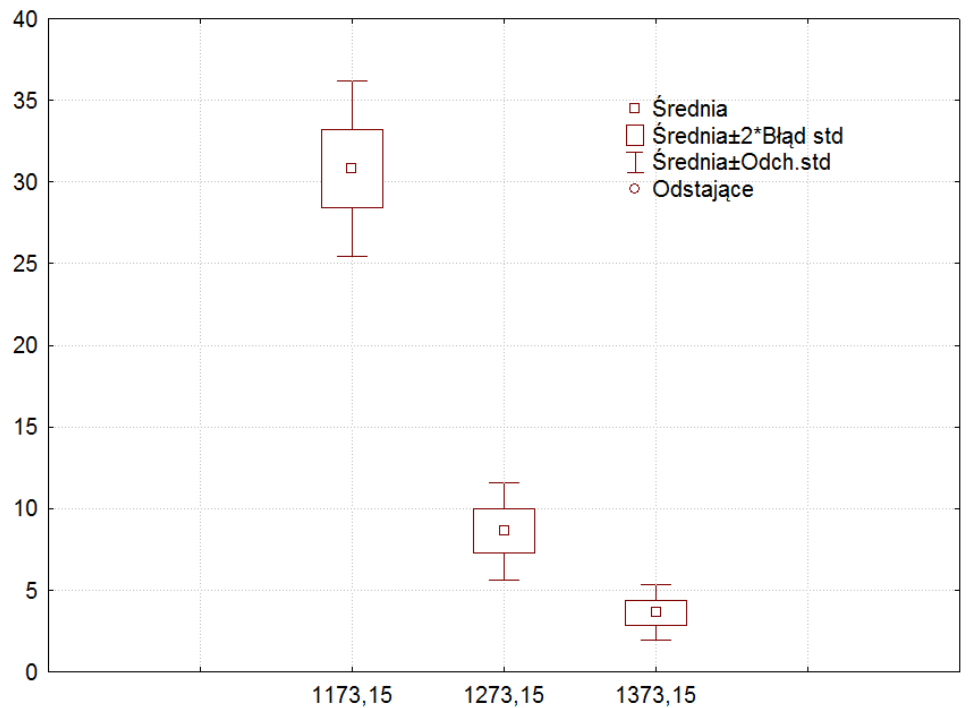
Zestaw wykresów



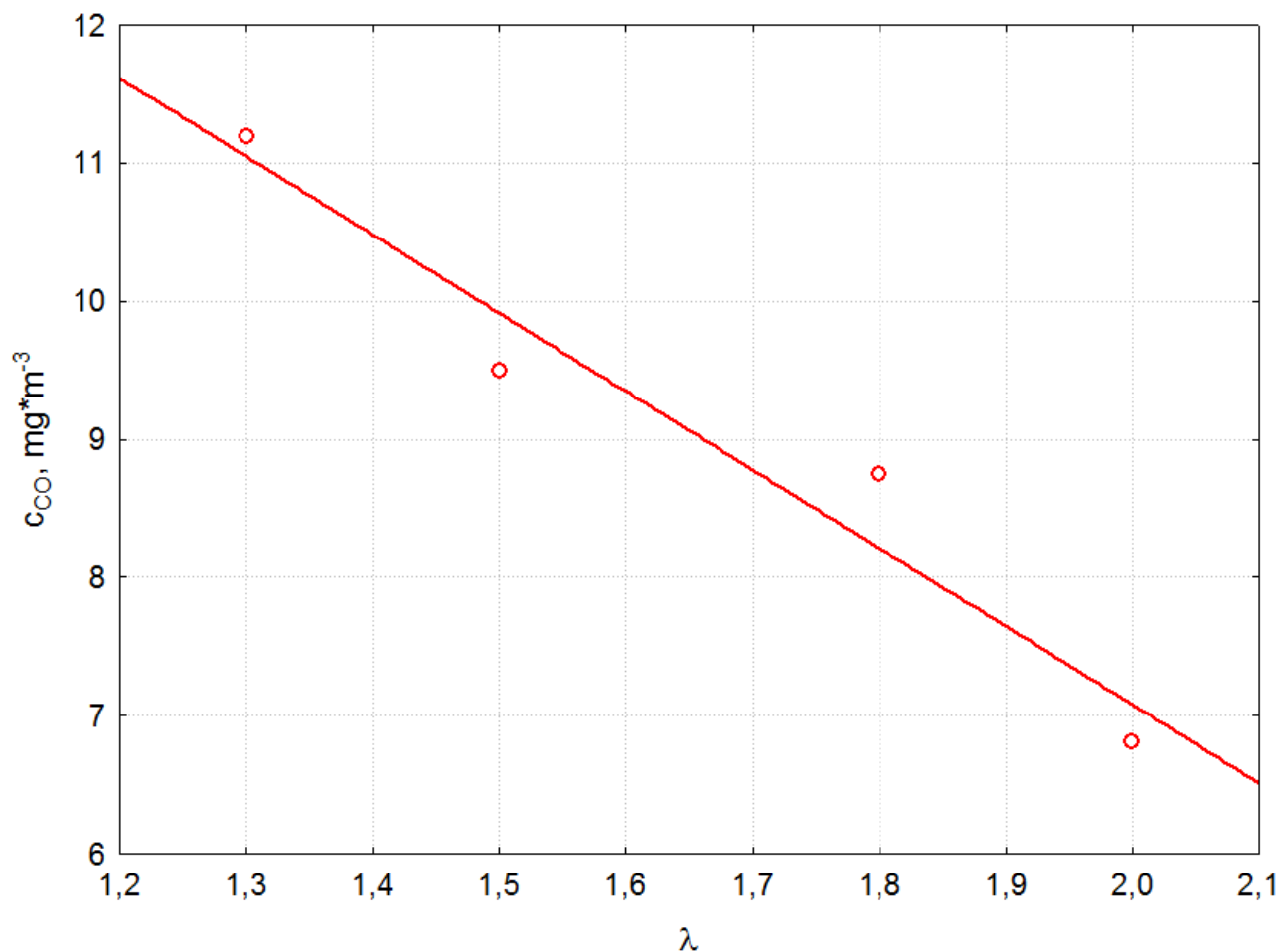
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

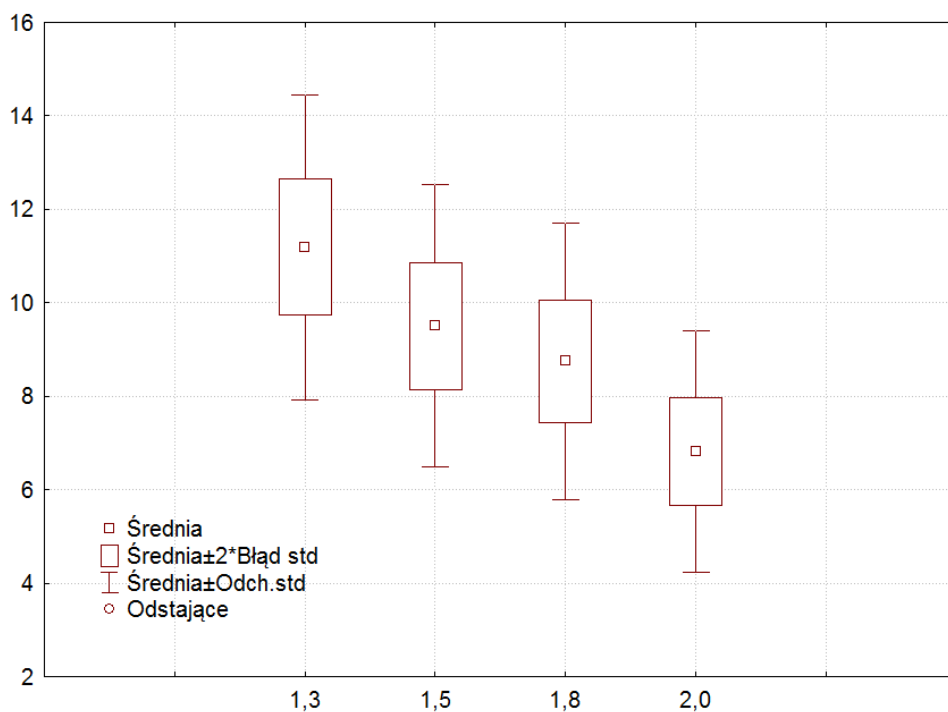
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z43. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych

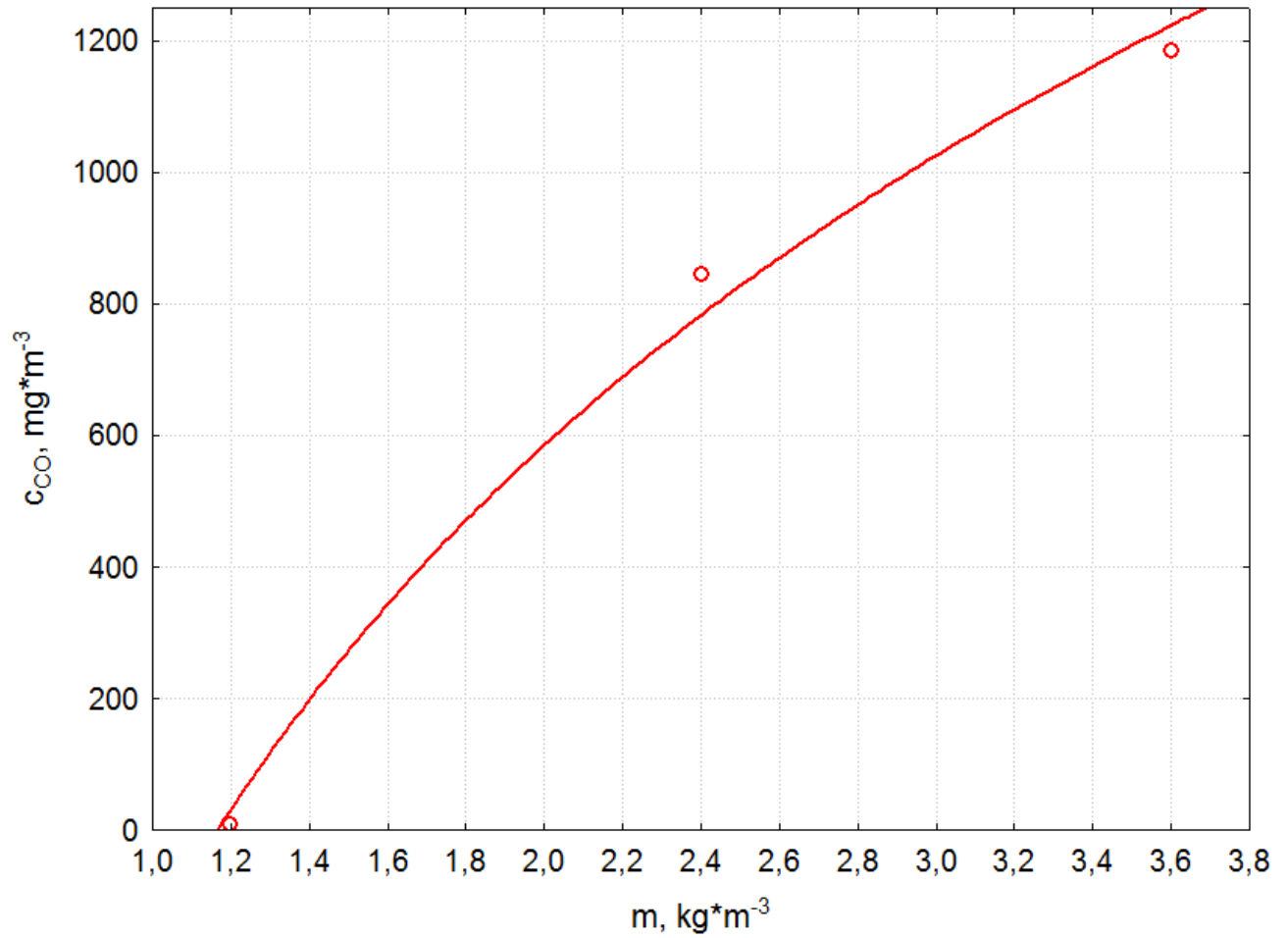


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

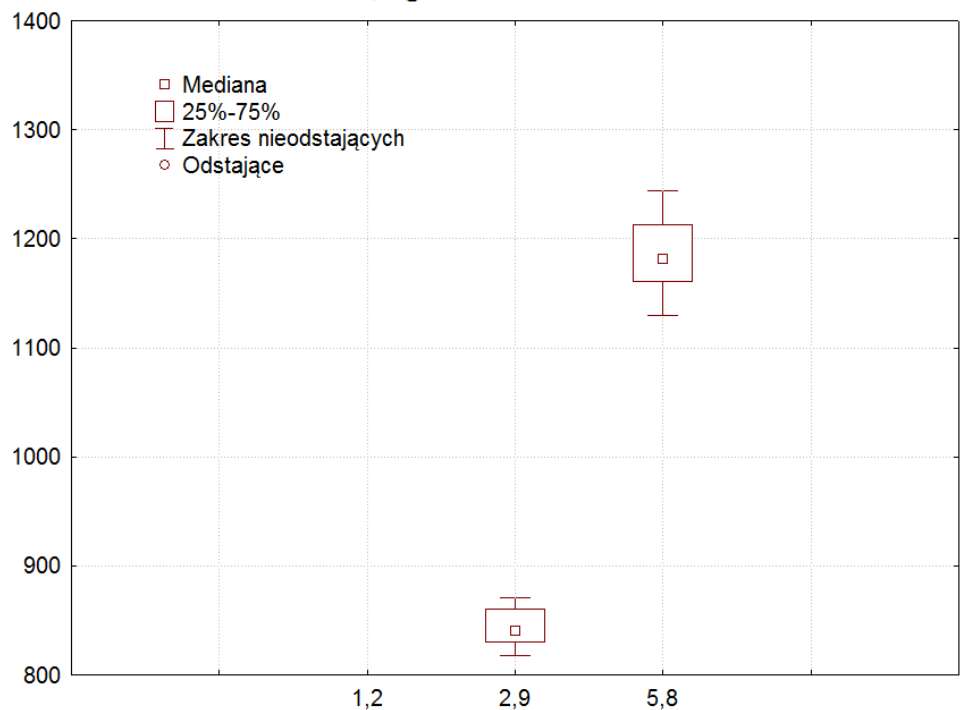


Rys. Z44. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Zestaw wykresów

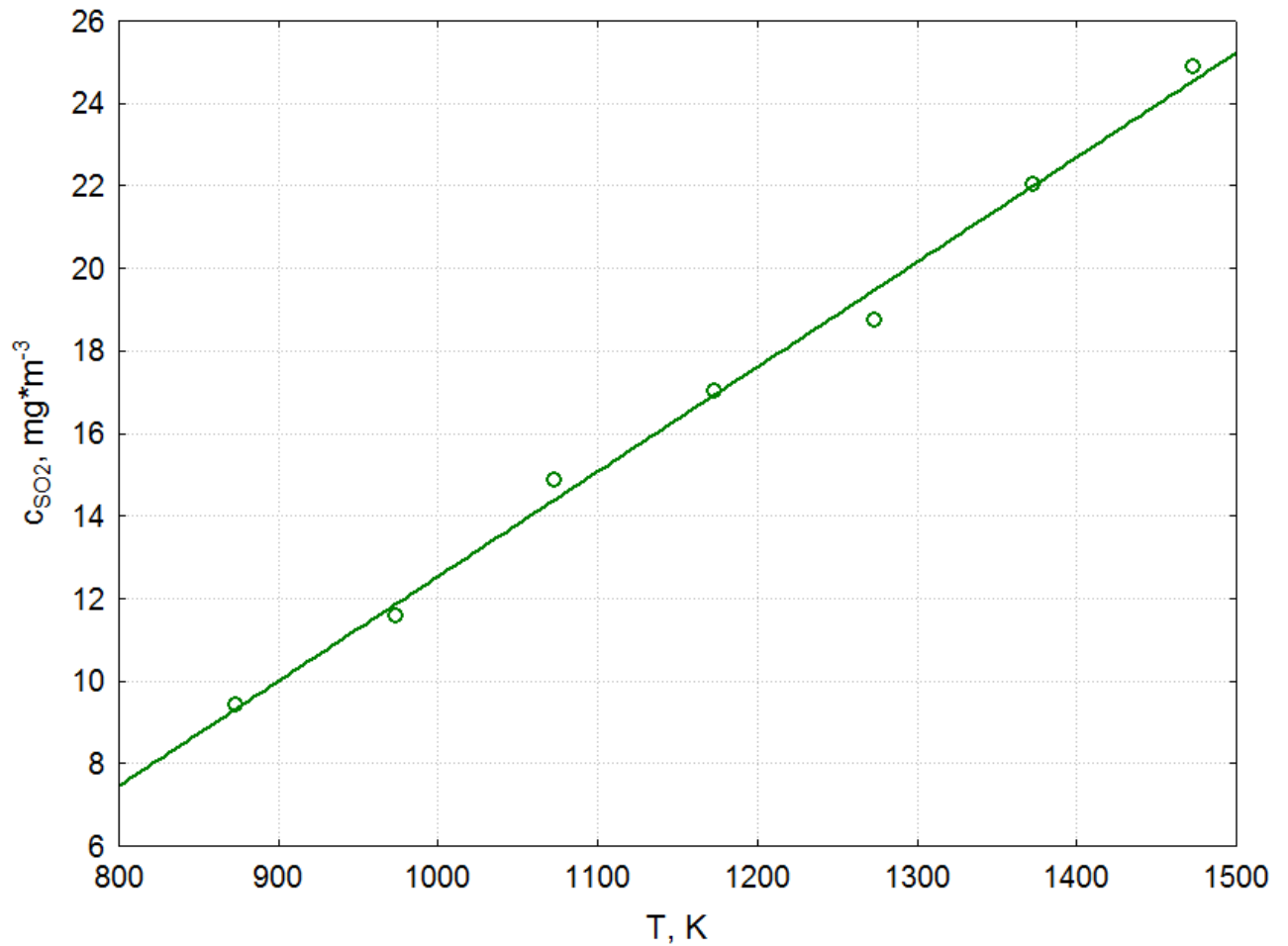


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

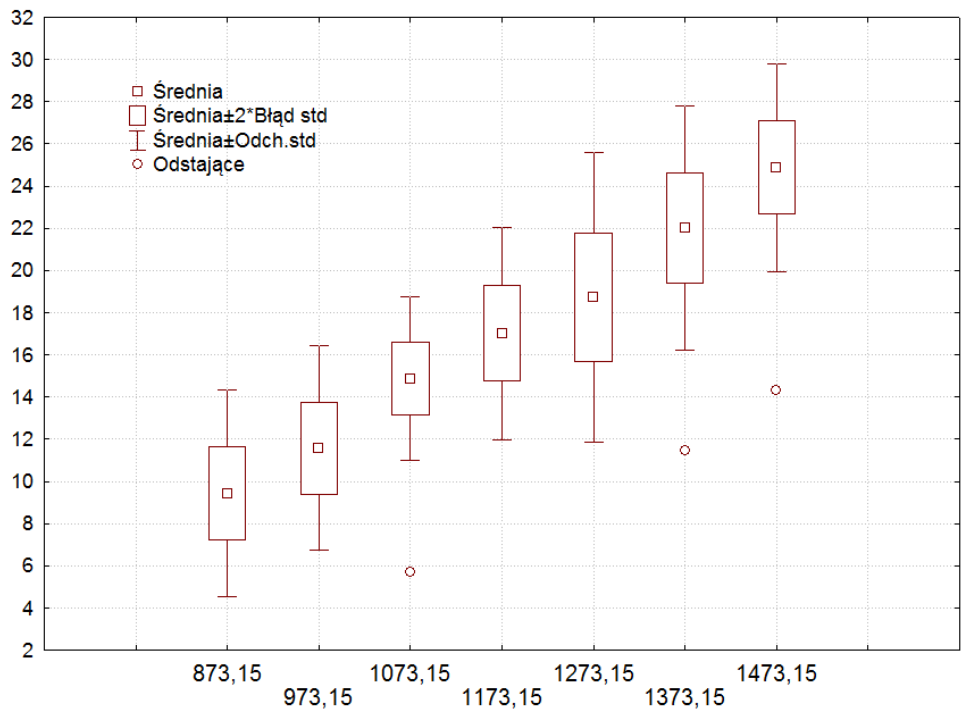


Rys. Z45. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliestrowych

Zestaw wykresów

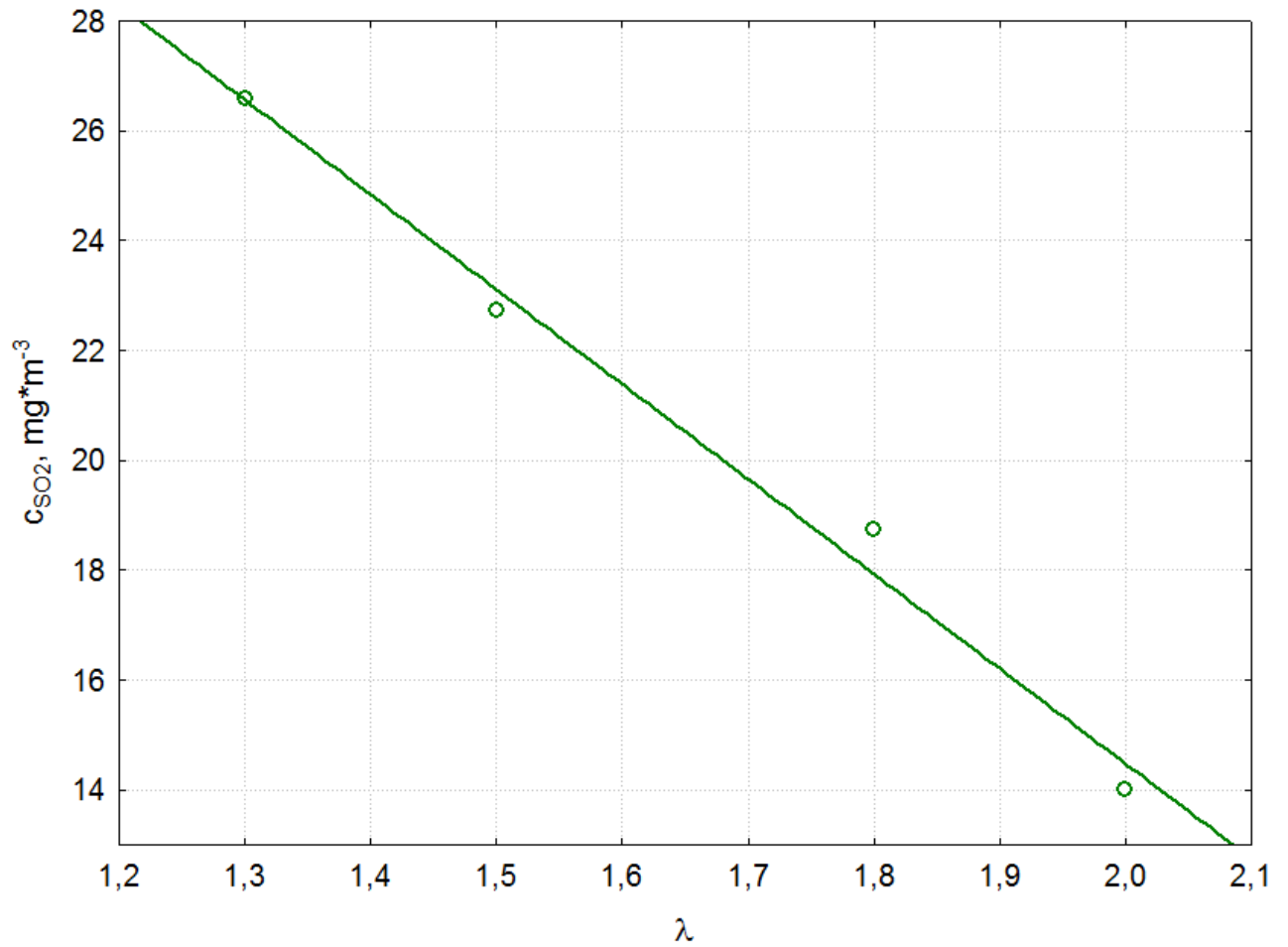


Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

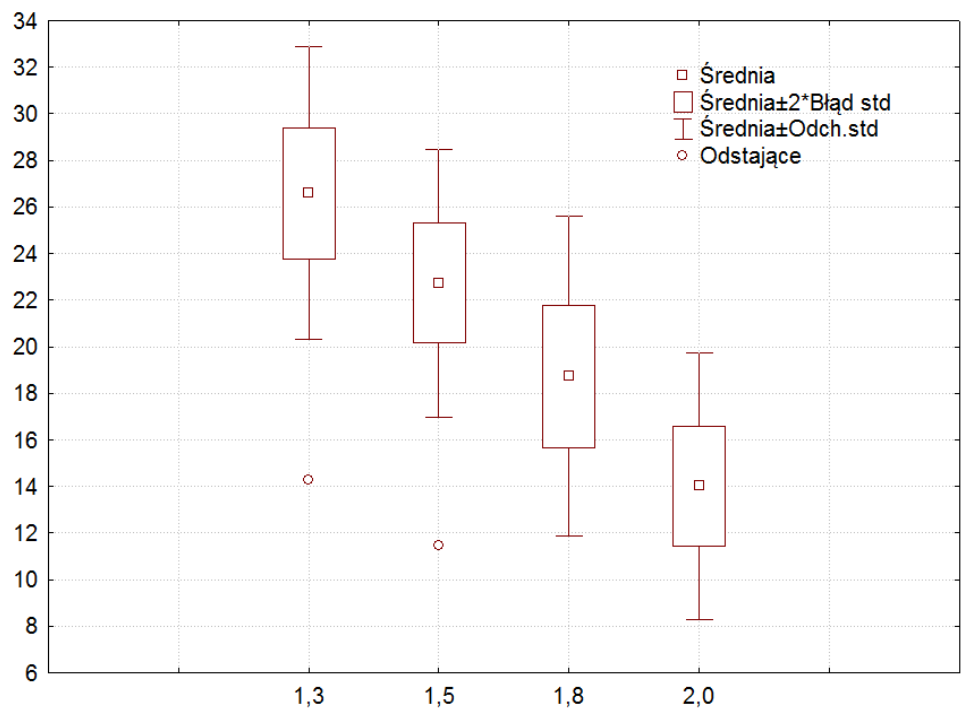


Rys. Z46. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

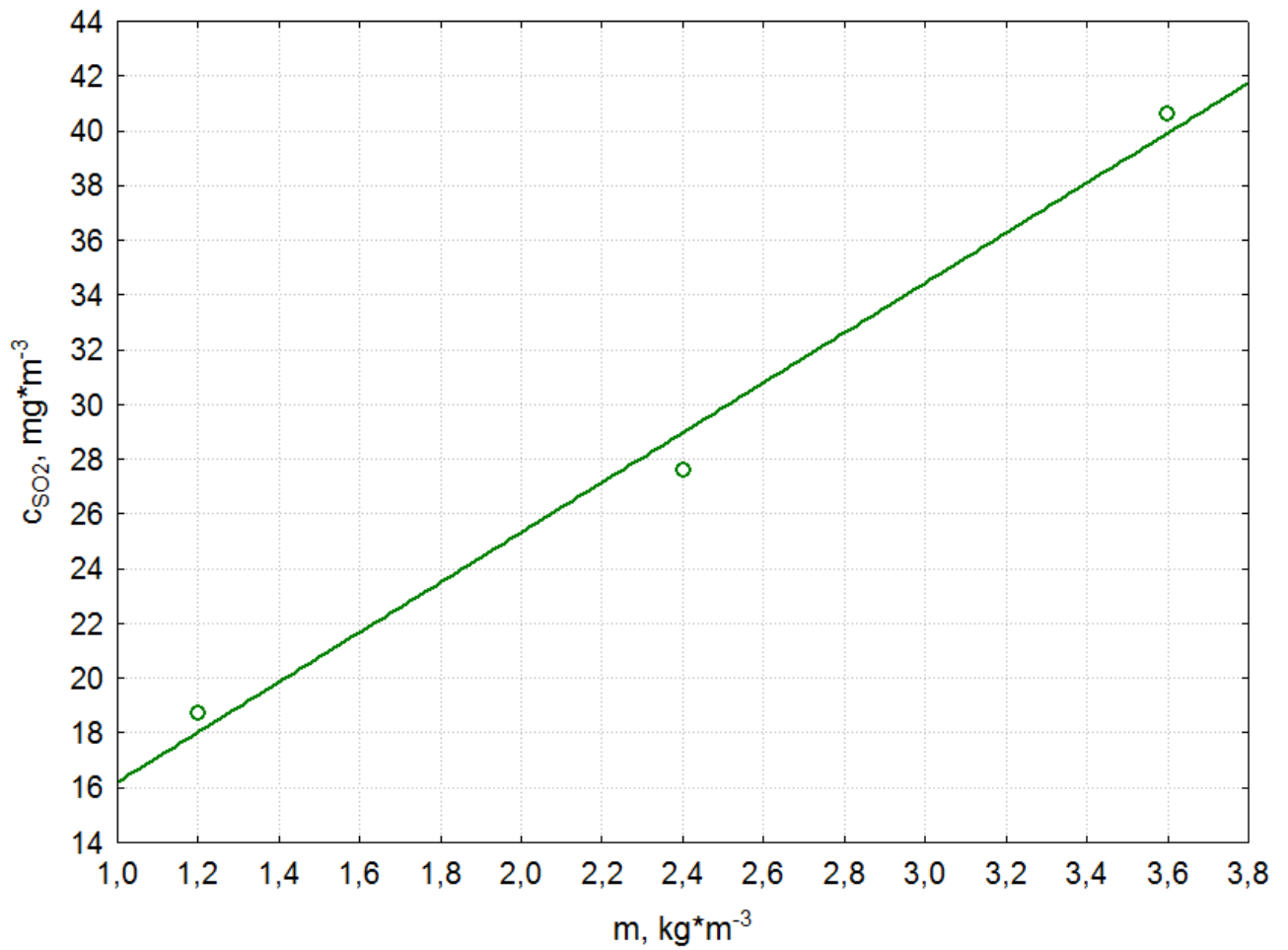
Zestaw wykresów



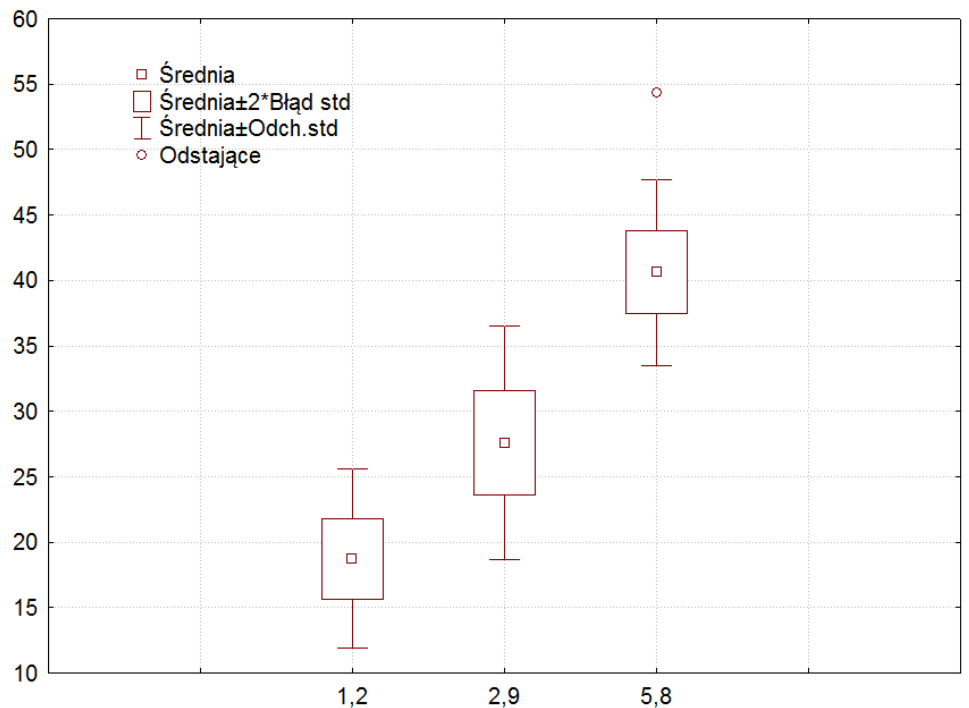
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot m^{-3}$



Rys. Z47. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

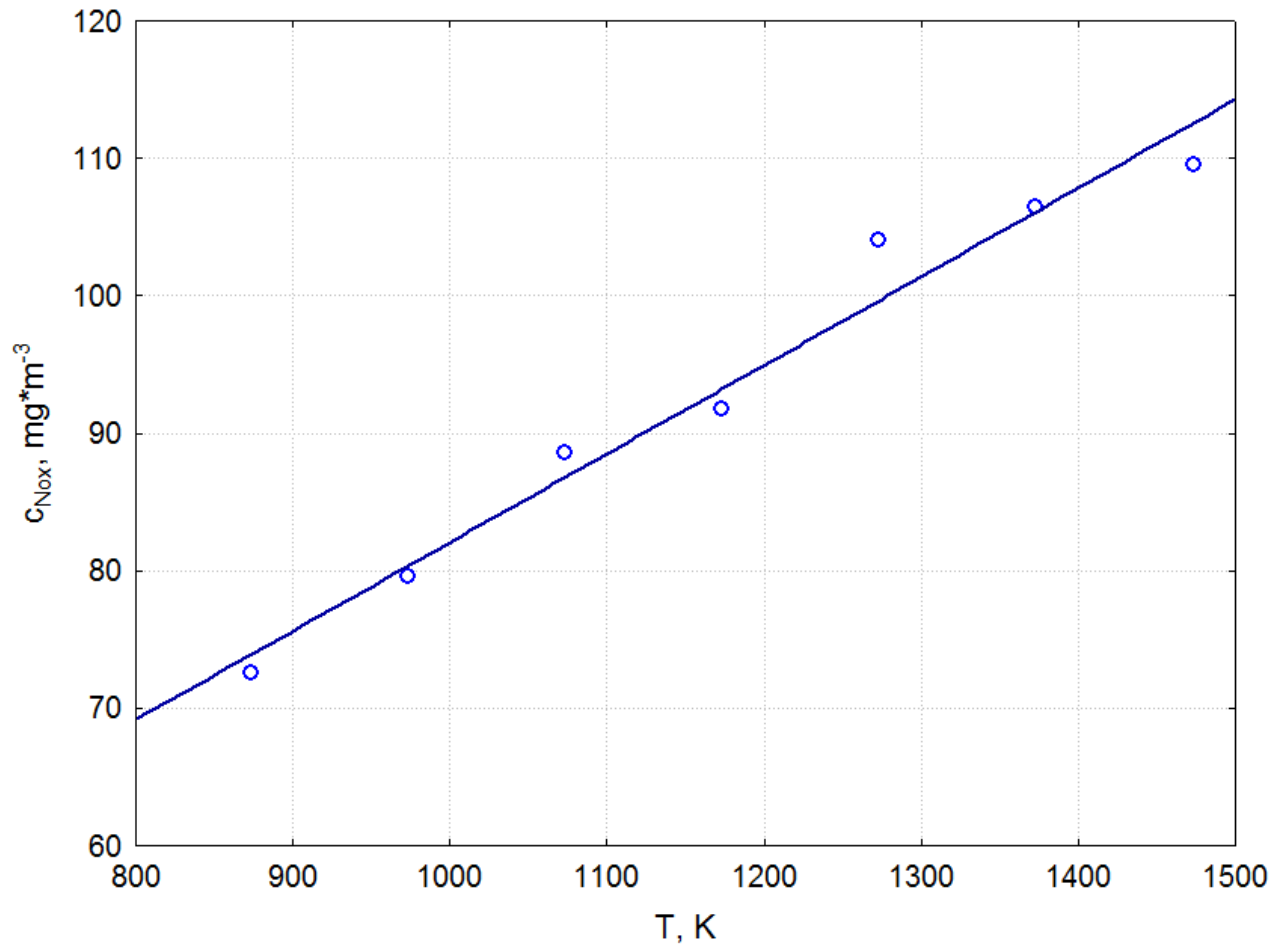


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

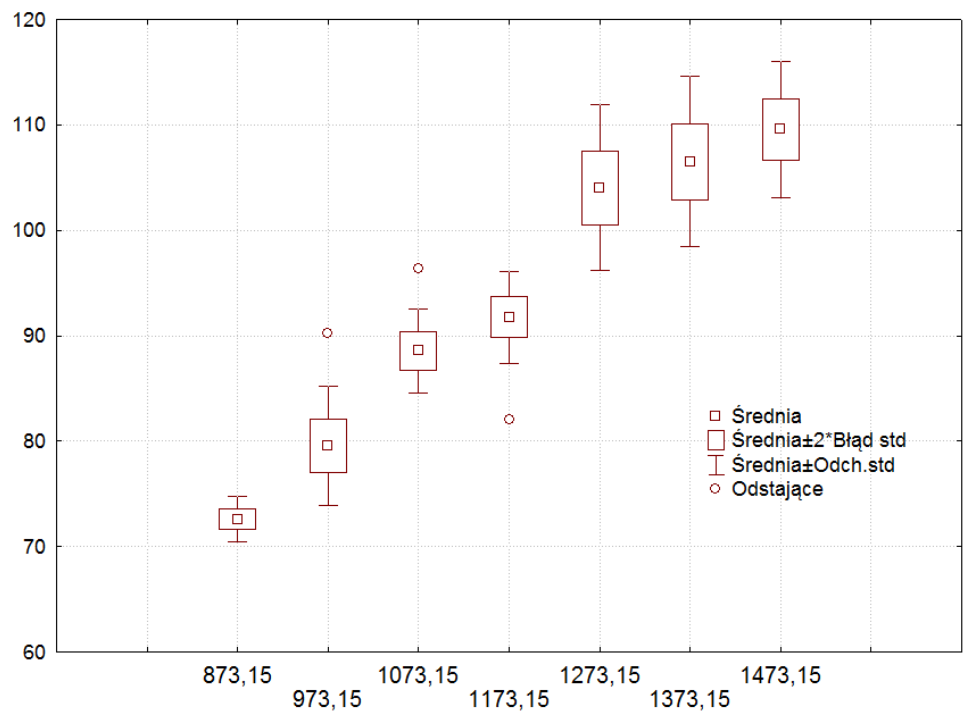


Rys. Z48. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Zestaw wykresów

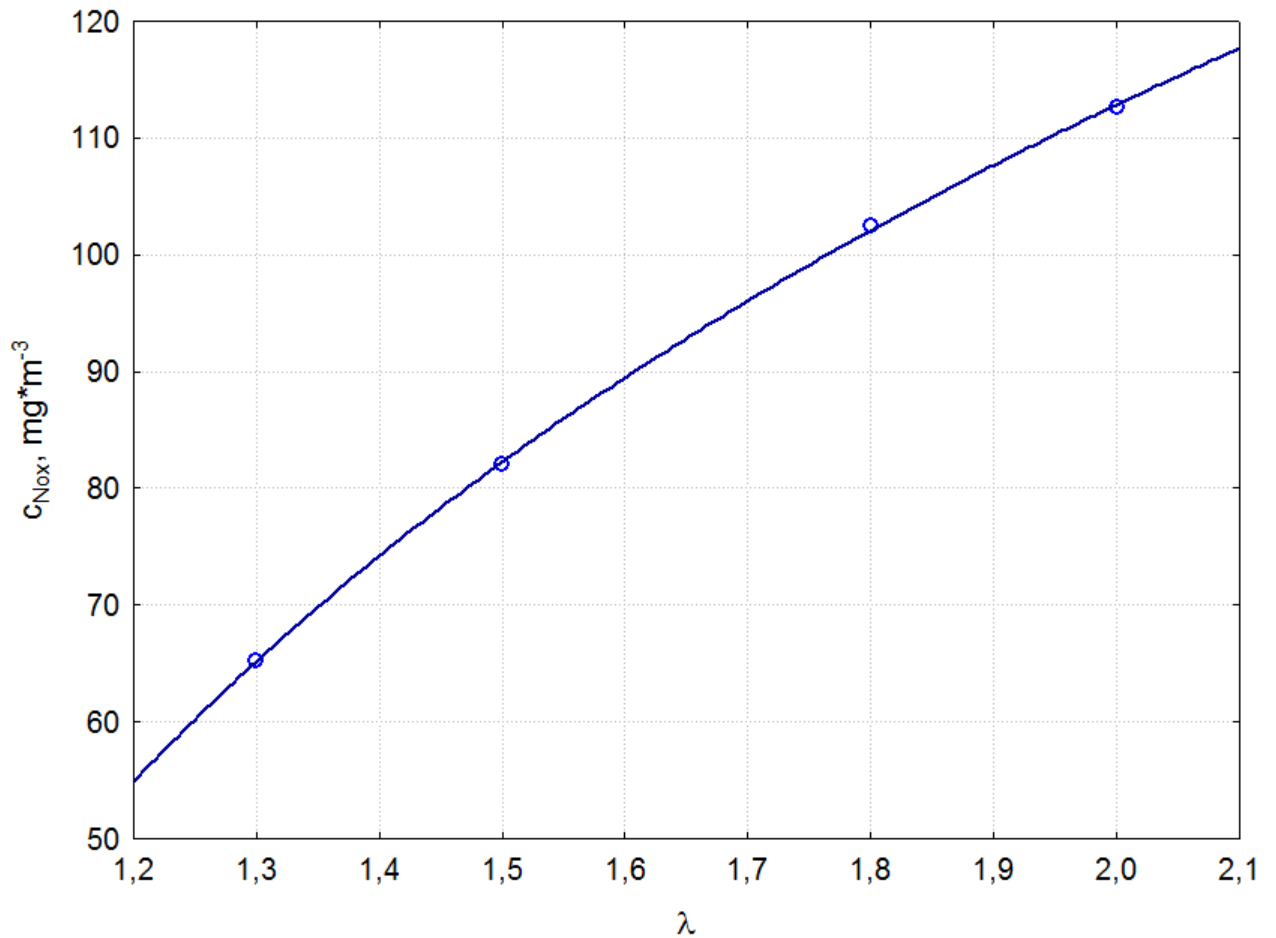


Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

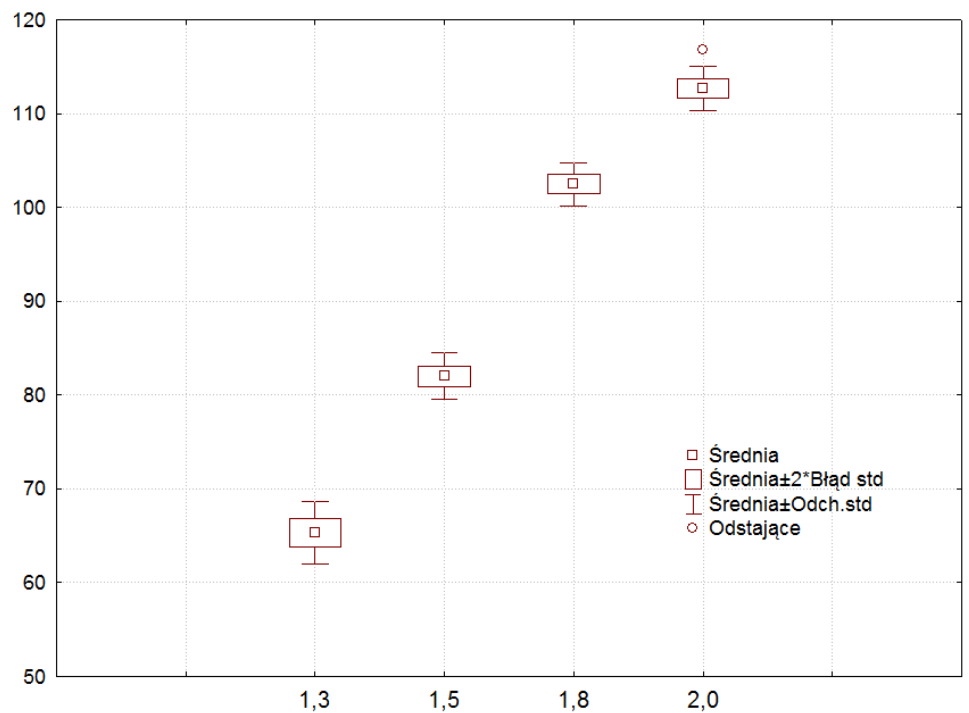


Rys. Z49. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Zestaw wykresów

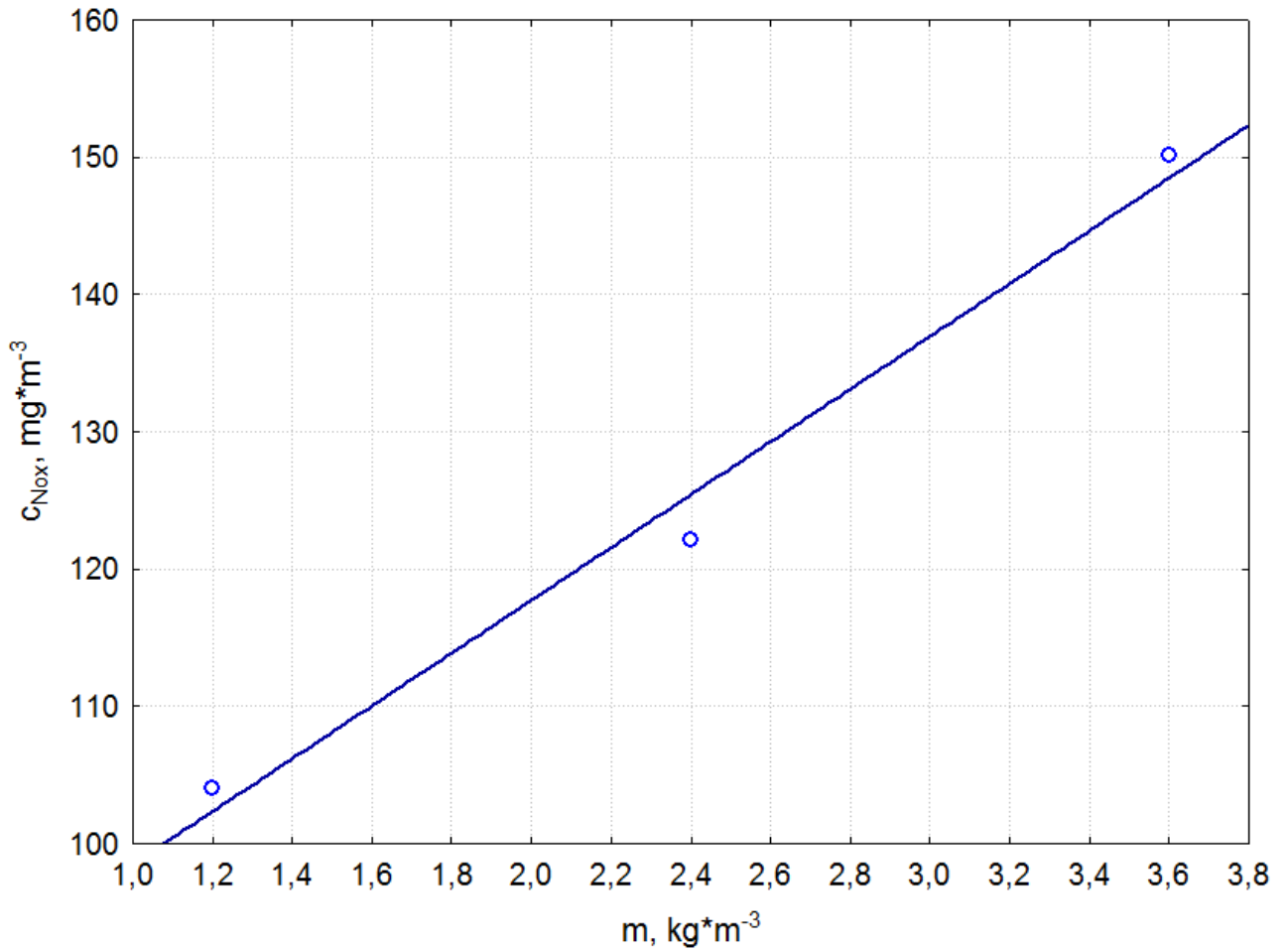


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

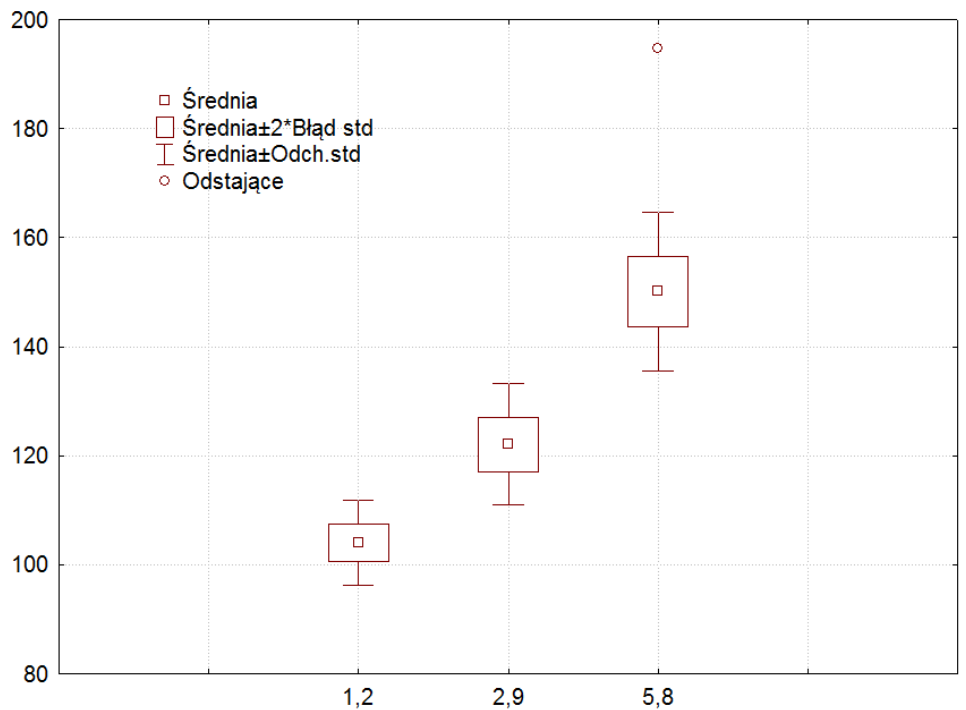


Rys. Z50. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Zestaw wykresów

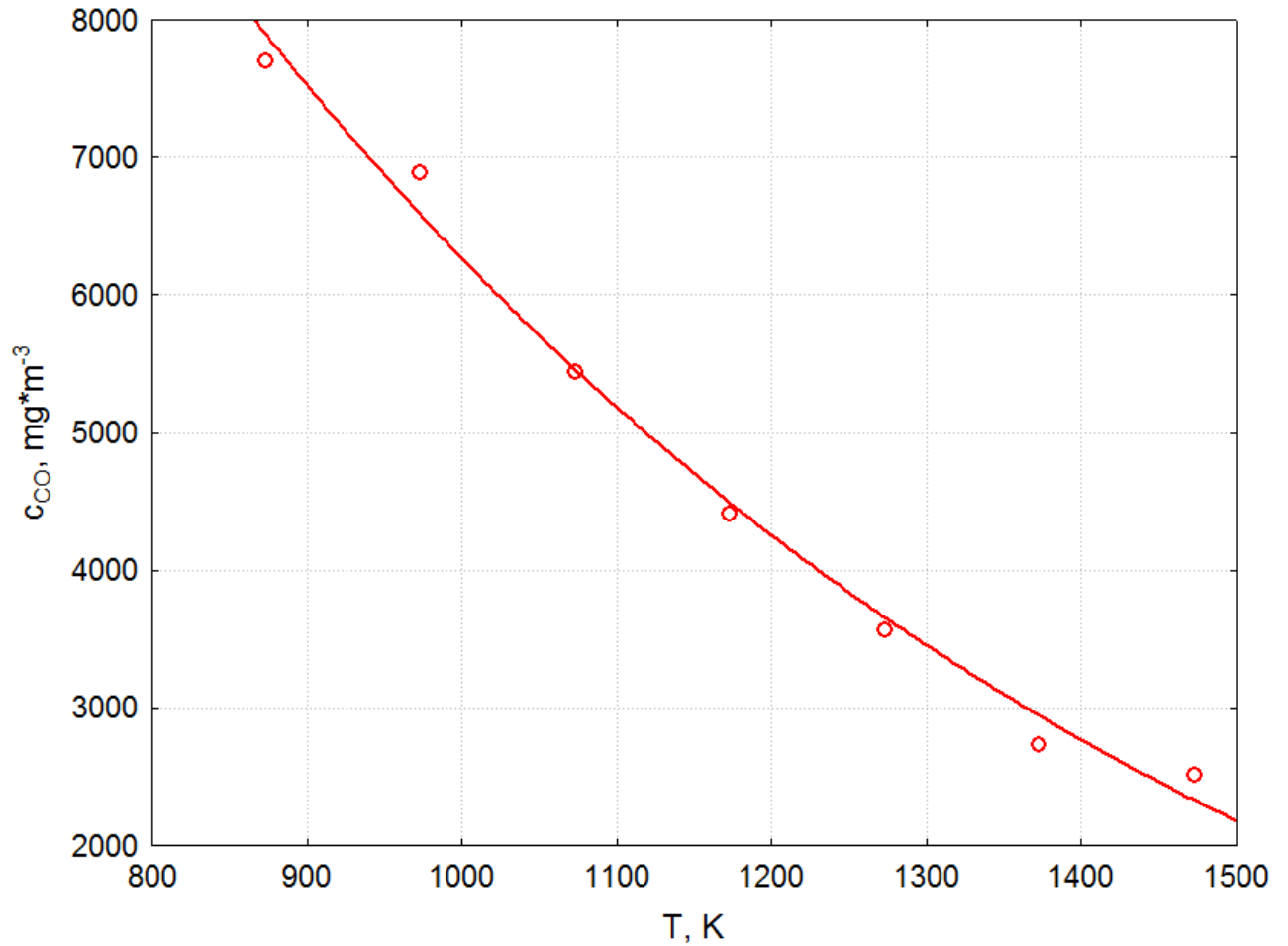


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z51. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliolefinowych

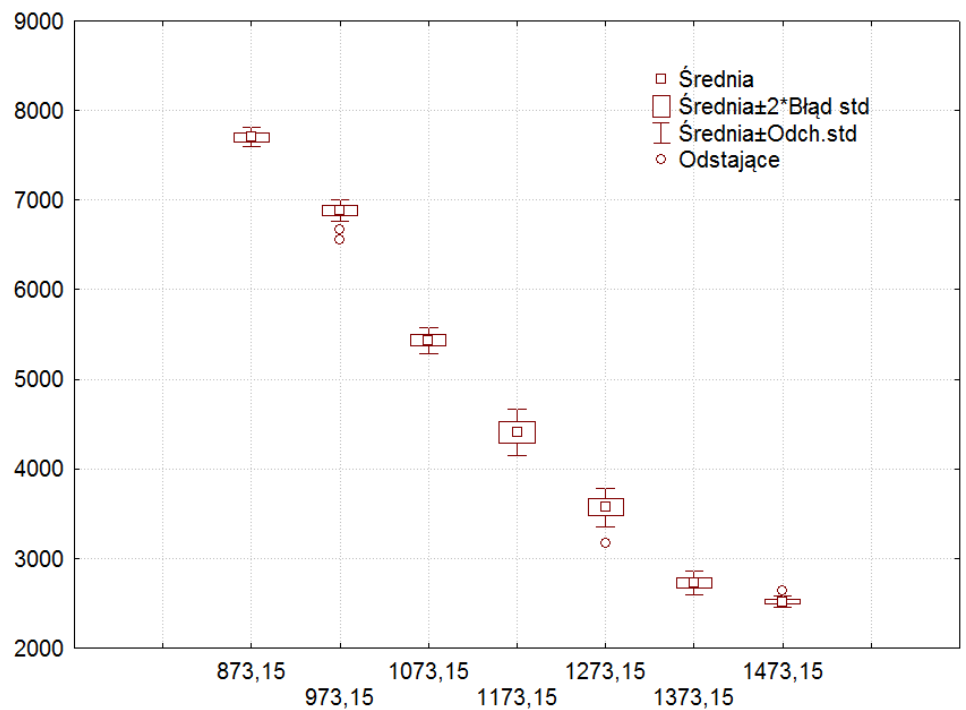
Zestaw wykresów



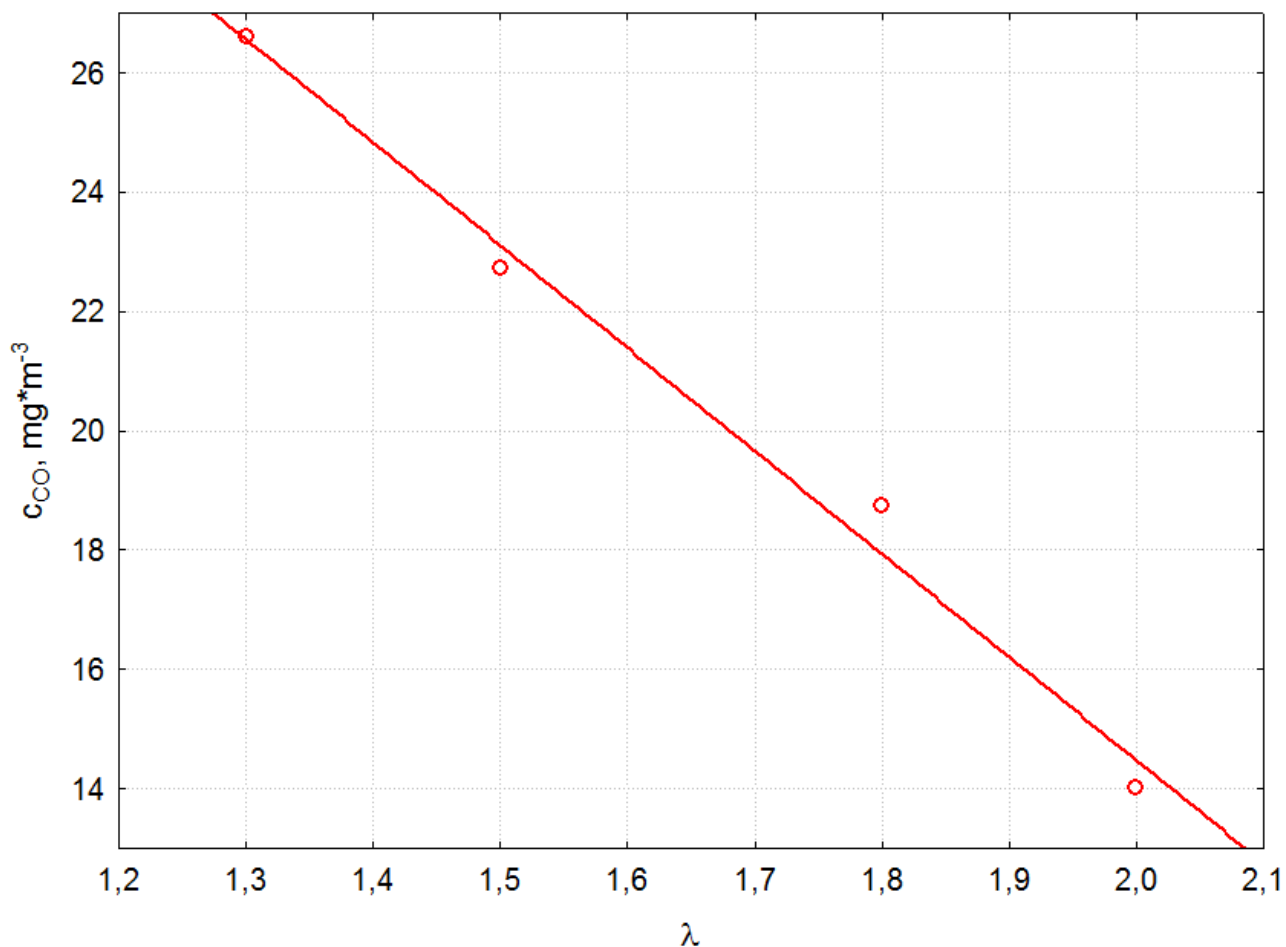
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

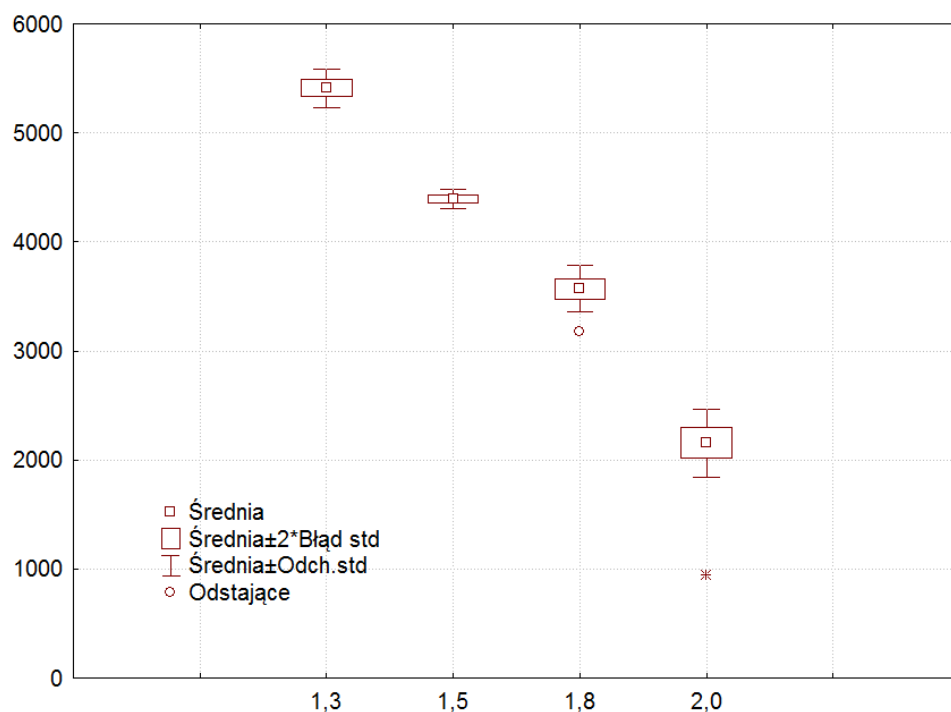
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z52. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

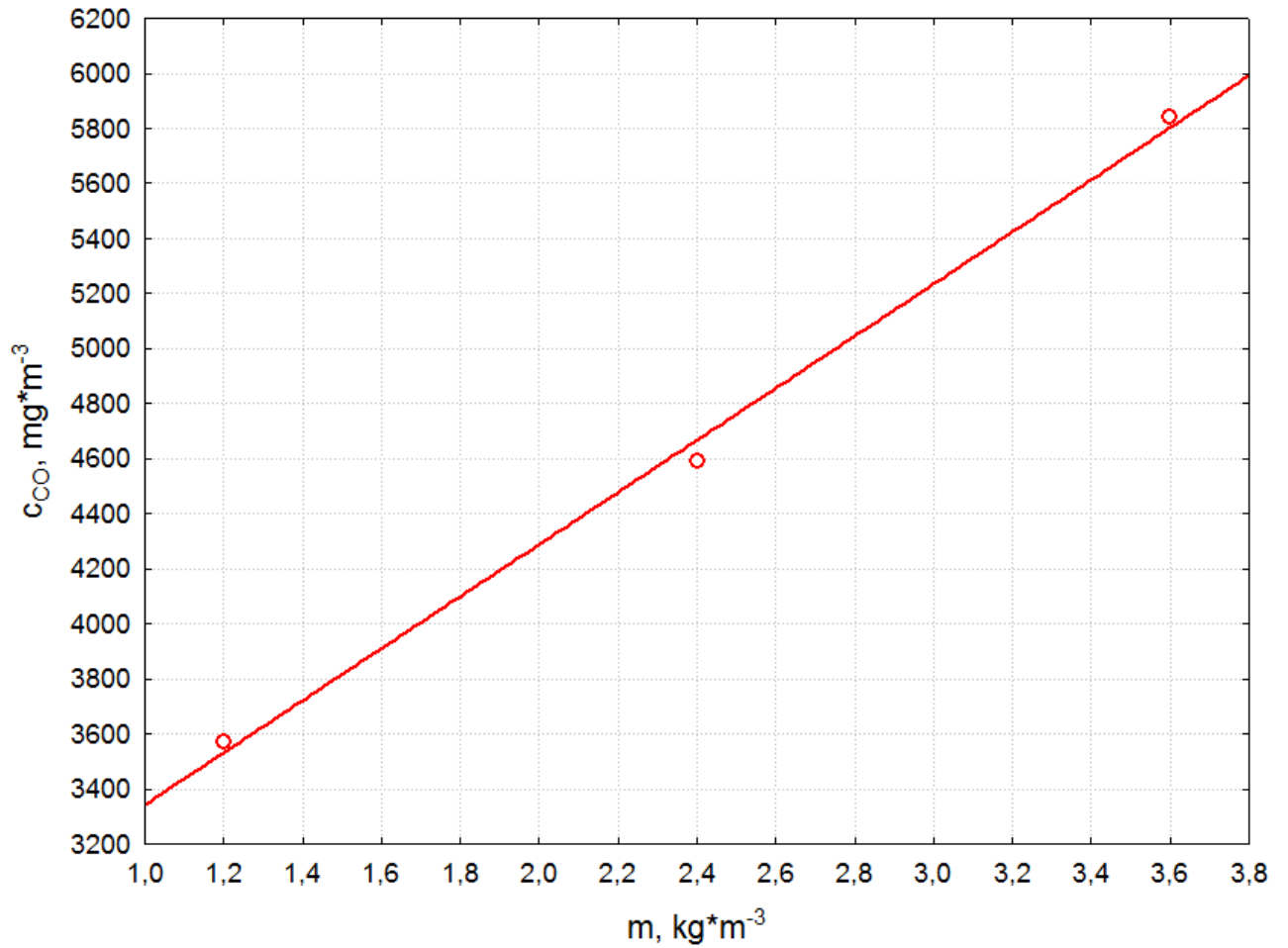


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

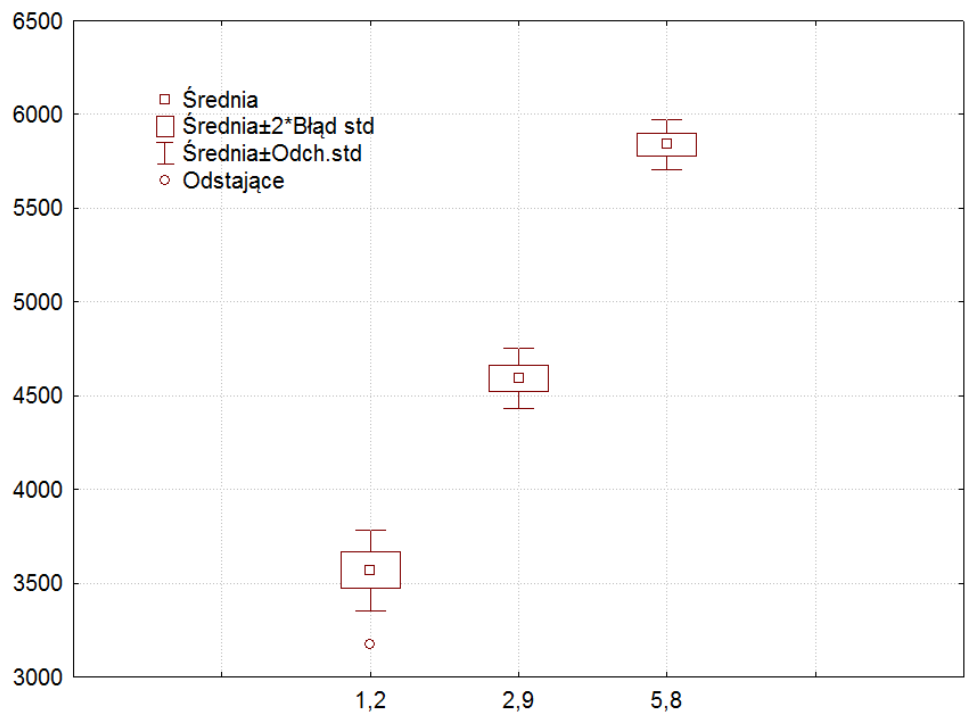


Rys. Z53. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Zestaw wykresów

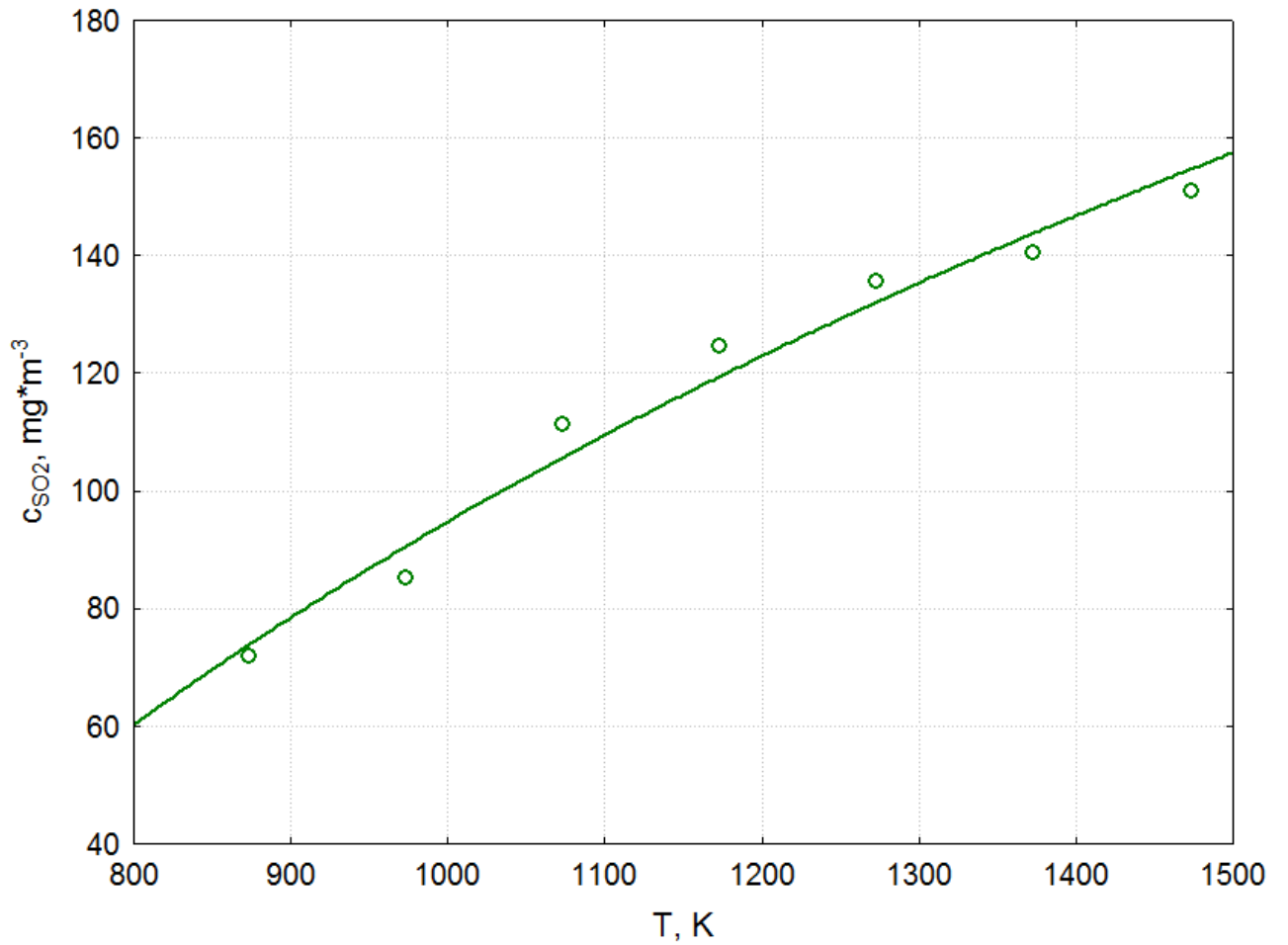


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$

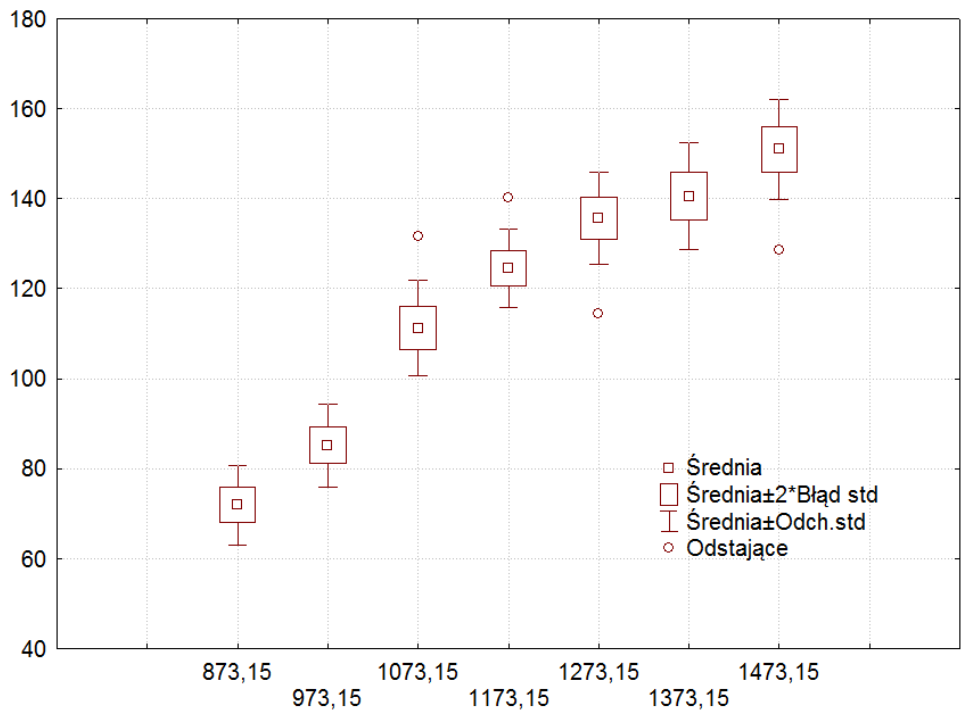


Rys. Z54. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliolefinowych

Zestaw wykresów

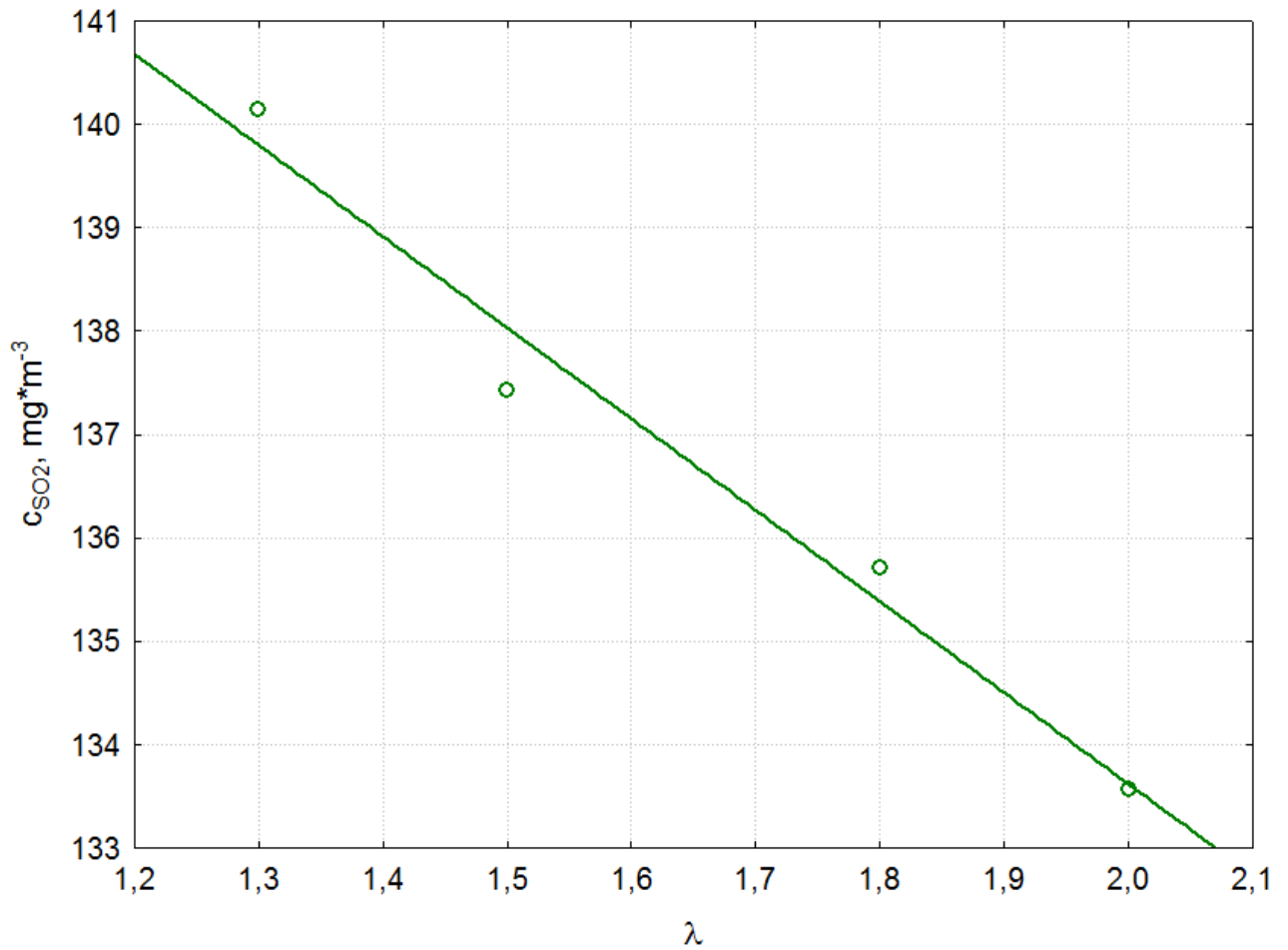


Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

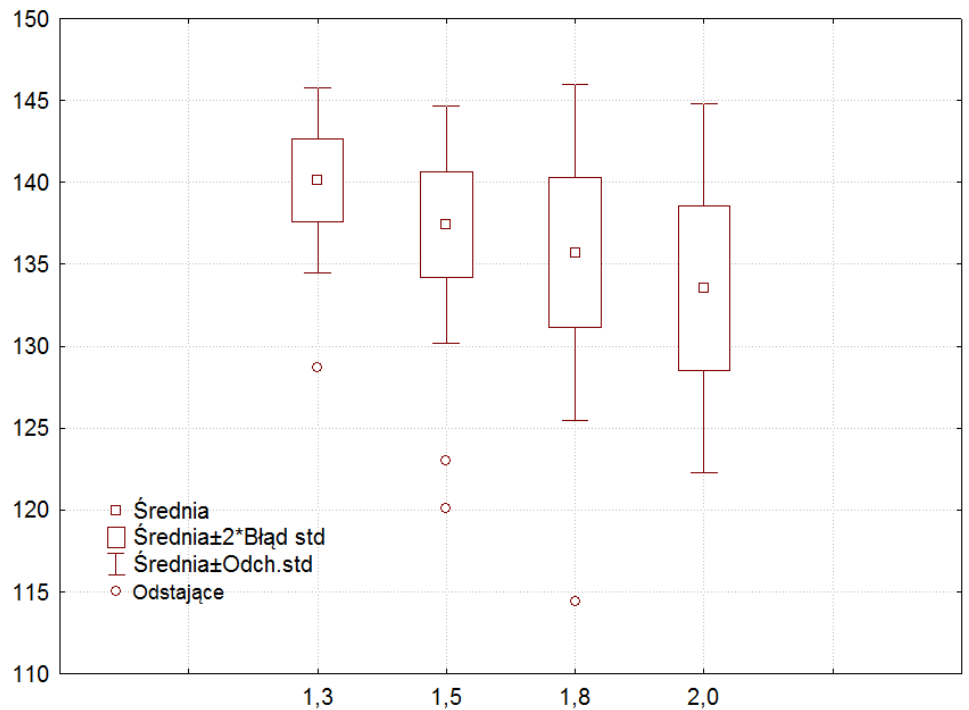


Rys. Z55. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Zestaw wykresów

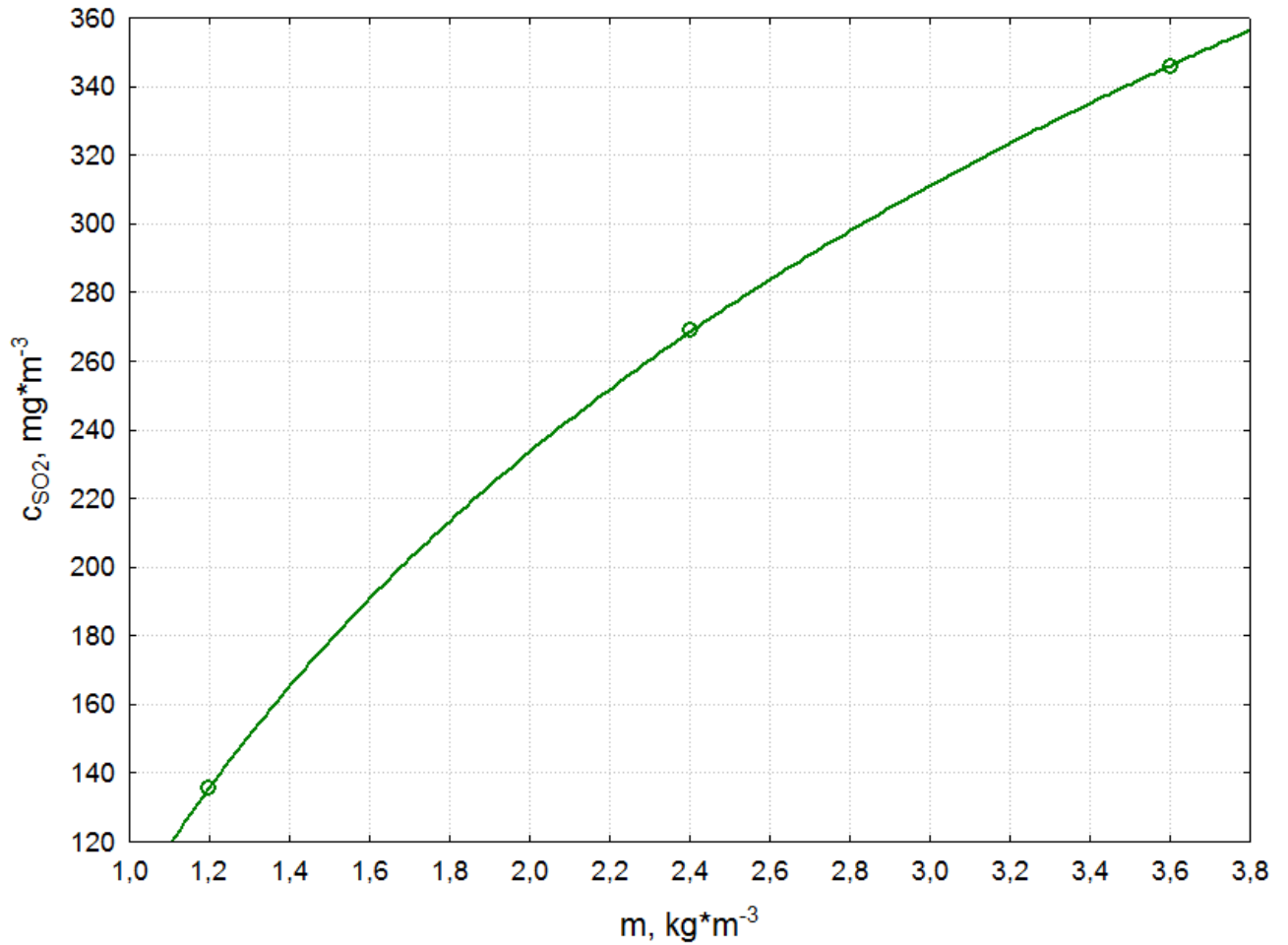


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

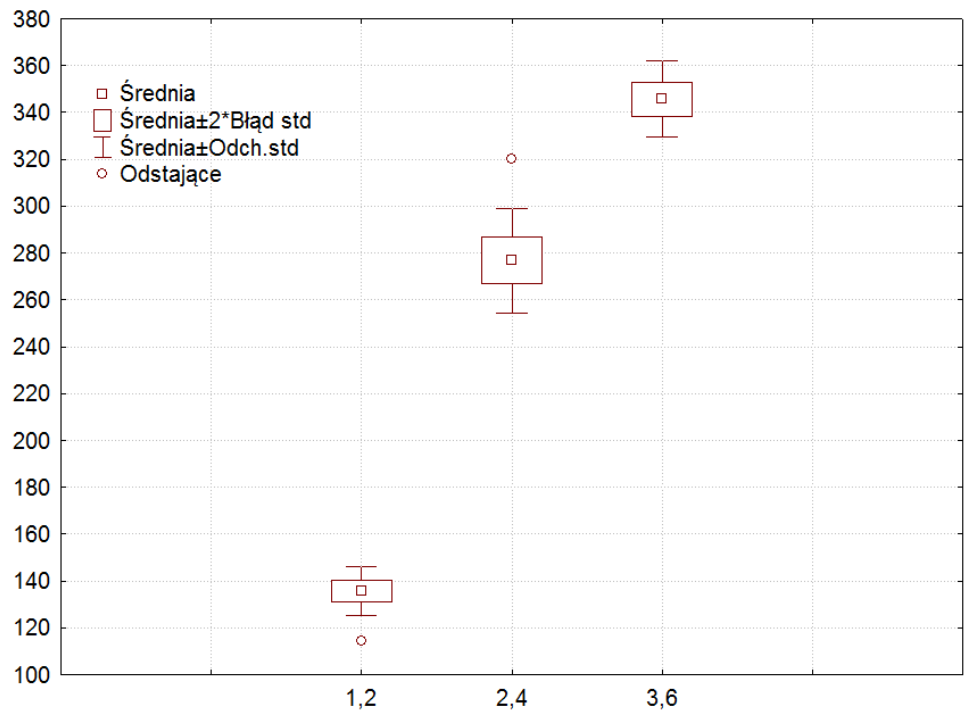


Rys. Z56. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Zestaw wykresów

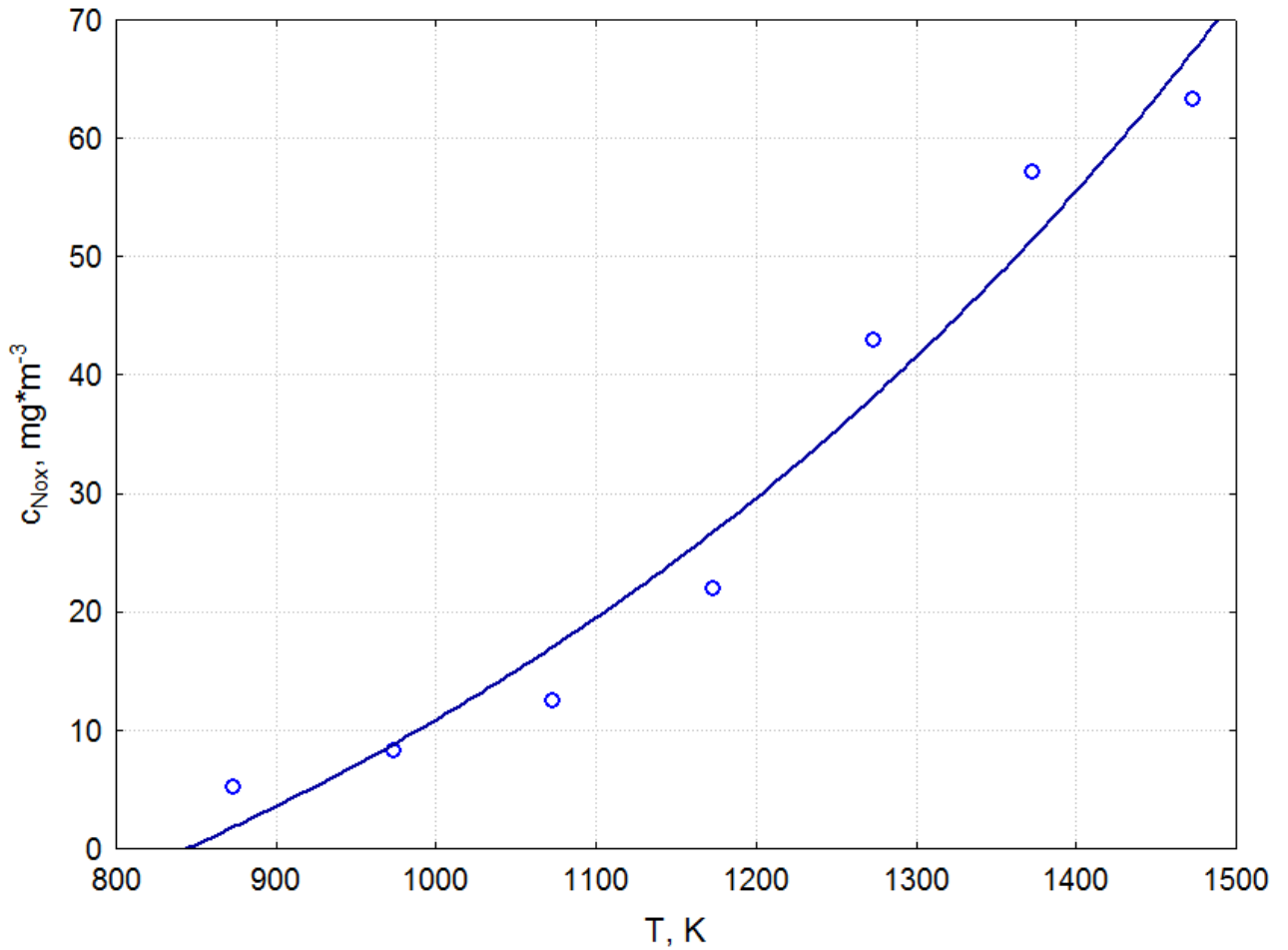


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

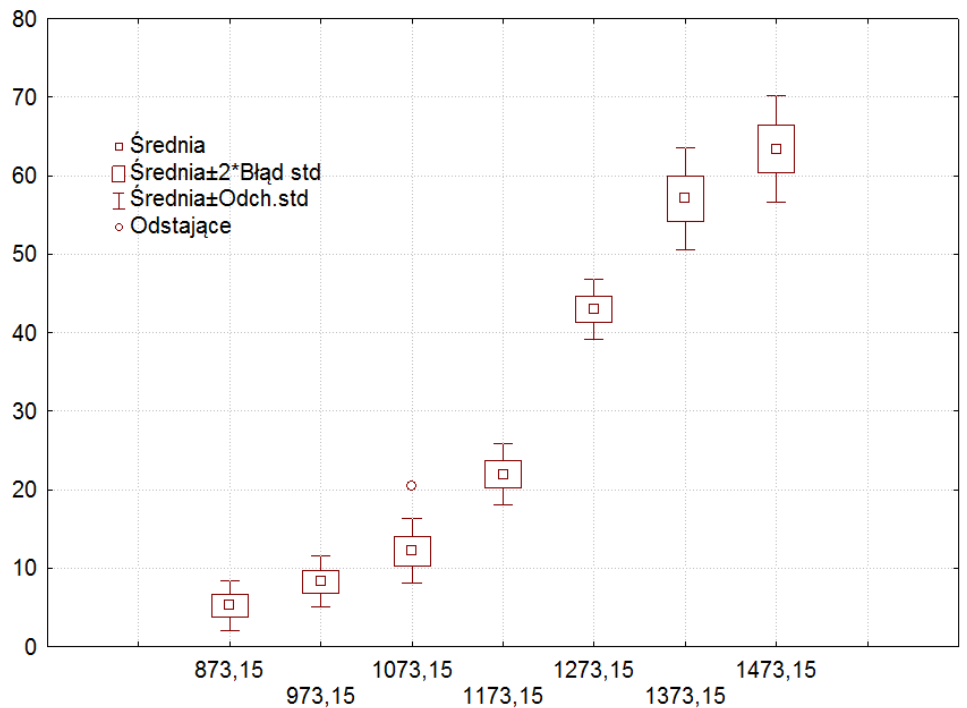


Rys. Z57. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Zestaw wykresów

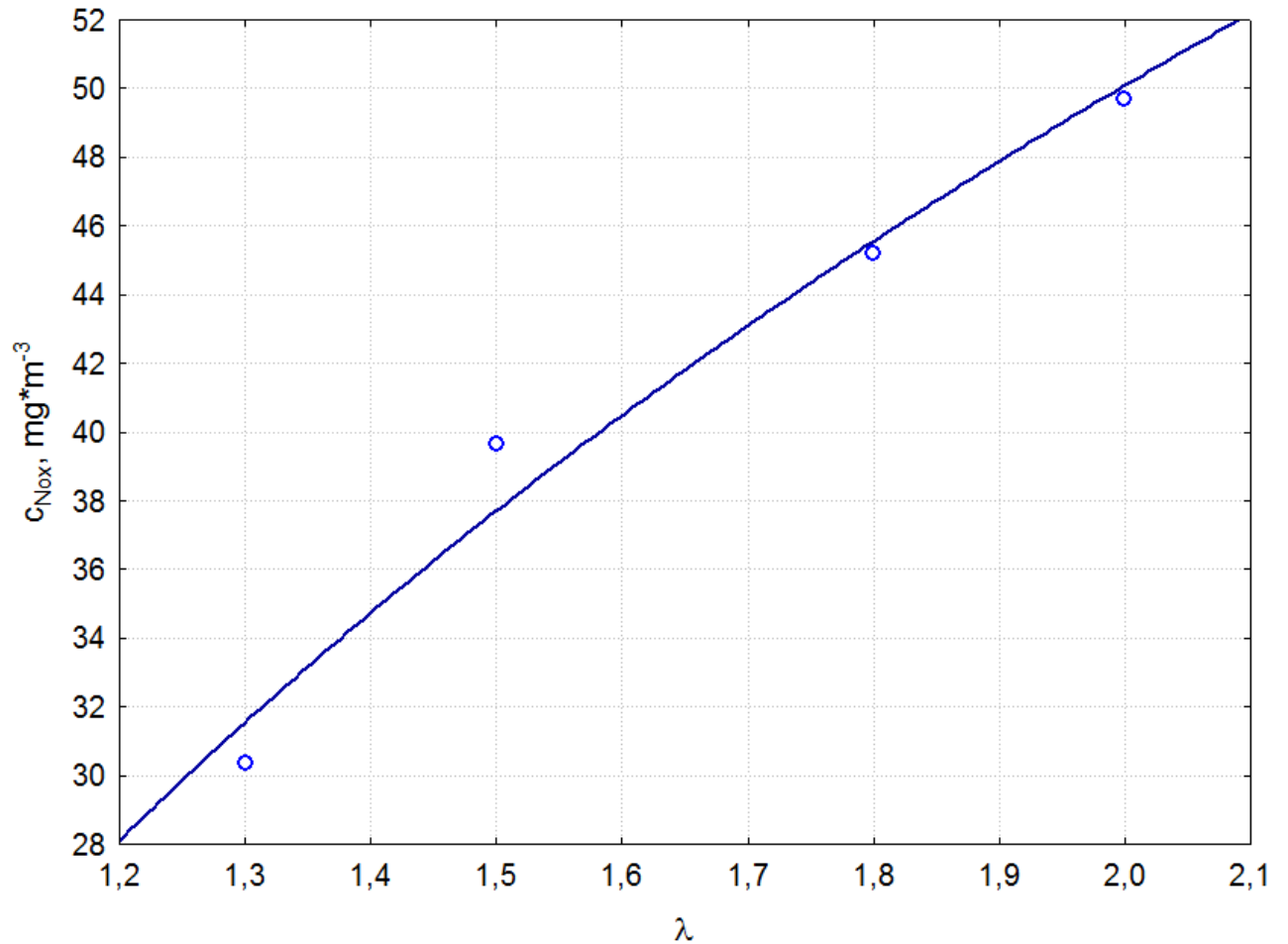


Parametry stałe:
 $\lambda = 1,8$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

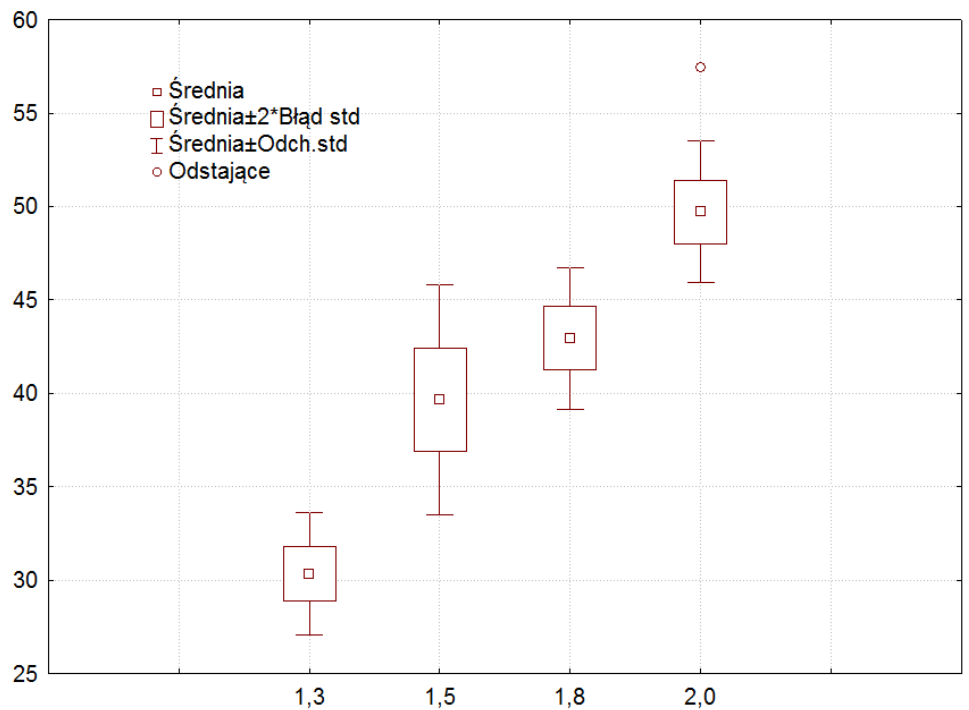


Rys. Z58. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Zestaw wykresów

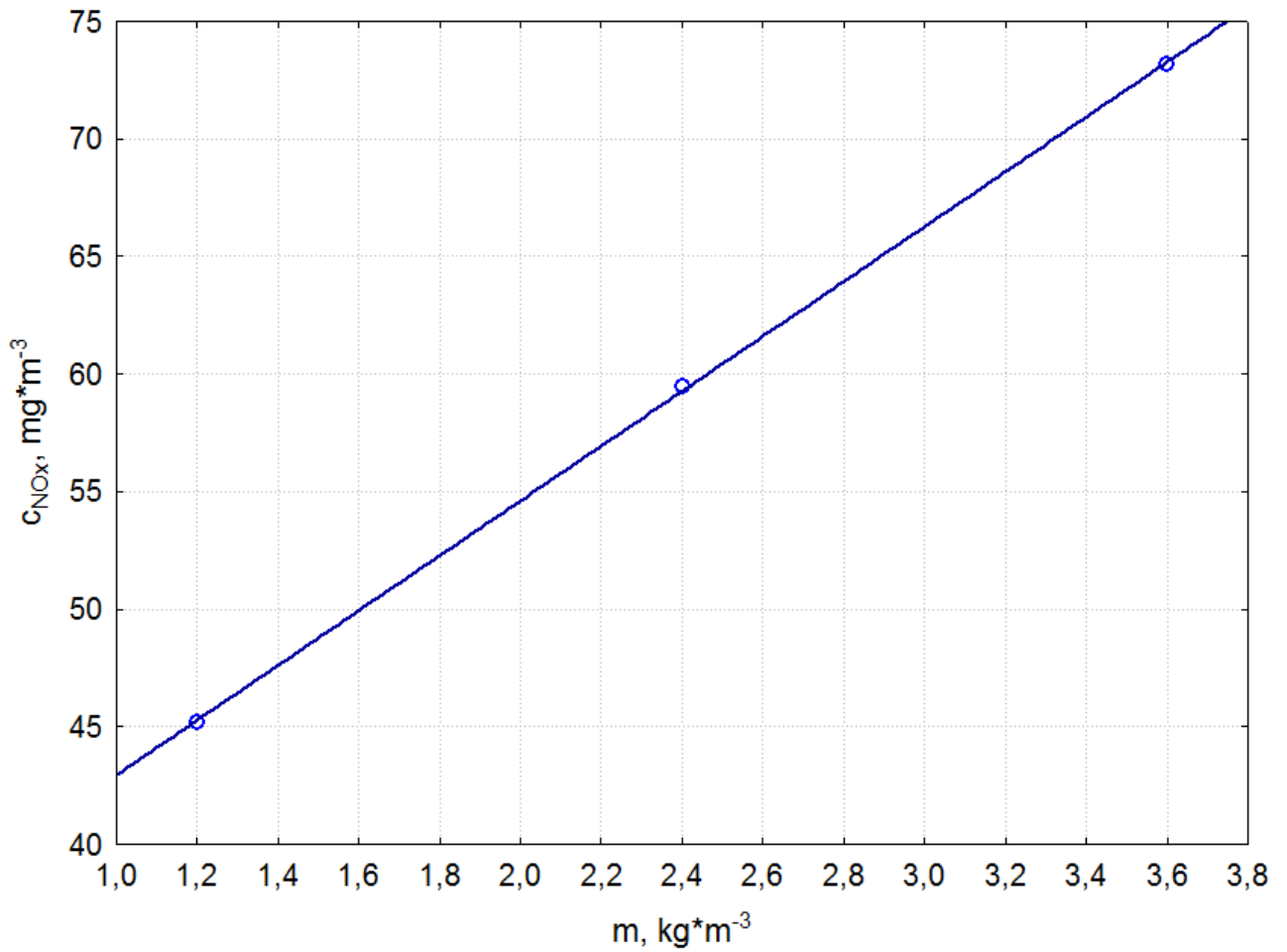


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

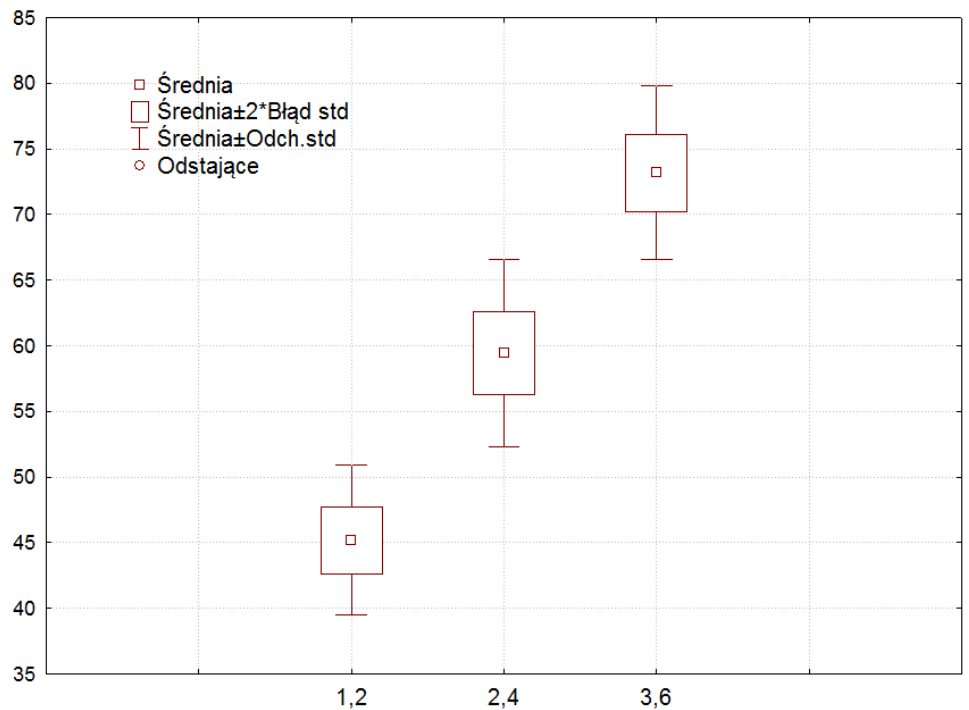


Rys. Z59. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Zestaw wykresów

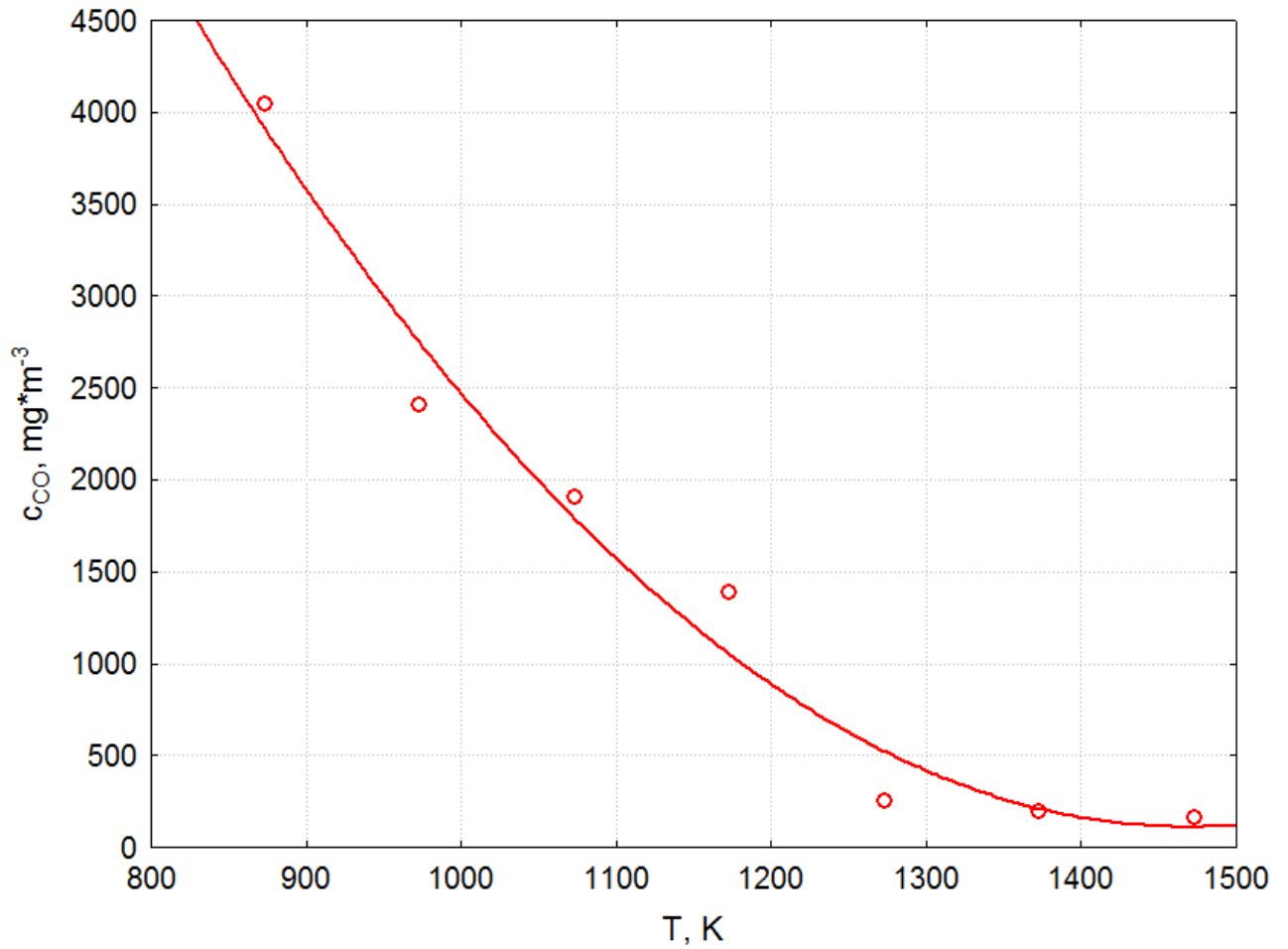


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z60. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania odpadów poliwinylowych

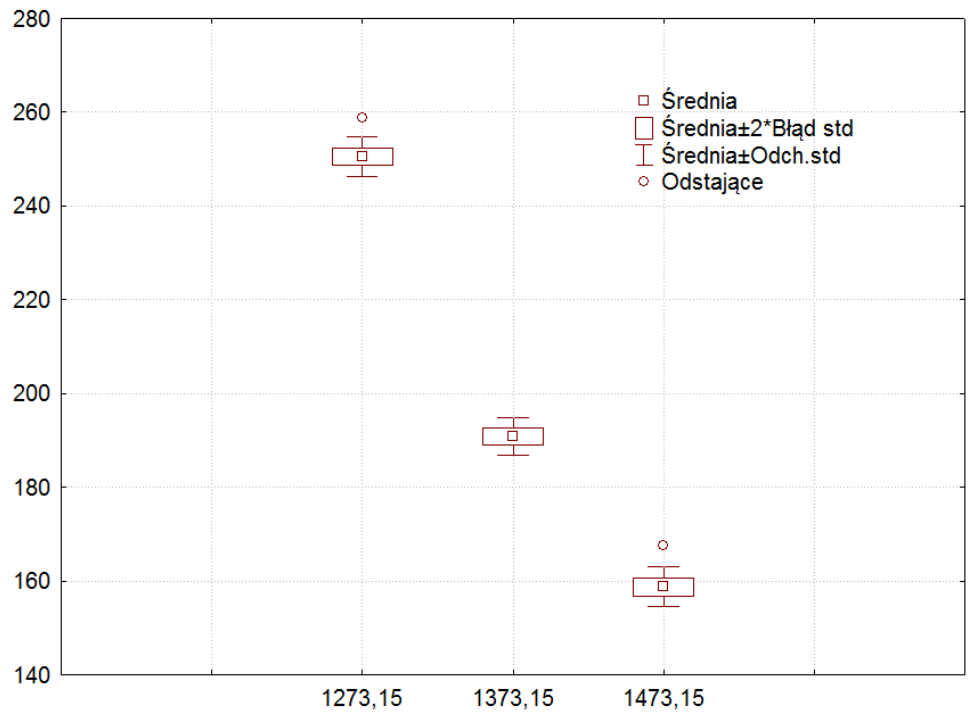
Zestaw wykresów



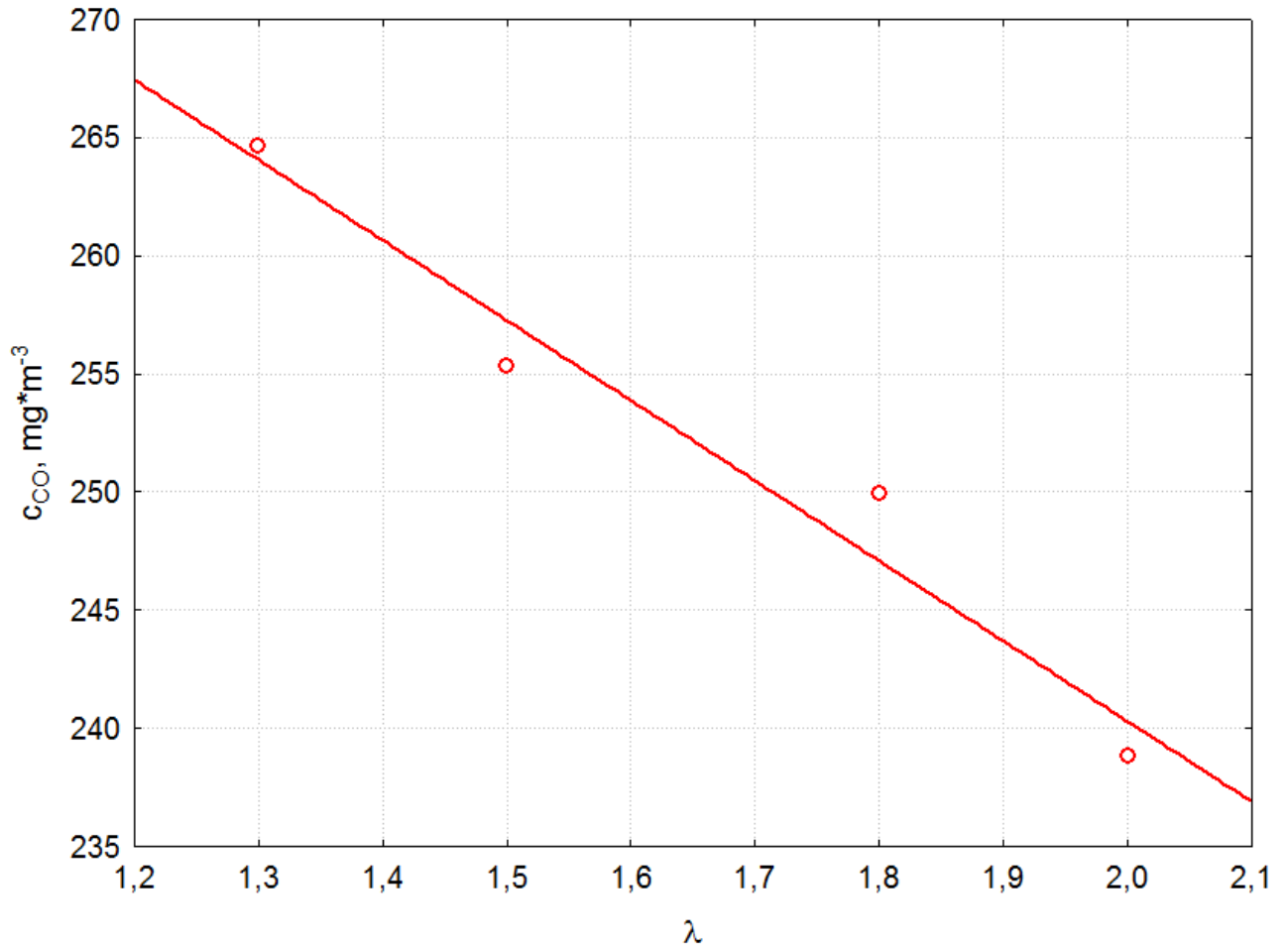
Parametry stałe:

$$\lambda = 1,8$$

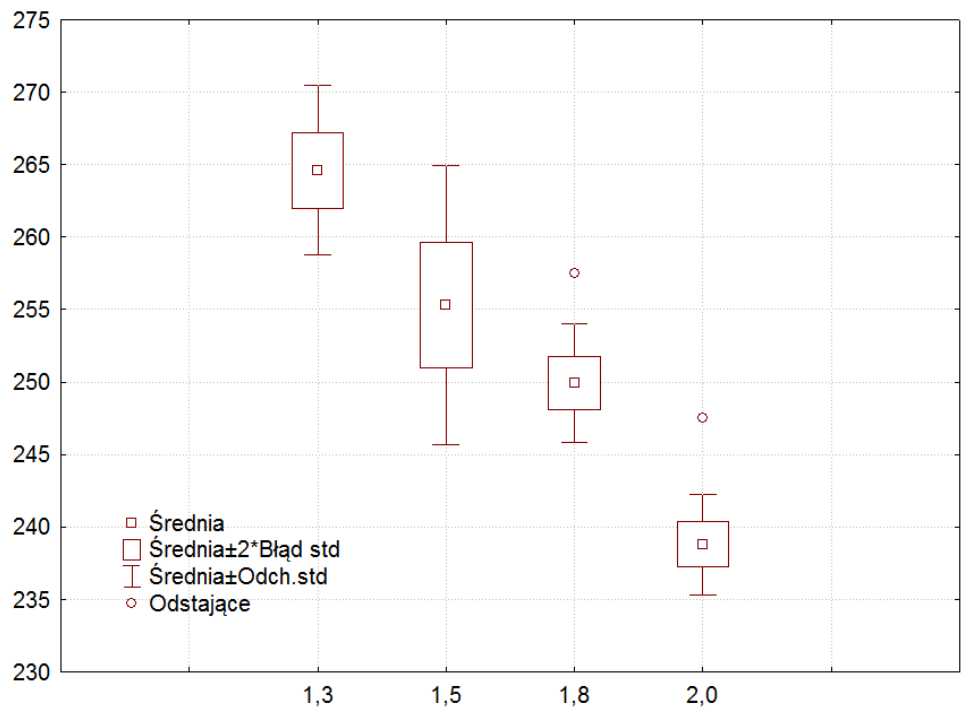
$$m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Rys. Z61. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

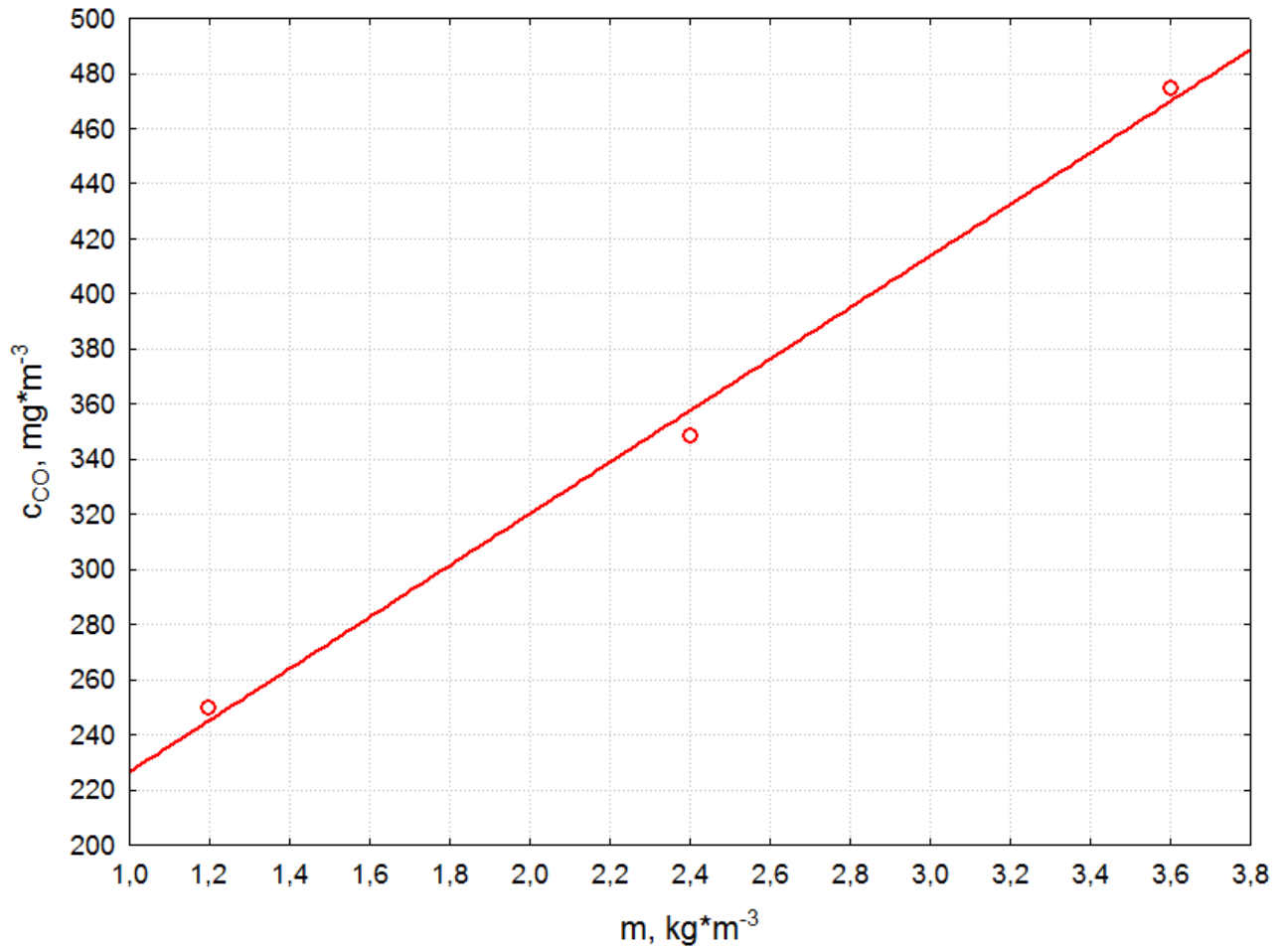


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

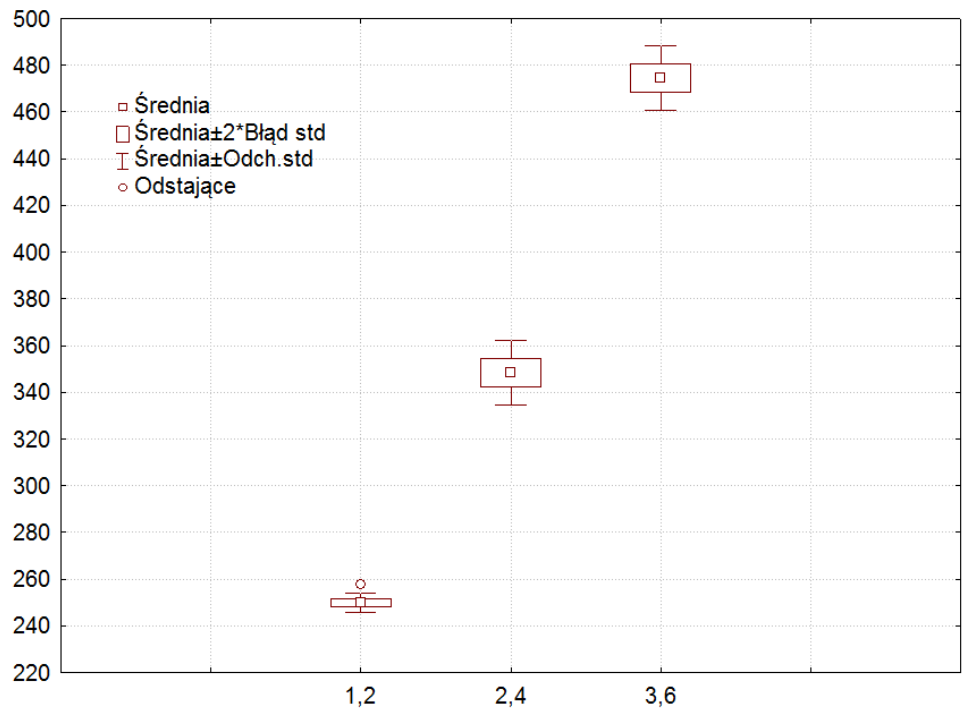


Rys. Z62. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

Zestaw wykresów

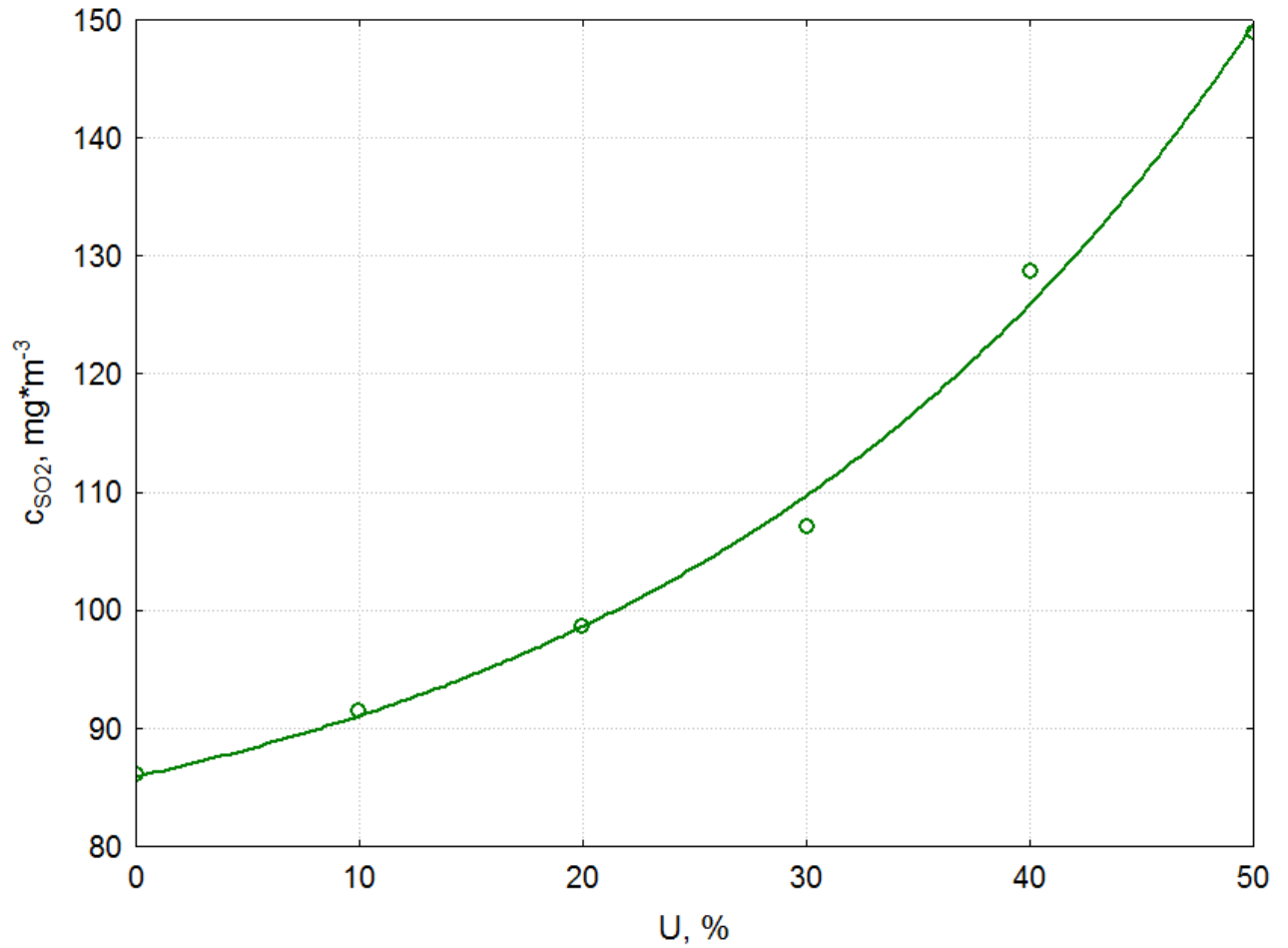


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

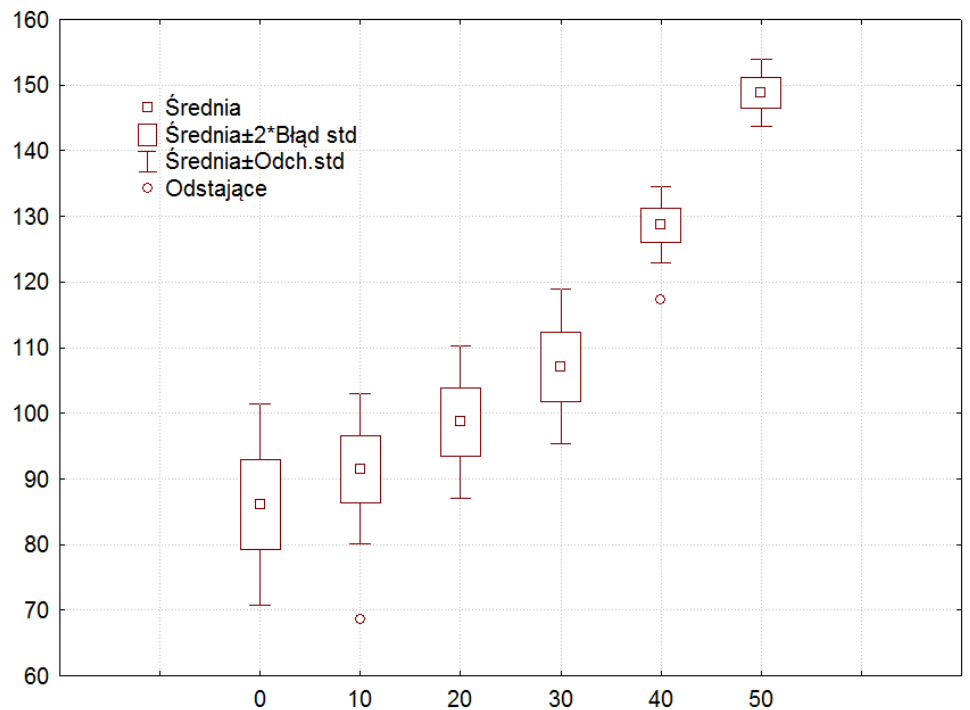


Rys. Z63. Wpływ zmian wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania odpadów poliwinylowych

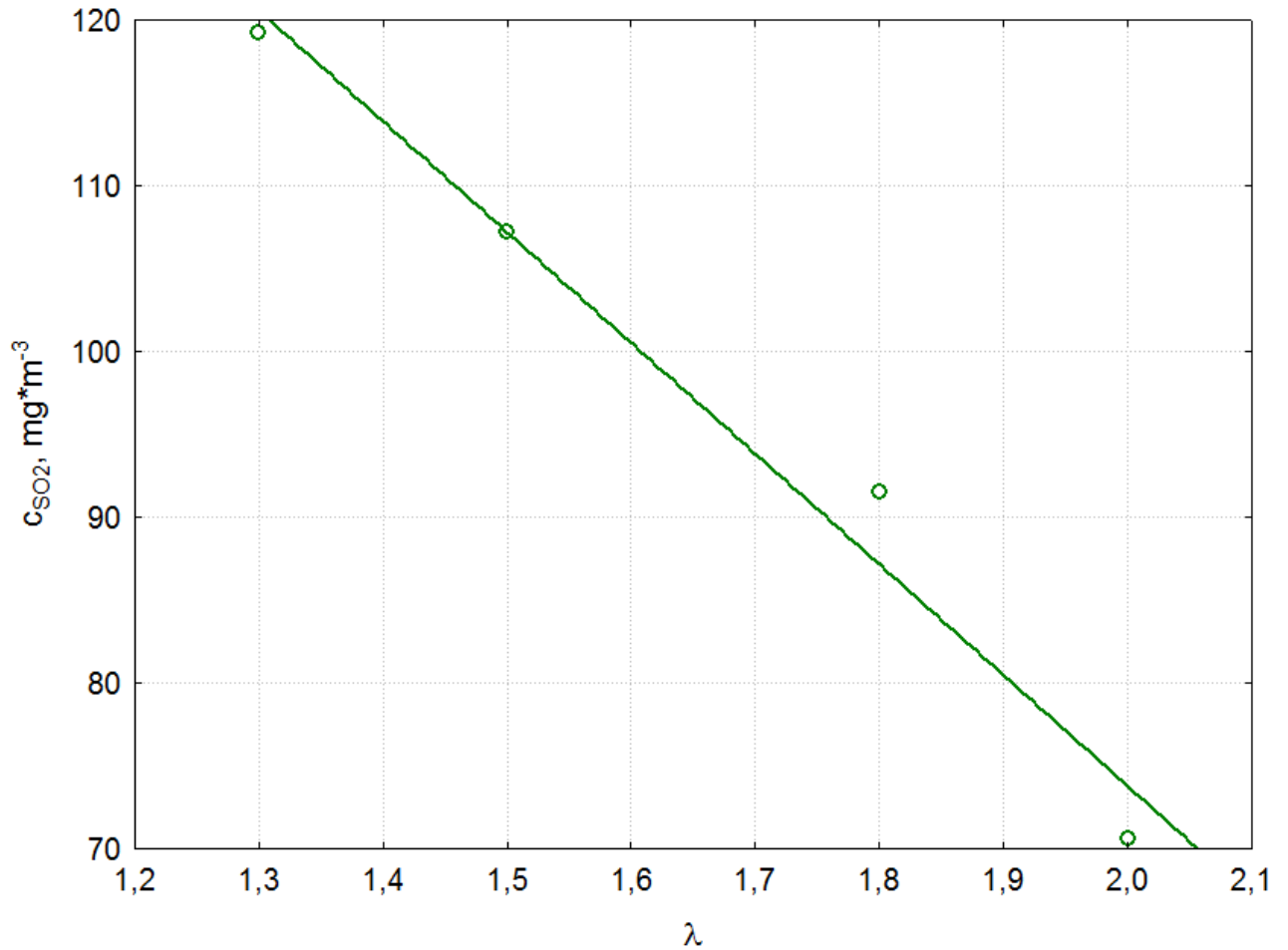
Zestaw wykresów



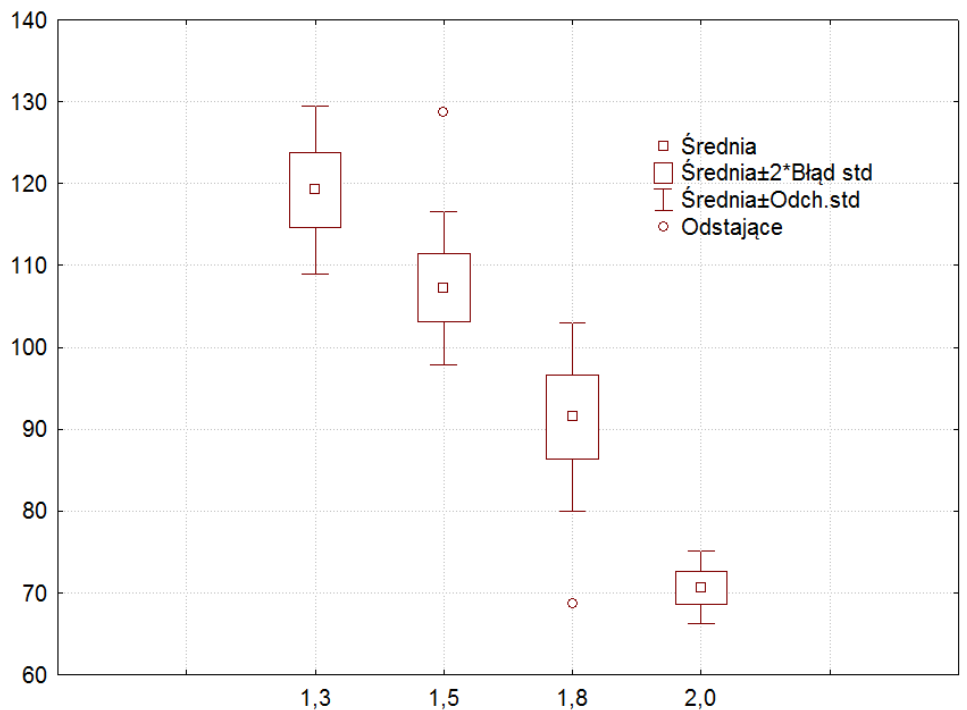
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z64. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

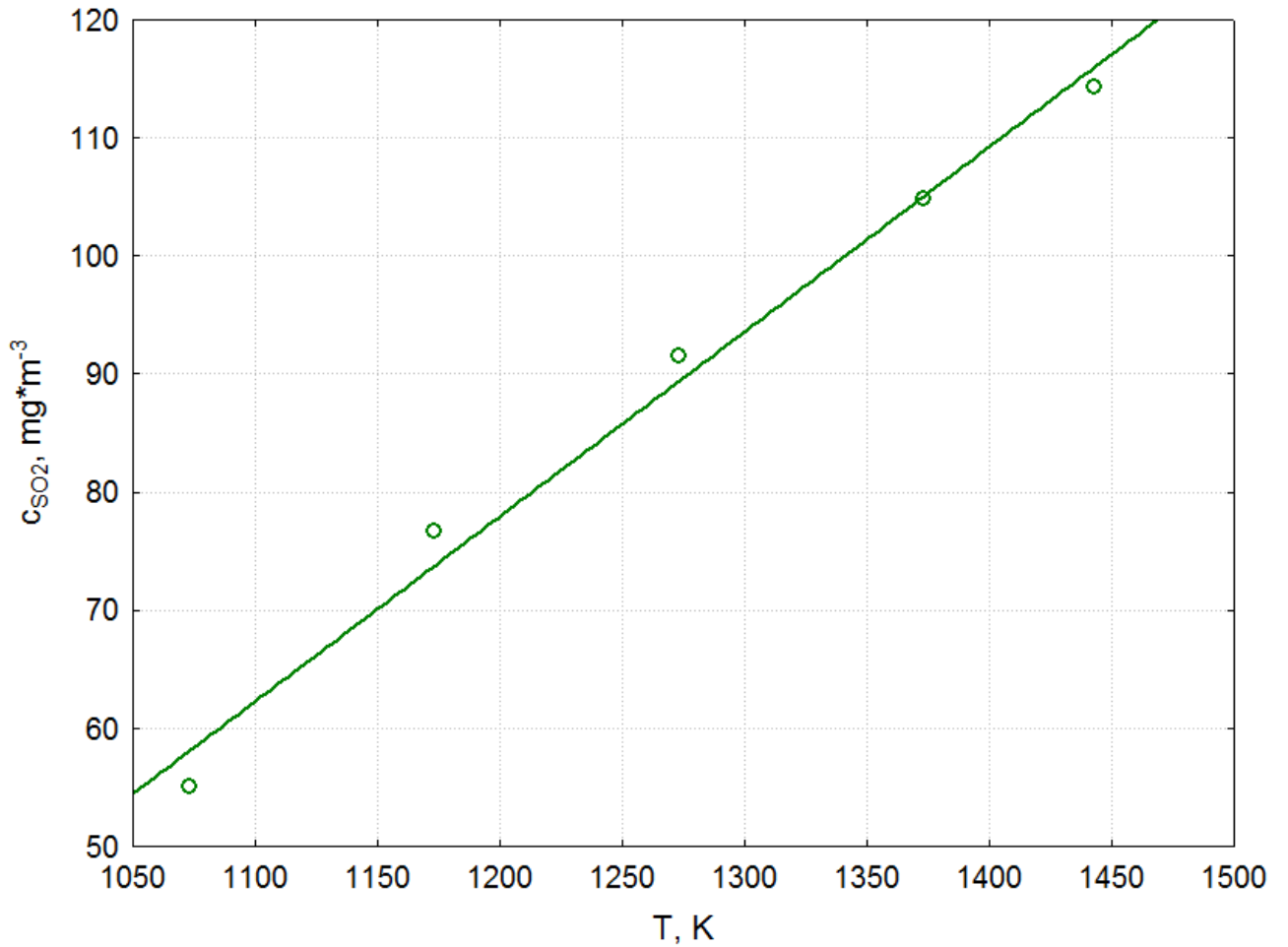


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $U = 10\%$



Rys. Z65. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

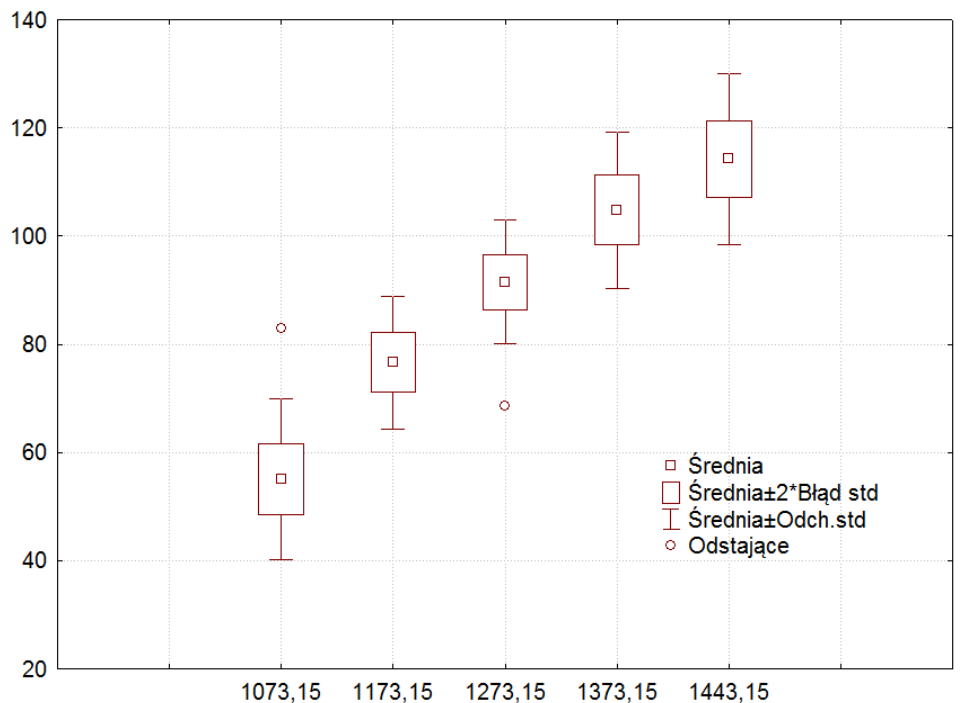
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

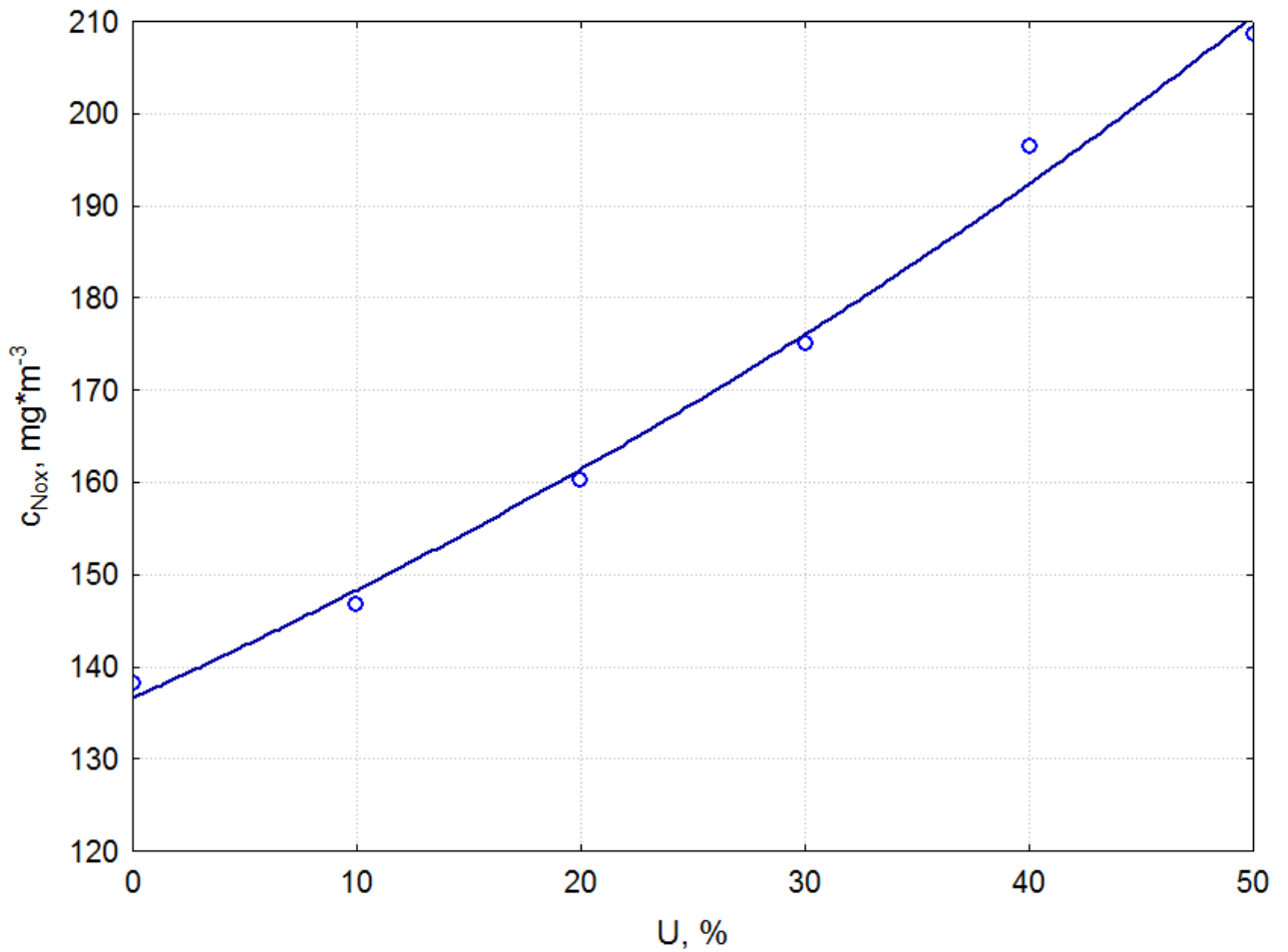
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

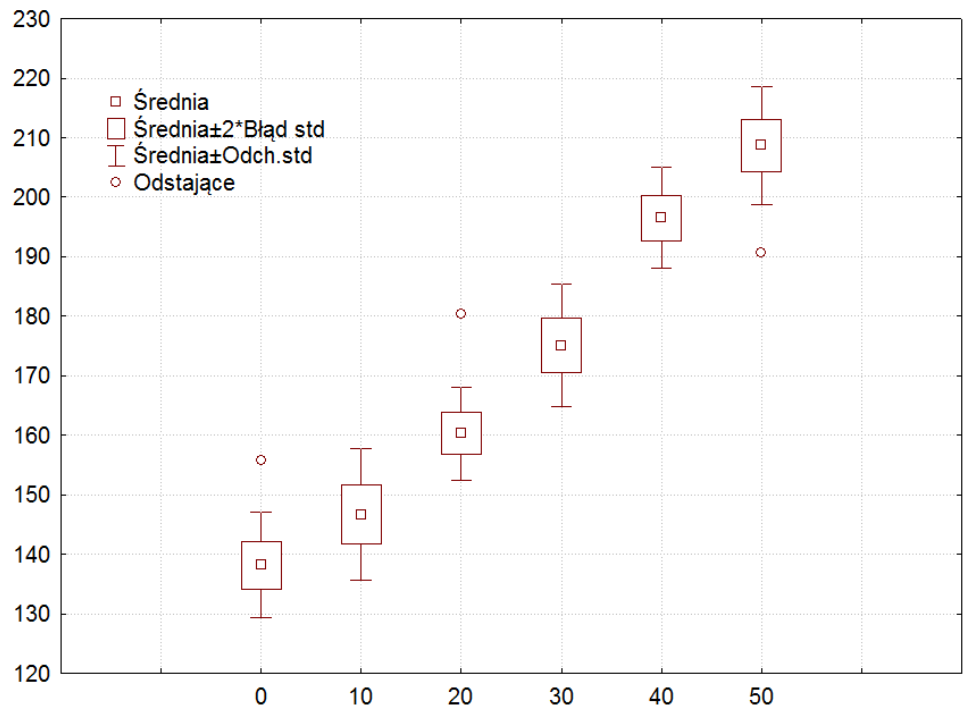


Rys. Z66. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Zestaw wykresów

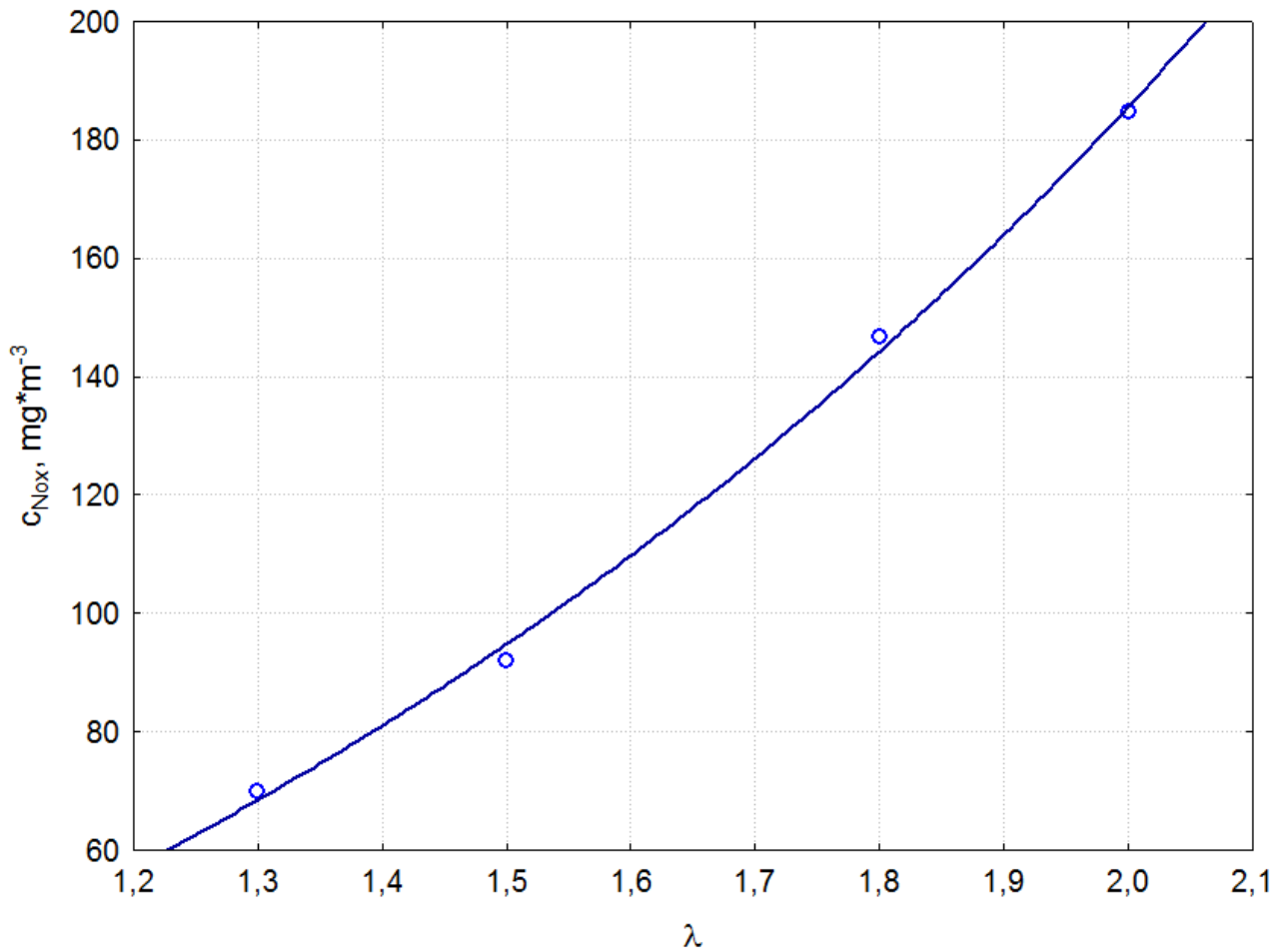


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

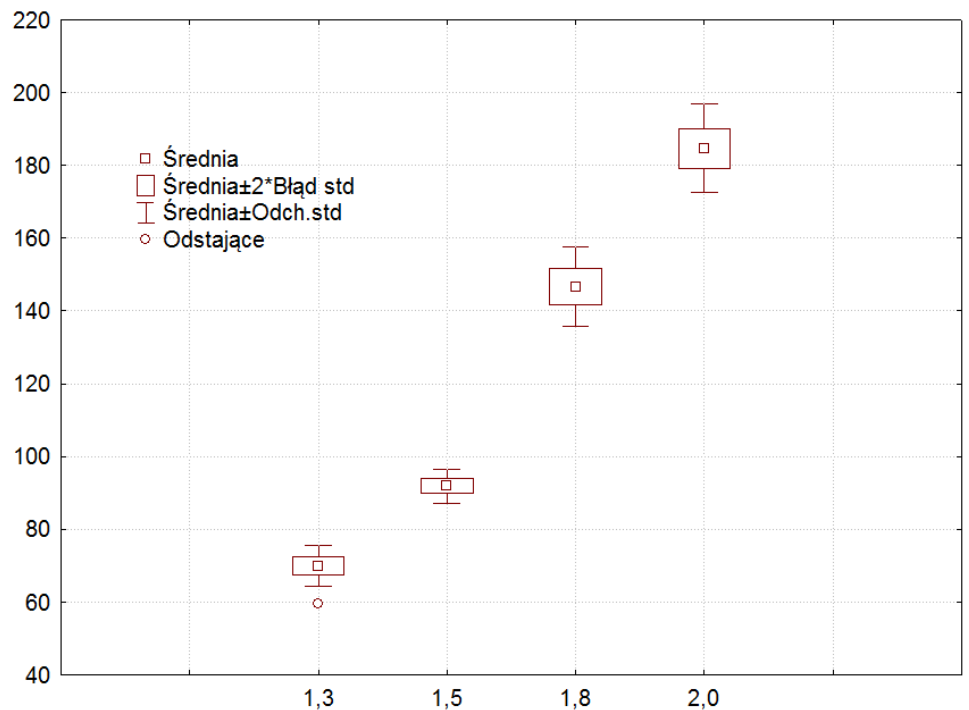


Rys. Z67. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miazem węglowym

Zestaw wykresów

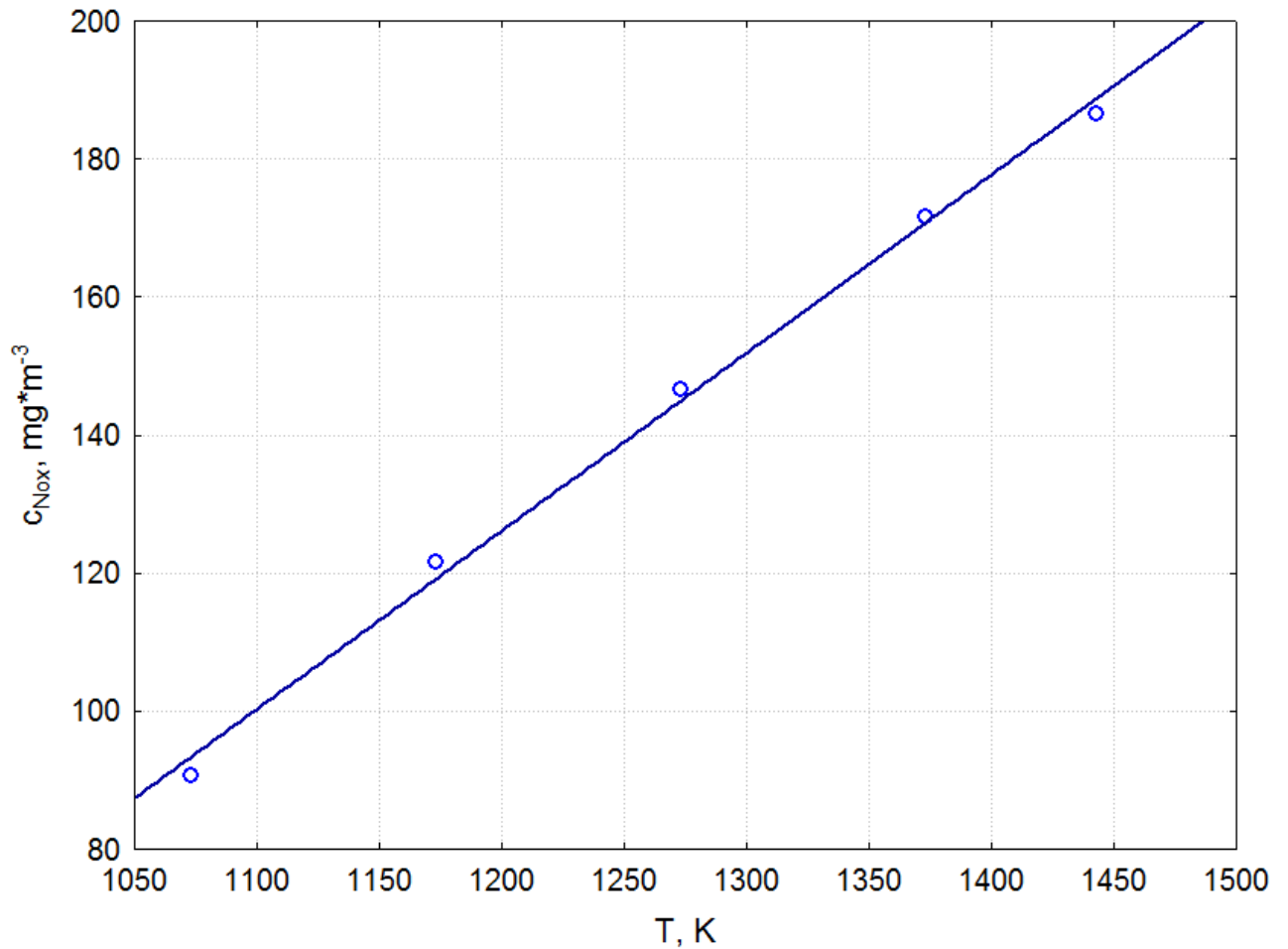


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $U = 10\%$



Rys. Z68. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współpalania osadów ściekowych z miałem węglowym

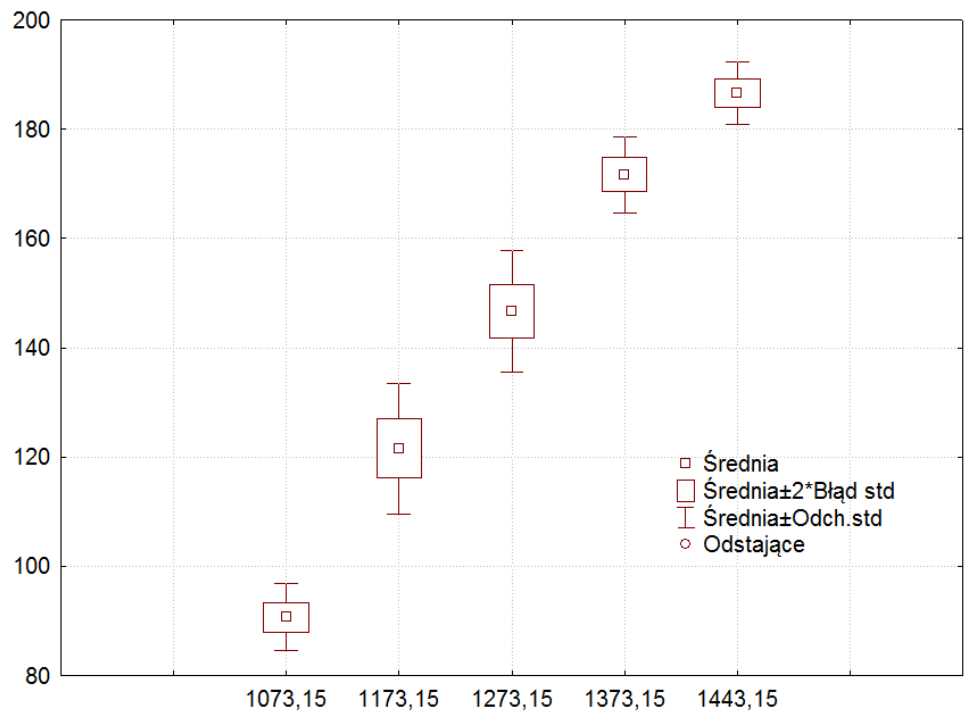
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

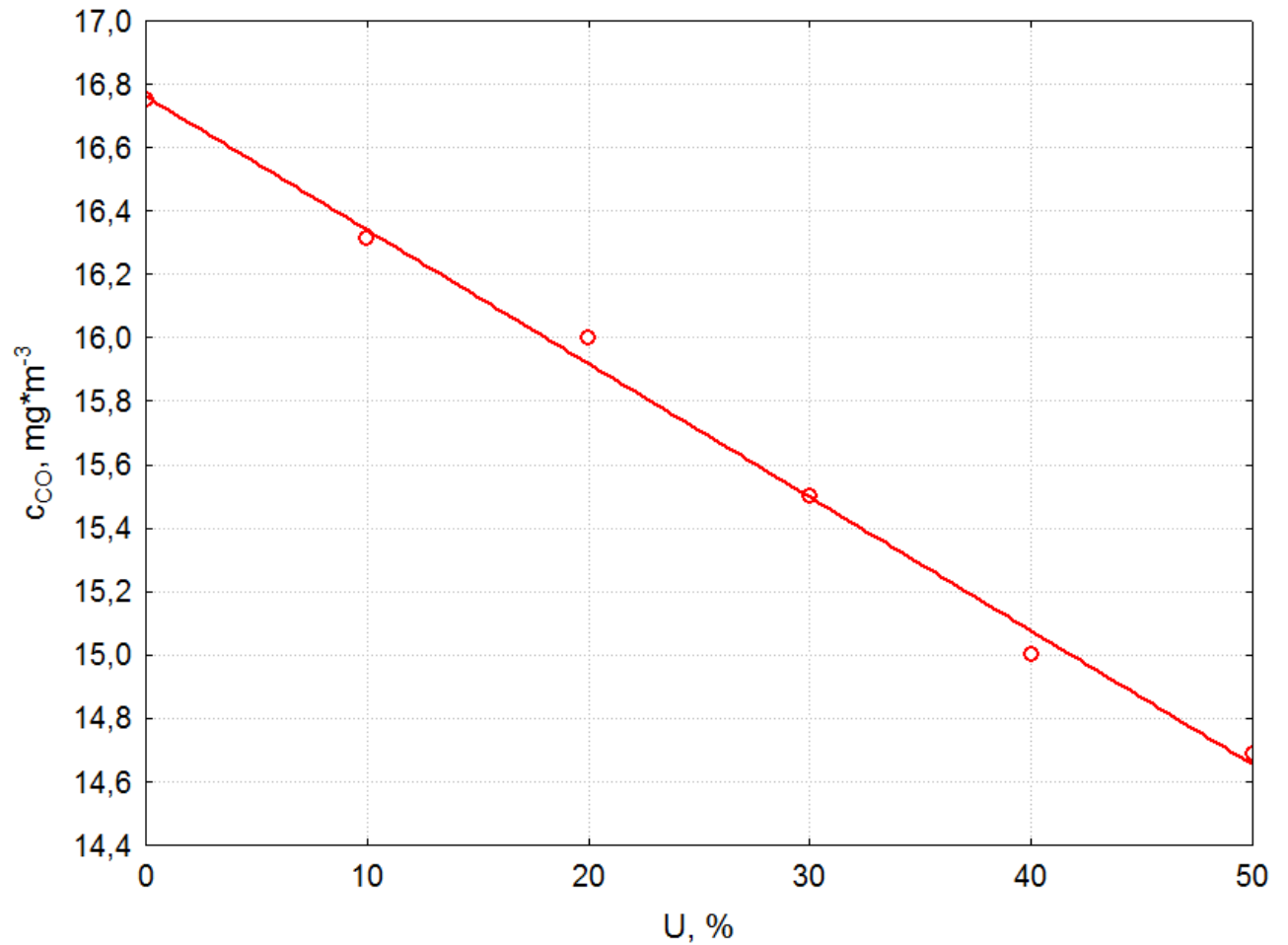
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

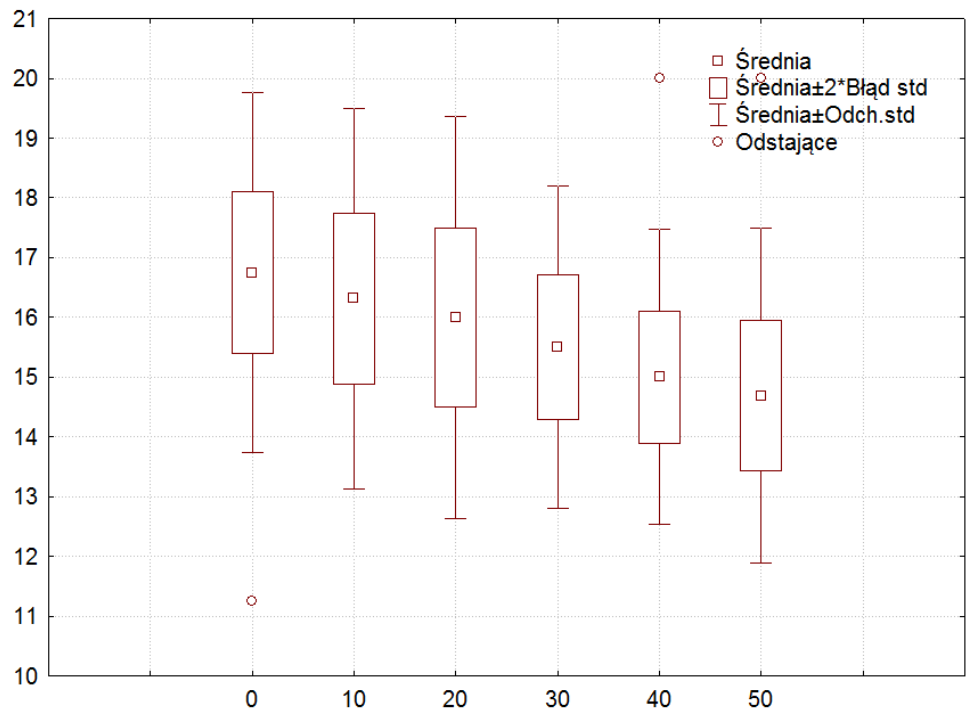


Rys. Z69. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym

Zestaw wykresów

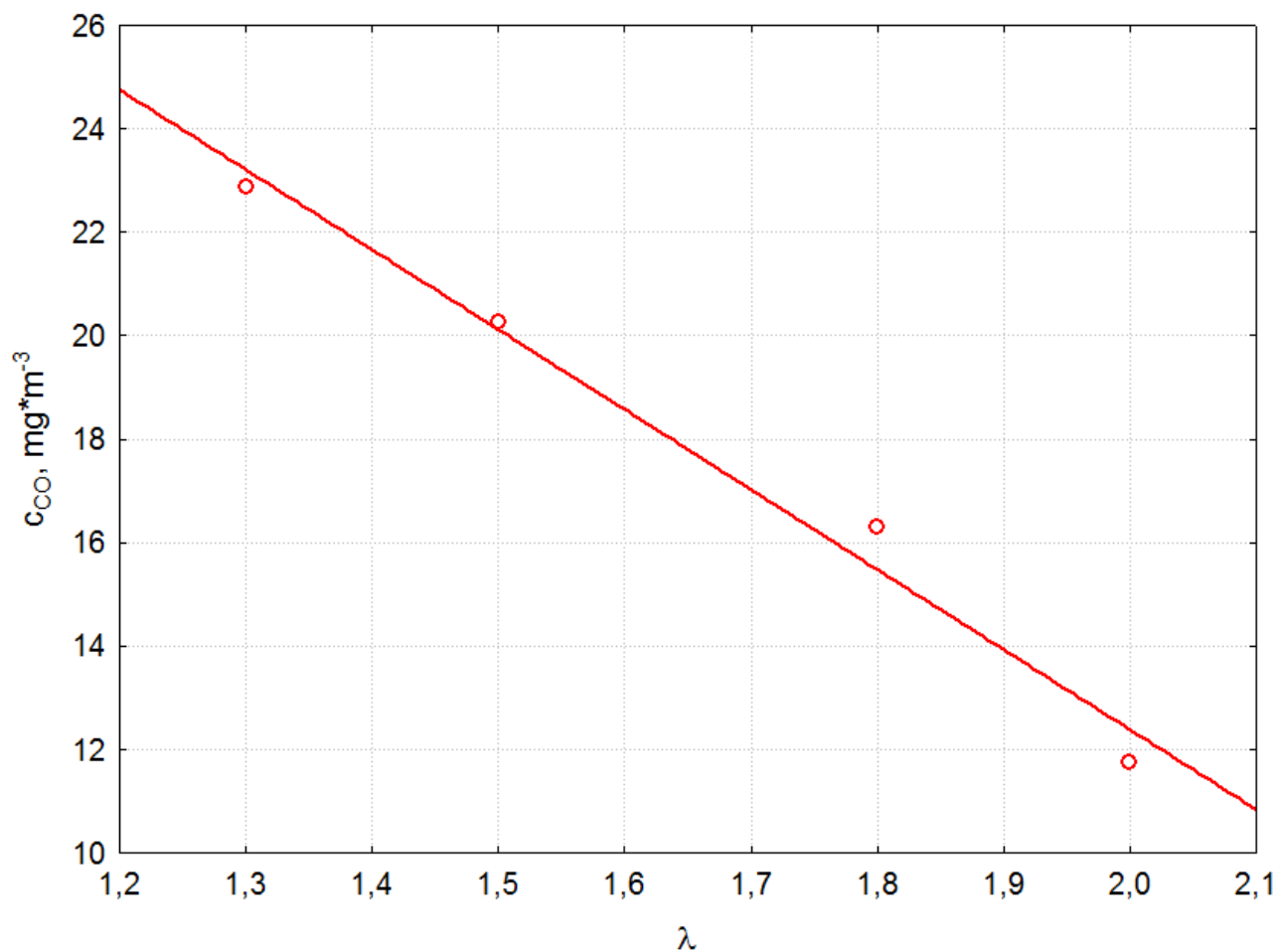


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$

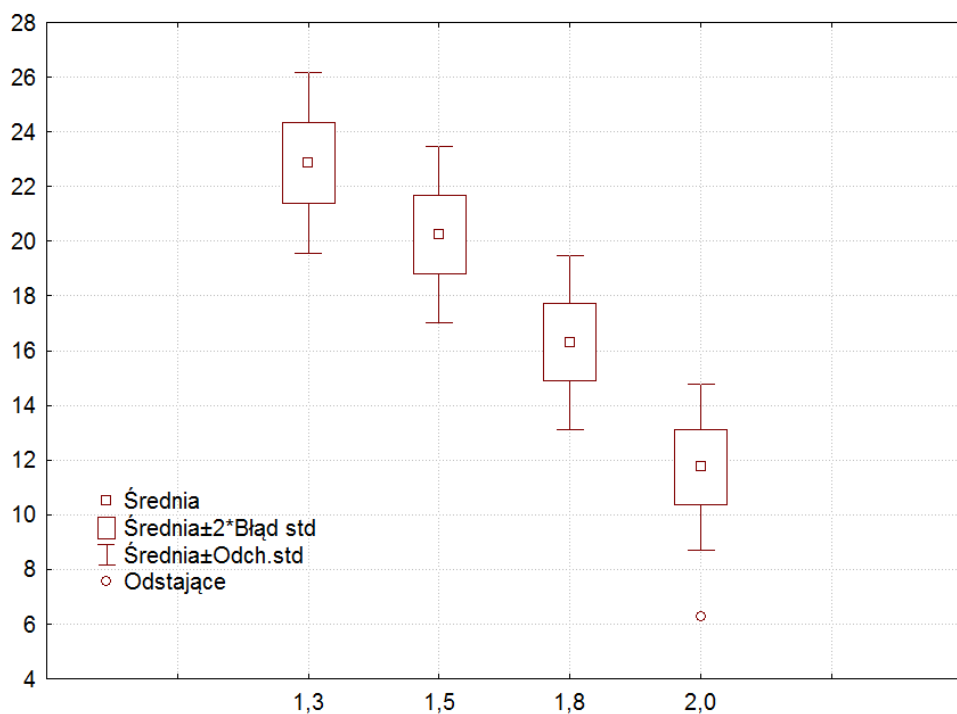


Rys. Z70. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z miąłem węglowym

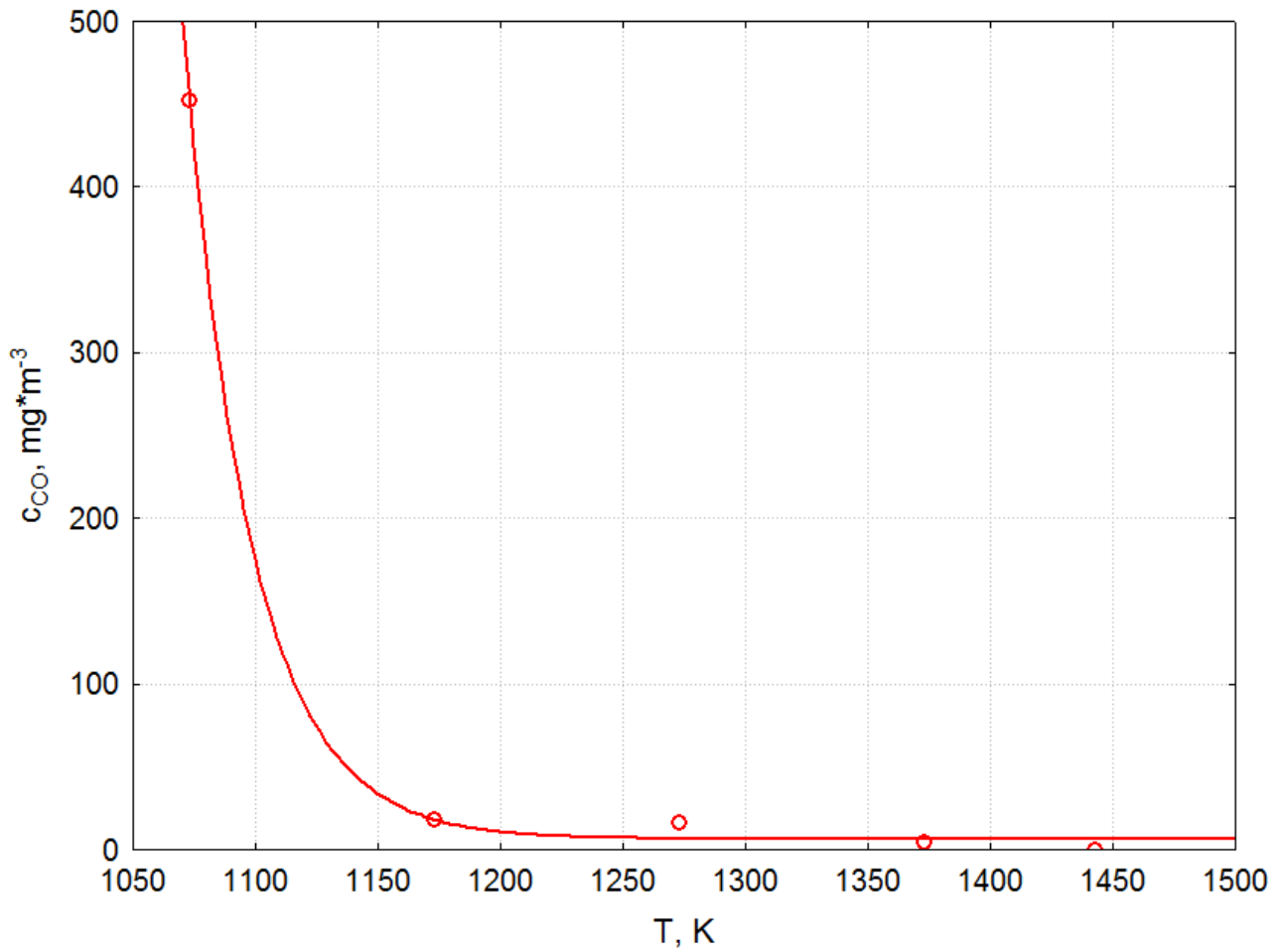
Zestaw wykresów



Parametry stałe:
T = 1273,15K
U = 10%



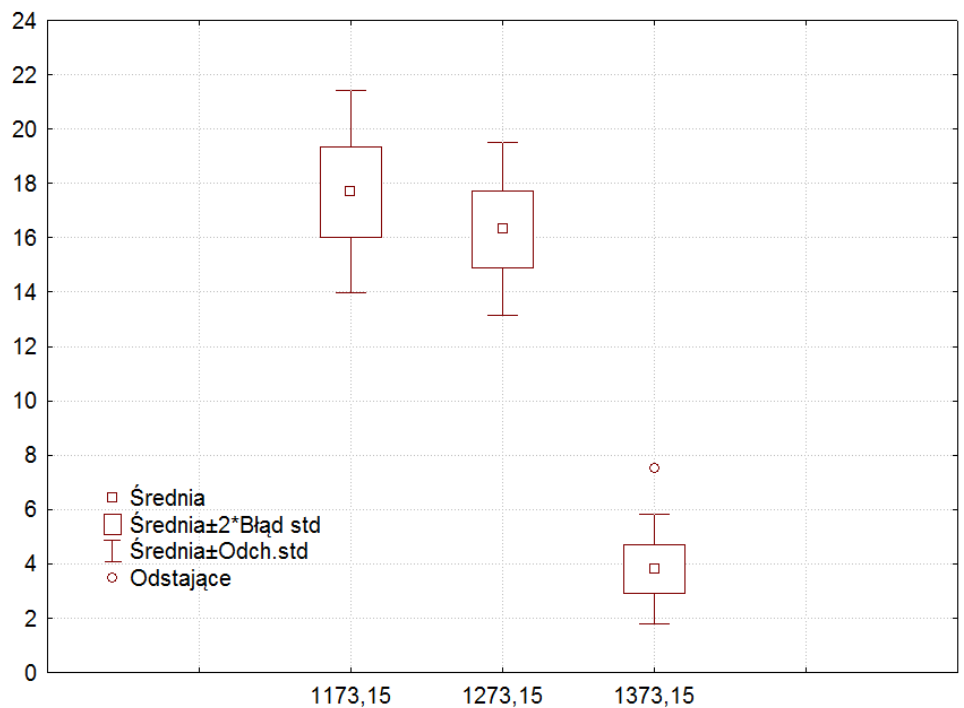
Rys. Z71. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z miałem węglowym



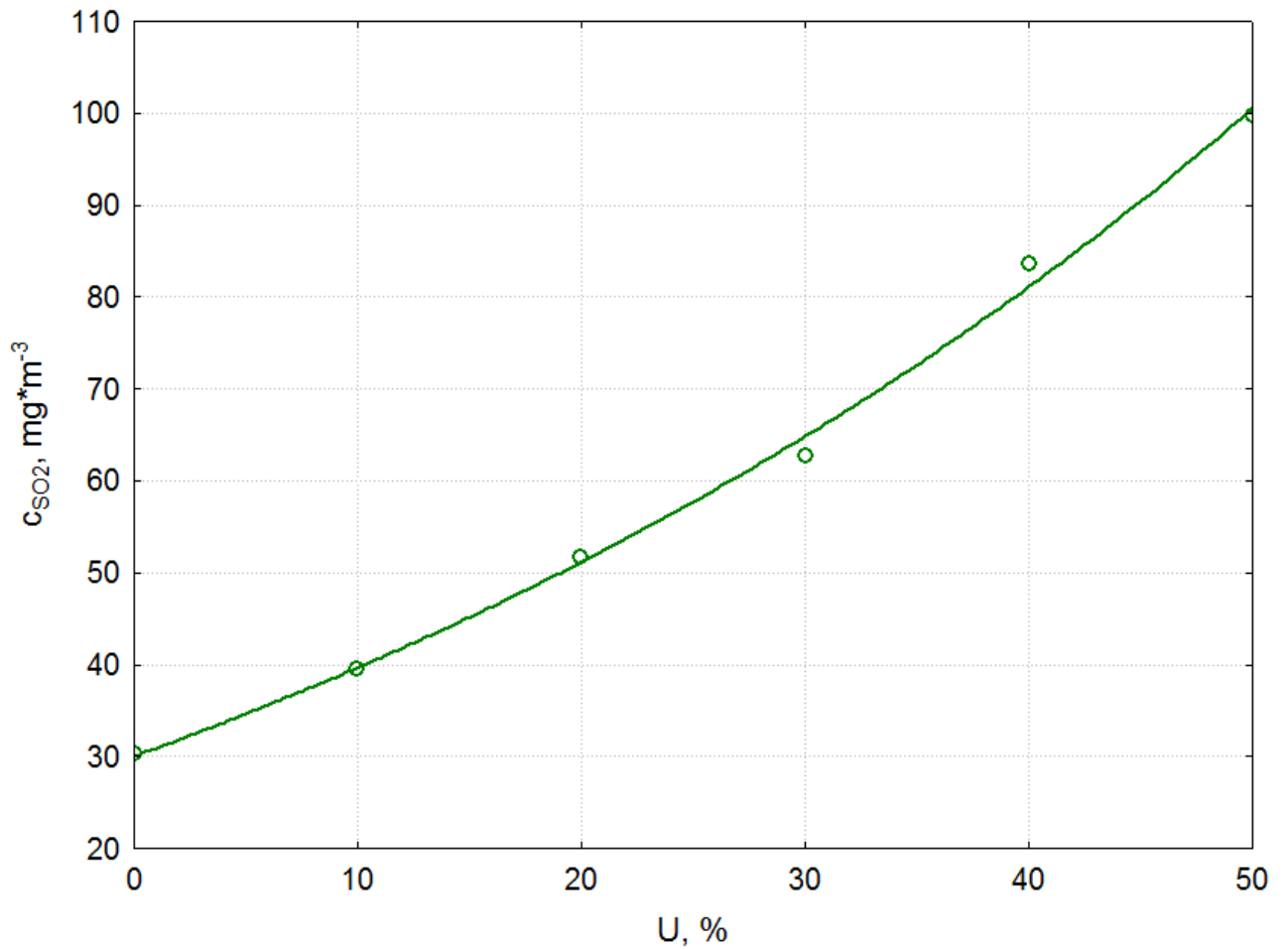
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

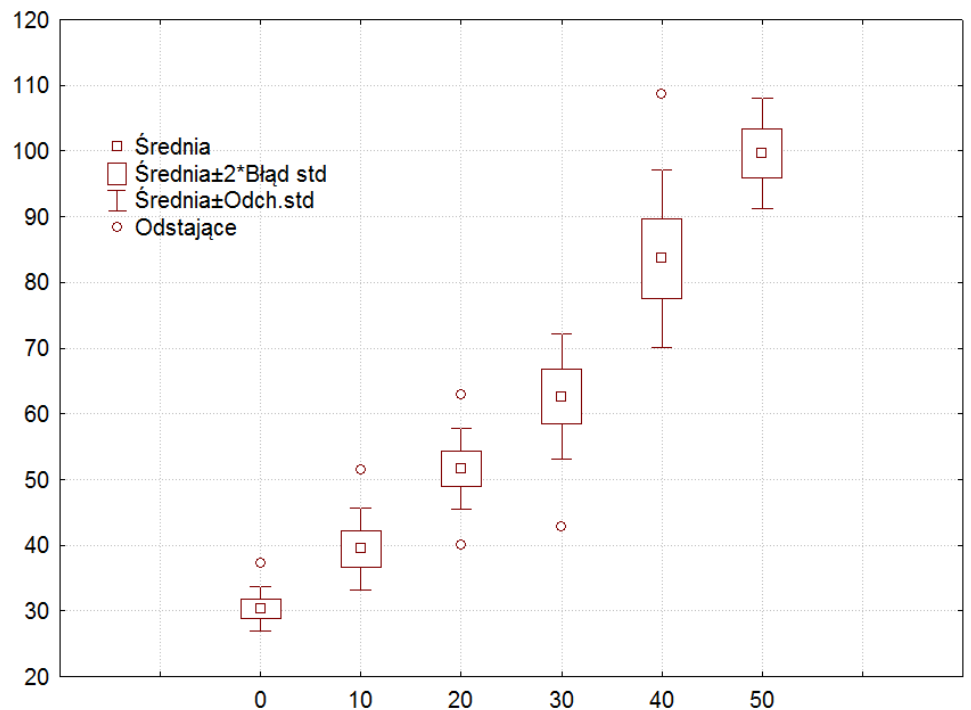
$U = 10\%$



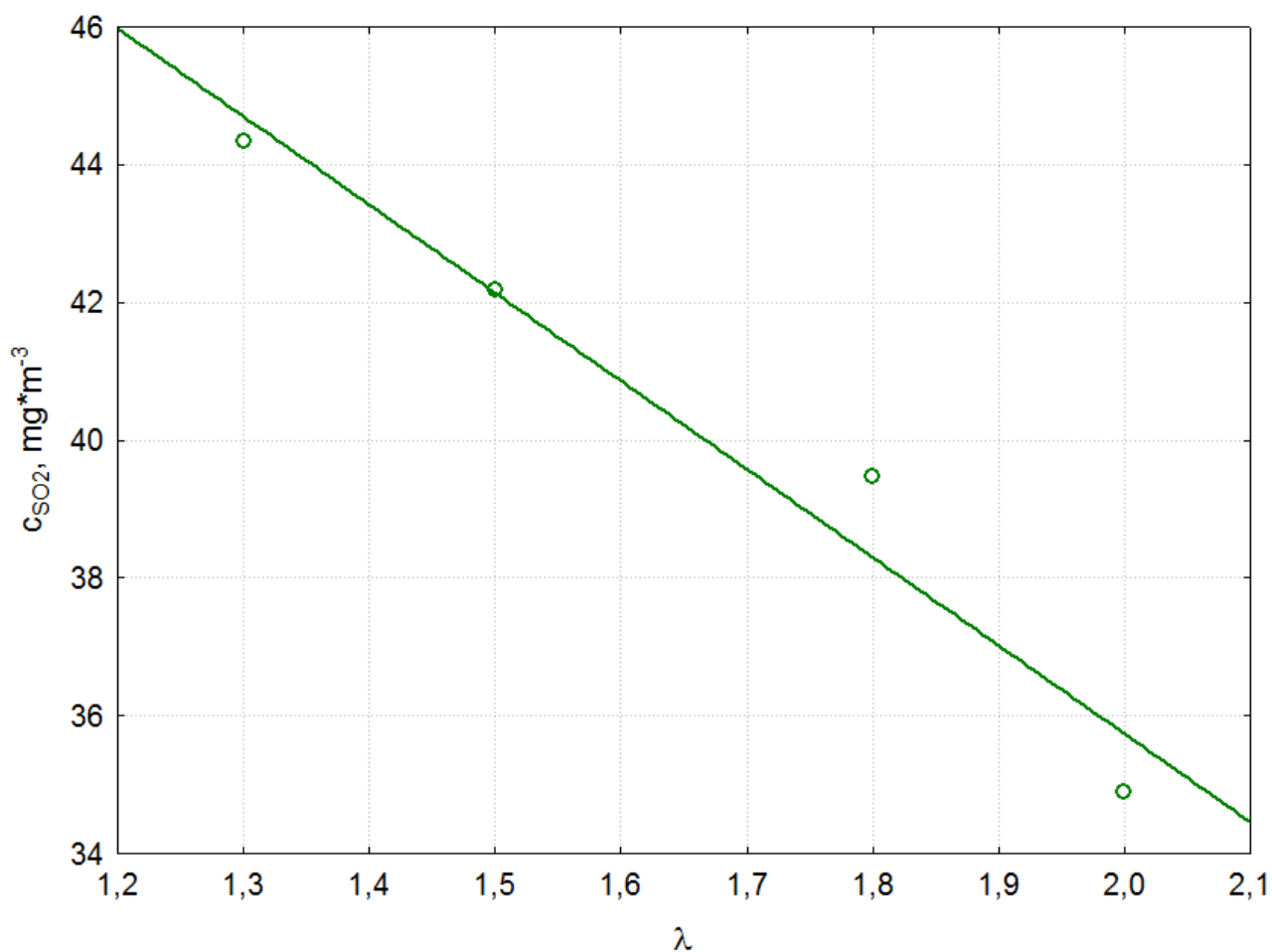
Rys. Z72. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z miazem węglowym



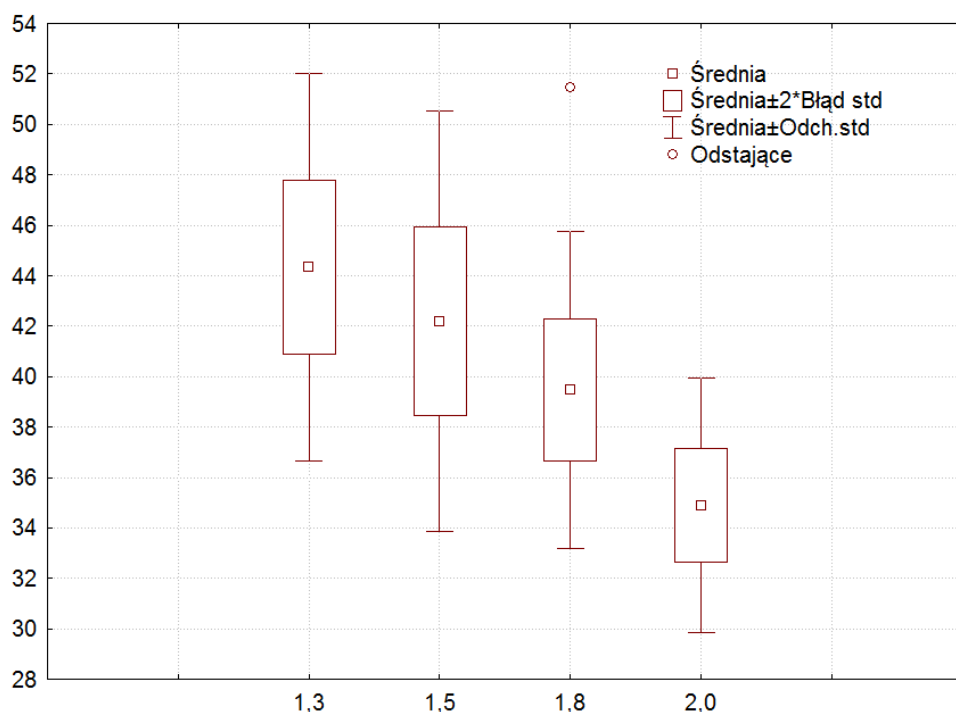
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z73. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

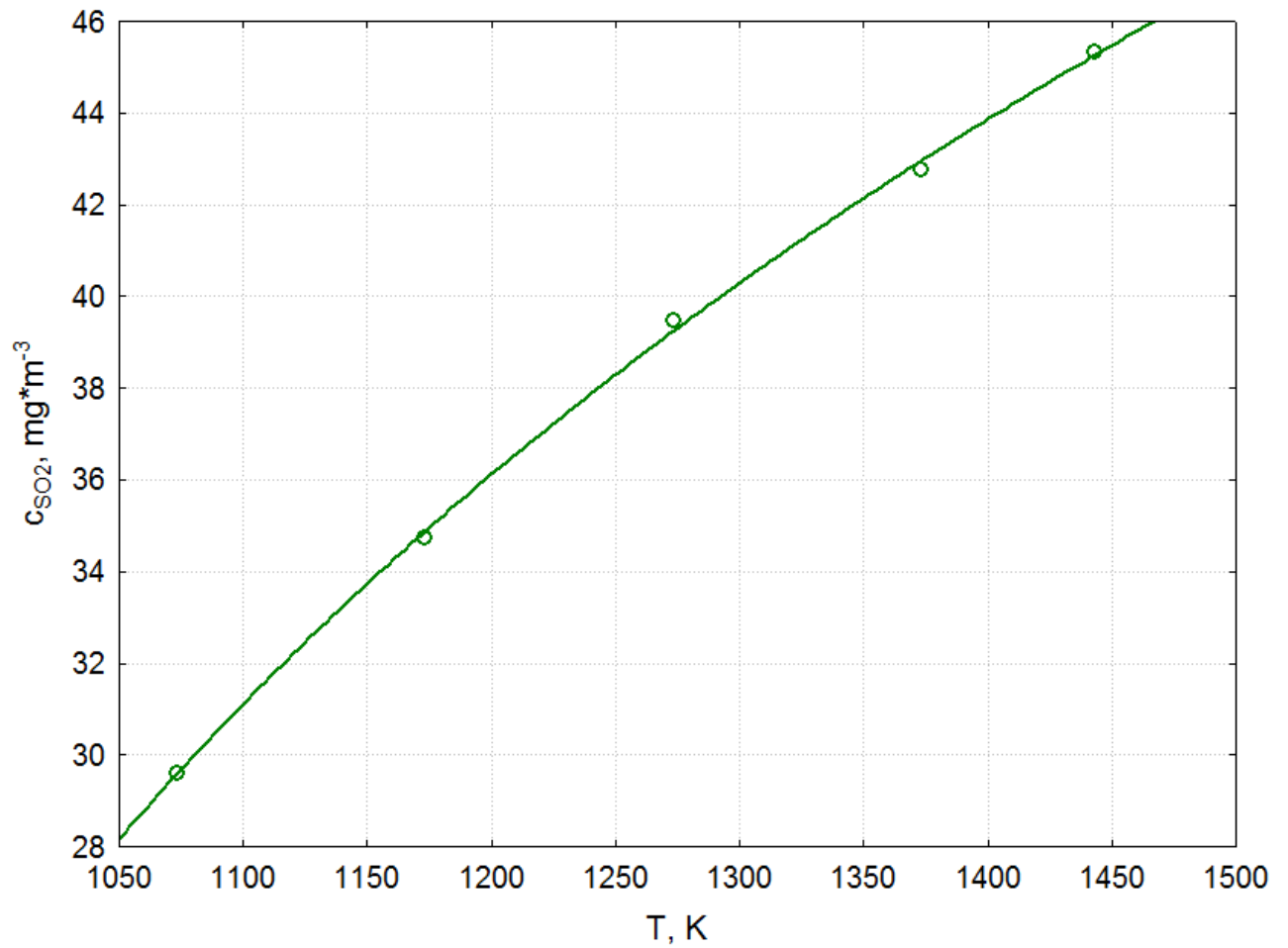


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $U = 10\%$



Rys. Z74. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

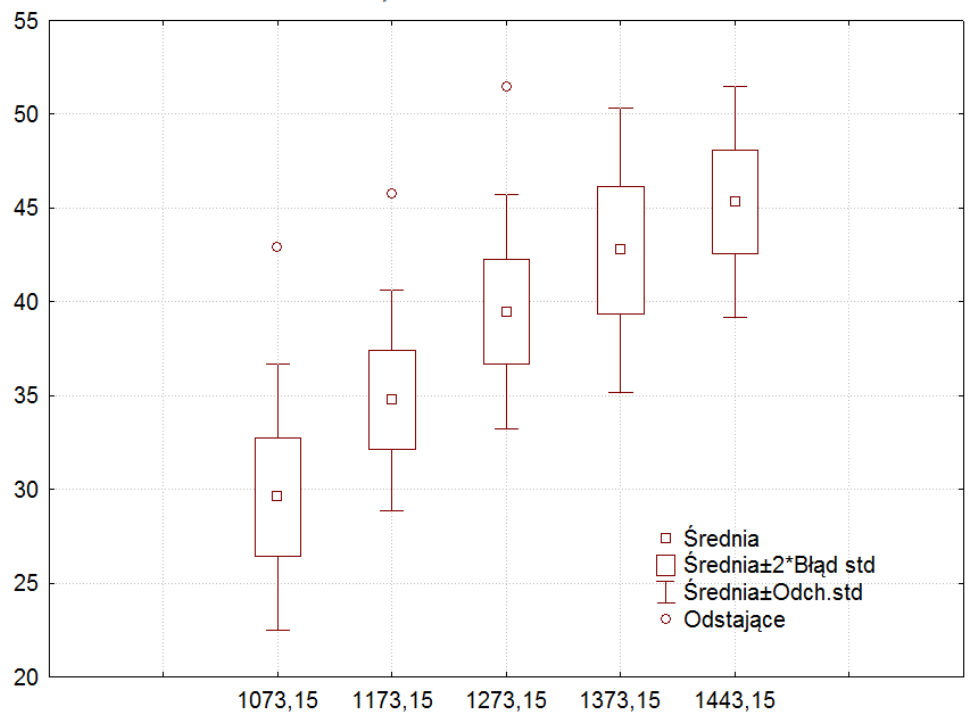
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

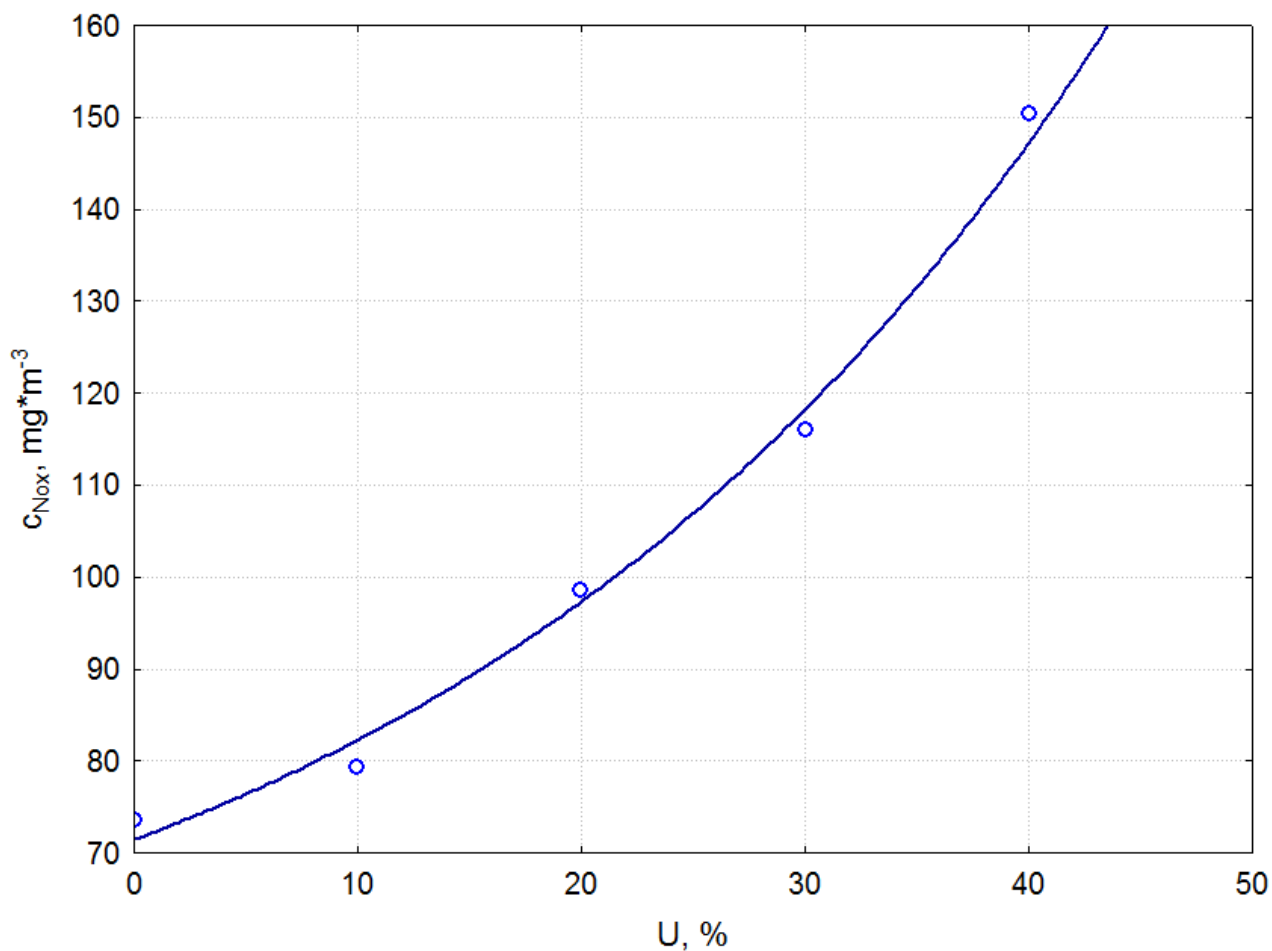
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

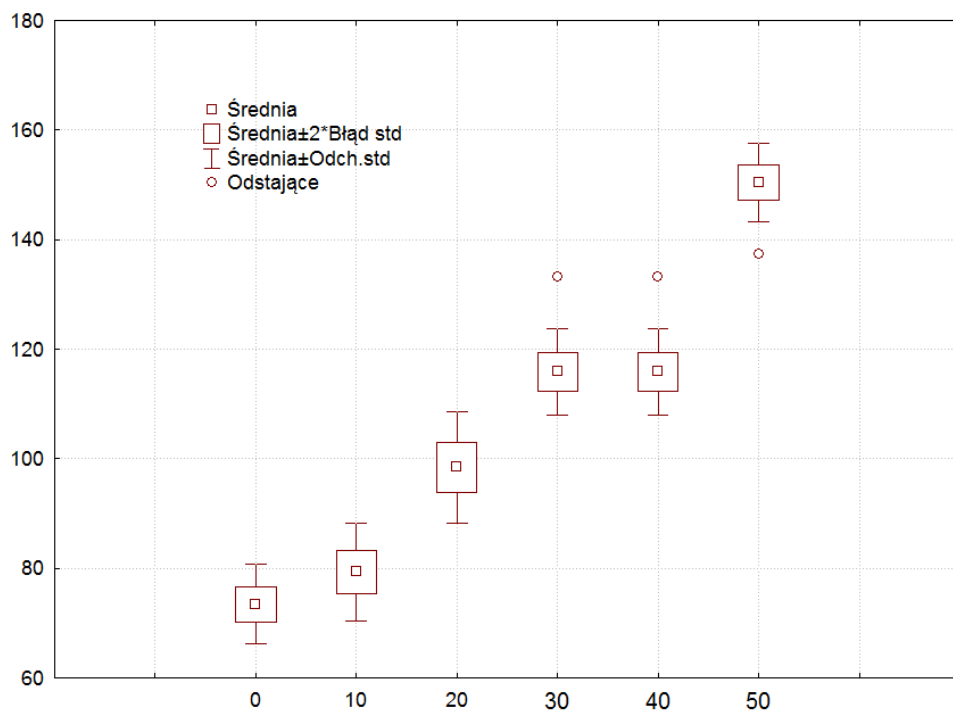


Rys. Z75. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Zestaw wykresów

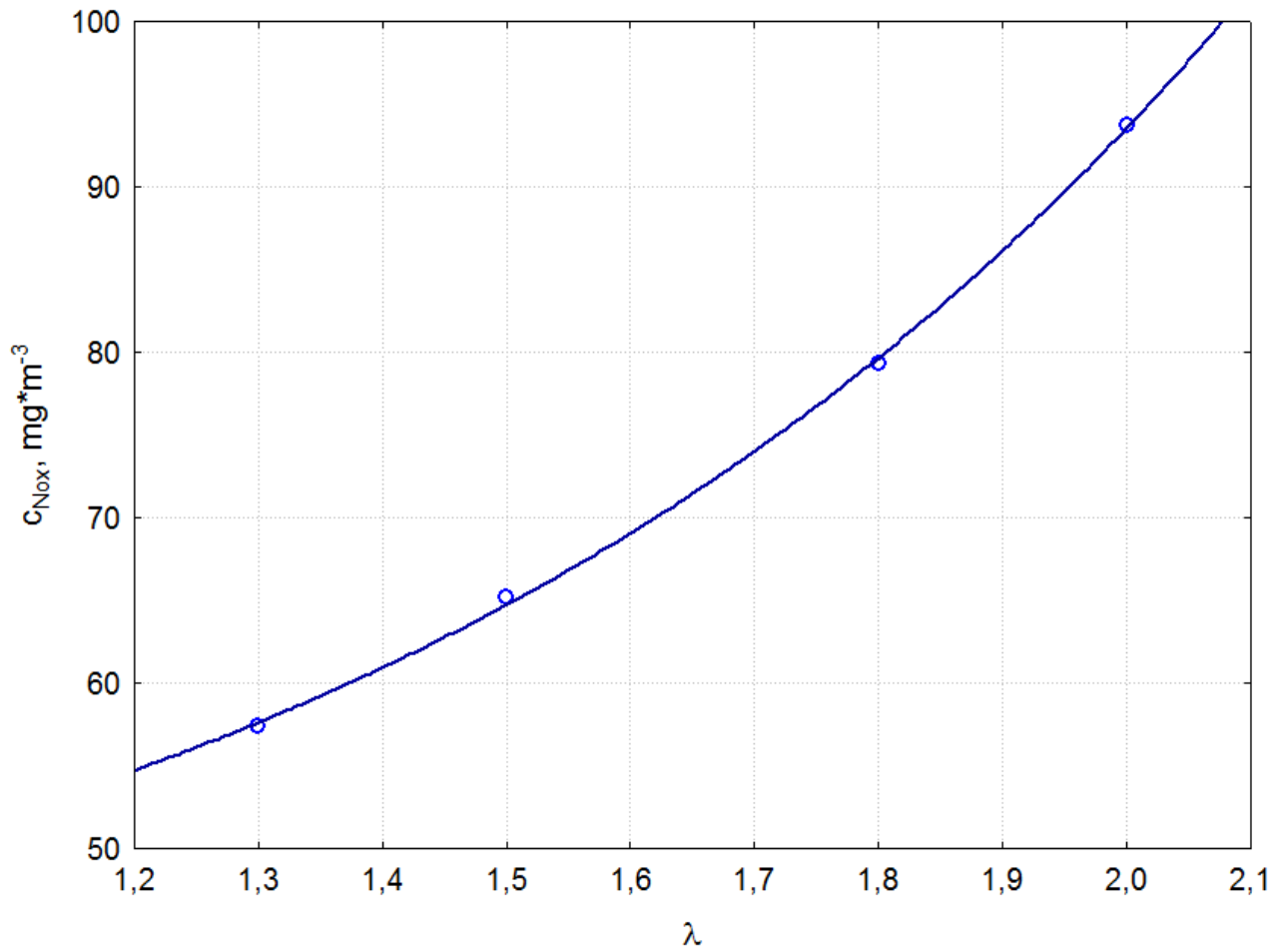


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$

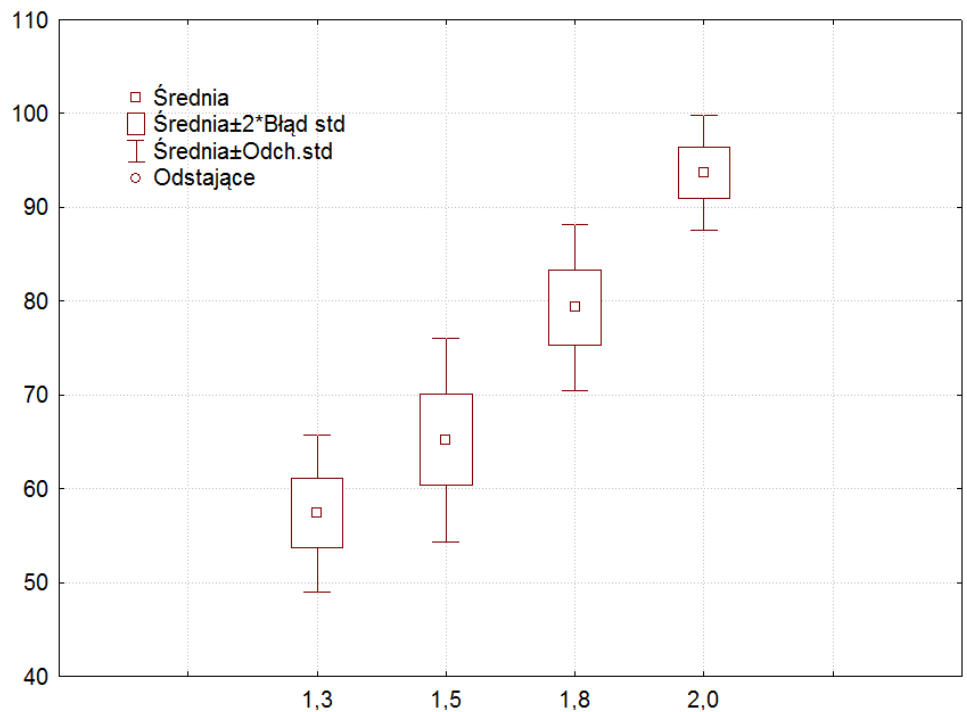


Rys. Z76. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

Zestaw wykresów

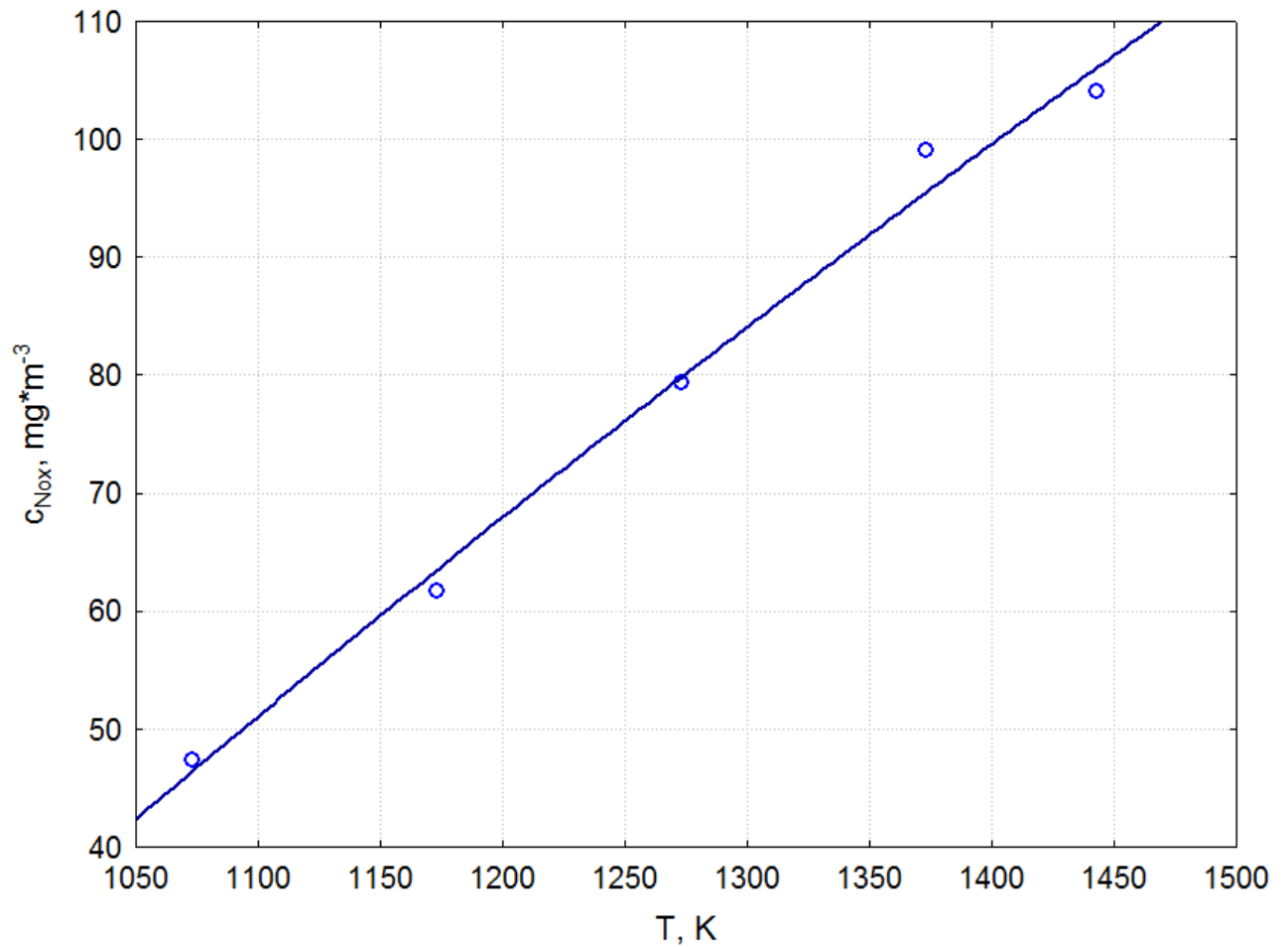


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $U = 10\%$



Rys. Z77. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

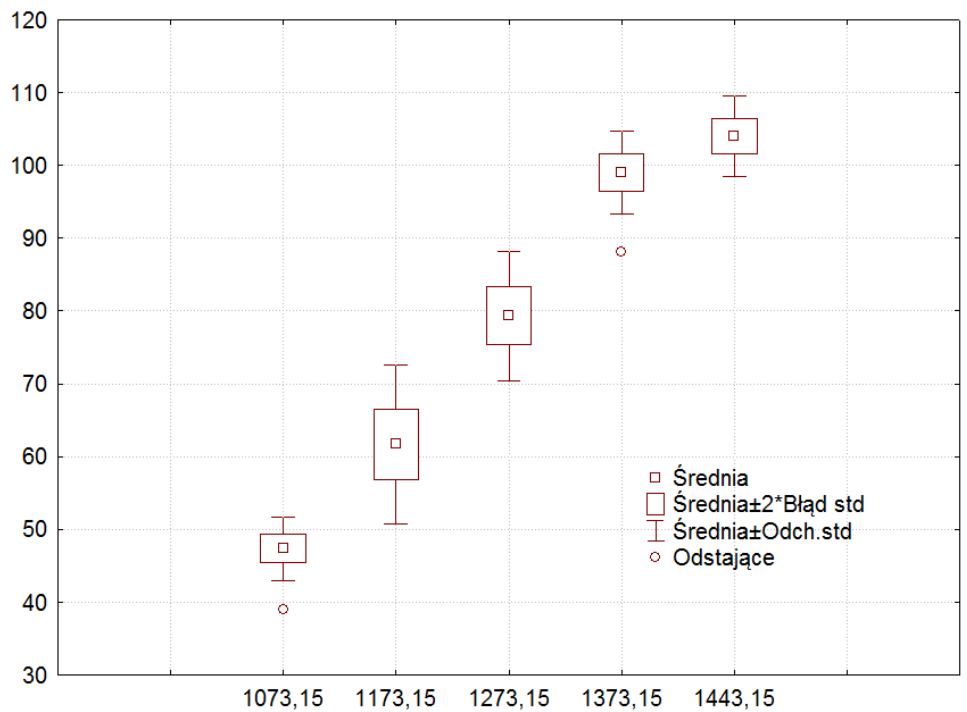
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

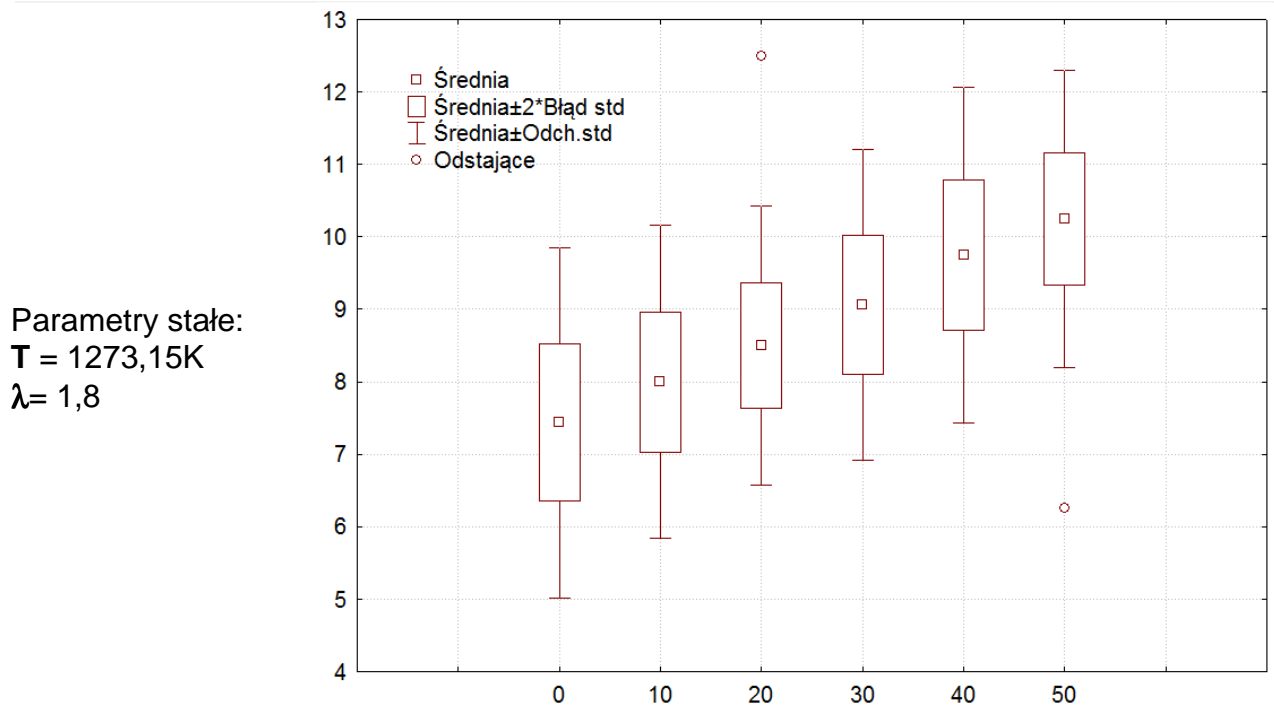
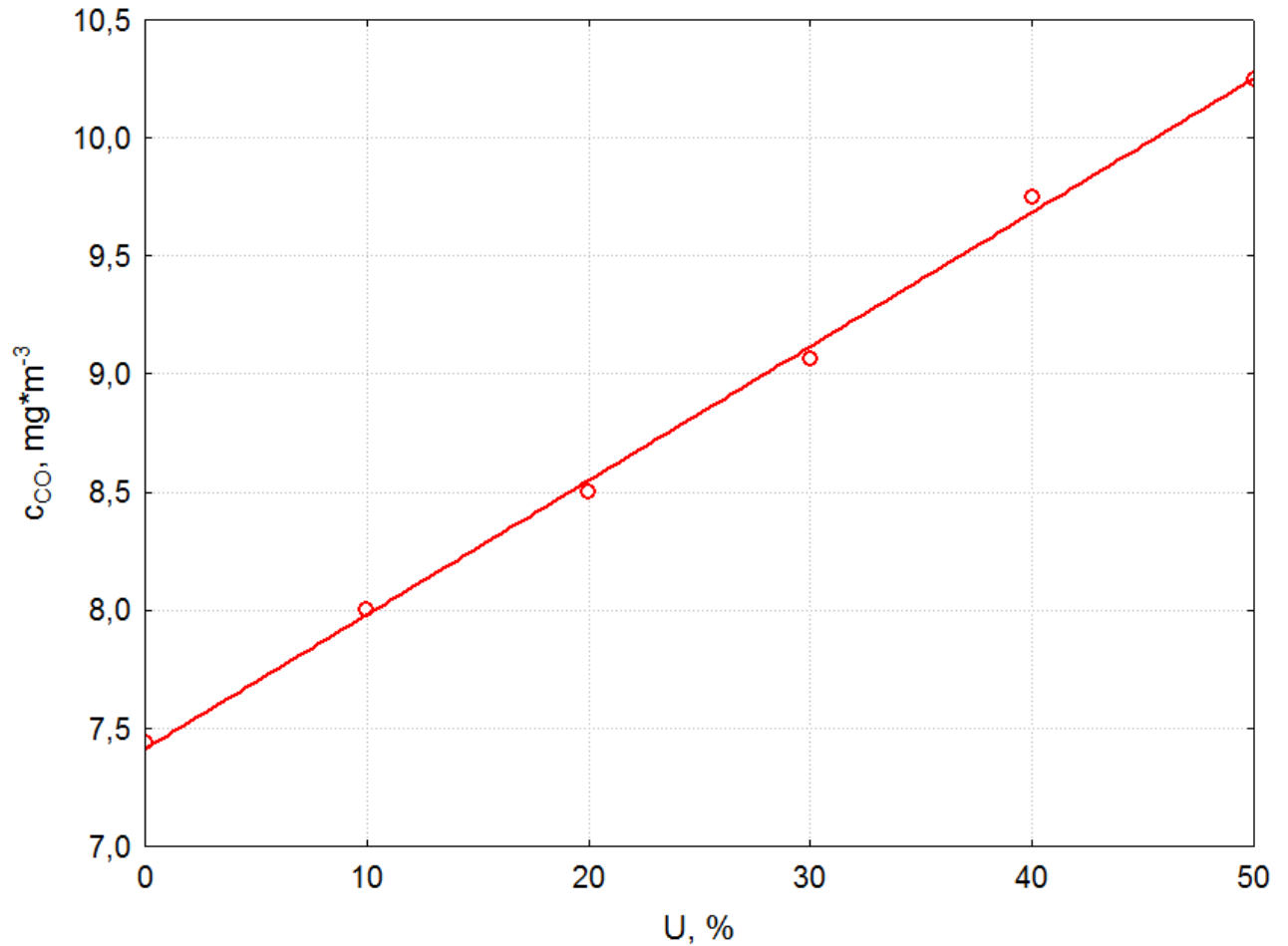
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

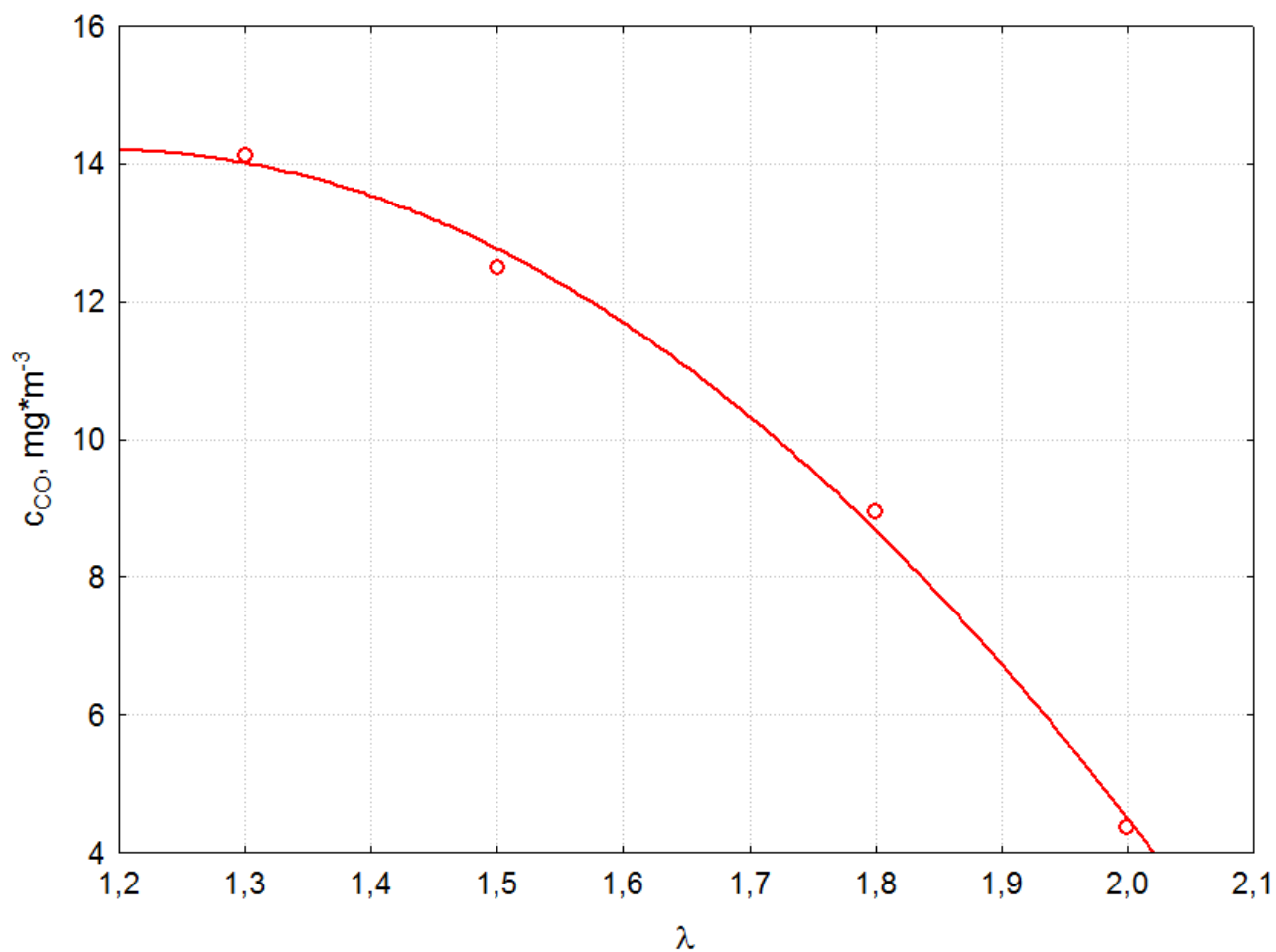


Rys. Z78. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

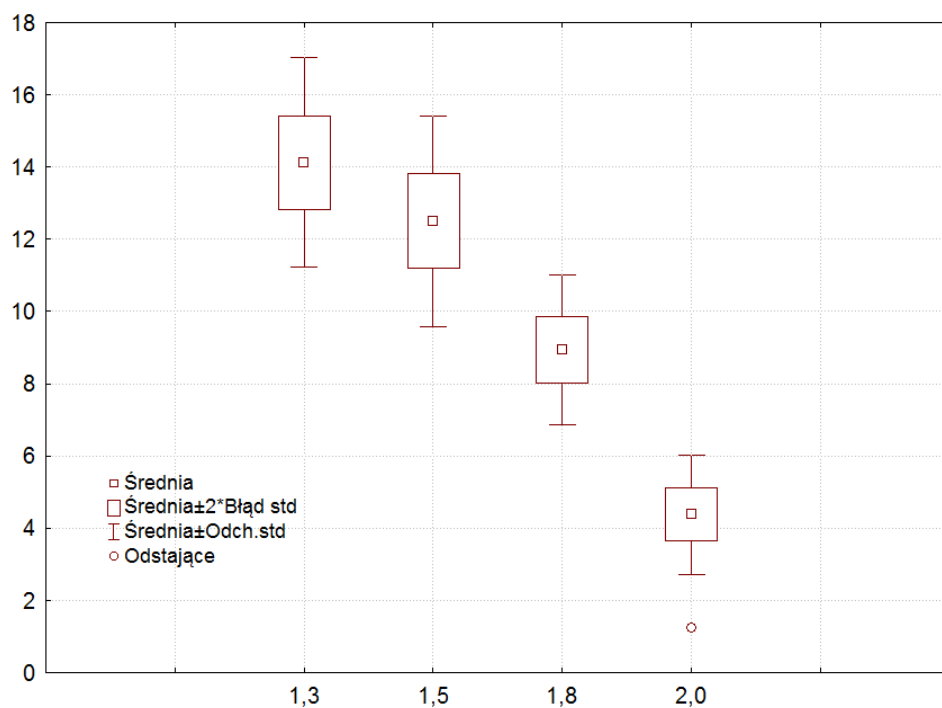
Zestaw wykresów



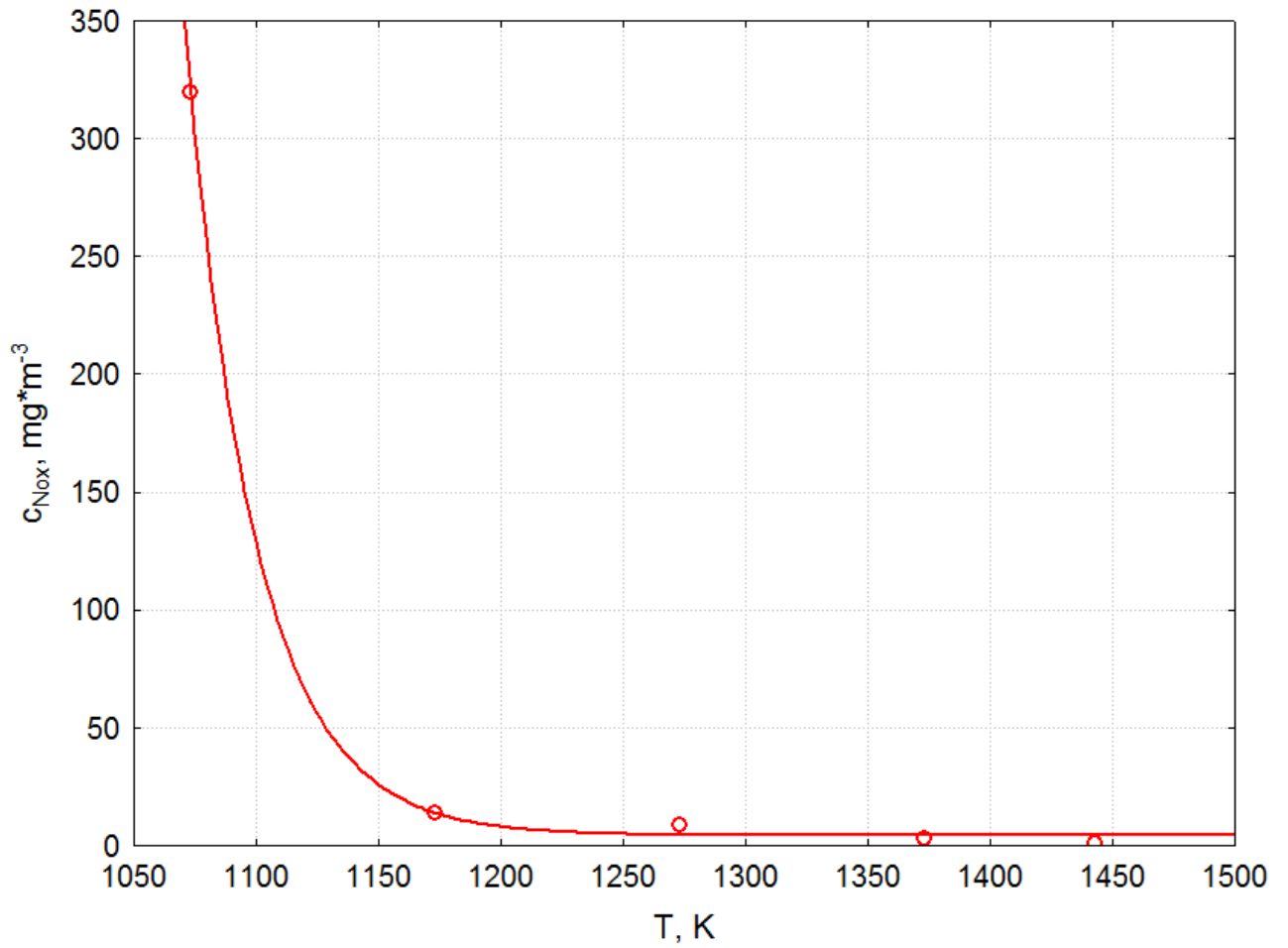
Rys. Z79. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi



Parametry stałe:
T = 1273,15K
U = 10%



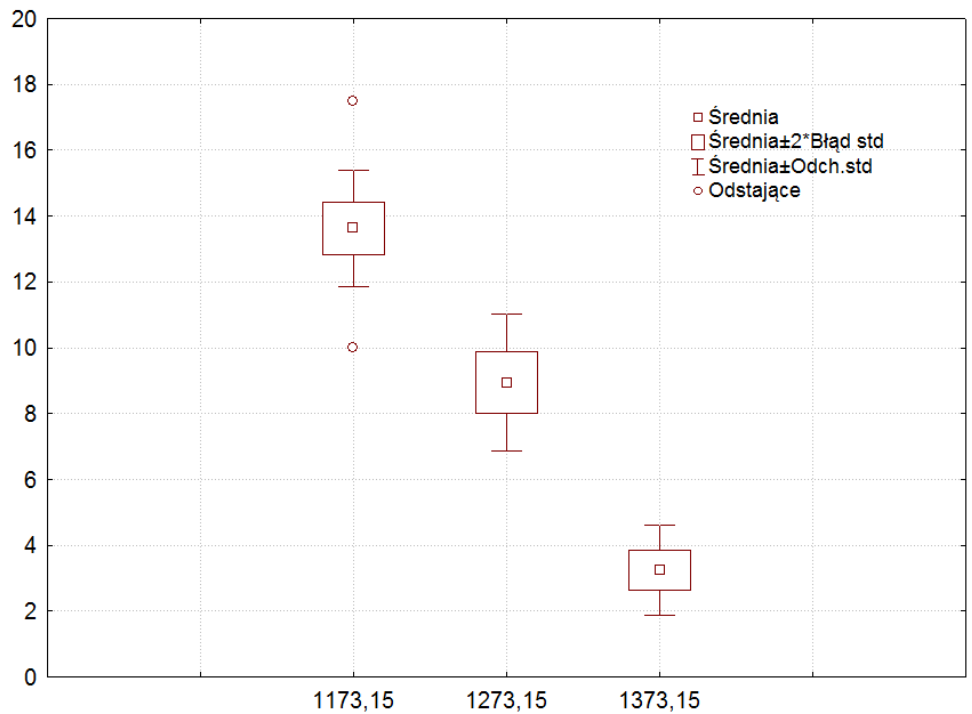
Rys. Z80. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi



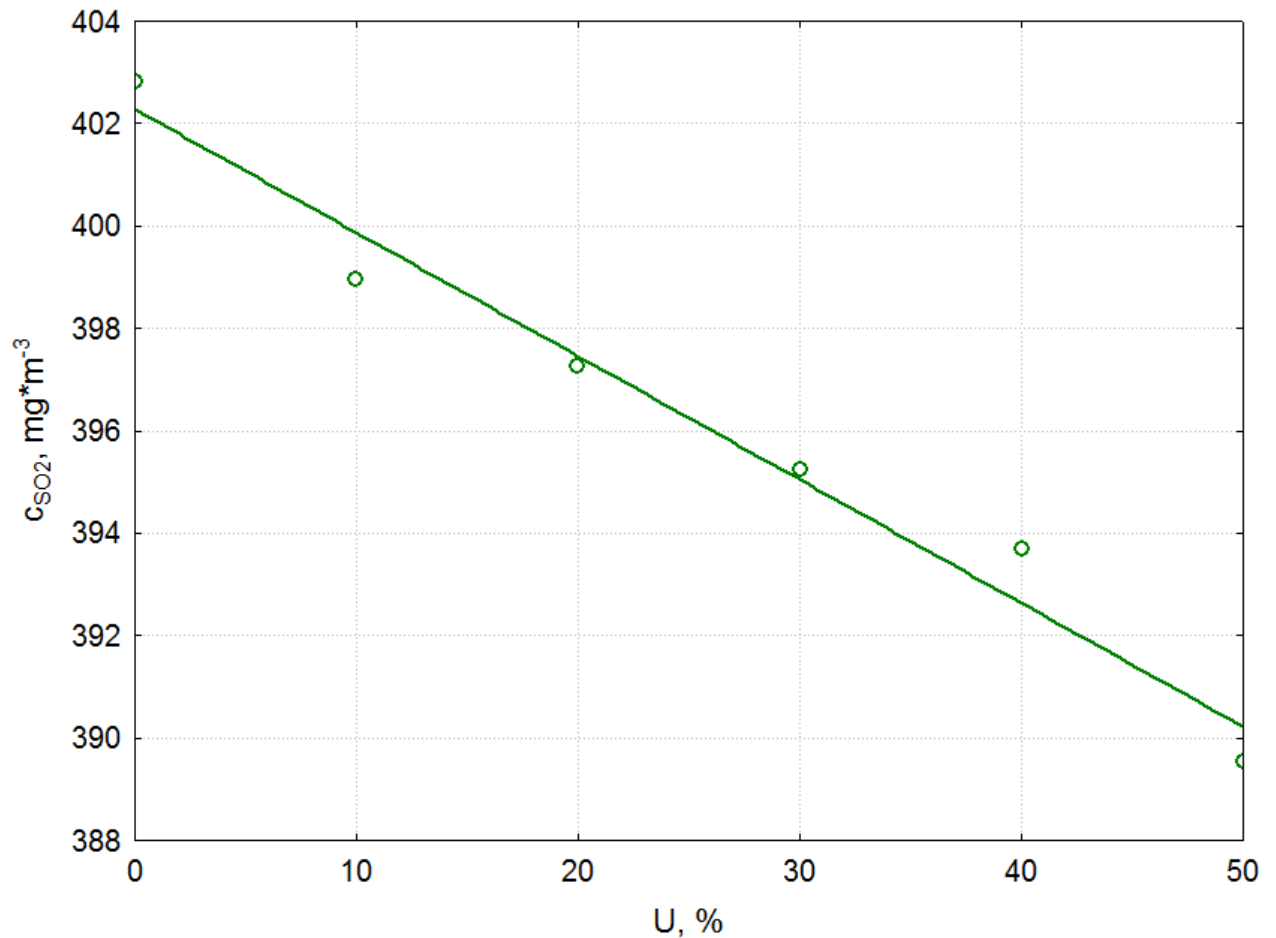
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

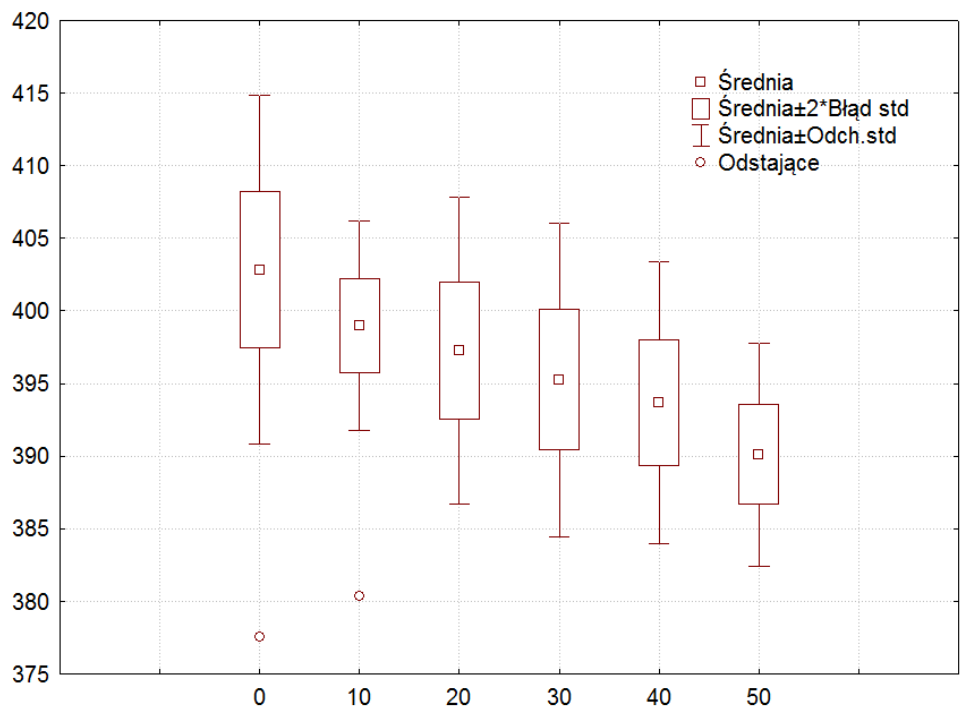
$U = 10\%$



Rys. Z81. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami farbiarskimi

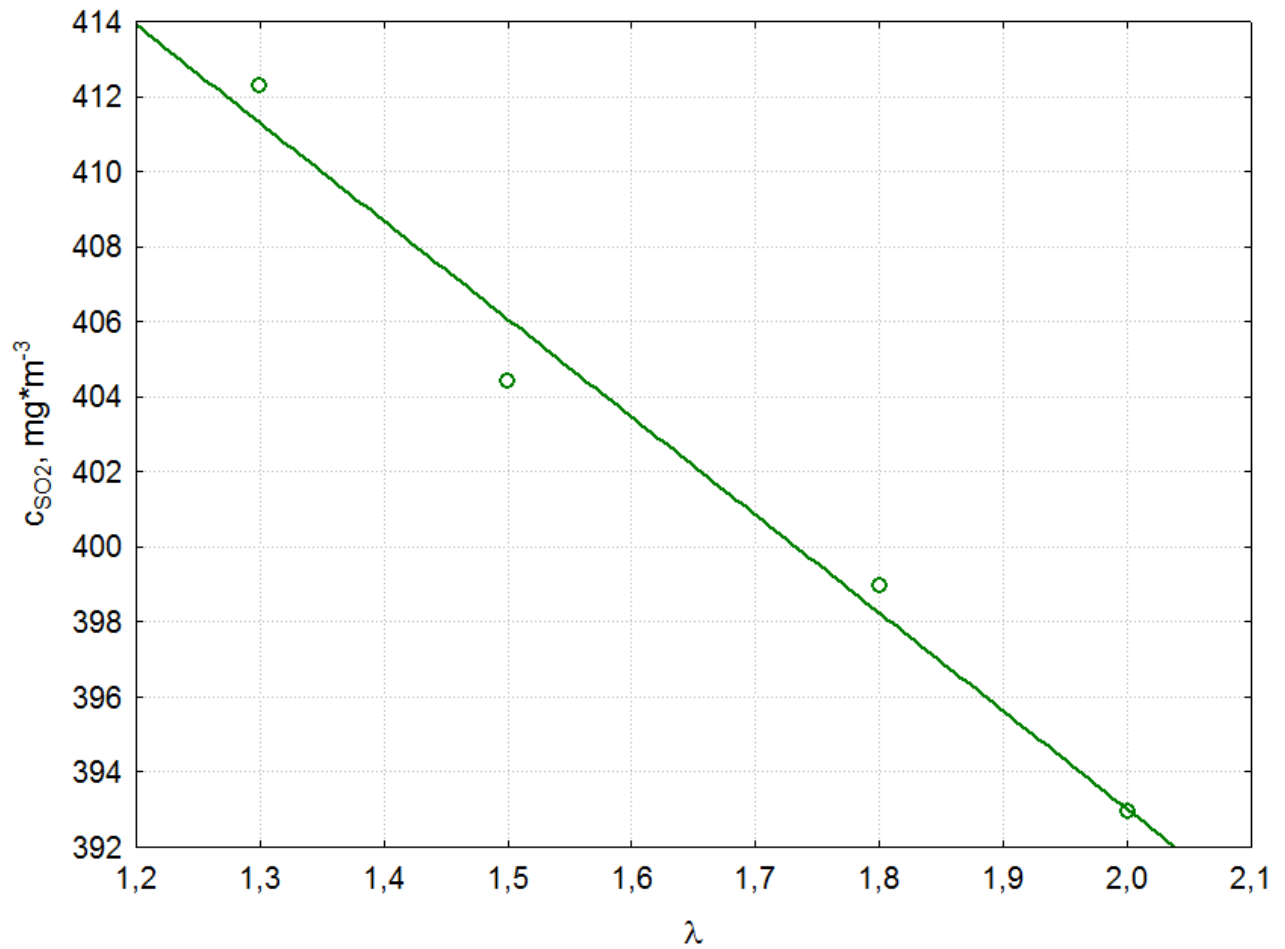


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$

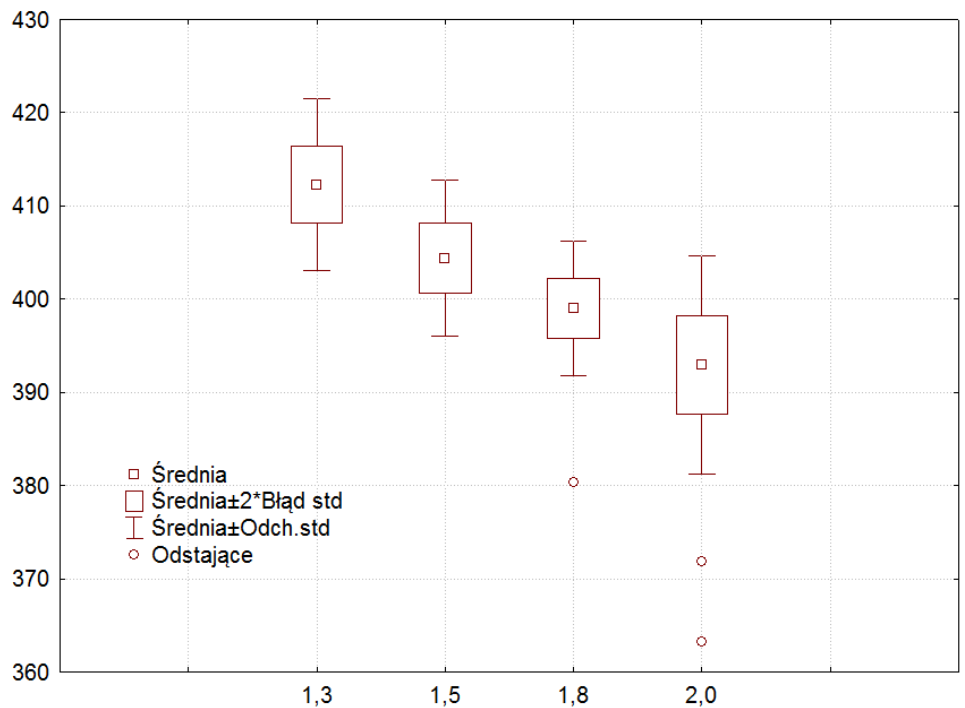


Rys. Z82. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

Zestaw wykresów

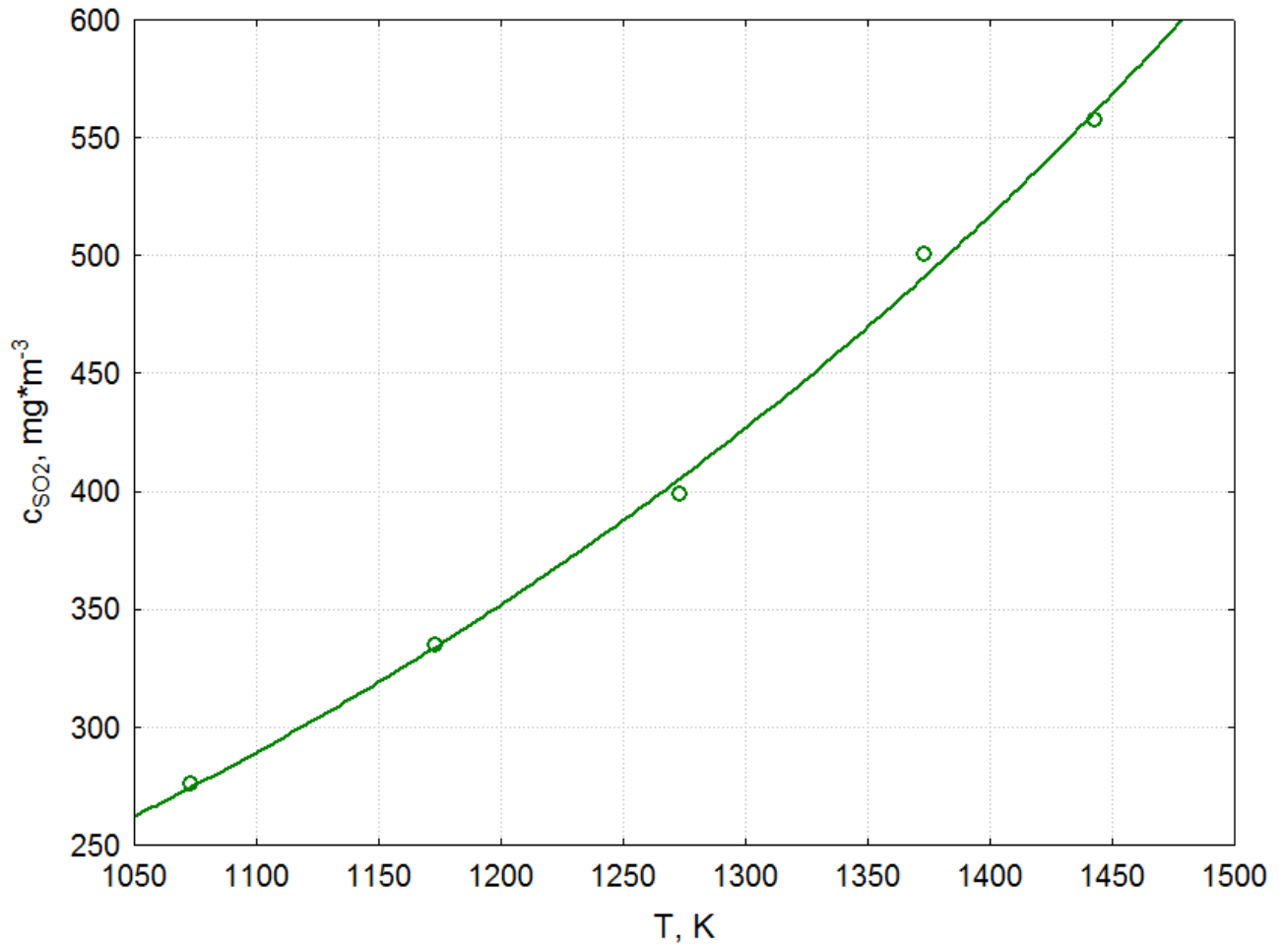


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $U = 10\%$



Rys. Z83. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

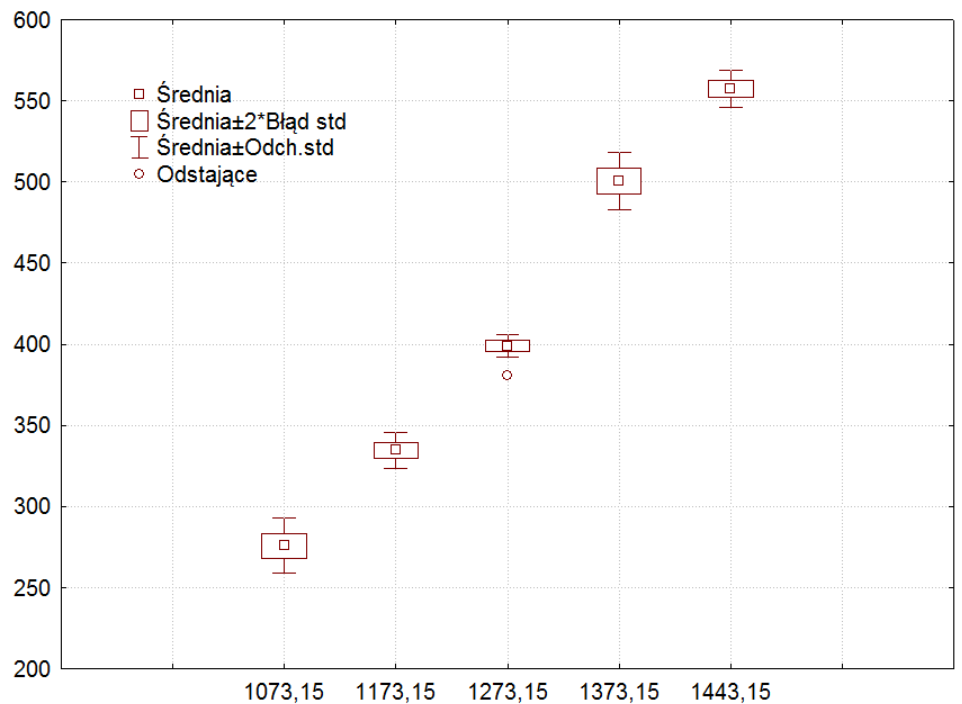
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

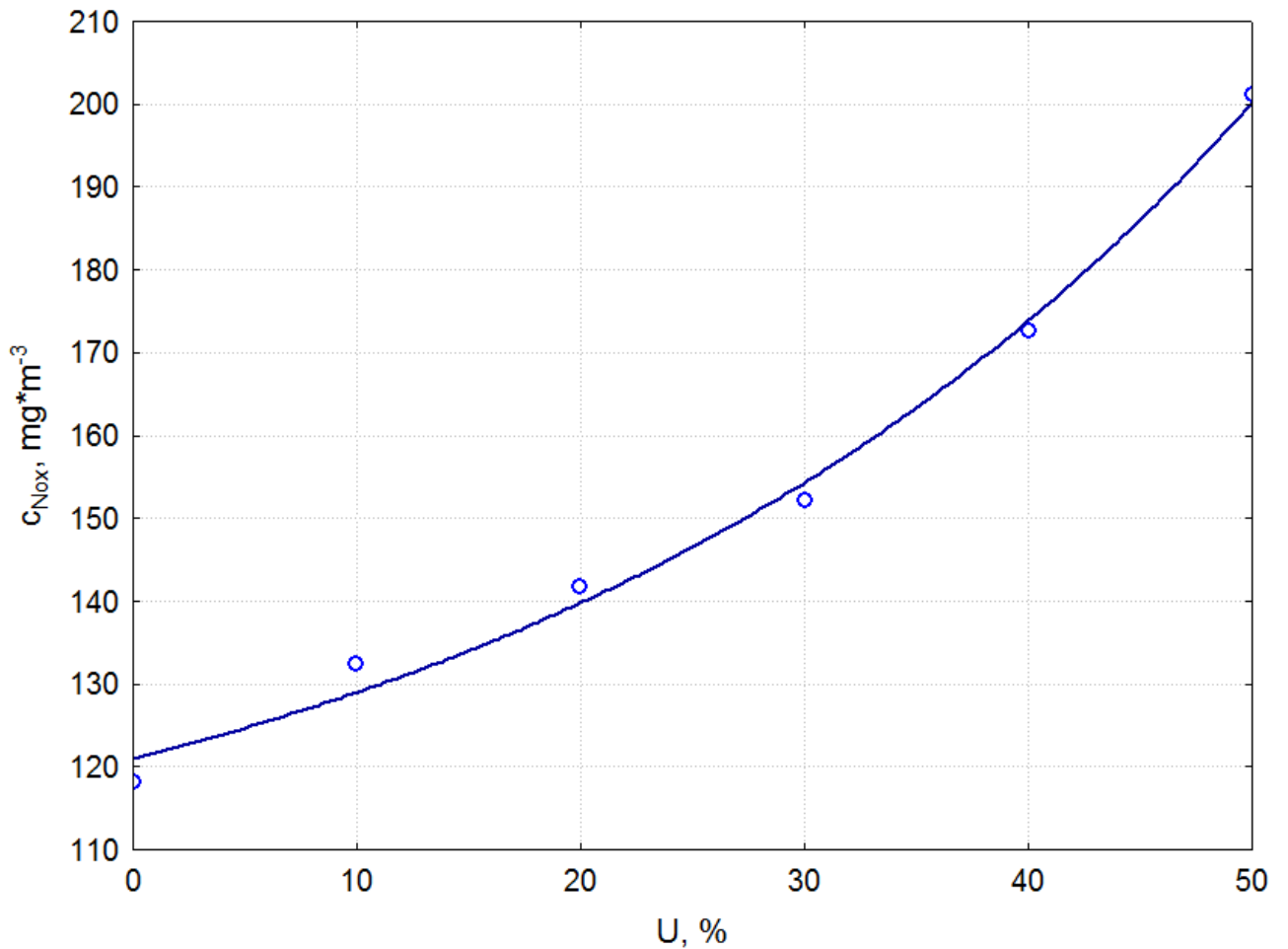
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$



Rys. Z84. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

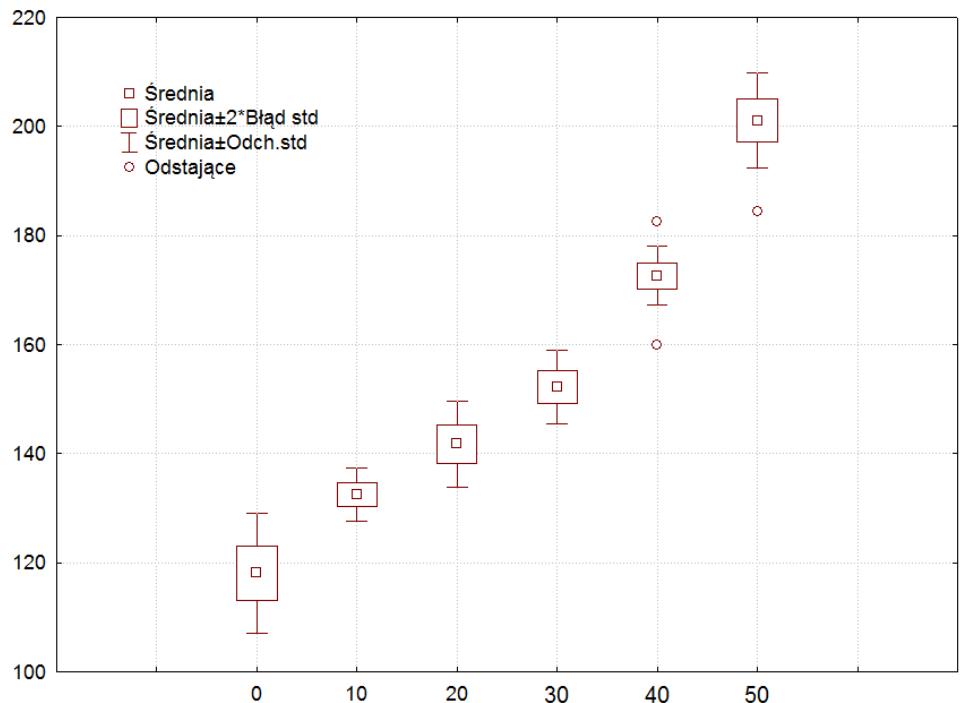
Zestaw wykresów



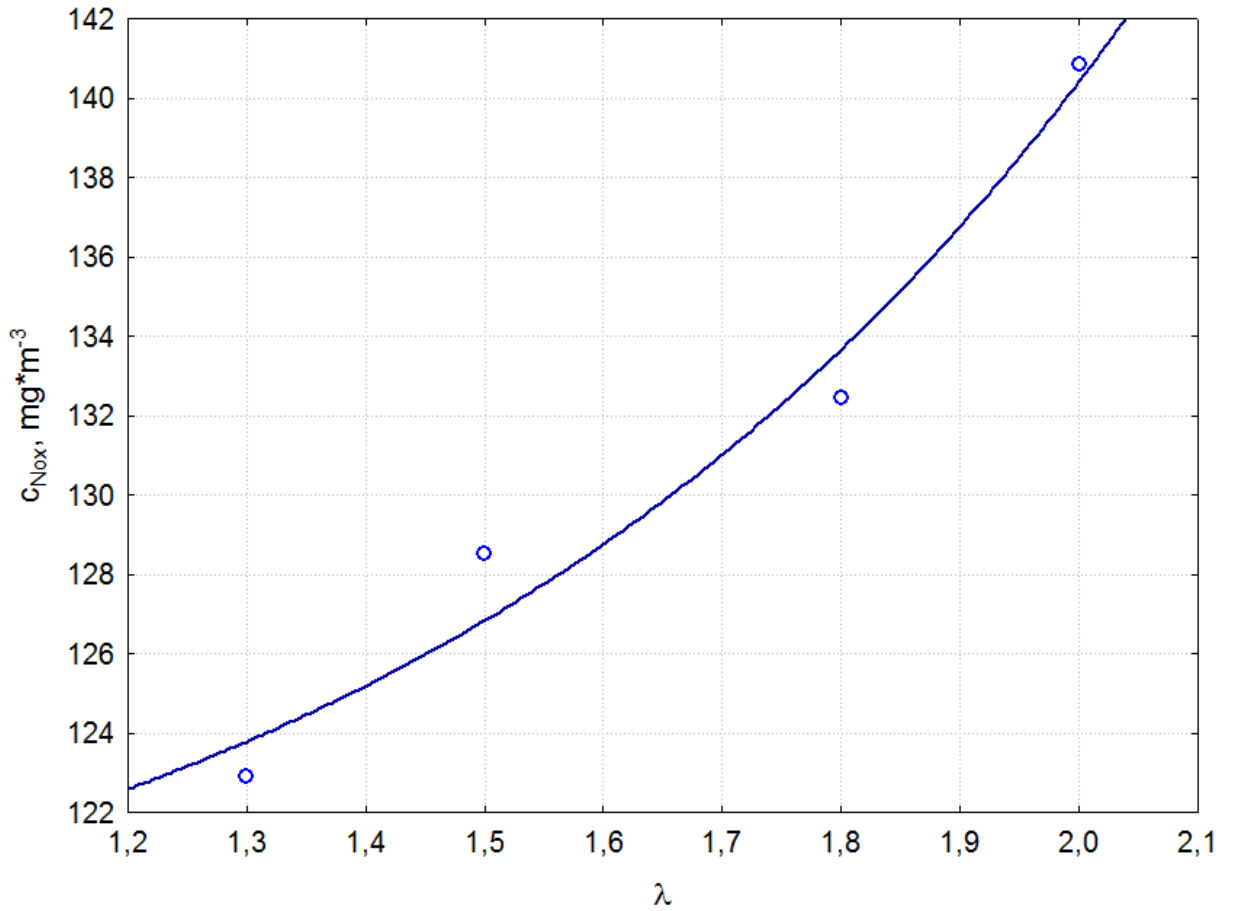
Parametry stałe:

$T = 1273,15\text{K}$

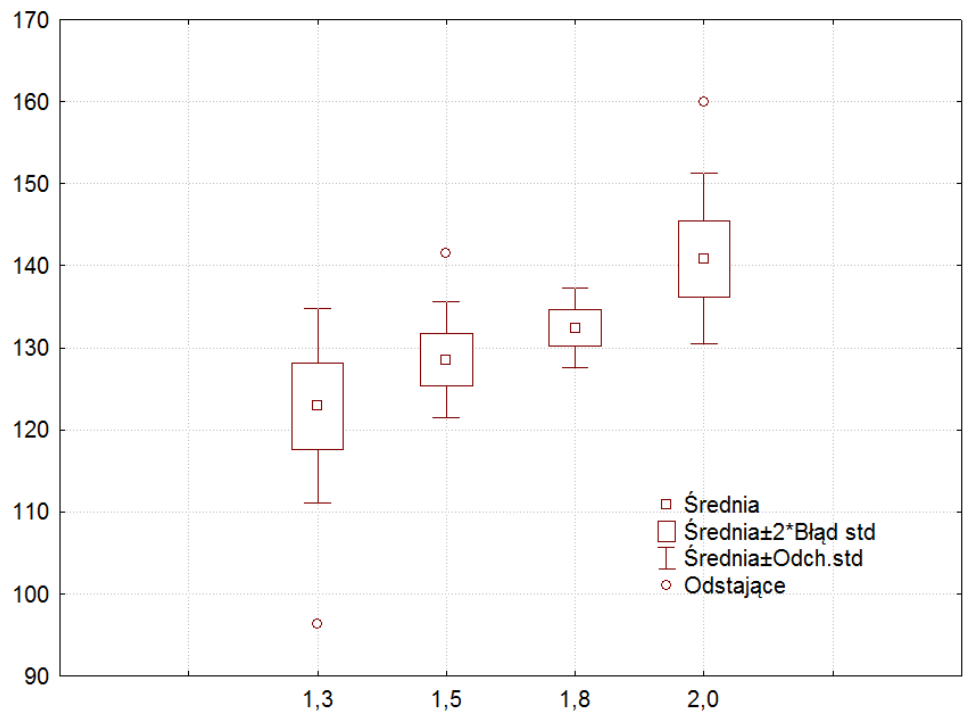
$\lambda = 1,8$



Rys. Z85. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

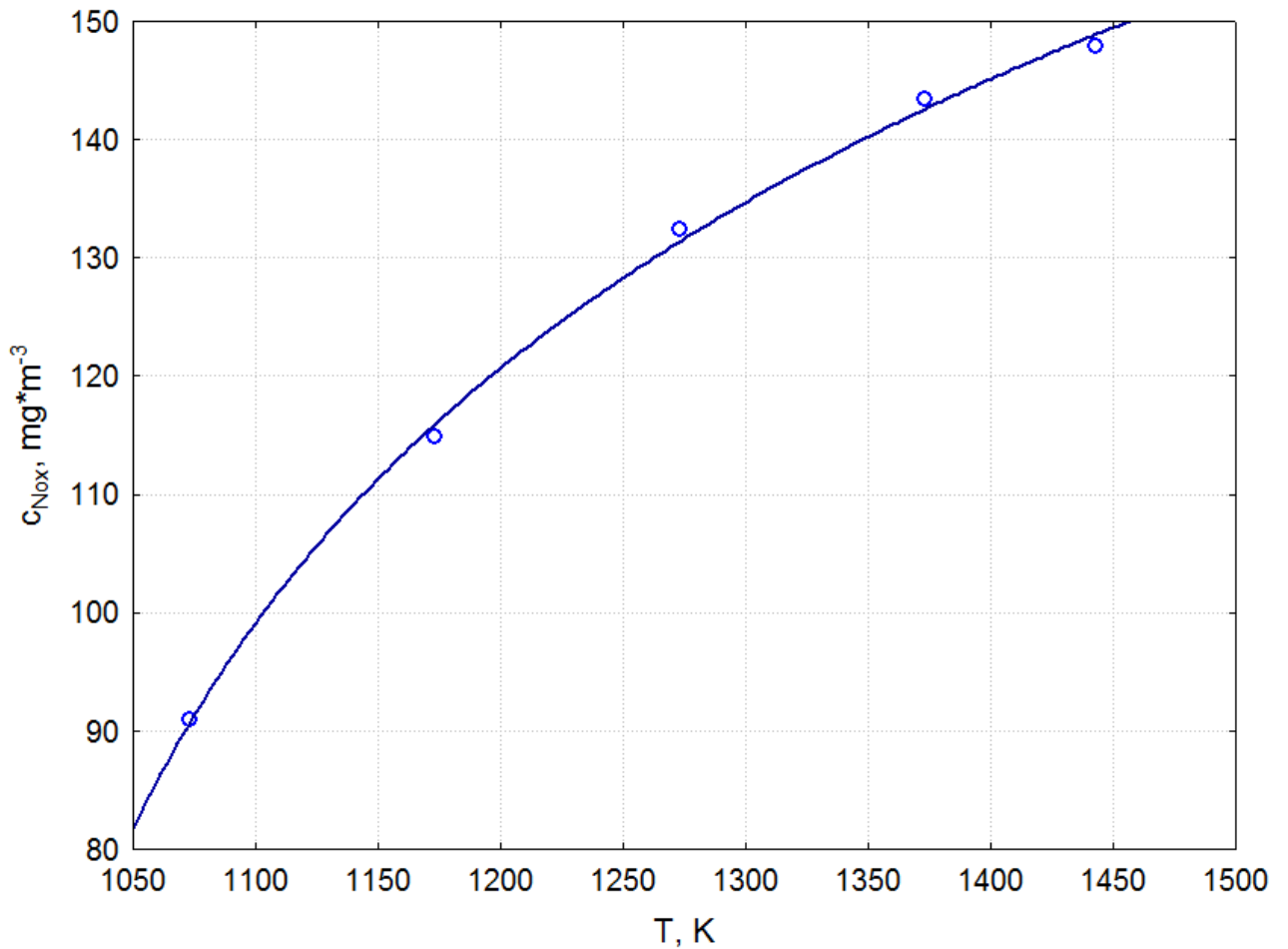


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $U = 10\%$



Rys. Z86. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

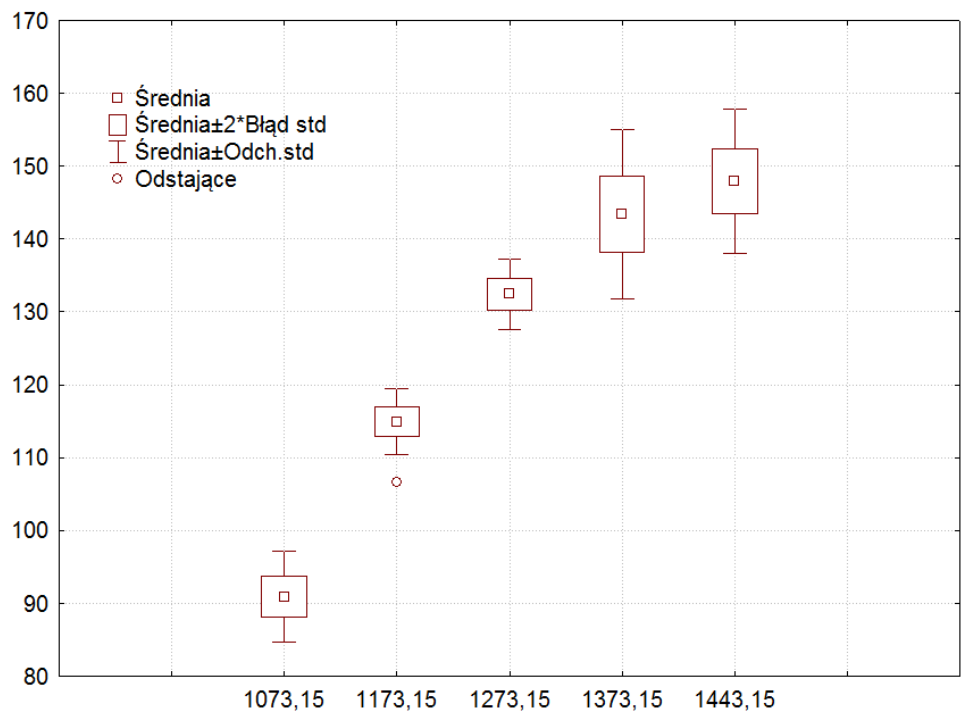
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

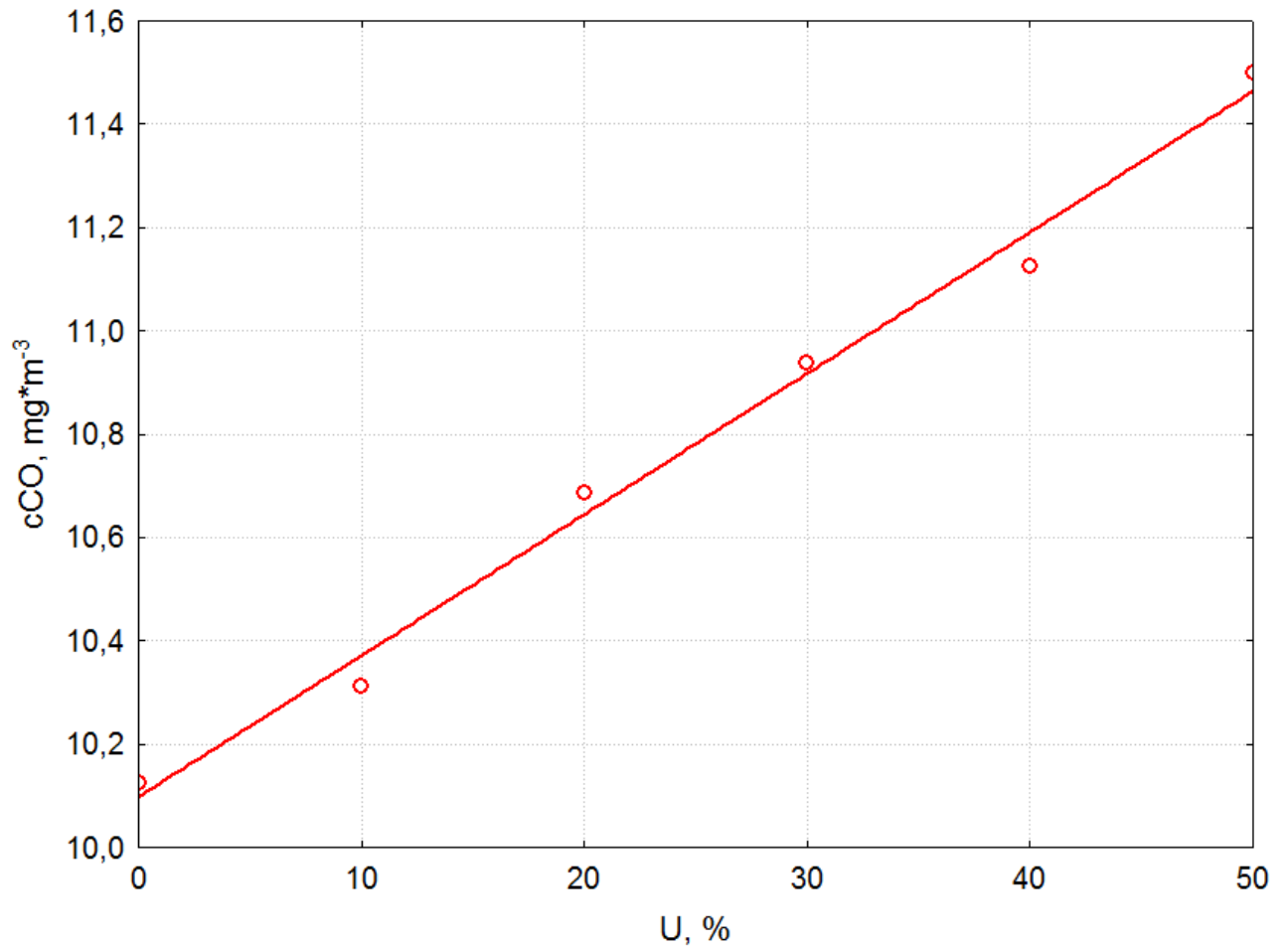
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

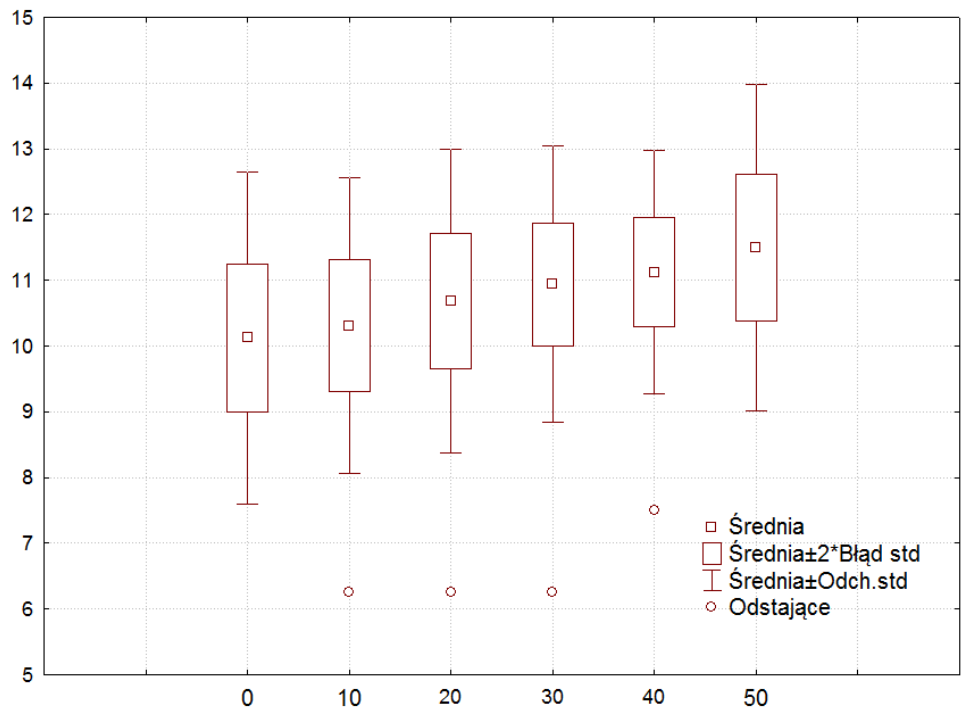


Rys. Z87. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

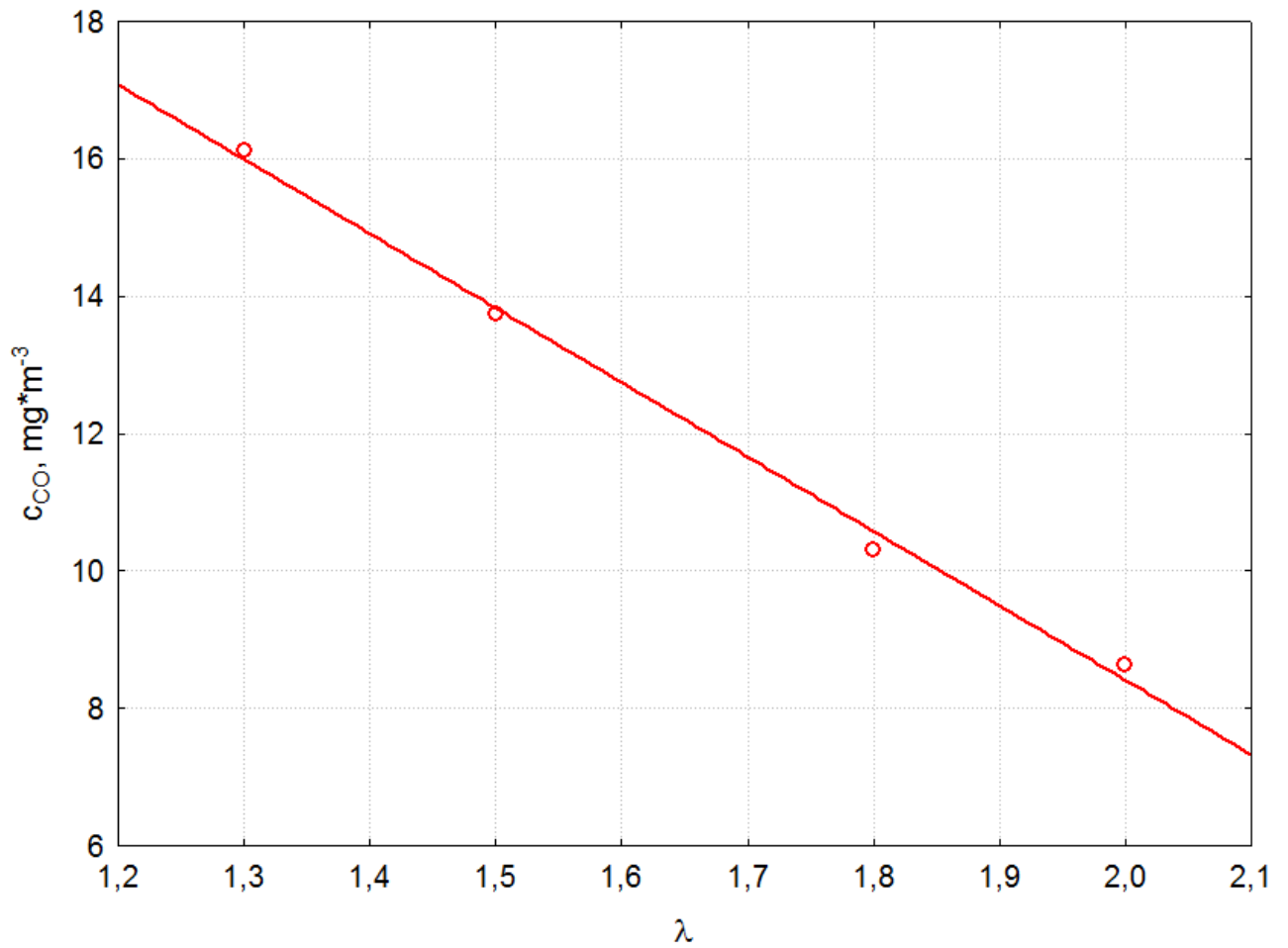
Zestaw wykresów



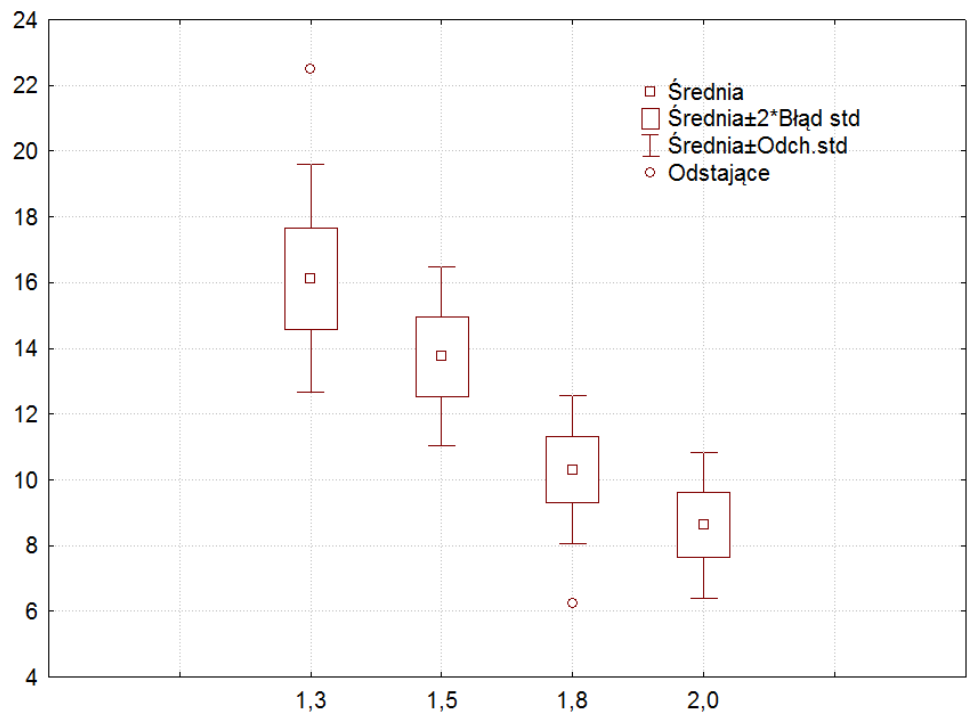
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z88. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

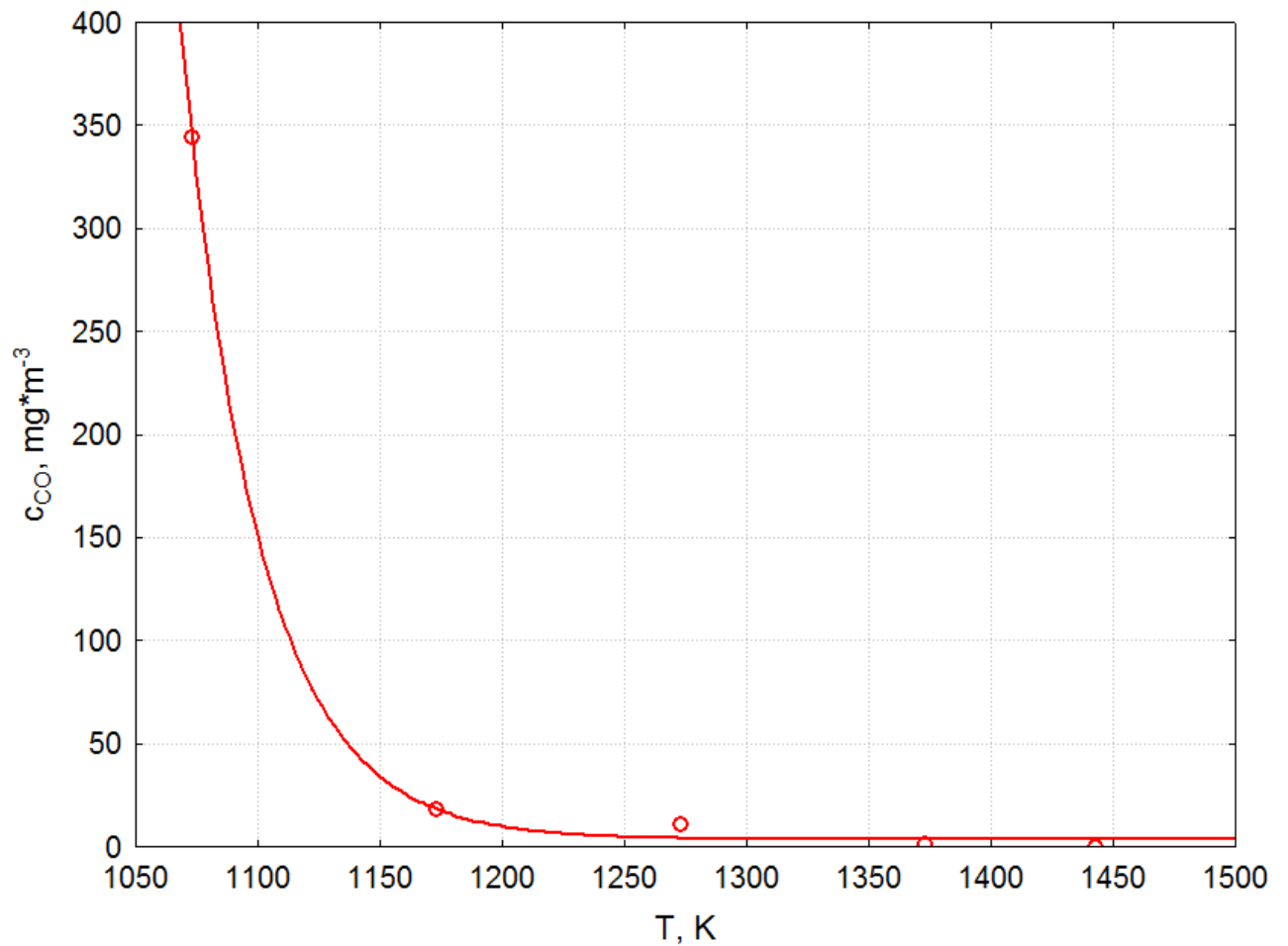


Parametry stałe:
T = 1273,15K
U = 10%



Rys. Z89. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

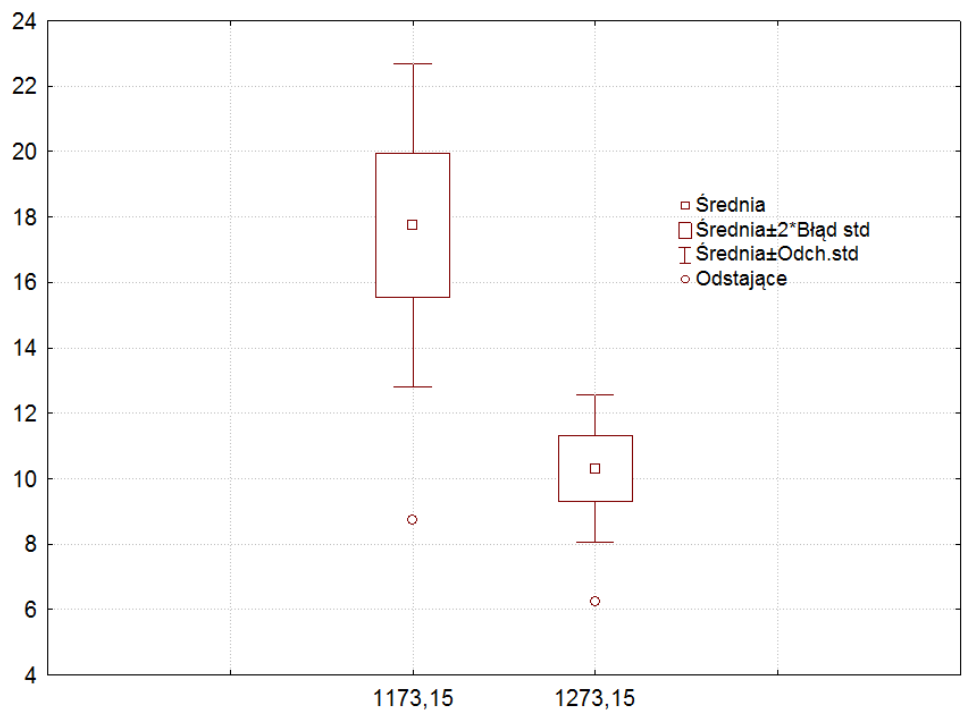
Zestaw wykresów



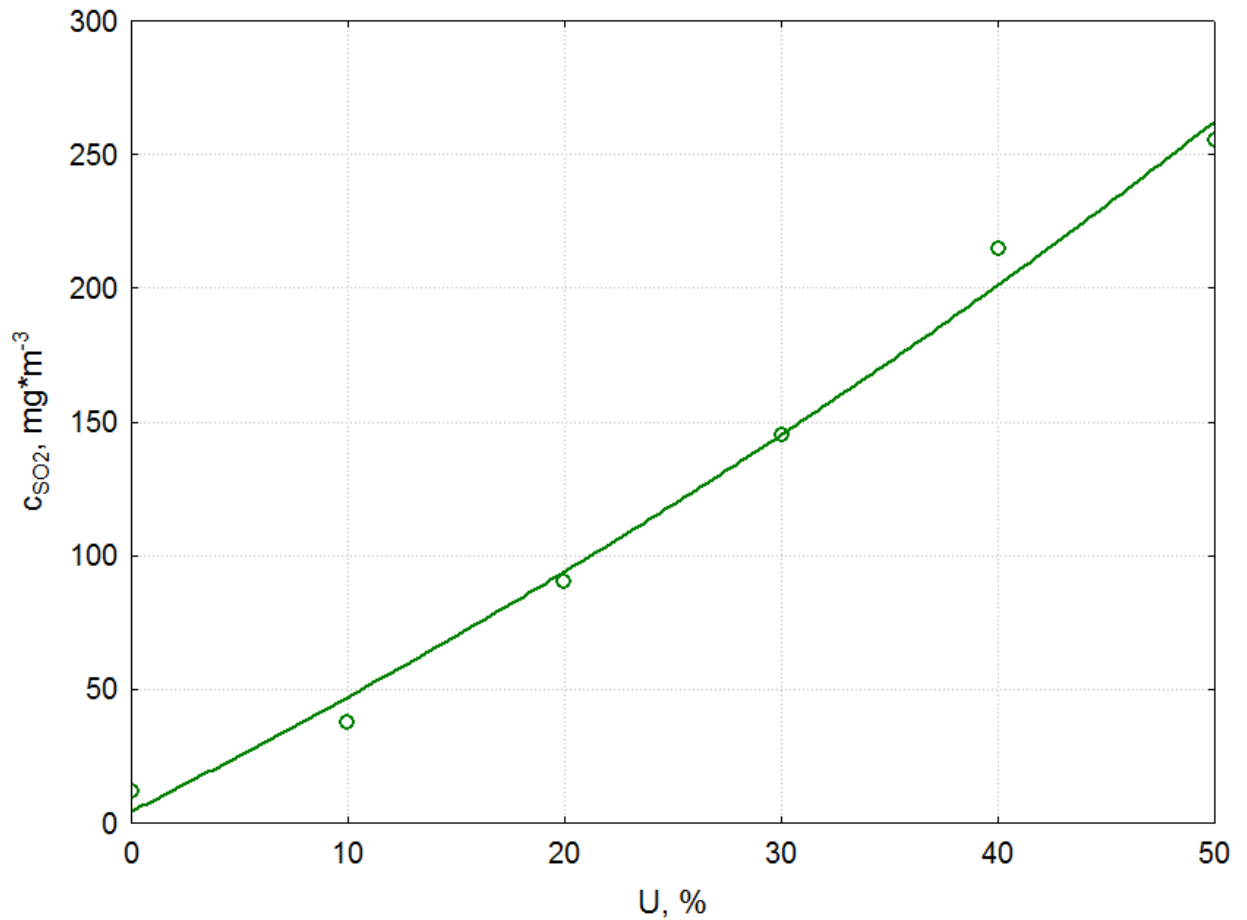
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

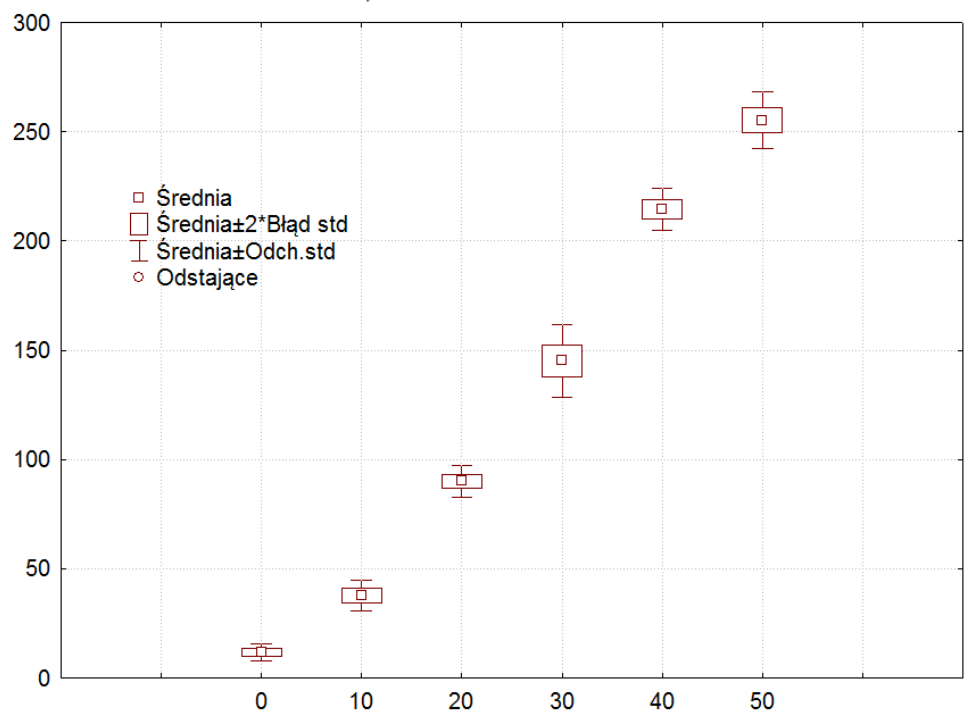
$U = 10\%$



Rys. Z90. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenu węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi

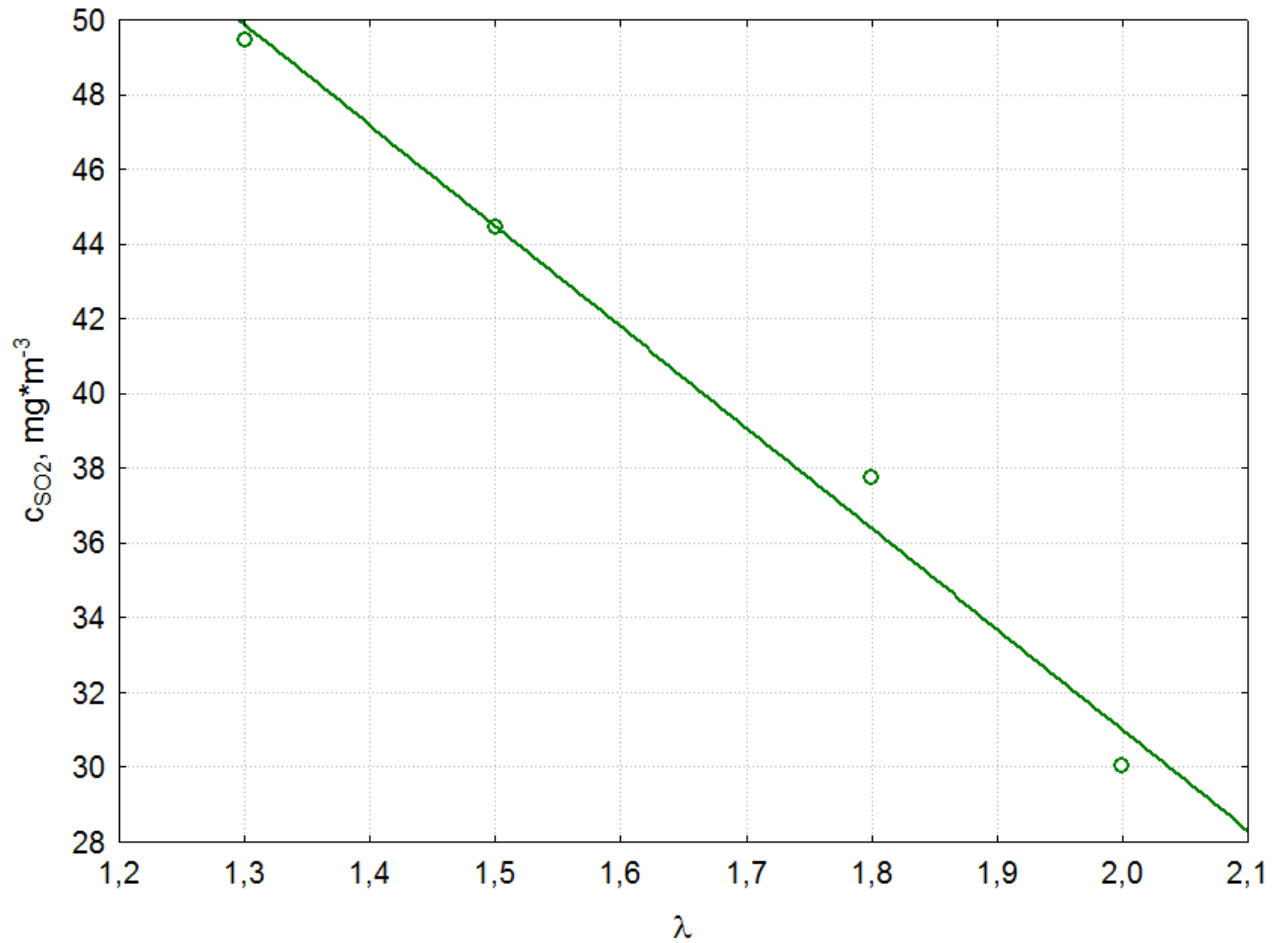


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$

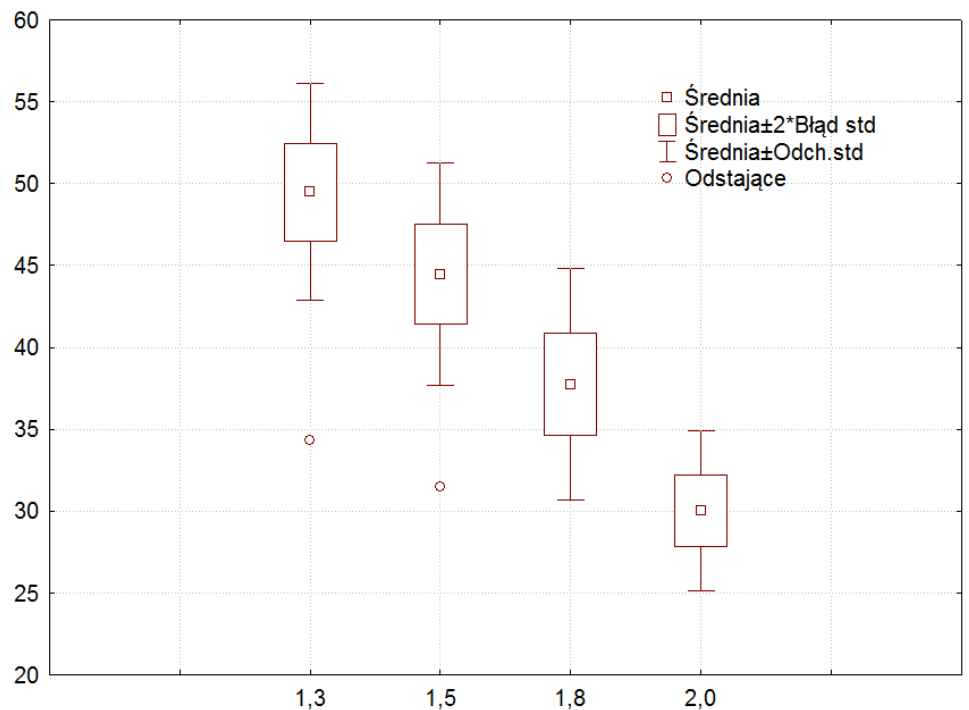


Rys. Z91. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

Zestaw wykresów

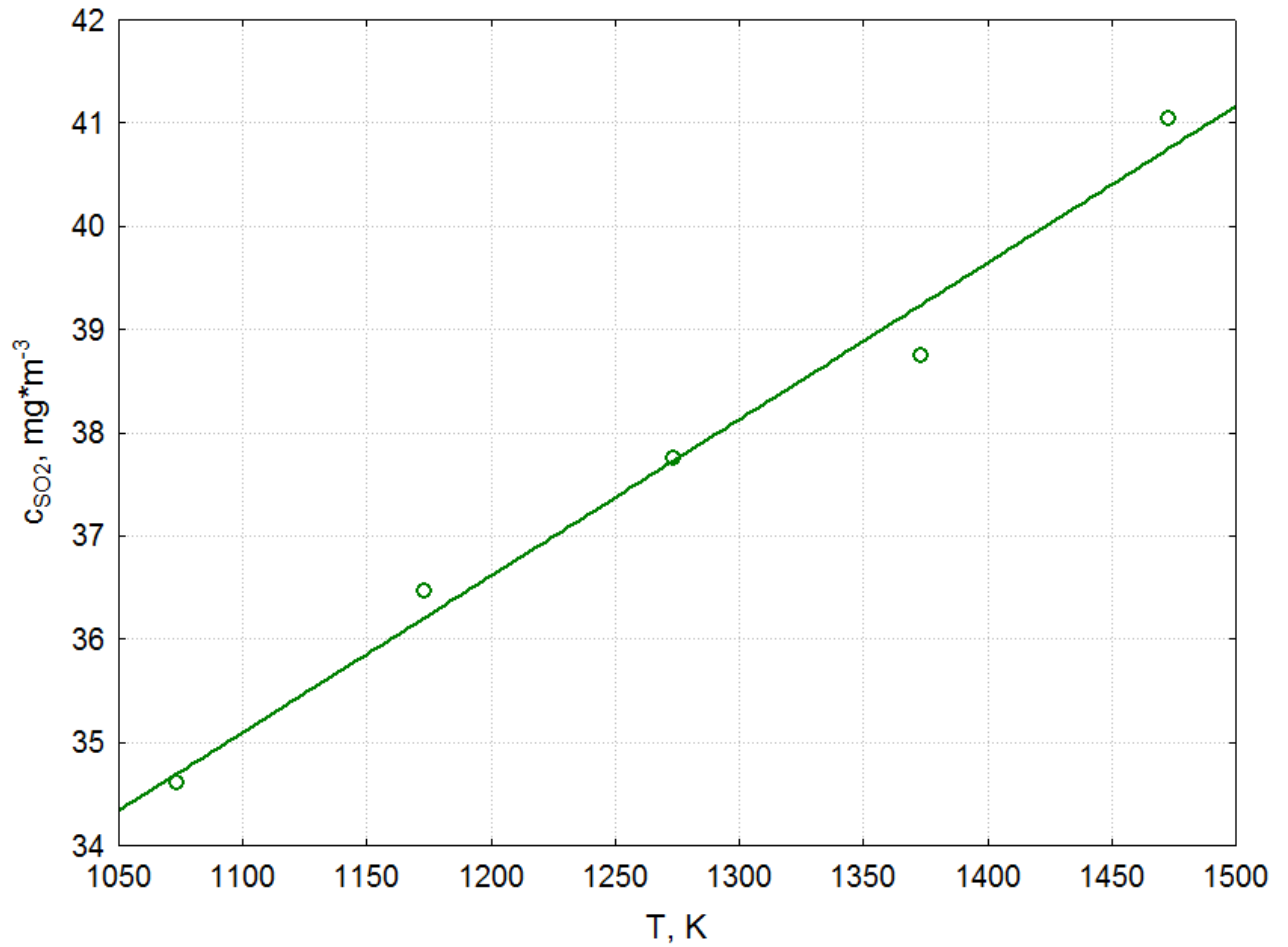


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $U = 10\%$



Rys. Z92. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

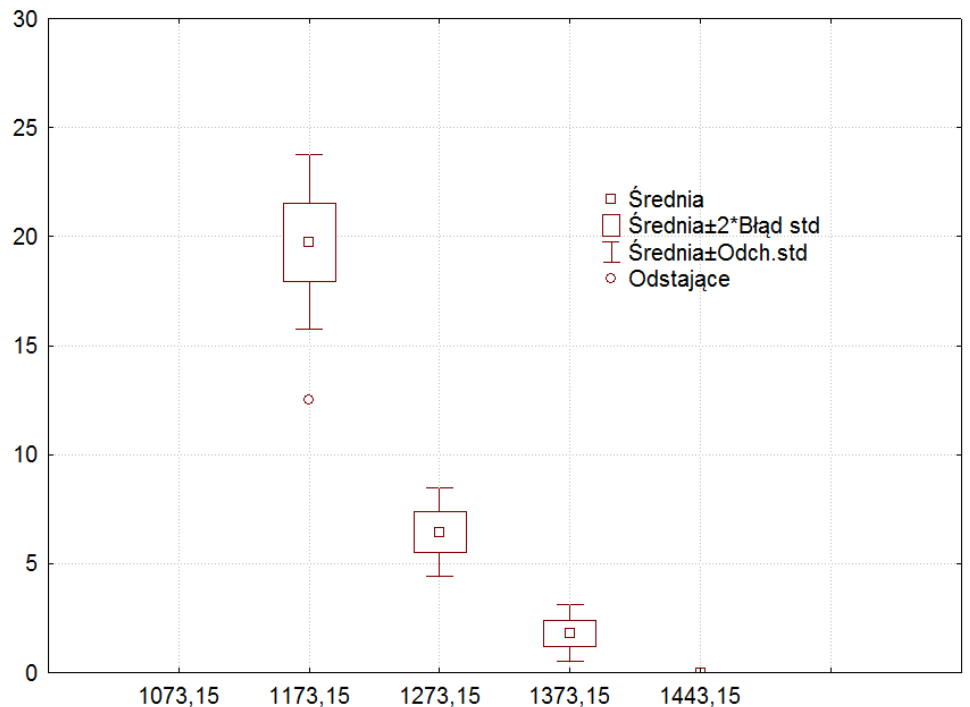
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

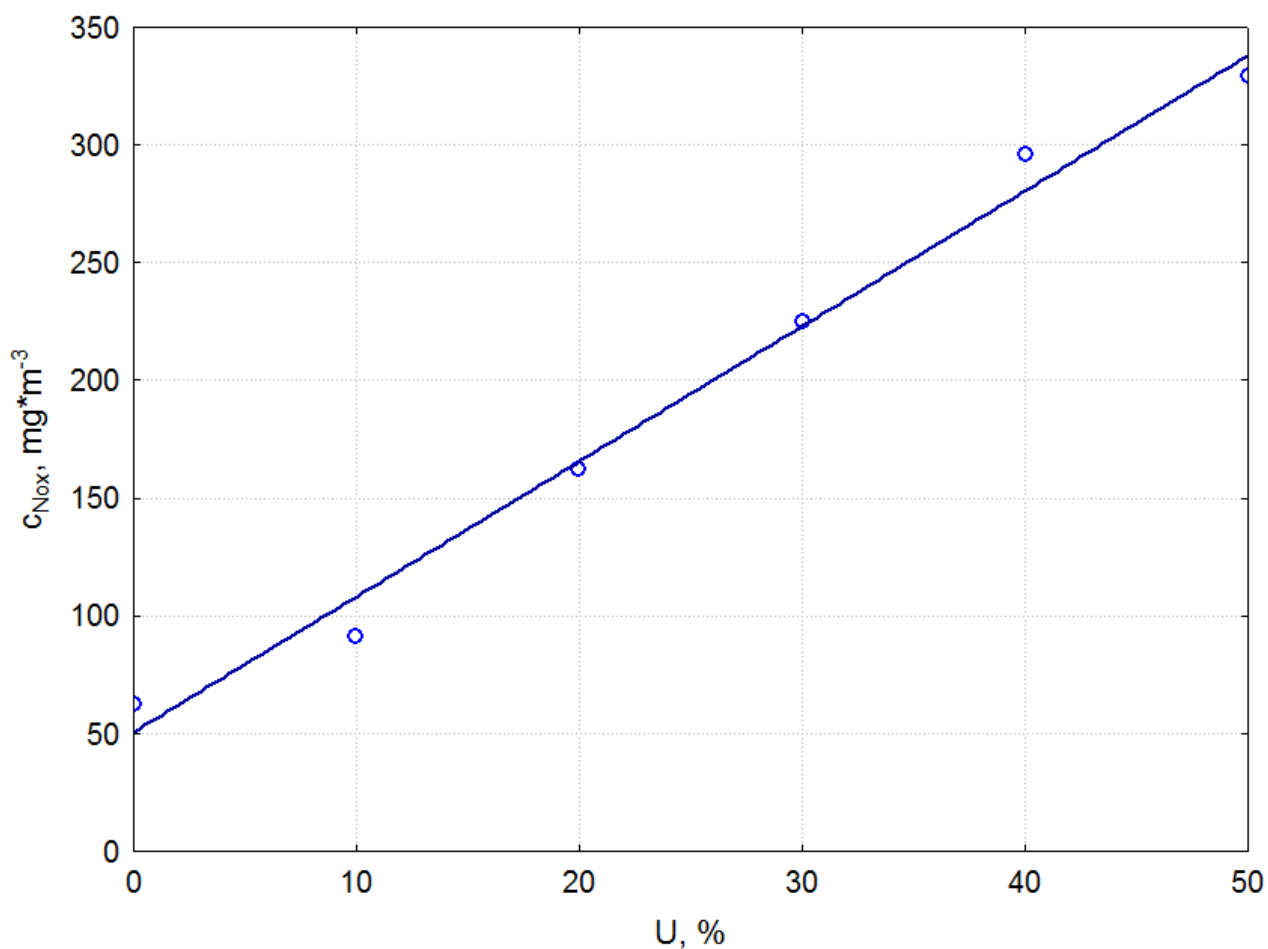
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

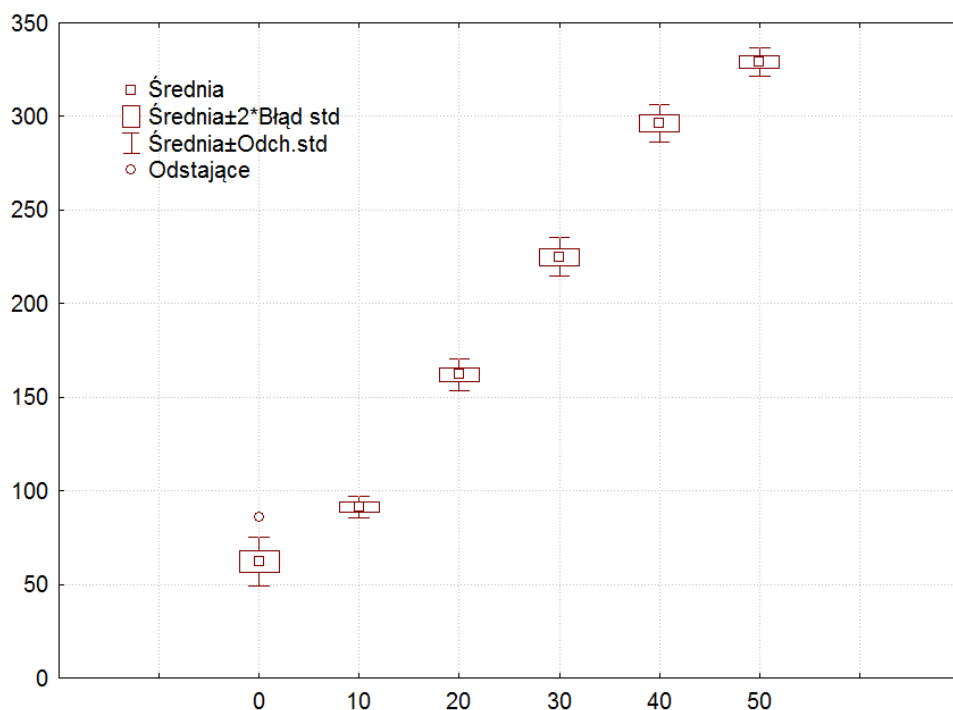


Rys. Z93. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

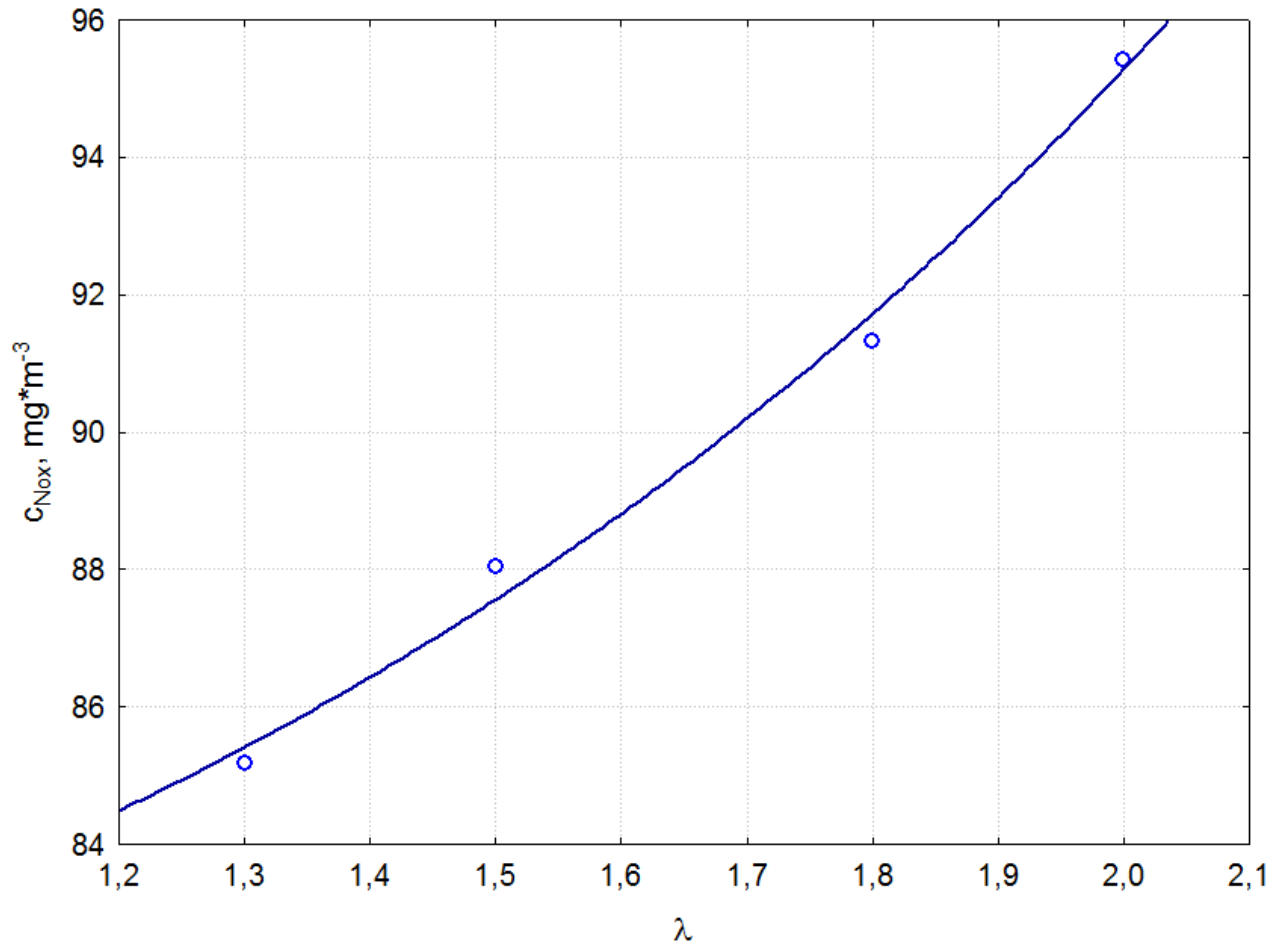
Zestaw wykresów



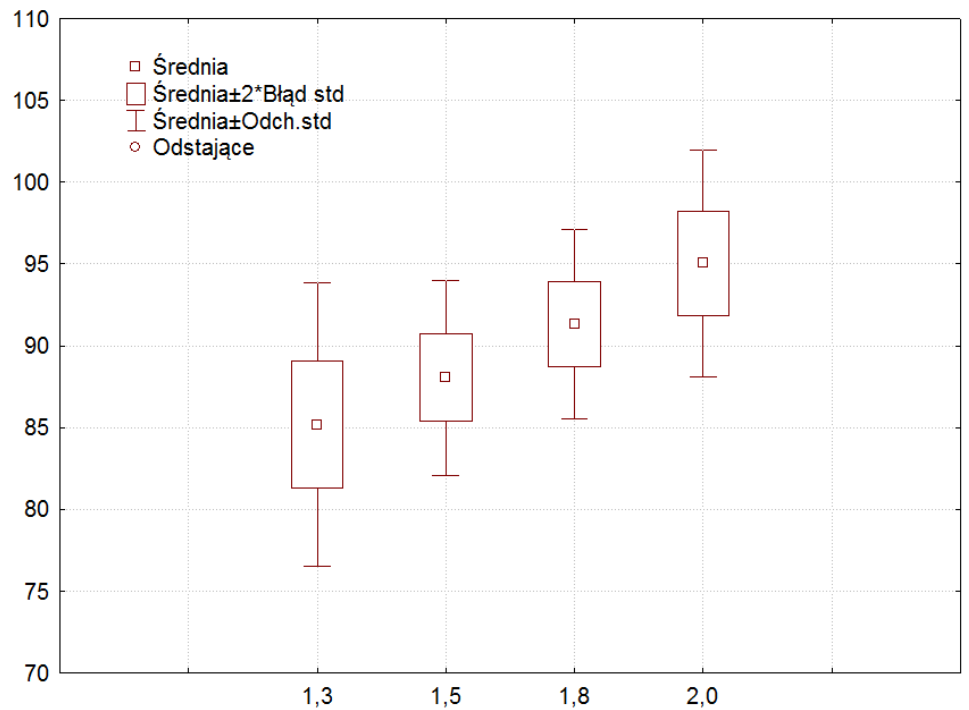
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z94. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

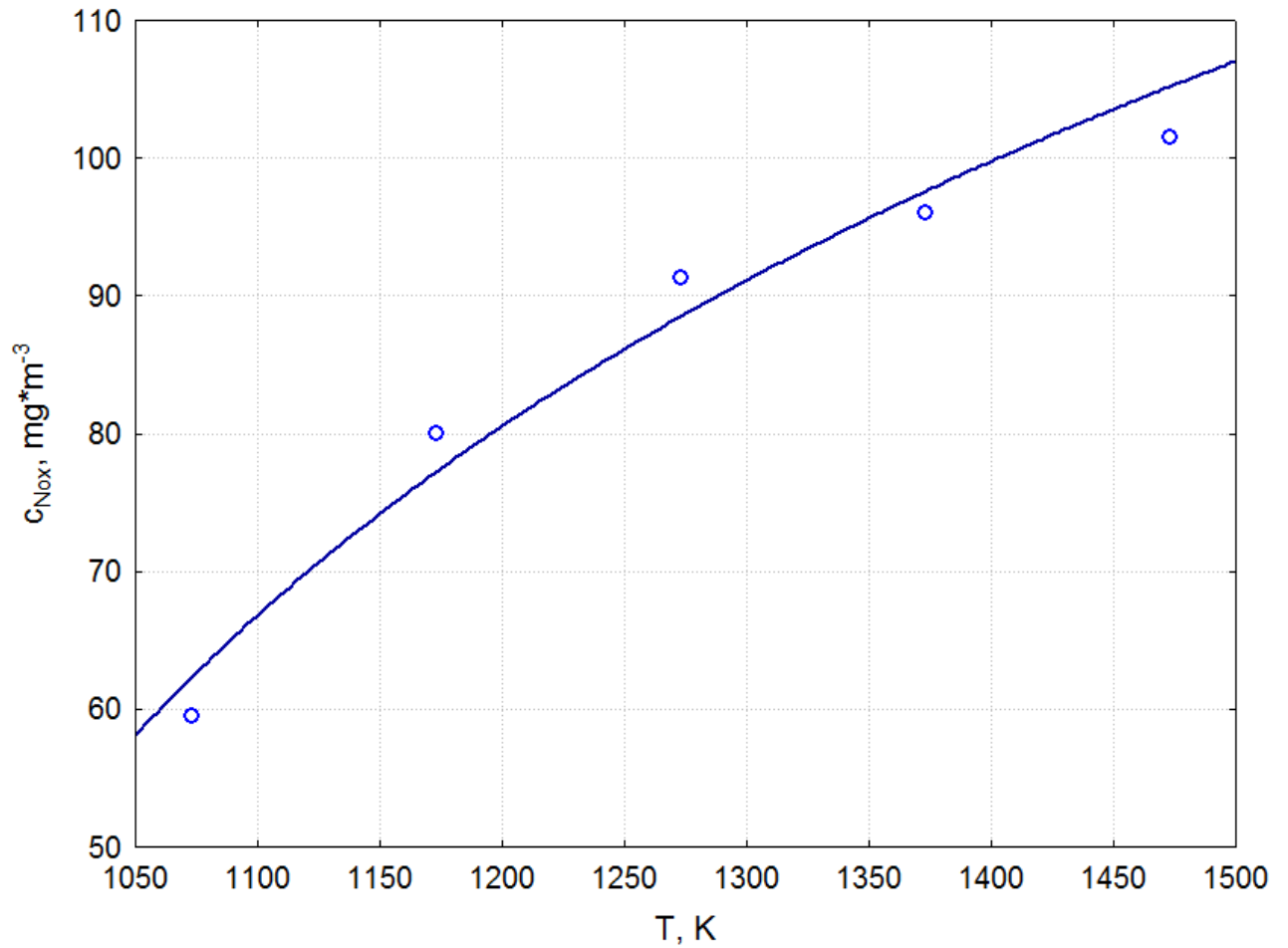


Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $U = 10\%$



Rys. Z95. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

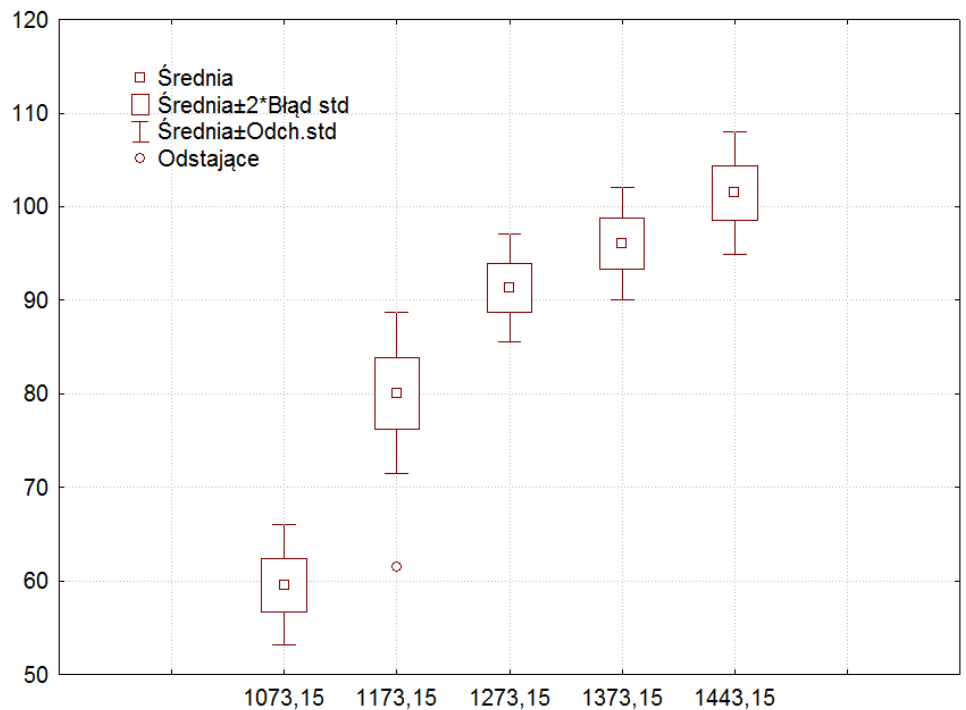
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

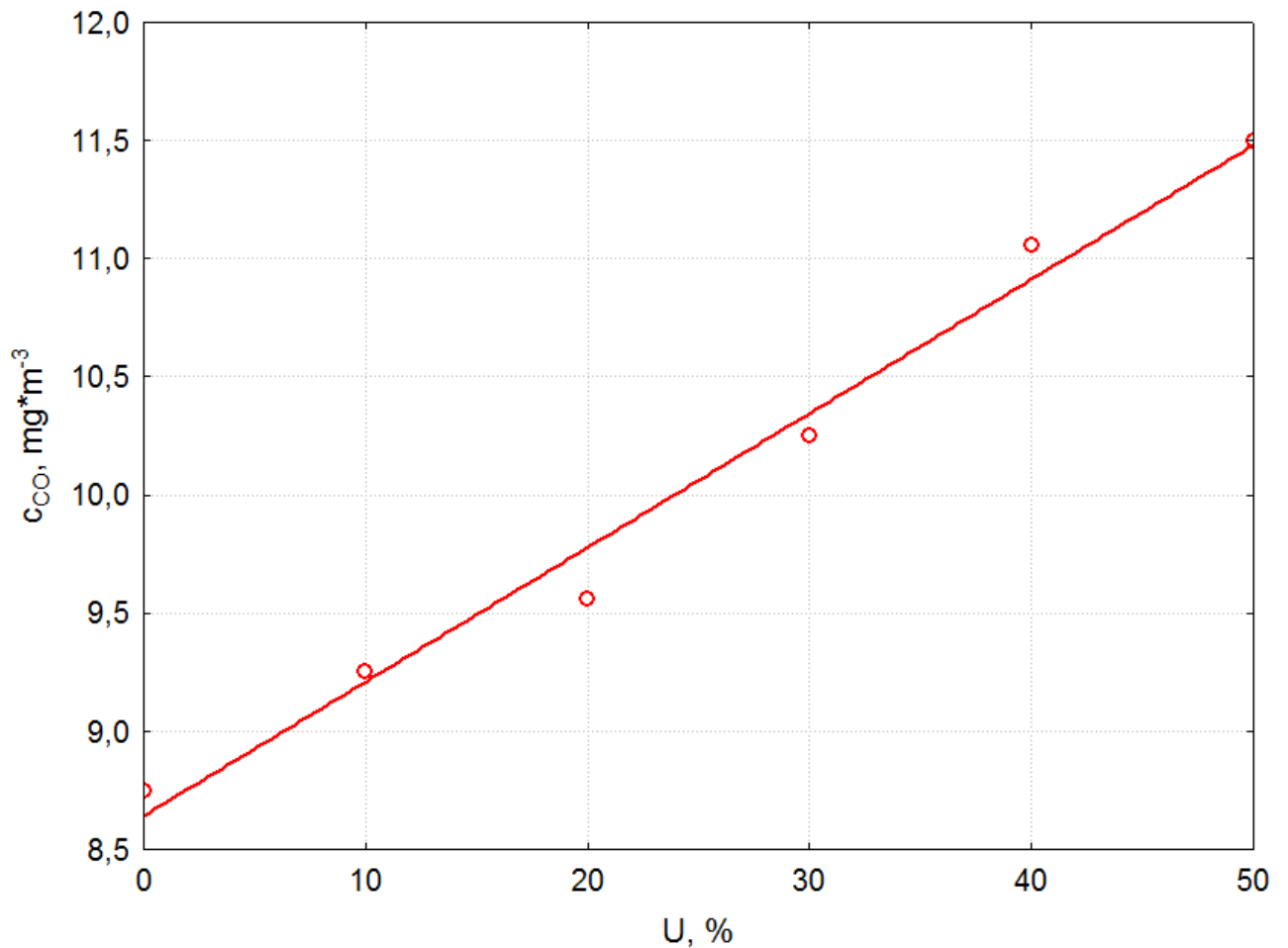
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

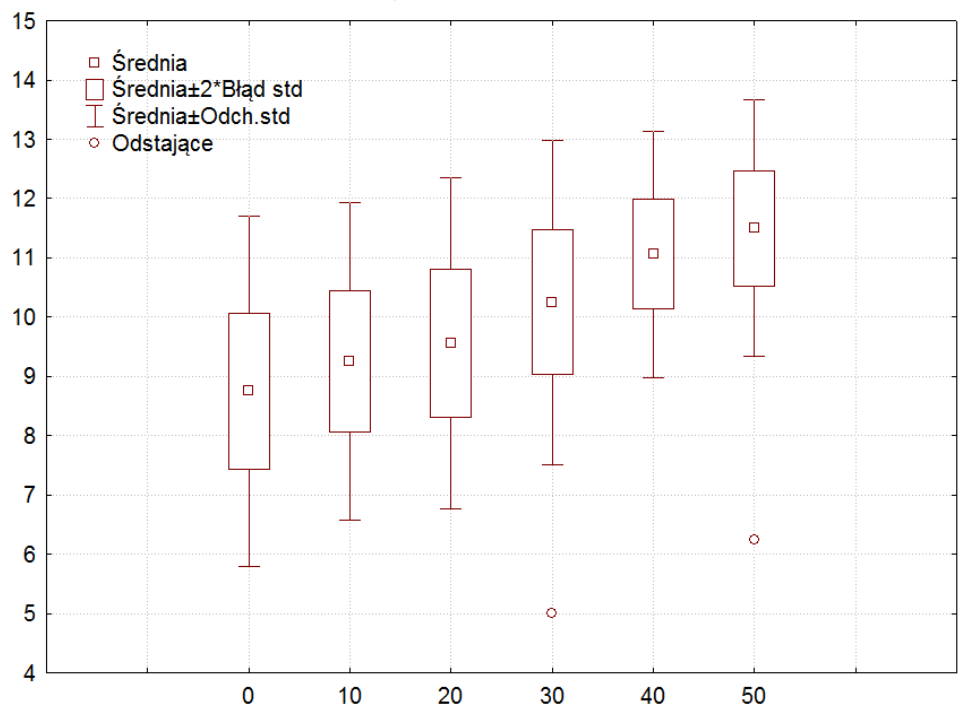


Rys. Z96. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi

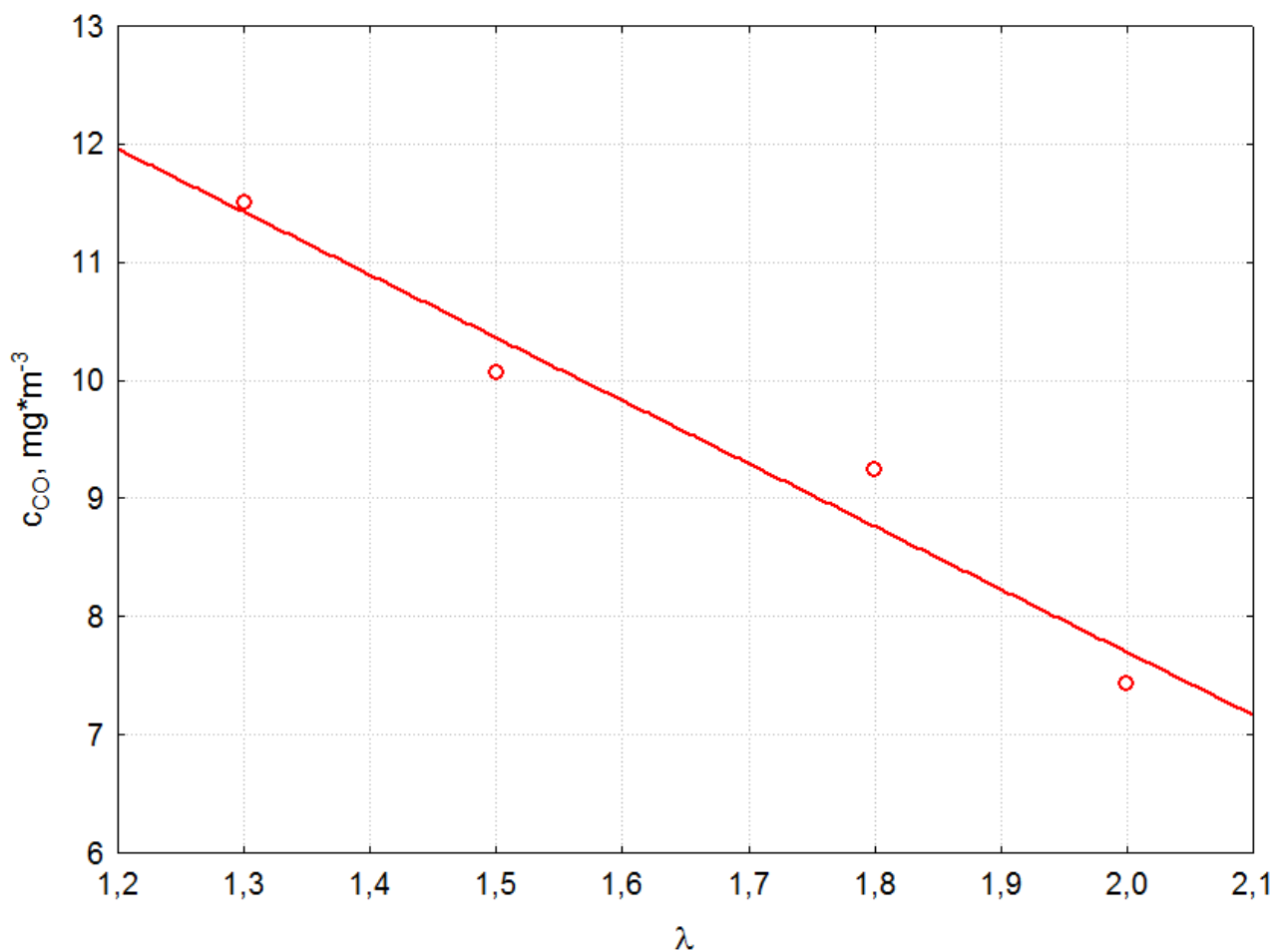
Zestaw wykresów



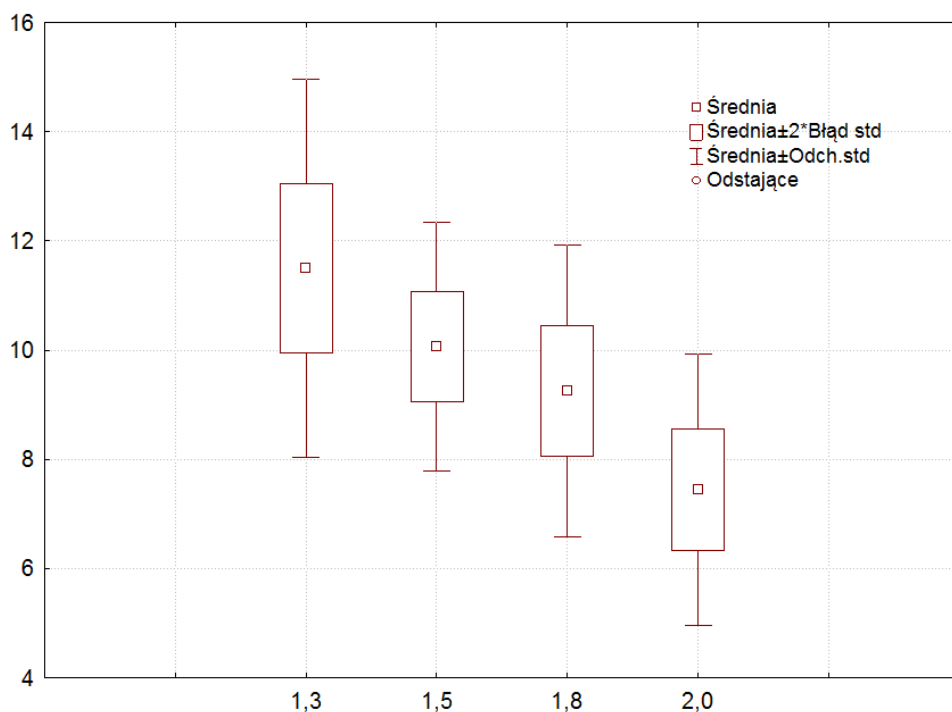
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



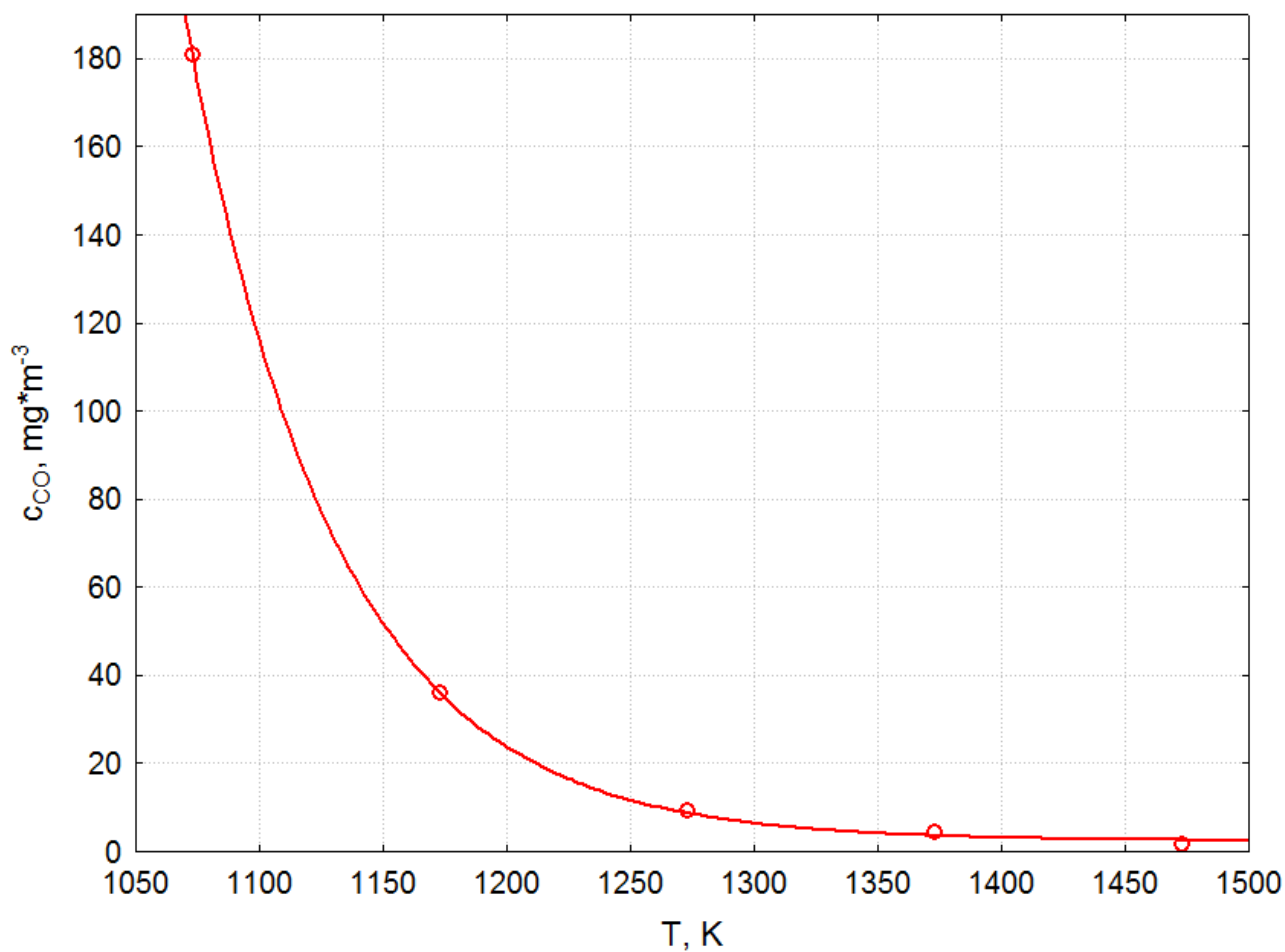
Rys. Z97. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi



Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $U = 10\%$



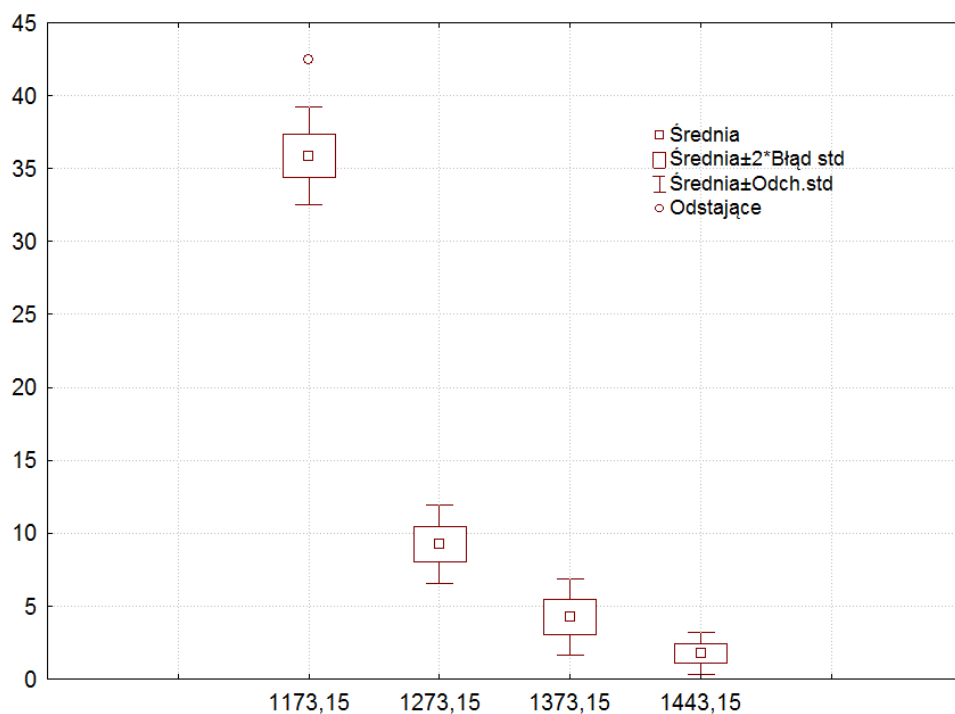
Rys. Z98. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi



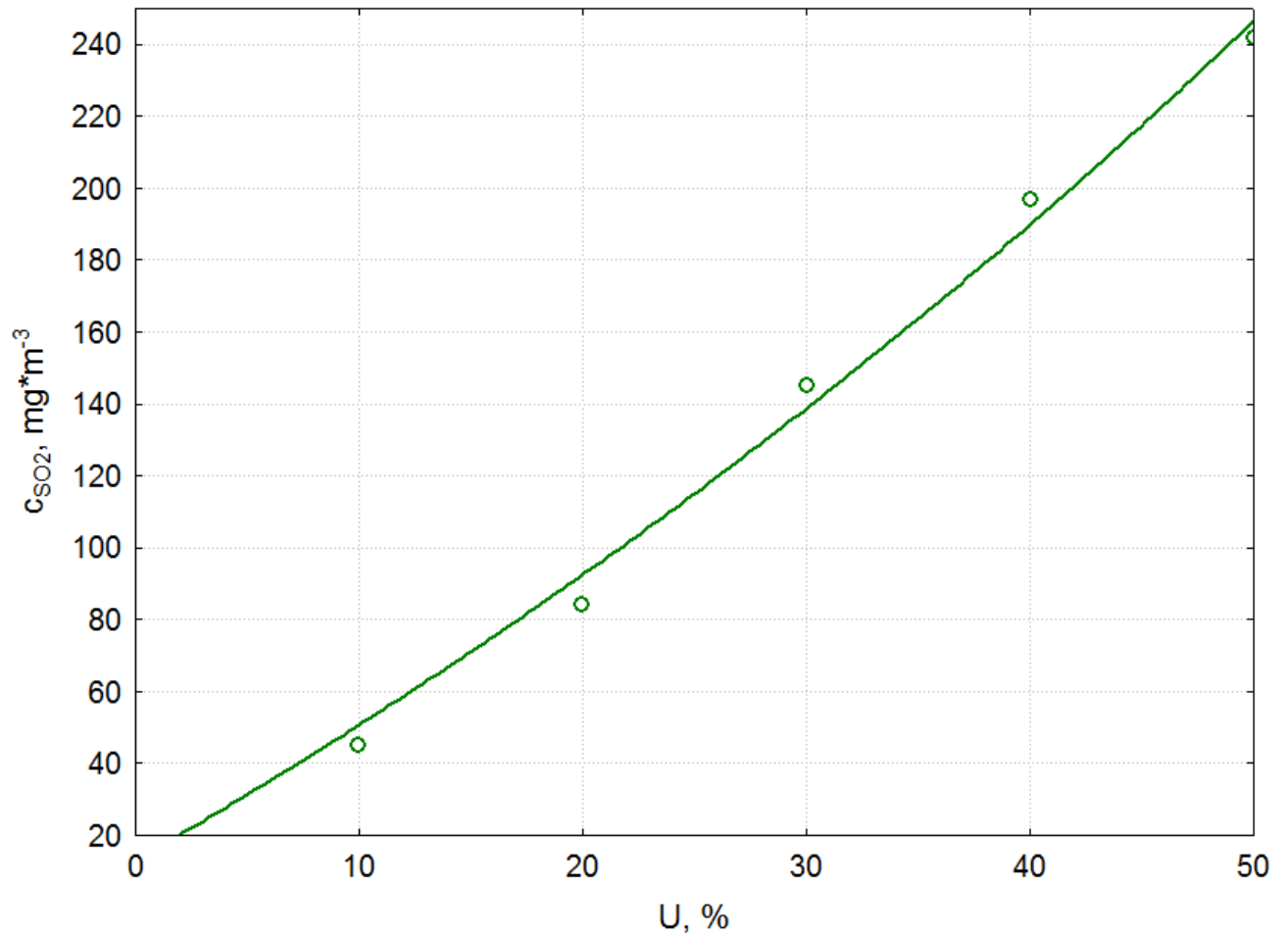
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

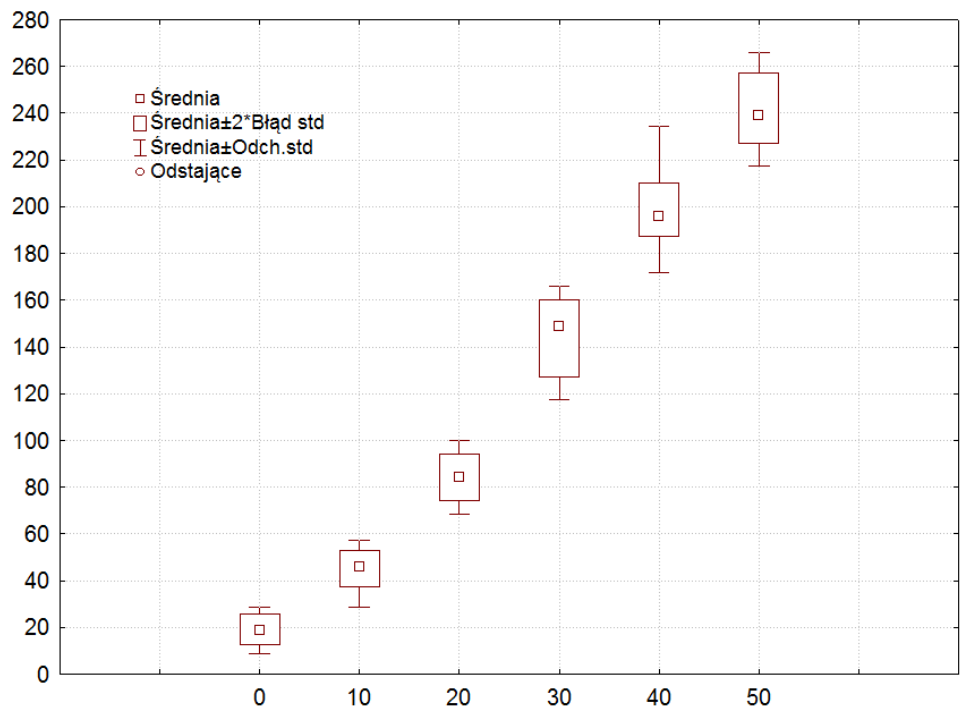
$U = 10\%$



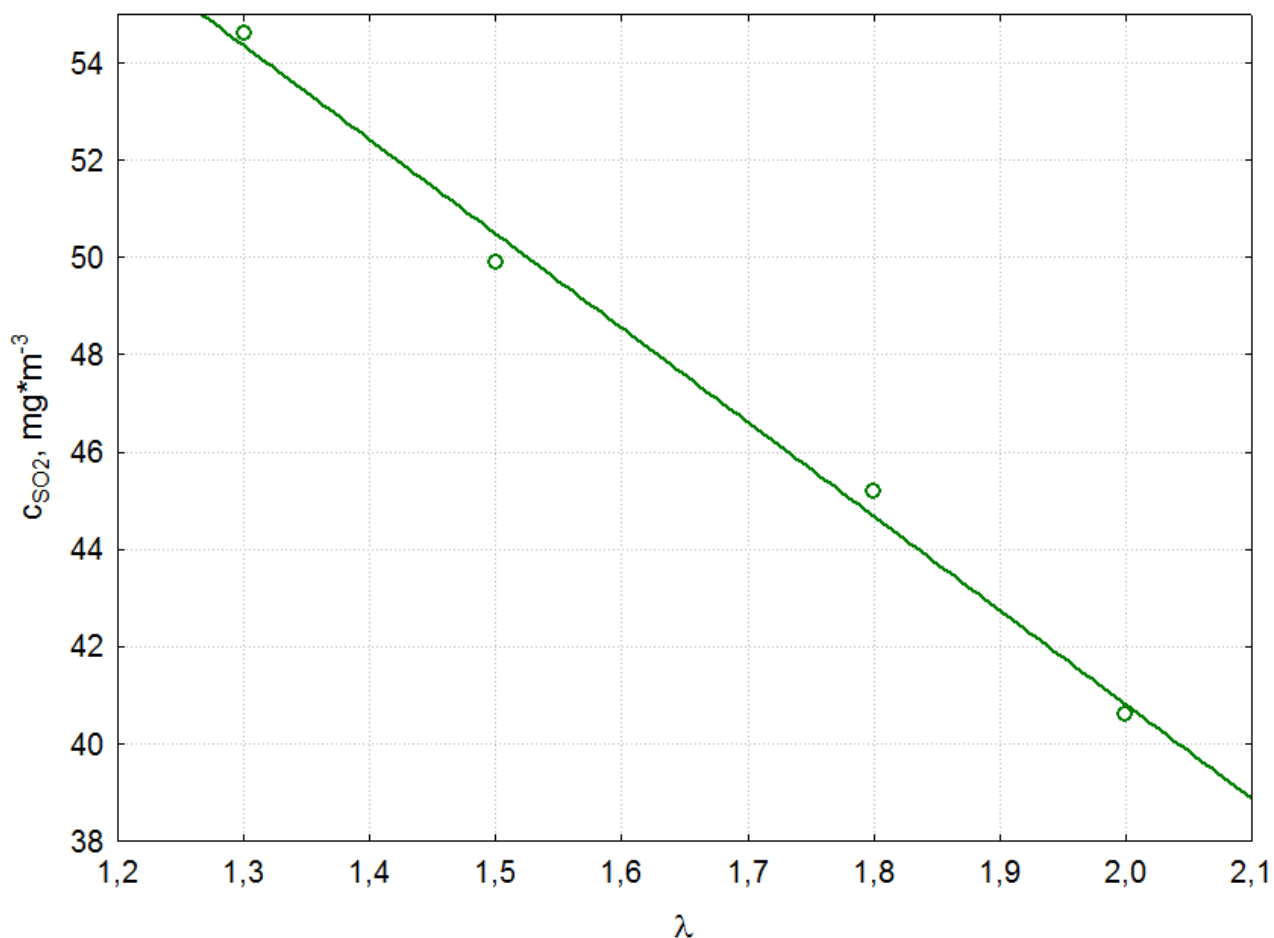
Rys. Z99. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi



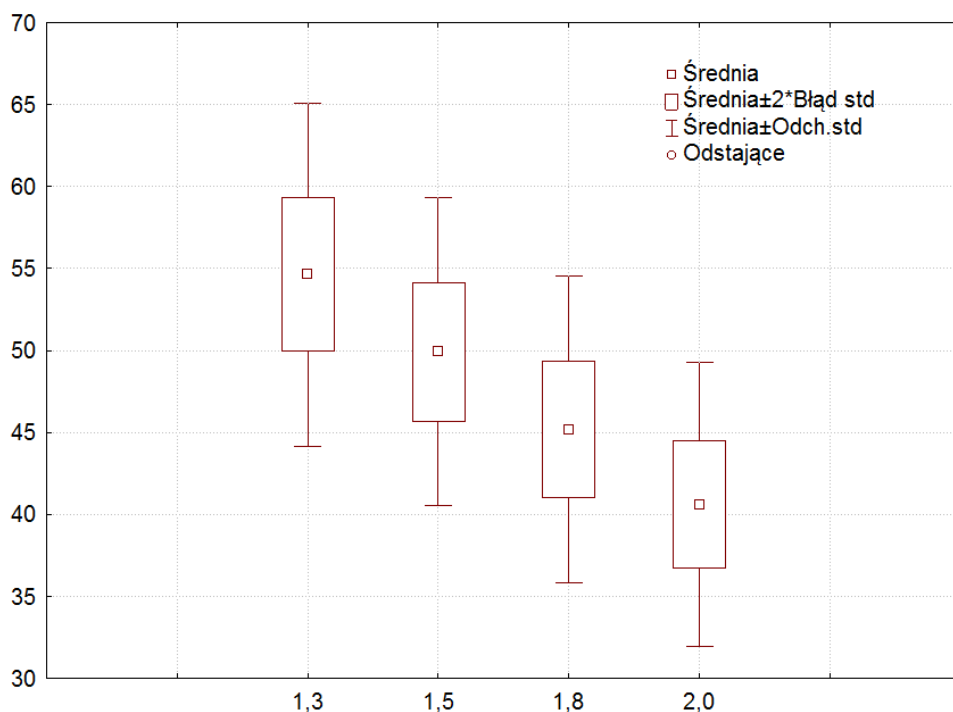
Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



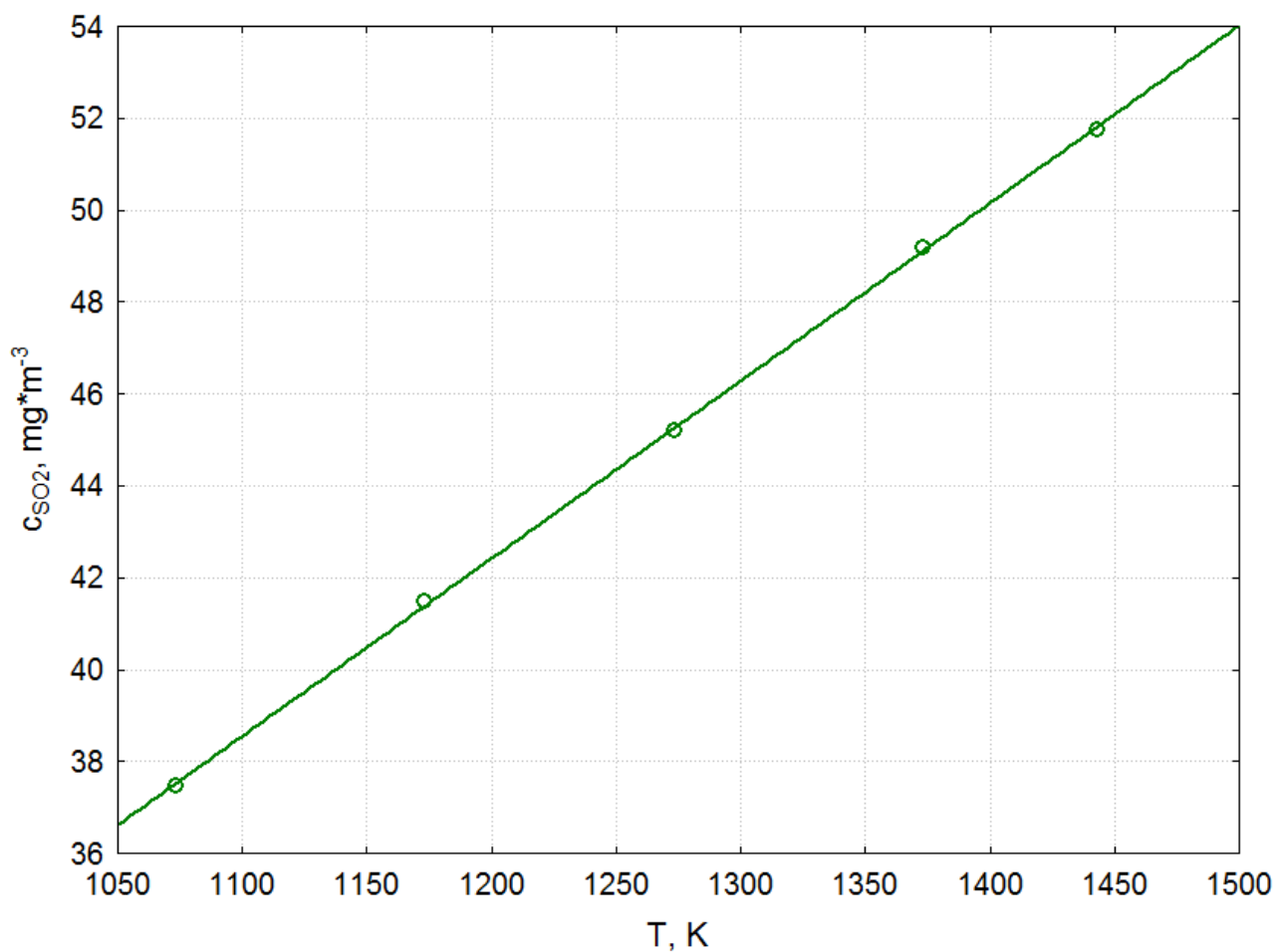
Rys. Z100. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi



Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $U = 10\%$



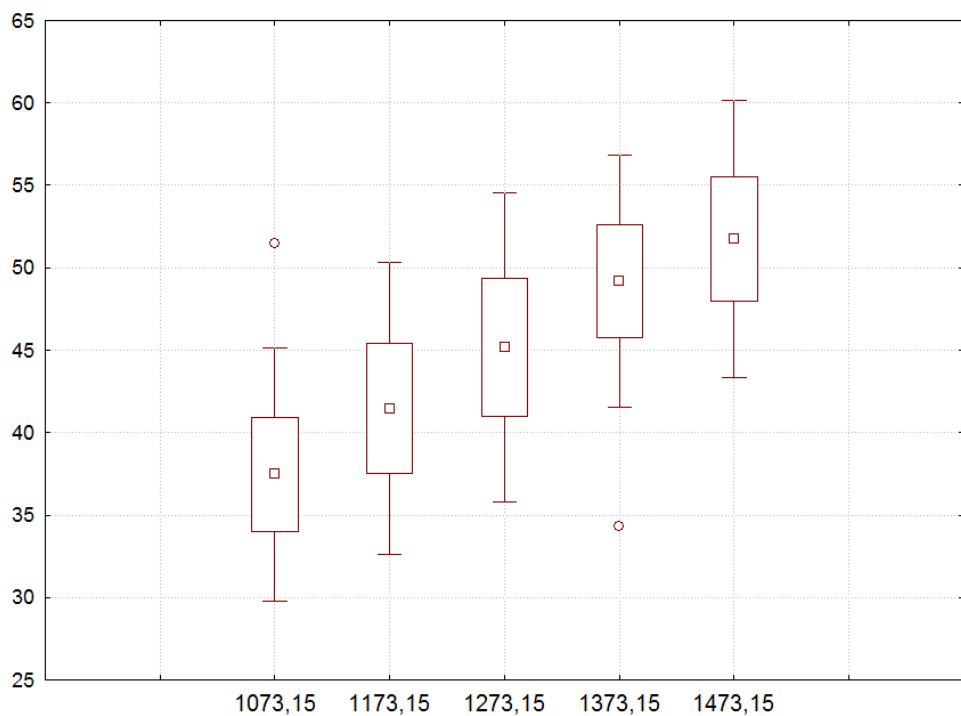
Rys. Z101. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi



Parametry stałe:

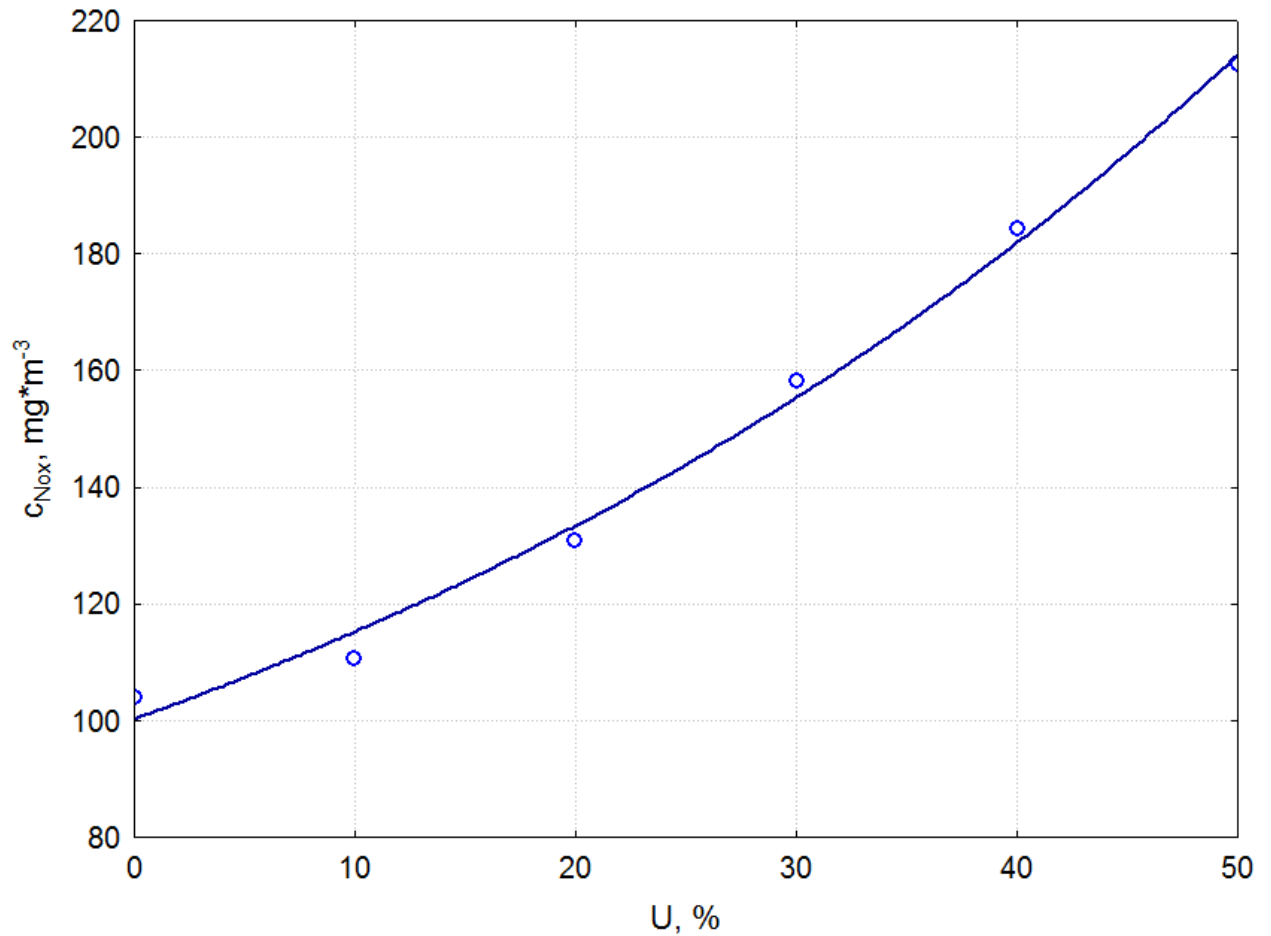
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

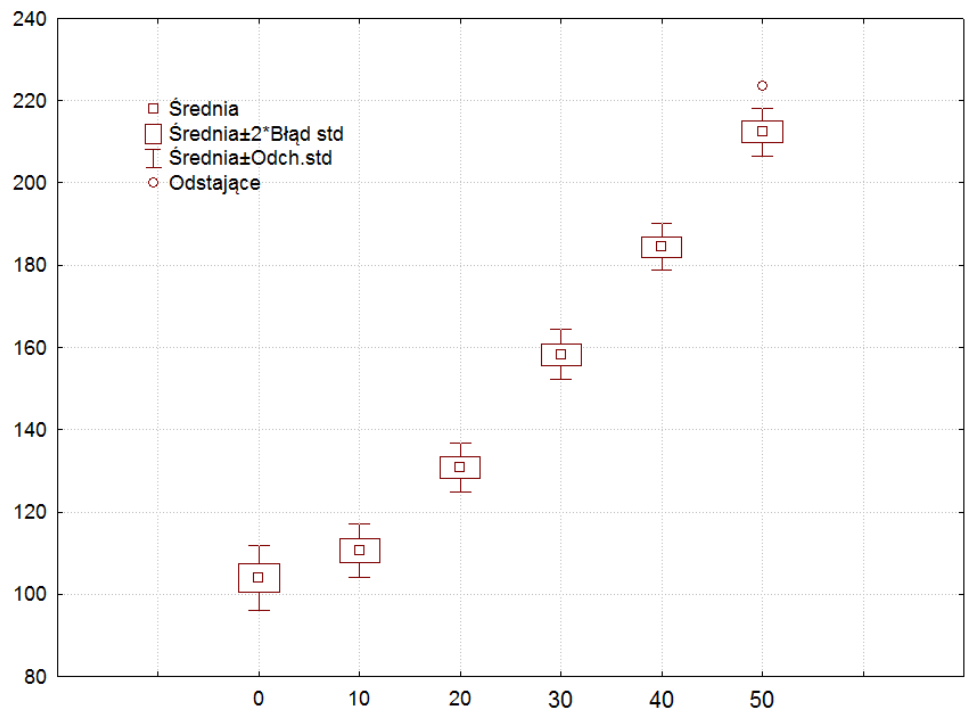


Rys. Z102. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca **T** na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

Zestaw wykresów

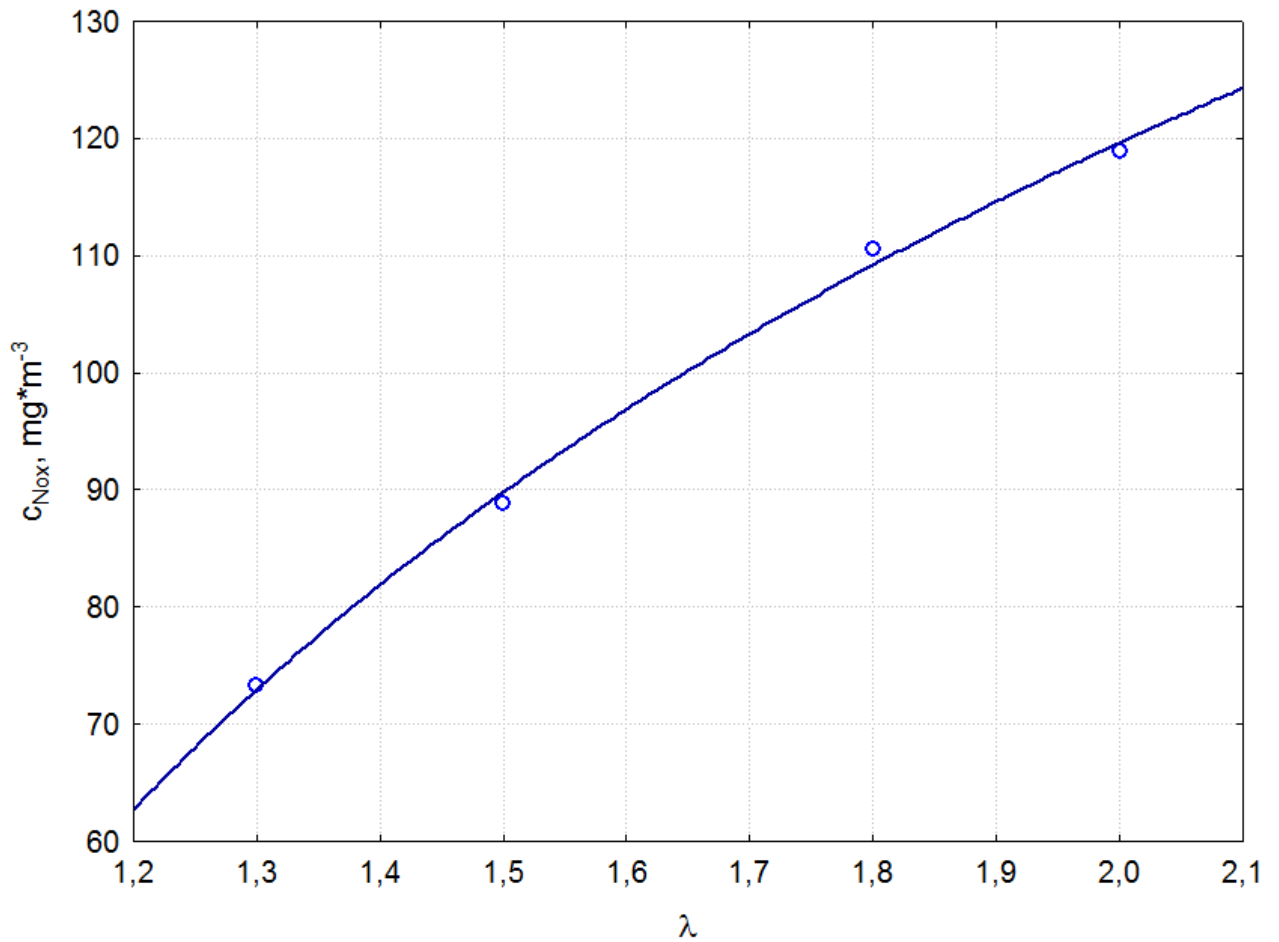


Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z103. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

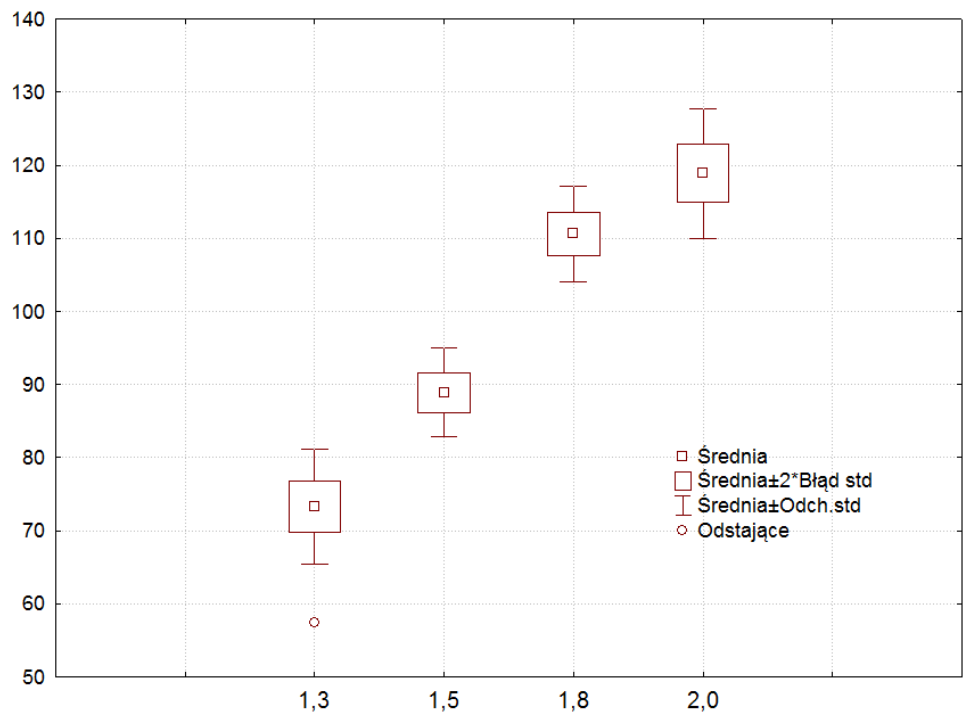
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

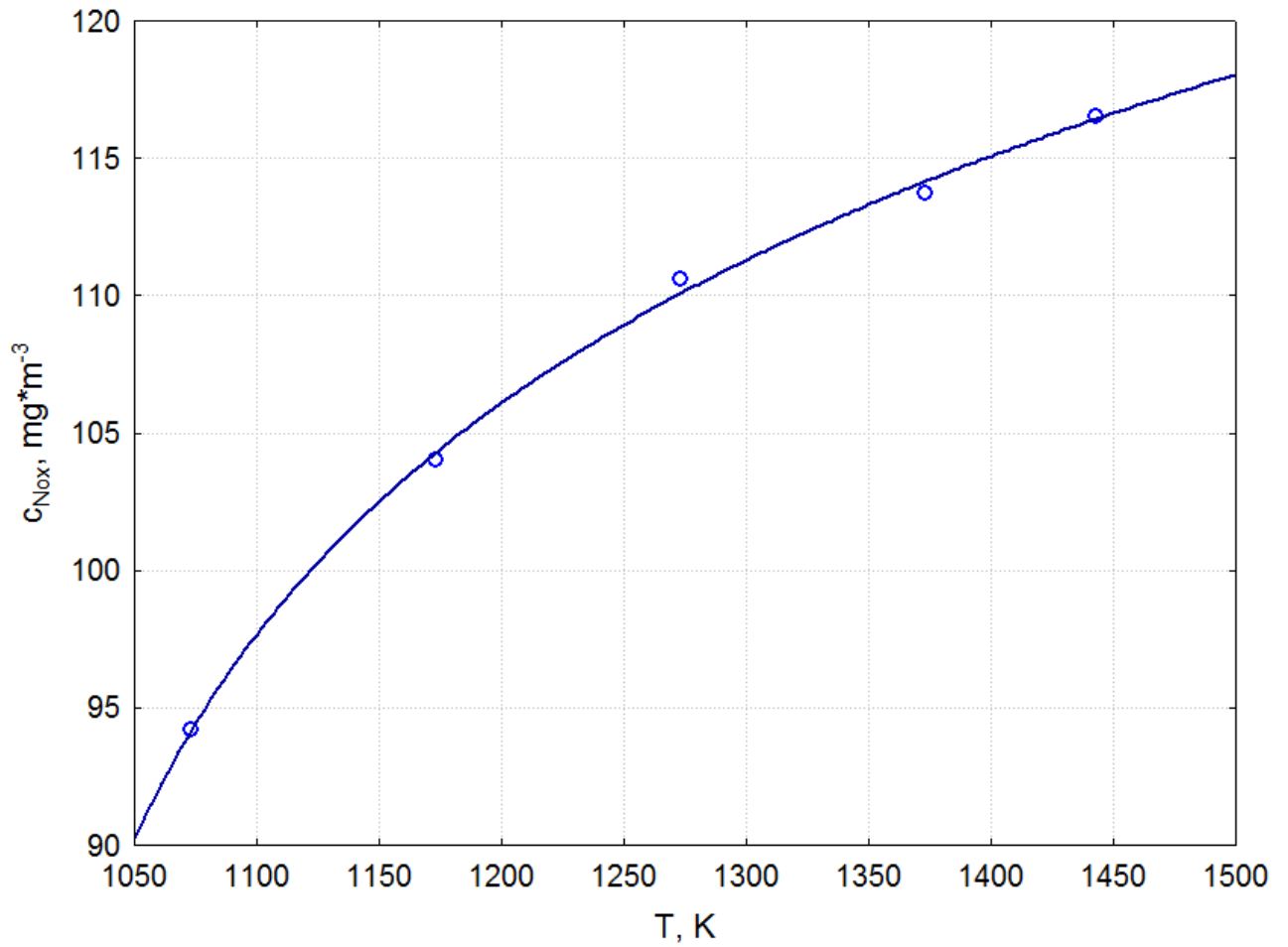
$T = 1273,15\text{K}$

$U = 10\%$



Rys. Z104. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

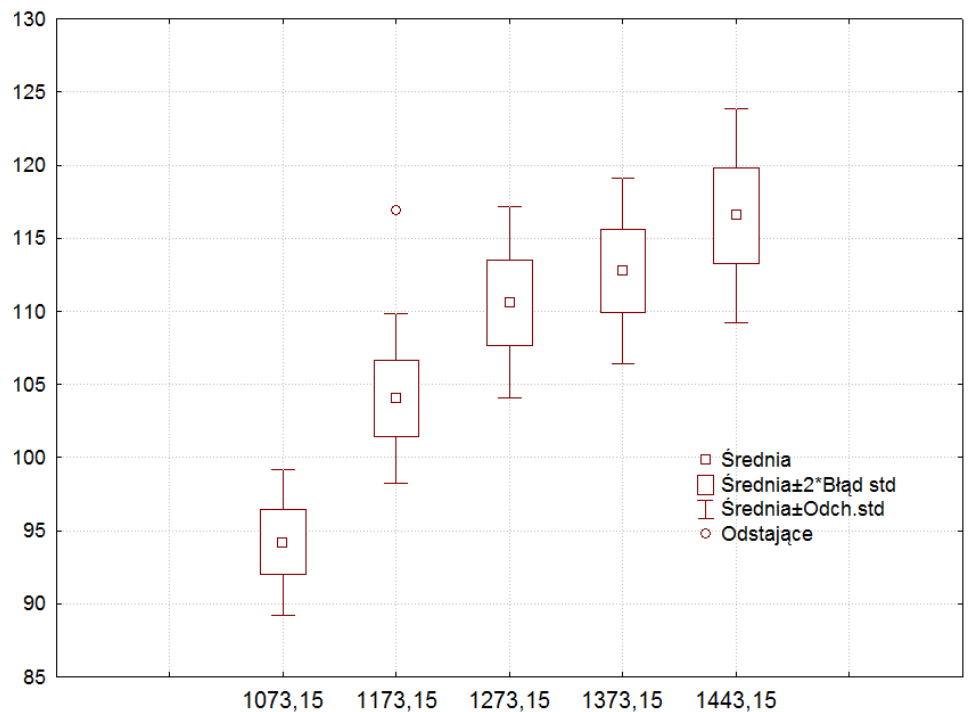
Zestaw wykresów



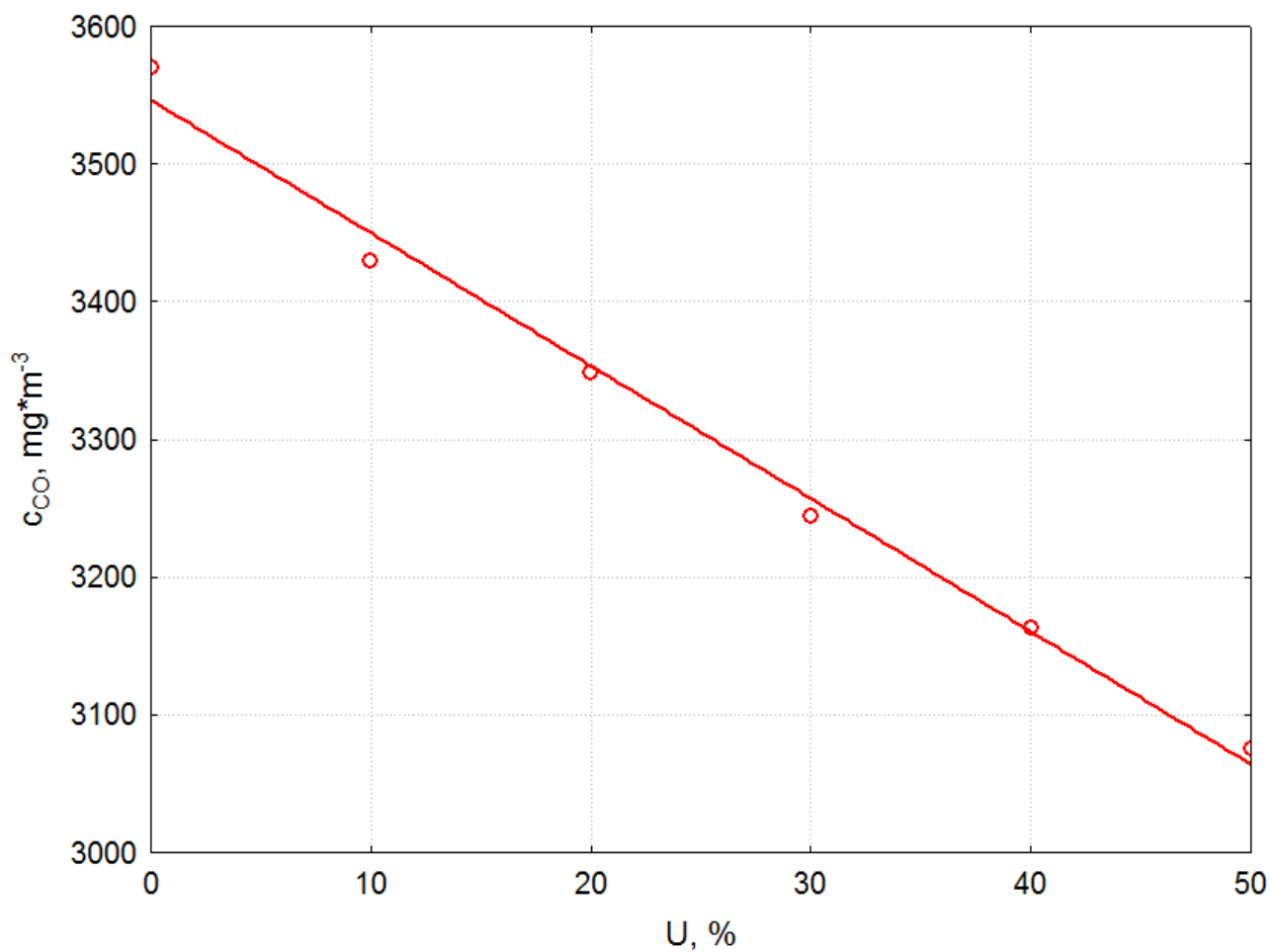
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

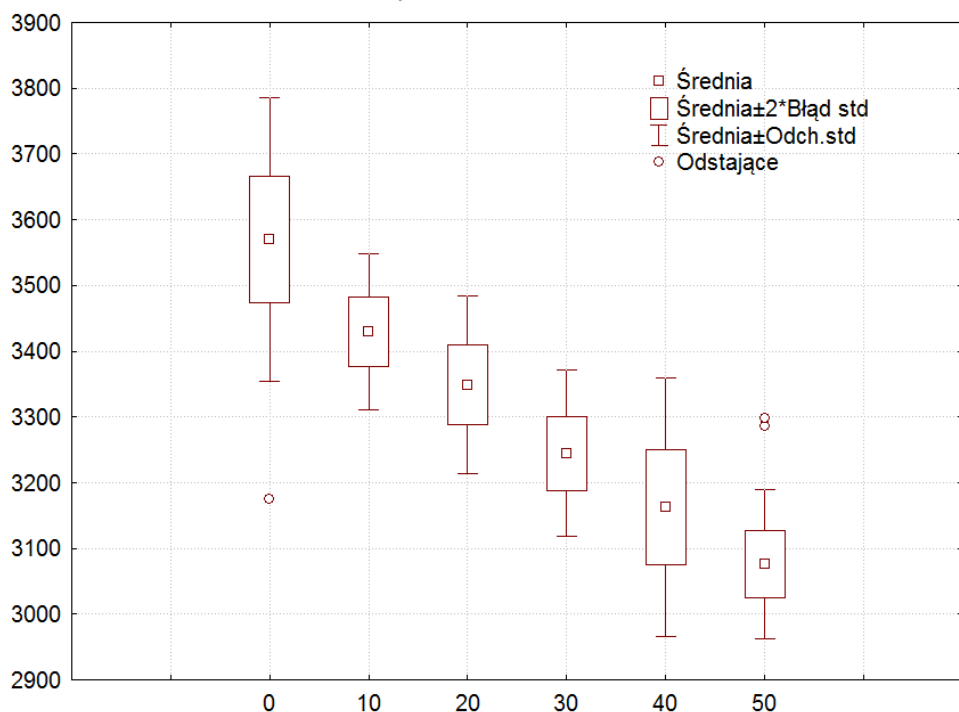
$U = 10\%$



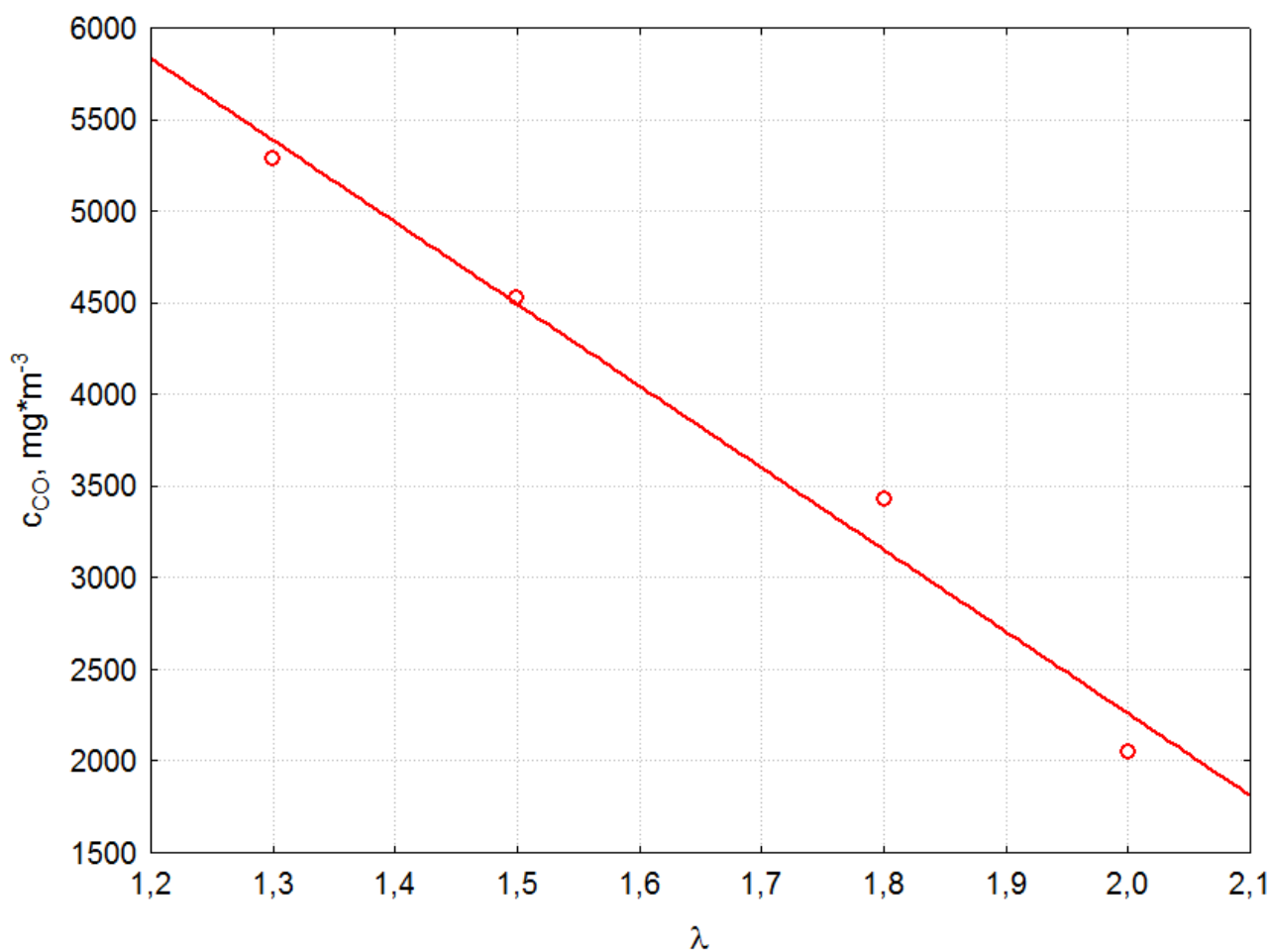
Rys. Z105. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi



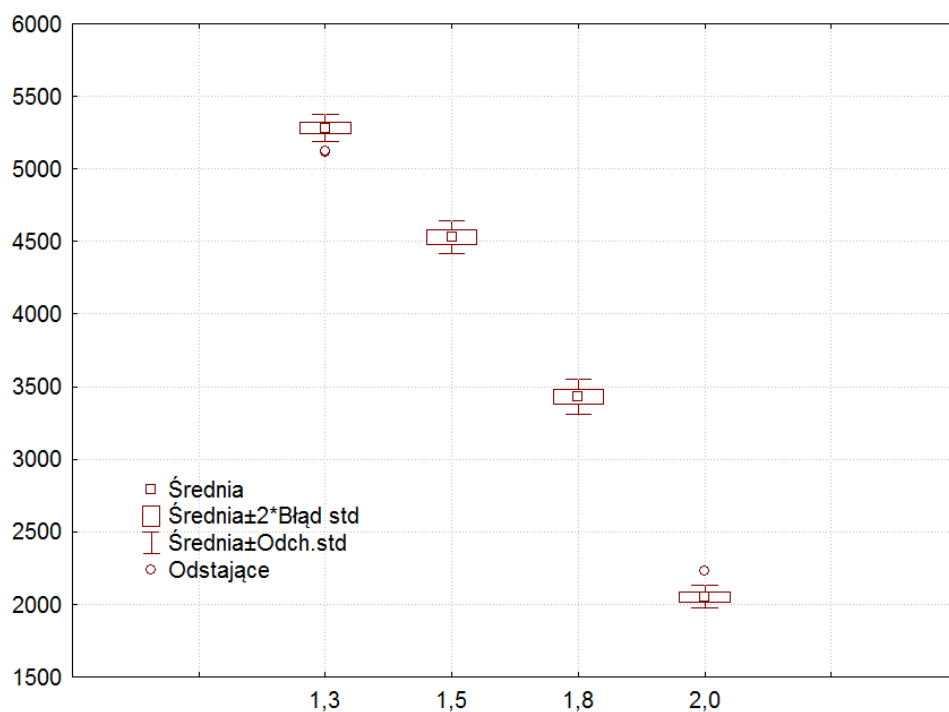
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z106. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenu węgla(II) w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

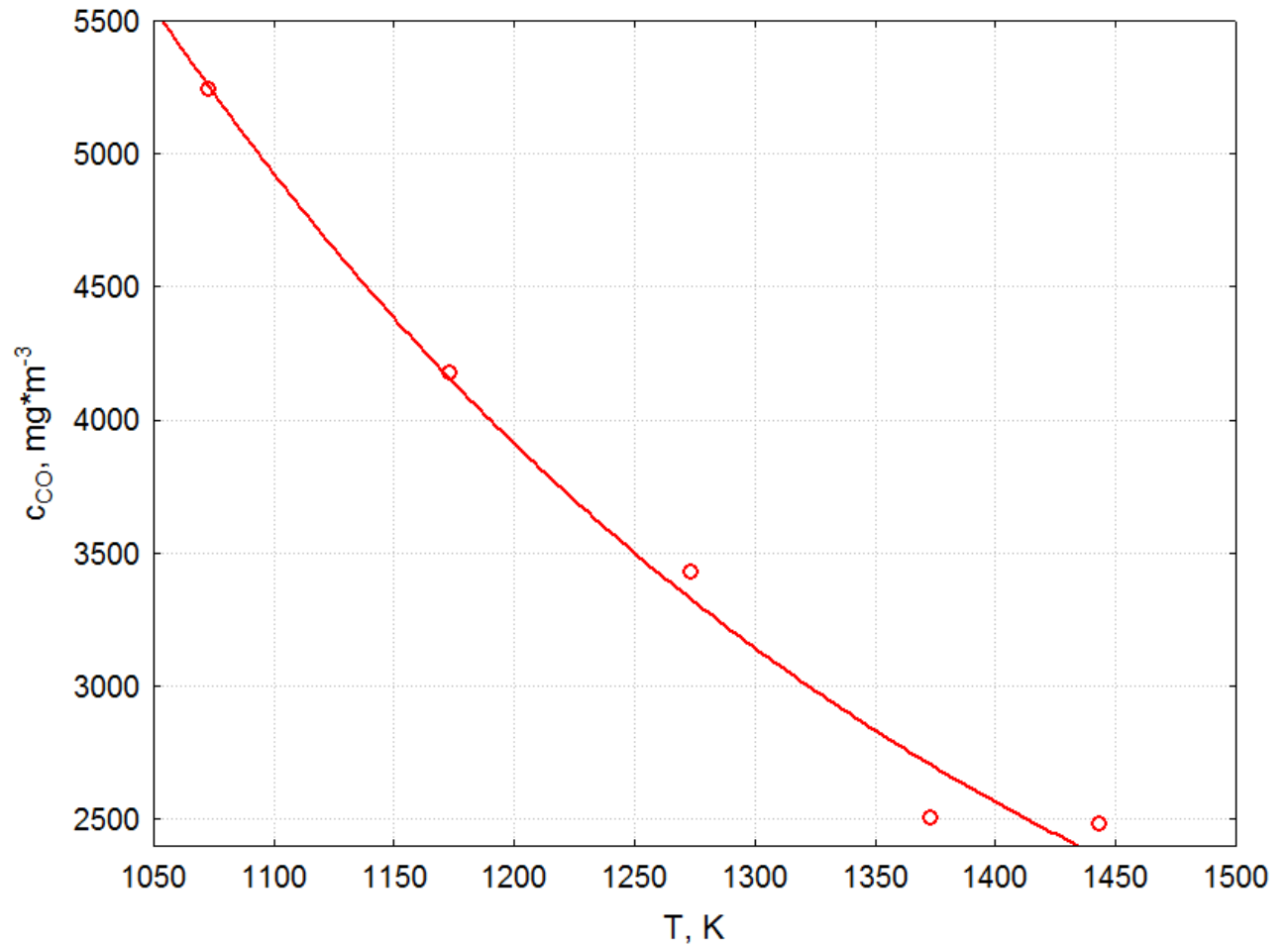


Parametry stałe:
T = 1273,15K
U = 10%



Rys. Z107. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

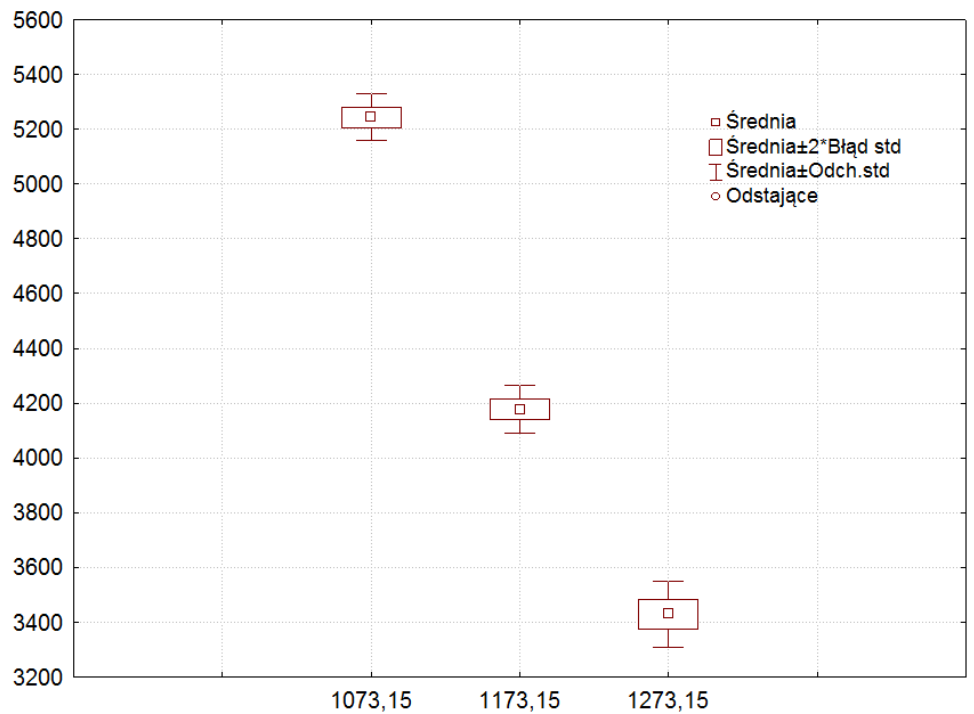
Zestaw wykresów



Parametry stałe:

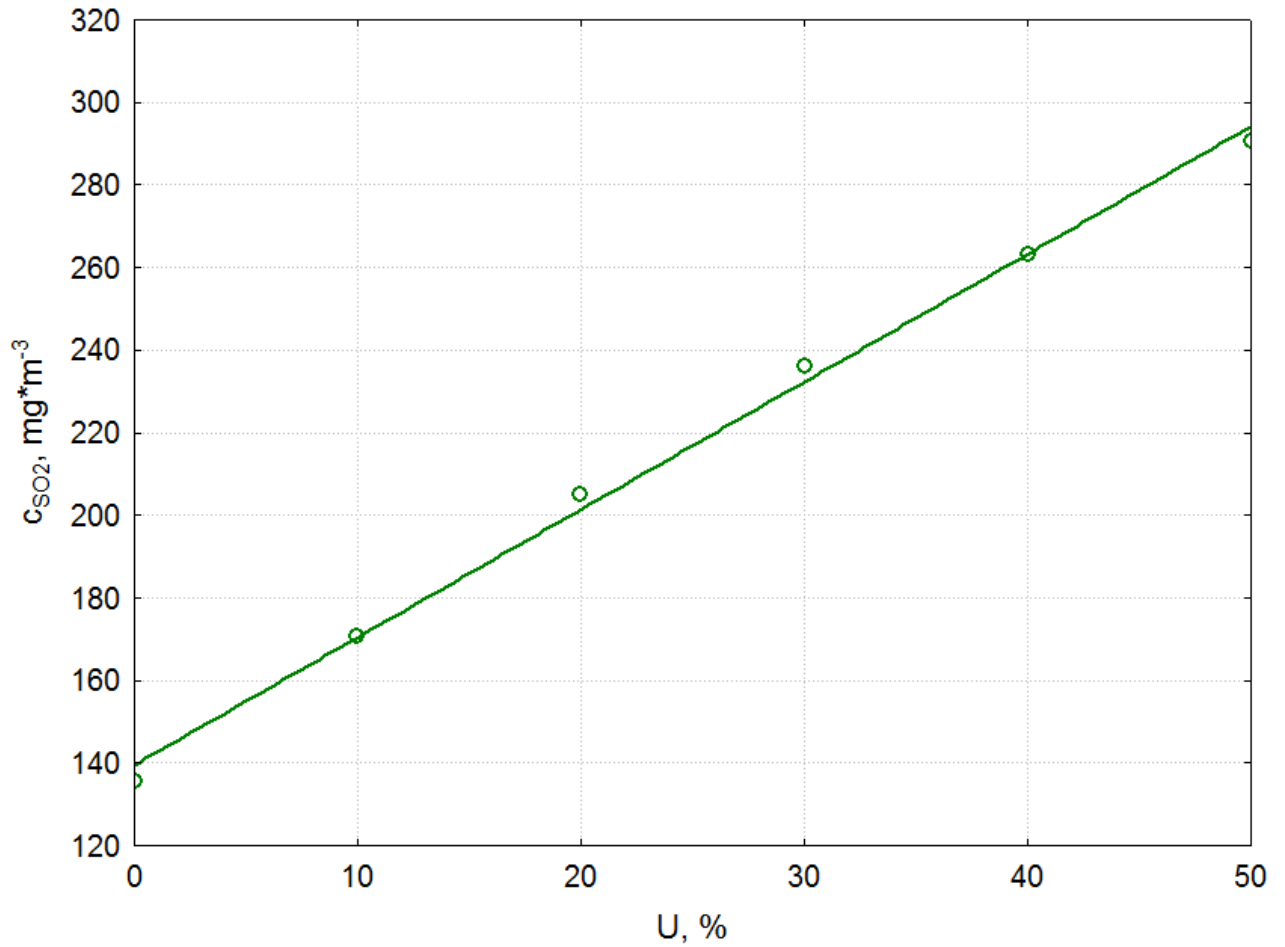
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

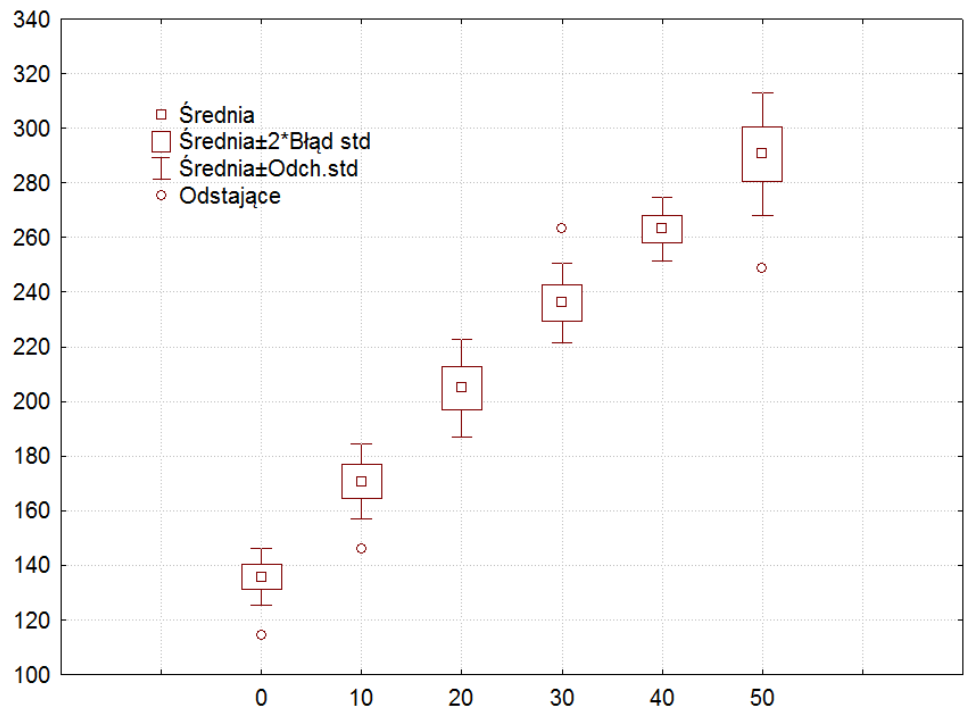


Rys. Z108. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi

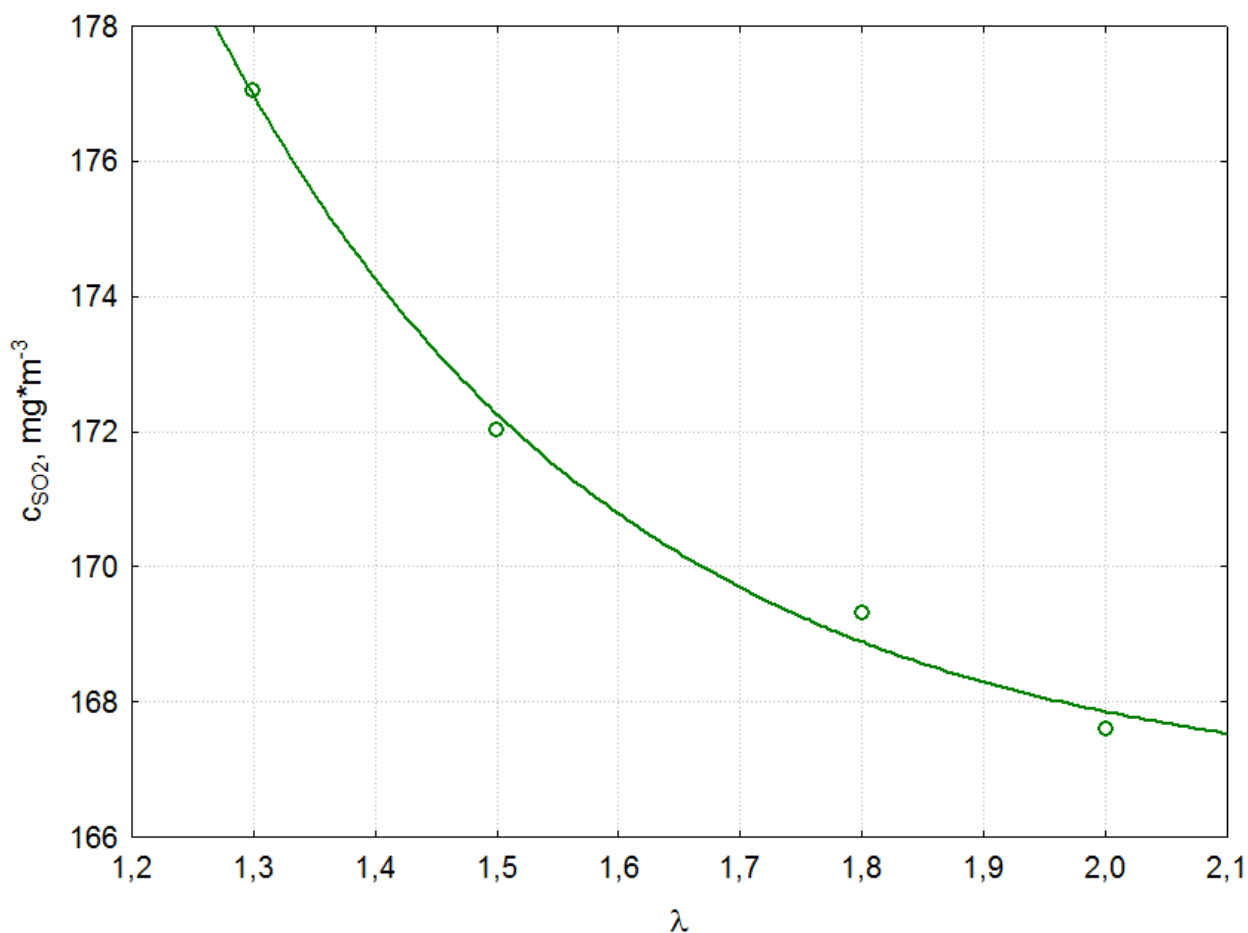
Zestaw wykresów



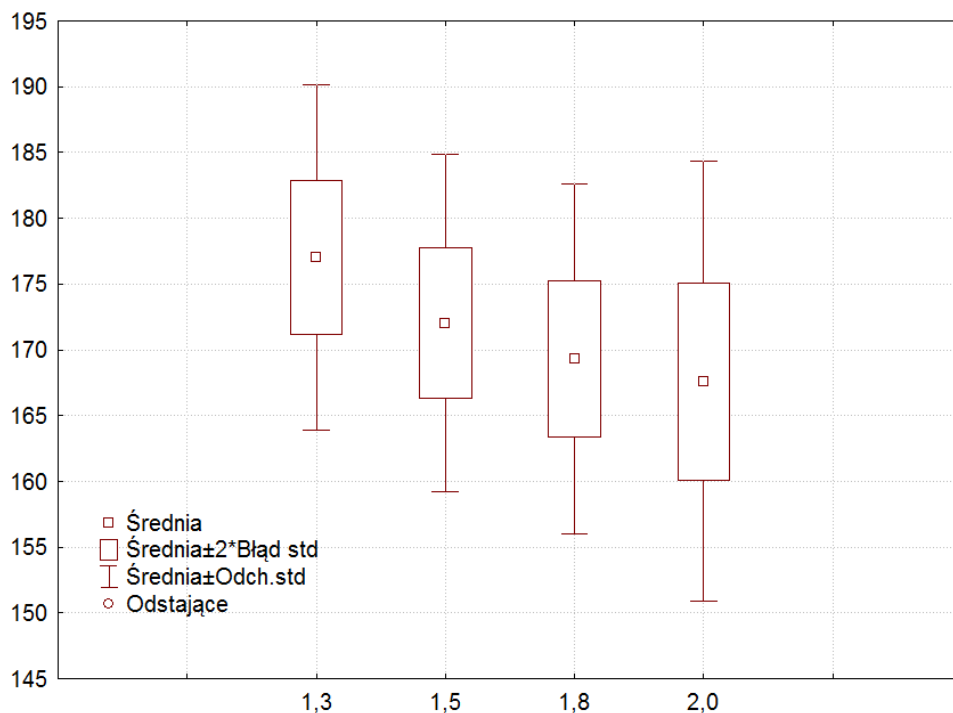
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



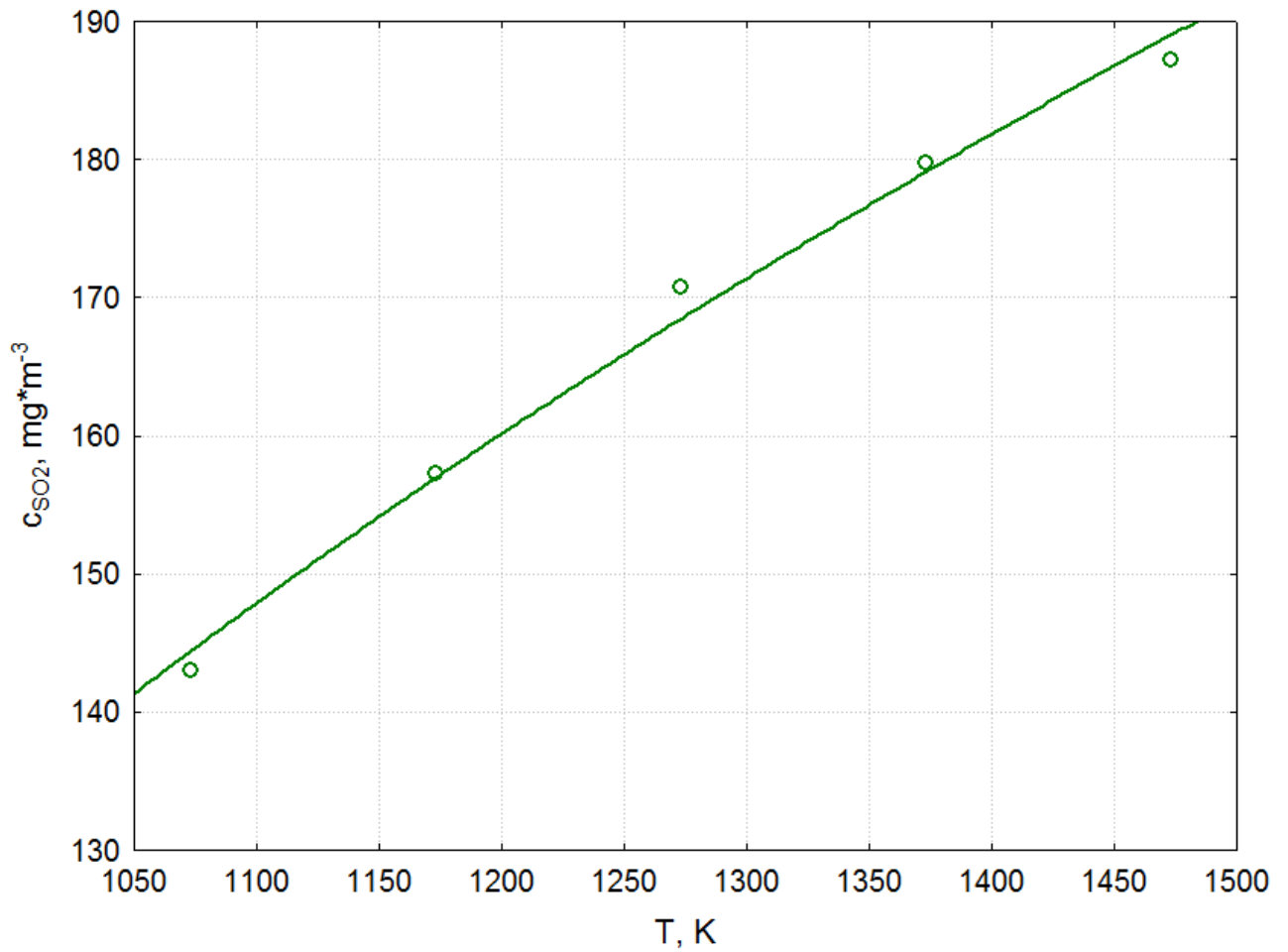
Rys. Z109. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi



Parametry stałe:
 $T = 1273,15\text{K}$
 $U = 10\%$



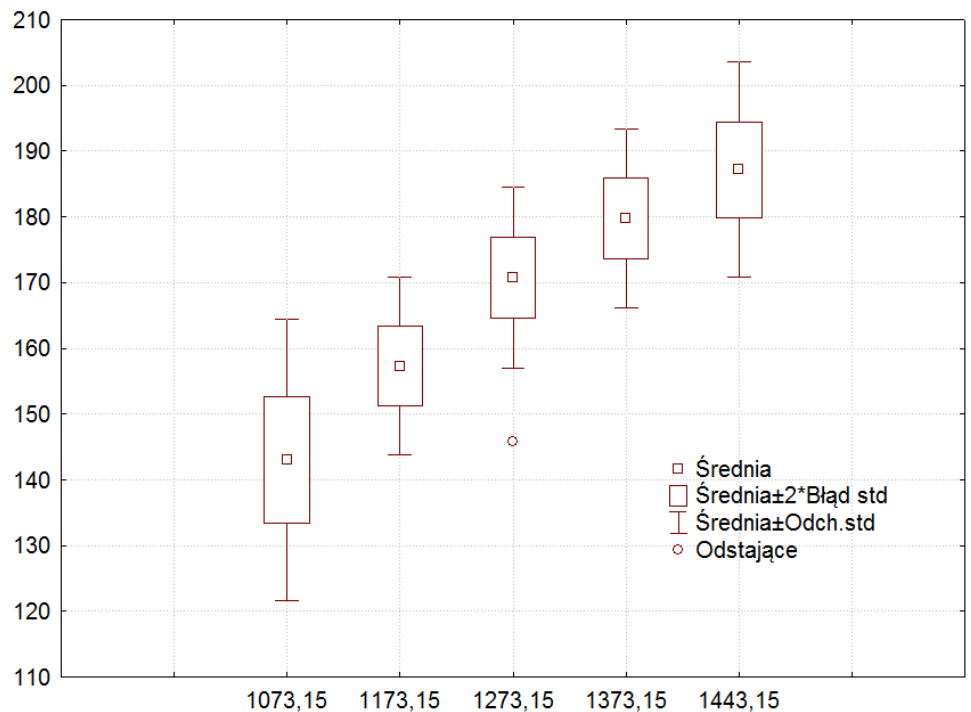
Rys. Z110. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenu siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi



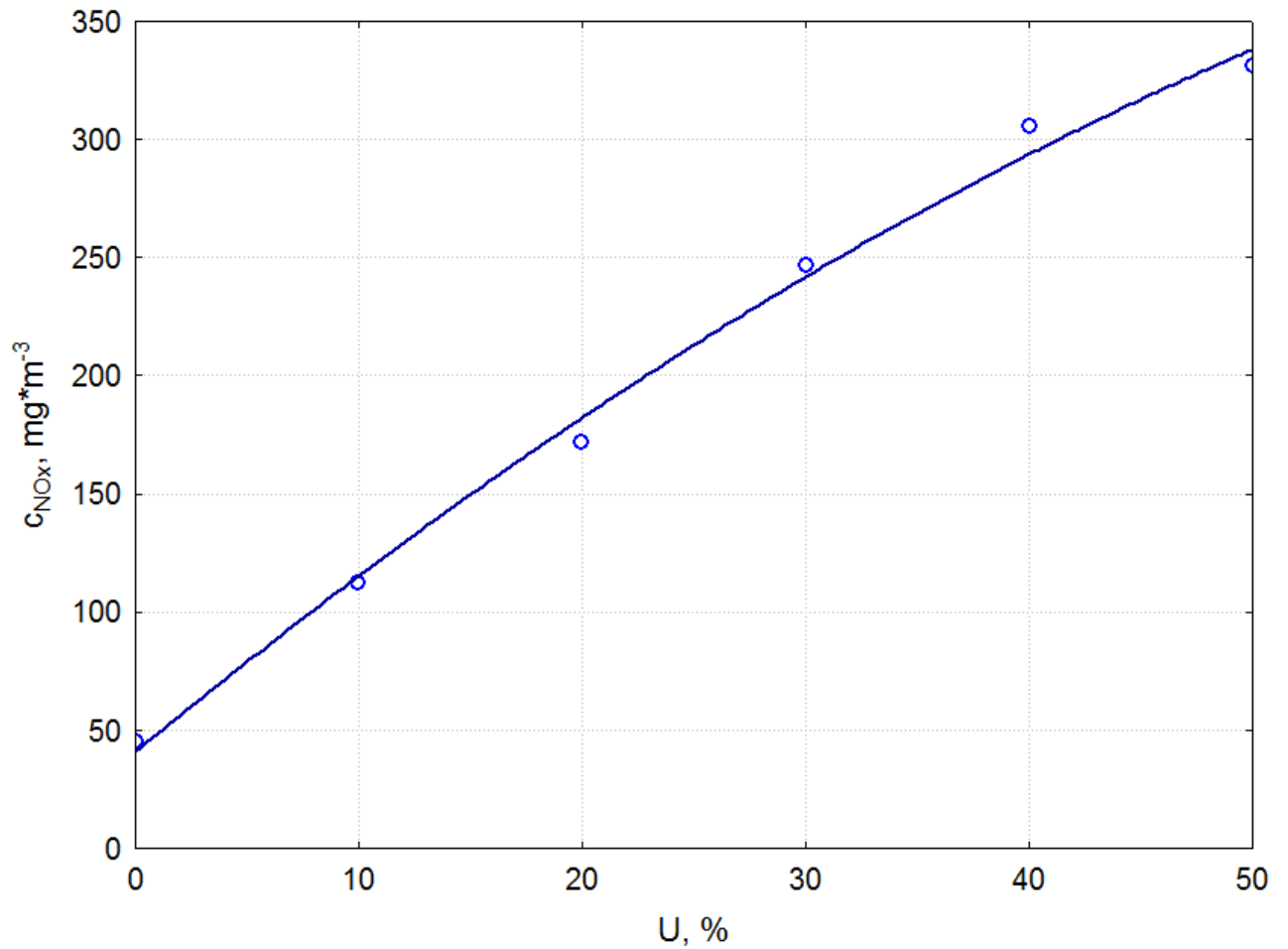
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

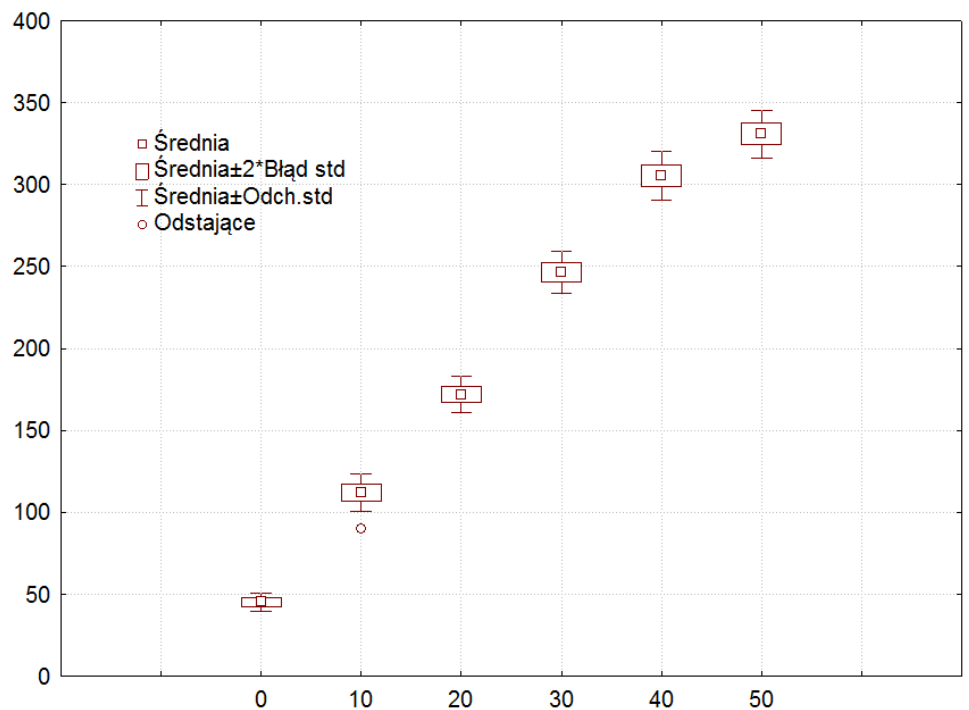
$U = 10\%$



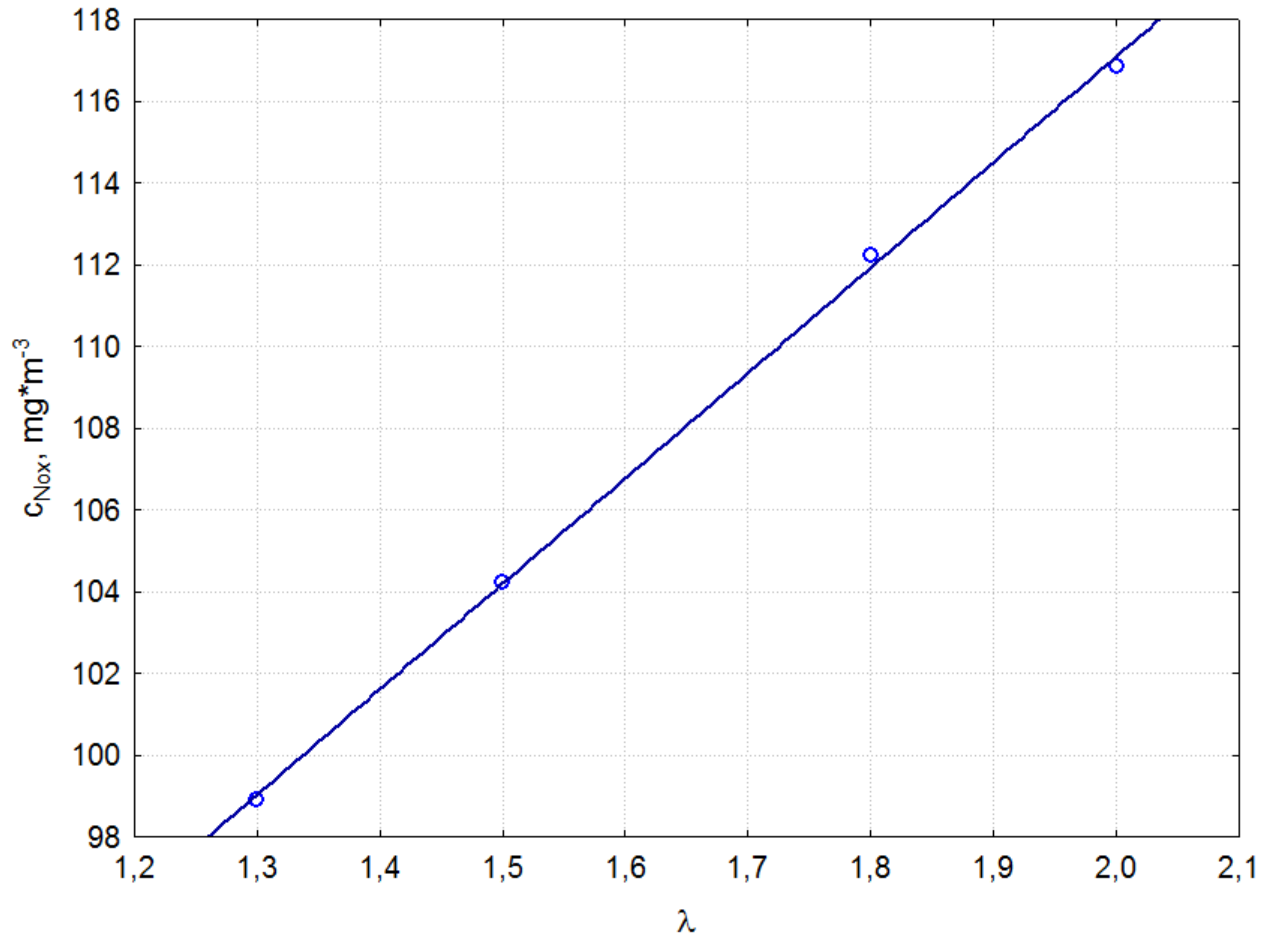
Rys. Z111. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi



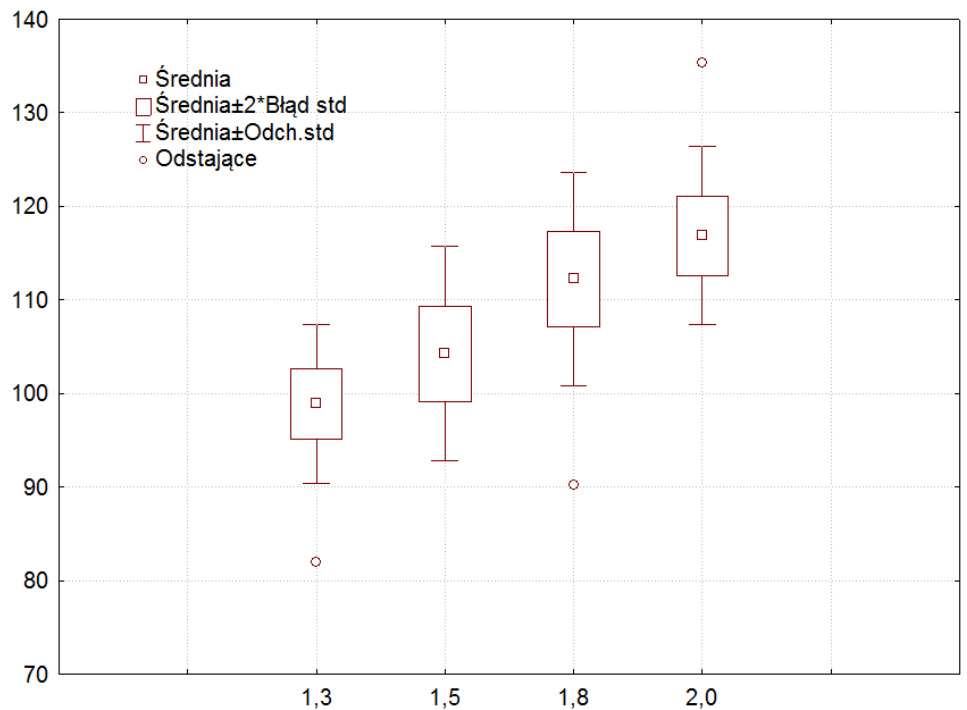
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



Rys. Z112. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

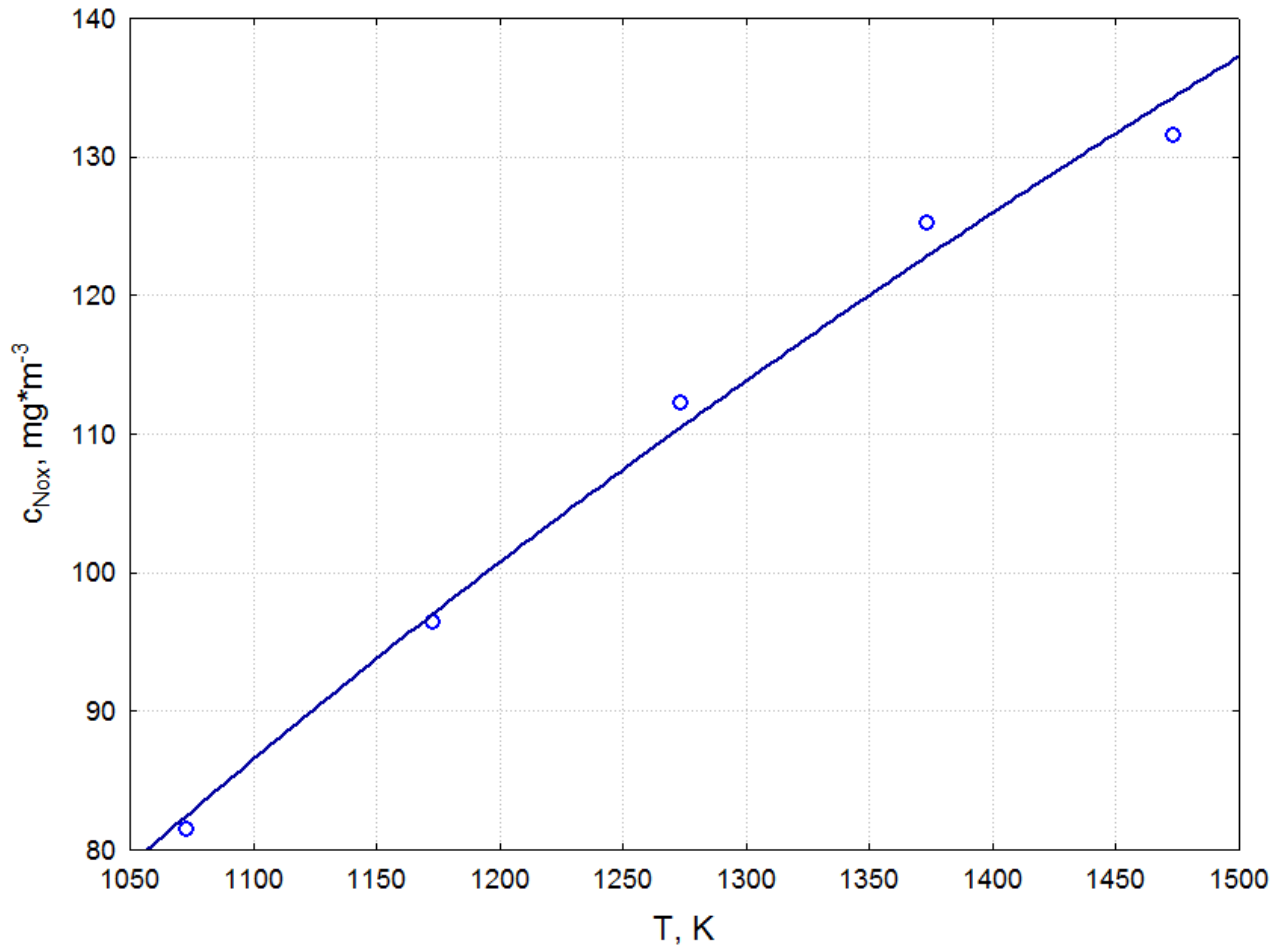


Parametry stałe:
T = 1273,15K
U = 10%



Rys. Z113. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

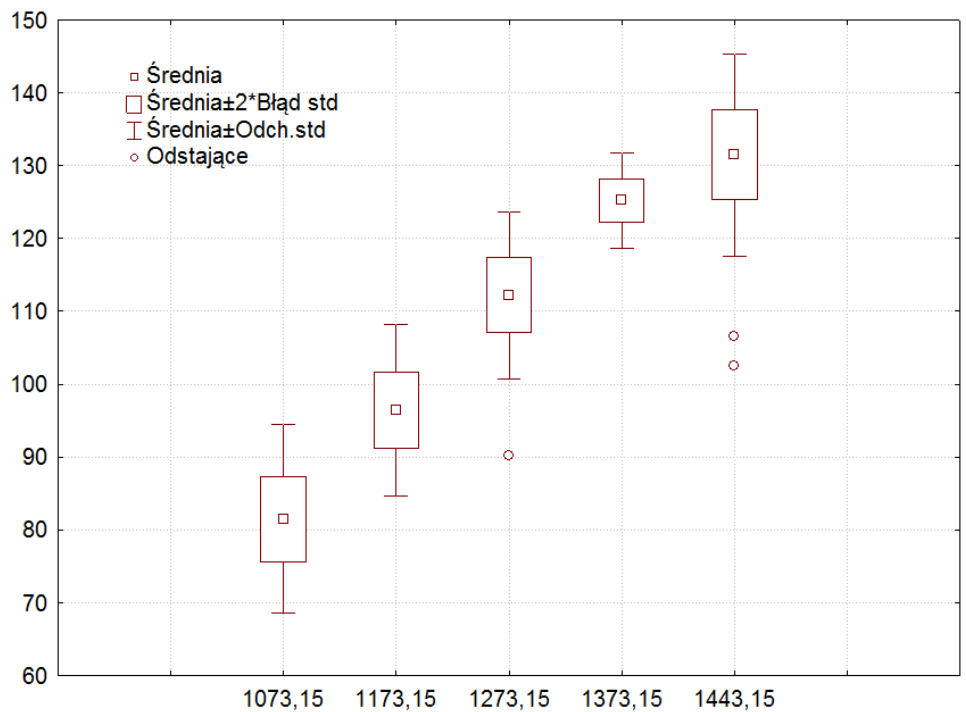
Zestaw wykresów



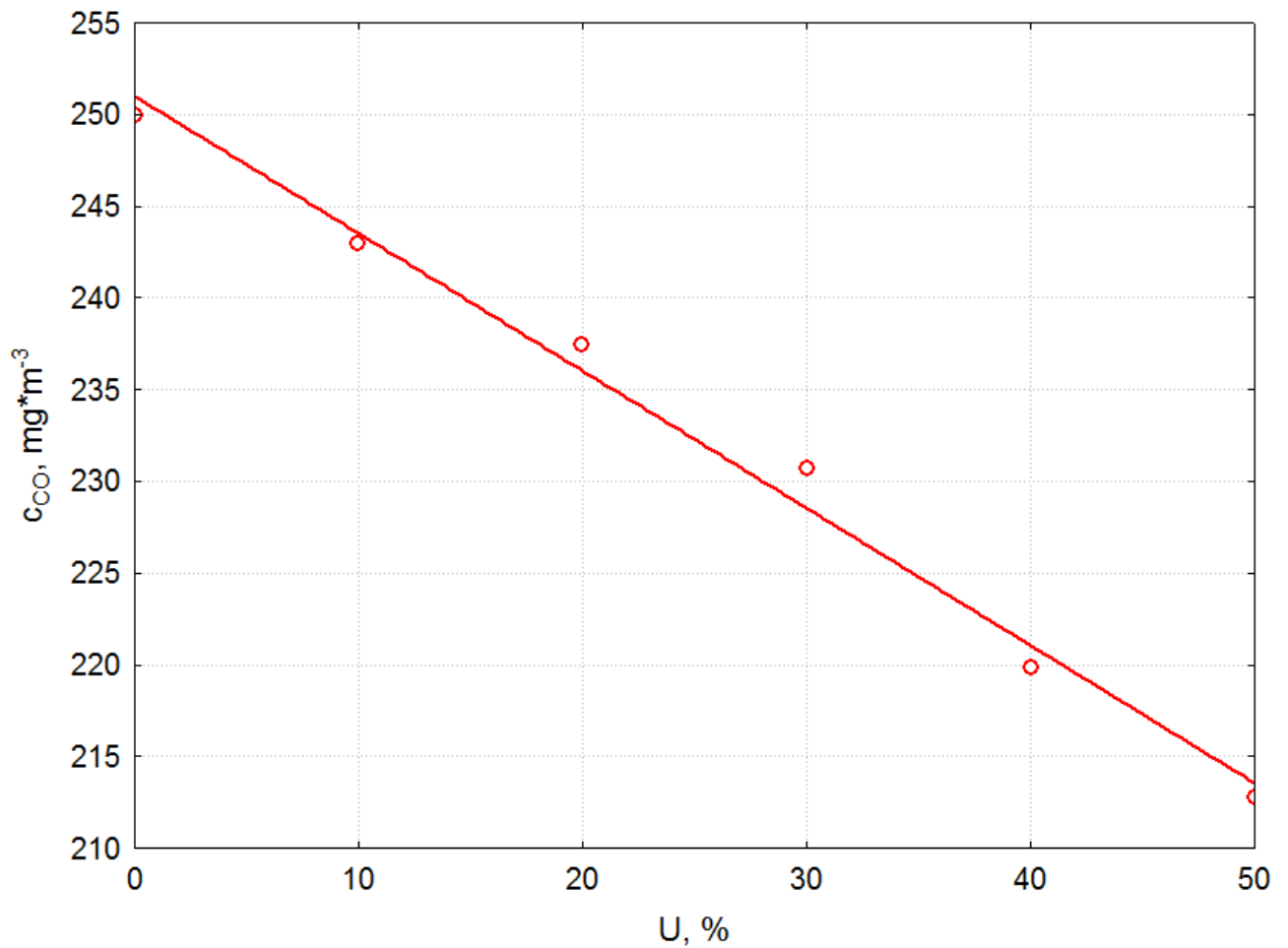
Parametry stałe:

$\lambda = 1,8$

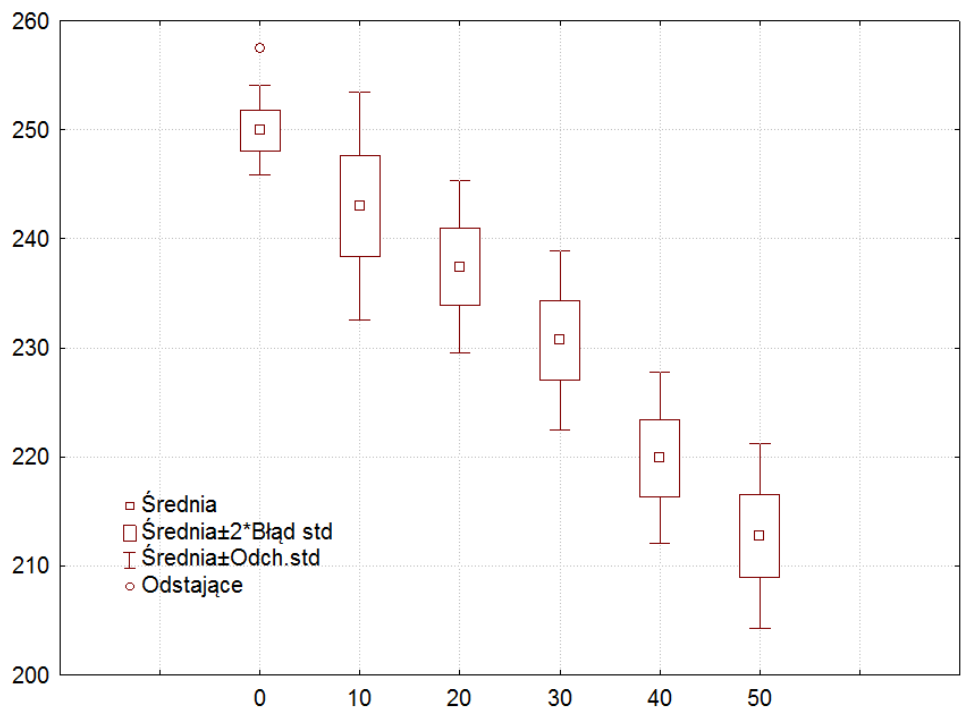
$U = 10\%$



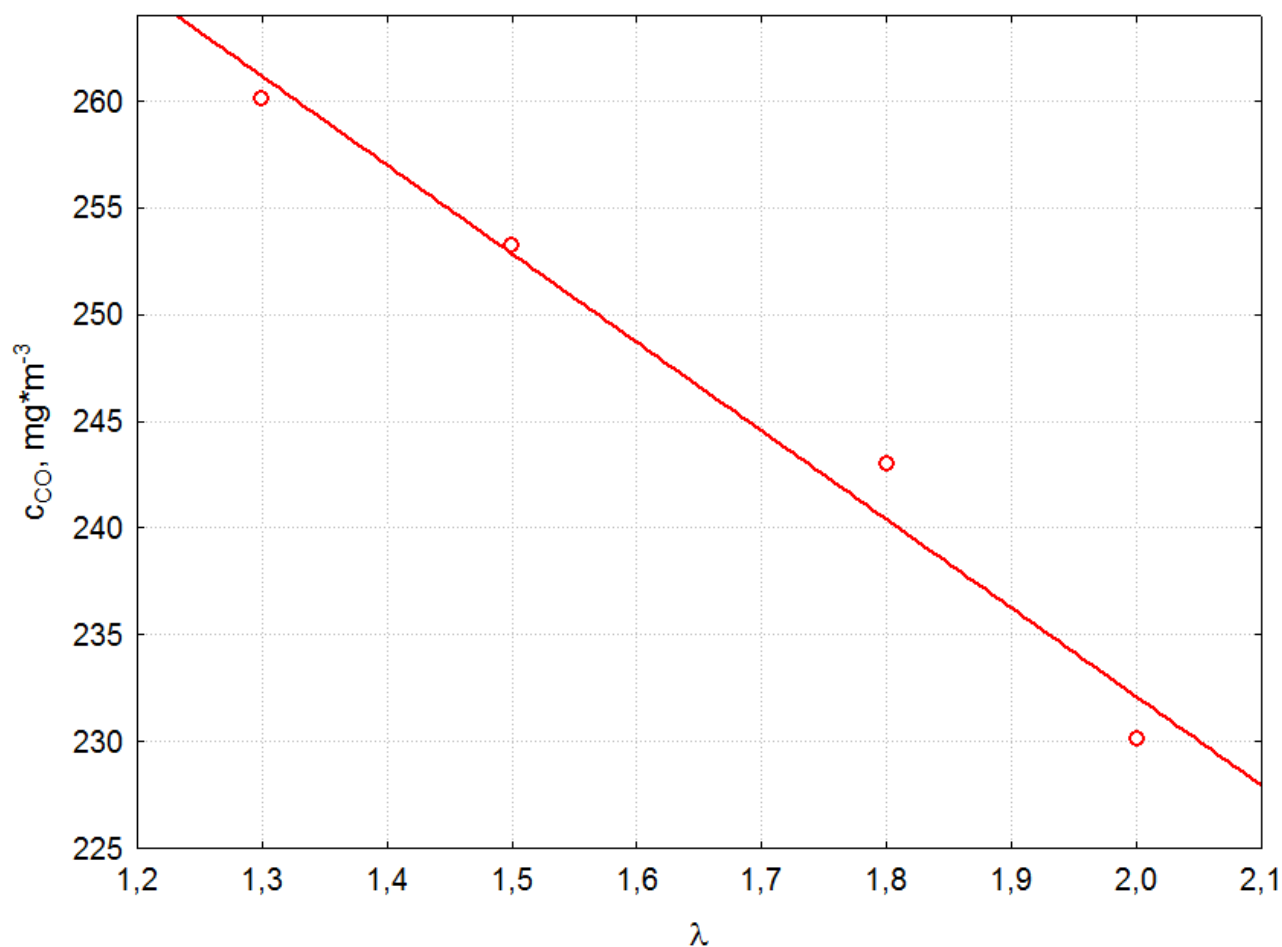
Rys. Z114. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi



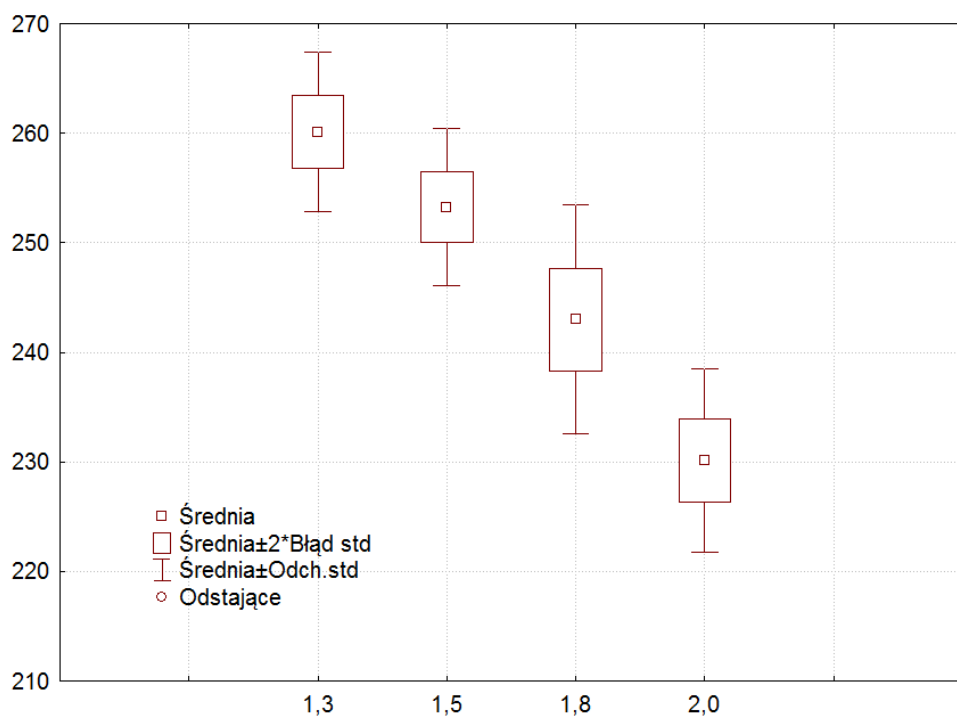
Parametry stałe:
 $T = 1273,15K$
 $\lambda = 1,8$



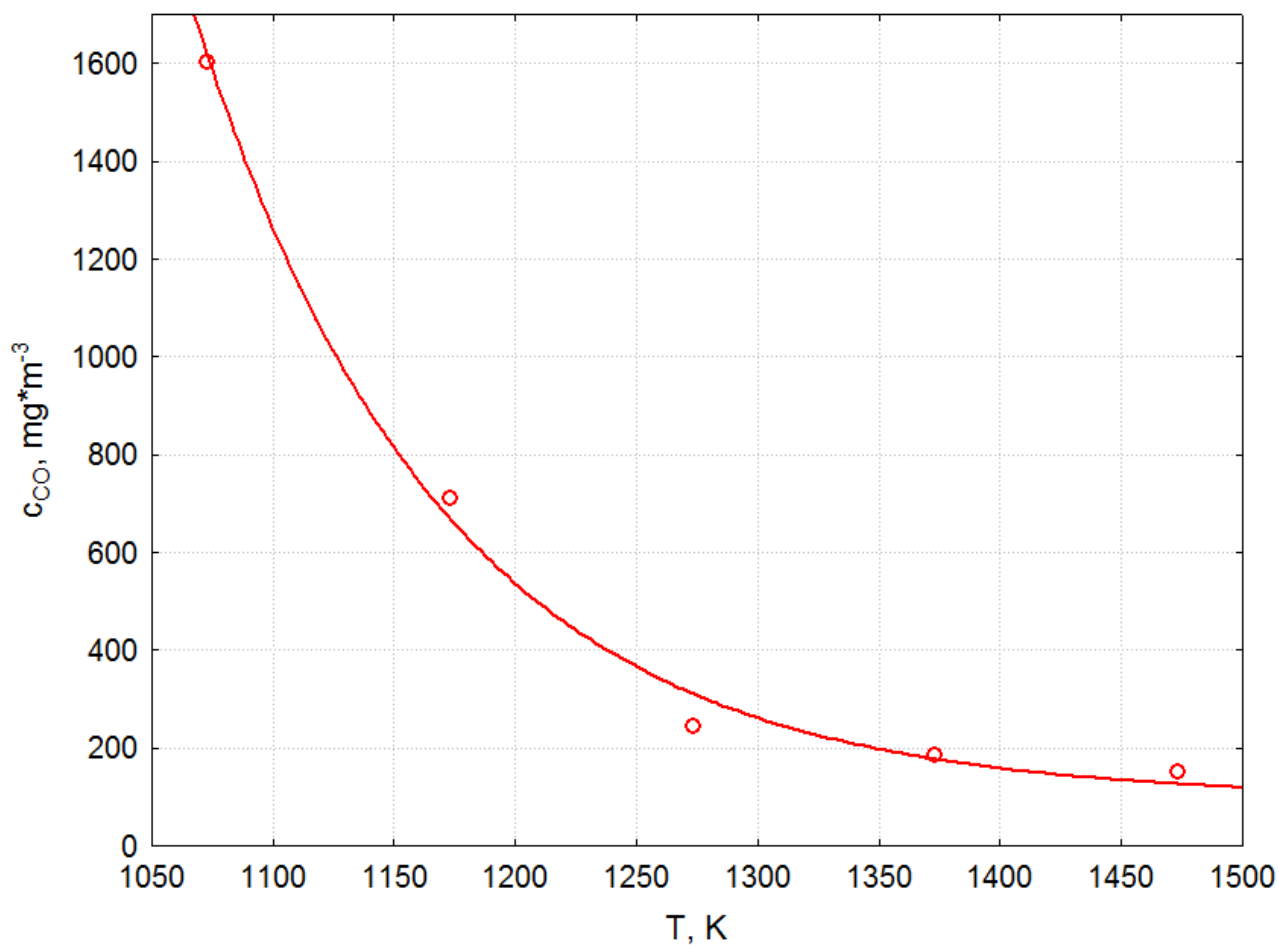
Rys. Z115. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współpalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi



Parametry stałe:
T = 1273,15K
U = 10%



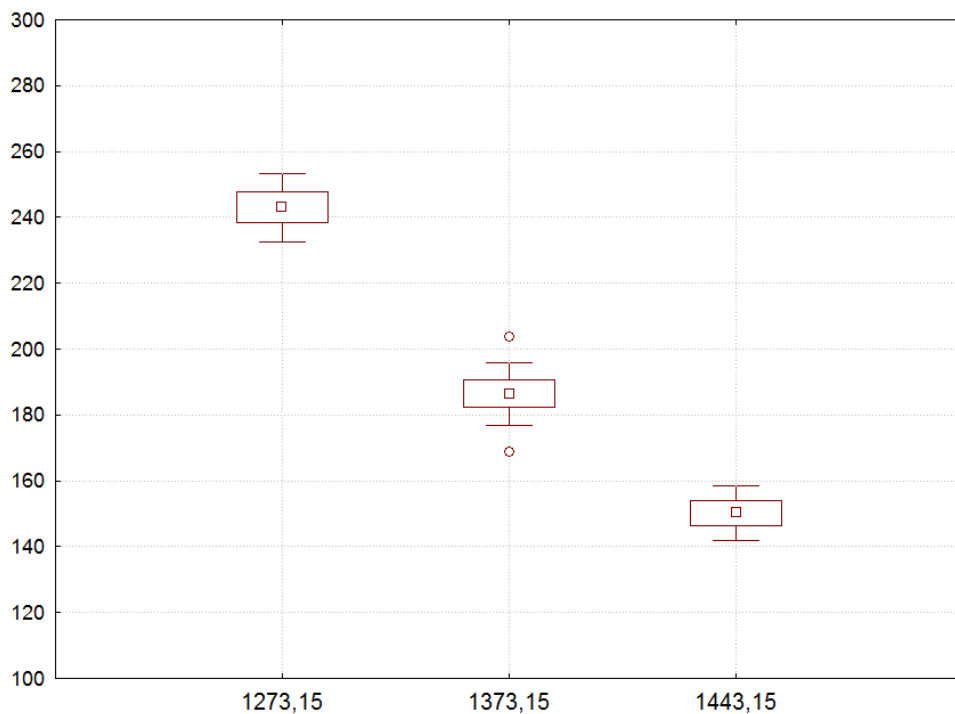
Rys. Z116. Wpływ zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi



Parametry stałe:

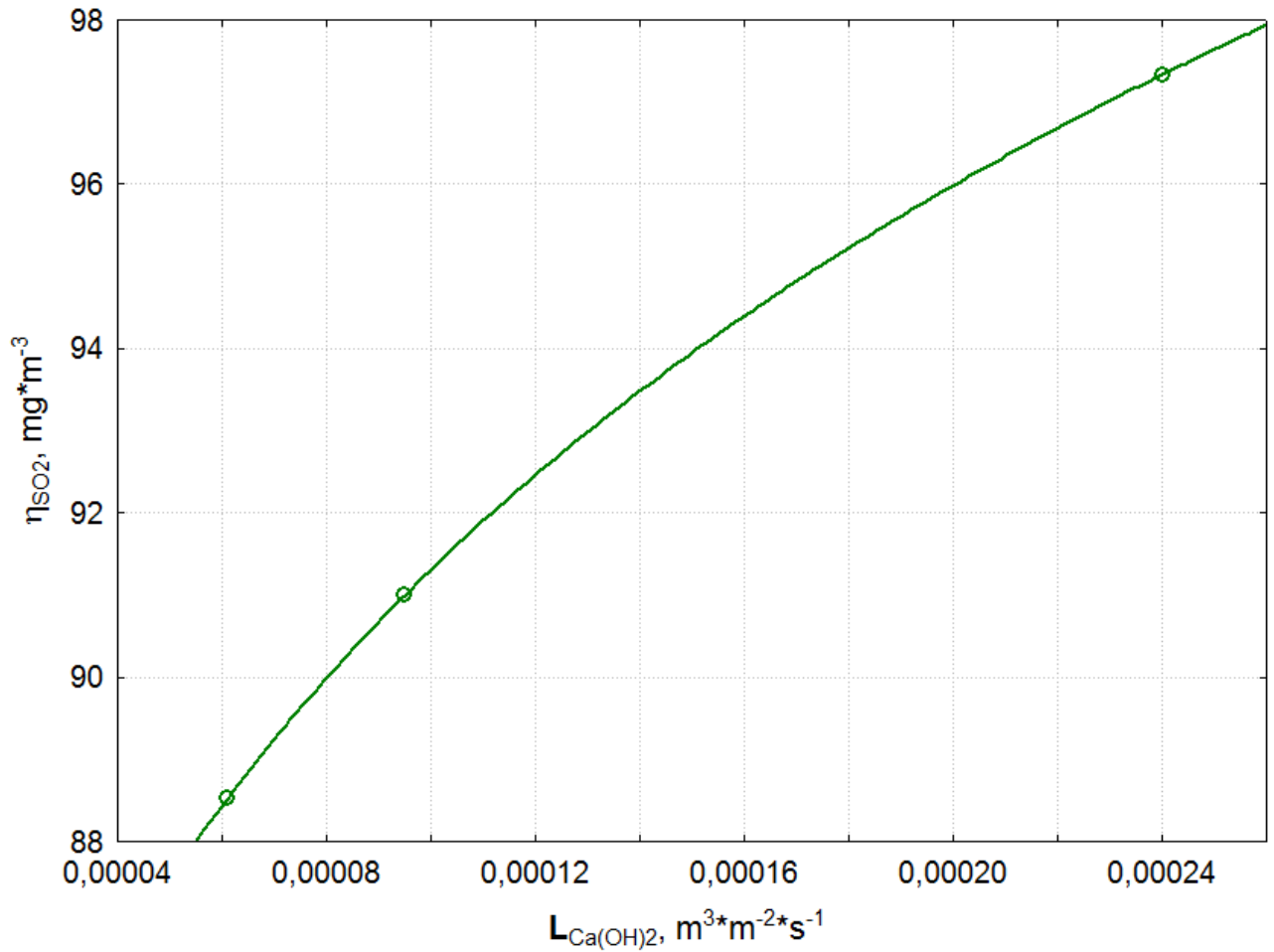
$\lambda = 1,8$

$U = 10\%$

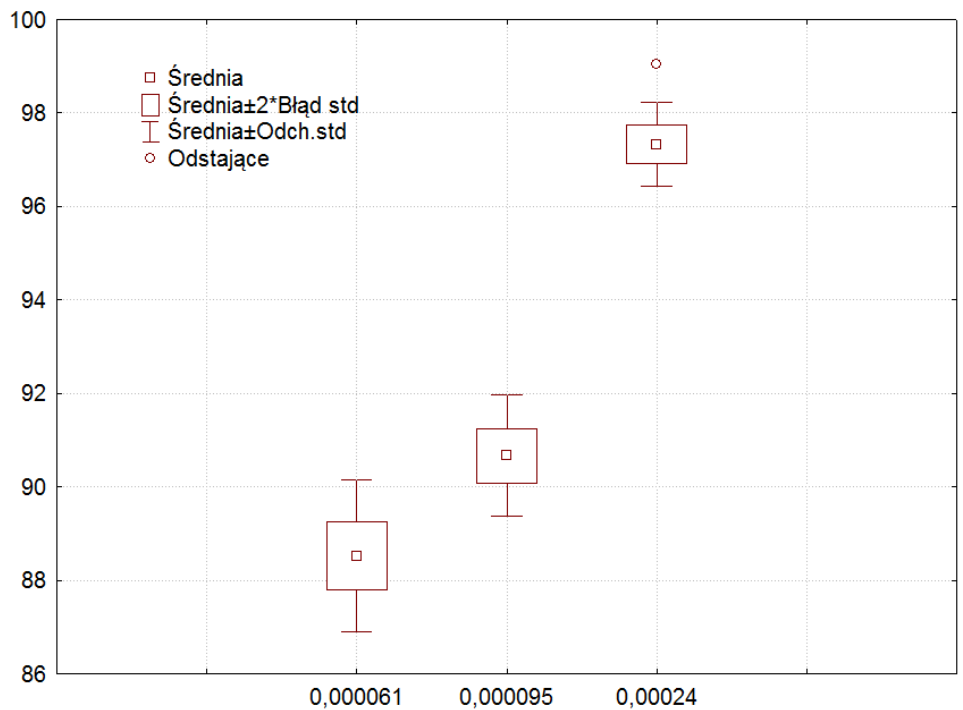


Rys. Z117. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi

Zestaw wykresów

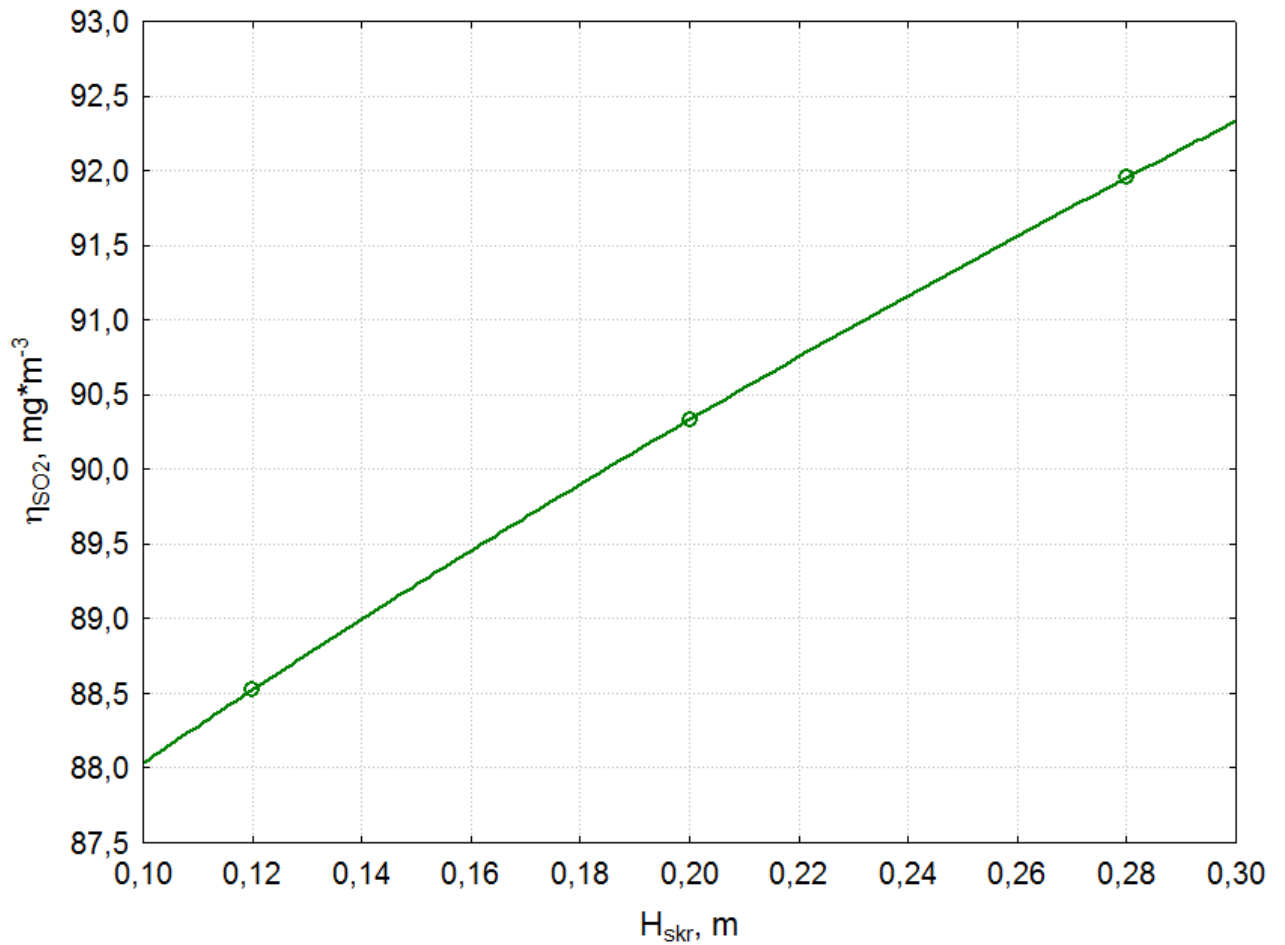


Parametry stałe:
 $H_{skr} = 0,12 \text{ m}$
 $L/G = 2,2 \text{ dm}^3/m^3$
 $T_s = 408,15K$

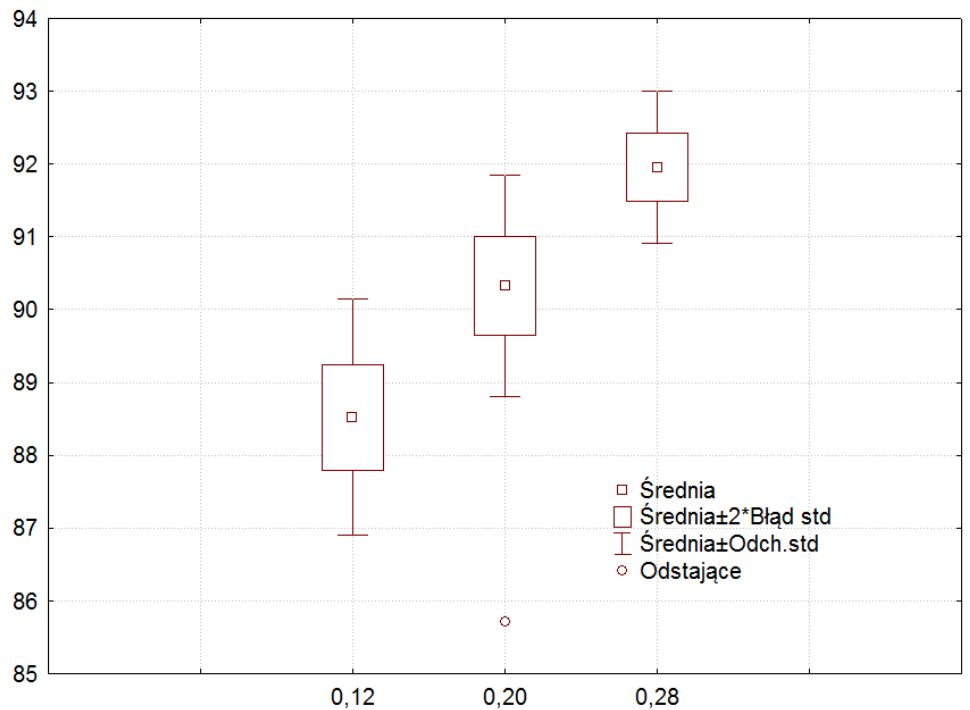


Rys. Z118. Wpływ zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

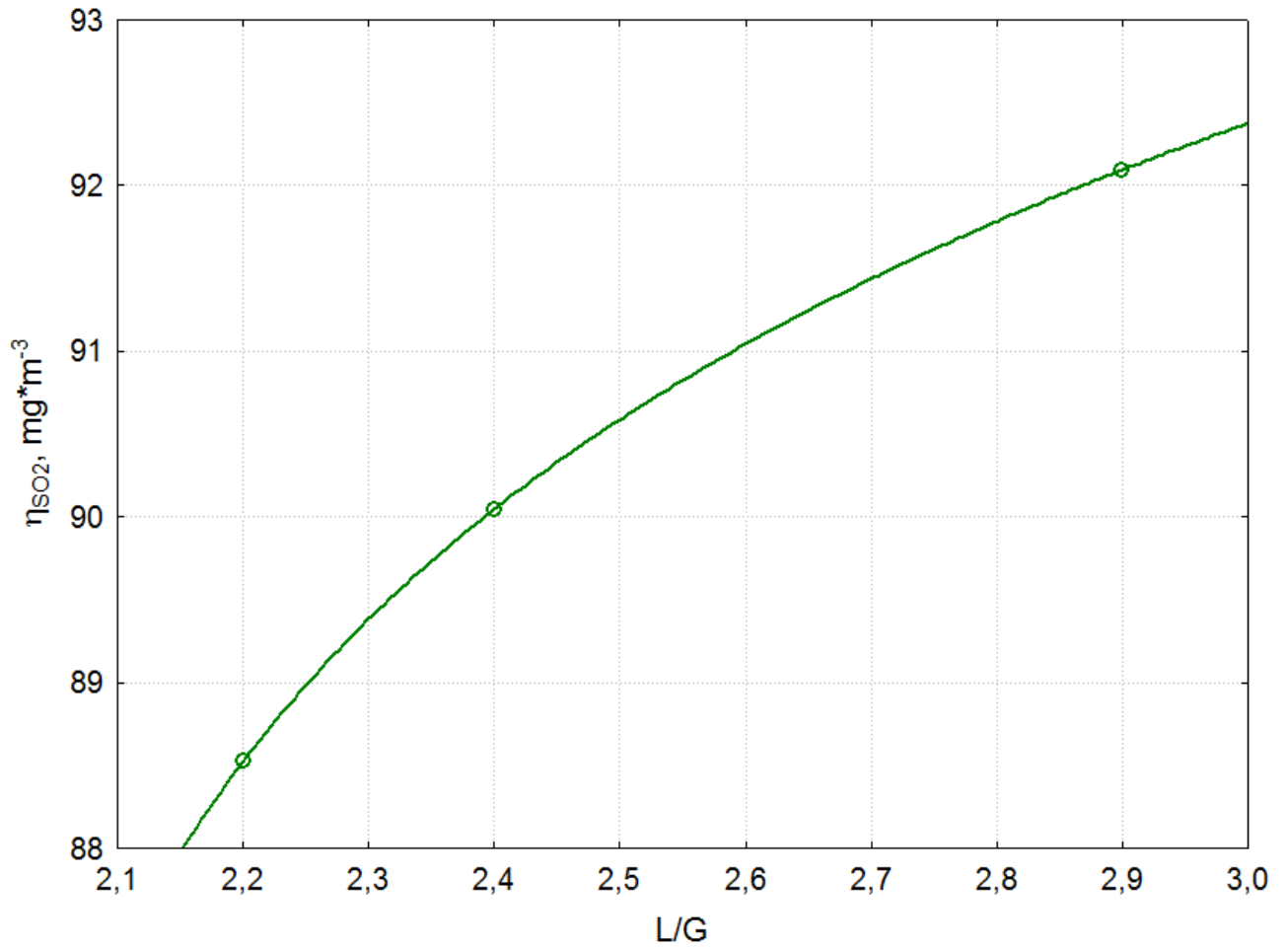
Zestaw wykresów



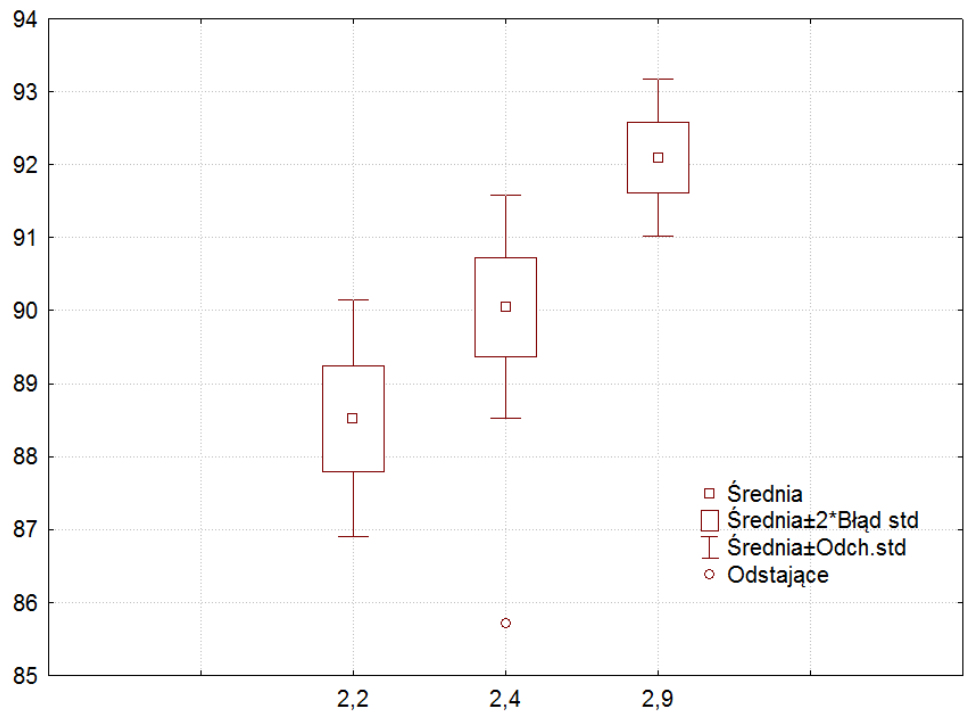
Parametry stałe:
 $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4}$
 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 $L/G = 2,2 \text{ dm}^3/m^3$
 $T_s = 408,15K$



Rys. Z119. Wpływ zmian wysokości skrubera na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

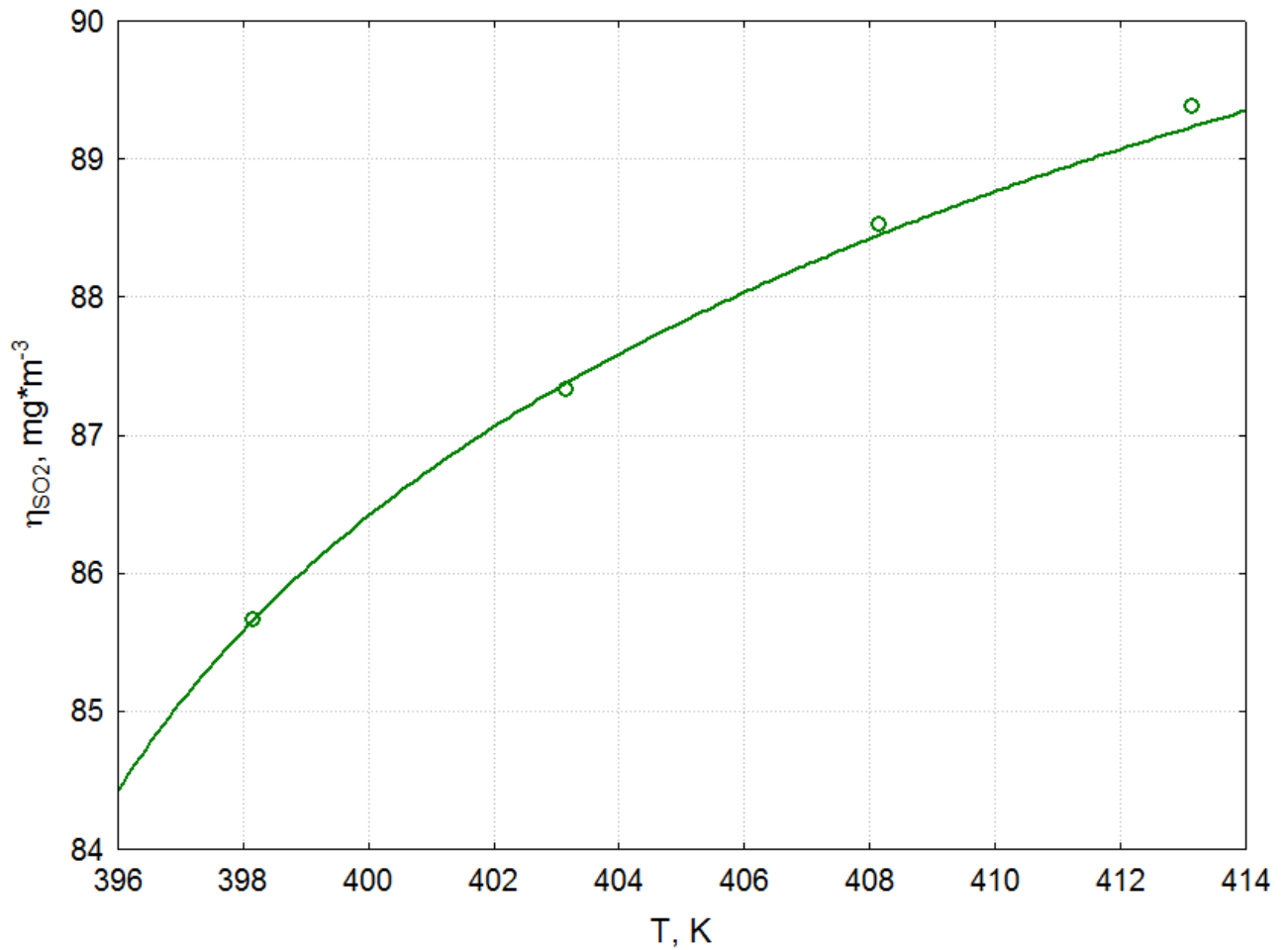


Parametry stałe:
 $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4}$
 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 $H_{skr} = 0,12$ m
 $T_s = 408,15$ K

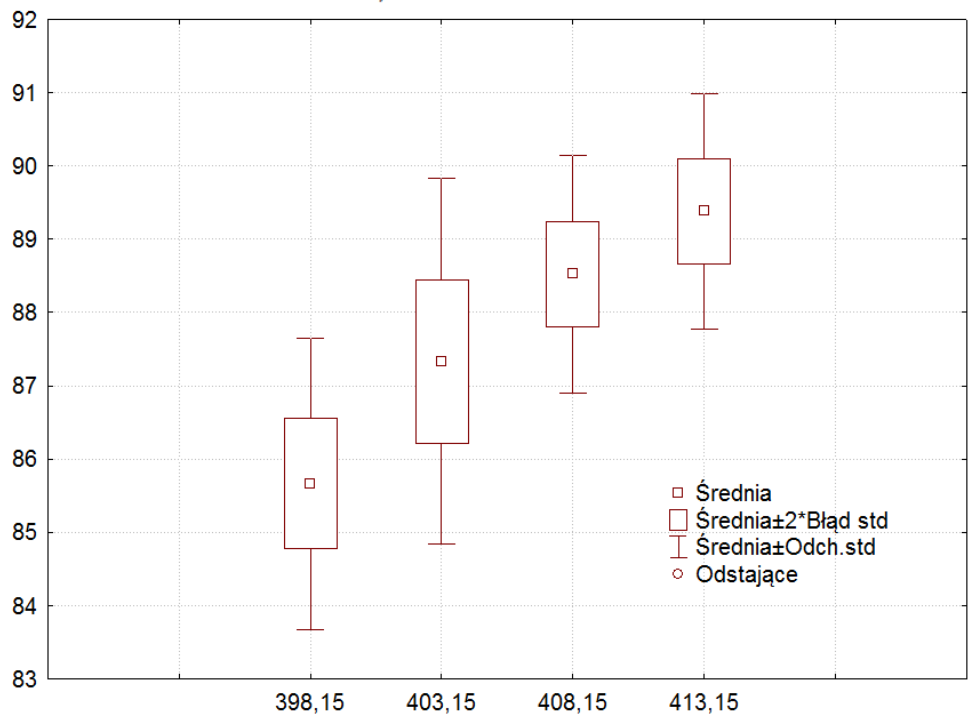


Rys. Z120. Wpływ ilorazu **L/G** na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapniową

Zestaw wykresów

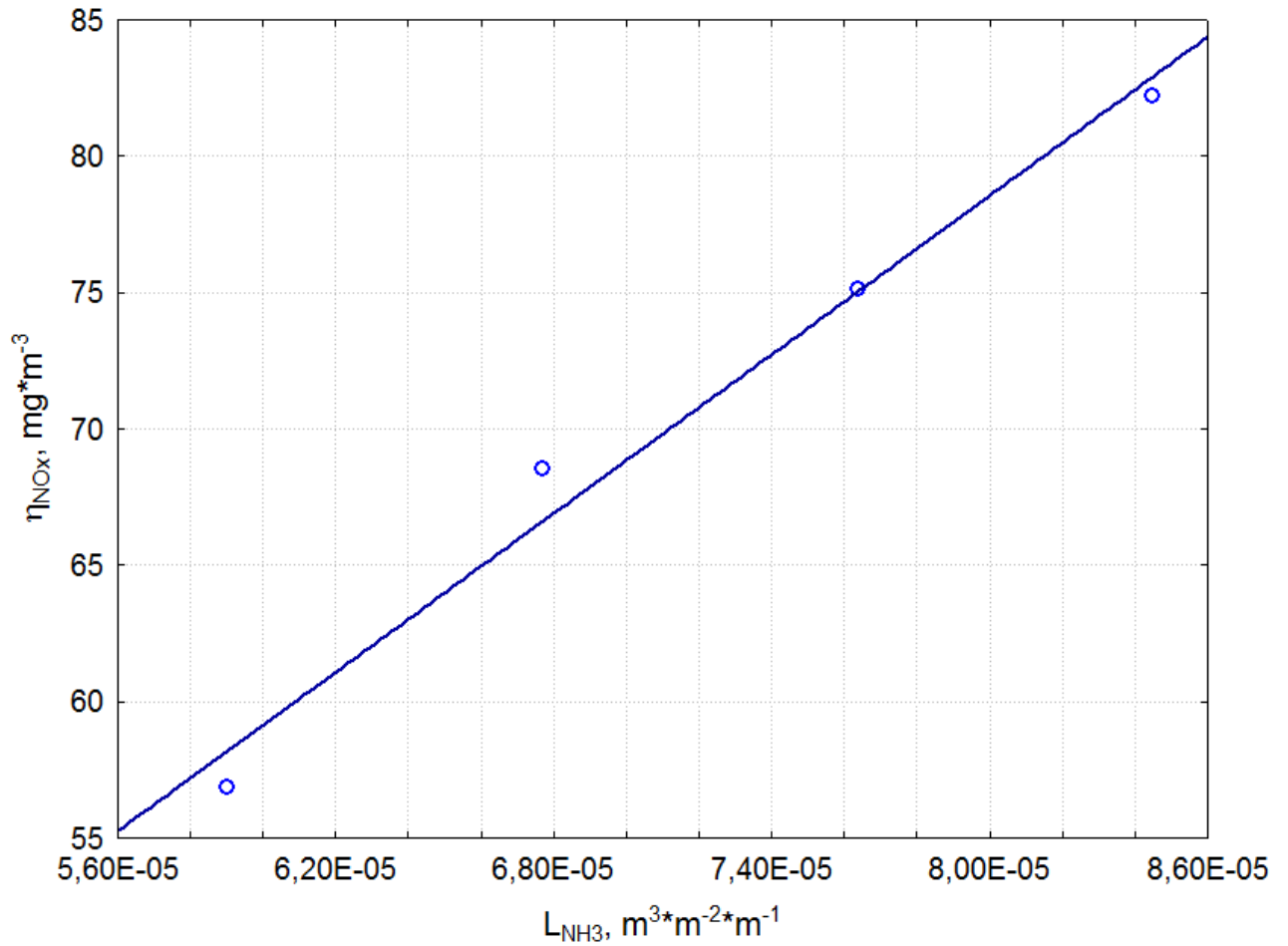


Parametry stałe:
 $L_{Ca(OH)_2} = 0,61 \cdot 10^{-4}$
 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 $H_{skr} = 0,12$ m
 $L/G = 2,2$ dm^3/m^3

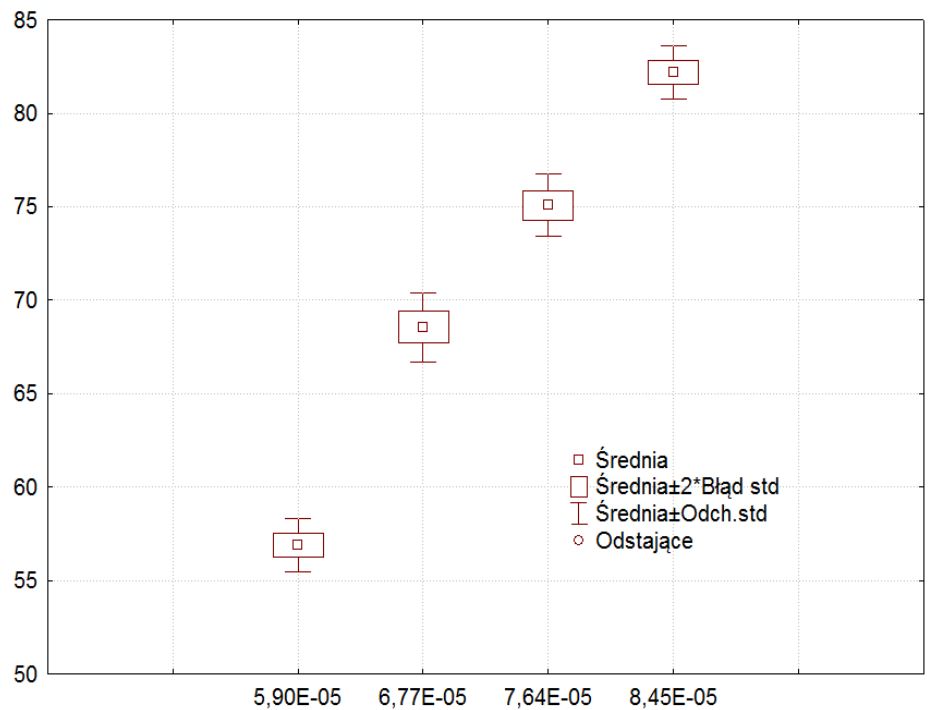


Rys. Z121. Wpływ zmian temperatury spalin T_s na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie odsiarczania spalin metodą wapiową

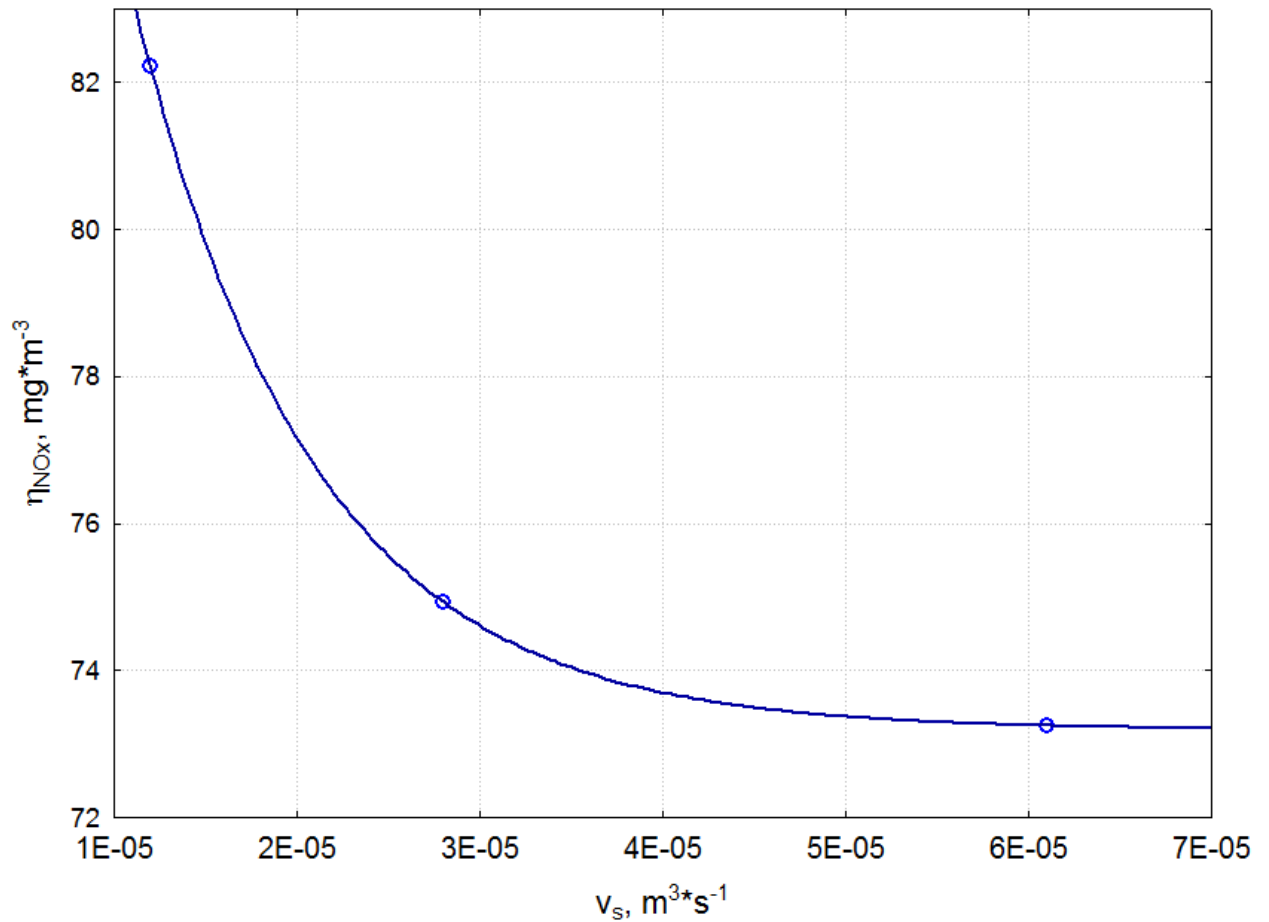
Zestaw wykresów



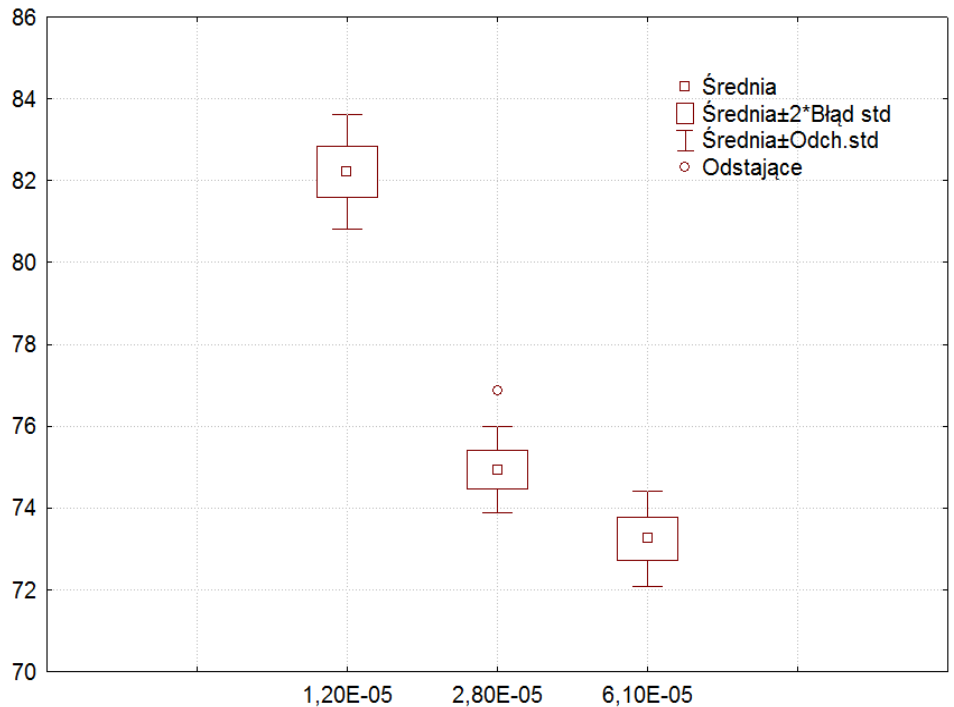
Parametry stałe:
 $v_s = 1,20 \cdot 10^{-5}$
 $m^3 \cdot s^{-1}$
 $T_s = 463,15K$



Rys. Z122. Wpływ zmian gęstości zraszania roztworem absorpcyjnym na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej

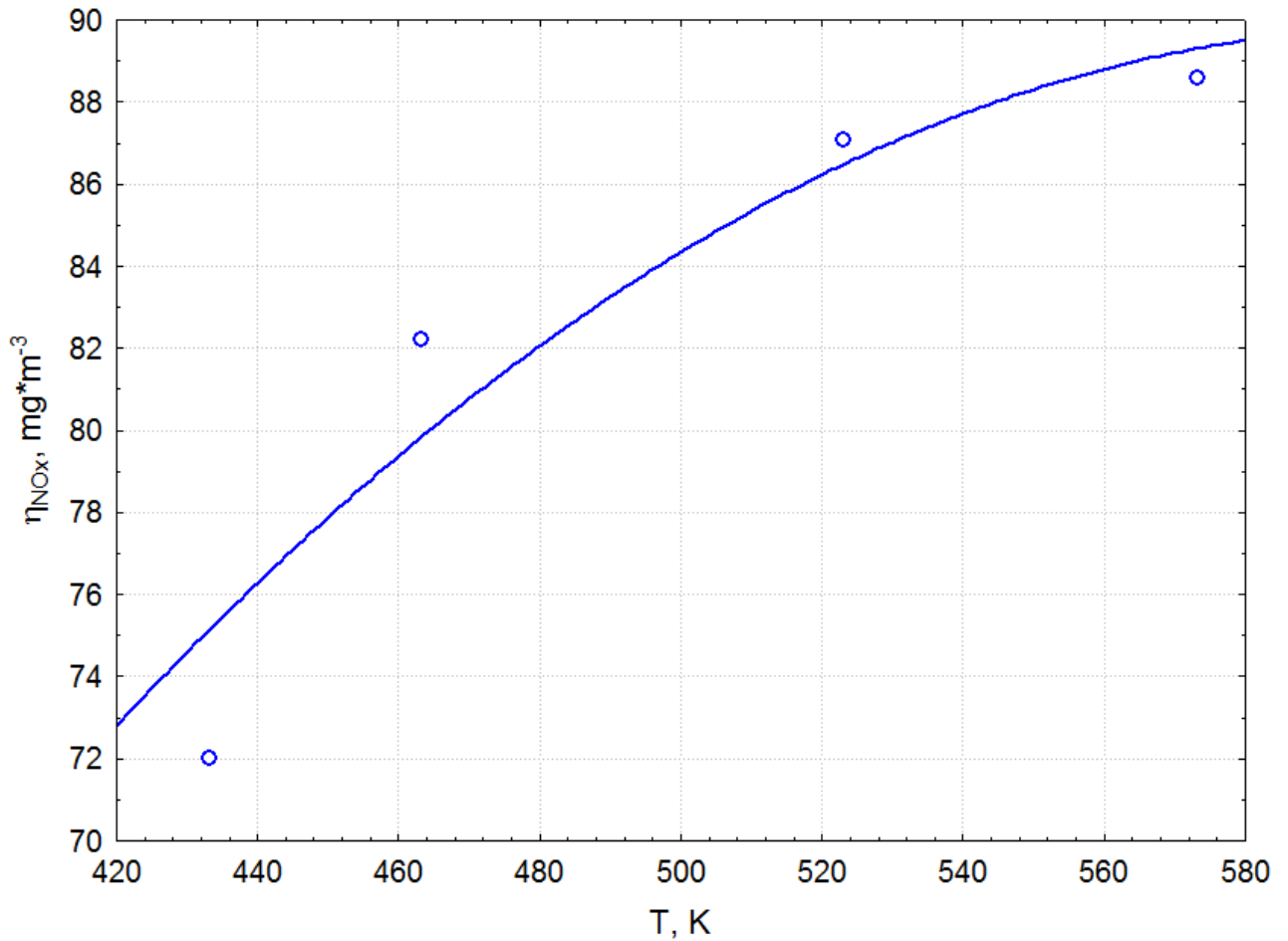


Parametry stałe:
 $L_{NH_3} = 8,45 \cdot 10^{-5}$
 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 $T_s = 463,15K$

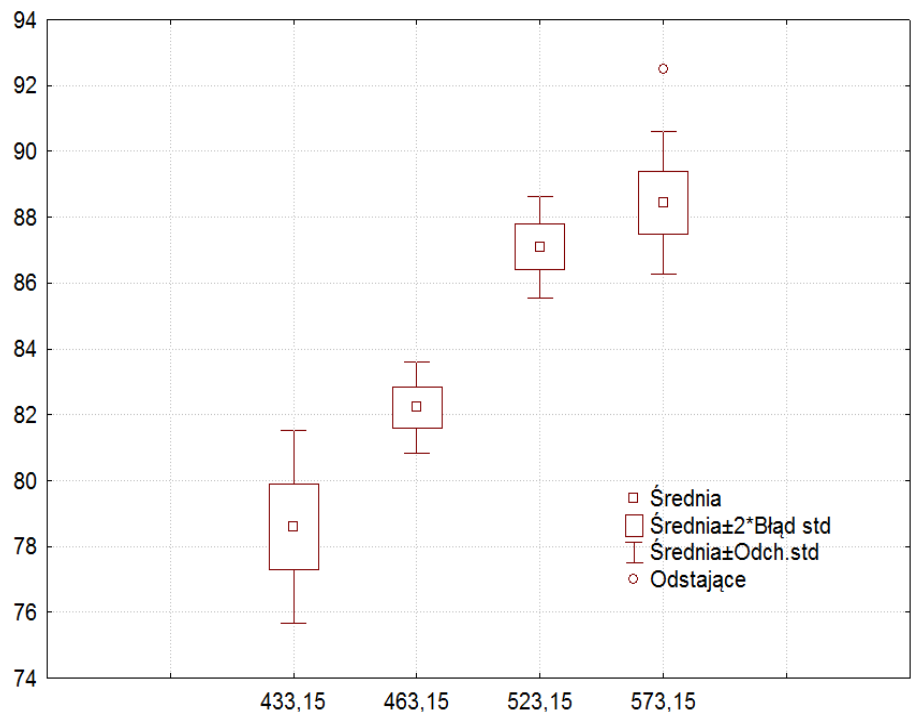


Rys. Z123. Wpływ zmian przepływu spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej

Zestaw wykresów

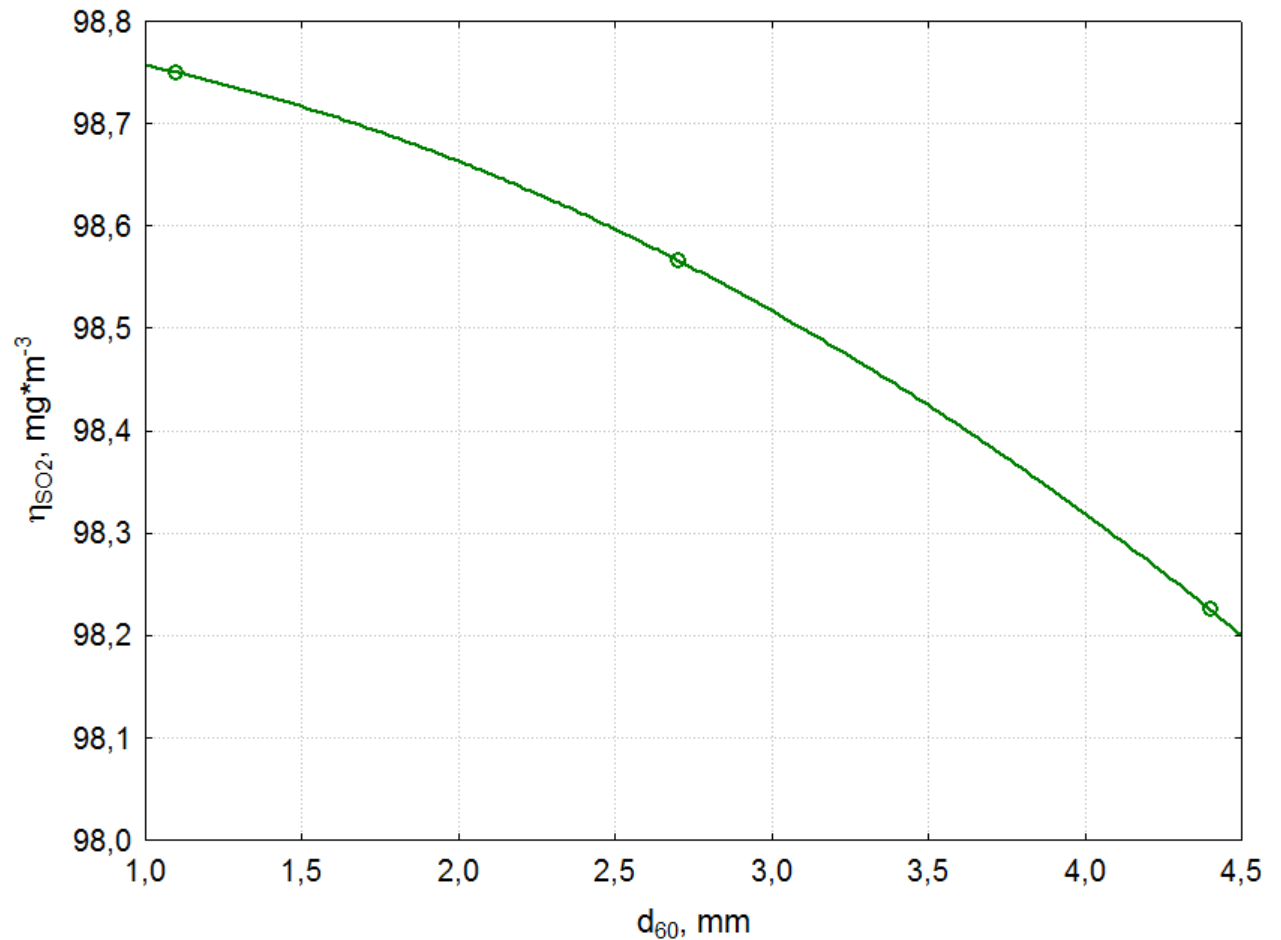


Parametry stałe:
 $L_{NH_3} = 8,45 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 $v_s = 1,20 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}$

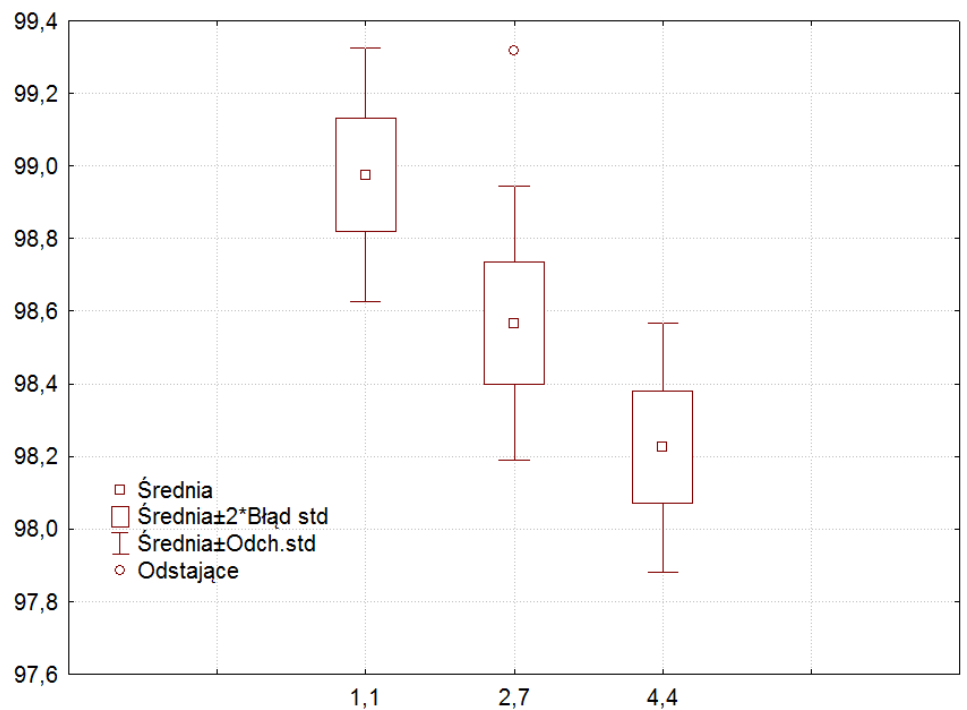


Rys. Z124. Wpływ temperatury spalin na skuteczność usuwania NOx metodą selektywnej redukcji katalitycznej

Zestaw wykresów

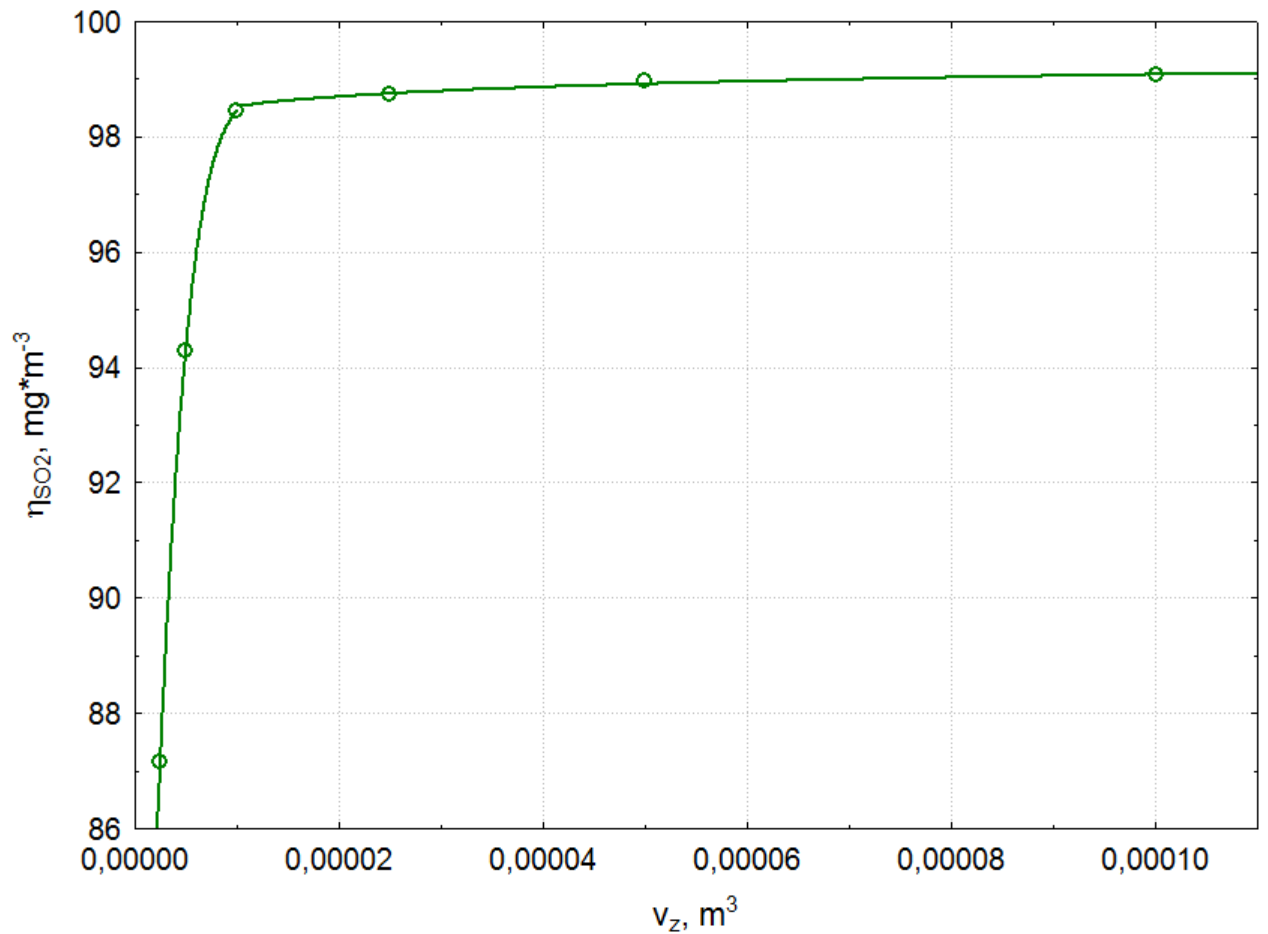


Parametry stałe:
 $V_z = 2,5 \cdot 10^{-5} m^3$

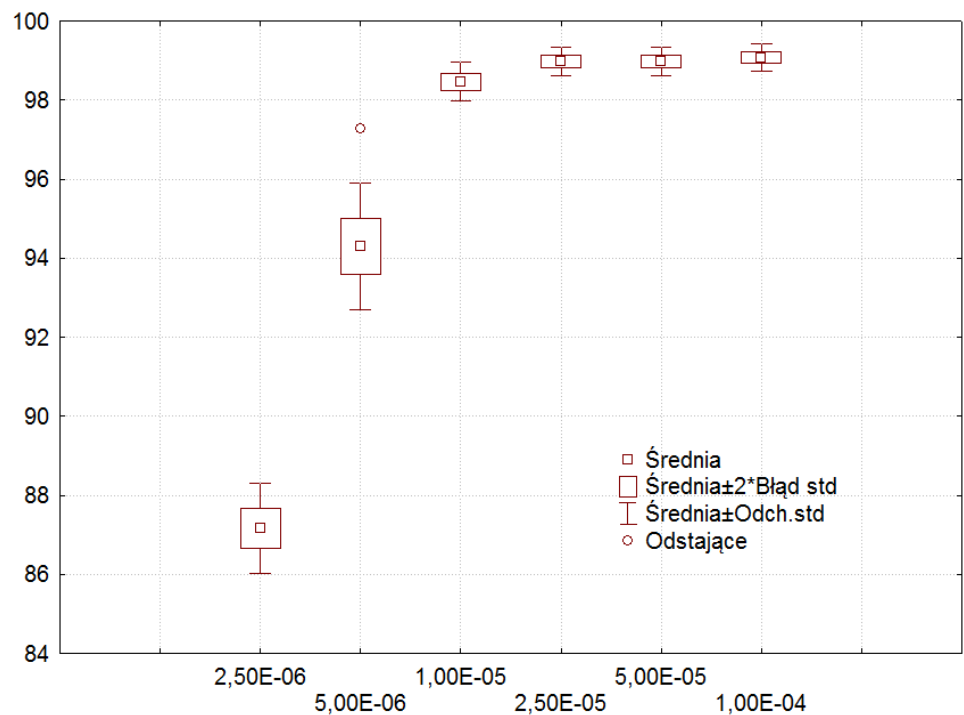


Rys. Z125. Wpływ zmian średniego uziarnienia sorbentu na skuteczność usuwania tlenu siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym

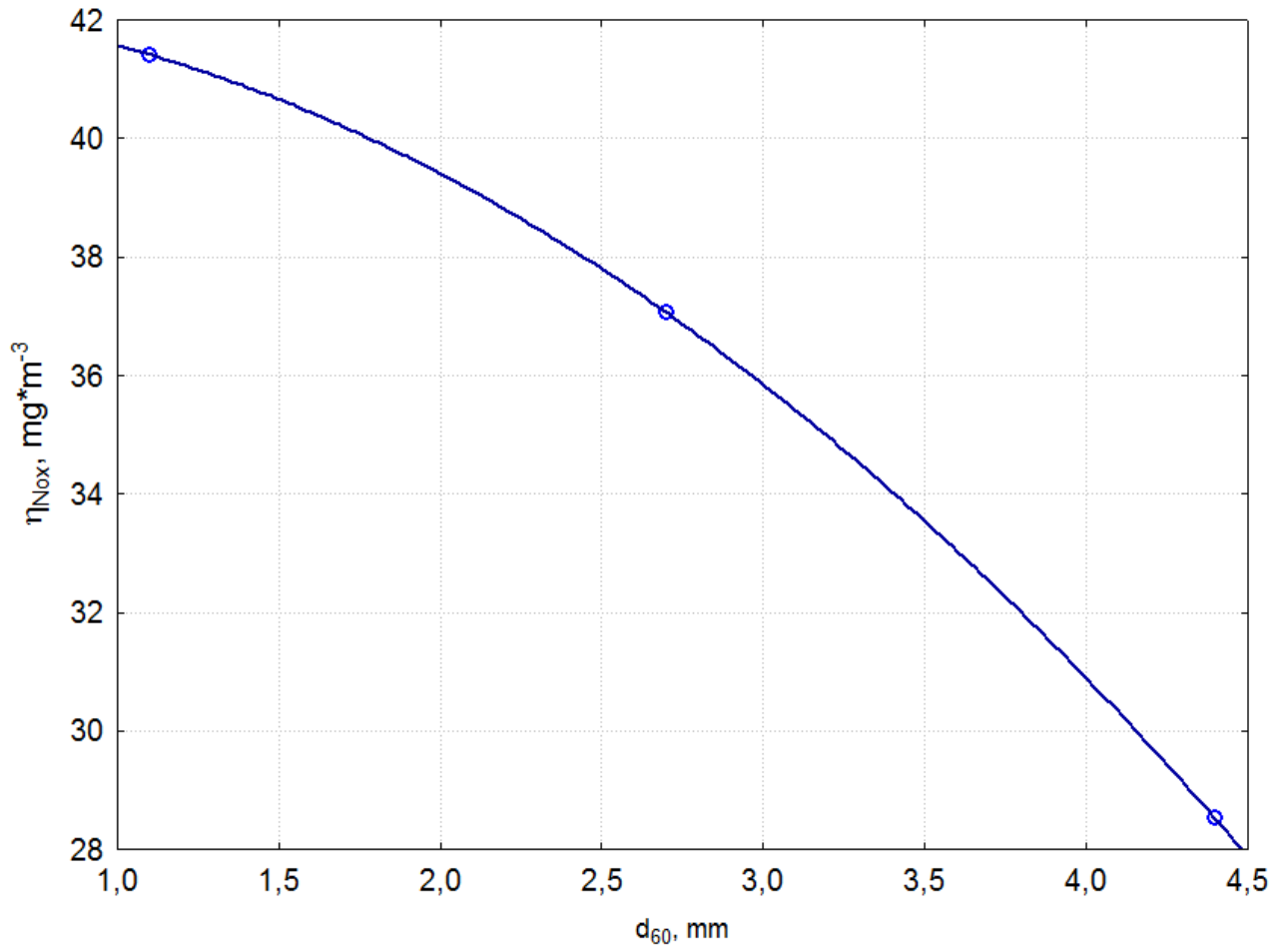
Zestaw wykresów



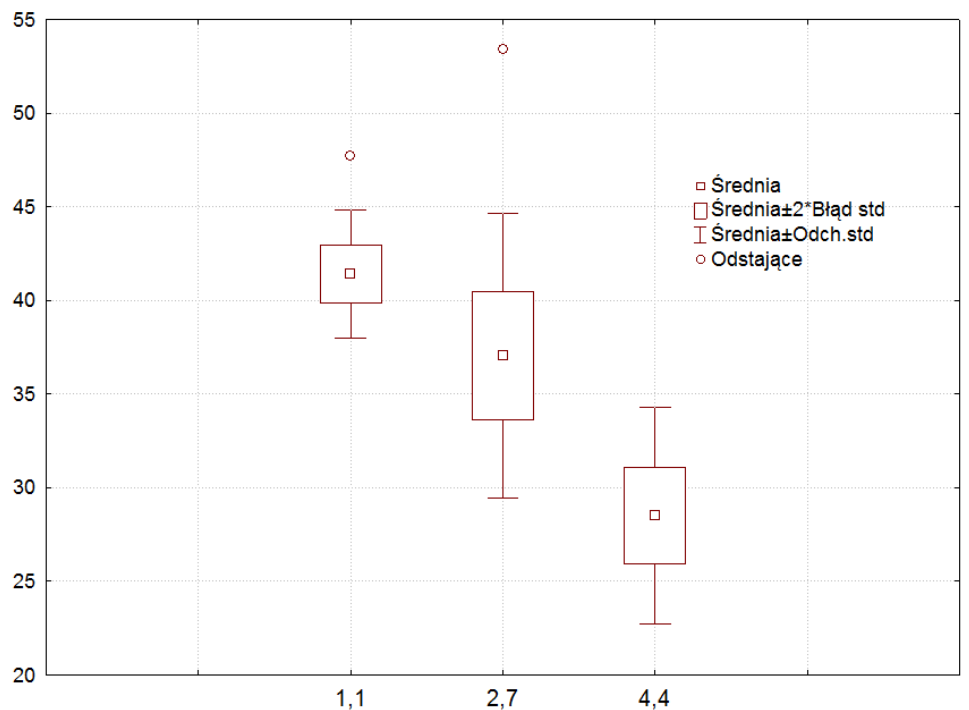
Parametry stałe:
 $d_{60} = 1,1 \text{ mm}$



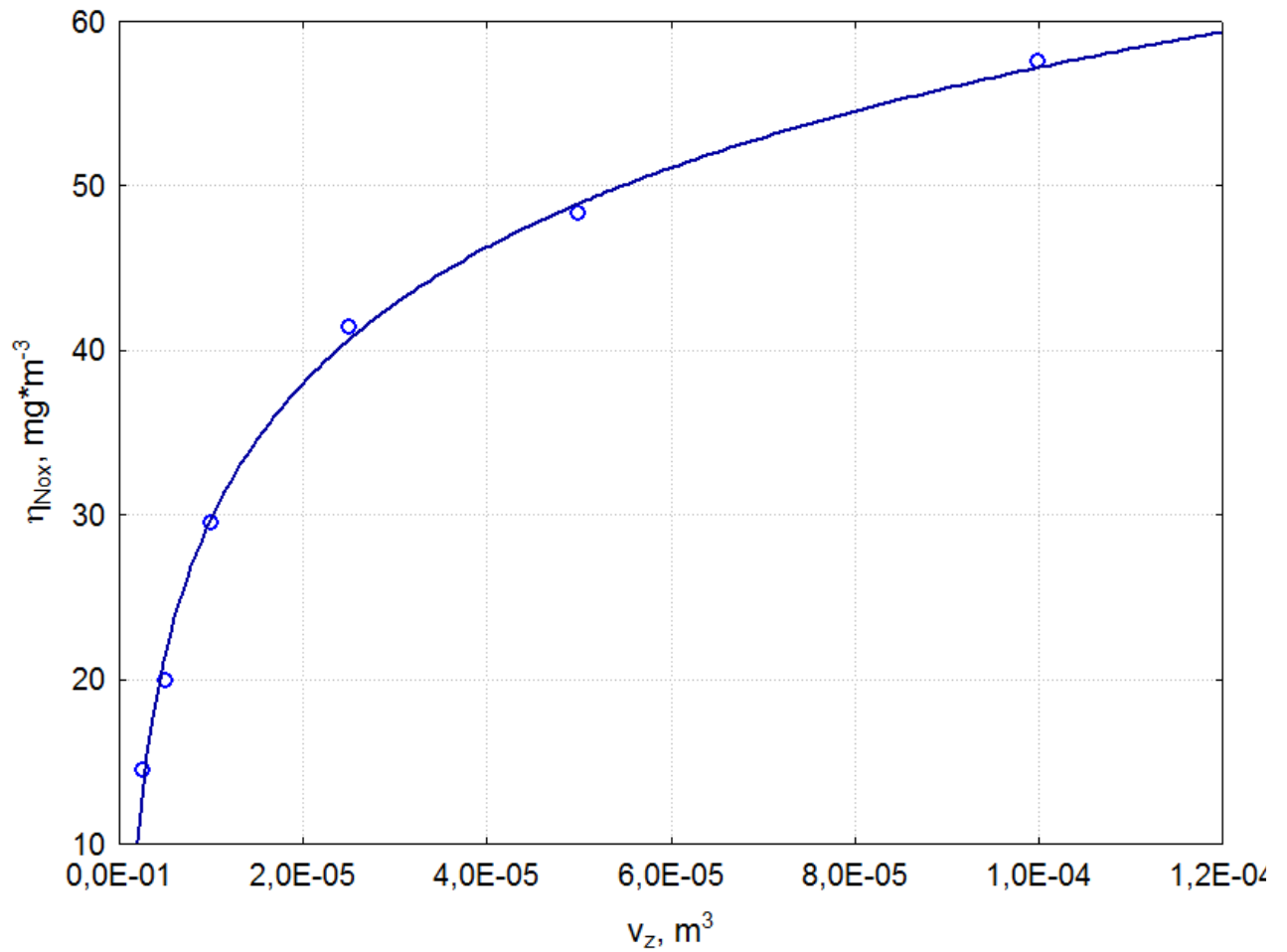
Rys. Z126. Wpływ zmian objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność usuwania tlenku siarki(IV) w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym



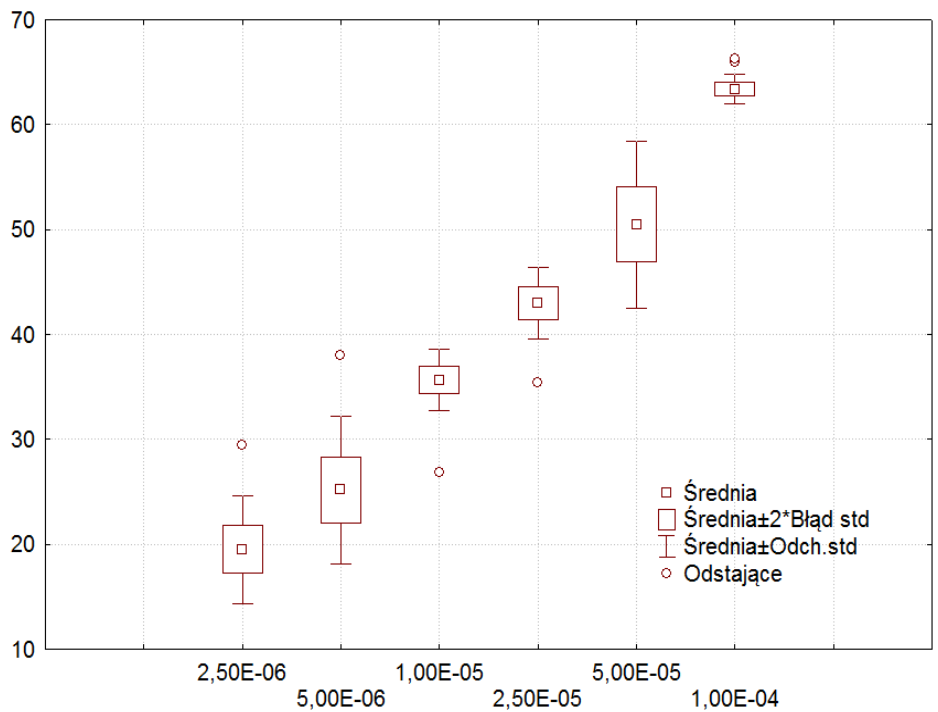
Parametry stałe:
 $V_z = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$



Rys. Z127. Wpływ zmian średniego uziarnienia sorbentu na skuteczność usuwania tlenków azotu NOx w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym



Parametry stałe:
 $d_{60} = 1,1 \text{ mm}$



Rys. Z128. Wpływ zmian objętości złoża adsorpcyjnego na skuteczność usuwania tlenków azotu NOx w procesie oczyszczania gazów spalinowych metodą adsorpcji na węglu aktywnym