

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KATEDRA PROCESÓW I URZĄDZEŃ  
PRZEMYSŁU SPOŻYWCZEGO

---

Mgr inż. SYLWIA MIERZEJEWSKA

Rozprawa doktorska

**ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ODDZIAŁYWANIA  
CZYNNIKÓW MECHANICZNYCH  
W ASPEKTCIE ENERGETYCZNYM I JAKOŚCIOWYM MYCIA  
RUROCIĄGÓW W PRZEMYSŁE SPOŻYWCZYM**

Dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn

PROMOTOR: Prof. dr hab. inż. Jarosław DIAKUN

---

KOSZALIN 2011

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ODDZIAŁYWANIA CZYNNIKÓW MECHANICZNYCH  
W ASPEKCIE ENERGETYCZNYM I JAKOŚCIOWYM  
MYCIA RUROCIĄGÓW W PRZEMYSŁE SPOŻYWCZYM

**Streszczenie**

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów. Pierwszy obejmuje wprowadzenie do omawianej tematyki i przedstawia genezę systemów Clean In Place (CIP).

W drugim rozdziale opisano rodzaje zanieczyszczeń, etapy procesu mycia, poziomy czystości i metody ich oceny, czynniki oddziałujące w procesie mycia, obieg Sinnera, wodę jako podstawowe medium myjące, czynniki mechaniczne, chemiczne, temperaturę i czas.

W trzecim rozdziale opisano system CIP, jego definicję oraz budowę stacji CIP. Przeanalizowano dostępne na rynku polskim stacje mycia i dokonano analizy parametrycznej i podziału w zależności od ich wielkości.

W czwartym rozdziale opisano czynniki mechaniczne oddziałujące na proces mycia. Obliczono prędkości przepływu i liczbę Reynoldsa dla stacji mycia dostępnych na rynku polskim. Opisano prędkość i charakter przepływu w rurociągach konieczny dla uzyskania odpowiedniej skuteczności mycia. Obliczono prędkość przepływu, grubość warstwy laminarnej, naprężenia ścinające i prędkość ścinana dla rurociągu zainstalowanego w laboratoryjnej stacji mycia CIP.

W piątym rozdziale przedstawiono zużycie energii w przemyśle spożywczym na proces mycia. Opisano zużycie energii w przemyśle browarniczym, przemyśle mleczarskim i przemyśle rozlewniczym.

W rozdziale szóstym przedstawiono cel, zakres i hipotezę niniejszej rozprawy. Podsumowano rozpoznanie literaturowe i badania własne i na ich podstawie przedstawiono cel pracy. Postawiono hipotezę badawczą i opisano zakres pracy.

W rozdziale siódmym opisano stanowisko badawcze z jego możliwościami badawczymi i pomiarowymi oraz opisano aparaturę pomiarową. Przedstawiono metodę zabrudzenia początkowego. Opisano metodę i skalę oceny skuteczności mycia opierając się na skali

barwnej i metodyce opisanej w normie. W kolejnym podrozdziale opisano plan badań, czynniki wejściowe, wyjściowe, stałe i zakłócenia. Określono zakres zmienności badanych parametrów i opisano plan eksperymentu.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań. Dokonano analizy istotności i wyznaczono funkcje regresji opisujące proces mycia w aspekcie jakościowym i energetycznym. Uwzględniono wpływ prędkość przepływu, ciśnienia, objętość i temperatury medium myjącego. W tym rozdziale opisano również kinetykę procesu mycia na podstawie mierzonych parametrów: pH, przewodności i mętności cieczy myjącej. Opisano i przeanalizowano zużycie energii w procesie mycia. Wyznaczono optymalne parametry procesu mycia.

Pracę kończą wnioski stwierdzające prawdziwość postawionej hipotezy, wnioski poznawcze, użytkowe i dotyczące kierunków dalszych prac naukowo-badawczych.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE IMPACT OF MECHANICAL  
FACTORS IN THE ENERGETIC AND QUALITATIVE ASPECT  
OF CLEANING OF PIPELINES IN FOOD PROCESSING INDUSTRY

**Abstract**

This thesis consists of nine chapters. The first chapter includes an introduction to the subject under discussion and presents the origins of Clean in Place (CIP) systems.

The second chapter presents types of contaminations, the cleaning process phases, cleanness levels and methods of their evaluation, those factors which affect the cleaning process, the Sinner circulation, water as the main cleaning medium, mechanical and chemical factors, the temperature and time.

The third chapter covers the CIP system: its definition and the construction of the CIP station. Those cleaning stations that are available on the Polish market were analyzed and a parametric analysis was conducted. The stations were divided depending from their sizes.

The fourth chapter presents those mechanical factors which affect the cleaning process. The flow rates and Reynolds number were calculated for those cleaning stations that are available on the Polish market. The flow rate and the nature of the flow in pipelines were described that are required in order to obtain the appropriate effectiveness of cleaning.

The flow rate, the thickness of the laminar layer, shearing stresses and the shear rate were all calculated for the pipeline that was installed in the laboratory CIP cleaning station.

The fifth chapter covers the consumption of energy for the cleaning process in food processing industry. Energy consumption was described in brewing industry, dairy industry and bottling industry.

The sixth chapter presents the objective, scope and hypothesis of the present dissertation. A review was provided of the literature studies and the author's own research; the objective of the thesis was presented on the basis of these studies. The research hypothesis was presented and the scope of the thesis was described.

The seventh chapter provides a description of the testing facility including its research and measuring potential. The measuring apparatus was described. The initial dirt method was presented. The evaluation method and the scale for the cleaning effectiveness were described on the basis of the color scale and the methodology as described for the standard. The further section includes the plan of the investigations, the input and output factors, constants and disturbances. The variability of the parameters under examination was specified and the plan of the experiment was described.

Next chapter covers the research results. A significance analysis was conducted and regression functions were determined that describe the cleaning process in the qualitative and energetic aspects. The influence was taken into account of the flow rate, the pressure as well as the volume and the temperature of the cleaning medium. This chapter also covers the kinetics of the cleaning process on the basis of the following parameters measured: pH, conductivity and the turbidity of the cleaning liquid. Energy consumption in the cleaning process was described and analyzed. The optimal parameters of the cleaning process were determined.

At the end of the thesis, conclusions are provided which confirm the hypothesis that was put forward; cognitive and utilitarian conclusions were presented concerning further scientific and research work.

## Zestawienie stosowanych oznaczeń

$\tau_r$  - naprężenia styczne [Pa];

$\mu$  - współczynnik lepkości dynamicznej [kg/ms];

$E$  – energia całkowita [kJ];

$E_g$  – energia potrzebna na podgrzewanie medium, energia grzania [kJ];

$E_p$  -energia potrzebna na realizację przepływu [kJ];

$f$ - współczynnik strat tarcia;

$J$  –jakość, skuteczność mycia [pkt.];

$p$  – ciśnienie [bar];

$R$ - promień [m];

$r$ - dowolny promień [m];

$T$  – temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$v$  – objętość [ $\text{m}^3$ ];

$w_{\max}$ - prędkość maksymalna [m/s];

$w$ - prędkość przepływu [m/s];

$\bar{w}$ - średnia prędkość przepływu [m/s];

$\delta$ - grubość laminarnej warstwy przyściennej [m].

$\rho$  – gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania [1/s].

## Spis treści

Streszczenie .....	2
Zestawienie stosowanych oznaczeń .....	6
1. Wstęp .....	9
2. Proces mycia .....	12
2.1. Rodzaje zanieczyszczeń .....	12
2.2. Etapy procesu mycia.....	15
2.3. Poziomy czystości i metody ich oceny.....	18
2.4. Czynniki oddziaływujące w procesie mycia .....	21
2.4.1. Obieg Sinnera .....	21
2.4.2. Woda jako podstawowe medium myjące .....	23
2.4.3. Czynniki mechaniczne.....	25
2.4.4. Czynniki chemiczne .....	26
2.4.5. Temperatura .....	27
2.4.6. Czas.....	28
3. Mycie w systemie Clean In Place (CIP) .....	29
3.1. Definicja CIP .....	30
3.2. Budowa stacji CIP .....	31
4. Czynniki mechaniczne oddziałujące w procesie mycia rurociągów .....	36
5. Zużycie energii w przemyśle spożywczym na proces mycia.....	41
6. Cel, hipoteza i zakres pracy.....	44
6.1. Podsumowanie rozpoznania badań i stanu wiedzy.....	44
6.2. Cel pracy .....	49
6.3. Hipoteza badawcza.....	50
6.4. Zakres pracy .....	50
7. Stanowisko badawcze, metodyka i program badań.....	51
7.1. Stanowisko badawcze.....	51
7.2. Standardowe zabrudzenie początkowe.....	60
7.3. Metoda i skala oceny skuteczności mycia .....	62
7.4. Plan badań .....	64
7.4.2. Ustalenie przedziału zmienności czynników badanych.....	67

7.4.3.	Przyjęcie klasy modelu matematycznego .....	69
7.4.4.	Kodowanie czynników badanych .....	69
7.4.5.	Plan eksperymentu.....	71
8.	Wyniki badań i ich analiza.....	73
8.1.	Funkcje regresji i analiza istotności .....	73
8.1.1.	Analiza statystyczna wyników badań .....	73
8.1.2.	Eliminacja wyników obciążonych błędem grubym .....	73
8.1.3.	Wariancja międzywierszowa i odchylenie standardowe .....	75
8.1.4.	Sprawdzenie jednorodności wariancji w próbie .....	76
8.1.5.	Obliczenie współczynników funkcji regresji.....	76
8.1.6.	Analiza statystyczna funkcji regresji.....	77
8.1.7.	Badanie współczynnika korelacji wielowymiarowej .....	79
8.1.8.	Sprawdzenie adekwatności modelu matematycznego .....	83
8.1.9.	Odkodowanie funkcji regresji .....	84
8.1.10.	Funkcje regresji jakości mycia, energii przepływu, energii ogrzewania .....	87
8.1.11.	Wnioski z analizy statystycznej .....	93
8.2.	Kinetyka procesu .....	93
8.3.	Zużycie energii a skuteczność mycia .....	100
9.	Podsumowanie i wnioski .....	109
9.1.	Wnioski z badań .....	110
	Propozycje dalszych badań.....	112
10.	Literatura .....	113



# 1. Wstęp

Najwyższe standardy higieny w zakładach są podstawowym czynnikiem wstępnym do produkcji bezpiecznej żywności. Czyszczenie, a następnie dezynfekcja lub sterylizacja muszą być wykonane bardzo starannie, aby zapewnić odpowiednią jakość i bezpieczeństwo żywności.

Do czasu wynalezienia nowoczesnych technik mycia czyszczenie w zakładach odbywało się wyłącznie metodą ręczną. Całe wyposażenia zakładów przetwórczych myte było ręcznie po każdym cyklu produkcyjnym, nawet kilka razy dziennie. Podczas tego zabiegu każdy element wymaga pracochłonnego demontażu, indywidualnego usuwania zanieczyszczeń, mycia środkami chemicznymi, suszenia, dezynfekcji i ponownego montażu. Ze względu na konieczność wyczyszczenia rurociągów i zbiorników od wewnątrz ich wielkości były ograniczone. Długości poszczególnych elementów rurociągu były ograniczone do 3 m, a zbiorniki miały wysokość maksymalnie 2,4 m tak, aby średniej wysokości osoba mogła je wyczyścić za pomocą szczotki. Mycie wykonywane było najczęściej na nocnej zmianie, przez niewykwalifikowanych pracowników i praktycznie bez nadzoru. Stwarzało to duże zagrożenie dla bezpieczeństwa produkcji. Stosowane środki i temperatura musiały być dostosowane do kontaktu z operatorem. Z doniesień literatury wynika, że mycie ręczne było podstawowym sposobem czyszczenia do 1950 r., czyli do momentu kiedy szeroko zaczęto wdrażać mycie w obiegu zamkniętym.

Pierwszą doświadczalną stację mycia CIP (Clean In Place) skonstruowano na początku lat 40 w Stanach Zjednoczonych dla niewielkiej mleczarni w Ohio. Instalacja wykonana była ze zbiorników, pomp oraz ocynowanych miedzianych rurociągów i gumowych węży, które łączyły urządzenia produkcyjne oraz rurociągi w taki sposób, aby możliwa była cyrkulacja wody i środków myjących. Stacje CIP stosowano głównie do mycia długich przewodów rurowych np. łączących odbiór surowca z tankami pośredniczącymi. Pozostałe elementy instalacji i urządzenia nadal czyszczone były ręcznie. Do 1945 zbudowano ok.40 podobnych stacji mycia CIP, ale w dalszym ciągu służyły one głównie do mycia linii przesyłowych, natomiast urządzenia i aparaty produkcyjne myte były ręcznie.

W 1953 r. rozpoczęto badania nad skutecznością mycia. Już wówczas jako najistotniejszy czynnik mycia wskazano prędkość przepływu. Wczesne nauki sugerowały, że w rurze o dużej średnicy, minimalna prędkość przepływu powinna wynosić 1,5 m/s. W 1953 – 1954 r. powstały pierwsze automatyczne stacje mycia CIP [Seiberling 1955]. Na jednej z konferencji w Ohio zademonstrowano zasadę działania takiej stacji CIP, którą wyposażono w urządzenia do kontroli temperatury, stężenia środków, czasu i właściwego płukania wstępnego i końcowego. Kolejne badania prowadzone były nad nowymi materiałami konstrukcyjnymi głównie ze stali nierdzewnej jak również dotyczyły rozszerzenia zakresu stosowania stacji CIP do mycia innych urządzeń. W tym czasie opracowano system mycia zbiorników wyposażając je w dysze spryskujące oraz prowadzono badania nad substancjami chemicznymi stosowanych do mycia i dezynfekcji. Pionierem w tej dziedzinie była firma Ekonomia Laboratorium założona w 1923 roku przez Merritta J. Osborna, która produkowała linię specjalistycznych produktów chemicznych, Klenzade Products Inc., przeznaczonych do mycia i dezynfekcji urządzeń w zakładach mleczarskich (w 1986 r. zmieniono nazwę na Ecolab). Firma oprócz detergentów oferowała również szeroką pomoc w zakresie badań mikrobiologicznych jak również programów mycia.

W latach 60-tych system CIP zyskał duże uznanie i rozpowszechnił się w przemyśle spożywczym w browarnictwie i przy produkcji napojów owocowych. Pierwsze stacje CIP budowane poza zakładami spożywczymi wprowadzono do sprzedaży w 1958r.



Rys. 1.1. Pierwsze centralne stacje mycia w systemie CIP: a) stacja jednozbiornikowa; b) stacja dwuzbiornikowa

Na rysunku 1.1. przedstawiono pierwsze stacje jednozbiornikowe i wielozbiornikowe dostępne na rynku amerykańskim w latach 50 tych. W ramach modyfikacji i rozwoju konstrukcji, obiegi zamknięte zostały zautomatyzowane i pod koniec lat 70-tych znalazły zastosowanie również w medycynie, farmaceutyce i biotechnologii [Diakun 2003].

Obecnie instalacje do mycia w systemie CIP przeznaczone są do mechanicznego mycia powierzchni wewnętrznych zbiorników, urządzeń technologicznych oraz rurociągów, poprzez przepuszczenie przez nie środka myjącego, dezynfekującego i płuczącego w obiegu zamkniętym, pod ciśnieniem, bez konieczności demontażu mytych elementów. Stosowane są wszędzie tam, gdzie wymagany jest wysoki poziom higieny.

Badania dotyczące oddziaływania czynników mechanicznych na skuteczność mycia w systemie CIP były realizowane w ramach projektu **„Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie”** współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013, oraz są kontynuowane w ramach grantu **N N313 136838: Identyfikacja zagrożeń i badanie warunków zapewnienia skutecznego mycia w systemie CIP krytycznych miejsc instalacji.**

## 2. Proces mycia

Celem mycia jest oderwanie cząsteczek brudu od mytej powierzchni, zachowanie ich w roztworze, którym jest woda myjąca z chemicznymi środkami myjącymi i usunięcie brudu wraz z nośnikiem. Oderwanie cząsteczek brudu ma podstawowe znaczenie w procesie uzyskiwania czystości fizycznej, a co za tym idzie również mikrobiologicznej. [Brycki 2002]

Procesy mycia ręczne czy zautomatyzowane we wszystkich sektorach przemysłu spożywczego kierują się podobnymi zasadami etapowości (wstępne płukanie, mycie, płukanie, dezynfekcja, płukanie końcowe). O złożoności danego programu mycia decydują rodzaj osadu oraz stopień zabrudzenia powierzchni roboczych.

### 2.1. Rodzaje zanieczyszczeń

Zanieczyszczenia to wszelkie substancje pozostające na powierzchniach instalacji i urządzeń technologicznych po procesie produkcyjnym lub po dłuższym przestoju linii technologicznej. Zanieczyszczenia poprodukcyjne mają charakter heterogeniczny i stanowią mieszaninę różnych związków. W zależności od przerabianego surowca oraz od parametrów procesu produkcji jeden z nich może występować w przewodzie (np. białko w przemyśle mleczarskim, tłuszcze w przemyśle tłuszczowym). W przemyśle spożywczym zanieczyszczenia zawierają tłuszcze, białka zarówno zdenaturowane i niezdenaturowane, cukry (często skarmelizowane), minerały (pochodzące zarówno od produktu i od wody używanej w procesie produkcji), komórki mikroorganizmów oraz różne składniki wykorzystywane jako dodatki w procesie produkcji (gumy, stabilizatory, emulgatory). Zanieczyszczenia nigdy nie składają się tylko z jednej frakcji. Większość zanieczyszczeń stanowią kompozyty kilku rodzajów zanieczyszczeń np. kompleksy tłuszczowo-białkowe, kamień mleczny, tłuste osady mineralne. Zanieczyszczenia mogą powodować powstawanie na powierzchniach produkcyjnych biofilmów.

Na podstawie tabeli 2.1. [Schmidt 1997, Bishop 1997] i przeprowadzonych własnych badań rozpoznawczych [Diakun 2005] wynika, że najtrudniej usuwalnym

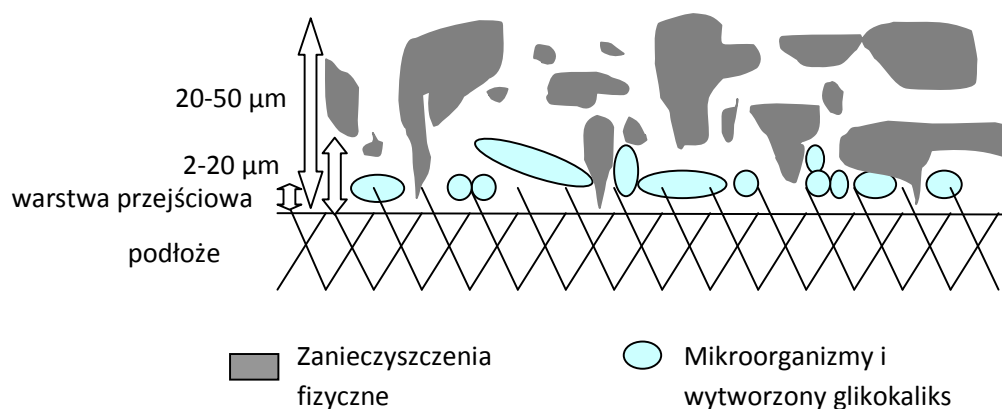
zanieczyszczeniem w przemyśle spożywczym są zanieczyszczenia białkowe, które uległy denaturacji.

*Tabela 2.1. Charakterystyka podstawowych zanieczyszczeń w przemyśle spożywczym [Schmidt 1997, Bishop 1997]*

<b>rodzaj zanieczyszczenia</b>	<b>rozpuszczalne w: (rozpuszczalnik)</b>	<b>trudność w usuwaniu</b>	<b>utrudnienia</b>
<b>cukier</b>	woda	łatwy	karmelizacja
<b>tłuszcz</b>	środki alkaiczne	trudny	polimeryzacja
<b>białko</b>	środki alkaiczne	bardzo trudny	denaturacja
<b>pojedyncze sole</b>	woda, środki kwasowe	łatwy do trudnego	brak
<b>złożone sole</b>	środki kwasowe	trudny	interakcje z innymi substancjami

Dużym zagrożeniem i problem w procesach mycia jest powstawanie biofilmów na powierzchniach produkcyjnych [Berthold 2007]. Tworzenie biofilmów bakteryjnych jest procesem dynamicznym i można w nim wyróżnić cztery etapy. Adhezję komórek planktonicznych do powierzchni (adhezja odwracalna i nieodwracalna), utworzenie mikrokoloni, utworzenie pozakomórkowej struktury zwanej biofilmem oraz odzepianie się fragmentów biofilmu od struktury macierzystej i zanieczyszczanie kolejnych elementów instalacji [Lee 1998]. Wzajemne oddziaływanie sił fizycznych (ciśnienia hydrodynamiczne, ruchy Browna, siły Van der Waalsa, dyfuzja, grawitacja), sił chemicznych (tworzenie wiązań hydrofobowych, wodorowych i jonowych nieswoistych) oraz sił mikrobiologicznych (tworzenie wiązań pod wpływem adhezyn białkowych) powoduje, że osadzone komórki stają się trudne do usunięcia [Królasik 2005, Chmielewski 2003, Czaczyk 2004, Czaczyk 2005]. W etapie drugim komórki dzielą się i namnażają, tworząc mikrokolonie. W wyniku przemian metabolicznych drobnoustrojów powstają biopolimerowe związki tworzące śluzowatą warstwę (glikokaliks), otaczającą rozrastającą się mikrokolonie i stanowią naturalną barierę chroniącą komórki przed działaniem czynników zewnętrznych (środków

myjących, dezynfekujących oraz wysokiej temperatury czynnika myjącego). Utworzona warstwa glikokaliksu łatwo adsorbuje wszelkie zanieczyszczenia organiczne i nieorganiczne, które stanowią źródło pokarmowe dla mikroorganizmów. Tworzy się coraz większa warstwa brudu stabilizująca całą strukturę biofilmu (Rys. 2.1). Drobnoustroje zalegają przy powierzchni na wysokości około 2-20  $\mu\text{m}$  od niej tworząc w sprzyjających warunkach biofilmy. Przylegające do glikokaliks cząsteczki brudu oddalone są od powierzchni średnio o 20-50  $\mu\text{m}$ . Stąd wynika, że cząsteczki brudu wykazują tak zwany efekt przysłaniający. Usunięcie ich umożliwia dotarcie środka dezynfekcyjnego do warstwy drobnoustrojów.



*Rys. 2.1. Struktura biofilmów. Odległość zalegania mikroorganizmów i brudu od powierzchni [opracowanie własne]*

Łatwość kolonizacji drobnoustrojów na powierzchniach produkcyjnych, wynikająca z ich szybkiej adaptacji do nowych warunków, sprzyja powstawaniu tzw. biofilmów bakteryjnych. Są to unieruchomione w biopolimerowym podłożu komórki drobnoustrojów jednego lub więcej gatunków, tworzące złożoną i trudną do usunięcia strukturę. Ich obecność w instalacjach produkcyjnych stwarza ogromny problem dla producentów żywności i przysparza wiele trudności związanych z ich usunięciem. Bakterie, ukryte pod warstwą wytworzonego przez siebie śluzu, zdolne są przetrwać najbardziej niekorzystne warunki. Tworzą warstwę odporną na wysokie temperatury oraz substancje myjąco-dezynfekujące. Daje to im możliwość przetrwania i dalszego, często niekontrolowanego

rozwoju. Dojrzały biofilm łatwo adsorbuje zanieczyszczenia z otaczającego go środowiska produkcyjnego oraz w wyniku odrywania się komórek bakteryjnych od jego macierzystej struktury, wykazuje tendencje do zanieczyszczania dalszych elementów konstrukcji. Błony biologiczne zakłócają również pracę wielu urządzeń technologicznych, m.in. w rurociągach transportujących blokują mechaniczne przepływy, natomiast w wymiennikach płytowych hamują procesy wymiany ciepła. Związki chemiczne (kwasy, związki wodorowe), powstałe w procesach życiowych komórek drobnoustrojów, biodegradują składniki powierzchni metalicznych i polimerowych. Wskutek tego następuje konieczność okresowej konserwacji urządzeń produkcyjnych, a nawet wymiana poszczególnych elementów na nowe [Berthold 2007, Chmielewski 2003, Lee 1998]. Obecność biofilmów wiąże się również ze stratami finansowymi związanymi z usuwaniem skutków ich obecności oraz z poszukiwaniem alternatywnych metod zapobiegających ich narastaniu [Piepiórka 2009a].

## 2.2. Etapy procesu mycia

Najprostszy proces mycia obejmuje trzy etapy: płukanie – mycie – płukanie. Najbardziej złożony realizowany jest w ośmiu etapach (zabiegach) obejmujących:

- usunięcie pozostałości produktu;
- płukanie wstępne;
- mycie zasadnicze;
- płukanie pośrednie I;
- mycie kwasowe (opcjonalnie);
- płukanie pośrednie II;
- dezynfekcja;
- końcowe płukanie.

Mycie rozpoczynamy od **usunięcia pozostałości produktu** z przestrzeni komór roboczych, zbiorników, rur oraz z pozostałych elementów wyposażenia stykających się z produktem. W procesach czyszczenia ręcznego zabieg ten polega na mechanicznym usunięciu pozostałości produktu z powierzchni przez zeszkobanie, zmiecenie, splukanie, itp. Instalacje, które mają być myte w systemie CIP muszą być tak zaprojektowane, aby

usuwanie pozostałości odbywało się przez np. grawitacyjne opróżnianie zbiorników, usuwanie produktów z instalacji za pomocą sprężonego powietrza, wody. Często ten etap procesu mycia łączony jest z etapem wstępnego płukania przy takim ustawieniu zaworów, że brudna ciecz płuczająca usuwana jest z układu myjącego. Jest to realizowane za pomocą automatycznych zaworów sprzężonych z mętnościomierzem lub konduktometrem. Gdy pomiar przewodności lub mętności przekroczy wartości dopuszczalne dla cieczy krążącej w obiegu zamkniętym to zawory automatycznie przekierowują ciecz do ścieków. Odpowiednie przeprowadzenie etapu usuwania pozostałości produkcyjnych pozwala na odzyskanie części produktu i zmniejszenie stopnia zanieczyszczenia ścieków.

Kolejnym etapem jest wstępne **płukanie**, które ma na celu usunięcie luźno związanych z powierzchniami instalacji pozostałości poprodukcyjnych oraz zwilżenie osadów, aby w dalszych etapach ułatwić ich usuwanie. Zapewnia to lepszy dostęp detergentów do mytej powierzchni i ogranicza ilość zanieczyszczeń, które będą miały kontakt ze środkami myjącymi, a tym samym zmniejsza koszty oczyszczania detergentów. Do wstępnego płukania często wykorzystuje się popłuczyny z poprzedniego procesu mycia, zawierające niewielkie ilości detergentu. Aby zmniejszyć zużycie wody i poprawić efektywność wstępnego wypłukiwania stosuje się często pulsacyjny przepływ wody.

**Mycie zasadnicze** to proces usuwania zanieczyszczeń mocno związanych z powierzchniami przy użyciu wody i odpowiedniego do rodzaju zanieczyszczeń środka myjącego. W trakcie mycia wodny roztwór środka myjącego wnika pomiędzy cząstki zabrudzeń, powodując ich rozdzielanie i oddzielenie od powierzchni, emulgowanie i dyspergowanie, a następnie przechodzenie z powierzchni, na której były osadzone, do cieczy. W wyniku mycia usuwa się wszystkie osady i znaczną część mikroorganizmów. Mycie zasadnicze odbywa się najczęściej przy użyciu detergentów zasadowych. Spośród komponentów alkalicznych wykorzystywanych w obiegowym systemie mycia najczęściej spotyka się wodorotlenek sodu i potasu. Związki te doskonale usuwają substancje organiczne, peptonizując białka i zmydlając tłuszcze. Mimo, że przy stosowanych stężeniach stwarzają zagrożenie korozji dla mytych powierzchni, zwłaszcza dla aluminium, żeliwa i cynku oraz niebezpieczeństwo dla obsługi, są one podstawowymi środkami



chemicznymi w procesach mycia. Najczęściej do mycia wykorzystywany jest wodorotlenek sodu (NaOH), nazywany potocznie ługiem sodowym. Wykazuje on doskonałe zdolności rozpuszczania substancji organicznych, dobre właściwości zmydlające, dzięki którym przekształca tłuszcze w substancje rozpuszczalne w wodzie. Pozytywną cechą ługu sodowego, z punktu widzenia ekonomicznego, jest niska cena, a z punktu ekologicznego, jest możliwość jego regeneracji [Gesau-Guiziu 2002, Schmidt 1997]. Podobne właściwości myjące wykazuje wodorotlenek potasu (KOH). Jest on rzadziej stosowany ze względu na wysoką cenę, zwykle w programach mycia okresowego. Do alkalicznych substancji aktywnych zalicza się również fosforany (fosforan trójsodowy, heksometę fosforan sodowy). Stanowią one skuteczne środki emulgujące i dyspergujące. Zmiękczejają również wodę oraz zapobiegają wytrącaniu się soli wapnia i magnezu. [Ziajka 1997, Kądzelski 1996] Są jednak stosowane wyłącznie jako substancje dodatkowe.

**Płukanie pośrednie I** jest kolejnym etapem mycia, którego zadaniem jest usunięcie pozostałości detergentu z układu. Do płukania pośredniego używa się zimnej wody pitnej, chociaż w niektórych przypadkach zalecane jest używanie ciepłej wody. Ma to miejsce wtedy, gdy kolejny etap realizowany jest na gorąco i nieekonomiczne jest ochładzanie układu. Woda z płukania pośredniego często wykorzystywana jest do przygotowania roztworu do mycia zasadniczego oraz do płukania wstępnego następnego cyklu mycia.

Kolejnym etapem stosowanym opcjonalnie jest **mycie kwasowe**. Związki kwaśne wykazują dobre właściwości myjące i bakteriobójcze. Stosowane są wszędzie tam, gdzie tworzy się kamień osadowy (mleczny, piwny, kotłowy), gdyż w doskonały sposób go rozpuszczają i usuwają z mytych powierzchni. Nie wymagają podgrzewania (skutecznie działają w temperaturze 20 – 35<sup>0</sup>C) i mogą być stosowane w obecności CO<sub>2</sub>. Ich wadą jest silne działanie korodujące, które minimalizuje się poprzez dodatek związków powierzchniowo czynnych i antykorozyjnych. W systemie CIP znalazły zastosowanie kwasy: azotowy i fosforowy, wykazujące zróżnicowany charakter działania. Kwas azotowy w doskonały sposób rozpuszcza osady mineralne (kamień mleczny, piwny, kotłowy) natomiast kwas fosforowy lepiej działa na zabrudzenia pochodzenia białkowego i tłuszczowego. Najczęściej jednak środki myjące są wzajemnie mieszane, a ich proporcje zależą od złożoności usuwanego osadu. [Schmidt 1997, Kądzelski 1996, Forder 2005].

Mycie środkami kwaśnymi jest powszechnie stosowane, gdy nie stosujemy złożonych detergentów i gdy zanieczyszczeń jest dużo np. w wymiennikach ciepła. Zastosowanie detergentów kilkuskładnikowych, o różnym oddziaływaniu na składniki zanieczyszczeń, pozwala na rezygnację z mycia kwasowego.

Po myciu kwasowym stosujemy **plukanie pośrednie II** zimną wodą spełniającą wymogi wody pitnej. Jakość wody ma bardzo duże znaczenie, jeśli w kolejnym etapie nie stosujemy dezynfekcji. Woda przeznaczona do płukania nie może wtórnie zanieczyszczać umytych powierzchni.

**Dezynfekcja** jest też zwana odkażaniem. Polega na niszczeniu wegetatywnych form drobnoustrojów, w celu zapobieżenia zakażeniu. Sposób dezynfekcji zależy od różnych czynników, np.: rodzaju drobnoustrojów, środka dezynfekcyjnego oraz środowiska. Do dezynfekcji można stosować metody fizyczne i chemiczne. Dezynfekcja w procesie mycia instalacji metodą CIP, najczęściej odbywa się na zimno, z zastosowaniem środków utleniających. Dezynfekcja gorącą parą wodną stosowana jest rzadziej ponieważ wymaga dużego nakładu energetycznego. Najbardziej popularne środki dezynfekcyjne zawierają w swoim składzie aktywny tlen (kwas nadoctowy, nadtlenek wodoru) lub aktywny chlor (podchloryn sodu). Natomiast do innowacji należy kwas salicylowy, który do tej pory używany był do konserwacji żywności.

Ostatnim etapem w procesie jest **plukanie końcowe**. Musi być przeprowadzone bardzo starannie, ponieważ po tym zabiegu powierzchnie bezpośrednio stykają się z produktem spożywczym i niedokładne ich wypłukanie może stanowić zagrożenia dla bezpieczeństwa żywności.

### 2.3. Poziomy czystości i metody ich oceny

W procesach mycia wyróżnia się trzy rodzaje czystości: fizyczną, chemiczną i mikrobiologiczną.

Czystość fizyczna oznacza powierzchnię oczyszczoną z substancji fizycznych, np.: osadów z sedymentacji zawiesin, osadów powstających z wody lub pozostałość mleka, brzezki, soków, osadów powstających w wyniku przechodzenia związków

rozpuszczalnych w nierozpuszczalne np. kamień mleczny itp. Po nieskutecznym procesie mycia objawia się w postaci plam osadów, zmatowienia powierzchni ze stali kwasoodpornej, przyklejonych do powierzchni resztek żywności. Czystość fizyczna oceniana jest najczęściej wizualnie. Ocena sensoryczna (dotyk, wzrok), daje pierwsze informacje o stanie higieny i pozwala bardzo szybko ocenić efekt procesu mycia. W celu zwiększenia dokładności tej metody stosuje się narzędzia pomocnicze np. szkło powiększające i oświetlenie. Do oceny zanieczyszczeń fizycznych opracowano również bardziej zaawansowane testy pomocnicze, polegające m.in. na obserwacji zwilżalności powierzchni po naniesieniu na nią kropli odpowiedniej cieczy. Na przykład olejek kamforowy stosuje się na wykrycie tłustej powierzchni, płyn Lugola na wykrycie powierzchni zabrudzonej skrobią. Wykorzystuje się również substancje fluorescencyjne, które wiążąc się ze składnikami osadu, wskazują miejsca, z których nie został on wymyty. Ocena wizualna jest jednak dość ograniczona ze względu na dostępność powierzchni urządzeń mytych w obiegu zamkniętym np. długie rurociągi, wysokie zbiorniki. Jeśli podczas badania zauważymy ślady niedomycia to bez wątpienia system CIP nie spełnił naszych oczekiwań. W celu dokładniejszej oceny czystości fizycznej stosuje się szybkie testy do określenia jakościowego stanu higieny, nazywanych indykatorami barwy. Sterylną wymazówką z powierzchni pobiera się materiał, który w połączeniu z ninhydrylowym odczynnikiem zmienia barwę na purpurową. Działanie szybkich testów polega na tworzeniu kompleksu pomiędzy dwoma łańcuchami peptydowymi z jonami  $\text{Cu}^+$ . Jeśli tampon zebrał z powierzchni białko i (lub) cukry, następuje reakcja miedzi z peptydami, wiążąc białko i (lub) cukry oraz formując kompleks białko-miedź.

Do ilościowej oceny czystości fizycznej można zastosować metodykę opisaną w normie PN –EN 50242-2004 opracowaną dla zmywarek gastronomicznych. Jest to metoda polegająca na pomiarze ilości i wielkości zanieczyszczeń oraz podawaniu wyniku w skali punktowej (Tab. 2.2). Powierzchnia czysta fizycznie odpowiada ilości punktów pięć, natomiast powierzchnia najbardziej zanieczyszczona to zero punktów. Metodę tę można zastosować tylko wtedy gdy zanieczyszczenia są wyraźnie widoczne.

Czystość chemiczna oznacza powierzchnię wolną od substancji chemicznych stosowanych w procesie mycia i dezynfekcji. Czystość chemiczną jest stosunkowo łatwo

zidentyfikować badając czynnik myjący lub wodę z zabiegu płukania. Do oceny czystości chemicznej stosuje się przede wszystkim urządzenia do pomiaru przewodności, pH oraz szybkie testy paskowe określające obecność składników środków myjących i dezynfekujących. Na przykład do oceny skuteczności wypłukania NaOH stosuje się fenoloftaleinę jako barwny wskaźnik. Gdy powierzchnia jest zanieczyszczona środkiem chemicznym to wskaźnik zabarwia się na silny kolor różowy, łatwo zauważalny.

Tab. 2.2. Ocena badań efektywności zmywania [PN –EN 50242-2004]

RESZTKI ZABRUDZENIA	ILOŚĆ	OCENA
Brak	0	5
Liczba małych punktowych oczek zabrudzenia: oraz obszar całkowicie zabrudzony:	1 do 4 $\leq 4\text{mm}^2$	4
Liczba małych punktowych oczek zabrudzenia: oraz obszar całkowicie zabrudzony:	5 do 10 $\leq 4\text{mm}^2$	3
Liczba małych punktowych oczek zabrudzenia: lub obszar całkowicie zabrudzony:	$>10$ $> 4\text{mm}^2$ do $\leq 50\text{mm}^2$	2
obszar całkowicie zabrudzony:	$> 50\text{mm}^2$ do $\leq 200\text{mm}^2$	1
obszar całkowicie zabrudzony:	$> 200\text{mm}^2$	0

Czystość mikrobiologiczna związana jest z obecnością bakterii, wirusów, grzybów i pleśni na powierzchni. Czystość mikrobiologiczna określa, czy liczba drobnoustrojów została zredukowana do akceptowalnego, założonego poziomu. Do oceny powierzchni pod względem mikrobiologicznym używa się testów wymazowych. Próbkę wymazów z powierzchni, popłuczyn lub produktu są wysiewane na specjalnie przygotowanych podłożach mikrobiologicznych. Wybór podłoża i warunków wylęgania zależy od tego jaki rodzaj mikroorganizmów chcemy zidentyfikować. Po wymaganym okresie inkubacji, zwykle od 24 h do 72 h, odczytuje się wynik, zliczając kolonie na płytkach lub obserwując wzrost w pożywkach płynnych objawiający się zmętnieniem lub zmianą zabarwienia cieczy. Metoda ta jest czasochłonna i nie nadaje się do szybkiej oceny poziomu czystości.

W ostatnim okresie obserwuje się dążenie do stosowania w badaniach mikrobiologicznych szybkich testów.

Obecnie popularnym i tanim sposobem, powszechnie stosowanym głównie w przemyśle mleczarskim, stały się luminometry. Ich działanie oparte jest na zjawisku luminescencji. Do pobrania próby wykorzystywany jest sterylny wacik zawierający enzym lucyferazy. Cukier, spożywany przez organizmy żywe, jest rozkładany przez enzymy wyzwalające energię, która magazynowana jest w postaci cząsteczki adenozyotrójfosforanu (ATP). ATP zawarte jest we wszystkich żywych komórkach. Za pomocą tej metody można wykrywać pozostałości żywności oraz mikroorganizmy bytujące na powierzchni. Oszacowanie higieny jest bardzo proste i trwa około jednej minuty od czasu pobrania próbki metodą tamponową, (dla porównania analiza w popłuczynach trwa około 1 godziny). Krótki czas oczekiwania na wynik analizy jest bardzo ważny, gdyż można sprawnie zareagować na błędy systemu CIP.

## **2.4. Czynniki oddziałujące w procesie mycia**

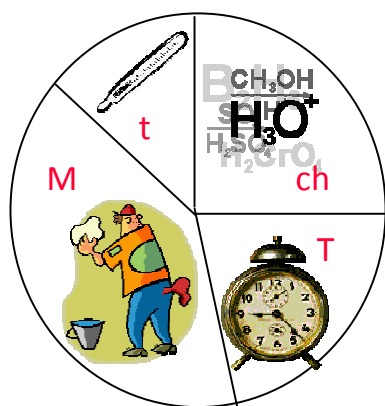
W procesie mycia wyróżnia się oddziaływanie czterech grup czynników, są to czynniki mechaniczne, czynniki chemiczne, czas i temperatura. Zachowanie odpowiednich proporcji pomiędzy tymi czynnikami pozwala na uzyskanie stałej, wymaganej skuteczności mycia. W rozdziale tym opisane zostały podstawowe czynniki oddziałujące na skuteczność mycia, obieg Sinnera oraz woda jako medium myjące.

### **2.4.1. Obieg Sinnera**

Wynik procesu mycia jest efektem oddziaływania czterech grup czynników:

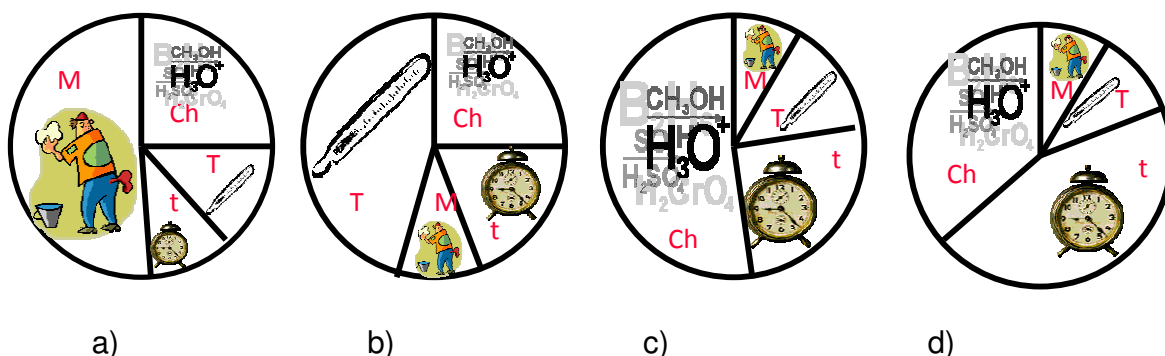
- oddziaływanie mechaniczne (M);
- środki chemiczne (Ch);
- temperatura (T);
- czas (t).

Oddziaływanie tych czynników przedstawia się obrazowo za pomocą Obiegu Sinnera (Rys. 2.2.) [Tamine 2008].



Rys. 2.2. Obieg Sinnera

Zakłada się, że czynniki w kole Sinnera przy określonych wartościach parametrów gwarantują pełną, stuprocentową skuteczność mycia. Zmiana jednego z nich, np. stężenia środków chemicznych pociąga za sobą zmianę jednego lub wszystkich pozostałych tak, aby osiągnąć założoną skuteczność [Andrzejewski 2001, Zakrzewski 1993].



Rys. 2.3. Koła Sinnera dla różnych rodzajów mycia: a) mycie mechaniczne, b) mycie na gorąco, c) mycie chemiczne, d) mycie długie (czasowe)

Na rysunku a) widać wyraźnie, że w tym rodzaju mycia największe znaczenie ma oddziaływanie mechaniczne przykładowo ciśnienie i prędkość przepływu. Oddziaływanie temperatury i czasu jest tu ograniczone. Czynniki mechaniczne mają największe znaczenie podczas mycia ręcznego, ciśnieniowego i w myciu przepływowym. Na rysunku b) oddziaływanie mechaniczne zostało wyraźnie zmniejszone na rzecz temperatury, która ma podstawowe znaczenie w tym procesie. Proces mycia z wykorzystaniem wysokiej

temperatury stosowany jest na przykład wtedy, gdy mycie łączymy razem z dezynfekcją termiczną. Rysunek c) przedstawia mycie przy największym udziale czynników chemicznych np. CIP, zmywarki gastronomiczne. Rysunek d) przedstawia wpływ oddziaływania czynników podczas mycia, które trwa długo. Wydłużony czas kontaktu detergentu z mytą powierzchnią pozwala na obniżenie wpływu pozostałych czynników. Przykładem takiego rodzaju mycia jest mycie przez zanurzenie mytych elementów w roztworze myjącym. Mycie z wydłużonym czasem kontaktu to również mycie pianowe i żelowe.

Obecnie ze względu na ochronę środowiska dąży się do zmniejszonego oddziaływanie środków chemicznych i temperatury na rzecz oddziaływania czynników mechanicznych. Dąży się również do zminimalizowania czasu trwania procesu, ze względu na wysoki koszt roboczogodziny. Wiedza z zakresu procesów mycia opiera się przede wszystkim na doświadczeniu operatorów i dystrybutorów preparatów myjących i urządzeń przeznaczonych do mycia. Wiedza praktyczna znacznie wyprzedza teorię z tego zakresu. Brak jest rzeczowej i ścisłej ilościowej informacji na temat oddziaływania czynników w procesie mycia. Projektanci i użytkownicy systemów mycia nie dysponując tabelami, wykresami i wzorami obliczeniowymi, skazani są na bezwarunkowe zaufanie dostawcom środków chemicznych do zakładu. Powoduje to, że każda zmiana w procesie mycia musi być konsultowana z ich dostawcą, co pociąga za sobą dodatkowe koszty.

#### **2.4.2. Woda jako podstawowe medium myjące**

Podstawowym medium, przy pomocy którego prowadzi się proces mycia jest woda. Przenosi ona środki myjące i ciepło oraz oddziałuje mechanicznie na myte powierzchnie. Odprowadzanie zanieczyszczeń jest drugą istotną rolą wody, gdyż są one miejscem bytowania mikroorganizmów. Przy współudziale środków myjących, ciepła i wirującej wody, osady ulegają zawieszeniu lub rozpuszczeniu i łatwo je wówczas usunąć. Woda ma jednak ograniczone możliwości usuwania brudu (białka, tłuszcze i niektóre sole są nierozpuszczalne lub bardzo słabo rozpuszczalne w wodzie). Głównym efektem wypłukiwania wodą jest mechaniczne usunięcie największych cząstek brudu, które nie są silnie przyłączone do powierzchni. Płukanie mogłoby być wykonywane wodą

o temperaturze pokojowej, niemniej jednak optymalna temperatura mycia wynosi od 45<sup>0</sup>C do 60<sup>0</sup>C. Woda o temperaturze poniżej 45<sup>0</sup>C nie rozpuszcza tłuszczów, natomiast temperatura powyżej 60<sup>0</sup>C powoduje denaturację białek, co znacznie utrudnia ich usunięcie, gdyż przywierają do powierzchni. Ponadto warstwa zdenaturowanych białek mogłaby ściśle otaczać drobnoustroje, do których środek dezynfekcyjny nie mógłby dotrzeć.

Pomimo odgrywania korzystnej roli w procesie mycia, woda może zawierać różne zanieczyszczenia, które mogą osłabiać skuteczność mycia. Składniki wody, które zaliczymy do zanieczyszczeń to wapń, magnez i inne jony tworzące tzw. twardą wodę. Wymagania dla wody do mycia pod względem mikrobiologicznym są takie same jak dla wody pitnej, co oznacza nieobecność bakterii chorobotwórczych i coli, przy ogólnej liczbie bakterii poniżej 100 j.t.k. w 1 ml [Zakrzewski E., 1993, Rozporządzenie].

Skład chemiczny wody używanej do sanitzacji powinien również odpowiadać wymaganiom dla wody pitnej (Tab. 2.3.), z tym, że należy kłaść większy nacisk na obniżenie jej twardości.

*Tab. 2.3. Wymagania dotyczące składu chemicznego wody stosowanej do mycia w przemyśle spożywczym [Zakrzewski 1993]*

Twardość ogólna	< 50 ppm (wyrażona jako CaCO <sub>3</sub> )
Chlorki (jako NaCl)	< 50 ppm
Chlor jonowy	< 1 ppm
pH	6,5 – 7,5
Żelazo (jako Fe)	< 1 ppm
Mangan (jako Mn)	< 0,5 ppm
Zawiesiny	brak

Twardość wody jest bardzo ważnym czynnikiem i musi być znana, zanim zostaną opracowane szczegółowe wytyczne dotyczące stosowania detergentów [Zakrzewski 1993]. Wodę ze względu na jej twardość dzielimy na: miękką, umiarkowanie twardą, twardą, bardzo twardą (Tab. 2.4.).



Tab. 2.4. Klasyfikacja twardości wody

<b>Twardość</b>	<b>Zawartość jonów Ca/Mg wyrażona jako ppm CaCO<sub>3</sub></b>	<b>Twardość w stopniach niemieckich</b>
Miękka	0 – 60	0 – 3,4
Umiarkowanie twarda	60 – 120	3,4 – 6,7
Twarda	120 – 180	6,7 – 10,0
Bardzo twarda	> 180	> 10

Stosowanie twardej wody do procesu mycia zmniejsza jego skuteczność, a na powierzchniach mytych urządzeń powoduje powstawanie twardego osadu. W celu obniżenia twardości wody stosuje się dodatki zapobiegające precypitacji jonów wapnia i magnezu. Substancje te to najczęściej pirofosforan czterosodowy, który jest dość tani i stabilny w gorących i alkalicznych roztworach, a także trój – i cztero – polifosforany sodu. Powstawaniu zwartych osadów mogą zapobiegać związki chelatujące takie jak kwas etylenodiaminotetraoctowy (EDTA) i jego sole sodowe lub potasowe.

### 2.4.3. Czynniki mechaniczne

Środki techniczne lub mechaniczne aspekty mycia, wpływają zasadniczo na skuteczność tego procesu. Dotyczy to takich parametrów jak: ciśnienie, uderzenie strumienia, wielkość i charakter przepływu środków myjących. Wielu badaczy wykazuje, że jest to czynnik decydujący o efekcie końcowym mycia w postaci mechanicznych oddziaływań cieczy na ścianki mytych elementów oraz lokalnych naprężeń ścinających (Blel 2007, Grasshoff 1992, Lelievre, 2002, Lelievre 2003). Inne będą kryteria mechanicznej efektywności dla mycia zamkniętego, inne dla otwartego. Dla zamkniętego, podstawowe kryterium to stworzenie warunków dla osiągnięcia przepływu burzliwego. Gwarantuje to mechaniczny efekt mycia, sprzyja odrywaniu się cząsteczek osadu od mytych powierzchni, ich rozproszeniu w całej objętości płynu oraz przetransportowaniu i usunięciu. Natężenie przepływu czynników myjących musi być większe niż natężenie

przepływu produktu podczas normalnej pracy linii [Lewicki 2005, Seiberling 2010, Ziajka 1997]. Przy myciu w systemie otwartym osiągnięcie dobrego wyniku zależy od działania głowic natryskowych, ich możliwości samooczyszczania, od równomierności oraz intensywności pokrywania środkiem myjącym powierzchni zabrudzonych.

#### **2.4.4. Czynniki chemiczne**

Środek myjący stanowi mieszaninę związków chemicznych o różnym działaniu, a skład chemiczny poszczególnych środków również znacznie się różni. Często rodzaj wody decyduje o tym jakiego środka i w jakiej ilości należy użyć. W tabeli 2.5 podano więcej informacji o związkach chemicznych zawartych w środkach myjących.

Zadaniem środków myjących jest uczestniczenie w usuwaniu zabrudzeń, które przyłgnęły do powierzchni produkcyjnych. Jednak w wielu przypadkach biorą one udział również w niszczeniu drobnoustrojów, ograniczając ich liczbę do akceptowalnego poziomu. Wybór optymalnego stężenia środków chemicznych zależy od szybkiej i całkowitej rozpuszczalności detergentów w wodzie, od szybkiego zwilżania i rozpuszczania głównych składników zanieczyszczeń, od możliwości ich oddzielenia, od braku pienienia, od biodegradowalności całkowitej lub z minimalnym zrzutem ścieków. Nie wszystkie z wymienionych wymagań mogą być spełnione przez jeden środek myjący, w związku z czym zaleca się zmienianie, co pewien czas, stosowanego środka. I tak np. przez pewien czas stosuje się detergent zasadowy, a następnie wymienia go na kwaśny.

Ze względu na duże zróżnicowanie zanieczyszczeń obowiązuje reguła, w której składniki zanieczyszczeń stanowią o doborze składu chemicznego roztworów myjących. Ich optymalna skuteczność w procesie mycia zależy od stosowanych substancji powierzchniowo czynnych (o zdolnościach zwilżających i emulgujących), środków kondycjonujących wodę (krzemiany, polifosforany), a także utrzymujących zanieczyszczenia w roztworze (polimeryzacja). W przypadku zanieczyszczeń organicznych najczęściej stosowany jest ług sodowy jako środek myjący i dezynfekujący. Jego stężenie waha się do 1÷3% (przy dużych zanieczyszczeniach 5%). Stosowanie większych stężeń jest nieekonomiczne i musi być dostosowane od regulacji prawnych

dotyczących ochrony środowiska. Jego efektywność zależy od temperatury, czasu działania oraz stężenia roboczego.

Tab. 2.5. Związki chemiczne zawarte w środkach myjących

Rodzaj	Działanie
Zasadowy	Rozbija i rozpuszcza kuleczki tłuszczu, które są łatwo wypłukiwane. Zmiękcza białka.
Nawilżający	Zmniejsza napięcie powierzchniowe między tłuszczem, a powierzchnią sprzętu.
Zmiękczący wodę	Tworzy rozpuszczalne kompleksy z jonami metali (wapnia, magnezu, żelaza) oraz zabezpiecza przed tworzeniem się osadu na powierzchni sprzętu.
Dezynfekujący	Zabija mikroorganizmy.
Kwaśny	Usuwa złoże kamienia z powierzchni sprzętu.

Dokładne stężenia środków chemicznych potrzebnych do osiągnięcia zamierzonych celów są podawane przez producentów. Producenci na podstawie badań określają odpowiednie parametry procesu mycia w zależności od rodzaju zabrudzenia i preferencji zakładu.

#### 2.4.5. Temperatura

Wybór wartości temperatury dla procesu mycia zależy od: możliwości stosowanych źródeł ciepła, od składu chemicznego detergentów, od siły przylegania i trudności usuwania zanieczyszczeń. Im wyższa temperatura, tym szybsze reakcje chemiczne, niższa lepkość, wzmożona turbulencja i przyspieszony proces mycia. Temperatura musi być dostosowana do rodzaju zanieczyszczeń. Np. dla zanieczyszczeń tłuszczowych minimalna temperatura procesu to temperatura topnienia tłuszczu i w tym przypadku im wyższa temperatura tym lepiej. Natomiast dla zanieczyszczeń białkowych temperatura

procesu nie powinna przekraczać 60°C ponieważ następuje denaturacja białek i powstawanie trudno usuwalnych zanieczyszczeń [Tamime 2008, Lelieveld 2003].

Ograniczeniem w stosowaniu wysokiej temperatury jest mycie ręczne i tu temperatura nie przekracza 40-50°C. W systemie CIP temperatury te mogą osiągać 85- 90°C nawet do 100 -105°C np. przy myciu urządzeń do pakowania mleka UHT. Mycie kwaśne odbywa się z reguły w temperaturach 60-70°C chyba, że stosujemy do mycia enzymy to temperatura nie powinna przekraczać 55°C.

#### **2.4.6. Czas**

Procesy rozpuszczania związków chemicznych wszystkich rodzajów zanieczyszczeń zależą od czasu ich trwania. Dlatego czas kontaktu powinien uwzględniać czas reakcji detergentów z zanieczyszczeniami, przy właściwym ich stężeniu i temperaturze. Zbyt krótki powoduje niedostateczne wyczyszczenie powierzchni, natomiast zbyt długi, powoduje niepotrzebne opóźnienia w produkcji i wpływa na zmniejszenie wydajności. Przyjmuje się, że najlepsze rezultaty osiąga się (w zależności od stopnia zabrudzenia) myjąc w czasie od 5 minut do 1 godziny. Wysoki poziom zanieczyszczenia powierzchni wydłuża czas trwania procesu mycia. Usuwanie większości zanieczyszczeń przebiega dwuetapowo. Główna część zanieczyszczeń lekko związanych z mytą powierzchnią jest usuwana stosunkowo szybko, natomiast dalsze usuwanie cząstek z powierzchni jest bardzo trudne i powolne. W miarę upływu czasu, od momentu zabrudzenia do mycia, coraz większa część osadu staje się trudno usuwalna. Aby zapewnić skuteczne mycie, płyn powinien wykonać co najmniej 150 obiegów, w tym podczas pierwszych 120 wymywane są osady najmniej związane z powierzchnią, a w kolejnych 30 pozostałe [Piepiórka 2007].

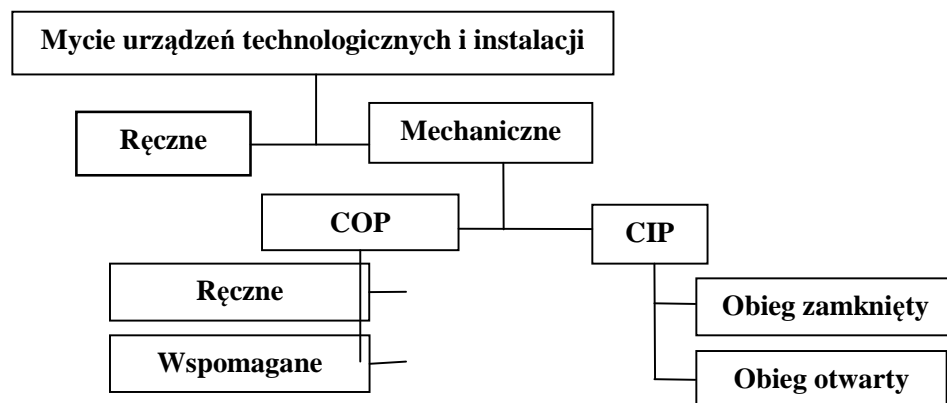
### 3. Mycie w systemie Clean In Place (CIP)

W zachowaniu odpowiedniego poziomu higieny, poza doбором preparatów myjących i dezynfekujących, ważną rolę odgrywa także technika mycia. Jej dobór zależy głównie od elementów poddawanych myciu. W zakładach produkujących żywność można wyróżnić następujące obiekty, poddawane myciu:

- duże powierzchnie (ściany, posadzki, blaty, zewnętrzne części maszyn i urządzeń);
- naczynia produkcyjne (wanny, zbiorniki, tanki, cysterny), pojemniki, drobny sprzęt;
- urządzenia i instalacje technologiczne (rozlewnie mleka, piwa, instalacje przesyłowe).

Dobór techniki mycia dokonywany jest w zależności od wielkości i charakterystycznych cech mytego obiektu, od dostępności powierzchni, które mają być umyte, od rodzaju osadu oraz od tego, jaki chcemy uzyskać stopień czystości.

Próby zebrania i klasyfikacji zakresu działań oraz obiektów dotyczących mycia w przemyśle spożywczym podjął się prof. J. Diakun [Diakun 2011]. Zestawił i scharakteryzował materiały, przedmioty i obiekty techniczne poddawane myciu. Podjął się próby uporządkowania metod i technik mycia w zależności od różnych aspektów. Poniższy rysunek (Rys. 3.1.) przedstawia podział technik mycia urządzeń technologicznych i instalacji [Diakun 2011].



Rys. 3.1. Podział technik mycia urządzeń produkcyjnych w przemyśle spożywczym ze względu na sposób ich realizacji [Diakun 2011]

Obecnie najpopularniejszym, rozwijającym się i zalecanym systemem mycia jest system Cleaning In Place (CIP), czyli mycie w obiegu zamkniętym.

### 3.1. Definicja CIP

Automatycznie sterowane mycie i dezynfekcja urządzeń w obiegu zamkniętym, znane powszechnie jako system CIP (Cleaning In Place), krajowy odpowiednik nazwy to CSM (Centralna Stacja Mycia), jest nowoczesnym systemem stosowanym w zakładach przemysłu spożywczego .

W 1990 Stowarzyszenie Technologów Mleczarstwa przyjęło definicję systemu CIP jako:

*„Czyszczenie kompletnych elementów instalacji lub rurociągów transportujących bez demontowania lub otwierania urządzeń i aparatury i z małym lub żadnym ręcznym zaangażowaniem ze strony operatora. Proces obejmuje przepływ strumienia lub opryskiwanie powierzchni oraz cyrkulację mediów myjących przez urządzenia przy zachowaniu warunków wzmożonej turbulencji i prędkości przepływu.”*

Definicja została zaczerpnięta z kodu bezpieczeństwa chemicznego z Narodowego Stowarzyszenia Mleczarzy (NDA - National Dairyman Association), i po raz pierwszy została opublikowana w 1985. Chociaż NDA zostało rozwiązane ich definicja dotycząca CIP nadal jest stosowana [Tamine 2008].

Ogólnie system mycia w obiegu zamkniętym w stosunku do mycia COP zmniejsza o 25-30% zużycie wody, pary wodnej o 12-15%, środków chemicznych o 10-12%, a także w bardzo dużym stopniu ogranicza czasochłonność procesu (15-20%) oraz udział pracy ręcznej [Jarczyk 2001].

Higienizacja urządzeń z zastosowaniem stacji mycia CIP odbywa się poprzez przepływ przez myte rurociągi i urządzenia środka myjącego, dezynfekującego i płuczącego w obiegu zamkniętym, pod ciśnieniem i bez konieczności demontażu mytych elementów. System ten przeznaczony jest do mycia powierzchni wewnętrznych zbiorników, urządzeń technologicznych oraz rurociągów. Jego skuteczność uzależniona jest od rozwiązań konstrukcyjnych instalacji, przystosowania zakładu produkcyjnego do mycia w tym systemie,

rodzaju wytworzonych osadów podczas produkcji oraz procesu mycia [Diakun 2003, Piepiórka 2007]. W zależności od stopnia zabrudzenia instalacji mycie w systemie CIP może być prowadzone w obiegu zamkniętym z wielokrotnym wykorzystaniem mediów myjących lub w obiegu otwartym z jednokrotnym użyciem środków myjących. System mycia w obiegu otwartym stosowany jest w przypadku bardzo zabrudzonych powierzchni oraz linii produkcyjnych tak zorganizowanych, że niemożliwe jest zbieranie cieczy myjącej i powtórne jej skierowanie do obiegu. W systemie tym roztwory myjące użyte są tylko raz i po zakończonym procesie mycia zostają odprowadzone do ścieków.

### **3.2. Budowa stacji CIP**

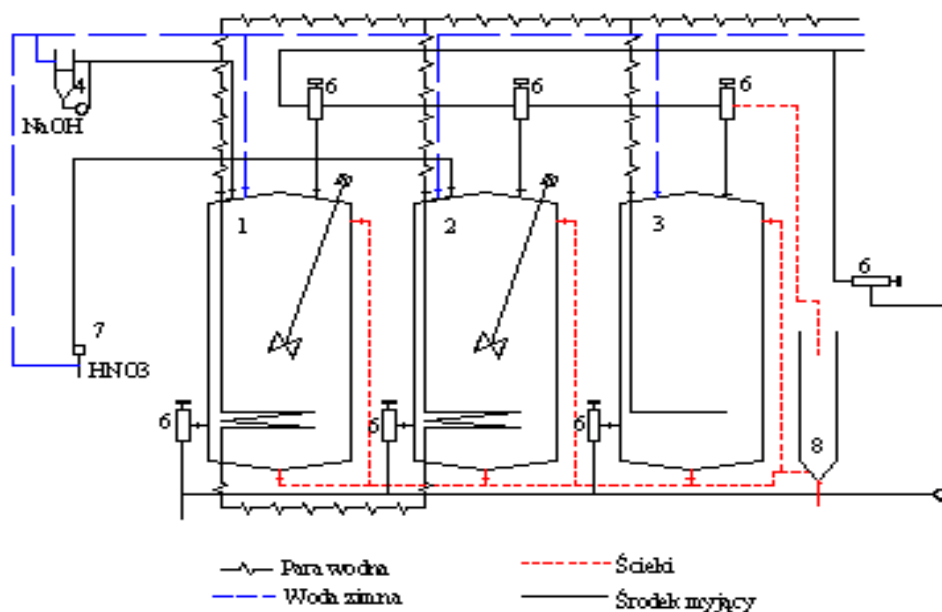
Składowymi stacji systemu CIP są:

- instalacja składająca się ze: zbiorników wyposażonych w sensory poziomu cieczy, czujniki temperatury, zawory i pompy oraz układy grzejne;
- układ sterowania (szafa sterownicza, przetworniki sygnału czujników temperatury, prędkości przepływu, ciśnienia, przewodnictwa, mętności oraz sterowniki wykonawcze);
- rurociągi doprowadzające i odprowadzające środki myjące.

Podstawą stacji jest instalacja mycia składająca się ze zbiorników, w których są przygotowywane i magazynowane roztwory myjące i dezynfekujące (Rys. 3.2.). Naczynia CIP wyposażone są w zawory umożliwiające dopływ wody do zbiorników oraz czujniki ciągłego pomiaru poziomu cieczy, czujniki pomiarowe stężenia środków myjących i czujniki przepływu.

Sterowanie stacjami mycia i dozowanie środków chemicznych odbywa się w sposób automatyczny i wymaga tylko ogólnego nadzoru. Programy mycia zadawane są na tzw. „tablicach sterujących” i nie wymagają czujnej obserwacji operatora. W momencie wystąpienia zakłóceń procesu (np. nie otworzenie się danego zaworu), program automatyczny jest wstrzymywany i możliwe jest przejście na sterownię półautomatyczne lub ręczne, w zależności od ilości operacji w danym programie mycia, które zostały już wykonane. Obecnie, coraz częściej stosuje się systemy sterowania

oparte na nowoczesnych sterownikach, umożliwiającym nie tylko kontrolę procesu ale również wizualizację całego cyklu pracy stacji.



Rys. 3.2. Schemat centralnej stacji mycia na przykładzie instalacji trzy-zbiornikowej: 1- zbiornik na środek zasadowy, 2- zbiornik na środek kwasowy, 3- zbiornik wody, 4- zespół do roztwarzania ługu, 5- pompa środków myjących, 6- zawory automatyczne, 7- pompa do kwasu, 8- lej ściekowy.

Nowoczesne programy kontrolują parametry używanego medium oraz automatycznie reagują na wszelkie ich zmiany. Umożliwiają określenie zadanej wartości temperatury i stężenia dla danego czynnika myjącego. Osiągnięcie wymaganych parametrów kontrolnych rozpoczyna odliczanie czasu przeznaczzonego na mycie, natomiast w momencie zmian ich wartości, poza wyznaczone granice, odmierzanie czasu zostaje zatrzymane. Takie rozwiązanie gwarantuje skuteczne mycie w zadanym czasie i przy zadanych parametrach środka myjącego.

Stacje mycia CIP wymagają podłączenia czynników energetycznych takich jak: sprężone powietrze, które służy do sterowania układem oraz do wypychania pozostałości środków chemicznych, pary wodnej, która najczęściej służy do podgrzewania mediów oraz



energii elektrycznej. Układy nieposiadające ogrzewania parą wodną znaczną część energii elektrycznej zużywają dodatkowo na podgrzewanie środków.

Przystosowanie zakładu produkcyjnego do mycia w systemie CIP ma zasadnicze znaczenie w pozyskiwaniu odpowiedniej higieny produkcji. Projektując stację mycia dla odpowiedniej linii produkcyjnej należy trzymać się pewnych zasad, mających na celu zarówno skuteczne mycie jak i bezpieczeństwo. Urządzenia stacji CIP muszą znajdować się w oddzielnym pomieszczeniu i w pobliżu magazynu środków chemicznych. Ponadto powinny być oddzielone od obszarów produkcyjnych np. korytarzem, posiadać oddzielny system zasysania oraz nieco niższe ciśnienie od pomieszczeń produkcyjnych, co zapobiega przed przedostaniem się oparów chemicznych do obszarów „czerwonej strefy”, czyli obszarów o najwyższych wymaganiach higienicznych [Jakubczyk, 1999]. Zawory oddzielające zbiorniki z środkami chemicznymi od instalacji i instalacje od zbiorników poddawanych myciu muszą pewnie zabezpieczyć układ przed skażeniem przerabianego surowca środkami chemicznymi. Zabezpieczenie jednym zaworem stanowi duże zagrożenie dla szczelności takiego układu, konieczne staje się zatem stosowanie kilku zaworów oddzielających. Jednak do warunku absolutnie niezawodnego działania zaworów i pełnej szczelności w zamkniętym obiegu dochodzi wymóg czystości i zachowania higieny. Stąd też stosowane zawory muszą być pozbawione jakichkolwiek gniazd i szczelin, gdzie mogłyby pozostawać resztki cieczy, a jednocześnie muszą dać się idealnie oczyszczać przepływającym roztworem bez demontażu .

W kraju jest ok. 20 firm zajmujących się produkcją i dystrybucją urządzeń do mycia w obiegu zamkniętym. Podstawowa oferta obejmuje wykonywanie stacji CIP na specjalne zamówienie. Producenci w katalogach prezentują również gotowe, samodzielne, kompletne agregaty myjące [Diakun 2003]. Z analizy dostępnych na rynku centralnych stacji CIP wynika, że większość oferowanych stacji to stacje trzy zbiornikowe do mycia dwufazowego, a więc zarówno zasadowego i kwasowego. Nieliczne są oferty stacji składające się z dwóch zbiorników i mają one najmniejszą pojemność (400 l). Pozostałe zbiorniki mają pojemność większą i jest to ściśle związane z wydajnością. Im większa wydajność tym większa pojemność zbiorników.

W budowie stacji CIP można wyróżnić szereg odmian konstrukcyjnych w zależności od kształtu i ilości zbiorników magazynowych, ich pojemności, ilości równolegle obsługiwanych torów mycia, stopnia automatyzacji oraz zastosowanych układów sterowania.

Standardowe stacje mycia to stacje zbiornikowe w układzie niezależnym stosowane do mycia obiegów (instalacji) o dużych pojemnościach. Stacje takie składają się najczęściej z trzech zbiorników. Jeden przeznaczony jest do zasadowych środków myjących, drugi do kwasowych a trzeci do wody wtórnej, co pozwala na wykorzystanie wody z ostatniego płukania do płukania wstępnego przy kolejnym obiegu i w znacznym stopniu ogranicza zużycie wody oraz emisji ścieków. Realizowane mycie w takim systemie jest myciem dwufazowym: zasadowo – kwaśnym, stosowanym w przemyśle mleczarskim do mycia instalacji i obiegów po stronie mleka i produktów pasteryzowanych, z dezynfekcją chemiczną w cyrkulacji zamkniętej.

Najmniejsze stacje mycia CIP zbudowane są z dwóch zbiorników i realizują mycie jednofazowe, przeznaczone głównie w przemyśle mleczarskim do mycia instalacji i urządzeń strefy mleka surowego, a także cystern samochodowych. Najbardziej rozbudowane stacje składają się z 6 (i więcej) zbiorników. W takich instalacjach montuje się oprócz w/w naczyń również zbiorniki na: dezynfekant, wodę, środek zasadowy regeneracyjny oraz zbiorniki regeneracji środków pomocniczych, np. ług sodowy do regeneracji złoża PVPP (poliwinylopirolidon – polimer stosowany np. w produkcji piwa jako preparat filtracyjny i stabilizator usuwający polifenole) [Piepiórka 2007, Piepiórka 2009, Diakun 2006].

Innym typem stacji mycia CIP są stacje występujące w postaci jednolitego kontenera. W swojej budowie różnią się od stacji zbiornikowych tym, że zamiast niezależnych zbiorników posiadają jeden duży kontener z podziałem na komory, w których magazynowane są rozwoły myjące. Stacje takie charakteryzują się małą pojemnością komór magazynowych i sprawdzają się wyłącznie w średnich i małych zakładach lub przy myciu wydzielonych działów produkcyjnych.

Na rynku dostępne są również małe, niezależne, mobilne stacje mycia CIP, stosowane głównie w przemyśle farmaceutycznym do mycia rurociągów transportujących,

do mycia urządzeń produkcyjnych przystosowanych do mycia w CIP np. dozownice, pakowarki. Są one w pełni zautomatyzowane, wymagają jedynie niewielkiej obsługi operatora. Zazwyczaj zbudowane są z jednego zbiornika przeznaczonego na środek myjący. Zbiornik wyposażony jest w grzałkę do podgrzewania wody, czujniki temperatury oraz wskaźniki poziomu. Istnieje również możliwość doposażenia stacji w dodatkowy zbiornik. Instalacja, podobnie jak typowe stacje CIP posiada rurociągi oraz zawory pneumatyczne umożliwiające doprowadzenie i odprowadzenie wody do zbiorników oraz doprowadzające media do mytej instalacji. Stacja wyposażona jest w szafę sterującą i zestaw kontrolno-pomiarowy informujący o wszelkich niezgodnościach. Całość umieszczona jest na mobilnej ramie wykonanej ze stali kwasoodpornej, umożliwiające swobodne przemieszczanie stacji.

## 4. Czynniki mechaniczne oddziałujące w procesie mycia rurociągów

Mycie w miejscu (CIP) polega na przepływie czynników myjących i dezynfekujących przez rurociągi i urządzenia. Dlatego bardzo ważne jest oddziaływanie czynników mechanicznych w procesie mycia i zrozumienie zasad ich działania. Warunkiem uzyskania założonej czystości jest zachowanie odpowiedniej prędkości przepływu i turbulencji. Oddziaływanie mechaniczne to przede wszystkim naprężenia ścinające, wynikające z prędkości przepływu medium myjącego. Przepływ cieczy w rurociągu może mieć charakter laminarny lub burzliwy. Zależy to od średnicy rury, prędkości przepływu i lepkości cieczy.

Dla sprawdzenia charakteru przepływu obliczono prędkości i liczbę Reynoldsa (przepływ dla wody o temp 20°C) dla parametrów wydajności pomp instalacji CIP dostępnych na rynku oraz średnic rurociągów. We wszystkich analizowanych konstrukcjach liczba Re była powyżej 10000, co świadczy o turbulentnym charakterze przepływu (Tab. 4.1).

Tab. 4.1. Obliczone wartości prędkości przepływu i liczby Reynolds osiągnęte przez stacje mycia [Diakun 2004]

Wydajność nominalna [m <sup>3</sup> /h]	Średnica rurociągu [m]					
	0,05		0,08		0,1	
	Prędkość przepływu [m/s]	Liczba Reynoldsa	Prędkość przepływu [m/s]	Liczba Reynoldsa	Prędkość przepływu [m/s]	Liczba Reynoldsa
10	1,42	71.000	0,55	44.000	0,35	35.000
15	2,13	106.000	0,83	66.000	0,53	53.000
20	2,83	141.000	1,11	88.000	0,71	70.000
22	3,12	155.000	1,22	97.000	0,78	77.000
30	4,25	212.000	1,66	132.000	1,06	106.000
32	4,53	226.000	1,77	141.000	1,13	113.000

Siły tarcia pomiędzy cząsteczkami zanieczyszczeń i przepływającą cieczą decydują w dużym stopniu o efektywności mycia. Naprężenia styczne są funkcją prędkości

przepływu oraz liczby Reynoldsa. W ruchu laminarnym naprężenie styczne przy ścianie przewodu jest wprost proporcjonalne do liczby  $Re$ , natomiast w ruchu burzliwym zależność ta ma charakter funkcji potęgowej o wykładniku potęgi bliskim 2. Dlatego mycie rurociągów należy przeprowadzać przy wyraźnym przepływie turbulentnym, a więc wysokiej liczbie Reynoldsa.

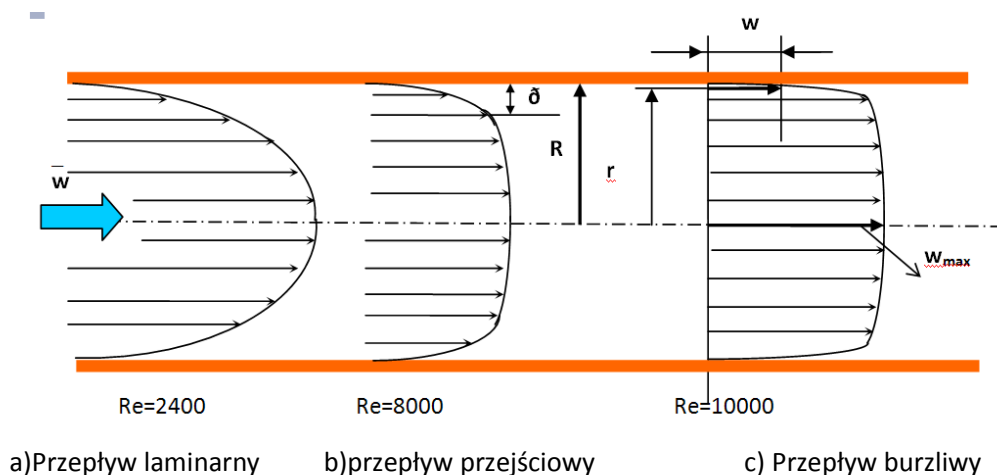
## Prędkość i charakter przepływu

Aby oderwać zanieczyszczenia od mytej powierzchni i mechanicznego transportowania cząstek osadów konieczna jest taka prędkość przepływu, aby naprężenia ścinające w cieczy przy powierzchni zerwały zanieczyszczenia z mytej powierzchni i uniosły je z przepływającą cieczą.

O charakterze przepływu decyduje liczba Reynoldsa. W praktyce inżynierskiej przyjmuje się na ogół następujące kryteria dla rur okrągłych:

- $Re < 2400$  - przepływ laminarny (uporządkowany, warstwowy, stabilny);
- $2400 < Re < 10000$  - przepływ przejściowy (częściowo turbulentny);
- $Re > 10000$  - przepływ turbulentny (burzliwy).

Charakter rozkładu prędkości na przekroju zobrazowano na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Profile prędkości dla a) przepływu laminarnego, b) przejściowego, c) burzliwego gdzie:  $\bar{w}$  - prędkość średnia,  $w_{max}$  - prędkość maksymalna,  $R$  - promień,  $w$  - dowolna prędkość,  $r$  - dowolny promień,  $\delta$  - grubość laminarnej warstwy przyściennej.

Dzięki mechanicznemu oddziaływaniu na powierzchnię zwiększa się skuteczność procesu mycia. Timperley i Lawson [Timperley 1980, Timperley 1981] podają, że bakterie z powierzchni usuwane są do minimum jeśli prędkość utrzymana jest na poziomie 1,5 m/s. Inne badania [Kessler H, 1981] wykazały, że dla osiągnięcia odpowiedniej skuteczności mycia konieczne jest, aby liczba Reynoldsa była większa niż  $10^4$ . Natomiast Jennings podaje, że dla rurociągów wzrost liczby Reynoldsa powyżej  $Re = 25000$  nie przynosi wzrostu efektywności procesu [Jennings 1957].

Przeprowadzono własne obliczenia parametrów określających warunki mycia rurociągów w przepływie. Wyliczono: prędkość przepływu, grubość warstwy laminarnej, prędkość ścinania i naprężenia ścinające na ściance w zależności od liczby Reynoldsa i temperatury. Do obliczenia naprężenia stycznego przy ściance dla ruchu burzliwego konieczne jest wyznaczenie grubości warstwy przyściennej laminarnej  $\delta$ .

Wzór na grubość warstwy laminarnej przepływu burzliwego wyprowadzony jest w podręcznikach [Duckworth 1983, Puzyrewski 1998]:

$$\delta = \frac{5\mu}{\rho w \sqrt{\frac{f}{2}}} \quad (4.1)$$

Gdzie:

$\mu$ - współczynnik lepkości dynamicznej  $[\frac{kg}{m \cdot s}]$ ;

$f$ - współczynnik strat tarcia;

$w$ - prędkość przepływu  $[\frac{m}{s}]$ ;

$\rho$  – gęstość  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

Wartość współczynnika strat tarcia można odczytywać z wykresów lub można ją obliczyć na podstawie wzoru Blasiusa obowiązującego w zakresie  $3000 < Re < 10^5$ :

$$f = 0,0791 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

Znając grubość warstwy przyściennej, prędkość ścinania wyraża wzór:

$$\dot{\gamma} = \frac{w}{\delta} \quad (4.3)$$

a naprężenia styczne:

$$\tau_r = \mu \dot{\gamma} \quad (4.4)$$

Obliczenia przeprowadzono dla liczby Reynoldsa 2400, 10000; 100000 i wody o temperaturze 20<sup>0</sup>C i 60<sup>0</sup>C dla rurociągu o średnicy 0,38 m, czyli takiej jaka występuje w laboratoryjnej stacji mycia. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Prędkość przepływu, grubość warstwy laminarnej, naprężenia ścinające i prędkość ścinania dla różnych wartości liczby Re i temperatury

	Re=2400		Re=10000		Re=100000	
	20 <sup>0</sup> C	60 <sup>0</sup> C	20 <sup>0</sup> C	60 <sup>0</sup> C	20 <sup>0</sup> C	60 <sup>0</sup> C
Prędkość przepływu [m/s]	0,067	0,032	0,28	0,13	2,79	1,33
Grubość warstwy laminarnej [m]	0,018	0,018	2,866x10 <sup>-4</sup>	2,862x10 <sup>-4</sup>	2,146x10 <sup>-6</sup>	2,166x10 <sup>-6</sup>
Prędkość ścinania [1/s]	3,72	1,76	996,42	464,01	1301775,14	613057,94
Naprężenia ścinające [Pa]	0,00373	0,00083	1,0004	0,218	611,799	288,137

Wyniki obliczeń przedstawione w tabeli wskazują na kilka interesujących zależności. Prędkość przepływu wzrasta wraz ze zwiększaniem się liczby Re, ale maleje gdy zwiększamy temperaturę cieczy. Związane jest to przede wszystkim ze zmianą lepkości wody, która w temp 20<sup>0</sup>C wynosi 1004\*10<sup>-6</sup> [Pa·s], a dla wody o temp 60<sup>0</sup>C maleje do wartości 470\*10<sup>-6</sup> [Pa·s]. Zmiany gęstości wody są nieznaczne.

Grubość warstwy laminarnej maleje wraz ze wzrostem liczby Re i przy Re powyżej 100000 jej wymiar jest mniejszy od 2,16\*10<sup>-6</sup> m. Dziesięciokrotne zwiększenie Re powoduje zmniejszenie się grubości warstwy przyściennej stukrotnie. Grubość warstwy laminarnej ma dla naszych badań duże znaczenie, ponieważ im mniejsza tym lepiej usuwane są z powierzchni zanieczyszczenia poprodukcyjne, mikroorganizmy i biofilmy. Osiągając grubość warstwy na poziomie 2,16\*10<sup>-6</sup> m wchodzimy w wielkości bakterii, które osiągają wielkości od 0,5 do 5 μm.

Naprężenie ścinające są również uzależnione od temperatury. W przepływie laminarnym są tak niskie, że można je praktycznie pominąć. Naprężenia wielkości 1 Pa osiągamy dla liczby Re powyżej 10000 i przy temperaturze 20<sup>0</sup>C. Natomiast przy Re = 100000 naprężenia wzrastają przy temp 20<sup>0</sup>C do wielkości 600 Pa. Wyższa temperatura wody powoduje spadek naprężeń ścinających. Spadek ten jest większy przy niższych wartościach Re (prawie 5 krotnie), a przy wyższych wartościach Re spadek ten jest około dwukrotny.

Im niższa temperatura i wyższa liczba Re tym prędkość ścinania rośnie. Wzrost temperatury o 40<sup>0</sup>C powoduje spadek prędkości ścinania o ponad połowę. Wynika z tego, że proces mycia (usuwania resztek poprodukcyjnych), biorąc pod uwagę wyłącznie oddziaływanie mechaniczne, na zanieczyszczenia powinien odbywać się przy niskich temperaturach i wysokich liczbach Re, a tym samym przy dużych prędkościach przepływu [Diakun 2010].



## 5. Zużycie energii w przemyśle spożywczym na proces mycia

Mycie i dezynfekcja wiąże się z dużym nakładem energii i środków poświęconych utrzymaniu w czystości instalacji i powierzchni produkcyjnych do właściwego procesu przetwarzania. Każda branża przemysłu spożywczego ma swoją specyfikę, np. przemysł mięsny charakteryzuje się otwartymi powierzchniami produkcyjnymi oraz trudnymi do usunięcia zanieczyszczeniami, związanymi głównie z tłuszczem i białkiem. Z kolei przemysł piwowarski, to przede wszystkim zbiorniki i rurociągi o zabrudzeniach związanych z kamieniem piwnym, drożdżami itd. Jak wykazano w badaniach, prezentowanych przez Pawelasa A., [Konferencja Naukowo-Techniczna: Efektywność energetyczna. Gospodarka mediami w przemyśle spożywczym, Zakopane 2010], proces mycia jest procesem energochłonnym (Tab. 5.1.)

Tab. 5.1. Struktura zużycia energii w przemyśle spożywczym

STRUKTURA ZUŻYCIA ENERGII W PRZEMYŚLE SPOŻYWCZYM	
Energia cieplna:	Energia elektryczna:
<ul style="list-style-type: none"><li>• obróbka cieplna produktu (zacieranie, gotowanie, pasteryzacja, itp.): 30-70% zużycia</li><li>• <b>mycie (CIP, zewnętrzne): do 30% zużycia</b></li><li>• ogrzewanie: 10-30% zużycia</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• chłodzenie (produkty, pomieszczenia): 25-80% zużycia</li><li>• sprężone powietrze (automatyka, transfer płynów): 10-20% zużycia</li><li>• napędy i pompy</li><li>• wentylacja</li><li>• oświetlenie</li></ul>

Zródło: Konferencja Naukowo-Techniczna: Efektywność energetyczna. Gospodarka mediami w przemyśle spożywczym, Zakopane 2010

W **browarach**, całkowite jednostkowe zużycie energii cieplnej wynosi 100÷200 MJ/hl piwa. Zakłady z nowoczesnymi, energooszczędnymi instalacjami plasują się na dolnych wartościach tego przedziału, natomiast stare niemodernizowane zakłady bez wdrożonych zasad efektywnej gospodarki energią i niskiej sprawności wytwarzania ciepła mogą zużywać ponad 200 MJ/hl piwa [BAT 2005].

Głównymi odbiornikami ciepła w browarze są następujące instalacje i procesy zestawione w kolejności wielkości zużycia energii:

- zacieranie słoju i gotowanie brzezki;
- mycie w obiegu zamkniętym CIP;
- mycie butelek zwrotnych;
- pasteryzacja piwa;
- ogrzewanie pomieszczeń.

Jak wynika z zestawienia procesy mycia wymieniane są jako znaczące w bilansie zużycia energii. Znajdują się one na drugiej pozycji po procesach cieplnych zacierania słoju.

W **zakładach mleczarskich** zużycie energii zależy w dużej mierze od profilu produkcji i jest dosyć zróżnicowane. Według analizy sektorowej polskiego sektora mleczarskiego (FAPA), jednostkowe zużycie energii elektrycznej waha się od 2160-28800 MJ na 1 tonę produktu [BAT 2005]. Zróżnicowanie wielkości zużycia energii wynika z wielkości i asortymentu produkcji, wymogów produkcji (np. dłuższe lub krótsze okresy dojrzewania serów, dystrybucji wymagającej dłuższego okresu magazynowania w chłodniach).

W przemyśle mleczarskim głównymi odbiornikami ciepła są w zależności od specyfiki produkcji:

- produkcja mleka i napojów mlecznych: mycie urządzeń, pasteryzacja i procesy pomocnicze;
- produkcja serów: procesy cieplne, mycie, ogrzewanie pomieszczeń.

W przemyśle mleczarskim proces mycia wymieniany jest jako jeden z głównych procesów w zapotrzebowaniu na energię.

**Przemysł rozlewniczy napojów bezalkoholowych** ze względu na technologię produkcji nie wymaga intensywnych procesów termicznych. Obecnie w zakładach rozlewniczych całkowite jednostkowe zużycie energii wynosi przeciętnie 0,7÷1,5 MJ/hl produktu [BAT 2005]. Głównymi odbiornikami ciepła w zakładzie są następujące instalacje i procesy, w kolejności zapotrzebowania energetycznego:

- mycie urządzeń, CIP;
- mycie butelek zwrotnych;

- pasteryzacja;
- ogrzewanie pomieszczeń.

Tu procesy mycia wymienione są na pierwszym miejscu zapotrzebowania energetycznego.

Z powyższego rozpoznania wynika iż mycie jest procesem, na który przeznaczane są znaczne nakłady energii. Wskazane jest dążenie do zmniejszenia energochłonności tego procesu. Celowe jest zatem prowadzenie badań i poszukiwanie możliwości obniżenia zużycia energii. Energia jest znaczącym składnikiem kosztu funkcjonowania zakładu przetwórczego i w konsekwencji ceny produktu.

## 6. Cel, hipoteza i zakres pracy

System CIP – (Clean In Place - mycie w obiegu zamkniętym), jest to powszechnie stosowany w przemyśle spożywczym i wygodny w użytkowaniu system, przeznaczony do mycia instalacji produkcyjnych. Mycie w systemie CIP nie wymaga demontażu mytego elementu, a jego stosowanie ma ogromne znaczenie w zapewnieniu bezpieczeństwa higienicznego produkcji żywności oraz dla ekonomicznego aspektu realizacji procesu i ochrony środowiska.

### 6.1. Podsumowanie rozpoznania badań i stanu wiedzy

Literatura książkowa z zakresu procesów mycia systemem CIP jest jedna wydana w 2008 w języku angielskim [Tamine 2008]. W podręczniku tym opisane są podstawowe zagadnienia dotyczące tego tematu. W innych podręcznikach można znaleźć jedynie rozdziały i podrozdziały dotyczące metody CIP, ale opisujące problem bardzo lakonicznie. Ograniczają opis procesów mycia jedynie do opisowego przedstawienia czynników oddziałujących w procesie, opisu urządzeń i sposobów oddziaływania środków chemicznych [Pijanowski 2004, Kołożyn–Krajewska 2001, Kunze 2010, Leliveld 2003]. Literatura zarówno krajowa jak i zagraniczna dostrzega problem związany z tymi procesami jednak ich opis jest bardzo skromny. Artykuły w czasopiśmie naukowych postrzegają proces mycia rurociągów jako problem nie natury mechanicznej, ale jako problem związany ze środkami myjącymi, z testowaniem nowych środków, sprawdzaniem ich skuteczności. Badania dotyczące problemów mycia w obiegu zamkniętym prowadzone są w Polsce tylko w naszym ośrodku naukowym. Wszyscy wiemy jak ważne są zagadnienia związane z utrzymaniem czystości produkcji. Jednak w praktyce polegamy wyłącznie na wiedzy dostawców środków i urządzeń do mycia niekiedy ufając im bezgranicznie.

W bazach internetowych można znaleźć bardzo dużo informacji na temat środków myjących i dezynfekujących oraz zaleceń ich stosowania. Są tam również informacje dotyczące urządzeń do mycia. Ciekawą pozycję opisującą system CIP jest strona

[<http://www.seiberling4cip.com>]. Autorem zawartych na stronie informacji jest Dale A. Seiberling, który posiada 60 letnie doświadczenie w stosowaniu systemów CIP w mleczarniach, browarach, przemyśle farmaceutycznym i biochemicznym. Celem tej strony było podzielenie się ze wszystkimi użytkownikami systemów CIP wiedzą i doświadczeniem z zakresu projektowania systemów. Jednak autor nie zdradza wielu szczegółów dotyczących badanych przez nas procesów.

W pozycji literaturowej [Kołożyn-Krajewska 2001] opisane są zagadnienia utrzymania czystości i porządku w pomieszczeniach produkcyjnych. Autorka wspomina o czynnikach oddziałujących w procesie mycia, etapowości procesu i o środkach myjących. Są to informacje ogólne bez szczegółów o ilościowym oddziaływaniu czynników.

W podręczniku „Inżynieria Procesowa i Aparatura Przemysłu Spożywczego” [Lewicki 1982] zamieszczono rozdział dotyczący mycia surowców i maszyn. Opisano tu cele i zadania procesu, maszyny do mycia surowców i mycie maszyn i urządzeń. System CIP opisany jest jako system zapewniający skuteczność mycia, ale bez informacji o szczegółowych aspektach mycia tym systemem. Kunze w swojej książce [Kunze 2010] zamieścił rozdział dotyczący mycia i dezynfekcji. Opisuje materiały z jakich powinny być wykonane urządzenia i rurociągi przesyłowe, opisuje środki myjące i dezynfekujące oraz przykładowy proces mycia i dezynfekcji w systemie CIP w browarze.

Kolejne pozycje literaturowe są to pozycje anglojęzyczne, które szerzej opisują proces mycia w systemie CIP. W książce „Industrial Cleaning Technology” Joe Harrington [Harrington 2001] zawiera informacje dotyczące metod mycia, wymagań regulacji prawnych i alternatywnych metod mycia. System CIP opisany jest pod kontem mycia zbiorników i urządzeń za pomocą dysz spryskujących. Opisane są rodzaje dysz, zasady działania i wykorzystania CIP w różnych przemysłach. Brak opisu mycia samych rurociągów i co za tym idzie brak danych o parametrach tego procesu.

Najwięcej informacji o systemie CIP zawartych jest w pozycji z 2008 „Cleaning-in-Place. Dairy, Food and Beverage Operations [Tamime 2008]. Jest to wydanie trzecie pod edycją Adnan Tamime. W książce tej można znaleźć informacje na temat etapów procesu mycia, sposobu doboru metody i środków do mycia. Rozdział poświęcony jest dynamice przepływów w procesie mycia, rodzajom przepływu, liczbie Reynoldsa, charakterystyce

pomp. Kolejne rozdziały zawierają informacje o wodzie wykorzystywanej w procesie mycia, o czynnikach chemicznych, o wytycznych dla projektantów systemów CIP i linii technologicznych, o myciu zbiorników i dyszach spryskujących, o wynikach symulacji mycia zbiorników oraz o metodach kontroli skuteczności mycia i dezynfekcji.

Cykl artykułów informacyjno-technicznych opublikował P. Lewicki w *Przemśle Spożywczym* [Lewicki 1993, 1994, 2005, 2006]. Jednym z ważniejszych artykułów dotyczących procesów mycia i próby opisanie zjawisk w nim zachodzących jest artykuł P. Lewickiego [Lewicki 1994]. Autor proponuje do opisu kinetyki usuwania osadów proces pierwszorzędowy (opisany równaniem różniczkowym pierwszego rzędu względem czasu). Jest to ogólne równanie procesu przyjęte a priori na zasadzie podobieństwa zjawisk z procesami chemicznymi i dyfuzyjnymi.

Z przeglądu literatury wynika iż proces mycia jest postrzegany jako bardzo ważny aspekt produkcji zdrowej i bezpiecznej żywności. Badania z tego zakresu skupiają się przede wszystkim na badaniu środków chemicznych.

Sprawdzenie skuteczności prowadzonego procesu na rurociągach stwarza duże problemy. Związane jest to z koniecznością demontażu rurociągu, który osiąga znaczne długości i nie ma możliwości sprawdzenia skuteczności mycia na całej jego długości (jedynie na wlocie i wylocie). Ze względu na zamknięty charakter rurociągu nie ma możliwości monitorowania miejsc niedomywanych i nie wiadomo kiedy należałoby zastosować inne, silniejsze środki lub środki o odmiennym działaniu (np. usuwające nagromadzony biofilm). Często taka procedura prowadzona jest dopiero wówczas, gdy w analizie popłuczyn lub w testach wymazowych (wymaz na wyjściu z rurociągu) uzyskamy pozytywne wyniki na obecność pozostałości produktu, substancji chemicznych, czy obecność flory bakteryjnej. Nie mamy jednak dokładnej informacji, w którym miejscu ten problem powstał i co było jego przyczyną. Niewymyte i nawarstwiający się osady obniżają również, w skrajnych przypadkach, przepustowość rurociągu. Nieodpowiednie parametry procesu i brak ich kontroli często prowadzą do niedostatecznego wymycia. Stwarza to poważne zagrożenie dla procesu produkcji i bezpieczeństwa zdrowotnego żywności. Przykładowo pozostałości środków dezynfekcyjnych uniemożliwiają proces fermentacji w browarnictwie ponieważ hamują rozwój drożdży.

Rurociągi do przesyłu produktów i półproduktów są niezbędnym elementem instalacji w przemyśle mleczarskim, browarnictwie, przemyśle owocowo warzywnym i tłuszczowym. Przeprowadzone badania terenowe [Diakun 2003] w zakładach przemysłowych, pokazują, jak ważne jest odpowiednie umycie rurociągów przesyłowych. Niedostateczne ich umycie powoduje gromadzenie się osadów, które w dalszej kolejności stanowią zagrożenie mikrobiologiczne, jak również uniemożliwiają dotarcie dezynfekanta do powierzchni rurociągu. Niemożliwe jest bezpośrednie doczyszczenie ręczne i sprawdzenie czystości długich rurociągów.

Podstawą skutecznego mycia w systemie CIP, są oddziaływania mechaniczne, chemiczne, termiczne i czasowe. W pracy zajmuję się wpływem oddziaływania czynników mechanicznych na skuteczność mycia i energochłonnością procesu. W praktyce produkcyjnej obserwuje się negatywną tendencję do zwiększania stężenia środków chemicznych, kosztem pozostałych czynników mycia, co wpływa ujemnie na środowisko i znacznie podnosi koszty utylizacji ścieków przemysłowych [Orth 1998]. Działania praktyczne znacznie wyprzedzają wiedzę o tym procesie i zachodzących w nim zjawiskach. Brak jest informacji literaturowych odnośnie badań nad skutecznością mycia samych rurociągów w obiegu zamkniętym. Podawane są jedynie nie potwierdzone doświadczalnie zalecenia o zachowaniu warunków burzliwości przepływu. Brak jest również danych dotyczących zasad tworzenia procedur mycia, a ponadto istnieje utarte przekonanie, że o skuteczności mycia decyduje wyłącznie środek chemiczny i jego stężenie. Sporo jest informacji dotyczących zasad praktycznych mycia zbiorników (dysze spryskujące), homogenizatorów, pasteryzatorów [Piepiórka 2010, Piepiórka 2011, Harrington 2001]. Jak wykazało własne rozpoznanie, rurociągi są myte przy okazji mycia urządzeń technologicznych [Diakun 2003].

Z przeprowadzonego rozpoznania w zakładach stosujących CIP wynika, że duże zakłady mają bardzo dobrze zorganizowane i prowadzone procesy mycia. Ich systemy CIP projektowane są przez specjalistyczne firmy, które zajmują się zarówno konstrukcją systemów jak i produkcją i rozpowszechnianiem preparatów do mycia. Sytuacja gorzej wygląda w małych, regionalnych zakładach, gdzie ze względów ekonomicznych budową stacji mycia zajmują się zakłady we własnym zakresie, nie zatrudniając do tego

specjalistów. W takich zakładach spotyka się niekiedy rurociągi, które w całym procesie mycia są tylko płukane wodą i nie dociera do nich środek myjący. Stanowi to bardzo duże zagrożenia dla bezpieczeństwa żywności.

Badania dotyczące mycia w systemie CIP prowadzone są na szeroką skalę już od wielu lat. Dotyczą one przede wszystkim oddziaływania czynników chemicznych i są związane z testowaniem nowoprodukowanych preparatów chemicznych i wpływu ich oddziaływania na drobnoustroje, zanieczyszczenia fizyczne i myte powierzchnie. Informacje na temat oddziaływania czynników mechanicznych zawarte w książkach mają charakter prezentacji podstawowych prawidłowości oraz ogólnikowych zaleceń producentów systemu CIP. Literatura nie podaje zależności ilościowych, wzorów obliczeniowych oraz w jakim stopniu zwiększenie oddziaływania czynników mechanicznych może wpłynąć na efektywność tego procesu. Producenci środków myjących, chcąc sprzedać swoje produkty i osiągnąć wysoki zysk, nie kładą dużego nacisku na ograniczenie stężeń środków myjących, kosztem zwiększenia oddziaływania czynników mechanicznych.

Zastosowanie zwiększonych sił mechanicznych w procesie mycia bez konieczności stosowania zwiększonych stężeń, mogących powodować korozję pozwoli na uniknięcie lub ograniczenie powstawania miejsc niedomytych i zastosowanie niższych, mniej obciążających środowisko, stężeń środków chemicznych.

Proces mycia składa się z kilku następujących po sobie czynności z których pierwszym etapem jest zawsze płukanie wstępne. Polega ono na wypłukaniu pozostałości produkcyjnych oraz usunięciu osadów słabo przylegających do powierzchni. Zadaniem tego procesu jest usunięcie jak największej ilości zabrudzeń, aby ułatwić działanie środka chemicznego i unikać jego dużego zanieczyszczenia odpadami poprodukcyjnymi. Wiąże się to bowiem ze zwiększeniem kosztów na zakup środka chemicznego oraz na oczyszczanie roztworów myjących. Zatem słuszne jest takie prowadzenie tego etapu aby usuwanie pozostałości poprodukcyjnych było wysoko skuteczne. Im więcej usuniemy w procesie płukania tym mniej użyjemy środka chemicznego na właściwy proces mycia.



## 6.2. Cel pracy

Głównym celem pracy jest określenie wpływu parametrów procesowych na warunki mycia rurociągów ze szczególnym uwzględnieniem czynników mechanicznych. Z czterech podstawowych grup czynników mających wpływ na proces mycia dwa z nich zależne są od użytych środków chemicznych (czynniki chemiczne i temperatura), jeden od użytej chemii (czas) i czwarty związany wyłącznie z możliwościami technicznymi stacji mycia. W pracy postanowiono przeanalizować wpływ czynników mechanicznych. Oddziaływanie to jest szczególnie ważne w pierwszym etapie mycia, gdy występuje usuwanie resztek produktu z rurociągów przesyłowych. Możliwie dobre wstępne mycie (wyplukanie) umożliwi w następnych etapach zmniejszenie agresywności i stężenia środków chemicznych. Postawiony cel pracy jest istotnie znaczący dla obecnego stanu wiedzy z zakresu techniki mycia w systemie CIP różnych obiektów. Prowadzone badania pozwolą zminimalizować stosowanie chemicznych środków myjących stosowanych do mycia w obiegu zamkniętym, co ma to istotne znaczenie dla ochrony środowiska.

Kolejnym celem badań jest ocena zużycia energii elektrycznej niezbędnej do podgrzania mediów myjących oraz do wymuszenia ich przepływu w celu umycia rurociągów. Zużycie energii elektrycznej ma istotne znaczenie dla ekonomiczno – finansowej strony działalności zakładu produkcyjnego jak również dla ochrony środowiska.

Kolejnym celem pracy jest wyznaczenie funkcji regresji opisujących proces mycia w aspekcie jakościowym i energetycznym z wyraźnym naciskiem na oddziaływania czynników mechanicznych.

Kierując się założonymi celami pracy, sformułowano problemy badawcze:

1. W jaki sposób ciśnienie, prędkość przepływu, temperatura i objętość cieczy myjącej wpływa na skuteczność i energochłonność procesu mycia rurociągów?
2. Czy można ograniczyć stosowanie chemicznych środków myjących znając mechaniczne oddziaływanie przepływu cieczy na mytą powierzchnię?

### **6.3. Hipoteza badawcza**

Przypuszcza się, że poznanie intensywności oddziaływania poszczególnych czynników mechanicznych na mycie rurociągu umożliwi znacznie lepsze usuwanie zanieczyszczeń poprodukcyjnych z rurociągów przesyłowych oraz pozwoli na opracowanie parametrów programu mycia tak, aby osiągnąć zadowalającą czystość powierzchni. Pozwoli to na ograniczenie zużycia energii w procesie mycia rurociągów.

### **6.4. Zakres pracy**

Praca została zrealizowana w przedstawionych poniżej etapach.

- Analiza procedur, warunków i parametrów mycia w zakładach przemysłu spożywczego i opracowanie założeń wstępnych do badań doświadczalnych.
- Określenie, w jakim zakresie wartości parametrów prowadzone jest mycie, aby osiągnąć wymaganą czystość.
- Opracowanie wstępnego planu badań uwzględniając techniczny zakres parametrów mycia.
- Zbudowanie stanowiska badawczego.
- Analiza czynnikowa obiektu badań i opracowanie programu badań właściwych.
- Opracowanie standardowych metod brudzenia oraz skali oceny jakości umycia.
- Analiza istotności wpływu badanych czynników na skuteczność mycia i na energochłonność procesu.
- Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowanie funkcji regresji opisujących istotność wpływu poszczególnych czynników na proces mycia w systemie CIP.
- Analiza ilościowego oddziaływania poszczególnych czynników na skuteczność i energochłonność procesu.
- Ilościowe opisanie potrzebnego nakładu energii na uzyskanie określonego stopnia skuteczności mycia (czystości powierzchni).
- Określenie oddziaływania czynników mechanicznych na skuteczność procesu mycia rurociągów oraz na energochłonność procesu.
- Analiza kinetyki zmian parametrów cieczy myjącej w trakcie mycia.

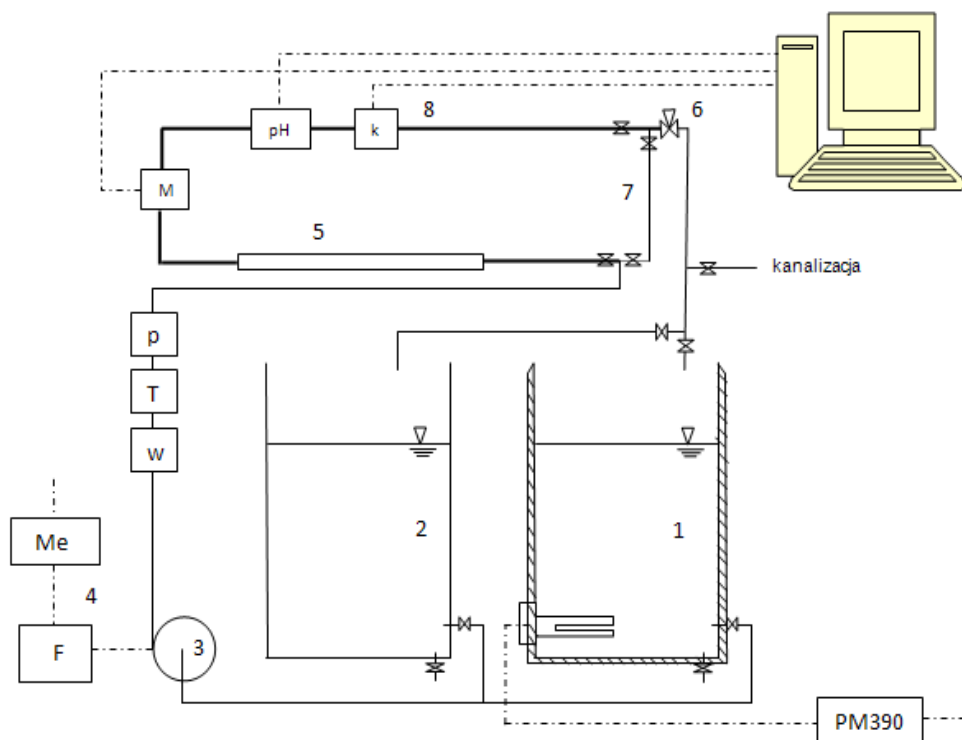
## 7. Stanowisko badawcze, metodyka i program badań

### 7.1. Stanowisko badawcze

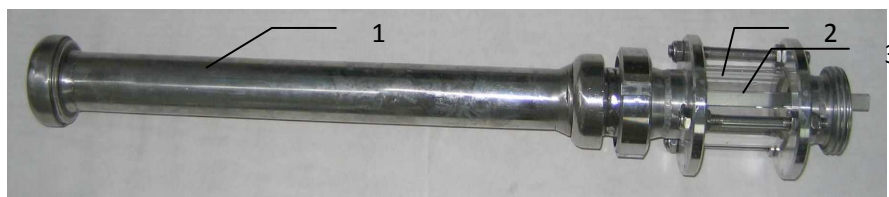
Stanowiskiem badawczym jest laboratoryjna dwu-zbiornikowa stacja mycia w przepływie Clean In Place (CIP) umożliwiająca prowadzenie badań procesu mycia zarówno rurociągów jak i innych elementów, które mogą być do niej podłączane. Została ona zaprojektowana i wykonana w ramach mojej pracy doktorskiej i stanowi obecnie wyposażenia Katedry Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Jedną z pierwszych wersji stanowiska została opisana w artykule „Stanowisko do badań eksperymentalnych warunków i skuteczności mycia [Diakun 2005a]. Stanowisko badawcze składa się z instalacji mycia oraz aparatury pomiarowej. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 7.1., a widok na fotografiach (Rys. 7.2., 7.3., 7.4., 7.5.).

Instalacja mycia składa się z dwóch zbiorników o pojemności  $0,3 \text{ m}^3$ , pompy, systemu rur i zaworów. Zbiornik (1) jest izolowany i posiada wbudowaną grzałkę o mocy 3 kW. Zasilanie grzałki następuje przez termostatyczny układ regulacji C24/1 umożliwiający nagrzanie i stabilizację temperatury cieczy w zbiorniku w zakresie od  $10\text{--}80^{\circ}\text{C}$ . Zbiornik ten służy do przygotowywania roztworów myjących oraz jako odbiornik cieczy, gdy układ pracuje w systemie zamkniętym. Zbiornik (2) nie jest izolowany. Wykorzystywany jest do zbierania popłuczyn lub jako zbiornik wody płuczącej. Podczas badań do niniejszej pracy jest on wykorzystywany jako zbiornik wody czystej do przepłukiwania układu.

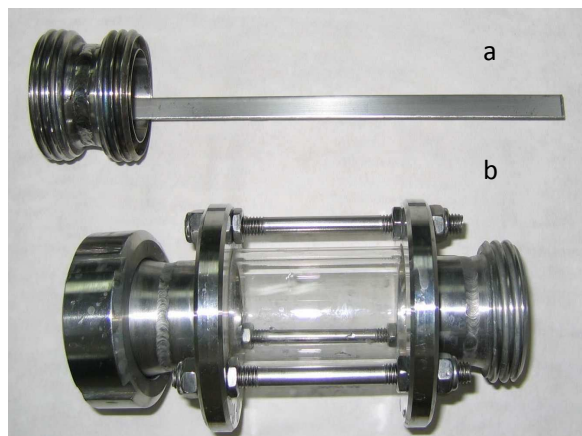
Instalacja wyposażona jest w czujniki pomiarowe, zawory i wzierniki. Kontrolnym odcinkiem rurociągu podlegającym brudzeniu i myciu był odcinek rury o długości 1,3 m oraz wziernik szklany, w którym umocowano płytkę kontrolną (Rys. 7.2., 7.3.).



Rys. 7.1. Schemat laboratoryjnej stacji mycia Clean In Place. Objasnienia: F- sterowany zasilacz (falownik), Me- miernik energii, w- miernik prędkości przepływu, T- miernik temperatury, p- miernik ciśnienia, M- miernik mętności, pH- miernik pH, k- miernik przewodności, 1- zbiornik izolowany z grzałką, 2- zbiornik nieizolowany, 3- pompa, 4- falownik z miernikiem energii, 5- odcinek kontrolny rurociągu, 6- zawór dławiący, 7- obwód boczny, 8- obwód pomiarowy



Rys. 7.2. Odcinek kontrolny rurociągu - elementy instalacji podlegające brudzeniu i ocenie skuteczności mycia: 1- odcinek rurociągu, 2- szklany wziernik, 3- płytka kontrolna



Rys. 7.3. Płytki kontrolna (a) i szklany wziernik (b).

Instalacja rurowa (Rys. 7.4.) umożliwia przepływ cieczy przez odcinek kontrolny i zestaw czujników do pomiaru parametrów cieczy myjącej lub przez obwód boczny z pominięciem odcina kontrolnego.

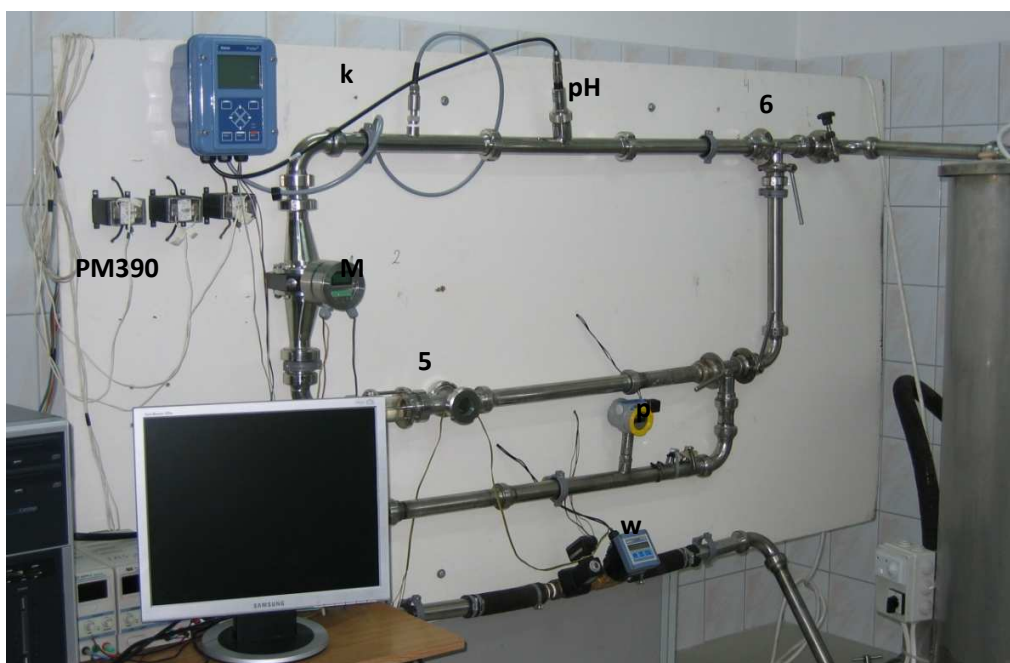


Rys. 7.4. Fotografia instalacji rurowej

Ciecz myjąca pobierana jest za pomocą pompy ze zbiornika (1) i przepompowywana przez układ rur. W pierwszej kolejności przepływa przez miernik prędkości przepływu i następnie miernik ciśnienia. W dalszej kolejności może płynąć na dwa sposoby.

1) Ciecz myjąca płynie przez obwód boczny, regulacyjny zawór dławiący i następnie jest odprowadzona z powrotem do zbiornika lub do kanalizacji. Ten przepływ omija odcinek kontrolny rurociągu.

2) Ciecz myjąca płynie przez odcinek kontrolny, następnie miernik mętności, miernik przewodności i miernik pH, regulacyjny zawór dławiący i, jak w pierwszym przypadku, odprowadzona jest do zbiornika lub do kanalizacji.



Rys. 7.5. Fotografia laboratoryjnej stacji do mycia w przepływie

Przepływ cieczy wymuszony jest pompą GU 14 (3) sterowaną za pomocą falownika (F). Nastawianie prędkości przepływu i ciśnienia, zgodnie z planem badań, odbywa się za pomocą zaworu dławiącego (6) oraz przez regulację prędkości obrotowej pompy za pomocą falownika. Są dwie możliwości ustawiania parametrów procesu. Pierwszy, polega na takim ustawieniu zaworów, aby przepływ cieczy następował przez obwód boczny z pominięciem odcinka kontrolnego. Przez odpowiednie przydławienie przepływu zaworem (6) i regulacją prędkości obrotowej pompy (3) uzyskuje się założone

ciśnienie i wydatek (prędkość przepływu). W momencie osiągnięcia założonych wielkości parametrów następuje przełączenie zaworów i ciecz myjąca płynie przez obwód pomiarowy, na którym zainstalowany jest zabrudzony odcinek kontrolny rurociągu. Druga metoda polega na przepływie cieczy myjącej przez obwód pomiarowy i niezabrudzony odcinek kontrolny (5). Po odpowiednim ustawieniu zaworu dławiącego (6) oraz nastawu parametrów zasilania silnika tak, aby otrzymać odpowiednie obroty pompy (3) wyłącza się zasilanie, opróżnia instalację i poddaje brudzeniu element kontrolny. Następnie montuje się go do instalacji, przygotowuje ciecz myjącą i załącza zasilanie. Zachowane są parametry ustawione wcześniej.

Stacja wyposażona jest w tory pomiarowe:

1. parametrów cieczy myjącej (temperatura, mętność, przewodność i pH);
2. wielkości charakteryzujących przepływ (prędkość przepływu, ciśnienie);
3. parametrów zasilania (napięcie, natężenie i moc).

Wszystkie układy pomiarowe, oprócz standardowego odczytu na wyświetlaczach, połączone są za pomocą karty pomiarowej do komputera. Wartości z pomiarów są zbierane i opracowywane za pomocą programu LabVIEW.

Stanowisko badawcze ma szerokie możliwości rozbudowy. Prowadzić można badania mycia różnych elementów rurociągów (zawory, uszczelki, kolanka, trójniki, itp.) oraz urządzeń, które standardowo są myte w obiegu zamkniętym. Zaprojektowane przeze mnie stanowisko służy do realizacji zajęć oraz kontynuacji badań w ramach projektów badawczych. Stanowisko to zapoczątkowało powstanie pracowni Higieny i Procesów Mycia w Przemysle Spożywczym oraz przyczyniło się do zainteresowania problemami mycia studentów i doktorantów.

## **Aparatura pomiarowa**

### **Miernik Mętności metodą 4-kierunkowego światła itm-4**

Mętność jest parametrem odgrywającym coraz ważniejszą rolę obok pomiaru przewodności w procesie mycia, czyszczenia i rozdzielenia faz. Pomiar mętności jest

niezbędny, gdy wymagana jest pełna kontrola zawartości cząsteczek stałych lub gdy wymagamy kontroli zanieczyszczenia medium.

Miernik itm 4 umożliwia pomiar mętności w zakresie od 0÷5000 NTU lub odpowiednio 0÷1250 EBC i wykorzystywany jest między innymi do kontroli wody lub wody zabrudzonej np. w mleczarni. Jego budowa i wyposażenie przystosowane są do współpracy z systemami CIP w temperaturze do 130<sup>0</sup>C

Podstawowe dane techniczne

zakres pomiarowy: 0÷1000 NTU (0÷250 EBC)                      błąd pomiarowy: <3%

zakres pomiarowy: 1001÷2000 NTU (250÷500 EBC)              błąd pomiarowy: <4%

zakres pomiarowy: 2001÷5000 NTU (500÷1250 EBC)            błąd pomiarowy: <6%

temperatura pracy: 0÷100<sup>0</sup>C

sygnał wyjściowy: 4 ÷20 mA

zasilanie:                      24 V

W badaniach stosowano zakres pomiarowy od 0÷1000NTU z dokładnością poniżej 3% i powtarzalnością pomiarów poniżej 2%

### **Przetwornik różnicy ciśnień PXWG 10**

Przetwornik ten przeznaczony jest do pomiaru różnicy ciśnień cieczy, pary i gazów, zarówno chemicznie obojętnych jak i agresywnych. Elementem pomiarowym w tym przetworniku jest piezorezystancyjny czujnik różnicy ciśnień.

Mierzone ciśnienie działa poprzez membrany separujące i olej silikonowy na czujnik, powodując zmianę rezystancji mostka Wheatstone`a, na którego wyjściu pojawia się napięcie o wartości proporcjonalnej do mierzonej różnicy ciśnień. Układ elektroniczny, oprócz zasilania mostka, przetwarza to napięcie na jeden ze standardowych sygnałów wyjściowych (prądowy lub napięciowy).

Podstawowe dane techniczne

zakres pomiarowy: 0÷10 bar



błąd pomiarowy: < 0,5% zakresu pomiarowego  
temperatura pracy: 0 ÷ 80<sup>0</sup>C  
sygnał wyjściowy: 4 ÷ 20 mA  
zasilanie: 5÷36 V

### **Regulator temperatury**

Regulator temperatury przeznaczony jest do pomiaru, nastawiania i stabilizacji temperatury. Regulator włączony jest w układ zasilania elektrycznego grzałek zbiornika (1).

Podstawowe dane techniczne

zakres pomiarowy: 0-80<sup>0</sup>C,  
błąd pomiarowy: 1,5<sup>0</sup>C,

### **Miernik parametrów sieci elektrycznej PM390**

Miernik PM390 służy do pomiaru zużycia energii elektrycznej potrzebnej do podgrzania i utrzymywania temperatury medium myjącego. Wykorzystuje on szybki mikroprocesor i przetwornik analogowy do pomiaru parametrów, niezależnie dla każdej z faz. Napięcie, prąd i moc każdej fazy są mierzone bezpośrednio, a wszystkie inne parametry są przeliczane. Miernik PM390 umożliwia jego zastosowanie w wielu różnorodnych aplikacjach takich jak np.:

- układ rejestratora / miernika zbierającego dane;
- zdalnego licznika energii;
- systemu zarządzania, kontroli i dystrybucji energii;
- systemów alarmowych, monitorujących i systemów śledzenia.

#### Podstawowe dane techniczne

zakres pomiarowy: pomiar do 71 parametrów sieci elektrycznej w tym moc, energia, napięcie, prąd - wartości maksymalne i średnie w wybranym okresie, wartości sumaryczne i dla każdej fazy.

błąd pomiarowy: 0,1% dla pomiarów prądu i napięcia

temperatura pracy:  $-10 \div +55^{\circ}\text{C}$

sygnał wyjściowy:  $4 \div 20 \text{ mA}$

zasilanie:  $230 \text{ V AC}, 45 \div 65 \text{ Hz}, \pm 15\%$

#### **Wielofunkcyjny przetwornik do pomiaru pH i przewodnictwa Protos 3400**

Przetwornik wykorzystany jest do pomiaru pH i przewodności cieczy myjącej w przepływie. Protos jest wszechstronnym systemem pomiarowym przeznaczonym do wykonywania pomiarów ciągłych w analizie płynów. Dzięki modułowej budowie system można w prosty sposób dostosować do danego zadania pomiarowego.

Modułowy system pozwala na wykorzystanie przetwornika w wielu konfiguracjach np.: pH/tlenomierz, pH/konduktometr, pH/pH, konduktometr/tlenomierz itp.; konfigurację tę można w dowolnym momencie zmienić na inną w zależności od potrzeb. W moich badaniach wykorzystałam konfigurację pH/konduktometr.

#### Podstawowe dane techniczne

temperatura pracy:  $-20 \div 80^{\circ}\text{C}$

sygnał wyjściowy:  $4 \div 20 \text{ mA}$

zasilanie:  $24 \div 230 \text{ V AC/DC}$

pH: zakres pomiarowy:  $-2,00 \div 16,00$

błąd pomiarowy:  $<0,02$

przewodność: zakres pomiarowy:  $0,000 \mu\text{S} \div 1999 \text{ mS/cm}$

błąd pomiarowy:  $<0,5\%$

## **Magnetoindukcyjny cyfrowy przetwornik przepływu**

Magnetoindukcyjny cyfrowy przetwornik zainstalowany jest na odcinku pomiarowym za pompą zasilającą układ. Czujnik ten przeznaczony jest do pomiaru prędkości przepływu cieczy zanieczyszczonych. Podczas badań wskazuje on prędkość przepływu cieczy nastawionej i ustabilizowanej zgodnie z założeniami planu badań.

### Podstawowe dane techniczne

zakres pomiarowy:	0,05 ÷ 10 m/s
błąd pomiarowy:	2% wartości mierzonej
temperatura pracy:	0 ÷ +60 <sup>0</sup> C
sygnał wyjściowy:	4 ÷ 20 mA
zasilanie:	18 ÷ 32 V AC

## **Tory pomiarowe i rejestracja wielkości mierzonych**

Czujniki, których wielkości pomiarowe ulegały zmianom podczas procesu zostały podłączone do karty pomiarowej. Przy pomocy środowiska programistycznego LabVIEW dane z czujników są odpowiednio przetwarzane, co umożliwia ich rejestrację i wizualizację.

Tory pomiarowe:

I tor pomiarowy: pomiar mętności cieczy myjącej;

II tor pomiarowy: pomiar pH cieczy myjącej;

III tor pomiarowy: pomiar przewodności cieczy myjącej;

Poprawność rejestrowanych pomiarów sprawdzono przez porównanie wyników z wartościami, na cyfrowych wyświetlaczach mierników.

## 7.2. Standardowe zabrudzenie początkowe

W ramach badań, których wyniki opublikowano w pracy [Diakun 2005], przeprowadzono ocenę stopnia zabrudzenia i skuteczności mycia elementów ze stali nierdzewnej. Przebadano cztery czynniki brudzące:

- mleko pasteryzowane o zawartości tłuszczu 2%, o temp. ok. 70°C i ok. 60°C;
- 5% roztwór skrobi o temperaturze pokojowej;
- 12% roztwór cukru o temperaturze pokojowej;
- olej spożywczy o temperaturze pokojowej.

Najtrudniej usuwalnym osadem okazał się osad z mleka gorącego, za względu na wytrącanie się osadów białkowych, mocno przylegających do powierzchni. Na podstawie wspomnianych badań własnych i literatury [Diakun 2005, Schmidt 1997, Bishop 1997] jako czynnik brudzący wybrałam gorące mleko o temp ok. 75°C. Jest to najtrudniej (z badanych zabrudzeń) usuwalny osad.

Ocenie skuteczności mycia poddawano szklany wziernik wraz z umieszczoną w nim płytką ze stali nierdzewnej (Rys. 7.2., Rys. 7.3.).



*Rys. 7.6. Element kontrolny podczas brudzenia i po standardowym zabrudzeniu początkowym*

Proces brudzenia przebiegał następująco. Odcinek kontrolny rury wymontowano z laboratoryjnej stacji mycia CIP i zalano go mlekiem o temperaturze 75<sup>0</sup>C (Rys 7.6.). Tak przygotowany element wstawiono do komory termostatowej na 20 minut, w temperaturze ok. 80<sup>0</sup>C. Czas ten wystarcza do powstania trudno usuwalnego osadu. Po tym czasie element kontrolny opróżniono i poddano osuszaniu w komorze cieplnej w tej samej temperaturze przez okres 2 min. Tak przygotowany wycinek rurociągu zamontowano do instalacji do mycia. Następnie przeprowadzono badawczy proces mycia. Parametry procesu nastawiano zgodnie z planem badań, opisanym w dalszych rozdziałach pracy. Przed każdym cyklem badawczym odcinek rurociągu był dokładnie myty i poddawany kolejnemu procesowi brudzenia.

Powstałe w ten sposób zabrudzenie oceniono metodami, które będą wykorzystywane do oceny stopnia umycia po procesie mycia. Ocena wizualna wskazywała na całkowite zanieczyszczenie powierzchni. Płytką kontrolną ze stali nierdzewnej była pokryta w całości cienką warstwą mleka. Powierzchnia była matowa, w świetle opalizująco-niebieska z wyraźnie widocznym kompleksem białkowo tłuszczowym powstałym na granicy mleka i powietrza.

Po ocenie wizualnej powierzchnię poddano dokładniejszej ocenie testami wymazowymi Pro-tect firmy BIOTRACE. Zaraz po wykonaniu wymazu i umieszczeniu wymazówki w roztworze kontrolnym, nastąpiło zabarwienie roztworu na szaro, a po minucie roztwór zabarwił się na ciemnofioletowy, wskazując dużą zawartość białka na badanej powierzchni (powyżej 500 µg/µl). Producent nakazuje odczytywać stopień zanieczyszczenia powierzchni dokładnie po 10 minutach. Tak intensywne zabarwienie, w tak krótkim czasie, wskazuje na bardzo duże zanieczyszczenie. Zanieczyszczenie to zostało zakwalifikowane jako maksymalne (0 stopień czystości, początkowy stan zabrudzenia) zgodnie ze skalą punktową opisaną w rozdziale 7.3 (Rys. 7.8.).



*Rys. 7.8. Wymarówka zabarwiona w wyniku dużej ilości białka na powierzchni poddanej ocenie*

### 7.3. Metoda i skala oceny skuteczności mycia

Przeprowadzono analizę wielu metod oceny czystości powierzchni (Diakun 2005, Lewicki 2006, Diakun 2011, Piepiórka 2009]. Do oceny skuteczności mycia w tej pracy wybrano metodę szybką, działającą w oparciu o wykrywanie pozostałości białkowych, powodujących zmianę zabarwienia indykatorów i w ten sposób informując o stanie czystości badanej powierzchni. Zastosowana metoda opiera się na reakcji barwnej miedzi i kompleksów białkowych. Do oceny skuteczności mycia wykorzystałam testy Pro-TECT.

Każda tubka Pro-TECT ma wymazówkę i zbiorniczek z jonami miedzi ( $\text{Cu}^+$ ) oraz roztwór kwasu zamknięte w szczelnej ampułce (Rys. 7.9).



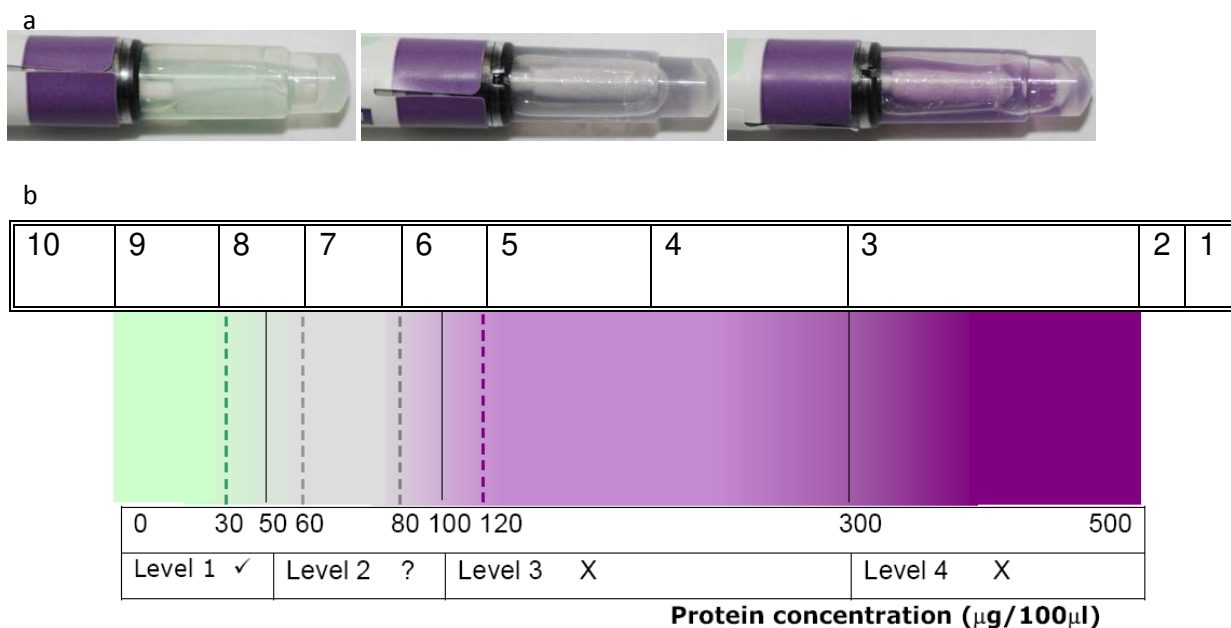
Rys. 7.9. Wymazówka i zbiorniczek z odczynnikami w wymazówkach Pro-TECT

Aby przeprowadzić pomiar, wymazówkę wyjmujemy z opakowania i pobieramy próbkę z badanej powierzchni (ok.  $10 \text{ cm}^2$ ). Próbkę pobierane są z płytki umieszczonej w odcinku kontrolnym (Rys. 7.3.). Następnie wymazówkę wkładamy do tubki i przebijamy nią zbiornik z roztworem. Energicznie wstrząsamy przez ok. 5 s i dokładnie po 10 minutach odczytujemy wynik.

Jeśli badana powierzchnia jest czysta, roztwór na końcu próbnika w ampułce zabarwia się na jasnozielony kolor. Jeśli na wymazówce znajdowało się białko i (lub) cukry, następuje reakcja miedzi z peptydami, wiążąc białko i (lub) cukry, formując kompleks białko-miedz. Roztwór kwasu jest bardzo czułym i stabilnym odczynnikiem reagującym tylko z miedzią  $\text{Cu}^+$ , tworząc fioletowy kompleks w jej obecności. Im więcej białka i (lub) cukru jest na wymazówce, tym intensywniejszy jest kolor fioletowy.

Do oceny skuteczności mycia opracowałam skalę liczbową z punktacją od 0 do 10, opierając się na zaproponowanej przez producenta skali barwnej, wprowadzając

dodatkowe przedziały (Rys. 7.10 b.). Do oceny stosowałam 7 przedziałów barwnych i 2 dodatkowe, w których czas odbarwienia próbki był krótszy niż zalecane 10 minut. Poziom 0 to powierzchnia po zabrudzeniu. Poziom 10 to powierzchnia całkowicie czysta. Dokładne przedziały wykrywalności i przyznaną ilość punktów przedstawia rysunek 7.10 a i b oraz tabela 7.1.



*Rys. 7.10 a) Zabarwienie wymazówek Pro-TECT w zależności od ilości białka i cukrów na testowanej powierzchni. b) Skala zabarwienia odczynnika w zależności od ilości białka na powierzchni*

Tab. 7.1. Zawartość białka i cukrów w zależności od zabarwienia testów Pro-tect

WYNIK TESTU	POZOSTAŁOŚĆ BIAŁKA / CUKRU	OCENA
Całkowita czystość	0 µg/µl	10
Pro-tect ciecz seledynowa	0÷30 µg/µl	9
Pro-tect ciecz seledynowo -szara	30÷60 µg/µl	8
Pro-tect ciecz szara	60÷80 µg/µl	7
Pro-tect ciecz szaro - fioletowa	80÷120 µg/µl	6
Pro-tect ciecz lekko fioletowa	120÷200 µg/µl	5
Pro-tect ciecz fioletowa	200÷300 µg/µl	4
Pro-tect ciecz intensywnie fioletowa po 10 min, widoczne nieliczne wytrącenia białkowe	300÷500 µg/µl	3
Pro-tect ciecz intensywnie fioletowa po 5 min, widoczne liczne wytrącenia białkowe	Powyżej 500 µg/µl	2
Pro-tect ciecz intensywnie fioletowa po 1 min, widoczne wytrącenia białkowe na całej badanej powierzchni	Powyżej 500 µg/µl	1
Stan początkowego zabrudzenia		0

#### 7.4. Plan badań

##### 7.4.1. Określenie zbiorów czynników badanych, stałych, zakłócających i wielkości wynikowych

W trakcie badań prowadzono mycie kontrolnego odcinka badawczego rury. Standardowo brudzony odcinek rury był obiektem badań. Sposób brudzenia został opisany rozdziale 7.2. Mycie następowało przez przepływ cieczy myjącej, wymuszony pompą. W wyniku badań rozpoznawczych określono zbiór czynników badanych (wejściowych), wielkości wyjściowych, parametrów stałych i zakłóceń. Graficznie obiekt badawczy przedstawiono na rysunku 7.11.

Jako czynniki wpływające na proces mycia przyjęto wielkości charakteryzujące wodę jako podstawowy środek myjący, w tym:

- temperaturę jako jeden z głównych czynników procesu mycia;



- warunki przepływu (prędkość i ciśnienie) jako czynniki mechanicznego oddziaływania;
- objętość wody myjącej, aby sprawdzić czy istotny jest wpływ zanieczyszczenia cieczy myjącej na efektywność mycia.

Wielkości wyjściowe podzielono na dwie grupy. Pierwsza to kryteria oceny procesu, a więc:

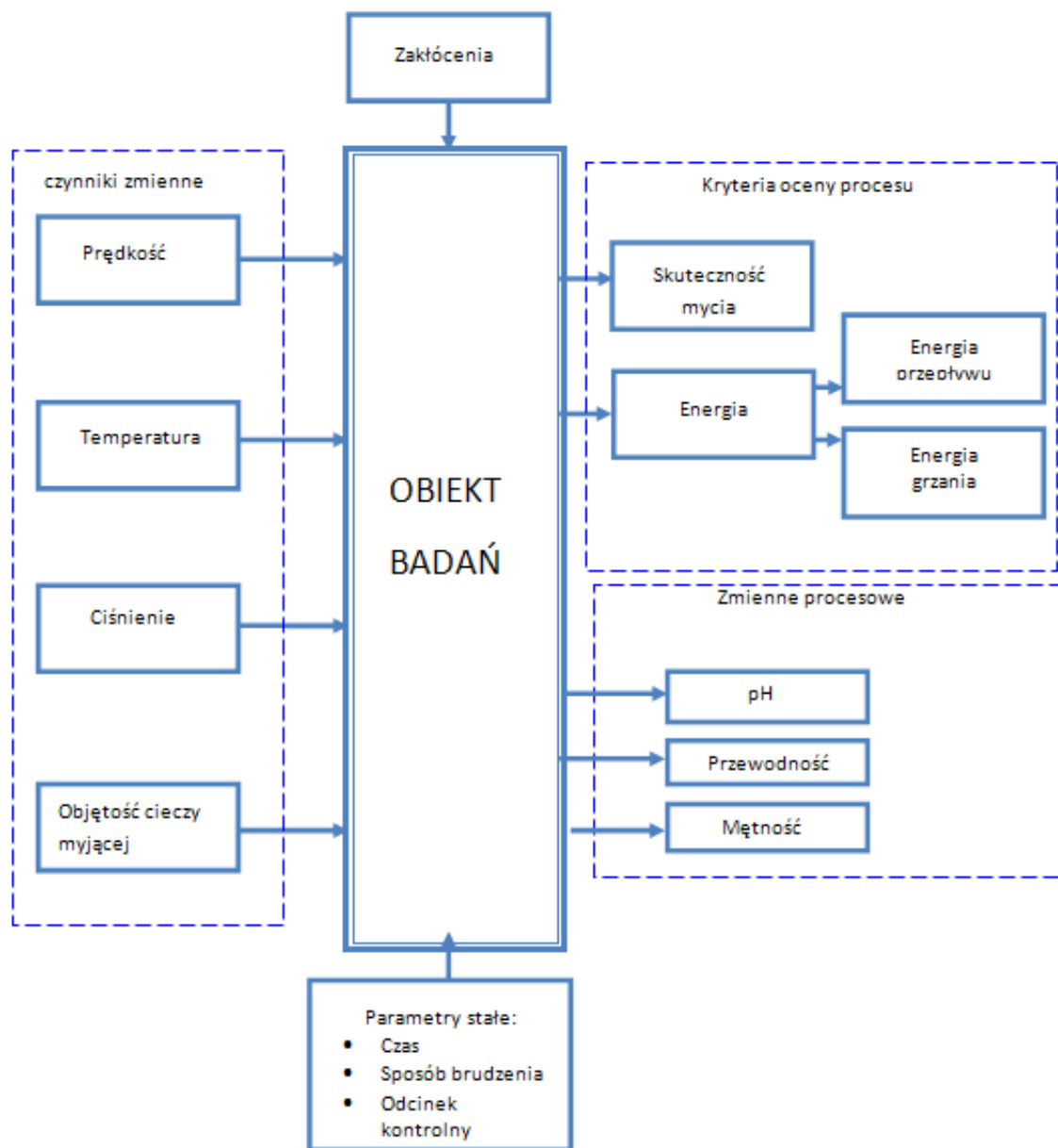
- wskaźnik skuteczności mycia (metoda oceny i skala opisana została w rozdziale 7.3);
- oraz zużycie energii (mierzone niezależnie energię potrzebną do ogrzania wody i energię potrzebną do realizacji procesu mycia).

Druga grupa to wielkości charakteryzujące proces:

- pH;
- mętność;
- przewodność.

Jako parametry, które utrzymywane były jako stałe w trakcie badań były:

- czas prowadzenia procesu mycia – 20 minut;
- odcinek kontrolny;
- sposób brudzenia odcinka kontrolnego.



Rys. 7.11. Obiekt badań

Zasadniczym środkiem myjącym była czysta woda wodociągowa, którą używano w głównym programie badań. Badania przeprowadzono w celu ustalenia wpływu prędkości przepływu ( $w$ ), ciśnienia ( $p$ ), temperatury ( $T$ ) i objętości wody myjącej ( $v$ ), na skuteczność usuwania zabrudzeń z badanej powierzchni. Podczas badań mierzono parametry procesu, parametry cieczy myjącej oraz parametry zasilania.

Jak wykazano, brak jest modeli teoretyczno – analitycznych oraz wyników badań eksperymentalnych, z których można by wnioskować o charakterze oddziaływań mechanicznych. W tym przypadku obiekt badań traktuje się jako „czarną skrzynkę”, a poszukuje się relacji pomiędzy wyjściem i wejściami obiektu. Identyfikację nieliniowego obiektu wielowymiarowego przeprowadzono według algorytmu [Kukielka 2002], w którym etapami są:

- 1) ustalenie przedziału zmienności czynników badanych;
- 2) przyjęcie klasy modelu matematycznego;
- 3) kodowanie czynników badanych;
- 4) wykonanie badań eksperymentalnych;
- 5) wyniki eksperymentu;
- 6) eliminacja wyników obarczonych błędem grubym;
- 7) obliczenie wariancji międzywierszowej i odchylenia standardowego;
- 8) sprawdzenie jednorodności wariancji w próbie;
- 9) obliczenie współczynników w funkcji regresji;
- 10) analiza statystyczna funkcji regresji;
- 11) badanie istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej;
- 12) sprawdzenie adekwatności modelu matematycznego;
- 13) odkodowanie funkcji regresji.

#### 7.4.2. Ustalenie przedziału zmienności czynników badanych

Po określeniu czynników wpływających na obiekt badań określono przedziały zmienności czynników wejściowych. W moim przypadku obszar badań mieści się w granicach zmienności poszczególnych czynników:

- |                        |                   |  |
|------------------------|-------------------|--|
| 1) prędkość przepływu: | $\bar{x}_1 = w :$ | $w = 0,5 \div 2,5$ [m/s];              |
| 2) ciśnienie:          | $\bar{x}_2 = p :$ | $p = 0,5 \div 3,0$ [bar];              |
| 3) temperatura cieczy: | $\bar{x}_3 = T :$ | $T = 10 \div 80$ [°C];                 |
| 4) objętość cieczy:    | $\bar{x}_4 = v :$ | $v = 0,08 \div 1,5$ [m <sup>3</sup> ]. |

Przyjęte zakresy badań wynikały z możliwości technicznych laboratoryjnej stacji mycia oraz z informacji uzyskanych z analizy parametrycznej oferowanych na rynku stacji CIP, literatury oraz z informacji uzyskanych podczas badań przeprowadzonych w zakładach przemysłu spożywczego [Diakun 2006, Diakun 2003, Mierzejewska 2003]. Najczęściej stosowaną i zalecaną przez producentów stacji mycia prędkością przepływu jest prędkość rzędu 1,5 m/s. W badaniach przyjęliśmy ją jako wartość średnią. Prędkość przepływu w badaniach przyjmowała wartości 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 m/s. Zakres ciśnienia obejmuje najniższe ciśnienie jakie można uzyskać na zbudowanej przez nas stacji, czyli 0,5 bar, przez wartości pośrednie, aż do 3 bar. W procesie mycia w systemie CIP, w zakładach przemysłu spożywczego, najczęściej stosowane ciśnienie na linii mycia to ok. 2 bar. Badano skuteczność mycia przy nastawach ciśnienia 0,5; 1,12; 1,75; 2,37; 3,0 bar. Temperatura procesu przyjmowała wartości: 10; 27,5; 45; 62,5; 80°C. Najniższa temperatura, podczas której prowadzono badania, to temperatura wody wodociągowej, bez konieczności podgrzewania. Temperatura 80°C, to najwyższa temperatura jaką można uzyskać ze względów technicznych na moim stanowisku badawczym. Temperatura 45°C to temperatura, podczas której następuje denaturacja białka i tworzenie się trudno usuwalnego osadu. Temperatury pośrednie wynikają z przyjętego planu badań. Poddano również badaniu wpływ objętości wody na skuteczność mycia. Najniższa przyjęta do badań objętość wody wynika z możliwości stanowiska, ponieważ jest to najmniejsza ilość wody, którą należy wlać do zbiornika aby można było ją podgrzewać i realizować proces. Kolejne objętości są jej wielokrotnością i przyjmują wartości: 0,08; 0,095; 0,115; 0,132; 0,15 m<sup>3</sup>.

### 7.4.3. Przyjęcie klasy modelu matematycznego

Funkcja obiektu badań jest nieznana w postaci analitycznej. W wyniku przeprowadzonej analizy czynnikowej ustalono następującą postać jakościową funkcji regresji:

$$\hat{Y} = \hat{Y}(w, p, T, v), \quad (7.1)$$

gdzie:

w – prędkość przepływu;

p – ciśnienie;

T- temperatura;

v– objętość cieczy myjącej.

Określenie klasy modelu matematycznego, dla którego otrzymuje się najlepszy współczynnik korelacji wielowymiarowej dokonywano wykorzystując program EPlanner [Kukiełka 2002a]. Parametry decydujące o jakości procesu mycia, opisywane za pomocą funkcji kwadratowej, mają najlepszy współczynnik korelacji wielowymiarowej  $R^2$ , dlatego też w tym przypadku, do opisu obiektu badań, użyto modelu matematycznego w postaci wielomianu algebraicznego drugiego stopnia z interakcjami podwójnymi:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & b_0 + b_1 \cdot d_2 + b_2 \cdot g + b_3 \cdot w + b_4 \cdot v + b_{11} \cdot d_2^2 + b_{22} \cdot g^2 + b_{33} \cdot w^2 + b_{44} \cdot v^2 \\ & + b_{12} \cdot d_2 \cdot g + b_{13} \cdot d_2 \cdot w + b_{14} \cdot d_2 \cdot v + b_{23} \cdot g \cdot w + b_{24} \cdot g \cdot v + b_{34} \cdot w \cdot v, \end{aligned} \quad (7.2)$$

gdzie:  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$  są poszukiwanymi współczynnikami równania regresji.

### 7.4.4. Kodowanie czynników badanych

Następnym etapem identyfikacji jest kodowanie czynników, które ma na celu uproszczenie zapisu wzorów oraz ułatwienie obliczeń matematycznych. Polega ono na zastąpieniu zmiennych rzeczywistych  $\bar{x}_i$ ,  $i=1 \div 4$ , bezwymiarowymi zmiennymi  $\bar{\bar{x}}_i$ , które w rozpatrywanym przypadku pięciopoziomowego planu eksperymentu przyjmują poziomy:

–  $\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+\alpha$ , gdzie  $\alpha$  jest wartością ramienia gwiazdowego, która w badanym przypadku dla  $S=2$  i rotabilności programu wynosi  $\alpha = 2$ .

Układ współrzędnych rzeczywistych zastępuje się nowym układem, dla którego wartość średnia czynników w starym układzie stanowi początek nowego układu. Sposób normowania zmiennych zależy od klasy przyjętego modelu matematycznego. Dla przyjętego modelu zmienne unormowane oblicza się ze wzoru:

$$\bar{\bar{x}}_i = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_{i0}}{\Delta\bar{x}_i} \quad (7.3)$$

Podstawiając do wzoru (7.3) wartości zmiennych rzeczywistych, zmienne zakodowane przyjmują odpowiednio wartości  $-2$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+2$ . Wartości rzeczywiste i odpowiadające im wartości zakodowane zestawiono w tabeli 7.2.

Tab. 7.2. Wartości zmiennych rzeczywistych i zakodowanych

LP.	POZIOM CZYNNIKA	WARTOŚĆ ZAKODOWANA				WARTOŚĆ RZECZYWISTA			
		$\bar{\bar{x}}_1$	$\bar{\bar{x}}_2$	$\bar{\bar{x}}_3$	$\bar{\bar{x}}_4$	$\bar{w}$	$\bar{p}$	$\bar{v}$	$\bar{T}$
		[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[bar]	[m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	„gwiazdny” górny	+2	+2	+2	+2	2,5	3,0	0,1500	80
2	górny	+1	+1	+1	+1	2,0	2,0	0,1325	62,5
3	centralny	0	0	0	0	1,5	1,5	0,1150	45
4	dolny	-1	-1	-1	-1	1,0	1,0	0,0975	27,5
5	„gwiazdny” dolny	-2	-2	-2	-2	0,5	0,5	0,8000	10

Po podstawieniu do modelu (7.2) wartości  $\bar{\bar{x}}_i$  według wzoru:  $\bar{x}_i = \bar{x}_{i0} + \bar{\bar{x}}_i \Delta\bar{x}_i$ , wyznaczonej ze wzoru (7.3) otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
\hat{Y} = & b_0 + b_1 \cdot (\bar{x}_{10} + \bar{\bar{x}}_1 \cdot \Delta\bar{x}_1) + b_2 \cdot (\bar{x}_{20} + \bar{\bar{x}}_2 \cdot \Delta\bar{x}_2) + b_3 \cdot (\bar{x}_{30} + \bar{\bar{x}}_3 \cdot \Delta\bar{x}_3) \\
& + b_4 \cdot (\bar{x}_{40} + \bar{\bar{x}}_4 \cdot \Delta\bar{x}_4) + b_{12} \cdot (\bar{x}_{10} + \bar{\bar{x}}_1 \cdot \Delta\bar{x}_1) \cdot (\bar{x}_{20} + \bar{\bar{x}}_2 \cdot \Delta\bar{x}_2) \\
& + b_{13} \cdot (\bar{x}_{10} + \bar{\bar{x}}_1 \cdot \Delta\bar{x}_1) \cdot (\bar{x}_{30} + \bar{\bar{x}}_3 \cdot \Delta\bar{x}_3) + b_{14} \cdot (\bar{x}_{10} + \bar{\bar{x}}_1 \cdot \Delta\bar{x}_1) \cdot (\bar{x}_{40} + \bar{\bar{x}}_4 \cdot \Delta\bar{x}_4) \\
& + b_{23} \cdot (\bar{x}_{20} + \bar{\bar{x}}_2 \cdot \Delta\bar{x}_2) \cdot (\bar{x}_{30} + \bar{\bar{x}}_3 \cdot \Delta\bar{x}_3) + b_{24} \cdot (\bar{x}_{20} + \bar{\bar{x}}_2 \cdot \Delta\bar{x}_2) \cdot (\bar{x}_{40} + \bar{\bar{x}}_4 \cdot \Delta\bar{x}_4) \\
& + b_{34} \cdot (\bar{x}_{30} + \bar{\bar{x}}_3 \cdot \Delta\bar{x}_3) \cdot (\bar{x}_{40} + \bar{\bar{x}}_4 \cdot \Delta\bar{x}_4) + b_{11} \cdot (\bar{x}_{10} + \bar{\bar{x}}_1 \cdot \Delta\bar{x}_1)^2 + b_{22} \cdot (\bar{x}_{20} + \bar{\bar{x}}_2 \cdot \Delta\bar{x}_2)^2 \\
& + b_{33} \cdot (\bar{x}_{30} + \bar{\bar{x}}_3 \cdot \Delta\bar{x}_3)^2 + b_{44} \cdot (\bar{x}_{40} + \bar{\bar{x}}_4 \cdot \Delta\bar{x}_4)^2.
\end{aligned} \tag{7.4}$$

Natomiast po uporządkowaniu równania (7.4) względem zmiennej  $\bar{\bar{x}}_i$ , otrzymuje się następujące równanie w postaci zakodowanej:

a) w zapisie macierzowym:

$$\{\hat{Y}\} = [\bar{\bar{X}}] \cdot \{\mathbf{k}\}, \tag{7.5}$$

b) w zapisie rozwiniętym:

$$\begin{aligned}
\hat{Y} = & k_0 + k_1 \cdot \bar{\bar{x}}_1 + k_2 \cdot \bar{\bar{x}}_2 + k_3 \cdot \bar{\bar{x}}_3 + k_4 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + k_{12} \cdot \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_2 + k_{13} \cdot \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_3 + k_{14} \cdot \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + k_{23} \cdot \bar{\bar{x}}_2 \cdot \bar{\bar{x}}_3 \\
& + k_{24} \cdot \bar{\bar{x}}_2 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + k_{34} \cdot \bar{\bar{x}}_3 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + k_{11} \cdot (\bar{\bar{x}}_1)^2 + k_{22} \cdot (\bar{\bar{x}}_2)^2 + k_{33} \cdot (\bar{\bar{x}}_3)^2 + k_{44} \cdot (\bar{\bar{x}}_4)^2 = \\
= & k_0 + \sum_{i=1}^{S=4} k_i \cdot \bar{\bar{x}}_i + \sum_{i=1}^{S=4} k_i \cdot \bar{\bar{x}}_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^{S=4} k_{ij} \cdot \bar{\bar{x}}_i \cdot \bar{\bar{x}}_j.
\end{aligned} \tag{7.6}$$

#### 7.4.5. Plan eksperymentu

Badania przeprowadzono zgodnie z planem statystycznym zdeterminowanym pięciopoziomowym, rotabilnym [Kukiełka 2002a, Kukiełka 2002]. Realizacja programu kompozycyjnego pięciopoziomowego PS/DS-P: $\lambda$  wymaga wykonania pomiarów dla:

- szesnastu układów ( $n_k = 2^S = 2^4 = 16$ ) w górnym i dolnym poziomie programu;
- ośmiu układów w „punktach gwiazdnych” ( $n_\alpha = 2 \cdot S = 2 \cdot 4 = 8$ );
- siedmiu pomiarów paralelnych dla układu w „centrum” programu ( $n_o = 7$ ).

Macierz planu eksperymentu wraz z wartościami rzeczywistymi i zakodowanymi zmiennych wygenerowane w programie EPlanner zestawiono w tabeli na rys.7.3.

Na podstawie 31 doświadczeń wyznacza się 15 nieznanymi współczynników  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_{11}, k_{22}, k_{33}, k_{44}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{23}, k_{24}, k_{34}$  modelu matematycznego (7.4).

Tab. 7.3. Pięciopoziomowy plan eksperymentu dla zmiennych zakodowanych i rzeczywistych

LP.	PLAN EKSPERYMENTU DLA ZMIENNYCH				PLAN EKSPERYMENTU DLA ZMIENNYCH			
	$\bar{x}_1 = \bar{w}$	$\bar{x}_2 = \bar{p}$	$\bar{x}_3 = \bar{v}$	$\bar{x}_4 = \bar{T}$	$\bar{w}$	$\bar{p}$	$\bar{v}$	$\bar{T}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[bar]	[m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	-1	-1	-1	-1	1	1,125	0,0975	27,5
2	+1	-1	-1	-1	2	1,125	0,0975	27,5
3	-1	+1	-1	-1	1	2,375	0,0975	27,5
4	+1	+1	-1	-1	2	2,375	0,0975	27,5
5	-1	-1	+1	-1	1	1,125	0,1325	27,5
6	+1	-1	+1	-1	2	1,125	0,1325	27,5
7	-1	+1	+1	-1	1	2,375	0,1325	27,5
8	+1	+1	+1	-1	2	2,375	0,1325	27,5
9	-1	-1	-1	+1	1	1,125	0,0975	62,5
10	+1	-1	-1	+1	2	1,125	0,0975	62,5
11	-1	+1	-1	+1	1	2,375	0,0975	62,5
12	+1	+1	-1	+1	2	2,375	0,0975	62,5
13	-1	-1	+1	+1	1	1,125	0,1325	62,5
14	+1	-1	+1	+1	2	1,125	0,1325	62,5
15	-1	+1	+1	+1	1	2,375	0,1325	62,5
16	+1	+1	+1	+1	2	2,375	0,1325	62,5
17	+2	0	0	0	2,5	1,75	0,115	45
18	-2	0	0	0	0,5	1,75	0,115	45
19	0	+2	0	0	1,5	3	0,115	45
20	0	-2	0	0	1,5	0,5	0,115	45
21	0	0	+2	0	1,5	1,75	0,15	45
22	0	0	-2	0	1,5	1,75	0,08	45
23	0	0	0	+2	1,5	1,75	0,115	80
24	0	0	0	-2	1,5	1,75	0,115	10
25	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45
26	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45
27	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45
28	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45
29	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45
30	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45
N=31	0	0	0	0	1,5	1,75	0,115	45



## 8. Wyniki badań i ich analiza

### 8.1. Funkcje regresji i analiza istotności

#### 8.1.1. Analiza statystyczna wyników badań

W tej części pracy pokazano obliczenia statystyczne na przykładzie zużycia energii całkowitej. Obliczenia dla pozostałych czynników wynikowych przeprowadzono analogicznie. W tabeli 8.1. zamieszczono wyniki pomiaru energochłonności procesu.

Tab. 8.1. Wyniki pomiarów energochłonności procesu mycia

Energochłonności procesu mycia				
Lp.	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	Średnia $\bar{y}$
1	2,55	2,5	2,54	2,53
2	2,82	2,88	2,85	2,85
3	2,34	2,36	2,32	2,34
4	2,48	2,46	2,59	2,51
5	2,93	2,83	2,91	2,89
6	3,39	3,38	3,34	3,37
7	3,06	3,11	3,13	3,1
8	3,42	3,38	3,4	3,4
9	7,83	7,9	7,82	7,85
10	7,69	7,65	7,67	7,67
11	6,97	6,96	7,04	6,99
12	7,78	7,85	7,8	7,81
13	9,54	9,57	9,6	9,57
14	9,71	9,62	9,68	9,67
15	9,02	9,07	9,03	9,04
16	10,09	10,11	10,04	10,08

Energochłonności procesu mycia				
Lp.	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	Średnia $\bar{y}$
17	6,98	6,85	6,9	6,91
18	5,70	5,72	5,74	5,72
19	5,65	5,64	5,69	5,66
20	5,95	5,93	5,88	5,92
21	6,83	6,86	6,8	6,83
22	4,42	4,38	4,43	4,41
23	11,53	11,6	11,58	11,57
24	0,46	0,50	0,48	0,48
25	5,77	5,7	5,69	5,72
26	5,52	5,54	5,59	5,55
27	5,6	5,58	5,62	5,6
28	5,73	5,68	5,75	5,72
29	5,82	5,84	5,86	5,84
30	5,68	5,66	5,7	5,68
31	5,67	5,71	5,72	5,7

#### 8.1.2. Eliminacja wyników obarczonych błędem grubym

W celu eliminacji wyników obarczonych błędem grubym wartości wyjściowe obiektu poszczególnych prób zostały uporządkowane w ciąg niemalejący (Tab. 8.2). Ze względu na brak znajomości rozkładu  $\mu$  i  $\sigma$ , dla weryfikacji hipotezy  $K^+$  oraz  $K^-$  zastosowano odpowiednio statystyki:  $B^{6+}$  i  $B^{6-}$ , które obliczono ze wzorów:

$$B_6^+ = \frac{y_{i3} - y_{i2}}{y_{i3} - y_{i1}}, \quad B_6^- = \frac{y_{i1} - y_{i2}}{y_{i3} - y_{i1}}. \quad (8.1)$$

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 8.2. Wartość krytyczna statystyki  $b_6^+$  odczytana z tablic statystycznych, na poziomie istotności  $\alpha=0,05$  oraz dla liczby powtórzeń  $r=3$  wynosi  $b_6^+=0,941$ . Wszystkie wiersze macierzy wyników spełniają warunek  $B_{6i}^+ \leq b_6^+(0,05;3)$ , zatem nie ma podstaw do odrzucenia maksymalnych wartości wyników eksperymentu otrzymanych dla poszczególnych punktów planu. Podobnie, ponieważ spełniony jest warunek  $B_{6i}^- \geq b_6^-(0,05;3)$  nie ma podstaw do odrzucenia minimalnych wartości wyników.

Tab. 8.2. Uporządkowane wyniki eksperymentu oraz statystyki  $B_6^+$  i  $B_6^-$

LP.	CIĄG NIEMALEJĄCY WYNIKÓW POMIARU			STATYSTYKI	
				$B_6^+$	$B_6^-$
1	2,5	2,54	2,55	0,200	-0,800
2	2,82	2,85	2,88	0,500	-0,500
3	2,32	2,34	2,36	0,500	-0,500
4	2,46	2,48	2,59	0,846	-0,154
5	2,83	2,91	2,93	0,200	-0,800
6	3,34	3,38	3,39	0,200	-0,800
7	3,06	3,11	3,13	0,286	-0,714
8	3,38	3,4	3,42	0,500	-0,500
9	7,82	7,83	7,9	0,875	-0,125
10	7,65	7,67	7,69	0,500	-0,500
11	6,96	6,97	7,04	0,875	-0,125
12	7,78	7,8	7,85	0,714	-0,286
13	9,54	9,57	9,6	0,500	-0,500
14	9,62	9,68	9,71	0,333	-0,667
15	9,02	9,03	9,07	0,800	-0,200
16	10,04	10,09	10,11	0,286	-0,714
17	6,85	6,9	6,98	0,615	-0,385
18	5,70	5,72	5,74	0,500	-0,500

<b>19</b>	5,64	5,65	5,69	0,800	-0,200
<b>20</b>	5,88	5,93	5,95	0,286	-0,714
<b>21</b>	6,8	6,83	6,86	0,500	-0,500
<b>22</b>	4,38	4,42	4,43	0,200	-0,800
<b>23</b>	11,53	11,58	11,6	0,286	-0,714
<b>24</b>	0,46	0,48	0,50	0,500	-0,500
<b>25</b>	5,69	5,7	5,77	0,875	-0,125
<b>26</b>	5,52	5,54	5,59	0,714	-0,286
<b>27</b>	5,58	5,6	5,62	0,500	-0,500
<b>28</b>	5,68	5,73	5,75	0,286	-0,714
<b>29</b>	5,82	5,84	5,86	0,500	-0,500
<b>30</b>	5,66	5,68	5,70	0,500	-0,500
<b>31</b>	5,67	5,71	5,72	0,200	-0,800

### 8.1.3. Wariancja międzywierszowa i odchylenie standardowe

Wariancję międzywierszową i odchylenie standardowe obliczono wykorzystując wzory:

$$s_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^{r=3} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad (8.2)$$

$$s_i = \sqrt{s_i^2}, \quad (8.3)$$

gdzie:

$r$  – liczba powtórzeń doświadczenia w poszczególnych punktach planu ( $r = 3$ );

$i = N$  – liczba punktów planu ( $N = 31$ );

$\bar{y}_i$  - średnia wartość wyjść dla  $i$ - tego punktu planu.

Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli pomocniczej (Tab. 8.5.).

#### 8.1.4. Sprawdzenie jednorodności wariancji w próbie

Jednorodność wariancji dla poszczególnych punktów badań sprawdzono za pomocą testu Cochra. Test ten, stosuje się w przypadkach, gdy liczba powtórzeń doświadczeń była identyczna dla wszystkich punktów planu. Wartość testu obliczano ze wzoru:

$$G = \frac{s_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^{31} s_i^2}, \quad (8.4)$$

gdzie:  $s_{i\max}^2$  - maksymalna wartość wariancji ze zbioru wszystkich wariancji;

$\sum_{i=1}^{31} s_i^2$  - suma wszystkich wariancji.

Ponieważ  $s_{i\max}^2 = 0,0049$  i  $\sum_{i=1}^{31} s_i^2 = 0,039$ , stąd  $G = 0,12564$ . Nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o jednorodności wariancji, gdy  $G \leq G_{kr(\alpha; k; \nu)}$ , gdzie:  $G_{kr}$  - wartość krytyczna testu Cochra,  $k = N = 31$ ,  $\nu = r - 1 = 2$  - liczba stopni swobody. W tym przypadku zachodzi nierówność  $G = 0,12564 \leq G_{kr(\alpha=0,05; k=31; \nu=2)} = 0,19396$  zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o jednorodności wariancji.

#### 8.1.5. Obliczenie współczynników funkcji regresji

Nieznane współczynniki funkcji regresji oblicza się ze wzoru:

$$\{\mathbf{k}\} = ([\tilde{\mathbf{X}}]^T \cdot [\tilde{\mathbf{X}}])^{-1} \cdot [\tilde{\mathbf{X}}]^T \cdot \{\bar{\mathbf{Y}}\}, \quad (8.5)$$

gdzie:

$[\tilde{\mathbf{X}}]$  – macierz planu eksperymentu;

$([\tilde{\mathbf{X}}]^T \cdot [\tilde{\mathbf{X}}])^{-1}$  - macierz kowariancji;

$\{\bar{\mathbf{Y}}\}$  - wektor średnich wyników eksperymentu.

Wykonując poszczególne operacje otrzymano jako rozwiązanie 15 nieznanych

współczynników równania (Tab. 8.3.).

Tab. 8.3. Współczynniki równania regresji na zużycie energii

<b>Współczynnik</b>	<b>k<sub>0</sub></b>	<b>k<sub>1</sub></b>	<b>k<sub>2</sub></b>	<b>k<sub>3</sub></b>	<b>k<sub>4</sub></b>	<b>k<sub>12</sub></b>	<b>k<sub>13</sub></b>	<b>k<sub>14</sub></b>
<b>Wartość współczynnika</b>	5,5849	0,2264	-0,0681	0,6416	2,8239	0,1015	0,0502	0,0327
<b>Współczynnik</b>	<b>k<sub>23</sub></b>	<b>k<sub>24</sub></b>	<b>k<sub>34</sub></b>	<b>k<sub>11</sub></b>	<b>k<sub>22</sub></b>	<b>k<sub>33</sub></b>	<b>k<sub>44</sub></b>	
<b>Wartość współczynnika</b>	0,0865	-0,0335	0,3452	0,1208	-0,0106	-0,0532	0,0482	

Funkcja regresji w postaci zakodowanej opisująca zużycie energii w zależności od wybranych warunków procesu mycia w systemie CIP przybiera postać zakodowaną:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \Delta \hat{E} = & 5,5849 + 0,2264 \bar{x}_1 - 0,0681 \bar{x}_2 + 0,6416 \bar{x}_3 + 2,8239 \bar{x}_4 + 0,1015 \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 + \\ & 0,0502 \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 + 0,0327 \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 + 0,0865 \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 - 0,0335 \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 + 0,3452 \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 + \\ & 0,1208 \bar{x}_1^2 - 0,0106 \bar{x}_2^2 - 0,0532 \bar{x}_3^2 + 0,0482 \bar{x}_4^2. \end{aligned} \quad (8.6)$$

### 8.1.6. Analiza statystyczna funkcji regresji

Istotność każdego współczynnika w funkcji regresji sprawdzano niezależnie wykorzystując do tego celu test t - Studenta. Jeżeli  $t_i < t_{kr(\alpha;f)}$ , gdzie  $t_{kr(\alpha;f)}$  jest wartością krytyczną, następuje odrzucenie hipotezy o nieistotności współczynników regresji, tzn., że współczynniki regresji mają wpływ istotny na czynnik wynikowy. Jeśli  $t_i \geq t_{kr(\alpha;f)}$  następuje przyjęcie hipotezy o nieistotności współczynników regresji. Współczynniki te można pominąć. Liczbę stopni swobody obliczono z zależności:

$$f = N - L - 1, \quad (8.7)$$

gdzie:

N - liczba doświadczeń w planie eksperymentu  $N = 31$ ;

L – liczba wyrazów równania regresji łącznie z wyrazem wolnym  $L = 15$ .

Badanie istotności współczynnika  $k_k$  równania wykonujemy obliczając funkcję testową:

$$t = \frac{|k_k| \cdot \sqrt{N}}{\hat{S}_{y-\hat{y}}}, \quad (8.8)$$

gdzie:

$k_k$  – obliczony współczynnik równania regresji;

$\hat{S}_{y-\hat{y}}$  - wariancja resztowa współczynników równania regresji, obliczana ze wzoru:

$$\hat{S}_{y-\hat{y}} = \frac{1}{N-L-1} \sum_{n=1}^{31} (y_n - \hat{y}_n)^2, \quad (8.9)$$

gdzie:

$y_n - \hat{y}_n$  - odchylenie wyjścia modelu od wyjścia obiektu.

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu PLANEKS-STAT. Wartości testów t-Studenta oraz wartości współczynników równania regresji z zaznaczeniem nieistotnych zestawiono w tabeli 8.4.

Tab. 8.4. Współczynniki równania regresji na zużycie energii oraz wartości testu t-Studenta

Współczynnik	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_{12}$	$k_{13}$	$k_{14}$
Wartość współczynnika	5.684868	0.226443	-0.068085	0.641611	2.823947	0.101458	0.05028	0.0308
Wartość testu t-Studenta	161.3739	11.90938	3.580842	33.74450	148.52105	4.353373	2.15439	1.4049
Współczynnik	$k_{23}$	$k_{24}$	$k_{34}$	$k_{11}$	$k_{22}$	$k_{33}$	$k_{44}$	
Wartość współczynnika	0.086458	-0.03354	0.345208	0.120816	-0.010644	-0.053212	0.04820	
Wartość testu t-Studenta	3.709754	1.439206	14.81217	6.927356	0.610326	3.051099	2.76364	

Ponieważ w przypadku funkcji regresji  $E$  współczynniki  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_{12}, k_{13}, k_{23}, k_{34}, k_{11}, k_{22}, k_{33}, k_{44}$ , są większe od wartości krytycznej  $t_{kr(\alpha=0,05;f=15)} = 2,1315$  to odpowiednie współczynniki regresji są istotne, natomiast pozostałe współczynniki ( $k_{14}, k_{24}, k_{22}$ ) są nieistotne i można je pominąć. Równanie regresji po uwzględnieniu czynników nieistotnych ma następującą postać zakodowaną:

$$\begin{aligned} \widehat{Y} = E = & 5,56849 + 0,2264 \bar{\bar{x}}_1 - 0,0681 \bar{\bar{x}}_2 + 0,6416 \cdot \bar{\bar{x}}_3 + 2,8239 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + 0,1015 \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_2 + 0,0502 \cdot \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_3 \\ & + 0,0327 \cdot \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + 0,0865 \bar{\bar{x}}_2 \cdot \bar{\bar{x}}_3 - 0,0335 \bar{\bar{x}}_2 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + 0,3452 \bar{\bar{x}}_3 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + 0,1208 \bar{\bar{x}}_1^2 - 0,0106 \cdot \bar{\bar{x}}_2^2 \\ & - 0,0532 \cdot \bar{\bar{x}}_3^2 + 0,0482 \cdot \bar{\bar{x}}_4^2. \end{aligned} \quad (8.10)$$

gdzie wyrazy podkreślone w równaniu są nieistotne w sensie statystycznym na przyjętym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

### 8.1.7. Badanie współczynnika korelacji wielowymiarowej

Miarą stopnia dopasowania otrzymanych wyników w postaci równania regresji do wyników eksperymentu jest badanie współczynnika korelacji wielowymiarowej, określony równaniem:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2}}, \quad (8.11)$$

gdzie:

$\hat{y}_i$  - wartość wyjścia modelu, obliczona z równania regresji;

$\bar{y}_i$  - średnia wartość wyjścia dla  $i$ -tej doświadczenia dla  $r$  powtórzeń;

$\bar{\bar{y}}$  - wartość średnia wyjścia obiektu dla  $n$  doświadczeń.

Istotność otrzymanego współczynnika korelacji wielowymiarowej sprawdzono wykorzystując test F Snedecora, oparty na analizie wariancji w równaniu regresji, na podstawie wzoru:

$$F = \frac{N-L}{L-1} \frac{R^2}{1-R^2}, \quad (8.12)$$

gdzie:

N - liczba doświadczeń w planie eksperymentu  $N = 31$ ,

L – liczba wyrazów równania regresji łącznie z wyrazem wolnym  $L = 15$ .

Obliczenie współczynnika korelacji wielowymiarowej oraz sprawdzenie jego istotności wymagało:

a) obliczenia wartości wyjść modelu bez pomijania współczynników nieistotnych (Tab. 8.5.) wartości wyjść modelu,

b) obliczenia wartości współczynnika korelacji wielowymiarowej:

- obliczenie średniej wartości wyjścia obiektu dla N doświadczeń (Tab. 8.5.) ze wzoru:

$$\bar{\bar{y}} = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} \bar{y}_i, \quad (8.13)$$

- obliczenie średniej wartości wyjścia modelu dla n doświadczeń (Tab. 8.5.) ze wzoru:

$$\hat{\bar{y}} = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} \hat{y}_i, \quad (8.14)$$

- sprawdzenie równości wartości średnich wyjść obiektu i modelu:

$$\bar{\bar{y}} = 5,773 \approx \hat{\bar{y}} = 5,766, \quad (8.15)$$

- obliczenie wariancji resztowej, która jest sumą kwadratów różnic wyjść modelu i obiektu, dla poszczególnych punktów planu (Tab. 8.5.):

$$S_R = \sum \hat{s}_{y-\hat{y}} = 0,7279,$$

- obliczenie sumy kwadratów różnic wyjść obiektu dla poszczególnych punktów planu (Tab. 8.5.):

$$\sum_{i=1}^{31} (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2 = 206,7559.$$



- obliczenie wartości współczynnika korelacji wielowymiarowej:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{31} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{31} (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2}} = \sqrt{1 - \frac{0,7279}{206,7559}} = 0,99824$$

- obliczenie wartości testu F Snedecora dla danych:  $N = 31, L = 15, R = 0,99824$  :

$$F = \frac{N-L}{L-1} \frac{R^2}{1-R^2} = \frac{31-15}{15-1} \frac{(0,99824)^2}{1-(0,99824)^2} = 316,3016,$$

- odczytanie wartości krytycznej testu F Snedecora z tablic, dla

$\alpha = 0,05, r_1 = L - 1 = 15 - 1 = 14, r_2 = N - L = 31 - 15 = 16$ , otrzymano

$$F_{kr(\alpha=0,05;r_1=14;r_2=16)} = 2,37.$$

Tab. 8.5. Tablica obliczeń pomocniczych

Lp.	Wariancja między-wierszowa $S_i^2$	Odchylenie standardowe $S_i$	Wartość średnia wyjść modelu $\hat{y}_i$	$\bar{y}_{0i}$	$(\bar{y}_{0i} - \bar{y}_0)$	Wartość średnia wyjść obiektu $\bar{y}_i$	$\hat{y}_i - \bar{y}_i$	$(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$\bar{y}_i - \bar{\bar{y}}$	$(\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2$
1	0,0007	0,0265	2.749	-	-	2,53	0,21	0,0479	-3,243	10,5170
2	0,0009	0,0300	2.833	-	-	2,85	-	0,0002	-2,923	8,5439
3	0,0004	0,0200	2.304	-	-	2,34	-	0,0013	-3,433	11,7855
4	0,0049	0,0700	3.068	-	-	2,89	0,17	0,0316	-2,883	8,3117
5	0,0028	0,0529	7.708	-	-	7,85	-	0,0201	2,077	4,3139
6	0,0007	0,0265	9.175	-	-	9,04	0,13	0,0182	3,267	10,6733
7	0,0013	0,0361	9.824	-	-	9,67	0,15	0,0237	3,897	15,1866
8	0,0004	0,0200	7.749	-	-	7,81	-	0,0037	2,037	4,1494
9	0,0019	0,0436	3.660	-	-	3,4	0,26	0,0676	-2,373	5,6311
10	0,0004	0,0200	9.408	-	-	9,57	-	0,0262	3,797	14,4172
11	0,0019	0,0436	7.129	-	-	6,99	0,13	0,0193	1,217	1,4811
12	0,0013	0,0361	3.353	-	-	3,37	-	0,0002	-2,403	5,7744

13	0,0009	0,0300	2.794	-	-	2,51	0,28	0,0806	-3,263	10,6472
14	0,0021	0,0458	2.969	-	-	3,1	-	0,0171	-2,673	7,1449
15	0,0007	0,0265	7.923	-	-	7,67	0,25	0,0640	1,897	3,5986
16	0,0013	0,0361	9.996	-	-	10,08	-	0,0070	4,307	18,5502
17	0,0043	0,0656	5.685	5,72	0,0011	5,72	-	0,0012	-0,053	0,0028
18	0,0004	0,0200	5.685	5,55	0,0188	5,55	0,13	0,0182	-0,223	0,0497
19	0,0007	0,0265	5.685	5,6	0,0076	5,6	0,08	0,0072	-0,173	0,0299
20	0,0013	0,0361	5.685	5,72	0,0011	5,72	-	0,0012	-0,053	0,0028
21	0,0009	0,0300	5.685	5,84	0,0234	5,84	-	0,0240	0,067	0,0045
22	0,0007	0,0265	5.685	5,68	0,0000	5,68	0,00	0,0000	-0,093	0,0086
23	0,0013	0,0361	5.685	5,7	0,0002	5,7	-	0,0002	-0,073	0,0053
24	0,0004	0,0200	5.715			5,72	-	0,0000	-0,053	0,0028
25	0,0019	0,0436	6.621	-	-	6,91	-	0,0835	1,137	1,2928
26	0,0013	0,0361	5.778	-	-	5,92	-	0,0201	0,147	0,0216
27	0,0004	0,0200	5.506	-	-	5,66	-	0,0237	-0,113	0,0128
28	0,0013	0,0361	4.189	-	-	4,41	-	0,0488	-1,363	1,8578
29	0,0004	0,0200	6.755	-	-	6,83	-	0,0056	1,057	1,1172
30	0,0004	0,0200	0.230	-	-	0,48	-0,25	0,0625	-5,293	28,0158
31	0,0007	0,0265	11.526	-	-	11,57	-	0,0019	5,797	33,6052
	0,039		$\hat{y} = 5,766$	$\bar{y} = 5,6$	$S_E = 0,05214$	$\bar{y} = 5,773$		$S_R = 0,72790$		206,7559

Ponieważ  $F = 316,3 > F_{kr(\alpha=0,05; r_1=14; r_2=16)} = 2,37$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej. Oznacza to również, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o prawdziwości współczynników funkcji regresji.

### 8.1.8. Sprawdzenie adekwatności modelu matematycznego

Ocenę adekwatności modelu matematycznego do obiektu rzeczywistego sprawdzono testem F, który oblicza się ze wzoru:

$$F = \frac{\frac{S_{LF}}{f_{LF}}}{\frac{S_E}{f_E}}, \quad (8.16)$$

gdzie:

$$S_R - \text{wariancja resztowa: } S_R = \sum_{i=1}^{31} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 = 0,72790 \text{ (Tab. 8.5),}$$

$$S_E - \text{wariancja adekwatności: } S_E = \sum_{i=17}^{23} (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2 = 0,05214 \text{ (Tab. 8.5),}$$

przy czym wariancja  $S_{LF}$  jest obliczana ze wzoru:  $S_{LF} = S_R - S_E$ , natomiast  $\bar{y}_i$  jest i-tym średnim wyjściem obiektu,  $\hat{y}_i$  - wartość średnia i-tego wyjścia modelu,

$$S_{LF} = 0,7279 - 0,05214 = 0,67576.$$

Liczbę stopni swobody wariancji  $S_{LF}$  obliczono ze wzoru:  $f_{LF} = N - L - n_0 - 1 = 31 - 15 - 7 - 1 = 8$ , natomiast liczbę stopni swobody wariancji adekwatności:  $f_E = n_0 - 1 = 7 - 1 = 6$ ,

stąd:

$$F = \frac{\frac{S_{LF}}{f_{LF}}}{\frac{S_E}{f_E}} = \frac{\frac{0,67576}{8}}{\frac{0,05214}{6}} = 9,746. \quad (8.17)$$

Wartość testu F porównuje się z wartością krytyczną testu  $F_{kr(\alpha; f_{LF}; f_E)}$ . Wartość ta odczytana z tablic statystycznych dla  $\alpha=0,05$ ,  $f_{LF}=8$ ,  $f_E=6$  wynosi  $F_{kr(\alpha=0,05; f_{LF}=8; f_E=6)} = 4,15$ . Ponieważ zachodzi nierówność  $F = 9,746 > F_{kr(\alpha=0,05; f_{LF}=8; f_E=6)} = 4,15$

następuje przyjęcie hipotezy o adekwatności funkcji regresji na przyjętym poziomie istotności.

### 8.1.9. Odkodowanie funkcji regresji

W celu odkodowania funkcji regresji (8.10) wykorzystuje się relacje kodowe według wzoru (7.3). Po odpowiednim podstawieniu otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{E} = & k_0 + k_1 \cdot \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_{10}}{\Delta \bar{x}_1} \right) + k_2 \cdot \left( \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_{20}}{\Delta \bar{x}_2} \right) + k_3 \cdot \left( \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_{30}}{\Delta \bar{x}_3} \right) + k_4 \cdot \left( \frac{\bar{x}_4 - \bar{x}_{40}}{\Delta \bar{x}_4} \right) \\ & + k_{12} \cdot \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_{10}}{\Delta \bar{x}_1} \right) \cdot \left( \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_{20}}{\Delta \bar{x}_2} \right) + k_{13} \cdot \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_{10}}{\Delta \bar{x}_1} \right) \cdot \left( \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_{30}}{\Delta \bar{x}_3} \right) + k_{14} \cdot \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_{10}}{\Delta \bar{x}_1} \right) \cdot \left( \frac{\bar{x}_4 - \bar{x}_{40}}{\Delta \bar{x}_4} \right) \\ & + k_{23} \cdot \left( \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_{20}}{\Delta \bar{x}_2} \right) \cdot \left( \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_{30}}{\Delta \bar{x}_3} \right) + k_{24} \cdot \left( \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_{20}}{\Delta \bar{x}_2} \right) \cdot \left( \frac{\bar{x}_4 - \bar{x}_{40}}{\Delta \bar{x}_4} \right) + k_{34} \cdot \left( \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_{30}}{\Delta \bar{x}_3} \right) \cdot \left( \frac{\bar{x}_4 - \bar{x}_{40}}{\Delta \bar{x}_4} \right) \\ & + k_{11} \cdot \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_{10}}{\Delta \bar{x}_1} \right)^2 + k_{22} \cdot \left( \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_{20}}{\Delta \bar{x}_2} \right)^2 + k_{33} \cdot \left( \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_{30}}{\Delta \bar{x}_3} \right)^2 + k_{44} \cdot \left( \frac{\bar{x}_4 - \bar{x}_{40}}{\Delta \bar{x}_4} \right)^2, \end{aligned} \quad (8.18)$$

natomiast po uporządkowaniu względem zmiennej  $\bar{x}_i$ ,  $i=1,2,3,4$ , otrzymuje się ostatecznie funkcję badanego obiektu dla rzeczywistych wartości czynników badanych:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & b_0 + b_1 \cdot \bar{x}_1 + b_2 \cdot \bar{x}_2 + b_3 \cdot \bar{x}_3 + b_4 \cdot \bar{x}_4 + b_{12} \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 + b_{13} \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 + b_{14} \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 + \\ & + b_{23} \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 + b_{24} \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 + b_{34} \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 + b_{11} \cdot \bar{x}_1^2 + b_{22} \cdot \bar{x}_2^2 + b_{33} \cdot \bar{x}_3^2 + b_{44} \cdot \bar{x}_4^2. \end{aligned} \quad (8.19)$$

Zatem, po odkodowaniu funkcji regresji (8.10), otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{E} = & 2,0200 - 2,3932 \cdot \bar{x}_1 - 1,2716 \bar{x}_2 + 20,6763 \cdot \bar{x}_3 + 0,0173 \cdot \bar{x}_4 + 0,3247 \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 + 5,7381 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \\ & + 0,00327 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 + 7,9048 \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 - 0,0031 \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 + 1,1272 \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 + 0,4832 \bar{x}_1^2 - 0,0272 \cdot \bar{x}_2^2 \\ & - 173,7545 \bar{x}_3^2 + 0,0002 \cdot \bar{x}_4^2. \end{aligned} \quad (8.20)$$

Postaci jawna zużycia energii całkowitej w procesie mycia w funkcji badanych czynników ma postać:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{E} = & 2,0200 - 2,3932 \cdot \bar{w} - 1,2716 \bar{p} + 20,6763 \cdot \bar{v} + 0,0173 \cdot \bar{T} + 0,3247 \bar{w} \cdot \bar{p} + 5,7381 \bar{w} \cdot \bar{v} \\ & + 0,00327 \cdot \bar{w} \cdot \bar{T} + 7,9048 \bar{p} \cdot \bar{v} - 0,0031 \bar{p} \cdot \bar{T} + 1,1272 \bar{v} \cdot \bar{T} + 0,4832 \bar{w}^2 - 0,0272 \cdot \bar{p}^2 \\ & - 173,7545 \bar{v}^2 + 0,0002 \cdot \bar{T}^2. \end{aligned} \quad (8.21)$$

Gdzie  $\bar{w}$ ,  $\bar{p}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{T}$ , są przyjętymi czynnikami procesu mycia. Wyrażenia podkreślone są nieistotne w sensie statystycznym przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

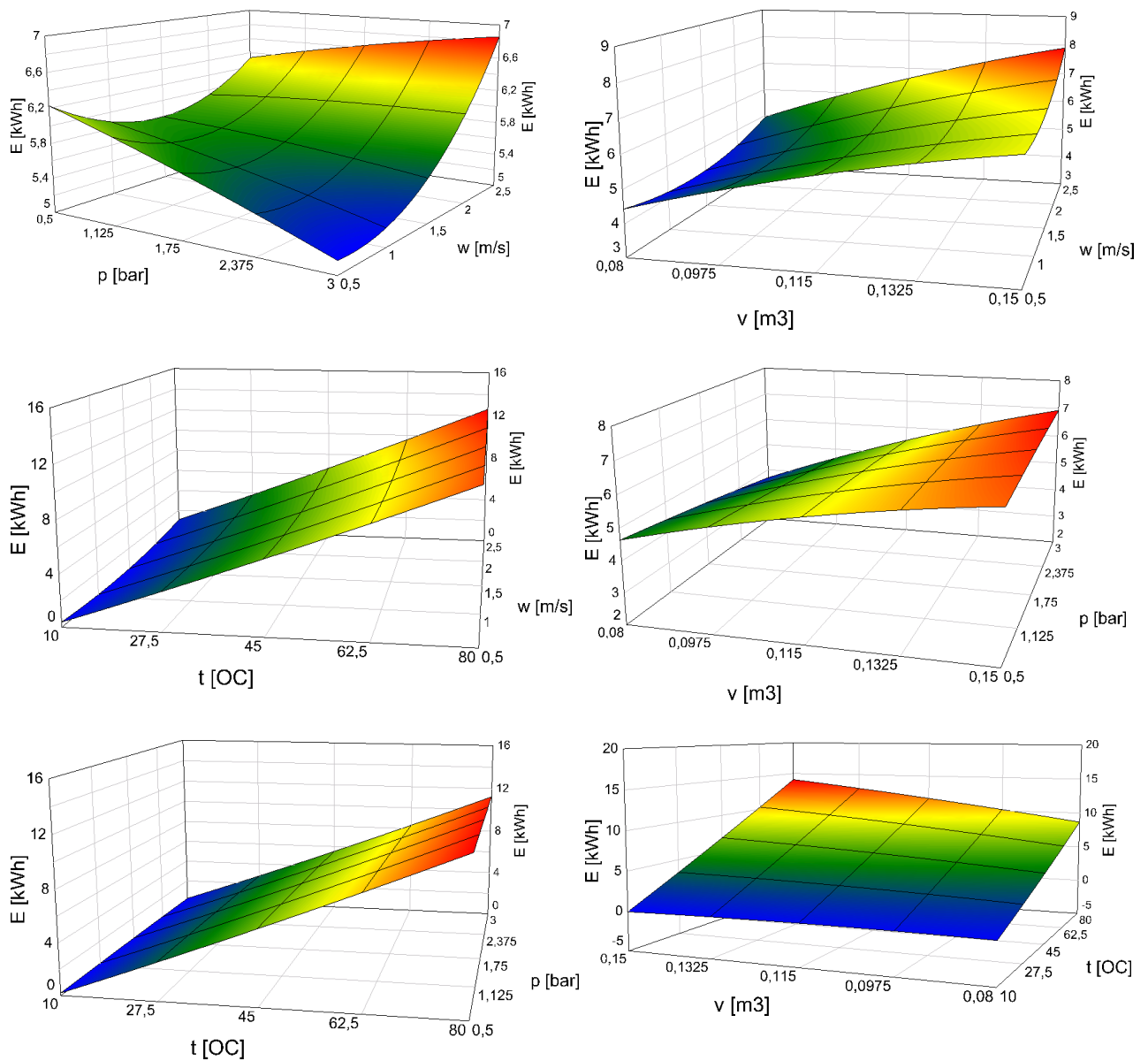
Po zgrupowaniu czynników i usunięciu z równania czynników nieistotnych funkcja ma postać:

$$\hat{Y} = \hat{E} = 2,0200 - 2,3932 \cdot \bar{w} + 0,4832 \bar{w}^2 - 1,2716 \bar{p} + 20,6763 \cdot \bar{v} - 173,7545 \cdot \bar{v}^2 + 0,0173 \cdot \bar{T} + 0,0002 \cdot \bar{T}^2 + 0,3247 \bar{w} \cdot \bar{p} + 5,7381 \bar{w} \cdot \bar{v} + 7,9048 \bar{p} \cdot \bar{v} + 1,1272 \bar{v} \cdot \bar{T}^2. \quad (8.22)$$

Na wykresach (Rys. 8.1.) przedstawiono graficznie funkcję (8.22) jako konfiguracje dwu zmiennych czynników. Czynniki niewystępujące na wykresach jako zmienne mają wartości stałe (centralne).

Na podstawie analizy funkcji regresji zużycia całkowitej energii w procesie mycia można przedstawić następujące wnioski.

- Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu wszystkich czynników wejściowych na zużycie energii całkowitej (energia zużyta na ogrzewanie wody i energia zużyta na przebieg procesu).
- W sensie statystycznym nieistotne znaczenie mają w równaniu trzy człony: interakcja prędkości przepływu i temperatury, interakcja ciśnienia i temperatury, oraz kwadrat ciśnienia cieczy myjącej.
- Oddziaływanie temperatury i objętości na zużycie energii mają charakter linowy (proporcjonalny). Pozostałe mają charakter funkcji kwadratowej.
- Oddziaływanie prędkość przepływu ma charakter niemonotoniczny dla ciśnień niższych od 2,4 bar. Występuje wartość minimalna (korzystna) w zakresie ok. 1,5 m/s. Dla ciśnień wyższych występuje wzrost w funkcji kwadratowej.
- Istotny wpływ na zużycie energii mają wszystkie interakcje, których jednym z członów jest objętość wody.
- Największy wpływ na zużycie energii ma temperatura czynnika myjącego. Przewyższa ona ponad czterokrotnie wpływ objętości i ponad 12 krotnie wpływ prędkości przepływu. Najmniejszy wpływ na zużycie energii ma ciśnienie.



Rys. 8.1. Wykresy funkcji zużycia energii całkowitej  $E$

### 8.1.10. Funkcje regresji jakości mycia, energii przepływu, energii ogrzewania

Analogicznie przeprowadzono obliczenia dla pozostałych czynników wyjściowych. Poniżej zaprezentowano końcowe postacie funkcji regresji oraz przykładowe wykresy.

Zakodowana funkcja regresji na jakość procesu mycia przy współczynniku korelacji  $R = 0,951$  ma postać

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{J} = & 5,5692 + 1,4140 \bar{\bar{x}}_1 + 0,2496 \bar{\bar{x}}_2 - 0,0000 \bar{\bar{x}}_3 + 0,4992 \bar{\bar{x}}_4 + 0,2500 \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_2 + 0,0000 \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_3 \\ & + 0,0000 \bar{\bar{x}}_1 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + 0,0000 \bar{\bar{x}}_2 \cdot \bar{\bar{x}}_3 + 0,0000 \bar{\bar{x}}_2 \cdot \bar{\bar{x}}_4 + 0,0000 \bar{\bar{x}}_3 \cdot \bar{\bar{x}}_4 - 0,2275 \bar{\bar{x}}_1^2 - 0,4799 \bar{\bar{x}}_2^2 \\ & - 0,1023 \bar{\bar{x}}_3^2 - 0,1023 \bar{\bar{x}}_4^2. \end{aligned} \quad (8.23)$$

Funkcja regresji odkodowana po zgrupowaniu czynników z pominięciem współczynników nieistotnych:

$$\hat{Y} = \hat{J} = -9,4449 + 4,1588 \cdot w - 0,9100 w^2 + 3,4813 \cdot p - 1,2234 \cdot p^2 + 0,0586 \cdot T. \quad (8.24)$$

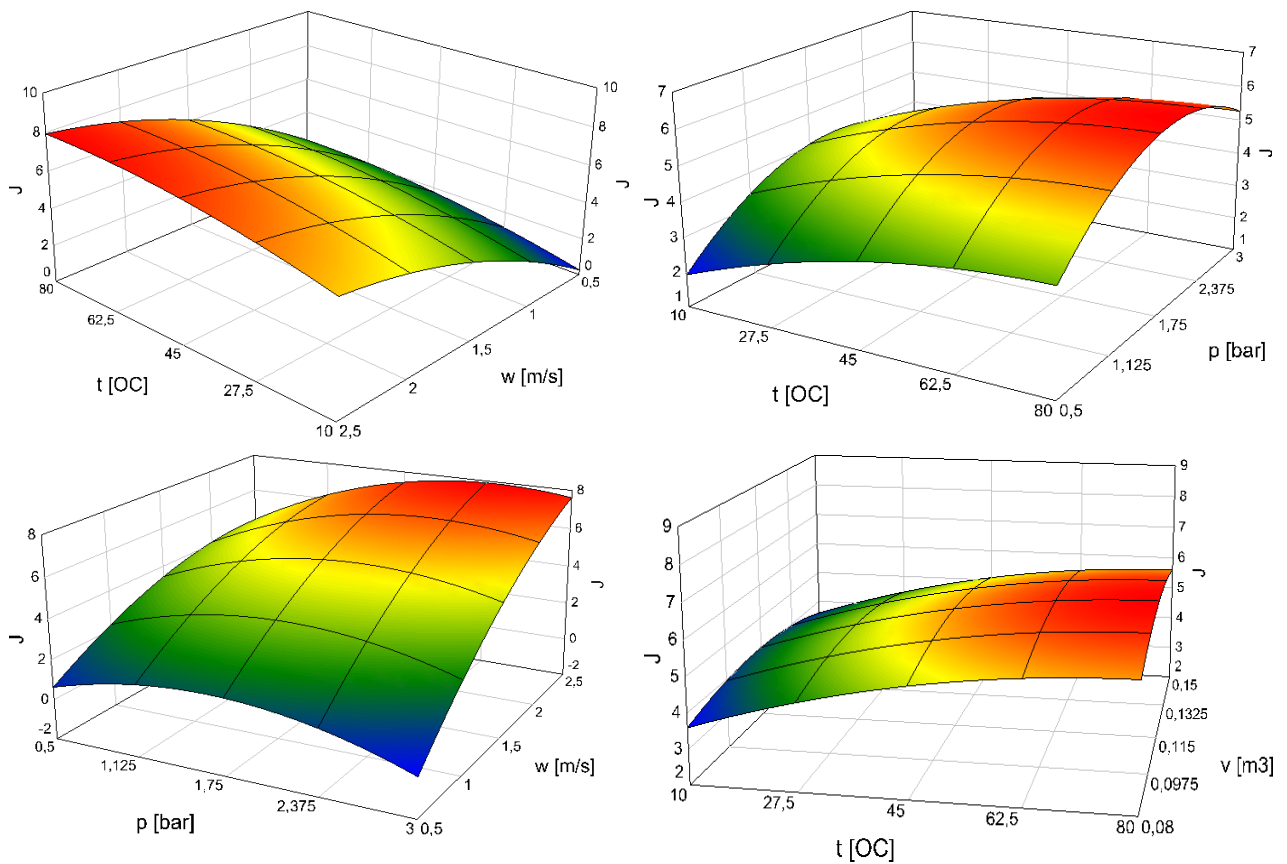
Gdzie:  $\bar{w}$ ,  $\bar{p}$ ,  $\bar{T}$  są parametrami warunków technologicznych procesu mycia.

Na wykresach przedstawiono graficznie funkcję (8.24) jako konfiguracje dwu zmiennych czynników (Rys. 8.2). Czynniki niewystępujące na wykresach jako zmienne mają wartości stałe (centralne).

Na podstawie analizy funkcji regresji jakości mycia można przedstawić następujące wnioski.

- Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu trzech czynników: prędkości przepływu, ciśnienia i temperatury na skuteczność mycia rurociągów.
- Nieistotny jest wpływ objętości na jakość mycia.
- W sensie statystycznym nieistotne znaczenie ma w równaniu dziewięć członów: objętość cieczy, wszystkie interakcje oraz kwadrat temperatury i kwadrat objętości cieczy.
- Oddziaływanie prędkości przepływu i ciśnienia na jakość procesu mycia mają charakter funkcji kwadratowej.
- W przypadku ciśnienia występuje optimum oddziaływania na jakość mycia przy ciśnieniu 1,75 bar. Stosowanie wyższych ciśnień jest niezasadne.

- W przypadku wpływu prędkości dla niższych prędkości jej przyrost daje lepsze efekty, a dla wyższych wzrost jest mniej intensywny.
- Oddziaływanie temperatury procesu na skuteczność mycia ma charakter linowy.
- Największy wpływ na skuteczność mycia ma prędkość przepływu czynnika myjącego. Przewyższa ona ponad trzykrotnie wpływ temperatury cieczy myjącej i ponad 5-krotnie wpływ ciśnienia na jakość procesu mycia.



Rys. 8.2. Wykresy funkcji regresji na jakość procesu mycia  $J$



Zakodowana funkcja regresji na energię ogrzewania przy współczynniku korelacji

$R = 0,9985$  ma postać:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{Eg} = & 5,1836 + 0,0541 \cdot \bar{x}_1 - 0,1539 \cdot \bar{x}_2 + 0,6448 \cdot \bar{x}_3 + 2,8246 \cdot \bar{x}_4 + 0,0562 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \\ & + 0,0062 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 + 0,0062 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 + 0,0812 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 - 0,0437 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 + 0,3812 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \\ & + 0,0718 \bar{x}_1^2 - 0,0157 \cdot \bar{x}_2^2 - 0,0408 \cdot \bar{x}_3^2 + 0,0593 \cdot \bar{x}_4^2 \end{aligned} \quad (8.25)$$

Funkcja regresji odkodowana po zgrupowaniu czynników z pominięciem współczynników nieistotnych:

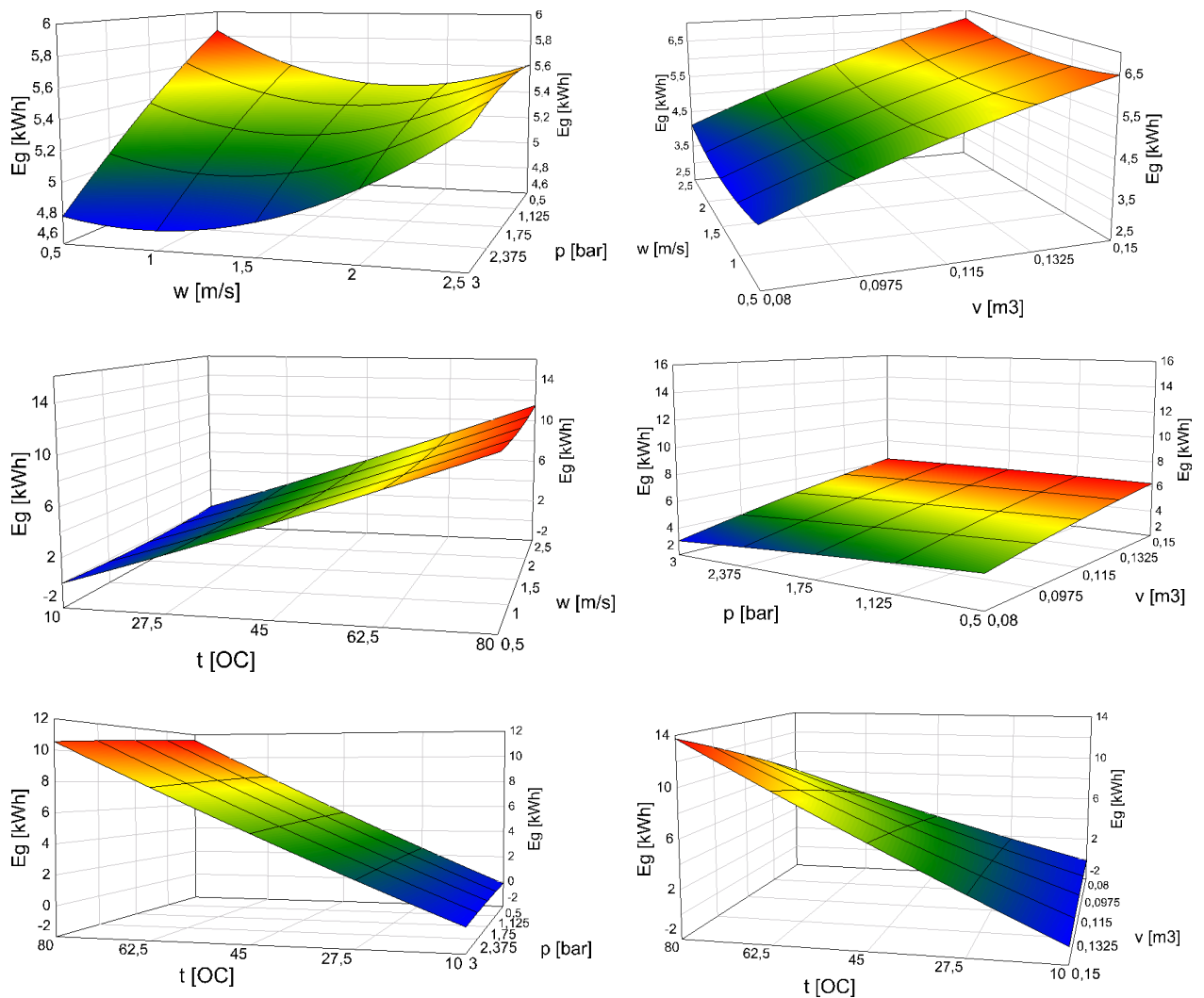
$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{Eg} = & 2,928 - 0,754 \cdot \bar{w} + 0,2874 \cdot \bar{w}^2 - 1,1 \cdot \bar{p} - 32,17 \cdot \bar{v} + 0,0008 \cdot \bar{T} + 0,0002 \cdot \bar{T}^2 \\ & + 7,4285 \cdot \bar{p} \cdot \bar{v} + 1,2449 \cdot \bar{v} \cdot \bar{T} \end{aligned} \quad (8.26)$$

Na wykresach przedstawiono graficznie funkcję (8.26) jako konfiguracje dwu zmiennych czynników (Rys. 8.3.). Czynniki niewystępujące na wykresach jako zmienne mają wartości stałe (centralne).

Na podstawie analizy funkcji regresji na ogrzewanie czynnika myjącego można przedstawić następujące wnioski.

- Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu wszystkich czynników wejściowych na zużycie energii potrzebnej na ogrzewanie medium myjącego.
- Funkcja regresji opisująca zużycie energii potrzebnej na ogrzewanie medium jest bardzo zbliżona do funkcji regresji opisującej zużycie energii całkowitej.
- W sensie statystycznym nieistotne znaczenie ma w równaniu sześć członów: wszystkie trzy interakcje z prędkością przepływu, interakcja ciśnienia i temperatury oraz kwadrat ciśnienia i objętości cieczy myjącej.
- Oddziaływanie prędkości przepływu i temperatury ma charakter funkcji kwadratowej, natomiast oddziaływanie ciśnienia i objętości ma charakter liniowy.
- Istotny wpływ na energię potrzebną na ogrzewanie mają interakcje ciśnienia i objętości oraz w znacznie większym stopniu interakcja objętości i temperatury.
- Największy wpływ na zużycie energii ma temperatura czynnika myjącego. Przewyższa ona ponad czterokrotnie wpływ objętości i ponad 18-krotnie wpływ ciśnienia.

- Energia grzania czynnika myjącego rośnie wraz ze wzrostem prędkości. Wynika z tego, że wraz ze wzrostem prędkości zwiększają się straty energii cieplnej do otoczenia.



Rys. 8.3. Wykresy funkcji regresji na energię grzania  $E_g$

Zakodowana funkcja regresji na energię przepływu czynnika przy współczynniku korelacji  $R = 0,971$  ma postać:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{E}p = & 0,5012 - 0,1709 \cdot \bar{x}_1 - 0,0853 \cdot \bar{x}_2 - 0,0037 \cdot \bar{x}_3 - 0,0012 \cdot \bar{x}_4 + 0,0444 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 + \\ & 0,04312 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 + 0,0256 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_4 + 0,0044 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 + 0,0094 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 - 0,0369 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 + \\ & 0,0477 \cdot \bar{x}_1^2 + 0,0052 \cdot \bar{x}_2^2 - 0,0123 \cdot \bar{x}_3^2 - 0,0111 \cdot \bar{x}_4^2. \end{aligned} \quad (8.27)$$

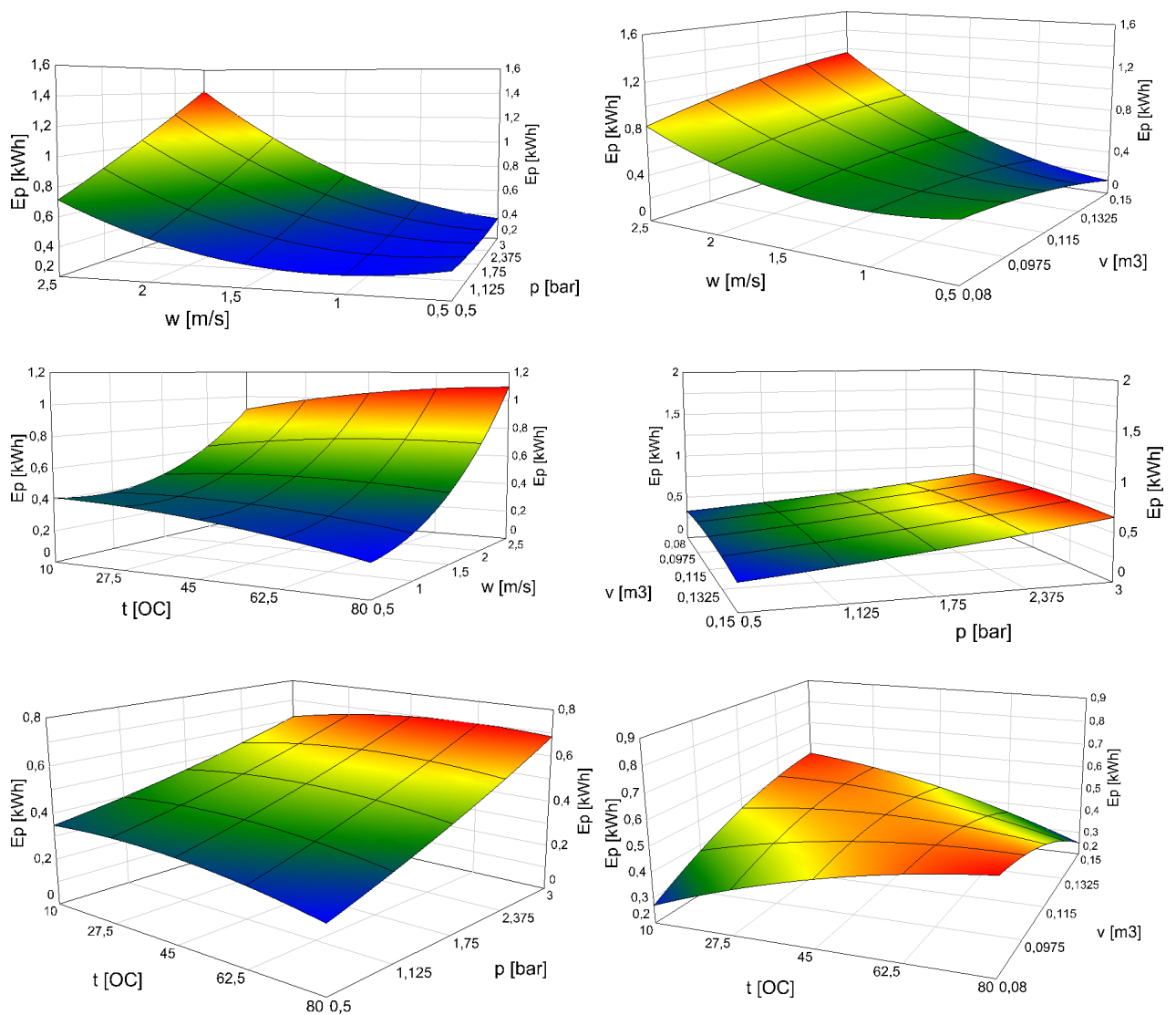
Funkcja regresji odkodowana po zgrupowaniu czynników z pominięciem współczynników nieistotnych:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \hat{E}p = & 0,9769 - 1,1784 \bar{w} + 0,1911 \bar{w}^2 - 0,0765 \bar{p} + 0,1420 \bar{w} \bar{p} + 4,9285 \bar{w} \bar{v} \\ & + 0,0029 \bar{w} \bar{T} - 0,1204 \bar{v} \bar{T}. \end{aligned} \quad (8.28)$$

Na wykresach przedstawiono graficznie funkcję (8.28) jako konfiguracje dwu zmiennych czynników (Rys. 8.4.). Czynniki niewystępujące na wykresach jako zmienne mają wartości stałe (centralne).

Na podstawie analizy funkcji regresji energii przepływu można przedstawić następujące wnioski.

- Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu dwóch czynników wejściowych (prędkość przepływu i ciśnienie) na zużycie energii potrzebnej na przepływ czynnika myjącego.
- W sensie statystycznym nieistotne znaczenie ma w równaniu siedem członów: objętość wody, temperatura wody, interakcja ciśnienia i objętości, interakcja ciśnienia i temperatury oraz kwadrat ciśnienia, temperatury i objętości cieczy myjącej.
- Oddziaływanie prędkości przepływu ma charakter funkcji kwadratowej, natomiast oddziaływanie ciśnienia ma charakter liniowy.
- Istotny wpływ na zużycie energii potrzebnej do realizacji przepływu czynnika myjącego mają wszystkie interakcje, których jednym z członów jest prędkość przepływu.
- W funkcji tej największy wpływ na zużycie energii ma prędkość przepływu czynnika myjącego. Przewyższa ona ponad dwukrotnie wpływ ciśnienia.



Rys. 8.4. Wykresy funkcji regresji na energię potrzebną do realizacji procesu  $E_p$

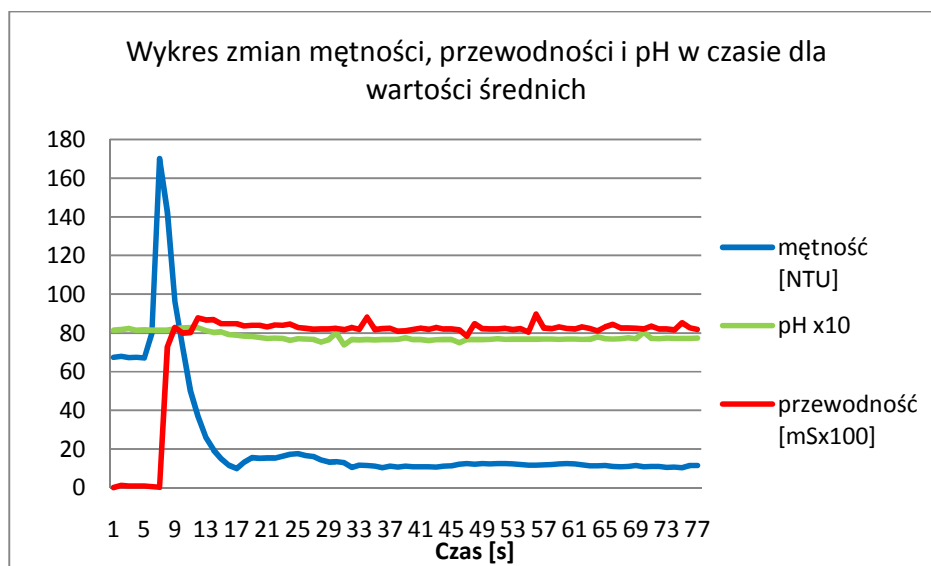
### 8.1.11. Wnioski z analizy statystycznej

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że jakość mycia w systemie Clean In Place jest bardzo złożonym procesem. Jakość zależy od wielu parametrów związanych z warunkami realizacji procesu mycia. Nieprawidłowy ich dobór prowadzi do otrzymania niedostatecznie umytej powierzchni stanowiącej zagrożenie mikrobiologiczne. Najważniejszym parametrem decydującym o jakości procesu mycia jest prędkość przepływu. Opracowane równania regresji mogą być wykorzystane do określania warunków procesu mycia ze względu na wymaganą skuteczność mycia i zużycie energii. Zaleca się dążenie do osiągnięcia jak najwyższej jakości mycia przy najniższym zużyciu energii.

Z powyższej analizy wynika, że na skuteczność mycia wpływają przede wszystkim parametry procesu (prędkość przepływu), a na zużycie energii parametry cieczy myjącej (temperatura i objętość). Należy zatem dążyć do ograniczania ilości i temperatury cieczy myjącej, a maksymalizować należy przede wszystkim prędkość przepływu cieczy, która ma największy wpływ na skuteczność mycia.

## 8.2. Kinetyka procesu

Oprócz oceny procesu mycia monitorowano również zmienne procesowe w trakcie przebiegu mycia. Dla wszystkich przebiegów sporządzono wykresy pH, przewodności i mętności w czasie. Na rysunku 8.5. przedstawiono przykładowy wykres zmian mętności, przewodności i pH w czasie dla centralnych wielkości programu badań ( $w = 1,5 \text{ m/s}$ ;  $p = 1,75 \text{ bar}$ ;  $v = 0,115 \text{ m}^3$ ,  $T = 45^{\circ}\text{C}$ ). W celu lepszego zobrazowania na jednym wykresie wyników badań pomierzone wartości pH pomnożono 10 razy, natomiast pomierzone wartości przewodności pomnożono razy 100.



Rys. 8.5. Wykres zmian mętności, przewodności i pH w czasie dla centralnych wielkości programu badań

W tabeli 8.6 Przedstawiono parametry czystej wody używanej w procesie mycia i parametry popłuczyn na koniec cyklu mycia, dla danych z wykresu (Rys. 8.5.). Parametry popłuczyn zmieniały się dla poszczególnych przebiegów procesu mycia.

Tab. 8.6. Parametry wody i popłuczyn dla wyników z wykresu rys 8.5

	Dla czystej wody	Dla popłuczyn
Mętność [NTU]	4,2÷4,4	10,5
pH	7,6	7,5÷7,6
Przewodność [mS/cm]	0,80	0,83

Na wykresie pierwszy okres trwający ok. 6 s to okres uruchamiania pompy i zalewania odcinka badawczego wodą. W tym czasie urządzenia pomiarowe nie wskazują parametrów cieczy. Dopiero od 6 s odcinek kontrolny i układ pomiarowy są wypełnione czynnikiem myjącym i wskazują poprawne wyniki.

Najbardziej zmienny przebieg na wykresie ma mętność. Obrazuje ona jak zmienia się mętność wody w czasie trwania cyklu mycia. Widać wyraźny duży skok

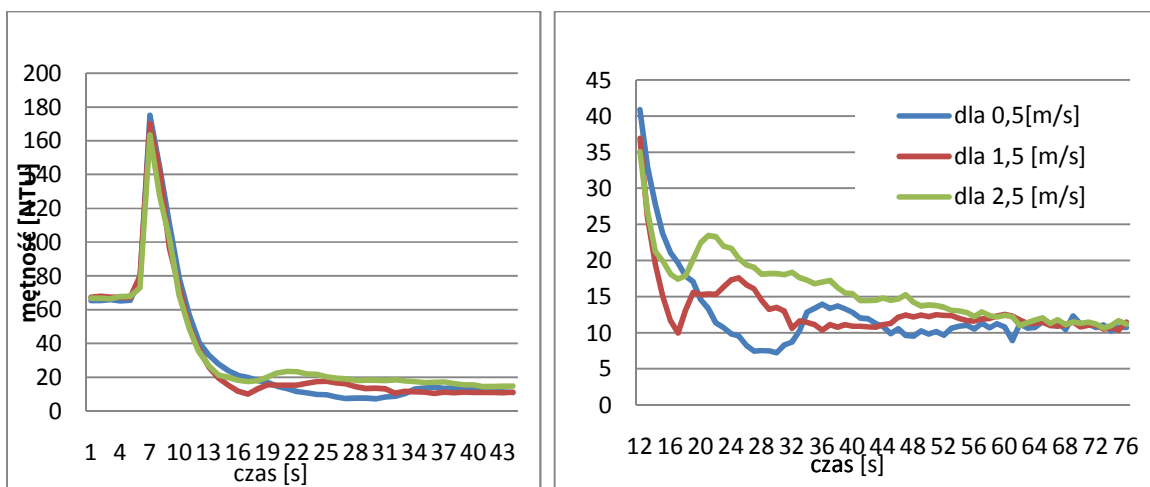
w początkowym okresie. Jest to wynikiem przejścia pierwszego strumienia wody, który zmywa znaczną ilość zabrudzenia i następnie przepływa przez czujnik mętności. Pozostałe zabrudzenie jest trudniej usuwalne co objawia się obniżeniem mętności. Po około 11 sekundach następuje drugie zwiększenie mętności i ten cykl trwa ok. 12 s. Jest to przejście pierwotnie usuniętego zabrudzenia ale rozproszonego w większej objętości wody. Później następuje stabilizacja mętności na poziomie wyższym niż mętność czystej wody.

Wartości pH po 6 s od uruchomienia pompy nieznacznie spada, a następnie stabilizuje się na stałym poziomie. Ten niewielki spadek wynika z tego, iż mleko ma pH ok. 6,5-6,7 i w początkowej fazie pochodzące od mleka zanieczyszczenie jest mniej rozcieńczone wodą płuczącą. Dalej następuje wymieszanie zanieczyszczenia w wodzie i pH stabilizuje się na poziomie nieco niższym niż pH wody czystej.

Przewodności po załączeniu cyklu mycia w początkowym okresie, gdy usuwane z powierzchni są osady lekko związane z powierzchnią wzrasta o około 8 mS/cm i następnie stabilizuje się na poziomie nieznacznie różniącym się od przewodności czystej wody.

Zmiany pH i przewodności są niewielkie. Dopiero zastosowanie środków chemicznych do mycia spowoduje ich znaczne zmiany. Pomiary pH i przewodności są wtedy przydatne do określenia stężenia środka chemicznego, i do kontroli stopnia ich wypłukania z instalacji. W dalszej analizie wyników skupiono się na zmianach mętności cieczy myjącej. Pominięto wykresy pH i przewodności.

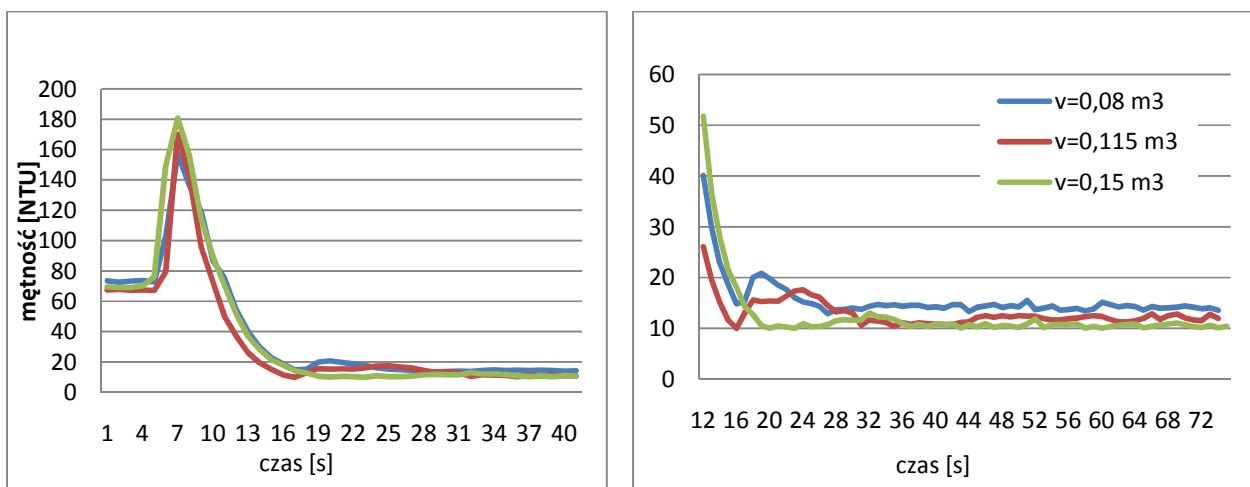
W celu dalszej analizy wykonano wykresy grupujące wyniki mętności dla na najniższych, średnich i najwyższych badanych prędkości przepływu, objętości i temperatury cieczy myjącej. Pominięto wyniki mętności dla różnych ciśnień, ponieważ wcześniejsze badania wykazały że oddziaływanie ciśnienia jest nieistotne.



Rys. 8.6. Wykresy zmian mętności w czasie dla różnych prędkości przepływu

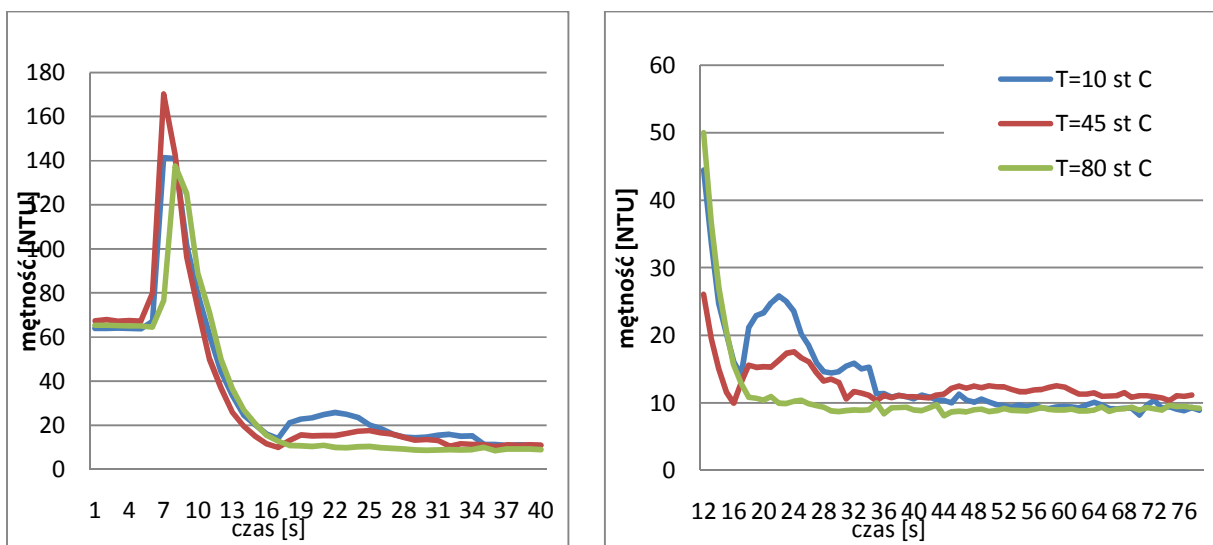
Na wykresach (Rys. 8.6.) przedstawiono zmiany mętności w czasie trwania procesu dla trzech różnych prędkości przepływu. Pierwszy wykres obrazuje proces od początku do 40 s trwania procesu. Drugi wykres przedstawia zmiany mętności od 12 s trwania procesu, aby uwydatnić zakres zmian mętności dla różnych prędkości. Początkowa faza wykresu dla wszystkich trzech prędkości przepływu jest zbliżona do siebie. Na wszystkich wykresach wartość mętności w początkowym przebiegu wzrasta o 105÷120 NTU. Różnice widać dopiero przy powstawaniu drugiego łagodnego wzrostu mętności. Powstaje przez wymieszanie się wody czystej w zbiorniku z wodą, która już przepłynęła przez instalację i jest zanieczyszczona. Dla najwyższej badanej prędkości wzrost ten następuje już w 16 s, niewielka różnica jest przy prędkości średniej. Natomiast dla prędkości 0,5 m/s mętność w drugim okresie spada nawet do mętności czystej wody (mało intensywne wmywanie zanieczyszczeń oraz brak wymieszania z osadami z pierwszego pik), a wzrost mętności pojawia się dopiero w 30 sekundzie. Im mniejsza prędkość przepływu tym wzrost mętności powstaje później i jest dłuższy. Różnice te wynikają z prędkości przepływu i świadczą o ilości wypłukanych zanieczyszczeń w pierwszej fazie mycia. W 60 s trwania procesu wszystkie przebiegi stabilizują się na wartości mętności, wyższej niż mętność czystej wody.





Rys. 8.7. Wykres zmian mętności w czasie dla różnych objętości wody

Na wykresie (Rys. 8.7.) przedstawiono wpływ objętości wody na zmiany mętności. W pierwszej fazie po załączeniu pompy objętość wody nie ma wpływu na intensywność wypłukiwania osadów. Przy największej badanej objętości wody drugi łagodny wzrost mętności jest niewielki, ponieważ następuje rozproszenie zanieczyszczeń w dużej objętości wody. Dla pozostałych objętości drugi wzrost mętności występuje w 16 s i jest wyższy dla niższej objętości wody. Zmętnienie stabilizuje się dla wszystkich przebiegów w ok. 40 s trwania procesu. Zwiększenie objętości cieczy myjącej wpływa na rozproszenie osadów. Dla 150 l mętność jest w końcowej fazie procesu najniższa (10 NTU), dla 115 l jest wyższa, a najwyższa rzędu 14 NTU jest dla najmniejszej badanej objętości. Ilość wody nie wpływa na skuteczność usuwania osadów, powoduje tylko ich rozproszenie w większej objętości.



Rys. 8.8. Wykres zmian mętności w czasie dla różnych temperatur

W zależności od temperatury mętność zmienia się znacząco (Rys. 8.8.) Dla min i max badanych temperatur pierwszy pik na wykresie jest mniej więcej taki sam. Natomiast dla temperatury 45<sup>0</sup>C pik ten jest większy, co oznacza, że w tej temperaturze następuje lepsze wyflukowanie zanieczyszczeń. W dwóch pozostałych temperaturach wyflukowanie jest gorsze, ponieważ przy temperaturze 10<sup>0</sup>C nierozpuszczają się tłuszcze, a w temperaturze 80<sup>0</sup>C następuje dalsza denaturacja białka i tworzy się trudno usuwalny osad. Okazuje się, że woda o wysokiej temperaturze najslabiej wymywa zanieczyszczenia białkowe.

Drugi łagodny wzrost mętności dla temperatury 10 i 45<sup>0</sup>C zaczyna się w 16 s i dla niższej temperatury jest dwukrotnie wyższy. Dla najwyższej temperatury wzrost ten nie występuje. Zmętnienie stabilizuje się dla wszystkich przebiegów w ok. 60 s trwania procesu.

Podsumowując analizy zmiany mętności w zależności od różnych parametrów procesu wyciągnięto następujące wnioski:

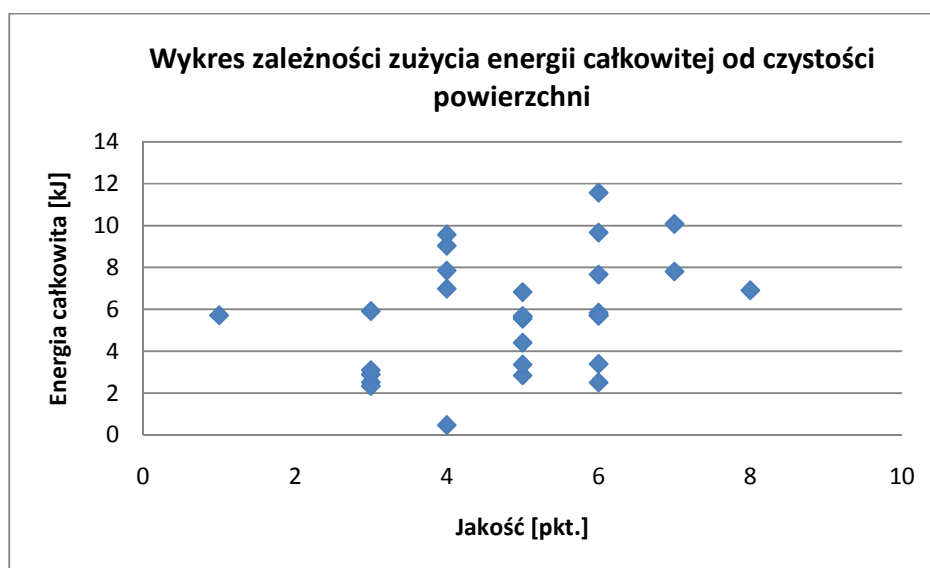
- Podczas mycia czystą wodą pomiary pH i przewodności nie charakteryzują procesu.
- Zmiany mętności są wyraźne i na ich podstawie można wnioskować o procesie.

- Pierwszy przepływ wody przez myty przewód powoduje wypłukania największej ilości zabrudzenia, co na wykresach objawia się gwałtownym wzrostem (pikiem) mętności.
- Drugi łagodny wzrost mętności powstaje przez wymieszanie się wody czystej w zbiorniku z wodą, która już przepłynęła przez instalację i jest silnie zanieczyszczona.
- Na wykresach, uwidaczniają się cykliczne zmiany mierzonych wielkości, wynikające z okresu przepompowywania objętości wody użytej do mycia.
- Parametry popłuczyn stabilizują się po ok. 60 s co świadczy, o tym że po tym czasie intensywność wmywania osadu jest już niewielka.
- Im wyższa prędkość przepływu tym więcej i szybciej wypłukane zostają osady białkowe. Drugi łagodny wzrost mętności powstaje później i trwa dłużej dla coraz niższych prędkości przepływu.
- Im większa objętość wody tym mętność w końcowej fazie procesu stabilizuje się na niższym poziomie. Wynika to z rozcieńczania zanieczyszczeń białkowych w coraz to większej objętości.
- W temperaturze 45<sup>0</sup>C następuje najlepsze wypłukanie osadów białkowych. Najgorzej osady białkowe wypłukuje woda o temperaturze 10<sup>0</sup>C.
- W końcowej fazie procesu mętność we wszystkich przypadkach mieści się w granicach 9÷13 NTU. Najwyższa końcowa mętność występuje w popłuczynach po procesie mycia najmniejszą objętością wody.

### 8.3. Zużycie energii a skuteczność mycia

Podjęto się próby określenia ilości energii zużytej na uzyskanie określonego stopnia czystości. Pomierzoną energię odniesiono do stopnia umycia określanego w dziesięciopunktowej skali. Wyniki przedstawiono na poniższych wykresach.

Pierwszy wykres (Rys. 8.9.) przedstawia zależność zużycia energii całkowitej od uzyskanego stopnia czystości. Zauważamy tu duży rozrzut wyników.

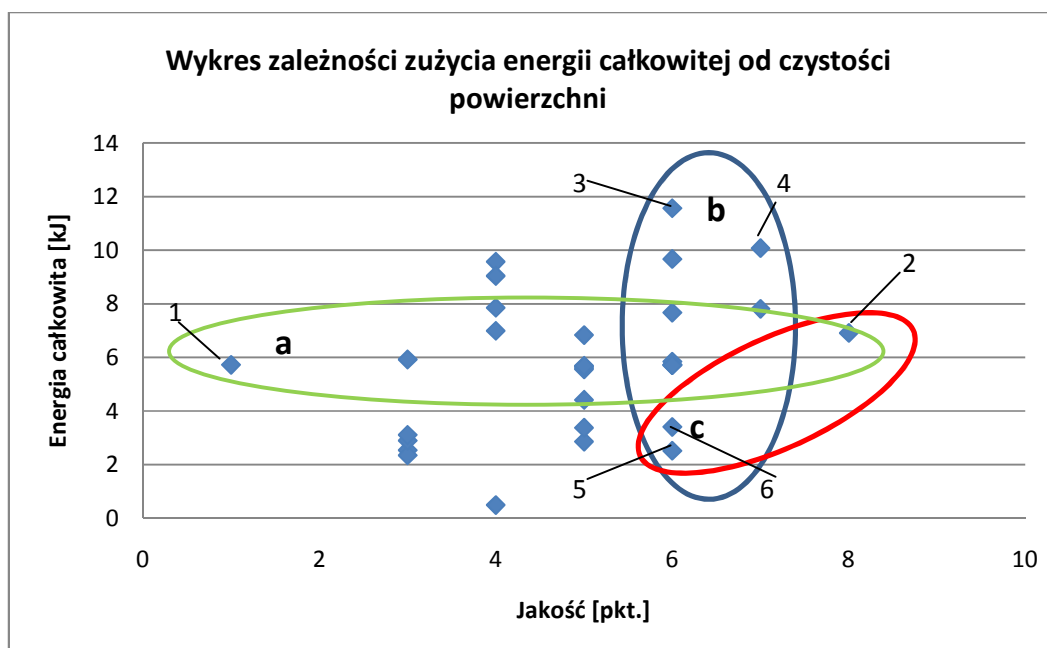


Rys. 8.9. Wykres zależności zużytej energii całkowitej od czystości powierzchni

Podobny charakter rozrzutu występuje na wykresie obrazującym zużycie energii potrzebnej na podgrzanie medium myjącego. Rozrzut wyników jest podobny, gdyż na ogólne zużycie energii w ponad 90% wpływa energia ogrzewania czynnika myjącego. Tak duża rozpiętość wyników spowodowana jest różnymi objętościami wody ( $0,08 \div 0,15 \text{ m}^3$ ), którą należy podgrzać do różnych temperatur ( $10 \div 80^\circ\text{C}$ ). Z rozrzutu punktów wynika, że nakład potrzebny na ogrzewanie wody nie zawsze daje w konsekwencji lepszy efekt mycia.

Analizując wyniki wyróżniono kilka obszarów punktów pomiarowych, które zobrazowano na rysunku 8.10. Obszar (a) to zbiór wyników pomiarów, w których dla tego samego poziomu zużytej energii (około 6 kJ) uzyskano różną skuteczność mycia. W tym obszarze punkt 1 jest najbardziej niekorzystny jakościowo (najniższy stopień umycia) przy średnim nakładzie energii. Ten minimalny efekt mycia nastąpił dla parametrów:  $w = 0,5 \text{ m/s}$

(najniższa prędkość);  $p = 1,75 \text{ bar}$ ;  $v = 0,115 \text{ m}^3$ ,  $T = 45^\circ\text{C}$ . Skuteczność mycia na poziomie 1 pkt. spowodowana jest niską prędkością przepływu mimo, że pozostałe parametry są na średnim badanym poziomie. W obszarze (a) najkorzystniejszy jest pkt. 2. Dla tego punktu parametry procesu mycia wynosiły:  $w = 2,5 \text{ m/s}$  (najwyższa prędkość);  $p = 1,75 \text{ bar}$ ;  $v = 0,115 \text{ m}^3$ ,  $T = 45^\circ\text{C}$ . Uzyskujemy najwyższą skuteczność (8 pkt.) przy podobnym nakładzie energetycznym jak dla punktu 1. Te dwa punkty wyróżnia minimalna i maksymalna prędkość przepływu. Czyli różnice w poziomie uzyskanej czystości powierzchni w tych dwóch punktach wynikały z różnej prędkości przepływu.



Rys. 8.10. Wykres zależności zużytej energii całkowitej od czystości powierzchni z wyróżnionymi obszarami i punktami pomiarowymi

Obszar (b) to zbiór wyników pomiarów, w których dla różnego poziomu zużytej energii uzyskano zbliżoną skuteczność mycia (6÷7 pkt.). W tym obszarze scharakteryzowano 4 punkty pomiarowe. Punkt 3 jest najbardziej niekorzystny energetycznie. To maksymalne zużycie energii nastąpiło dla parametrów:  $w = 1,5 \text{ m/s}$ ;  $p = 1,75 \text{ bar}$ ;  $v = 0,115 \text{ m}^3$ ,  $T = 80^\circ\text{C}$ . Tak wysokie zużycie energii spowodowane jest podgrzewaniem 115 l wody (średnia badana wartość) do temperatury  $80^\circ\text{C}$  (największa badana wartość). W punkcie 4 osiągamy skuteczność mycia wyższą o 1 stopień (7 pkt.)

w stosunku do punktu 3 przy nieznacznie niższym nakładzie energetycznym. Dla punktu 4 parametry procesu mycia wynosiły:  $w = 2,0$  m/s;  $p = 2,375$  bar;  $v = 0,1325$  m<sup>3</sup>;  $T = 62,5^{\circ}\text{C}$ . Energochłonność jest nieco niższa ponieważ podgrzewamy większą ilość wody (132,5 l), ale do niższej temperatury ( $62,5^{\circ}\text{C}$ ). Wyższe również były dwa pozostałe parametry procesu.

Skuteczność mycia na poziomie 6 pkt. osiągamy przy znacznie niższych nakładach energetycznych, a mianowicie dla punktu 5 i 6 zaznaczonych na wykresie. W punkcie 5 parametry procesu mycia wynosiły:  $w = 2,0$  m/s;  $p = 2,375$  bar;  $v = 0,0975$  m<sup>3</sup>;  $T = 27,5^{\circ}\text{C}$ . Natomiast w punkcie 6 parametry procesu mycia wynosiły:  $w = 2,0$  m/s;  $p = 2,375$  bar;  $v = 0,1325$  m<sup>3</sup>;  $T = 27,5^{\circ}\text{C}$ . W tych dwóch punktach różnice w zapotrzebowaniu na energię w stosunku do punktu 3 i 4 wynikają z podgrzewania znacznie mniejszych objętości wody (97,5 l i 135,5 l) do temperatury  $27,5^{\circ}\text{C}$ .

Interesujący jest obszar (c) obejmujący punkty 2, 5 i 6. Dla parametrów punktu 2 osiągamy najwyższą skuteczność usunięcia zanieczyszczeń przy średnim nakładzie energetycznym. Dwa kolejne punkty (5 i 6) są również istotne ponieważ osiągamy stosunkowo wysoką skuteczność przy minimalnych nakładach energetycznych. Uzyskuje się to przy nieznacznym podgrzaniu wody ( $27,5^{\circ}\text{C}$ ) i prędkości przepływu rzędu 2 m/s.

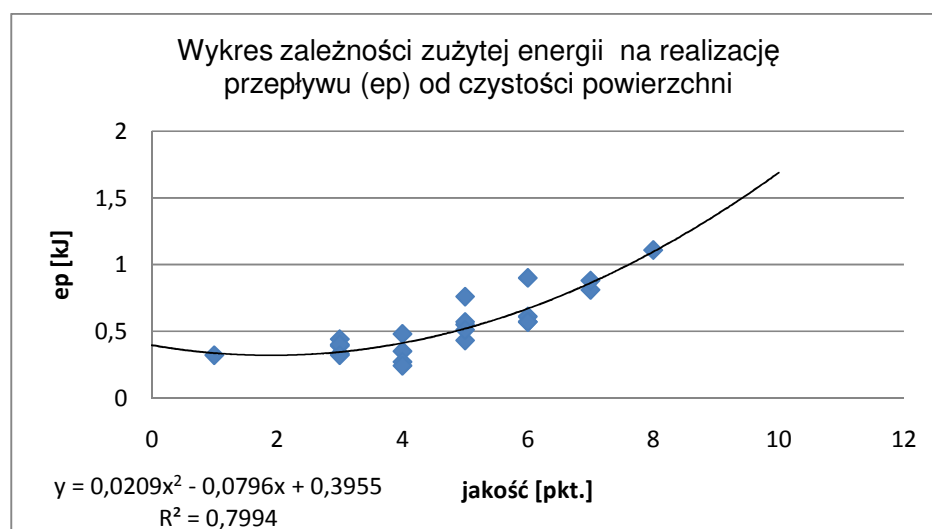
Z analizy wykresu (Rys. 8.10.), mimo dużego rozproszenia wyników, można wysunąć interesujące wnioski i znaleźć „optymalne” parametry procesu.

- Wysokie zużycie energii związane jest przede wszystkim z ilością i temperaturą wody, którą wykorzystujemy w procesie mycia.
- W ogólnym podsumowaniu energia potrzebna na wymuszenie przepływu (prędkość przepływu, ciśnienie) w małym stopniu wpływa na całkowite zużycie energii.
- Na jakość procesu znaczący wpływ ma prędkość przepływu, a nie temperatura i objętość wody. Uzyskanie większych prędkości przepływu wymaga niskich nakładów energetycznych, a daje lepszy efekt.
- W obszarze (a) zróżnicowanie poziomu skuteczności mycia wynika z prędkości przepływu.
- W obszarze (b) zróżnicowanie zużycia energii wynika z ilości wody i temperatury do której ją podgrzewamy. Używając minimalnej ilości wody (uwzględniając objętość instalacji z pewnym buforem bezpieczeństwa), niezbędnej do realizacji

procesu, i odpowiedniej temperatury osiągamy ten sam efekt bez generowania nadmiernego zużycia energii.

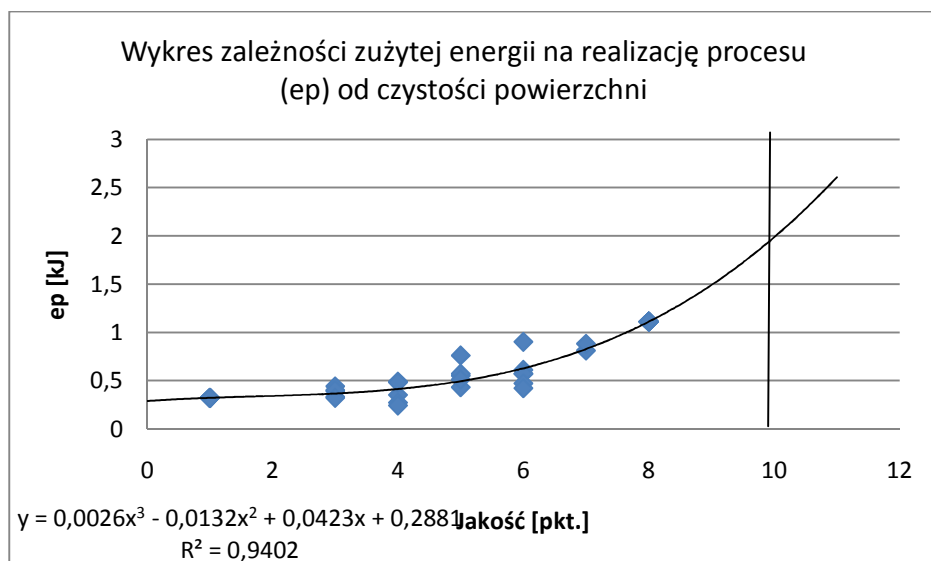
- Interesujące punkty wyznaczone na wykresie to punkty w obszarze (c). Podgrzewamy małe objętości wody (0,095; 0,115; 0,1325; m<sup>3</sup>) do niskich i średnich badanych temperatur (27,5<sup>0</sup>C; 45<sup>0</sup>C) oraz stosujemy w procesie prędkość przepływu rzędu 2÷2,5 m/s.

Spójnie grupują się punkty na wykresie przedstawiającym zużycie energii potrzebnej do napędu pompy w zależności od stopnia czystości. Na rysunku 8.11. wyniki badań aproksymowano funkcją wielomianową drugiego stopnia, na rysunku 8.12. wyniki aproksymowano funkcją wielomianową trzeciego stopnia, a na rysunku 8.13. funkcją wykładniczą.

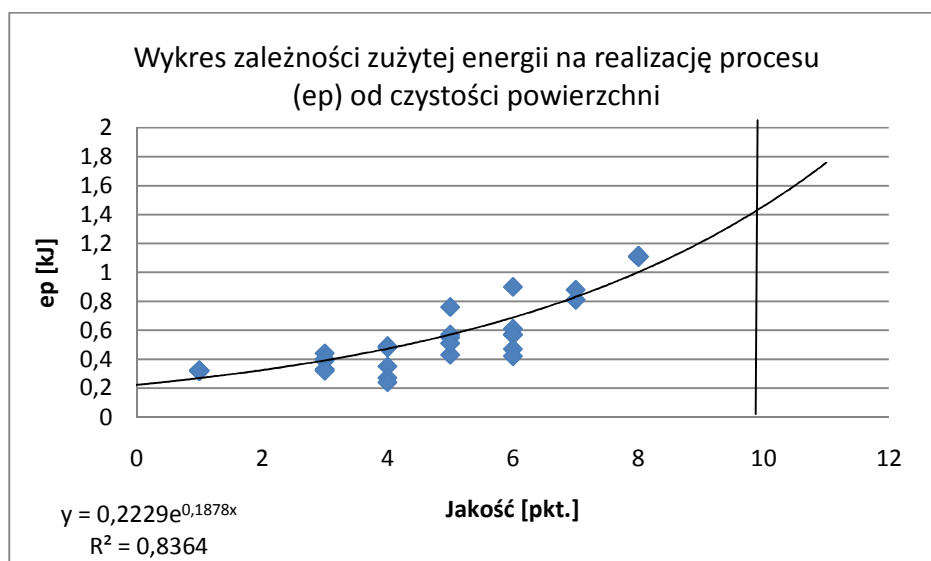


Rys. 8.11. Wykres zależności zużytej energii na realizację przepływu (Ep) od czystości powierzchni - aproksymacja wielomianem drugiego stopnia

Aproksymacja linią wielomianową drugiego stopnia jest nielogiczna z powodu występowania minimum i wzrostowi funkcji w zakresie od 0 do 2 .



Rys. 8.12. Wykres zależności zużytej energii na realizację przepływu ( $E_p$ ) od czystości powierzchni - aproksymacja wielomianem trzeciego stopnia



Rys. 8.13. Wykres zależności zużytej energii na realizację przepływu ( $E_p$ ) od czystości powierzchni - aproksymacja wykładnicza

Aproksymacja wykresu funkcją wielomianową trzeciego stopnia (Rys. 8.12.) i funkcją wykładniczą (Rys. 8.13.) obrazuje tendencje jakie mają miejsce w procesie mycia. Najwyższy stopień korelacji (0,94) uzyskuje się dla funkcji wielomianowej trzeciego



stopnia. Lewicki [Lewicki, 1994] wykazuje, że mycie ma charakter procesów pierwszorzędowych, więc najbardziej odpowiednia jest aproksymacja funkcją wykładniczą mimo uzyskania niższego stopnia korelacji.

Z ekstrapolacji funkcji (Rys 8.12. i Rys.8.13.) wynika, że idealną czystość (10 pkt.) można osiągnąć przy nakładzie energii napędu pompy na poziomie 1,6÷2,0 kJ. W związku z tym oprócz badań wynikających z planu badań przeprowadzono dodatkowe badania. Prowadzono proces mycia przy najkorzystniejszym układzie parametrów mycia ( $w = 2,5$  m/s;  $p = 1,75$  bar;  $v = 0,115$  m<sup>3</sup>,  $T = 45^{\circ}\text{C}$ ). Proces prowadzono przez 3 i 8 godzin. W obu przypadkach uzyskano czystość powierzchni na poziomie 8,5 pkt. Czyli nieznacznie wyższą jak po 20 min mycia. Osiągnięcie poziomu czystości na poziomie 8 punktów w ciągu 20 min procesu mycia wymaga nakładu energetycznego rzędu 1,1 kJ, wydłużając czas do 3 godzin otrzymujemy zużycie energii rzędu 10 kJ. Proces prowadzony przez 8 godzin wymaga nakładu energetycznego rzędu 25 kJ. Z przeprowadzonych badań wynika, że za pomocą samej wody i założonych parametrów mycia nie osiągnęliśmy skuteczności na poziomie 9 i 10 (powierzchnia całkowicie czysta).

Wyniki badań dodatkowych naniesiono na wcześniejsze wykresy. W związku z tym, że w procesie nie osiągamy skuteczności na poziomie 10 pkt. postanowiono znaleźć funkcję aproksymującą wyniki, która posiada asymptotyczną granicę przy wartości 10. (Rys. 8.14.).

Przyjmujemy, że proces mycia przebiega zgodnie z kinetyką procesu pierwszorzędowego [Lewicki, 1982, Lewicki 1994, Stręk 1981, Serwiński 1982].

Jeżeli, zgodnie z przyjętą punktacją w rozdziale 7.3, powierzchnia czysta to  $s=10$ , zatem  $(10-s)$  charakteryzuje niedomycie powierzchni.

Równanie różniczkowe pierwszego rzędu opisujące proces mycia można zapisać słownie jako przyrost jakości umycia ( $\partial u$ ) w odniesieniu do nakładu energii ( $\partial E$ ) jest proporcjonalny do stopnia niedomycia  $(10-u)$  lub w postaci:

$$\frac{\partial u}{\partial E} = k(10 - u), \text{ gdzie } u \in (0, s) \quad (8.29)$$

Po przekształceniu:

$$\partial E = \frac{1}{k} * \frac{\partial u}{(10-u)} \quad (8.30)$$

Wprowadzamy zmienne zastępcze:  $(10-u)=x$  oraz  $\partial u = -dx$

$$\int dE = \frac{1}{k} \int \frac{-dx}{x} \quad (8.31)$$

Całkując:

$$E = -\frac{1}{k} \ln x = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{x}$$

Zastępując  $x=(10-u)$ :

$$E = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{(10-u)}$$

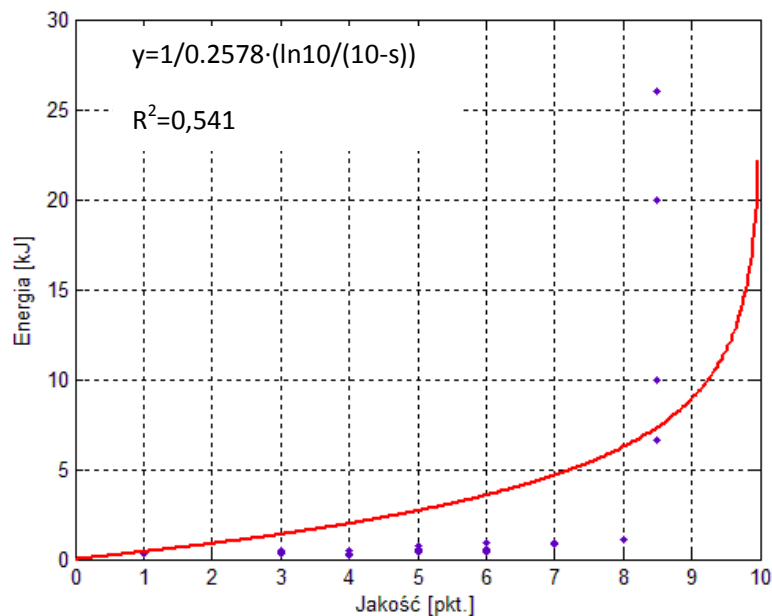
Uwzględniając stan początkowy dla  $(E=0, u=0)$  otrzymujemy:

$$E = \frac{1}{k} \left( \ln \frac{1}{(10-s)} - \ln \frac{1}{10} \right)$$

Po obliczeniu:

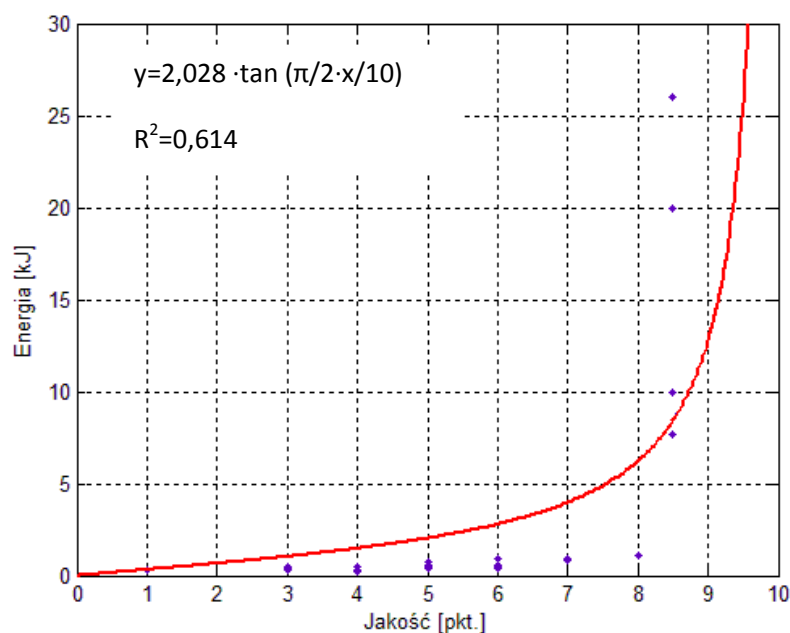
$$E = \frac{1}{k} \left( \ln \frac{10}{(10-s)} \right) \quad (8.32)$$

Równanie na energię potrzebną na realizację procesu w zależności od skuteczności mycia posłuży nam jako funkcja aproksymująca wyniki badań (Rys. 8.14.).



Rys. 8.14. Wykres zależności zużytej energii na realizację przepływu ( $E_p$ ) od czystości powierzchni - aproksymacja funkcją logarytmiczną 8.32

Mimo, że powyższa funkcja logarymiczna odzwierciedla procesy pierwszorzędowe uzyskano niski stopień korelacji. Postanowiono dalej poszukiwać funkcji aproksymującej z jeszcze większym dopasowaniem. Wyniki badań aproksymowano funkcją tangens posiadającą asymptotyczną granicę przy wartości 10 (Rys. 8.15.).



Rys. 8.15. Wykres zależności zużytej energii na realizację przepływu ( $E_p$ ) od czystości powierzchni - aproksymacja funkcją tangens

Ta funkcja, mimo że nie jest funkcją naturalną najdokładniej odzwierciedla proces mycia w aspekcie energetycznym. W pierwszym etapie procesu wmywanie zachodzi bardzo szybko, następnie jego tempo maleje i proces dąży do osiągnięcia maksymalnej czystości.

Z przeprowadzonych badań dodatkowych wynika, że osady które są niewymywane po 20 min, są już słabo usuwalne również po dłuższym czasie. Niecelowe zatem jest przedłużanie procesu mycia, ponieważ powoduje znaczny wzrost zużycia energii potrzebnej do napędu pompy (bez energii potrzebnej na podgrzewanie medium). W praktyce dalszy wzrost zużycia energii nie przynosi efektywnych rezultatów.

Podsumowując, płukanie wstępne należy prowadzić przy dużym oddziaływaniu czynników mechanicznych do takiego momentu, aby uzyskać maksymalne usunięcie zanieczyszczeni i jednocześnie nie powodować zbyt dużych nakładów energetycznych i przestoju w pracy. Dążąc do całkowitego usunięcia zanieczyszczeń, bez używania detergentów zwiększa się zużycie energii i czas trwania procesu co powoduje przestój w produkcji. Trzeba zatem zastanowić się, co jest dla nas korzystniejsze. Czy można sobie pozwolić na długotrwały proces mycia (mycie nocne gdy zakład nie pracuje), czy korzystniejsze będzie krótkie mycie z wykorzystaniem większego stężenie detergentu (praca zmianowa, gdy proces mycia „hamuje” proces produkcji).

## 9. Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy zrealizowano następujące zadania.

- Zaprojektowano i wykonano laboratoryjną stację mycia w systemie CIP, umożliwiającą przeprowadzanie badań.
- Dobrano odpowiednie czujniki pomiarowe i kartę pomiarową umożliwiającą rejestrację wielkości opisujących kinetykę procesu.
- Zbudowano układ pomiarowo rejestrujący w oparciu o komputer PC i wielofunkcyjną kartę pomiarową.
- Zaprojektowano aplikację w programie LabVIEW umożliwiającą komunikację programu z kartą pomiarową, wizualizację mierzonych wielkości i ich rejestrację.
- Sprawdzone poprawność działania stanowiska badawczego i układu pomiarowo-rejestrującego.
- Zdefiniowano obiekt badań, wyznaczając czynniki wejściowe, wyjściowe i stałe.
- Opracowano i zrealizowano plan badań na laboratoryjnej stacji mycia CIP.
- Otrzymane wyniki badań poddano analizie statystycznej i wyprowadzono równania regresji opisujące wpływ czynników wejściowych na skuteczność usuwania osadów, na zużycie energii na ogrzewanie medium myjącego oraz na napęd pompy.
- Opisano kinetykę przewodności, pH i mętności cieczy myjącej w trakcie realizacji procesu.
- Przeanalizowano wyniki badań dotyczące energochłonności procesu. Na tej podstawie wyznaczono korzystne i niekorzystne obszary realizacji procesu mycia w systemie CIP.
- Podsumowano wyniki badań, sformułowano wnioski i określono dalsze kierunki badań.

## 9.1. Wnioski z badań

Wnioski z badań.

- Z obliczeń teoretycznych wynika, że proces mycia przy uwzględnieniu wyłącznie oddziaływania mechanicznego (naprężenia ścinające na ściance), powinien odbywać się przy niskich temperaturach i wysokich liczbach  $Re$ , a tym samym przy dużych prędkościach przepływu. Im niższa temperatura tym większe naprężenia ścinające.
- Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu trzech czynników: prędkości przepływu, ciśnienia i temperatury na skuteczność mycia rurociągów oraz dwóch czynników: prędkość przepływu i ciśnienie na zużycie energii potrzebnej na przepływ czynnika myjącego.
- Dla tego samego czasu ale różnych parametrów procesu uzyskano skrajnie różny efekt mycia.
- Największy wpływ na skuteczność mycia ma prędkość przepływu czynnika myjącego. Najlepsze parametry procesu mycia to duża prędkość przepływu, ciśnienie rzędu 1,75 bar, temperatura  $20\div 40^{\circ}C$  i minimalna objętość czynnika myjącego.
- Badania eksperymentalne wykazały istotność wpływu dwóch czynników wejściowych (prędkość przepływu i ciśnienie) na zużycie energii potrzebnej do napędu pompy. W funkcji tej największy wpływ na zużycie energii ma prędkość przepływu czynnika myjącego.
- Największy wpływ na zużycie energii całkowitej ma temperatura czynnika myjącego. Najmniejszy wpływ na zużycie energii ma ciśnienie. W ogólnym podsumowaniu energia potrzebna na realizację procesu (prędkość przepływu, ciśnienie) w małym stopniu wpływa na całkowite zużycie energii.
- Funkcja regresji opisująca zużycie energii potrzebnej na ogrzewanie medium jest bardzo zbliżona do funkcji regresji opisującej zużycie energii całkowitej.
- Całkowita ilość energii zużytej w procesie mycia, zwłaszcza energii potrzebnej na ogrzewanie cieczy myjącej, nie jest jednoznaczna z uzyskanym efektem mycia.

- Usuwanie zanieczyszczeń przez mechaniczne oddziaływanie w wyniku przepływu należy prowadzić do takiego momentu, aby uzyskać maksymalne usunięcie zanieczyszczeni i jednocześnie nie powodować zbyt dużych nakładów energetycznych. Osady, które są niewymywane po 20 min, są już słabo usuwalne również po dłuższym czasie. Niecelowe zatem jest przedłużanie procesu mycia, ponieważ powoduje znaczny wzrost zużycia energii potrzebnej do napędu pompy (bez energii potrzebnej na podgrzewanie medium). W praktyce dalszy wzrost zużycia energii nie przynosi efektywnych rezultatów.
- Kinetyką procesu mycia wyraźnie charakteryzują zmiany mętności, natomiast pH i przewodność cieczy myjącej zmieniają wartości w nieznacznym zakresie. Na podstawie zmętnienia można wnioskować o ilości zanieczyszczeń usuniętych w procesie mycia.
- Opracowane równania regresji mogą być wykorzystane do określania warunków procesu mycia ze względu na wymaganą skuteczność mycia i zużycie energii. Zaleca się dążenie do osiągnięcia jak najwyższej jakości mycia przy najniższym zużyciu energii.

## **Propozycje dalszych badań**

Kontynuowane są już badania dotyczące popłuczyn pod względem wielkości zanieczyszczeń, ich sedymentacji i zdolności koagulacji. Badania te realizowane są w ramach grantu na temat: Identyfikacja zagrożeń i badanie warunków zapewnienia skutecznego mycia w systemie CIP krytycznych miejsc instalacji. Dokonano już zakupu luminometru, natomiast zakup aparatu do oceny popłuczyn jest w trakcie realizacji.

Celowym jest dalsze badanie wpływu czynników mechanicznych w tym zastosowanie niekonwencjonalnych metod oddziaływań (barbotaż, mycie pulsacyjne, ultradźwięki) na skuteczność mycia elementów instalacji.

Przeprowadzone badania wykazały, że oddziaływanie mechaniczne przepływu nie jest wystarczające do całkowitego usunięcia zabrudzenia. Należałoby przeprowadzić badania ze środkami chemicznymi, tak aby skorelować oddziaływania chemiczne i mechaniczne, w celu osiągnięcia powierzchni całkowicie czystej. Na podstawie funkcji regresji można poszukiwać optymalnych parametrów procesu mycia aby uzyskać całkowitą czystość powierzchni.



## 10. Literatura

1. [Andrzejewski 2001] Andrzejewski R., „Nowoczesne technologie mycia i dezynfekcji”, *Przegląd Mleczarski* 10/2001, s. 450 – 453,
2. [Bat 2005] Najlepsze dostępne techniki BAT. Wytyczne dla branży mleczarskiej. Ministerstwo środowiska. Warszawa 2005.
3. [Bat 2005a] Najlepsze dostępne techniki BAT. Wytyczne dla przemysłu piwowarskiego. Ministerstwo środowiska. Warszawa 2005.
4. [Bat 2005b] Najlepsze dostępne techniki BAT. Wytyczne dla przemysłu rozlewniczego napojów niealkoholowych. Ministerstwo środowiska. Warszawa 2005.
5. [Berthold 2007] Berthold A.: „Biofilmy w przemyśle spożywczym”, *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* 1/2007, s. 60-66
6. [Bishop 1997] Bishop A.: „Cleaning in food industry”. *Basic Principles of Sanitation*. 1997.
7. [Blel 2007] Blel Walid Bénézech Thierry Legentilhomme Patrick Legrand Jack Le Gentil-Lelièvre: „Effect of flow arrangement on the removal of Bacillus spores from stainless steel equipment surfaces during a Cleaning In Place procedure”, *Chemical Engineering Science* Volume: 62, Issue: 14, July, 2007, pp. 3798-3808
8. [Brycki 2002] Brycki B.: „Przemysł spożywczy- mycie i dezynfekcja”. *Materiały informacyjne IODEX 2002*.
9. [Chmielewski 2003] Chmielewski R.A.N., Frank J.F.: „Biofilm Formation and Control in Food Processing Facilities”, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Vol. 2, 2003, pp. 22 – 32,
10. [cip.ukcentre] <http://www.cip.ukcentre.com>
11. [Czaczyk 2004] Czaczyk K.: „Czynniki warunkujące adhezję drobnoustrojów do powierzchni abiotycznych”, *Postępy Mikrobiologii* 2004, 43, s. 267 – 283,
12. [Czaczyk 2005] Czaczyk K.: „Adhezja mikroorganizmów do powierzchni stykających się z żywnością”, *Przemysł Spożywczy* 2/2005, s. 28 – 31,
13. [Diakun 2003] Diakun J, Mierzejewska S.: „Analiza techniczna stacji CIP oferowanych na polskim rynku”, *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* 2004/2 s. 55-58

14. [Diakun 2005] Diakun J, Mierzejewska S.: „Ocena stopnia zabrudzenia i skuteczność mycia powierzchni ze stali kwasoodpornej”, Inżynieria Rolnicza 11(71) Kraków 2005, s. 325 – 331,
15. [Diakun 2005a] Diakun J., Mierzejewska S.: „Stanowisko do badań eksperymentalnych warunków i skuteczności mycia”. Inżynieria i Aparatura Chemiczna t. 44(36) 2005. nr 1-2. s. 33-34.
16. [Diakun 2006] Diakun J., Mierzejewska S.: „Centralne stacje mycia oferowane na polskim rynku”. Agro Przemysł – kwartalnik nr 1/2006, str. 24 – 26
17. [Diakun 2007] Diakun J., Mierzejewska S.: „Wpływ oddziaływania czynników mechanicznych na skuteczność mycia rurociągu”. Inżynieria Rolnicza 5(93)/2007
18. [Diakun 2009] Diakun J., Piepiórka J.: „Warunki mycia metodą CIP kolanek rurociągu instalacji produkcyjnej” Inżynieria i Aparatura Chemiczna 1/2009
19. [Diakun 2009a] Diakun J., Mierzejewska S., Piepiórka J.: „Monitorowanie parametrów czynnika myjącego podczas mycia w przepływie” Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 1/2009
20. [Diakun 2010] Diakun J., Piepiórka J., Bil T.: "Poliptymalizacja mycia rurociągów w systemie CIP" Zeszyty Problemowe Nauk Rolniczych nr 546, 2010
21. [Diakun 2011] Diakun J, Przegląd systematyka i analiza metod mycia, Referat na konferencji BEMS 2010, oddane do druku w Postęпах Techniki Przetwórstwa Spożywczego 1/2011
22. [Diakun 2011a] Diakun J: „Metody i kryteria oceny stopnia umycia powierzchni urządzeń przetwórstwa spożywczego”. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2011
23. [Duckworth 1983] Duckworth R. A.: “Mechanika płynów”, WNT Warszawa 1983
24. [Forder 2005] Forder S., Hyde J.M.: “Increasing Plant Efficiency Through CIP” BioPharm International.” February 1, 2005, <http://drgreene.mediwire.com/main>
25. [Gesán-Guiziou 2002] Gesán-Guiziou, Geneviève, Boyaval Evelyne, Daufin Georges: “Nanofiltration for the recovery of caustic cleaning-in-place solutions: robustness towards large variations of composition”, Desalination 149 (2002), p. 127–129,
26. [Grasshoff 1992] Grasshoff, A.: "Hygienic design: The basis for computer controlled automation", Food and Bioproducts Processing, Transactions of The Institution of Chemical Engineers Part C, Volume: 70, (1992), pp. 69-77

27. [Harrington 2001] Harrington B. J.: „Industrial Cleaning Technology”, Springer-Verlag Gmbh 2001
28. [Jakubczyk 1999] Jakubczyk E., Jaworski S.: „Wymagania higieniczne zapewniające produkcję przetworów mleczarskich bezpiecznej jakości” cz. II, Przegląd Mleczarski, 2/99, s. 40 – 41, [
29. [Jarczyk 2001] Jarczyk A. : „Technologia żywności.” WS i P , Warszawa 2001
30. [Jennings 1957] Jennings W.G., McKillop A.A., Luick J.R.: „Circulation Cleaning, Journal of Dairy Science” Vol. 40 (1957), Issue 11, Pages 1471-1479
31. [Kądzielski 1996] Kądzielski F., Zaborowska G., Zaborowski T.: „Mycie i dezynfekcja w browarze”, Przemysł fermentacyjny i owocowo-warzywny 12/96, s. 19 – 21,
32. [Kessler 1981] Kessler H.: “Food engineering and dairy technology”, Verlag A., Kessler, Freising. Kessler, Germany 1981.
33. [Kołożyn–Krajewska 2001] Kołożyn–Krajewska D.: „Higiena produkcji żywności”, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2001,
34. [Królasik 2005] Królasik J.: „Biofilm –mikrobiologiczna strategia przetrwania” Przegląd Piekarski i Cukierniczy, 2005/11, s. 14 – 18,
35. [Kukielka 2002 a] Kukielka S., Kukielka L.: „Experiment planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań”. Instrukcja użytkownika, Politechnika Koszalińska WM, Koszalin 2002.
36. [Kukielka 2002] Kukielka L.: „Podstawy badań inżynierskich”. Politechnika Koszalińska, PWN, Warszawa 2002.
37. [Kunze 2010] Kunze W.: „Technology Brewing&Malting”, VLB Berlin, Germany 2010
38. [Lee 1998] Lee Wong A.C.: “Biofilms in Food Processing Environments”, Journal of Dairy Science, Vol. 81, No. 10, 1998, pp. 2765 – 2770,
39. [Lelievre 2002] Lelièvre C.; Legentilhomme P.; Gaucher C.; Legrand J.; et. al.: „Cleaning in place: effect of local wall shear stress variation on bacterial removal from stainless steel equipment”, Chemical Engineering Science Volume: 57, Issue: 8, April, 2002, pp. 1287-1297

40. [Leliveld 2003] Lelieveld H., i in.: „Higiene in food processing”, Woodhead publishing limited, 2003 England
41. [Lewicki 1982] Lewicki P. P.: „Inżynieria Procesowa i aparatura przemysłu spożywczego”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
42. [Lewicki 1993] Lewicki P.: „Higiena produkcji . Cz.1. Zagadnienia ogólne.” Przemysł Spożywczy, 10/1993 : 275-276
43. [Lewicki 1994] Lewicki P.: „Higiena produkcji część 4. Mycie maszyn i urządzeń”, Przemysł Spożywczy, 2\94,
44. [Lewicki 2005] Lewicki P.: „Mycia maszyn i urządzeń w przemyśle spożywczym”, Przemysł Spożywczy 2/2005,
45. [Lewicki 2006] Lewicki P.: „Skuteczność procesów mycia w przemyśle spożywczym”, Przemysł Spożywczy 2/2006
46. [Mierzejewska 2003] Mierzejewska S., Diakun J.: „Analiza warunków technicznych, procesowych i skuteczności mycia rurociągów technologicznych. „Inżynieria Rolnicza nr 7(49)” Wyd. Komitetu Techniki Rolniczej PAN, Warszawa 2003 str. 119 – 124
47. [Nehrbass 2001] Nehrbass J.: „Process Pipe Network Pigging”, Fluid Recovery Systems Inc, Paint&Coatings Industry, January 25, 2001
48. [Orth 1998] Orth R.: „The importance of disinfection for the hygiene in the dairy and beverage production”. International Biodeterioration and Biodegradation 41/1998. s. 201-208.
49. [Piepiórka 2007] Piepiórka J., Diakun J.: „Mycie w systemie CIP”, Przemysł Spożywczy 2007/10
50. [Piepiórka 2009] Piepiórka J.: „Ocena skuteczności procesów mycia w przemyśle spożywczym” Przemysł Spożywczy 2/2009
51. [Piepiórka 2009a] Piepiórka J.: „Analiza warunków występowania biofilmów w systemach CIP”. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 2/2009, str. 113 - 117
52. [Piepiórka 2010] Piepiórka J.: "Wpływ warunków przepływu cieczy między płytami wymiennika ciepła na skuteczność mycia w obiegu zamkniętym" Inwestycja w Wiedzę, tom II, Szczecin 2010
53. [Piepiórka 2011] Piepiórka J., Diakun J.: „Nierównomierność mycia powierzchni płyt wymienników ciepła”, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 1/2011

54. [Puzyrewski1998] Puzyrewski R., Stawicki J.: „Podstawy mechaniki płynów i hydromechaniki”, Wydawnictwo Naukowe PWN 1998
55. [Ronald 1997] Ronald H. Schmidt: ”Basic Elements of Equipment Cleaning and Sanitizing in Food Processing and Handling Operations”, Food Science and Human Nutrition Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Original publication date July, 1997
56. [Rozporządzenie] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 4 września 2000 r. w sprawie warunków, jakim powinna odpowiadać woda do picia i na potrzeby gospodarcze, woda w kąpieliskach, oraz zasad sprawowania kontroli jakości wody przez organy Inspekcji Sanitarnej.
57. [Schmidt] Schmidt R. H., „Basic Elements of Equipment Cleaning and Sanitizing in Food Processing and Handling Operations”, University of Florida Extension Institute of Food Agricultural Sciences, [http://www.gaps.cornell.edu/Dialup/SanitizingEquipm\\_Florida.pdf](http://www.gaps.cornell.edu/Dialup/SanitizingEquipm_Florida.pdf), 1997
58. [Seiberling] Seiberling D. A., „Cip evangelist...“, <http://www.seiberling4cip.com>
59. [Serwiński 1982] Serwiński M.: „Zasady Inżynierii Chemicznej i procesowej”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982
60. [Stręk 1981] Stręk F.: „Mieszanie i mieszalniki”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.
61. [Śmietama 2002] Śmietana Z., „Rola stanu higieniczno – sanitarnego w fazie produkcji i przetwórstwa mleka w kształtowaniu zużycia energii”, *Przegląd Mleczarski* 12/2002, s. 558 – 562,
62. [Tamine 2008] Tamine A. Y.: “Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations”, Blackwell Publishing 2008
63. [Timperley 1980] Timperley D., Lawson G.: „Test rigs for evaluation of hygiene in plant design”, in Jowitt, R (ed.) *Hygienic design and operation of food plant*, Ellis Horwood, Chichester, UK.1980
64. [Timperley 1981] Timperley D.: „Fundamentals and Applications of Surface Phenomena Associated with Fouling and Cleaning In Food Processing”, Lund University, Sweden 1981

65. [Wiśniewski 1995] Wiśniewski J., Rozumowicz K., Walo R.: „System mycia niedoceniana konieczność”, *Przemysł Spożywczy* 9/95, s. 333 – 335,
66. [Zakrzewski 1993] Zakrzewski E.: „Prawidłowe mycie i dezynfekcja warunkiem uzyskania wysokiej jakości produktów mleczarskich”, *Przegląd Mleczarski* 9/93, s. 248 – 249,
67. [Ziajka 1997] Ziajka S.: „Mleczarstwo – zagadnienia wybrane” cz. II, Akademia Rolniczo – Techniczna, Olsztyn 1997,