

Jarosław DIAKUN, Sylwia MIERZEJEWSKA, Krzysztof KUKIEŁKA
Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego
Katedra Inżynierii Produkcji
Politechnika Koszalińska

Równanie regresji zapotrzebowania energetycznego w procesie mycia rurociągu metodą CIP

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki pomiaru zapotrzebowania energetycznego w procesie mycia rurociągu metodą CIP, której składnikami są: energia na ogrzewanie czynników myjących i energia do napędu pompy. Badania przeprowadzono na laboratoryjnej dwuzbiornikowej stacji mycia. Środkiem myjącym była czysta woda wodociągowa. Podczas badań mierzono parametry procesu, parametry cieczy myjącej oraz parametry zasilania. Badania przeprowadzono w celu ustalenia wpływu prędkości przepływu (w), ciśnienia (p), temperatury (T) i objętości wody myjącej (v) na całkowite zużycie energii w procesie mycia. Zużycie energii jako funkcję mierzonych wielkości aproksymowano wielomianem stopnia drugiego z interakcjami czynników. Przeprowadzono analizę otrzymanej funkcji regresji opisującej całkowite zużycie energii w procesie mycia. Największy wpływ na energię mycia ma temperatura i objętość wody. Znacznie mniejszy wpływ ma prędkość przepływu i ciśnienie.

Słowa kluczowe: mycie, CIP, funkcja regresji, zapotrzebowanie na energię

Regression equation of energy demand in the process of cleaning by pipeline CIP

Summary

Paper presents the measured results of the energy demand in the cleaning process for CIP pipeline, whose components are: the energy for heating and cleaning agents for the pump energy. The study was conducted on laboratory for double-tank clean station. Cleaning agents was running water. During the researches was measured, such as the process parameters, the parameters of the cleaning up liquid and the supply parameters. The study was conducted to determine the impact of velocity (w), pressure (p), temperature (T) and wash water volume (v) on the total energy consumption in the process of cleaning. Energy consumption as a function of the measured values was approximated by second degree of polynomial with interaction of input factors. The regression function describing the total energy consumption in the cleaning process was analyzed. The highest influence on the total cleaning energy has a temperature (T) and volume of water (v). The lowest impact has flow velocity (w) and pressure (p).

Key words: cleaning, CIP, regression function, the demand for energy

Wstęp

Proces mycia jest bardzo ważnym etapem produkcji w przemyśle spożywczym. Zachowanie odpowiednich standardów czystości pozwala na produkcję bezpiecznej żywności o wysokiej jakości odżywczej i sensorycznej. Mycie i dezynfekcja wiąże się z dużym nakładem energii i środków poświęconych utrzymaniu w czystości instalacji i powierzchni produkcyjnych (Tamine 2008; Mierzejewska, Diakun 2011). Każda branża przemysłu spożywczego ma swoją specyfikę zanieczyszczeń. Jak wykazano w badaniach, prezentowanych przez Pawelasa A., na Konferencji Naukowo-Technicznej: Efektywność energetyczna. Gospodarka mediami w przemyśle spożywczym, proces mycia jest procesem energochłonnym (Pawelasa 2010). Zużycie energii na procesy mycia w niektórych przemysłach sięga nawet 30% ogólnego zapotrzebowania. Minimalizacja zużycia środków myjących, obniżenie temperatury czynnika myjącego i maksymalizacja oddziaływania mechanicznego przepływu jest głównym celem naszych badań.

Prezentowane badania dotyczą wpływu czynników hydro-mechanicznych na zużycie energii w procesie mycia instalacji w systemie CIP.

Materiał i metody

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 podłączone. Jedna z pierwszych wersji stanowiska została opisana w artykule. Stanowisko do badań eksperymentalnych warunków i skuteczności mycia (Diakun, Mierzejewska 2005). Stanowisko badawcze składa się z instalacji mycia oraz aparatury pomiarowej. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 1.

Instalacja mycia składa się z dwóch zbiorników o pojemności 0,3 m³, pompy, systemu rur i zaworów. Zbiornik (1) jest izolowany i posiada wbudowaną grzałkę o mocy 3 kW. Zasilanie grzałki następuje przez termostatyczny układ regulacji umożliwiający nagrzanie i stabilizację temperatu-

ry cieczy w zbiorniku w zakresie od $10 \div 80^{\circ}\text{C}$. 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 płuczacej. Przepływ cieczy wymusza pompa GU14. Odcinek kontrolny oznaczony na schemacie numerem 5 podlegający standardowemu procesowi brudzenia i mycia ma długość 1,3 m.

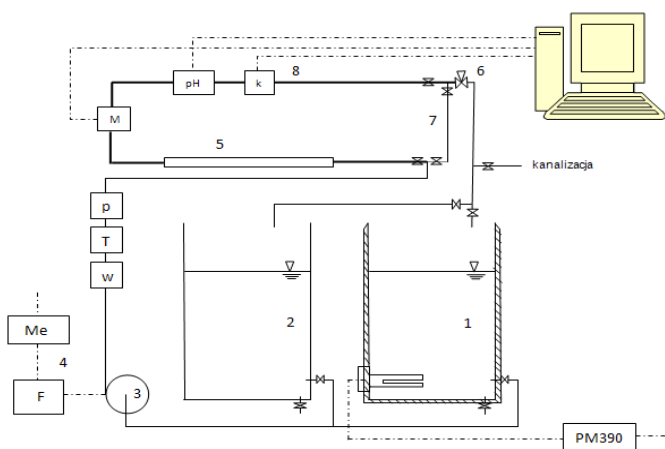
Metoda pomiaru

Pomiaru zapotrzebowania na energię elektryczną potrzebną do podgrzania i utrzymywania temperatury medium myjącego dokonywano za pomocą miernika PM390. 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. Natomiast energię potrzebną do wymuszenia przepływu mierzono za pomocą standardowego miernika poboru mocy sieci trójfazowej.

Plan badań

Badania przeprowadzono zgodnie z planem statystycznym zdeterminowanym pięciopoziomowym, rotabilnym. Jako czynniki wpływające na energochłonność procesu przyjęto cztery zmienne wejściowe zmieniające się w zakresach:

- 1) prędkość przepływu: $w = 0,5 \div 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- 2) ciśnienie: $p = 0,5 \div 3,0 \text{ bar}$;
- 3) temperatura cieczy: $T = 10 \div 80^{\circ}\text{C}$;
- 4) objętość cieczy: $v = 0,08 \div 1,5 \text{ m}^3$.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnej stacji mycia Clean In Place. Objaśnienia: 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 bocznikowy, 8 – obwód pomiarowy.

Fig. 1. Schematic of laboratory cleaning station Clean In Place. Key: F – controlled power supply (inverter), Me – power meter, w – flow-meter, T – temperature gauge, p – pressure gauge, M – measure of turbidity, pH – pH meter, k – conductivity meter, 1 – insulated tank with heater, 2 – non-insulated tank, 3 – pump, 4 – inverter with energy meter, 5 – the control section of the pipeline, 6 – throttle valve, 7 – by-pass circuit, 8 – measuring circuit.

Identyfikację nieliniowego obiektu wielowymiarowego przeprowadzono według algorytmu (Kukiełka, Kukiełka 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.

Wyniki i dyskusja

Określenie klasy modelu matematycznego, dla którego otrzymuje się najlepszy współczynnik korelacji wielowymiarowej dokonywano wykorzystując program EPlanner (Kukiełka 2002). Do opisu obiektu badań, użyto modelu matematycznego w postaci wielomianu algebraicznego drugiego stopnia z interakcjami podwójnymi.

Na podstawie wyników badań i analizy statystycznej otrzymano funkcję regresji zużycia energii całkowitej w procesie mycia. Postać jawna funkcji zużycia energii w funkcji badanych czynników ma postać:

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

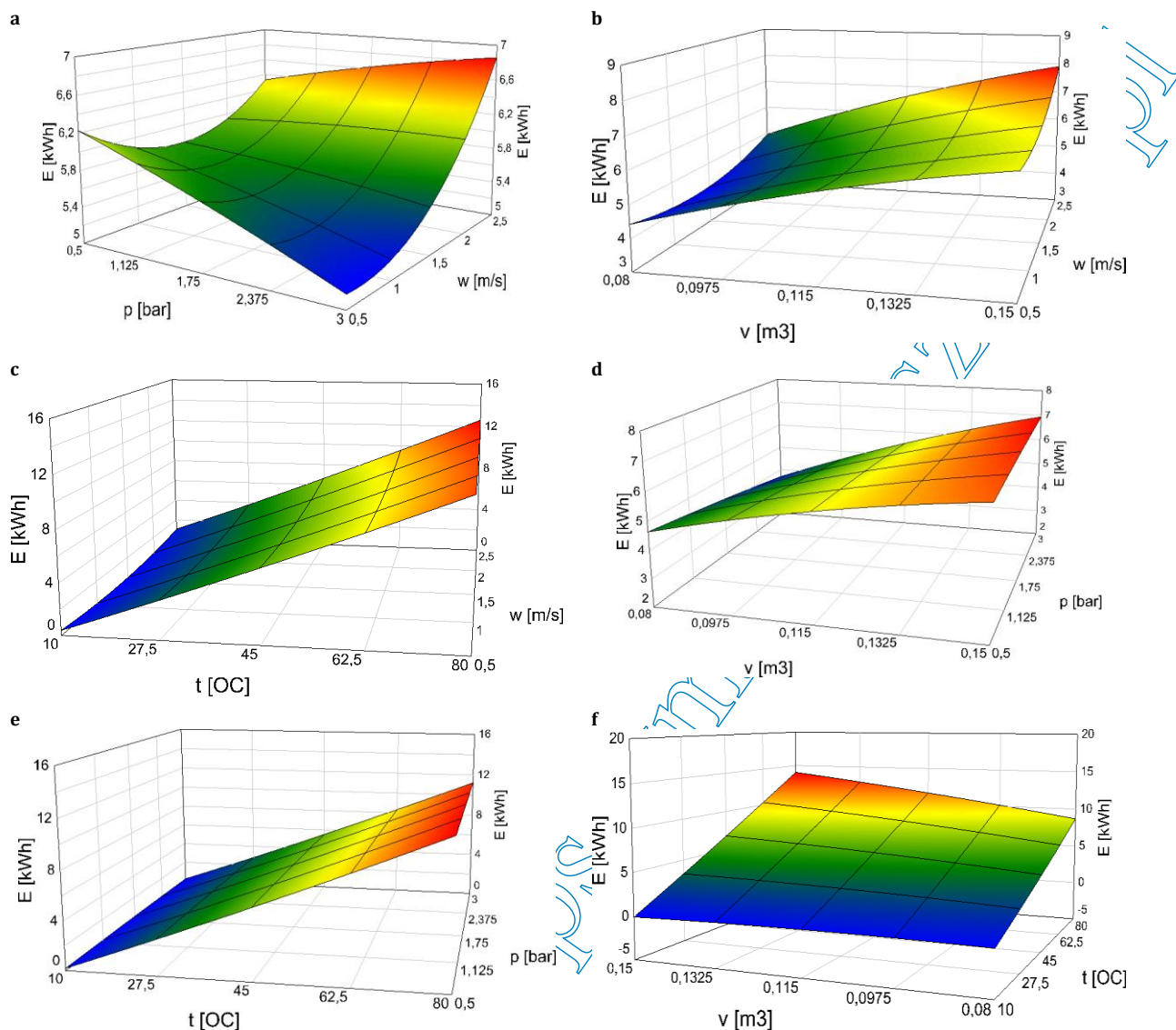
gdzie:

\bar{w} , \bar{p} , \bar{v} , \bar{T} , są przyjętymi czynnikami procesu mycia. Z analizy statystycznej wynika, że podkreślone wyrazy są nieistotne w sensie statystycznym przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

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

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

Na wykresach a, b, c, d, e, f (rys. 2) przedstawiono graficznie powyższą funkcję jako konfigurację dwu zmiennych czynników. Czynniki niewystępujące na wykresach jako zmienne mają stałe, centralne wartości programu badań: $w = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $p = 1,75 \text{ bar}$; $T = 45^{\circ}\text{C}$; $v = 0,115 \text{ m}^3$.



Rys. 2. Wykresy zużycia energii całkowitej E w funkcji temperatury - T , ciśnienia - p , objętości cieczy myjącej - v , prędkości przepływu - w : (a - zależność zużycia energii w funkcji ciśnienia i prędkości przepływu; b - zależność zużycia energii w funkcji objętości i prędkości przepływu; c - zależność zużycia energii w funkcji temperatury i prędkości przepływu; d - zależność zużycia energii w funkcji prędkości przepływu i ciśnienia; e - zależność zużycia energii w funkcji temperatury i ciśnienia; f - zależność zużycia energii w funkcji prędkości przepływu i temperatury).

Fig. 2. Chart of the Total energy E as a function of temperature - T , pressure - p , the volume of wash liquor - v , flow rate - w : (a - the energy dependence as a function of pressure and flow velocity; b - energy dependence as a function of volume and flow rate; c - the dependence of energy consumption as a function of temperature and flow velocity; d - energy dependence as a function of flow rate and pressure; e - energy dependence as a function of temperature and pressure; f - the dependence of energy consumption as a function of flow rate and temperature).

Wnioski

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 liniowy (proporcjonalny). Pozostałe mają charakter funkcji kwadratowej.
- Oddziaływanie prędkości przepływu ma charakter niemonotoniczny dla ciśnień niższych od 2,4 bar. Występuje wartość minimalna (korzystna) w zakresie ok. 1,5 m·s⁻¹. 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.

· Otrzymane wyniki badań mogą być przydatne do projektowania programów mycia metodą CIP.

Literatura

1. Kukielka S., Kukielka L. 2002. *Experiment planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań*. Instrukcja użytkownika. Politechnika Koszalińska.
2. Kukielka L. 2002. *Podstawy badań inżynierskich*. Politechnika Koszalińska, PWN, Warszawa.

3. Diakun J., Mierzejewska S. 2005. *Stanowisko do badań eksperymentalnych warunków i skuteczności mycia*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 1 – 2.
4. Mierzejewska S., Diakun J. 2011. *Energia w procesie mycia rurociągów w systemie CIP*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 1.
5. Pawelas A. 2010. *Prezentacja na Konferencji Naukowo – Technicznej: Efektywność energetyczna*. Gospodarka mediami w przemyśle spożywczym, Zakopane.
6. Tamine A. Y. 2008. *Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations*. Blackwell Publishing.

Sylwia Mierzejewska

Politechnika Koszalińska

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego

ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

tel. (0-94) 3478-404

e-mail: sylwia.mierzejewska@tu.koszalin.pl

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę
w latach 2010 – 2011 jako projekt badawczy Nr N N313 136838**