

MODEL ROZMYTY FILTRACJI MEMBRANOWEJ

Marcin Tomasik

Akademia Rolnicza w Krakowie

Streszczenie. Zaprezentowano metodykę modelowania matematycznego oraz rozmyty model procesu filtracji membranowej emulsji chłodząco-smarującej elementy robocze prasy tłoczącej opakowania dla produktów rolno-spożywczych. Modelowanie za pomocą równań różniczkowych, kiedy na membranie powstaje warstwa nieodwracalna i stopniowo zanika strumień permeatu, jest nieskuteczne. Wymagałoby ono długiego czasu obliczeń oraz liczbę wolnych parametrów, które trzeba wyznaczyć doświadczalnie. W niniejszej pracy jako rozwiązanie alternatywne zaproponowano modelowanie rozmyte. Wykorzystuje ono wiedzę eksperta procesu, czyli osób obsługujących proces oraz wyniki badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: emulsja, filtracja membranowa, logika rozmyta, puszka napojowa

WSTĘP

Filtracja membranowa jest operacją mającą na celu oddzielenie od siebie dwóch faz znajdujących się w mieszaninie przez zatrzymanie jednej z nich na porowatej membranie. Efektywność rozdziału mieszanin zależy od właściwego doboru membran, parametrów prowadzonego procesu (ciśnienia nad i pod przegrodą) oraz systemu filtracji [Juszka i Tomasik 2002, Bouhabila i in. 1998].

Techniki membranowe jako metody separacji, znajdują zastosowanie w technologiach oczyszczania odpadów produkcyjnych. Przyczyniają się do recykulacji surowców oraz wprowadzania czystych technologii (bezodpadowych), zastępując energochłonne metody rozdzielania [Condon 2003]. Szczególnie dużą rolę odgrywają one w procesach rolno-spożywczych. Przy produkcji żywności służą m.in. do zagęszczania lub klarowania produktów [Bednarski 1997, Palacios i in. 2002, Komornicki 1995].

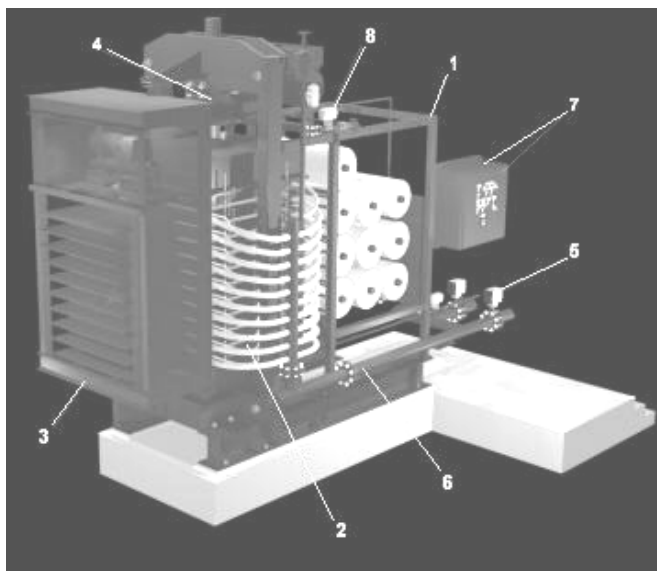
Realizacja procesów membranowych wymaga takiej konstrukcji aparatury, aby w trakcie ich trwania uzyskiwać możliwie duży, stabilny w czasie strumień permeatu o odpowiednio niskiej zawartości składnika separowanego przez membranę [Tomala 1999].

Adres do korespondencji – Corresponding Author: Marcin Tomasik, Katedra Energetyki Rolniczej Akademii Rolniczej w Krakowie, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków, tel. 0-12 662-46-48, kom: 0501 549 897, e-mail: mtomasik@poczta.fm

Podstawowym urządzeniem do produkcji puszek napojowej w analizowanym układzie jest prasa tłocząca puszkę nazywana bodymakerem. Operacja wykonywania korpusów puszek obejmuje zmianę kształtu kubka poprzez przetłoczenie kubka wstępnego do średnicy puszek nominalnej ze zmianą grubości ścianki. Towarzysząca procesowi przetłaczania puszek zmiana kształtu wywołuje powstawanie wysokiej temperatury. Podstawowymi zadaniami emulsji chłodziwo-smarującej w procesie obróbki metali jest odprowadzenie ciepła ze strefy obrabiania oraz zmniejszenie tarcia pomiędzy powierzchniami narzędzia i tworzonego przedmiotu. Względem ekonomiczne oraz ekologiczne decydują o oczyszczaniu emulsji za pomocą filtra membranowego w zamkniętym obiegu. Emulsja powinna charakteryzować się szeregiem istotnych właściwości dla bezpieczeństwa produktów w nich przechowywanych [Bergeson i Reiling 1997].

Celem pracy było opracowanie modelu procesu filtracji membranowej bazując na logice rozmytej. Logika rozmyta umożliwia modelowanie procesów nieliniowych, do których należy filtracja membranowa.

System filtracyjny składa się z pionowej kolumny i poziomo montowanymi równoległymi połączeniami do komory płyt ciśnieniowych (membran) (rys. 1).



Rys. 1. Filtr membranowy
Fig. 1. The membrane filter

Prasa filtracyjna skonfigurowana jest w osiem matryc filtrujących (2) o łącznej powierzchni $8,09 \text{ m}^2$ i maksymalnej wydajności $650 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Papierowe membrany przeciągane są z zasobnika papierowych membran (1) przez prowadnice (3), stąd zużyte trafiają do pojemnika. Filtracja prowadzona jest systemem krzyżowym (crossflow). Usuwanie zapechnionych membran odbywa się po otwarciu filtra (rozdzieleniu modułów

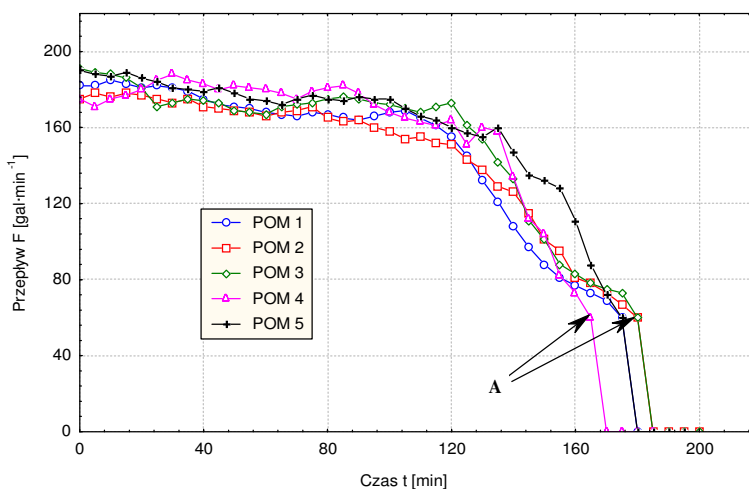
filtracyjnych) poprzez siłownik (4). Regulacja przepływu zasilającego filtr (6) realizowana jest poprzez zawór (5). Sterowanie tym zaworem i innymi urządzeniami obsługującymi tą prasę odbywa się na panelu sterowania (7).

Zapchanie porów membrany objawia się wzrostem różnicy ciśnień pomiędzy wejściem a wyjściem.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

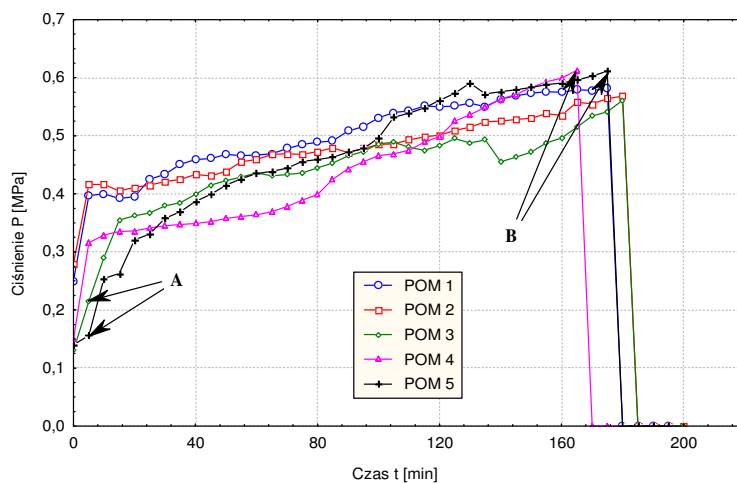
Badania doświadczalne prowadzono na linii produkującej puszkę napojową. Obiektem badań był filtr membranowy Filtrap 800. Celem badań doświadczalnych było zebranie danych do opracowania rozmytego modelu filtracji membranowej. Wyniki badań stanowiły pomiary bezpośrednie, jako reprezentacja czasowych przebiegów poszczególnych wielkości. W przypadku pomiarów bezpośrednich błąd bezwzględny wyznaczano z klasy dokładności przyrządów pomiarowych lub na podstawie najmniejszej działki skali przyrządu.

Charakterystykę przepływu emulsji przez prasę filtracyjną zamieszczono na rysunku 2. Wyłączenie prasy w celu wymiany wkładu filtracyjnego następuje w punkcie A. Wówczas przerywano również odczyt pomiarów. Nieliniowa charakterystyka przepływu ma podłoże w zmiennym oporze membrany filtracyjnej. Metoda filtracji krzyżowej pozwala na zmywanie z powierzchni membrany zanieczyszczeń i chwilowe zwiększenie przepływu. Krążą one jednak w obiegu, powodując powolny wzrost oporu i spadek przepływu przez filtr.

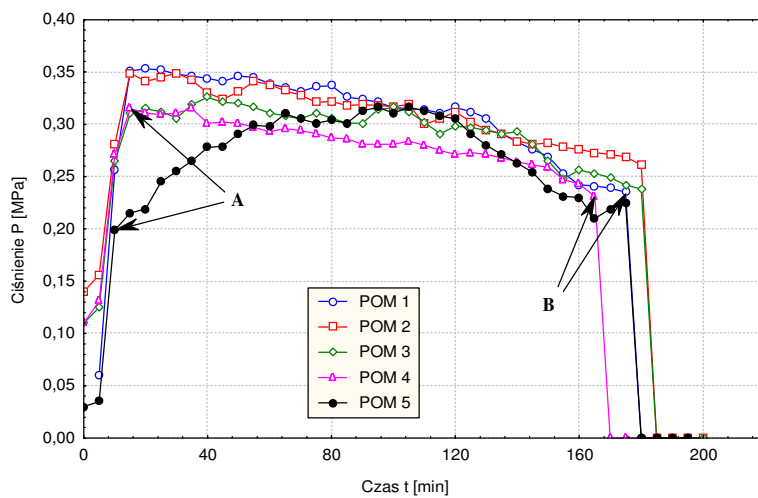


Rys. 2. Charakterystyka przepływu emulsji przez filtr
Fig. 2. Characteristic of flow emulsion by filter

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki pomiarów ciśnienia mierzonego przed prasą filtracyjną. Po operacji wymiany wkładu filtracyjnego uruchomiono układ z prasą.



Rys. 3. Charakterystyka ciśnienia zanieczyszczonej emulsji zasilającej filtr
Fig. 3. Characteristic of pressure defiled emulsion feeding filter



Rys. 4. Charakterystyka ciśnienia przefiltrowanej emulsji wypływającej z filtra
Fig. 4. Characteristic of pressure filtered emulsion effluent with filter

Punkt A jest początkiem prowadzenia pomiarów. Ponieważ układ zasilający prasę filtracyjną został opróżniony, wielkość początkowa ciśnienia była często nawet o połowę mniejsza od ustalonej po 5 min pomiaru. Mniejsza wartość na początku ma dodatkowo zapobiegać uderzeniu strumienia w membranę rozdzielającą i chronić ją przed uszkodzeniami. Na początku pracy występuje niewielki opór membrany. Wraz z koncentracją zanieczyszczeń powoli jednak zaczyna wzrastać ciśnienie.

Duża różnica pomiędzy pierwszymi pomiarami wynikać też może z chwilowej koncentracji zanieczyszczeń w zbiorniku. Wyznacznikiem dobrych właściwości emulsji jest piana znajdująca się na jej powierzchni w zbiornikach przed i za prasą filtracyjną. Piana ma zdolność do unoszenia części zanieczyszczeń, które zbiera urządzenie Oil Mop Skimmer. Brak piany powoduje większą koncentrację zanieczyszczeń w zbiorniku i przyczynia się do szybszego zapychania membrany. W punkcie B proces filtracji przez prasę zostaje zatrzymany celem wymiany wkładu.

Charakterystykę zmiany ciśnienia w rurociągu za filtrem zilustrowano na rysunku 4. W początkowej fazie przebiegów widoczne są pomiary w momencie uruchomienia. Ciśnienie za filtrem ma małe wartości, stopniowo wzrasta, następnie powoli zaczyna opadać. Zjawisko to spowodowane jest mniejszym przepływem. Właściwa praca prasy filtracyjnej wiąże się z zapewnieniem podtrzymywania ciśnienia za nią, w celu ochrony membrany przed uszkodzeniem. W układzie rurociągu odprowadzającego emulsję do zbiornika zamontowano zawór zwrotny oraz zawór sterowany ciśnieniowo, który utrzymuje odpowiednie wartości ciśnienia za filtrem.

MODEL FILTRACJI MEMBRANOWEJ

Każda membrana jest filtrem, a zatem co najmniej jeden ze składników rozdzielanej mieszaniny – w tym przypadku oczyszczona emulsja, może bez przeszkód przechodzić przez membranę, podczas gdy zanieczyszczenia zostają przez nią zatrzymane. Rozdzielanie to przebiega w sposób czysto fizyczny, tzn. rozdzielane składniki nie ulegają przemianom termicznym, chemicznym ani biologicznym [Hayes 2001]. W przeciwieństwie do tradycyjnego filtra za pomocą membran można rozdzielać składniki mieszaniny, aż do zakresu molekularnego [Rautenbach 1996].

W przypadku transportu konwekcyjnego (membrany porowate) siłą napędową jest różnica ciśnień po obu stronach membrany.

Metodą oczyszczającą emulsję jest mikrofiltracja realizowana na syntetycznych stałych materiałach nieorganicznych w formie porowatej o wykonaniu symetrycznym.

Modelowanie transportu w porach (rys. 5) rozpoczyna się od następujących założeń:

- przepływ przez membranę porowatą odpowiada przepływowi przez złożę usypane,
- uproszczenie membrany do układu równoległych kapilar [Gawroński 1999].

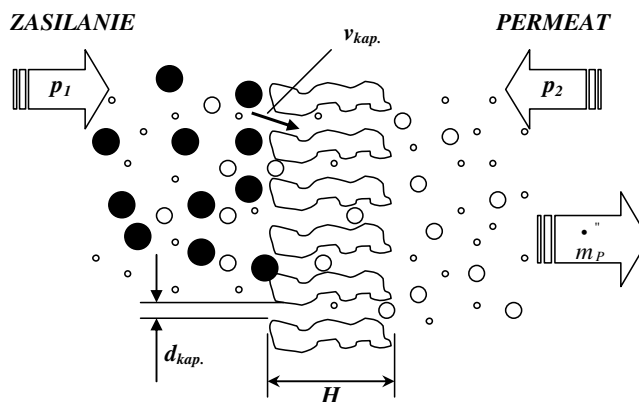
Strukturę membrany charakteryzują jej parametry:

- porowatość

$$\mathcal{E} = \frac{V_{por.}}{V_{cat.}}, \quad (1)$$

– powierzchnia właściwa w odniesieniu do objętości:

$$S_{(v)} = \frac{A_{por.}}{V_S}, \quad (2)$$



Rys. 5. Zasada działania membrany porowatej
Fig. 5. Principle function membrane porous

Przepływ w kapilarach można opisać równaniem Hagena-Poiseuille'a [Rautenbach 1996]:

$$v_{kap.} = \frac{d_h^2}{32\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L}, \quad (3)$$

w którym:

$$L = \mu H \quad (4)$$

stanowi zależność pomiędzy długością kapilar a grubością membrany H ($\mu \approx 25/12$),

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{(1-\varepsilon)S_{(v)}} \quad (5)$$

jest średnicą kapilar,

$$v_{kap.} = \frac{Q_p}{\varepsilon} = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p \cdot \varepsilon} \quad (6)$$

jest zależnością średniej prędkości w kapilarach od prędkości strumienia permeatu.

Przekształcenie równań do obliczenia v_{kap} przedstawia zależność prędkości strumienia permeatu od siły napędowej:

$$v_p = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} = A \cdot \Delta p \quad (7)$$

w którym:

$$A = \frac{\varepsilon^3}{\eta(1-\varepsilon)^2 S_{(V)}^2 2\mu H} \quad (8)$$

Zależność na stałą membrany A nazywa się często równaniem Carmana-Kozeny'ego. Wyznacza się ją doświadczalnie za pomocą testu permeacji czystej wody [Rautenbach 1996].

Należy zaznaczyć, że w praktyce – filtracja poprzeczna kontrolowana jest na ogół przez warstwę powierzchniową. W czasie pracy zatrzymywane przez membranę składniki tworzą na niej osad, który w znacznie większym stopniu decyduje o strumieniu i charakterystyce rozdzielczej, aniżeli sama membrana. To zjawisko wprowadza w rzeczywistości zmianę stałej membrany. Ma ono zdecydowany udział w kreowaniu różnicy pomiędzy modelem a obiektem rzeczywistym. Modelowanie przypadku, kiedy na membranie powstaje warstwa nieodwracalna i stopniowo zanika strumień permeatu, nie jest zbyt sensowne. Wymagałoby ono długiego czasu obliczeń oraz liczbę wolnych parametrów, które trzeba wyznaczyć doświadczalnie.

MODEL SYSTEMU OPARTY NA LOGICE ROZMYTEJ

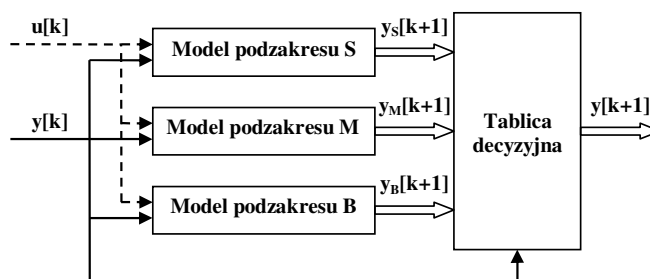
Logika rozmyta oferuje wygodne możliwości projektowania sterowania obiektami nieliniowymi, szczególnie w przypadkach, gdy charakter nieliniowości utrudnia ich opisanie metodami analitycznymi (np. w formie równań różniczkowych lub algebraicznych) i wymagana jest zmiana parametrów regulacji w formie zależności od punktu pracy. Ze względu na możliwość implementacji algorytmu, sterowanie rozmyte należy do komputerowych (mikroprocesorowych) metod regulacji [Czogała i Pedrycz 1981].

Lingwistyczne modele Takagi-Sugeno są modelami predykcyjnymi. Umożliwiają wyznaczenie wartości wyjściowej (sygnału wyjściowego) w następnym kroku (po upływie pewnego czasu). Przewidywanie tych wartości odbywa się na podstawie wiedzy z kroków poprzednich, zgodnie z którymi opracowuje się pomocnicze modele liniowe.

Modelowanie rozmyte opiera się na wiedzy o procesie. Wiedza zawarta jest w obserwacjach procesu i wynikach badań niezbędnych dla procesu modelowania rozmytego. W przypadku metody Takagi-Sugeno wykorzystane zostały przedstawiane w pracy wyniki badań doświadczalnych, jak również dodatkowe (konieczne) pomiary wielkości wejściowych $u(k)$ oraz wyjściowych $y(k)$.

Następnym krokiem jest opracowanie bazy reguł w zależności od stosowanej metody. W przypadku modelowania metodą Takagi-Sugeno, konieczne jest wyczerpanie pomocniczych modeli liniowych dla poszczególnych podzakresów wartości dla danego

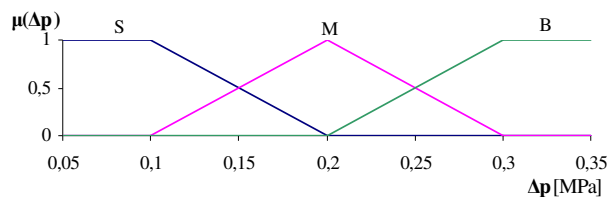
modelu procesu. Ostatnim etapem jest stworzenie tablicy decyzyjnej. Na podstawie wyznaczonych wartości poszczególnych funkcji przynależności zmiennej w kroku bieżącym k do podzakresów S , M , B i wyliczonych pomocniczych modeli liniowych odpowiednio dla podzakresów, można wyliczyć poszukiwaną przewidywaną ostrą wartość w kroku następnym $k + 1$. Przewidywaną wartość wielkości wyjściowej w kroku $k+1$ (następnym) wylicza się wg tablicy decyzyjnej (rys. 6) [Wachowicz 2002].



Rys. 6. Algorytm wyznaczania wielkości wyjściowej w kroku $k + 1$ (następnym)

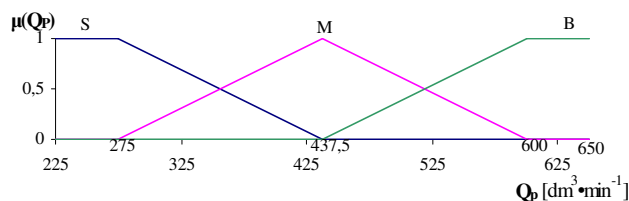
Fig. 6. Algorithm apportion value output in stage $k + 1$ (next)

Rozmyty model procesu filtracji emulsji pozwala przewidywać wielkość strumienia permeatu Q_p wypływającego z filtra w zależności od różnicy ciśnienia po obu stronach membrany Δp . Funkcje przynależności tego ciśnienia Δp do podzbiorów rozmytych małych – S , średnich – M , dużych – B przedstawiono na rysunku 7, natomiast strumień permeatu Q_p na rysunku 8.



Rys. 7. Fuzyfikacja różnicy ciśnień Δp na membranie

Fig. 7. Fuzzification of difference pressure Δp on the membrane



Rys. 8. Fuzyfikacja strumienia permeatu Q_p wypływającego z filtra do zbiornika ZB-CZ

Fig. 8. Fuzzification of effluent in filter flux permeat Q_p in tank ZB-CZ

Pomocnicze modele liniowe w chwilach $k + 1$ dla poszczególnych podzbiorów S (małe), M (średnie), B (duże) są następujące:

$$Q_{S-P}(k+1) = 0,889 \cdot Q_P(k) - 0,013 \cdot Q_P(k-1) - 977,988 \cdot \Delta p(k) + 1117,828 \cdot \Delta p(k-1) \quad (9)$$

$$Q_{M-P}(k+1) = -1,827 \cdot Q_P(k) + 2,267 \cdot Q_P(k-1) + 610,549 \cdot \Delta p(k) + 358,864 \cdot \Delta p(k-1) \quad (10)$$

$$Q_{B-P}(k+1) = 2,286 \cdot Q_P(k) + 1,286 \cdot Q_P(k-1) - 201957 \cdot \Delta p(k) + 207771 \cdot \Delta p(k-1) \quad (11)$$

Tablica decyzyjna umożliwiająca wyliczenie w kroku $k + 1$ strumienia permeatu zasilaającego zbiornik ZB-CZ w oczyszczoną emulsję przedstawia się następująco:

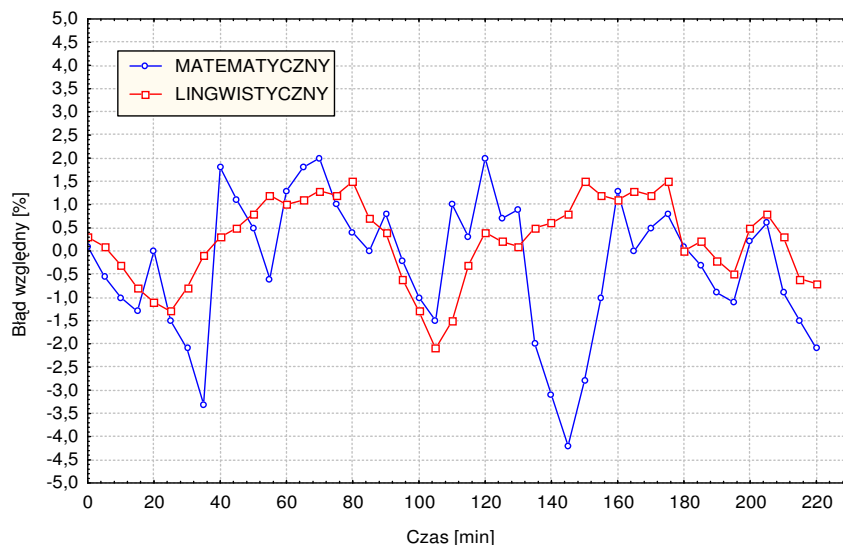
$$Q_P(k+1) = \frac{\mu_S(Q_P[k])}{\mu_S(Q_P[k]) + \mu_M(Q_P[k]) + \mu_B(Q_P[k])} \cdot Q_{S(P)}[k+1] + \frac{\mu_M(Q_P[k])}{\mu_S(Q_P[k]) + \mu_M(Q_P[k]) + \mu_B(Q_P[k])} \cdot Q_{M(P)}[k+1] + \frac{\mu_B(Q_P[k])}{\mu_S(Q_P[k]) + \mu_M(Q_P[k]) + \mu_B(Q_P[k])} \cdot Q_{B(P)}[k+1] \quad (12)$$

Skomplikowane nieliniowe modele można przybliżyć przez lokalne modele liniowe, na bazie których tworzy się optymalne liniowe regulatory dla najważniejszych punktów pracy. Metoda Takagi-Sugeno szczególnie dobrze spełnia rolę w opisie regulatorów. Regulatory liniowe są obecnie bardzo dobrze rozpoznane. Duże możliwości regulatorów T-S pozwalają na stosunkowo proste modelowanie skomplikowanych systemów złożonych obiektów nieliniowych.

WERYFIKACJA EMPIRYCZNA MODELU FILTRACJI MEMBRANOWEJ

Badania weryfikacyjne przeprowadzono na zautomatyzowanym obiekcie. Odczytu wskazań dokonano z czujników pomiarowych podłączonych do systemu sterowania. Do systemu sterowania podłączono komputer przemysłowy z zainstalowanym oprogramowaniem wizualizacyjnym, rejestrującym zdarzenia w czasie rzeczywistym oraz prowadzącym archiwizację i wyświetlającym alarmy. Z archiwum tego komputera pobrano dane do weryfikacji modelu.

Weryfikacja obejmowała porównanie klasycznego modelu matematycznego z modelem lingwistycznym (rys. 9). Dla filtracji trwającej 220 min wykonano symulację komputerową na modelach matematycznym i lingwistycznym. Wyniki symulacji porównano z wartościami empirycznymi zarejestrowanymi na obiekcie badań. Z obserwacji wyników błędów względnych tych modeli wynika, że model lingwistyczny dokładniej opisuje proces filtracji membranowej. Przy uwzględnieniu, że model lingwistyczny można jeszcze udoskonalić modyfikując reguły bądź sam proces rozmywania, istnieje możliwość uzyskania jeszcze większej dokładności tego modelu. To dodatkowo przemawia za lepszą oceną dla modelu lingwistycznego.



Rys. 9. Porównanie modelu matematycznego i lingwistycznego dla strumienia permeatu
 Fig. 9. Comparison mathematical model and linguistic for flux permeat

Realizacja procesów membranowych wymaga takich konstrukcji aparatuowych, aby podczas prowadzenia procesu filtracji uzyskiwać możliwie duży stabilny w czasie strumień permeatu o odpowiednio niskiej zawartości składnika separowanego przez membranę. Zaprezentowane modelowanie systemu filtracji membranowej ma na celu przedstawienie możliwości zwiększenia zdolności prognostycznych modelu. Powinno wpłynąć na wzrost zainteresowania modelowaniem rozmytym w innych obszarach zastosowań. Zastosowane w prezentowanej pracy sprawdziło się, jako narzędzie do wyznaczania parametrów sterowania w warunkach niekorzystnych zjawisk towarzyszących procesowi i wprowadzających nieliniowości do obiektów.

WNIOSKI

1. Rozmyty model filtracji membranowej dokładniej opisuje ten proces, aniżeli model oparty na równaniach różniczkowych.
2. Model oparty na logice rozmytej pozwala na predykcję wielkości wyjściowych, a tym samym wcześniejsze wykrywanie stanów krytycznych, tj. różnica transmembranowa.
3. Logika rozmyta pozwala na skuteczne modelowanie procesów nieliniowych. Modele są tworzone na podstawie aktualnych wyników pomiarów. Takie rozwiązanie polegające na „uczeniu” modelu, zapewnia dokładne opisywanie procesu i szybką korektę współczynników.
4. Przedstawione modele rozmyte można adaptować do sterowników mikroprocesorowych z dostępnymi bibliotekami lub modułami fuzzy logic.

PIŚMIENNICTWO

- Bednarski W., 1997. Postęp w technikach membranowych oraz ich zastosowanie w przemyśle piwowarskim. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny* 6, 17–23.
- Bergeson B.T., Reiling M., 1997. Wytwarzanie dwuczęściowej puszkii napojowej. Williamson, Wielka Brytania.
- Bouhabila E.H., Aim Ben R., Buisson H., 1998. Microfiltration of activate sludge using submerged membrane with air bubbling (application to wastewater). *Desalination* 118, 315–322.
- Condon M., 2003. Industrial wastewater filter technology inspired by nature. *Filtration & Separation* 40, 1, 18–21.
- Czogała E., Pedrycz W., 1981. On identification of fuzzy systems and its applications in control problems. *Fuzzy Sets and Systems* 6, 73–83.
- Gawroński R., 1999. *Procesy oczyszczania cieczy*. Oficyna Wyd. PW, Warszawa.
- Hayes K. Q., 2001. Process filtration: characterizing fluids and medium selection. *Chemical Eng.* 108, 7, 72–78.
- Juszka H., Tomasik M., 2002. Analiza pracy filtra membranowego. *Inż. Roln.* 6, 415–420.
- Komornicki J., 1995. Nowe podejście do filtracji piwa. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny* 2, 12–17.
- Palacios V.M., Caro I., Pérez L., 2002. Comparative study of crossflow microfiltration with conventional filtration of sherry wines. *J. Food Eng.* 54, 95–102.
- Rautenbach R., 1996. *Procesy membranowe. Podstawy projektowania modułów i instalacji*. WNT, Warszawa.
- Tomala D., 1999. Przeciwdziałanie zapychaniu membran filtracyjnych. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny* 5, 22–26.
- Wachowicz E., 2002. Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do modelowania procesów technologicznych. *Inż. Roln.* 7(40), 5–17.

THE FUZZY LOGIC MODEL IN FILTRATION MEMBRANE

Abstract. Featured methodic mathematical modeling and fuzzy logic model process membrane filtration cooling oil emulsion cooling elements of the bodymaker in production for food processing. Modeling by means of differential equation, when by membrane be due to smth dirtiness layer irreversible and gradually decline flux permeat is ineffective. It was made the analysis and selection control parameters. In article as alternative solution propose modeling by fuzzy logic.

Key words: emulsion, membrane filtration, fuzzy logic, can beverage

Praca naukowa finansowana ze środków KBN w latach 2005–2006 jako projekt badawczy

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 16.03.2006