

Adam Ekielski  
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

## WYKORZYSTANIE STEROWNIKÓW ROZMYTYCH DO OPTYMALIZACJI PRACY LINII DO EKSTRUDOWANIA PRODUKTÓW ROŚLINNYCH

### Streszczenie

W pracy przedstawiono projekt układu regulacji wykorzystującego prosty sterownik rozmyty wykorzystujący w procesie wnioskowania i wyostrzenia algorytm Tagaki-Sugeno-Kang. Sterownik wykorzystano w procesie ekstruzji kaszki kukurydzianej. Do budowy sterownika wykorzystano pakiet oprogramowania LabView7 wraz z bibliotekami schematów. Algorytm i funkcje przynależności napisano w języku C++. Badania polegały na sprawdzeniu skuteczności w przypadku wystąpienia zakłócenia w przebiegu procesu regulacji za pomocą regulatora rozmytego. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność tego systemu regulacji i jego pełną przydatność. Szczególnie dobre działanie miało miejsce w przypadku znacznego rozchwiania wartości wyjściowych, tak jak ma to miejsce w przypadku zakłócenia w dopływie materiału do ekstrudera.

**Słowa kluczowe:** ekstrudat, wilgotność, temperatura procesu, regulator rozmyty, algorytm

### Wykaz oznaczeń

- m – liczba wielkości wyjściowych,
- r – liczba wielkości wejściowych,
- $x_i^k$  – odpowiednie wartości wielkości wejściowych,
- $y_i^k$  – odpowiednie wartości wyjściowe,
- $\mu_{ij}^k$  – stopień przynależności do zbioru rozmytego odpowiedniej wartości wejściowej ( $i=1,2,\dots,m, j = 1,2,3,\dots,r$ ),
- $p_0, p_1, \dots, p_k$  – waga wielkości wejściowych.
- N – liczba reguł wnioskowania opisujących zachowanie procesu,
- I – natężenie prądu [A]
- T – temperatura [°C]

## Wprowadzenie

Ekstruzja jest procesem łączącym kilka operacji jednostkowych takich jak mieszanie, miesienie, ścinanie, sprężanie i formowanie. Znaczne zainteresowanie wykorzystaniem procesu zachęca do badań i opracowywania rozmaitych metod do automatycznej kontroli jego przebiegu. Jednakże sukces w tej dziedzinie jest znacznie ograniczony przez złożoną dynamikę procesu, wielowymiarowe interakcje, występowanie dynamicznych układów nieliniowych, znaczne opóźnienia czasowe, dużą liczbę zakłóceń, zmieniające się natężenie materiału podawanego.

Do dzisiaj większość jeżeli nie wszystkie ekstrudery stosowane w przemyśle do produkcji ekspandowanych produktów zbożowych pozostają ręcznie sterowanymi lub wyposażonymi regulatory PID.

Regulatory PID są proste w budowie, niezawodne w działaniu i solidne w wykonaniu, szczególnie w modelowaniu systemów liniowych [Timothy 2000]. Jednakże regulatory te są ogólnie nieprzydatne do układów nie liniowych i nie działają poprawnie w systemach opisywanych przy zastosowaniu złożonych i nieprecyzyjnych modeli matematycznych, takich jak fermentacja i odwodnienie, czy ekstruzja [Odejobi 2005]. Logika rozmyta zdobyła popularność jako skuteczna oferta przy projektowaniu i symulacji systemów sterowania procesami, szczególnie w przemyśle przetwórczym i spożywczym. Stało się to ponieważ, logika rozmyta jest pojęciowo łatwa do zrozumienia, elastyczna i odporna na nieprecyzyjne dane. Ze względu na skuteczność optymalizacji pracy nieliniowych obiektów [Johansen 2003] do sterowania procesem wykorzystano metodę Takagi-Sugeno [Takagi 1985].

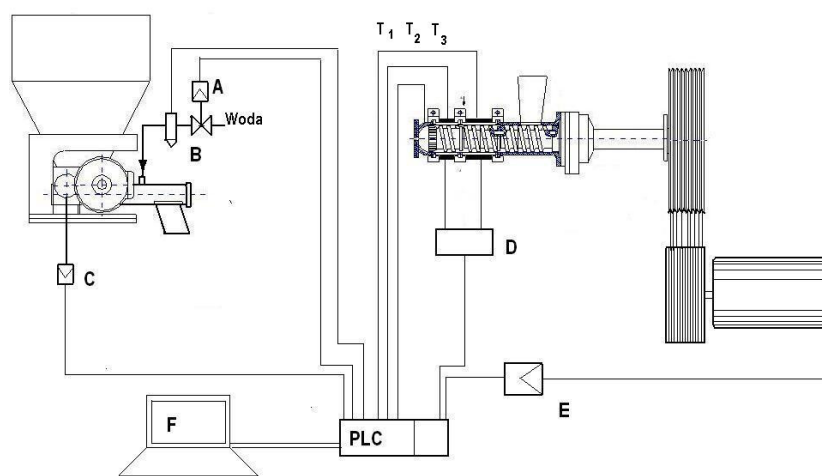
## Cel i zakres pracy

Celem pracy jest opracowanie systemu regulacji wykorzystującego język logiki rozmytej sterującego procesem ekstruzji oraz sprawdzenie skuteczności jego działania poprzez właściwy dobór ilości doprowadzonej wody i surowca w przypadku wprowadzenia zakłóceń do przebiegu procesu.

## Metodyka

Na rysunku 1 przedstawiono stanowisko badawcze wraz z układem sterowania i pomiaru. Proces ekstruzji prowadzony był w ekstruderze jedno ślimakowym o współczynniku  $L/D = 6.5$ , prędkości obrotowej ślimaka  $n=200$  obr/min, mocy silnika głównego  $N=25$  kW. Temperatura w dwóch sekcjach tulei oraz matrycy ekstrudera mierzona była za pomocą czujników Pt-100. Utrzymanie zadanej temperatury zapewniały dwie grzałki umieszczone na dwóch ostatnich sekcjach

tulei o mocy 1,5 kW każda [Ekielski et al, 2005]. Natężenie prądu mierzono przemysłowym przekładnikiem prądowym firmy Honeywell umieszczonym na przewodzie doprowadzającym energię do silnika. Natężenie przepływu wody mierzono przepływomierzem objętościowym firmy Honeywell o zakresie pomiarowym 0-30 dm<sup>3</sup>/h i rozdzielczości 1 cm<sup>3</sup>. Elementem wykonawczym układu sterowania przepływem wody silnik krokowy firmy zamocowany na zaworze kulowym. Objętościowe natężenie podawanego materiału uzyskano poprzez zmianę prędkości obrotowej ślimaka podajnika i znaną funkcję przetwarzania  $Q = f(n)$ . Wszystkie mierzone wartości oraz wartości wyjściowe były zbierane przez przetwornik A/C modułu PLC firmy National Instruments, i następnie przetwarzane w programie LabView ver. 7. Do analizy danych i realizacji algorytmu regulatora zastosowano komputer z procesorem 3.5 GHz, 512 MB RAM.

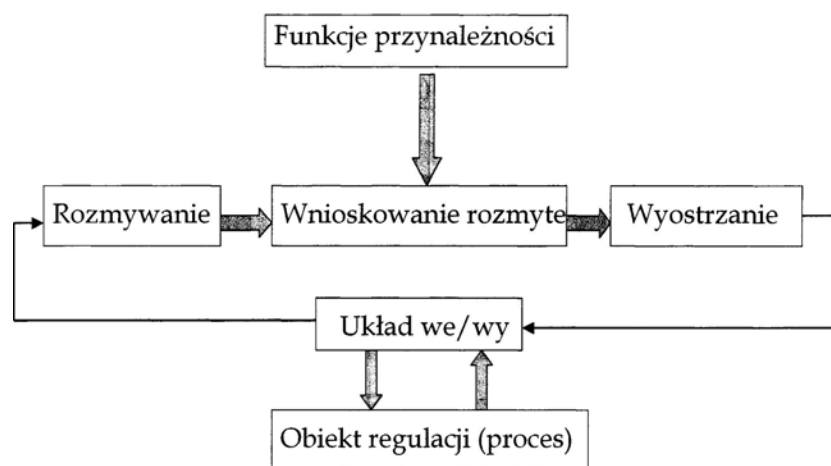


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego. (A) Silnik krokowy sterujący zaworem dopływu wody; (B) przepływomierz objętościowy; (C) układ regulacji prędkości obrotowej podajnika materiału; (D) układ sterowania grzałkami oporowymi; (E) indukcyjny przekładnik prądowy do pomiaru obciążenia silnika; (F) jednostka sterująca; PLC interface pomiarowy,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – czujniki temperatury w odpowiednich sekcjach i matrycy ekstrudera

Fig. 1. Chart of a research station. (A) stepping motor which controls water inflow valve; (B) volume flowmeter; (C) rotational speed control system for feeder of material; (D) control system for resistance heaters; (E) induction current transformer for measurement of engine load; (F) controlling unit; PLC measurement interface,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – temperature sensors in respective sections and matrix of the extruder

Algorytm pracy regulatora rozmytego napisano wykorzystując dostępne dla LabView&7 biblioteki oprogramowania oraz kod napisany w C++.

Schemat blokowy opisujący zasadę działania sterownika rozmytego przedstawiono na rysunku 2. Dane odczytywane były z przetworników pomiarowych z częstotliwością próbkowania wynoszącą  $f_p=1\text{Hz}$ . Obróbka danych wejściowych i przetwarzanie wykonywane jest w klasyczny sposób poprzez trzy oddzielne bloki regulatora: rozmywania, wnioskowania, ostrzenia. Ostra wartość wyjściowa podawana jest do odpowiednich elementów wykonawczych.



Rys. 2. Struktura sterownika rozmytego

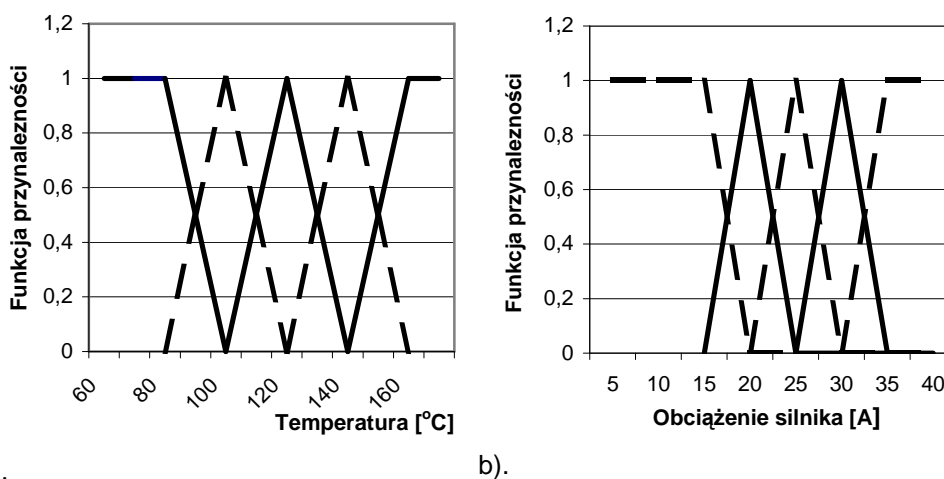
Fig. 2. Structure of a fuzzy control

Funkcja przynależności jest bardzo ważnym elementem wnioskowania rozmytego przypisującą stopień przynależności wartości wielkości wejściowej do określonej wartości rozmytej. W celu opisu przynależności w badaniach wykorzystano trójkątną funkcji przynależności do zbioru rozmytego. Na rysunku 3 przedstawiono dwa badane rozkłady funkcji przynależności do zbioru rozmytego.

Funkcja przynależności wartości wielkości T i I została określona na podstawie wielokrotnej obserwacji działania operatora i przebiegu procesu. Proces sterowania przebiegiem procesu za pomocą sterownika rozmytego jest opisywany modelem Tagaki-Sugeno [Tagaki 1985]. W którym baza reguł opisywana jest następująco:

$$R: \text{if } x_i^k \text{ is } \mu_{i1}^k \text{ and } \dots \text{and } x_r^k \text{ is } \mu_{ir}^k \text{ then } y_i^k = p_{i0} + p_{i1}x_1^k + \dots + p_{ir}x_r^k; \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m.$



a).

b).

Rys. 3. Funkcje przynależności wartości temperatury matrycy  $T$  (a) i prądu pobieranego przez silnika  $I$  do zbiorów wartości rozmytych (b)

Fig. 3. Functions of membership of temperature value of  $T$  matrix (a) and electricity taken by the engine  $I$  in sets of fuzzy values (b)

Zadaniem funkcji regulacji ma być utrzymanie zadanej temperatury i reakcja na zakłócenia. Wartość wyjściowa regulatora obliczona z  $n$  pojedynczych implikacji

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_1^i(x_i) \wedge \dots \wedge \mu_n^i(x_n)) * (p_0^i + p_1^i * x_1 + \dots + p_k^i * x_k)}{\sum_{i=1}^n (\mu_1^i(x_i) \wedge \dots \wedge \mu_n^i(x_n))} \quad (2)$$

Przypisano symbole odpowiadające wartościom objętościowego natężenia przepływu doprowadzanej wody  $Q_i$  i surowca  $M_i$  (tabela 1) do procesu.  $H$  określa załączenie  $L$  wyłączenie grzałek oporowych. Biorąc pod uwagę przedstawione zależności wprowadzono w algorytmie regulatora zbiór reguł wnioskowania które zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 1. Tabela kodowania wartości objętościowego doprowadzenia wody do procesu  
Table 1. Table with coding of the values of volumetric water supply to the process

Wartość $Q$ [dm <sup>3</sup> /h]	0	5	7,5	10	15
Kod	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
Wartość $M$ [kg/h]	5	20	50	75	100
Kod	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$

Tabela 2. Tabela reguł wnioskowania sterownika rozmytego  
Table 2. Table of rules of reasoning of a fuzzy control

Temperatura [T] Obciążenie [I]	Bardzo niska [BN]	Niska [N]	Normalna [NO]	Wysoka [W]	Bardzo wy- soka [BW]
Bardzo niskie [BN <sub>1</sub> ]	Q <sub>3</sub> M <sub>1</sub> H	Q <sub>3</sub> M <sub>2</sub> H	Q <sub>3</sub> M <sub>5</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>5</sub> L	Q <sub>5</sub> M <sub>5</sub> L
Niskie [N <sub>1</sub> ]	Q <sub>3</sub> M <sub>2</sub> H	Q <sub>3</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>3</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>5</sub> L	Q <sub>5</sub> M <sub>4</sub> H
Normalne [NO <sub>1</sub> ]	Q <sub>3</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>2</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>2</sub> M <sub>5</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>4</sub> H	Q <sub>5</sub> M <sub>3</sub> H
Wysokie [W <sub>1</sub> ]	Q <sub>4</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>2</sub> M <sub>4</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>2</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>2</sub> H
Bardzo wysokie [BW <sub>1</sub> ]	Q <sub>5</sub> M <sub>2</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>2</sub> H	Q <sub>3</sub> M <sub>3</sub> H	Q <sub>4</sub> M <sub>1</sub> H	Q <sub>3</sub> M <sub>1</sub> H

Wykorzystując tabele reguł i funkcje przynależności algorytm przeprowadzono wnioskowanie oraz wyostrzono wartości wyjściowe wykorzystując reguły (3). Przykładowo dla zmierzonej w układzie temperatury matrycy  $T=115^{\circ}\text{C}$  i natężenia prądu pobieranego przez silnik  $I = 25\text{ A}$  Zestawienie reguł i wnioskowania zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Wnioskowanie i wartość wyjściowa  
Table 3. Reasoning and output value

Reguła	Przesłanka T	Przesłanka I	Wynik wnioskowania	Wartość przynależności do zbioru
R <sub>1</sub>	Niska (temp) = 0,25	Normalne(I) = 1	Q <sub>2</sub> M <sub>3</sub> H	Min (0,25;1) = 0,25
R <sub>2</sub>	Normalna (temp) = 0,75	Normalne (I) = 1	Q <sub>2</sub> M <sub>5</sub> H	Min(1;1) = 1
R <sub>3</sub>	Niska (temp) = 0,25	Niskie (I) = 0	Q <sub>3</sub> M <sub>3</sub> H	Min (0,25; 0) = 0
R <sub>4</sub>	Normalna (temp) = 0,75	Wysokie (I) = 0	Q <sub>2</sub> M <sub>4</sub> H	Min (0,75;0) = 0

Na korzystając ze wzoru 3 i danych zawartych w tabeli 3 obliczono wartość wyjść regulatora.

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^4 |y = y^{(i)}| * y^i}{\sum_{i=1}^4 |y = y^{(i)}|} = \frac{0,25 * 5 + 1 * 5}{0,25 + 1} = 5 \text{ [dm}^3/\text{h]};$$

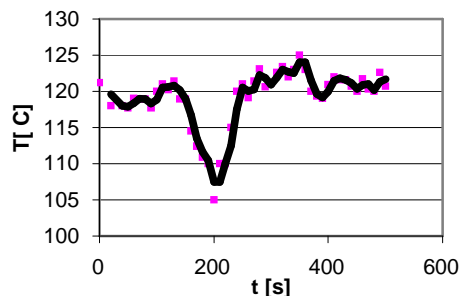
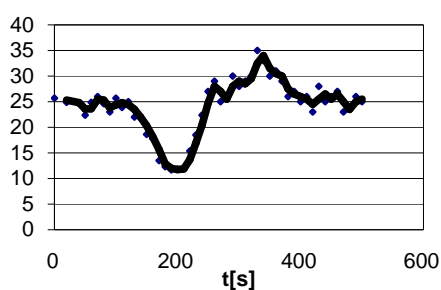
$$M = \frac{0,25 * 50 + 1 * 100}{1,25} = 92,5 \text{ [kg/h]}$$

Regulator ustawi taką prędkość obrotowa ślimaka podajnik , aby natężenie przepływu materiału M do ekstrudera wynosiło 92,5 kg/h. Zmieniając dławienie w linii

przepływu wody doprowadzi do ustalenia natężenie wody  $Q$  dopływającej do procesu na poziomie  $5 \text{ dm}^3/\text{h}$ .

### Wyniki badań i ich analiza

Sprawdzenie pracy regulatora polegało na wprowadzeniu zakłócenia w trakcie przebiegu procesu. Przypadek 1 - polegający na dostarczeniu w krótkim czasie  $0.5 \text{ dm}^3$  wody – awaria linii dozowania wody. Przypadek 2 - przerwanie dostarczania materiału do procesu przez 60 s. Wykresy przedstawiające odpowiedź układu na wprowadzane zakłócenie przedstawiono na rysunkach 4a, 4b, 5a, 5b.

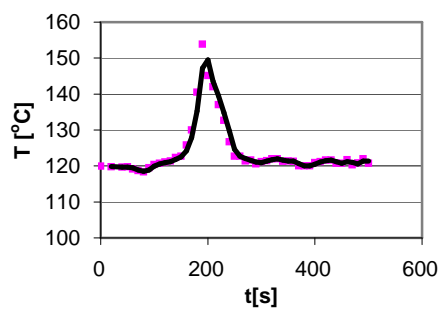
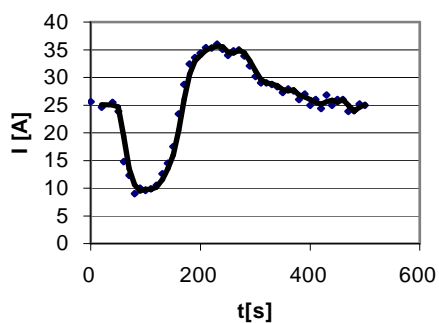


a).

b).

Rys. 4. a) i b). Odpowiedź układu na wprowadzenie zakłócenia do procesu – przypadek 1 (dodatek wody)

Fig. 4. System answer to a disturbance in the process – case 1 (addition of water)



a).

b).

Rysunek 5 a) i b). Odpowiedź układu na wprowadzenie zakłócenia do procesu – przypadek 2 (brak materiału- 50 s).

Fig. 5. System answer to a disturbance in the process – case 2 (lack of material: 50 s)

## **Wnioski**

1. Przedstawiony regulator rozmyty w obu przypadkach w wystarczającym stopniu spełnia wyznaczone zadanie.
2. Uzyskana odchyłka regulacji (od wartości zadanej) wynosiła nie więcej niż 5%.
3. Czas regulacji procesu (stabilizacji) po wprowadzonym zakłóceniu wynosił około 5 minut.
4. Należy jednak zaznaczyć istotny wpływ bazy danych (wiedzy) o procesie na uzyskane wyniki, co jednocześnie może stanowić przeszkodę przy właściwym konfigurowaniu regulatora.

## **Bibliografia**

Ekielski A., Biller E., Żelaziński T. 2005. Investigation on the effect of wheat extrudate break-up on its colour. *Annals of Warsaw Agricultural University. Agriculture No 46 (Agricultural Engineering)* 2005: 33-38.

Johansen T.A., Babuska R. 2003. Multi-objective identification of Takagi-Sugeno fuzzy models. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 11(6), 847-860.

Odejobi A. Odetunji, Owolarafe O. Kehinde. 2005. Computer simulation of fuzzy control system for gari fermentation plant. *Journal of Food Engineering*, 68, 197-207.

Rywotycki R. 2003. Food frying process control system. *Journal of Food Engineering*, 59, 339-342.

Takagi T., Sugeno M. 1985. Fuzzy identification systems and its applications to modelling and control. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 15, 116-132.

Timothy A. Haley S., Mulvaney J. 2000. On-line system identification and control design of an extrusion cooking process: Part II. Model predictive and inferential control design. *Food Control*, 11, 121-12.



**USE OF FUZZY CONTROLLERS IN OPTIMIZATION  
OF OPERATION OF A LINE FOR EXTRUSION  
OF PLANT PRODUCTS**

**Summary**

The study presents a project of a control system with a simple fuzzy controller which makes use of the reasoning and sharpening process. The controller was used in the process of maize gruel extrusion. LabView7 package with chart libraries was used for construction of the controller. The algorithm and membership functions were written in the language C++. The research involved checking the effectiveness in the event of a disturbance in the course of the control process using the fuzzy controller. The obtained results confirmed effectiveness of this system of control and its full usefulness. It worked especially well in the case of a considerable difference between input values as is in the case of disturbances in inflow of material to the extruder.

**Key words:** extrudate, moistness, process temperature, fuzzy control, algorithm