

ANALIZA TEORETYCZNA PROCESU KUTROWANIA W ASPEKTCIE TERMODYNAMICZNYM

Marek Szelaǳ

Katedra Inżynierii i Aparatury Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. w pracy przedstawiono analizę teoretyczną procesu kutrowania i wynikające stąd efekty termodynamiczne. Wyróżniony układ roboczy, złożony z misy kutra wypełnionej farszem mięsnym i zespołu noży, rozpatrywany jest jako termodynamiczny układ otwarty, przyrównywany do układu tribologicznego. Dokonano podziału pracy tarcia i oporów tarcia na część cieplną i mechaniczną rozpatrywanego układu.

Słowa kluczowe: kutrowanie, termodynamiczny układ otwarty, dyssypacja

Wprowadzenie

W procesie kutrowania między rozdrabnianym mięsem, a elementami roboczymi kutra czyli nożami i misą w której znajduje się mięso podczas cięcia występuje tarcie. Objawia się ono przede wszystkim wzrostem temperatury rozdrabnianego materiału oraz zużyciem ściernym elementów roboczych. Odpowiedni kształt krzywizny noża i kąt ostrza zmniejsza tarcie jednak nie na tyle aby to całkowicie rozwiązywało problem wzrostu temperatury podczas kutrowania. W związku z tym istnieje potrzeba schłodzenia farszu w bardzo szybkim czasie, przestrzegając receptury technologicznej. Często tradycyjne sposoby obniżania temperatury na zasadzie odbierania ciepła są niewystarczające. Dodatek wody, czy lodu coraz częściej zastępowany jest przez bezpośredni wtrysk gazów chłodzących (azotu lub dwutlenku węgla), gdzie wykorzystywane jest ciepło parowania gazu. Temperatura kutrowanego farszu zależy również od kąta ostrzy noża i gładkości wewnętrznej powierzchni misy [Fabian 2010].

Celem pracy jest analiza teoretyczna układu utworzonego przez narzędzia robocze w postaci noży o zróżnicowanych kształtach i rozdrabnianego surowca, jako termodynamicznego układu otwartego. Analizowane będą zagadnienia dyssypacji energii i dyssypacji ciepła oraz podziału pracy tarcia i oporów tarcia rozpatrywanego układu.

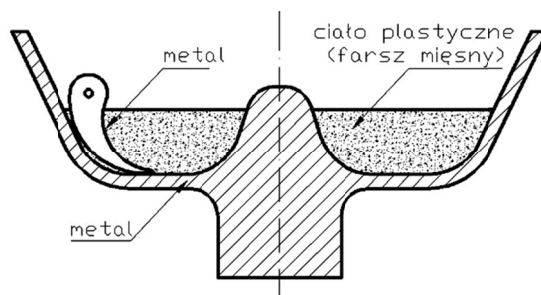
Proces kutrowania jako układ termodynamiczny otwarty

Pojęcie systemu (układu) ma charakter podstawowy w termodynamice. Powstało ono zanim powstała cybernetyka i teoria systemów. Opis systemów termodynamicznych oparto na aksjomatycznym zbiorze termodynamiki utworzonym przez jej zasady: zerową, pierwszą, drugą i trzecią. Współcześnie znajduje zastosowanie tak zwana zmodyfikowana termodynamika klasyczna, gdzie uwzględnia się nieodwracalność procesów rzeczywistych poprzez wprowadzenie ciepła dyssypacji do opisujących je równań [Tuliszka 1980].

Powyższy opis można zastosować do scharakteryzowania tarcia i zużycia w procesie kutowania.

W celu jednoczesnego i ogólnego przeanalizowania wszystkich zjawisk fizycznych (termodynamicznych), zachodzących podczas tarcia na makroskopowym poziomie organizacji materii, należy przyjąć jako obiekt termodynamiczny system otwarty, który wymienia z otoczeniem zarówno energię, jak i materię. Do opisu przemian termodynamicznych spowodowanych tarciami będą użyte wszystkie najważniejsze parametry termodynamiczne. Spośród parametrów ekstensywnych wystąpią między innymi energia wewnętrzna (U) i entalpia (I); spośród parametrów intensywnych – temperatura (Θ) i nacisk jednostkowy (p) lub obciążenie normalne (N). Do najważniejszych wzajemnych oddziaływań układu i otoczenia będą zaliczane: praca techniczna ($A_{t\ 1-2}$), ciepło (Q_{1-2}) i ciepło dyssypacji (Q_{dys}) [Sadowski 1999].

Do rozważań przyjęto fragment układu roboczego kutra, składający się z miski wypełnionej farszem mięsnym i wykonującej ruch obrotowy oraz z zespołu noży umocowanych na wale nożowym obracającym się wokół własnej osi. Układ ten nazwano układem rzeczywistym metal-ciało plastyczne-metal i przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ rzeczywisty w systemie metal-ciało plastyczne-metal
Fig. 1. Actual configuration in metal-plastic body-metal system

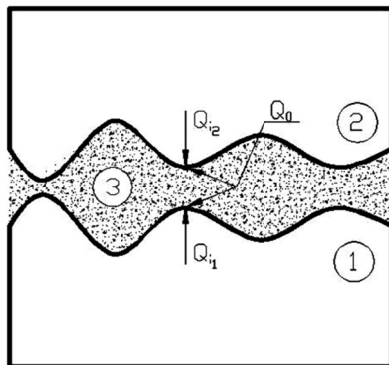
W procesie technologicznym rozdrabniania mięsa, jakim jest kutowanie, występuje tarcie na granicy styku farszu mięsnego z powierzchnią miski oraz z powierzchnią noży, a także tarcie między przemieszczającymi się względem siebie cząsteczkami mięsa. Tarcii towarzyszą zawsze procesy cieplne, które będą omówione z pomocą rysunku 2.

Układ modelowy na rysunku 2 odnosi się do skali mikro i odzwierciedla mikronierówności powierzchni miski oraz mikronierówności noży. Mikronierówności te w układzie rzeczywistym nigdy ze sobą nie stykają się. W celu uwzględnienia ciepła dyssypacji przyjęto, jakoby cząstki mięsa łączyły (były mostkiem) mikronierówności miski kutra i mikronierówności noży. Przy takim założeniu można zapisać następujące wyrażenie na ciepło dyssypacji:

$$Q_i = Q_{i1} + Q_{i2} \quad (1)$$

gdzie:

- Q_{i1} – składowa impulsu cieplnego miski kutra,
- Q_{i2} – składowa impulsu cieplnego narzędzia.



Rys. 2. Układ modelowy w systemie metal-ciało plastyczne-metal: 1 – ścianka miski, 2 – narzędzie robocze, 3 – farsz mięsny

Fig. 2. Model configuration in metal-plastic body-metal system: 1 – pan wall, 2- working tool, 3 – meat stuffing

Ciepło zgromadzone w farszu mięsnym częściowo przechodzi do miski 1 i do narzędzia 2.

Jeżeli przyjmiemy, że temperatura powierzchni miski 1 wynosi θ i farszu mięsnego wynosi θ_0 , to gęstość strumienia cieplnego q_c na granicy tych ciał będzie wyrażona przez prawo Newtona:

$$q_c = \alpha(\theta_0 - \theta) \quad (2)$$

gdzie:

α – współczynnik przyjmowania ciepła [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Zapis wzoru (2) o przyjmowaniu ciepła może być także przedstawiony za pomocą prawa przewodzenia Fouriera:

$$q_c = \alpha(\theta_0 - \theta) = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (3)$$

gdzie:

λ – przewodność cieplna warstwy laminarnej [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}$],

δ – grubość warstwy laminarnej [m].

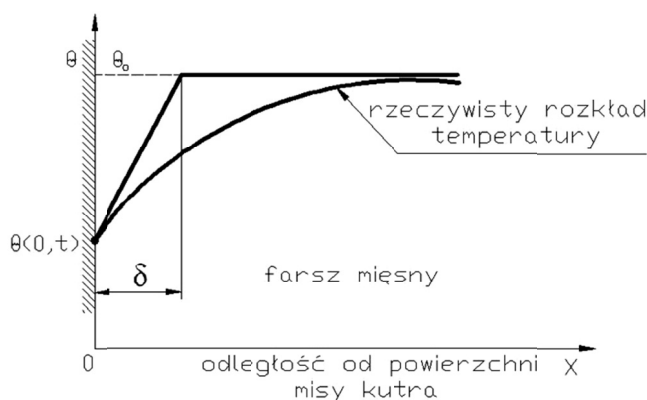
W tym przypadku warstwą laminarną jest warstwa najbardziej rozdrobnionego farszu mięsnego (niemalże do postaci emulsji) przylegająca bezpośrednio do powierzchni miski kutra.

W celu wykorzystania zależności literaturowych [Sadowski 1982, 1987], układ modelowy przedstawiony na rysunku 2 będzie potraktowany jako układ tribologiczny pary toczno-ślizgowej z tarcie płynnym [Hebda 1980]. Tarcie płynne w układzie tribologicznym pojawia się wówczas, gdy warstwa środka smarowego rozdziela styk metal-metal współpracujących ze sobą elementów maszyn.

W rozpatrywanym układzie miski kutra-farszu mięsnego-noży obrotowych, farsz mięsny pomiędzy krawędzią boczną noży a powierzchnią miski, porównywany jest do warstwy środka smarowego powstającej w wyniku ruchu względnego elementów maszyn (np. czoło wału w łożysku ślizgowym wzdłużnym).

Zatem interpretacja wzoru (3) będzie odnoszona do zdefiniowanego juŝ układu tribologicznego, który będzie utoŝsamiany z systemem termodynamicznym. Współczynnik α występujący w tym wzorze jest funkcją wielu zmiennych, jak: gęstość, ciepło właściwe, współczynnik lepkości, przewodność cieplna farszu mięsnego, które sę z kolei funkcjami ciśnienia i temperatury. Takŝe zmiany prędkości przemieszczania się farszu mięsnego decydują o wartości współczynnika α . Stąd teŝ najlepsza charakterystyka tego współczynnika odnosi się do procesów stacjonarnych wymiany ciepła [Sadowski 1987].

Rozdrabniany i mieszany farsz mięsny tworzy warstwę przyścienną przylegającą do powierzchni misy kutra, a gradient temperatury w tej warstwie przyjmuje wartości dodatnie lub ujemne, zaleŝnie od tego, czy temperatura misy jest niŝsza, czy wyŝsza od temperatury farszu mięsnego. Róŝnicę między przejmowaniem ciepła na granicy misy i farszu mięsnego, a przejmowaniem ciepła z obszaru występujących mikronierówności przedstawiono na rysunku 3. Współczynnik przejmowania ciepła α będzie scharakteryzowany przez warunki zbliŝania i oddalania się powierzchni bocznej noŝy względem powierzchni misy kutra. Moŝe on być wyznaczony z równania bilansu energii zapisanego w odniesieniu do pola elementarnej powierzchni nierówności dF misy kutra i noŝy oraz elementarnego czasu dt i prawa Newtona zapisanego za pomocą wzoru (3).



Rys. 3. Przejmowanie ciepła między powierzchnią misy kutra a farszem mięsnym
Fig. 3. Heat exchange between cutter pan surface and meat stuffing

Bilans będzie wyrażony za pomocą wzoru [Sadowski 1982]:

$$q = \mu p v = q_c + q_m = \alpha(\theta_0 - \theta) + \eta \mu p v \quad (4)$$

gdzie:

- μ – współczynnik tarcia,
- p – nacisk jednostkowy,
- q_m – jednostkowa moc dyssypacji mechanicznej,
- v – prędkość poślizgu,
- $\eta = q_m / q$, q , q_c – jednostkowy strumień ciepła.

Przekształcając wzór (4) wyznaczony będzie współczynnik przejmowania ciepła α

$$\alpha = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot (1 - \eta)}{\theta_o - \theta} \quad (5)$$

Jeżeli temperatura odniesienia zostanie przyjęta jako równa temperaturze na mikronierównościach θ_p , najczęściej pokrywająca się z temperaturą otoczenia θ_{ot} , to współczynnik przejmowania ciepła α można wyrazić następująco:

$$\alpha = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot [1 - \eta(Q_p)]}{\theta_o - \theta_p} \quad (6)$$

Na podstawie wzorów (5) i (6) można wyznaczyć ułamek η odniesiony do dowolnej temperatury θ :

$$\eta = 1 - \frac{1 - \eta(Q_p)}{\theta_o - \theta_p} \cdot (Q_o - \theta) = \frac{\theta - Q_x}{\theta_o - Q_x} \quad (7)$$

Temperatura θ_x dla której $\eta=0$ nazwano temperaturą charakterystyczną, która może być wyznaczona według wzoru [Sadowski 1990]:

$$\theta_x = \frac{\theta_p - \theta_o \cdot \eta(\theta_p)}{1 - \eta(\theta_p)} \quad (8)$$

Pojęcie temperatury charakterystycznej po raz pierwszy opublikowano w roku 1990 w czasopiśmie niemieckim [Sadowski 1990]. Temperatura ta uwzględniona we wzorze (5) na współczynnik przejmowania ciepła α pozwala na eliminację temperatury odniesienia θ_p . Taki zabieg sprawia, że powstanie nowa postać wzoru (5) po wykorzystaniu bilansu określonego wzorem (4), w którym przyjęto $\eta=0$ i $\theta=\theta_x$. Na podstawie tych założeń wzór na współczynnik przejmowania ciepła α przyjmuje postać [Sadowski 1990]:

$$\alpha = \frac{\mu \cdot p \cdot v}{\theta_o - \theta_x} \quad (9)$$

Wzór (9) niesie ze sobą informacje o tym, że gęstość strumienia ciepła dyssypacji rośnie w miarę wzrostu współczynnika tarcia, nacisku jednostkowego, prędkości poślizgu oraz minimalizacji różnicy $\theta_o - \theta_x$.

Uwzględniając wzór (9) można wyznaczyć gęstość strumienia ciepłego q_c na podstawie wzoru (3). Wykonując podane czynności otrzymamy:

$$q_c = \frac{\mu \cdot p \cdot v}{\theta_o - \theta_x} \cdot (\theta_o - \theta) \quad (10)$$

Podczas kutrowania zachodzi zużywanie powierzchni misy, jak i powierzchni noży. Ten proces będzie scharakteryzowany przez jednostkową moc tworzenia nowej powierzchni produktów zużycia q_i , wyznaczoną według wzoru:

$$q_i = q_m = \frac{\mu \cdot p \cdot v}{\theta_o - \theta_x} \cdot (\theta - \theta_x) \quad (11)$$

Wyznaczenie ciepłego współczynnika tarcia μ_c , jako iloczynu $\mu(q_c:q)$ będzie zapisane wzorem:

$$\mu_c = \frac{\theta_o - \theta}{\theta_o - \theta_x} \cdot \mu \quad (12)$$

Podobnie wyznacza się mechaniczny wspólczynnik tarcia μ_m :

$$\mu_m = \frac{\theta - \theta_x}{\theta_o - \theta_x} \cdot \mu \quad (13)$$

Wzory (12) i (13) wskazują, że struktura wspólczynnika tarcia w rozpatrywanym ukłdzie tribologicznym zależy od jego temperatury θ oraz od dwóch stałych systemowych: temperatury farszu mięsnego θ_o i temperatury charakterystycznej θ_x . Stałe systemowe mogą być wyznaczone za pomocą badań kalorymetrycznych, a temperatura θ zwyczajnie odczytana z miernika temperatury, jako wynik pomiaru.

Praca tarcia i opory tarcia jako część cieplna i mechaniczna

Pojmowanie tarcia jako procesu w którym doprowadza się energię mechaniczną do ukłdu tribologicznego pozwala na jego analizę z pomocą pierwszej zasady termodynamiki. Przy stosowaniu takiego podejścia otrzymuje się opis oporów tarcia, który może być uznany jako zasada, mająca charakter ogólny.

W rozpatrywanym przypadku, kiedy misa kutra razem z farszem mięsnym wykonuje ruch obrotowy wokół osi pionowej, a zespół noży ruch obrotowy wokół własnej osi poziomej, to praca siły tarcia równa jest sumie ciepła dyssypacji i pracy dyssypacji mechanicznej powodującej rozdrabnianie mięsa. Korzystając z prac [Sadowski 1999, 2001] w zakresie przedmiotu moźna zapisać:

$$A_{t1-2} = \int_0^t T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau = A_{dyss} + Q_{dyss} \quad (14)$$

gdzie:

- A_{t1-2} – praca tarcia w systemie termodynamicznym,
- A_{dyss} – praca dyssypacji mechanicznej,
- Q_{dyss} – ciepło dyssypacji,
- T – siła tarcia,
- v – prędkość poślizgu,
- τ – czas tarcia.

Praca dyssypacji mechanicznej A_{dyss} jest tylko częścią pracy tarcia A_{t1-2} i może być wyznaczona z zaleźności:

$$A_{dyss} = \int_0^t \eta(\tau) \cdot T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot dt \quad (15)$$

Natomiast ciepło dyssypacji będzie wyznaczone na podstawie wzoru [Sadowski 2001] :

$$Q_{dyss} = \int_0^t [1 - \eta(\tau)] \cdot T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (16)$$

gdzie:

$$0 \leq \tau \leq t$$

Korzystając z twierdzenia o pochodnej całki [Pogorzelski 1964], jako funkcji jej górnjej granicy t i uwzględniając działania według równań (14-16) będzie:

$$T(t) = T_{c(t)} + T_{m(t)} \quad (17)$$

gdzie:

- $T_{(t)}$ – siła tarcia w funkcji czasu,
- $T_{c(t)}$ – składowa cieplna siły tarcia w funkcji czasu,
- $T_{m(t)}$ – składowa mechaniczna siły tarcia w funkcji tarcia, t- czas tarcia.

Siły $T_{(t)}$, $T_{c(t)}$, $T_{m(t)}$ powstają na skutek działania siły docisku N , jaka występuje pomiędzy powierzchnią czołową noża, a powierzchnią wewnętrzną misy kutra. Siła ta przekazywana jest za pośrednictwem farszu mięsnego. Po podzieleniu obu stron równania (17) przez siłę docisku N otrzyma się zależność [Sadowski 2008] :

$$\mu_{(t)} = \frac{T_{(t)}}{N} = \frac{T_{c(t)}}{N} + \frac{T_{m(t)}}{N} = \mu_{c(t)} + \mu_{m(t)} \quad (18)$$

Na podstawie równania (18) mówimy, że współczynnik tarcia kinetycznego jest sumą cieplnego współczynnika tarcia μ_c i mechanicznego współczynnika tarcia μ_m . Ciepły współczynnik tarcia μ_c wiąże się z nagrzewaniem ciemnym występującym podczas kutrowania. Natomiast mechaniczny współczynnik tarcia odnosi się do energii wewnętrznej potencjalnej układu, utworzonego przez farsz mięsny oraz powierzchnie stalowe misy kutra i noży roboczych. Zjawisko dyssypacji w termodynamicznych układach otwartych przedstawiane jest jako rozpraszanie energii i ciepła na skutek oddziaływania na siebie elementów składowych układu. Tak jak opory tarcia w procesie kutrowania dzielą się na część cieplną i mechaniczną tak z tego podziału wynika dyssypacja energii z części mechanicznej tarcia oraz dyssypacja ciepła z części cieplnej tarcia.

Podsumowanie

Kutrowanie jest procesem bardzo złożonym zarówno z punktu widzenia przemian zachodzących w rozdrabnianym surowcu jak i fizycznych zjawisk towarzyszących oddziaływaniu elementów roboczych na rozdrabniany materiał. Aby przeanalizować w sposób kompleksowy rozważany problem bez pominięcia wszystkich zjawisk fizycznych zachodzących podczas tarcia na makroskopowym poziomie organizacji materii, w rozważaniach przyjęto jako obiekt termodynamiczny system otwarty, który wymienia z otoczeniem zarówno energię, jak i materię. W prezentowanej pracy autor przedstawił oddziaływanie powierzchni misy kutra i noży na rozdrabniany materiał, jako termodynamiczny układ otwarty. Powstające podczas rozdrabniania ciepło zostało zinterpretowane jako tarcie występujące między nożami a mięsem i powierzchnią misy kutra oraz dokładnie scharakteryzowane. Z przeprowadzonej analizy teoretycznej wynika, że opory tarcia w procesie kutrowania dzielą się na część cieplną i mechaniczną, a w związku z tym następuje dyssypacja energii z części mechanicznej tarcia oraz dyssypacja ciepła z części cieplnej tarcia. Energia z części mechanicznej jest zużywana na rozdrabnianie, a ciepło przekazywane jest rozdrabnianemu surowcowi.

Bibliografia

- Fabian M.** 2010. Chłodzenie podczas kutowania. *Gospodarka Mięсна*. 9. s.17-23.
- Hebda M., Wachal A.** 1980. *Trybologia*. Warszawa. WNT. ISBN: 83-204-0043-0.
- Pogorzelski W.** 1964. *Analiza matematyczna*. Warszawa. PWN. ISBN 978-83-01-15970-2.
- Sadowski J.** 1982. Die warmemechanische natur der Reiboxydation von Metallen. *Schmierungstechnik* nr 6. s. 119-282.
- Sadowski J.** 1987. *Termodynamika zużywania tribologicznego*. Radom. WSI. s. 146.
- Sadowski J.** 1990. *Ciepno-mechaniczna hipoteza tribologiczna*. Warszawa, PWN. s.39-45.
- Sadowski J.** 1990. Untersuchungen zur maximalen Verschleißfestigkeit fester Körper. *Tribologie und Schmierungstechnik* nr 3. S. 171-174.
- Sadowski J.** 1999. *Termodynamiczna interpretacja tarcia i zużywania*. Radom, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. s. 208.
- Sadowski J.** 2001. *Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarcu metali*. Radom. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. s. 41-62.
- Sadowski J.** 2008. *Zagadnienia dyssypacji energii w procesie zużywania tribologicznego*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. ISBN 9788316425281.
- Staniszewski B.** 1982. *Termodynamika*. Warszawa. PWN. ISBN 8301031514.
- Tuliszka E.** 1980. *Termodynamika techniczna*. Warszawa-Poznań. PWN. ISBN 83-01-00905-5

THEORETICAL ANALYSIS OF MECHANICAL MEAT CUTTING PROCESS IN THERMODYNAMIC ASPECT

Abstract. The paper presents theoretical analysis of the process involving cutting meat by means of mechanical cutters and resultant thermodynamic effects. Separated working system, consisting of cutter pan filled with meat stuffing and a set of knives, is considered as a thermodynamic open system compared to a tribological system. The researchers divided friction work and frictional resistance into thermal and mechanical part of the discussed system.

Key words: mechanical meat cutting, thermodynamic open system, dissipation

Adres do korespondencji:

Marek Szelaĝ; e-mail: Marek.Szelaĝ@ur.krakow.pl
Katedra Inżynierii i Aparatury Przemysłu Spożywczego
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 122
30-149 Kraków