

ZASTOSOWANIE WSKAŹNIKÓW OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ DO DIAGNOZOWANIA SYSTEMU SUSZĄCEGO

Renata WALCZAK

Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii,
Instytut Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Systemów
ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, tel./fax (24) 367 59 95, e-mail: rpwalcza@pw.plock.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę budowy wskaźników oceny efektywności dla systemu suszącego na przykładzie instalacji suszącej z suszarką daszkową. Przedstawiono pojęcie efektywności energetycznej oraz metodę jej wyznaczania. Omówione wskaźniki efektywności mogą być wykorzystane do oceny stanu i pracy instalacji suszącej. Przedstawiono przykładowe zastosowanie wskaźników do diagnozowania instalacji.

Słowa kluczowe: system ekspertowy, system diagnostyki, suszarka daszkowa, efektywność energetyczna.

ENERGY EFFICIENCY RATIOS UTILIZATION IN DRYING SYSTEM DIAGNOSIS

Summary

In the paper were shown the method of energy efficiency ratios constructing taking into consideration continuous, cross flow, cascade dryer as an example. Energy efficiency term and the way of calculating it were defined. Presented efficiency ratios could be used for diagnosing the state and operating of the dryer. The exemplary utilization of mentioned ratios was presented.

Keywords: expert system, diagnosis system, cascade dryer, energy efficiency.

WYKAZ PODSTAWOWYCH OZNACZEŃ

Oznaczenia

B – ilość spalonego paliwa, kg/s,
 G – natężenie przepływu czynnika suszącego, kg/s,
 F – pole powierzchni wymiany ciepła, m²,
 I – entalpia, J,
 K – koszty całkowite, zł,
 K_s – koszty stałe, zł,
 K_z – koszty zmienne, zł
 L – praca, J,
 L_{p_i} – długość i -tego połączenia przewodów powietrznych, m,
 M – natężenie przepływu materiału suszonego, kg/s, masa, kg,
 T – temperatura materiału suszonego, °C,
 Q – ciepło, J,
 Q_f – wartość opałowa paliwa, J/kg,
 E_{SA} – efektywność energetyczna systemu agrosuszącego,
 c – ciepło właściwe, J/kg K,
 i – entalpia właściwa, J/kg,
 k – współczynnik przenikania ciepła, W/m²K, koszt jednostkowy, zł,
 r – ciepło parowania wody, J/kg
 u – zawartość wody w materiale suszonym, kg/kg,
 x – zawartość wody w czynniku suszącym, kg/kg,

z – zysk jednostkowy,
 τ – czas, s,

Indeksy

‘ – wejście,
” – wyjście,
 d – kolumna susząca,
 dop – dopuszczalny,
 el – energia elektryczna,
 G – powietrze suszące,
 h – podgrzewacz,
 $inst$ – elementu instalacji.
 is – instalacja susząca,
 M – materiał suszony,
 N – nakłady,
 $nagrz$ – nagrzanie,
 p – powietrze,
 pw – para wodna,
 P – wymiennik ciepła na podgrzewaczu powietrza,
 R – przewody powietrzne,
 s – sucha masa,
 zal – założony.

1. WPROWADZENIE

W zależności od gałęzi przemysłu koszt suszenia stanowi znaczny udział w ogólnych kosztach procesu technologicznego. W przemyśle przeróbki drewna koszt suszenia stanowi około 70% kosztów całkowitych, w procesach produkcji włókien tekstylnych 50%, w przemyśle papierniczym oraz spożywczym około 30% [2]. Zmniejszenie zużycia energii może być uzyskane poprzez:

- zmianę struktury wykorzystania procesów i urządzeń energochłonnych;
- poprawę efektywności energetycznej urządzeń lub procesów;
- zmianę poziomu aktywności sektorów energochłonnych;
- dopasowanie się do fluktuacji warunków naturalnych w tym pogodowych.

W krótkim okresie jedynie poprawa efektywności energetycznej urządzeń i procesów może ograniczyć zużycie energii. Proces suszenia konwekcyjnego jest najczęściej stosowaną formą suszenia. W celu poprawy efektywności suszenia konieczna staje się ocena efektywności energetycznej urządzenia.

Obiektem rozważań były systemy suszące przeznaczone do suszenia zbóż. Przyjętą egemplifikacją systemu suszącego jest suszarka daszkowa, uznana za reprezentatywny model urządzeń suszących.

Przedmiotem rozważań była analiza systemu agrosuszącego, identyfikacja elementów infrastruktury oraz określenie zależności między nimi.

Celem niniejszej pracy było poszukiwanie miar pozwalających na ocenę efektywności energetycznej procesu suszenia. Miary te mogą być wykorzystane do budowy kryteriów optymalizacji procesu eksploatacji systemów suszących oraz do oceny pracy i stanu instalacji suszącej.

Analiza procesu decyzyjnego ma na celu jego implementację w postaci systemu ekspertowego.

2. SYSTEMY SUSZĄCE

Zastosowanie podejścia systemowego do analizy systemu agrosuszącego implikuje jednoznaczne określenie elementów i relacji składających się na ten system. System agrosuszący rozumiany jest jako zespół funkcjonalnie powiązanych ze sobą elementów służących do realizacji procesu agrosuszenia zgodnie z wymaganiami przy określonych możliwościach, w danych warunkach. Zgodnie z teoriomnogościową teorią Wintgena [8] system suszący można zapisać jako

$$S = \{A, B, C, D, F, R\} \quad (1)$$

gdzie:

$\{A, B, C, D, E, F\}$ jest zbiorem elementów systemu S przyjętych ze względu na modelowany proces;

$A = \{A_i; i = \overline{1, I}\}$ - zbiór użytkowników;

$B = \{B_k; k = \overline{1, K}\}$ - zbiór środków technicznych;

$C = \{C_n; n = \overline{1, N}\}$ - zbiór elementów otoczenia;

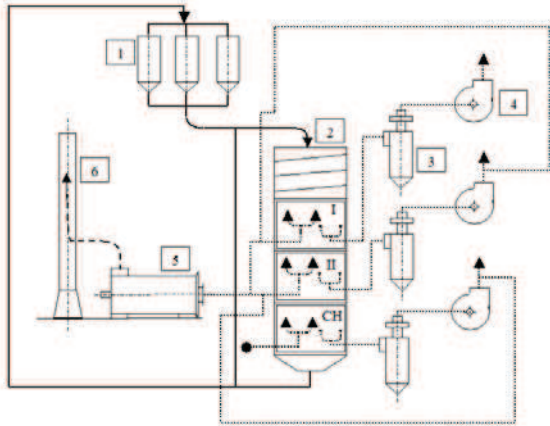
$D = \{D_l; l = \overline{1, L}\}$ - zbiór zadań;

$F = \{F_j; j = \overline{1, J}\}$ - zbiór technologii;

$R = \{R_b; \overline{1, B_R}\}$ ciąg relacji systemotwórczych występujących między elementami systemu.

Przy specyfikacji systemów agrosuszących z punktu widzenia warunków, w jakich przebiega proces, istniejących możliwości oraz wymagań można wyróżnić różne ich rodzaje, typy i konfiguracje. Konfiguracja rozumiana jest jako zestaw środków technicznych realizujących określone zadanie według wybranej technologii, o określonej strukturze i w określonych warunkach. Konfiguracja zależy od wyróżniającego kryterium. Między innymi wyróżnia się konfiguracje ze względu na rozwiązania konstrukcyjne, rodzaj procesu termofizycznego, rodzaj suszonego materiału, rodzaj i postać produktu, rodzaj generatora ciepła, ciągłość procesu, mobilność systemu. Ze względu na konstrukcję można wyróżnić między innymi suszarki absorpcyjne, bębnowe, daszkowe, fluidyzacyjne, komorowe, kaskadowe, pneumatyczne, podłogowe, promiennikowe, silosowe, sitowe, taśmowe i tunelowe. Do wymienionych grup konfiguracji należą konfiguracje eksploatacyjne, energetyczne, funkcjonalne, strukturalne, technologiczne i zadaniowe. Wśród konfiguracji energetycznych ze względu na temperaturę wyróżnia się konfiguracje wysokotemperaturowe, średniotemperaturowe, niskotemperaturowe, ze względu na generator ciepła konfiguracje z konwencjonalnym, niekonwencjonalnym lub hybrydowym generatorem ciepła. Z punktu widzenia procesu eksploatacji można wymienić konfiguracje wyróżnione ze względu na ciągłość, suszarki o procesie ciągłym i dyskretnym, ze względu na mobilność, suszarki stacjonarne i przewoźne, ze względu na samodzielność suszarki samodzielne i będące elementem systemu.

W pracy rozpartywano instalację suszącą złożoną z podgrzewacza powietrza, przewodów powietrznych, kolumny suszącej wyposażonej w daszkowate kanały powietrzne, cyklonów, wentylatorów, instalacji elektrycznej i systemu sterowania (rys. 1) [11].



Rys. 1. Instalacja susząca [11]:

1 - silosy, 2 - kolumna susząca, 3 - cyklony, 4 - wentylatory, 5 - podgrzewacz powietrza, 6 - komin
 Fig. 1. Drying installation [11]: 1 - storage silo, 2 - drying column, 3 - cyclone, 4 - fan, 5 - burner, 6 - chimney

3. PROCES SUSZENIA

Proces agrosuszenia to proces termicznego odwodnienia materiałów pochodzenia biologicznego, przede wszystkim roślinnych, w stanie naturalnym lub przygotowanych zgodnie z wymogami technologii. Celem procesu jest usunięcie nadmiaru wody z suszonego materiału, dzięki czemu zatrzymane zostają naturalne procesy niszczenia, niekorzystnie wpływające na jakościowy i ilościowy stan materiału, a materiał nadaje się do długotrwałego przechowywania lub różnorodnego wykorzystania.

Proces suszenia w ujęciu systemowym, w aspekcie bilansu zasobów rozumiany jest jako transformacja zasobów materialno-energetyczno-informacyjnych zawartych w surowcu i medium suszącym do postaci tych zasobów zawartych w produkcie przy zastosowaniu odpowiednich środków technicznych, procedury suszenia oraz przy oddziaływaniu otoczenia. Transformację opisują w czasie zmienne stanu, parametry procesu oraz relacje między zmiennymi [10].

Na przebieg procesu suszenia wpływają procesy robocze, zakłócające, wspomagające oraz sterujące, a zależy on od wymagań wynikających z przeznaczenia suszonego materiału, warunków wynikających z dostępu do surowca, oraz możliwości instrumentalizacji, m.in. określenia rodzaju i typu systemu, jego konfiguracji oraz parametrów.

4. WSKAŹNIKI CHARAKTERYSTYK SYSTEMU

O stanie systemu suszącego, zarówno na etapie konstruowania jak i podczas eksploatacji, można wnioskować korzystając z ustrukturalizowanego procesu określania charakterystyk użyteczności systemu. Analiza użyteczności sprowadza się do zdefiniowania struktury problemu, oceny preferencji

eksperta dotyczących jakości systemu suszącego, przedstawienia sugerowanych decyzji oraz analizy wrażliwości. Na ocenę struktury problemu składają się zdefiniowanie kontekstu oceny, określenie celu i obiektów oceny i ich cech oraz określenia kryteriów i miar oceny. Kontekst i cele oceny są ze sobą ściśle powiązane i w zależności od nich przyjmowane są charakterystyki, na podstawie, których system jest oceniany.

Charakterystyki systemu są wielkościami, które w sposób uznany za wystarczający reprezentują właściwości, bądź własności systemu, istotne z punktu widzenia celu zainteresowania. Najbardziej ogólną z ogólnych charakterystyk systemu jest jakość. Jakość jako cecha niemierzalna jest charakterystyką subiektywną, która wyraża stopień spełnienia oczekiwań w stosunku do obiektu, do którego się odnosi. Podejmowane próby obiektywizacji jakości sprowadzają się do wyrażania jej poprzez: syntetyczny wskaźnik jakości [8] lub charakterystyki szczegółowe. Wiele z tych charakterystyk to charakterystyki z natury swej mierzalne, które mogą być wyrażane poprzez wartości liczbowe.

Koncepcja budowy miar tych charakterystyk wynika z definicji charakterystyk i w największym skrócie sprowadza się do ustalenia zbioru zmiennych opisujących system oraz przyjęcia za miary charakterystyk algebraicznych relacji pomiędzy tymi zmiennymi oraz na dokonaniu wyboru spośród tych relacji, relacji istotnych ze względu na rozpatrywany aspekt oceny.

Punktem wyjścia jest zidentyfikowanie obiektu oceny, którym w tym przypadku jest system suszący. Jako miary charakterystyk systemu agrosuszącego przyjęto zbiór relacji istotnych R_a ze zbioru relacji możliwych R . Za istotne uznano relacje algebraiczne (2).

$$R_a : W_{k,l} = \frac{X_k}{X_l} \quad (2)$$

gdzie: $k=l$; $k, l = 1 \dots K$.

Relacje W_{kl} nazwano wskaźnikami charakterystyk systemu. Po uporządkowaniu według indeksów otrzymano kwadratową macierz wskaźników (3)

$$W = [W_{k,l}]_{K \times K} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & \dots & W_{1,l} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & \dots & W_{2,l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{k,1} & W_{k,2} & \dots & W_{k,l} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Pomiędzy elementami $[W_{k,l}]$ istnieją relacje:

$$\bigvee_{k=l \in \{1, \dots, k\}} W_{k,l} = 1 \quad (4)$$

oraz

$$\bigvee_{k \neq l \in \{1, \dots, k\}} W_{k,l} = \frac{1}{W_{l,k}} \quad (4)$$

Charakterystyki systemu podzielono na niezależne moduły, dzięki czemu możliwa jest implementacja przedmiotowej wiedzy w różnych źródłach bazy wiedzy. Wyróżniono moduły dotyczące całego systemu suszącego oraz poszczególnych jego elementów, a także główne i pośrednie podzbiory cech określających cel rozważań. Jako główne wyróżniono podzbiory dotyczące bezpośredniej efektywności energetycznej, ekonomicznej oceny inwestycji oraz efektywności skumulowanej systemu. Efektywność energetyczna bezpośrednia dotyczy efektywności energetycznej w czasie ustalonej pracy instalacji oraz w czasie nagrzewania instalacji. W każdej z grup wyróżniono zmienne dotyczące efektów, nakładów i czasu. Na tej podstawie wyznaczono szereg miar przyporządkowanych do każdej z grup głównych. Na podstawie uzyskanych ocen można wnioskować o modernizacji instalacji suszącej. Modernizacja rozumiana jest tu z punktu widzenia poprawy efektywności energetycznej procesu. Różne warianty poprawy efektywności energetycznej są również oceniane w aspekcie efektów, nakładów i czasu.

5. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA

Metody oceny efektywności energetycznej suszarni zakładają, że urządzenia pracują w stanie ustalonym. Nie bierze się pod uwagę procesu nagrzewania instalacji. W celu oceny rzeczywistej energochłonności urządzenia konieczne jest zaplanowanie pracy urządzenia w całym sezonie oraz określenie strat ciepła na nagrzewanie w każdym planowanym cyklu pracy. Dopiero powiększenie wielkości zużycia paliwa w rachunku obliczania wskaźników efektywności może dać pogląd o rzeczywistej sprawności urządzenia w sezonie suszarniczym.

Dla ustalonej pracy suszarni do budowy wskaźników w grupie efektywności energetycznej bezpośredniej, w grupie nakładów, wykorzystano wielkości [10, 11] M' , G' , u' , T' , Q_h' , Q_d' , B , Q_{elN} . W grupie efektów umieszczono M'' , G'' , u'' , Δu , Q_{uz} , T'' , Q_h'' , Q_d'' , τ . Zaproponowano wskaźniki dla poszczególnych elementów instalacji suszącej oraz dla całego systemu suszącego. Dla systemu suszącego określono zestawione poniżej podstawowe wskaźniki efektywnościowe, zestawione w zależności od celu i rozpatrywanego urządzenia.

W grupie wskaźników dotyczących sprawności cieplnej wyznaczono dla podgrzewacza powietrza sprawność podgrzewacza (5), Dla przewodów powietrznych, sprawność przewodów (8), dla kolumny suszącej, sprawność kolumny suszącej (10), dla całej instalacji, sprawność całej instalacji (11).

$$\eta_p = \frac{Q_h''}{Q_h'} \quad (5)$$

gdzie:

$$Q_h'' = I_h' - I_z = G_s (c_p + x' c_{pw}) (t_h'' - t_z) \quad (6)$$

$$Q_h' = B Q_i \quad (7)$$

$$\eta_R = \frac{Q_h'' - Q_{R\,strat}}{Q_h''} \quad (8)$$

gdzie:

$$Q_{R\,strat} = \int_0^l (F(k_R (t_G - t_z))) dl \quad (9)$$

$$\eta_s = \frac{Q_{uz}}{Q_h''} \quad (10)$$

$$\eta_s = \frac{Q_{uz}}{Q_d'} \quad (11)$$

gdzie:

$$Q_{uz} = (i_{Gd}'' - i_{Md}') \cdot \Delta u \quad (12)$$

$$\Delta u = M_s (u' - u'') \quad (13)$$

$$i_{Gd}'' = r + c_{pw} t'' \quad (14)$$

$$i_{Md}' = c_w T' \quad (15)$$

Sprawność instalacji suszącej określana jest jako iloczyn sprawności poszczególnych elementów systemu suszącego (16).

$$\eta_s = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (16)$$

Pozostałe wskaźniki zdefiniowane zgodnie z przedstawioną powyżej metodą będą wykorzystane w systemie ekspertowym.

$$\frac{Q_h'}{\Delta u} - \text{jednostkowe zużycie ciepła} \quad (17)$$

$$\frac{B}{\Delta u} - \text{jednostkowe zużycie paliwa} \quad (18)$$

$$\frac{M''}{M'} - \text{wskaźnik wysuszenia} \quad (19)$$

$$\frac{G'}{M'} - \text{0 wskaźnik natężenia powietrza na 1 kg wilgotnego materiału} \quad (20)$$

$$\frac{G'}{M''} - \text{wskaźnik natężenia powietrza na 1 kg suchego materiału} \quad (21)$$

$$\frac{G'}{\Delta u} - \text{wskaźnik natężenia powietrza na 1 kg odparowanej wody} \quad (22)$$

$$\frac{Q'}{M'} - \text{wskaźnik natężenia ciepła dostarczonego na 1 kg wilgotnego materiału} \quad (23)$$

$$\frac{Q_h''}{M''} - \text{wskaźnik natężenia ciepła dostarczonego na 1 kg suchego materiału} \quad (24)$$

$$\frac{Q_h''}{\Delta u} - \text{wskaźnik natężenia ciepła dostarczonego na 1 kg odparowanej wody} \quad (25)$$

$$\frac{Q''}{M'} - \text{wskaźnik natężenia ciepła traconego na 1 kg wilgotnego materiału} \quad (26)$$

$$\frac{Q''}{M''} - \text{wskaźnik natężenia ciepła traconego na 1 kg suchego materiału} \quad (27)$$

$$\frac{Q''}{\Delta u} - \text{wskaźnik natężenia ciepła traconego na 1 kg odparowanej wody} \quad (28)$$

$$\frac{\Delta u}{G'} - \text{wskaźnik natężenia odparowanej wody na 1 kg dostarczonego powietrza} \quad (29)$$

$$\frac{\Delta u}{Q'} - \text{wskaźnik natężenia odparowanej wody na 1 J dostarczonego ciepła} \quad (30)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta Q} - \text{wskaźnik natężenia odparowanej wody na 1 J wykorzystanego ciepła} \quad (31)$$

$$\frac{Q_{uz}}{Q'} - \text{wskaźnik natężenia wykorzystanego ciepła na 1 J ciepła dostarczonego} \quad (32)$$

W grupie wskaźników dotyczących efektywności wykorzystania energii elektrycznej:

$$\frac{E_{el N}}{\Delta u} - \text{jednostkowe zużycie energii elektrycznej na jednostkę odparowanej wody} \quad (33)$$

$$\frac{E_{el N}}{M'} - \text{jednostkowe zużycie energii elektrycznej na jednostkę wilgotnego materiału} \quad (34)$$

$$\frac{E_{el N}}{M''} - \text{jednostkowe zużycie energii elektrycznej na jednostkę wysuszonego materiału} \quad (35)$$

W grupie wskaźników odniesionych do czasu wyznaczono:

$$\frac{E_{el N}}{\tau} - \text{zużycie energii elektrycznej na jednostkę czasu} \quad (36)$$

$$\frac{Q_h'}{\tau} - \text{zużycie ciepła pochodzącego z energii chemicznej paliwa na jednostkę czasu} \quad (37)$$

$$\frac{B}{\tau} - \text{zużycie paliwa na jednostkę czasu} \quad (38)$$

Przy kompleksowej ocenie eksploatacji urządzenia w sezonie suszącym niezbędna jest informacja jak często instalacja susząca nagrzewa się od temperatury otoczenia do temperatury pracy. Koszt nagrzewania instalacji stanowi od 10% do 30% całkowitych kosztów suszenia, więc instalacja powinna być tak zaprojektowana, żeby minimalizować koszty eksploatacji. W celu wyznaczenia ilości ciepła przeznaczanego na nagrzanie instalacji suszącej konieczna jest znajomość jej budowy, a przede wszystkim niezbędne są informacje na temat rodzaju i masy tych elementów instalacji, które się nagrzewają. Straty ciepła obliczane są zgodnie z zależnością (39).

$$Q_{nagrz I} = \sum_{i=1}^n (M_{inst i} \cdot c_{inst i} \cdot (t_{sr i} - t_z)) \quad (39)$$

Palniki w podgrzewaczu powietrza mogą być załączone, gdy suszarnia jest całkowicie wypełniona ziarnem. Zanim suszarnia się nagrzeje i ustalą się parametry pracy, ziarno jest niedosuszone. Ziarno takie można suszyć w cyrkulacji, do momentu, aż parametry pracy będą zadowalające, lub można je przesać do silosu, i wysuszyć do żądanych parametrów w późniejszym terminie. W silosie ziarno stygnie, a ciepło, które zostało przeznaczone na podgrzanie go jest bezpowrotnie tracone. Straty te również należy również uwzględnić w bilansie energetycznym. Ciepło przeznaczone na nagrzanie ziarna odesłanego do silosu oblicza się na podstawie zależności (40).

$$Q_{nagrz M} = M_M \cdot c_M \cdot (t_{sr M} - t_z) \quad (40)$$

W celu określenia wartości wskaźników efektywności zarówno dla pracy w warunkach ustalonych jak i dla warunków rozruchu należy do ilości ciepła wykorzystywanego w warunkach ustalonych dodać ilość ciepła potrzebną na nagrzanie instalacji i na nagrzanie ziarna. Rachunek powinien dotyczyć całego sezonu pracy instalacji.

Osobną grupę wskaźników stanowią wskaźniki dotyczące kosztów. Koszty stałe K_s w tym koszty nakładów inwestycyjnych oraz koszty stałe eksploatacji i koszty zmienne K_z mogą być

odniesione do ilości odparowanej wody, ilości materiału dostarczanego do suszarni, ilości uzyskanego suszu, ilości ciepła dostarczonego, ilości ciepła odprowadzonego itp. Uzyskane w ten sposób jednostkowe koszty wspomnianych wielkości można wykorzystać w rachunku efektywności energetycznej. Efektywność systemu suszącego zdefiniowano jako stosunek zysków jednostkowych do kosztów jednostkowych (41).

$$e = \frac{z}{k} \quad (41)$$

gdzie:

$$z = \frac{Z}{Q_{uż}} \quad (42)$$

$$k = \frac{K}{Q_h} \quad (43)$$

$$K = K_s + K_z \quad (44)$$

stąd związek między efektywnością i sprawnością systemu można przedstawić zależnością (45).

$$e = \frac{ZQ_h'}{KQ_{uż}} = \frac{Z}{K\eta_s} \quad (45)$$

Dla poprawy sprawności systemu konieczne jest poniesienie dodatkowych kosztów inwestycyjnych. Wykorzystując rachunek kosztów krańcowych można określić jak dodatkowa wartość inwestycji wpływa na zwiększenie sprawności energetycznej systemu. Inwestycje są opłacalne od momentu, kiedy koszt krańcowy zrówna się z przychodem krańcowym.

6. WYKORZYSTANIE MIAR EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Celem eksploatacji systemów suszących jest odwodnienie materiału suszonego do określonej wilgotności, z zachowaniem wymogów technologii suszenia, w jak najbardziej efektywny sposób. W czasie eksploatacji możliwość kontrolowania wartości podstawowych zmiennych procesowych umożliwi wyznaczenie wskaźników efektywności energetycznej i na tej podstawie decydowanie o sterowaniu procesem, określanie wpływu otoczenia i decydowanie o zadaniach obsługowych. Wskaźniki efektywności mogą więc być wykorzystywane do postawienia diagnozy użytkowej i obsługowej [5].

Systemy ekspertowe wraz z rozwojem technik informatycznych, coraz częściej wykorzystywane są do rozwiązywania problemów projektowania oraz doboru i eksploatacji w tym diagnozowania maszyn [4]. Przedstawione miary oceny efektywności energetycznej mogą być wykorzystane na etapie projektowania i doboru systemów suszących w celu doboru instalacji najbardziej odpowiadającej

wymaganiom użytkownika oraz w czasie eksploatacji, do oceny pracującej instalacji i podjęcia decyzji o możliwości termorenowacji lub do oceny zmian wartości wskaźników w czasie, w kolejnych sezonach suszących, w celu wykrywania nieprawidłowości w działaniu instalacji.

Wnioskowanie diagnostyczne w systemie ekspertowym polega na pobraniu danych o ocenianym procesie, obliczeniu wartości wskaźników efektywności energetycznej, porównaniu wartości obliczonych wskaźników z wartościami odniesienia zawartymi w bazie danych, wyznaczonymi na podstawie modelu procesu, przeprowadzenie procesu wnioskowania ze względu na cel określony przez użytkownika, wyznaczenie diagnozy oraz poinformowanie użytkownika o diagnozie i sposobie wnioskowania.

W procesie oceny systemu suszącego i procesu technologicznego konieczne jest wyznaczenie wartości zmiennych procesowych i wartości wielkości pochodnych oraz wskaźników. W celu oceny instalacji suszącej konieczne jest wyznaczenie wartości wskaźników dla przedmiotowej instalacji na podstawie modelu matematycznego. Określenie wartości wskaźników dla rzeczywistej instalacji pozwoli je porównać ze wskaźnikami wzorcowymi obliczonymi z modelu matematycznego.

Dla określonej na wyjściu z kolumny suszącej temperatury czynnika suszącego konieczne jest wyznaczenie ciśnienia nasycenia pary wodnej, a tym samym maksymalnej ilości pary, jaka może być przejęta przez powietrze suszące. Znając obliczeniową wydajność instalacji suszącej możliwe jest wyznaczenie ilości wody, jaka powinna być odprowadzona z ziarna. Dla tak obliczonej ilości wody możliwe jest wyznaczenie ilości powietrza suszącego, które będzie w stanie odebrać wyznaczoną ilość wody. Dla tak wyznaczonej ilości powietrza suszącego, zakładając, że przewody powietrzne od podgrzewacza do kolumny suszącej są idealnie zaizolowane, możliwe jest wyznaczenie ilości paliwa, które będzie spalane w podgrzewaczu powietrza. W ten sposób będzie wyznaczone minimalne zużycie ciepła i paliwa na wysuszenie określonego przez użytkownika materiału, przy założeniu, określonej przez producenta kolumny suszącej, wydajności suszenia.

W związku z tym, że zawsze pewna część ciepła jest tracona do otoczenia w wyniku przewodzenia, na podstawie modelu należy wyznaczyć, zależne od rodzaju materiałów izolacyjnych, wielkości strat ciepła. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie sprawności możliwej do uzyskania w określonej instalacji suszącej.

Wyznaczenie wartości zmiennych procesowych podczas badań eksploatacyjnych pozwoli na porównanie ich z wartościami otrzymanymi z modelu. Na tej podstawie można wnioskować o stanie instalacji suszącej zgodnie z drzewem decyzyjnym przygotowanym dla systemu ekspertowego.

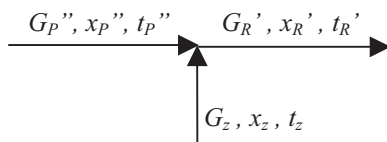
7. REGUŁY BAZY WIEDZY

7.1. Przewody powietrzne

W systemie ekspertowym opracowano metodę oceny efektywności energetycznej instalacji suszącej na podstawie analizy wybranych wskaźników. Wskaźniki te mogą być również zastosowane do oceny stanu technicznego instalacji suszącej.

Wg [2,6,8,11] poważnym problemem w instalacjach suszarniczych jest nieszczelność połączeń przewodów powietrznych. W instalacji suszącej stosuje się nadciśnieniowe i podciśnieniowe przewody powietrzne. Wentylatory promieniowe zainstalowane są za kolumną suszącą oraz za cyklonami. W systemie podciśnienia pracuje podgrzewacz powietrza, kolektor zasilający kolumnę suszącą, przewody łączące kolumnę suszącą z cyklonami, cyklony oraz przewody między cyklonami a wentylatorami. W systemie nadciśnienia pracują przewody recyrkulacji powietrza, jeśli instalacja je posiada. Nieszczelne mogą być połączenia przewodów oraz uszczelnienia otworów rewizyjnych.

Przewody zasilające kolumny suszące mają wymiary rzędu 1000x1000mm i trudno jest utrzymać ich szczelność. W Polsce nie ma normy definiującej klasy szczelności instalacji. Jako zalecenie można przyjąć klasy szczelności wg DIN, ASTM, oraz niemieckiej normy TA LUFT VDI 2440, wg których przedmiotowa instalacja powinna odpowiadać klasie $K_S=1\text{g}/\text{mb s}$ (gram powietrza na metr bieżący uszczelnienia i sekundę). Ani w czasie montażu, ani w czasie eksploatacji nie są robione próby szczelności przewodów. W celu obniżenia zużycia energii warto zadbać o szczelność instalacji ze względu na znaczny spadek temperatury powietrza suszącego w przypadku nieszczelności. W nieszczelnych przewodach doprowadzających powietrze do kolumny suszącej wzrasta wydatek powietrza suszącego i przede wszystkim spada jego temperatura. Na rysunku 2 przedstawiono schemat mieszania się strumienia powietrza w kolektorze z powietrzem przedostającym się do kolektora z otoczenia.



Rys. 2. Schemat węzła, w którym następuje mieszanie dwóch strumieni powietrza
Fig 2. The diagram of two air jets joint

Zgodnie z bilansem ciepła i masy temperaturę powietrza na wlocie do kolektora po zmieszaniu z powietrzem zewnętrznym można wyznaczyć z zależności (46).

$$t_R' = \frac{G_P''(c_g + c_{pw} \cdot x_P'') \cdot t_P'' + G_z(c_g + c_{pw} \cdot x_z) \cdot t_z}{G_R'(c_g + c_{pw} \cdot x_R')} \quad (46)$$

W przypadku nieszczelności połączenia kolektora z podgrzewaczem, przy wydatku powietrza suszącego 5,5 kg/s o temperaturze początkowej 100°C i zawartości wody takiej, jak powietrze z otoczenia, przy założeniu, że do przewodu zasysane jest powietrze o temperaturze 20°C w ilości 20% powietrza suszącego, temperatura w kolektorze spada do 86°C. W celu zachowania odpowiedniej temperatury na wlocie do kolumny suszącej niezbędne jest podniesienie temperatury powietrza opuszczającego podgrzewacz do 116°C i tym samym zwiększenie kosztów suszenia o ponad 15%.

Jeśli instalacja powietrzna jest szczelna, strumień objętościowy powietrza suszącego na wlocie powinien być równy strumieniowi na wylocie z przewodu. Do oceny szczelności przewodów powietrznych wykorzystano wskaźniki G'/G'' lub

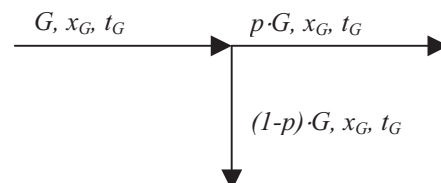
G''/G' wyznaczone na podstawie wartości strumienia powietrza w dwóch różnych punktach przewodu (G' na wlocie do przewodu, G'' na wylocie z przewodu). Dopuszczalne wskaźniki wyznaczone są dla każdej części rozpatrywanej instalacji suszącej na podstawie podanych przez użytkownika wymiarów przewodów i ilości połączeń oraz wielkości i liczby otworów rewizyjnych. Wartość wskaźnika wyznaczonego dla rzeczywistej instalacji (47, 48) powinna być większa od wartości dopuszczalnej wynikającej z przyjętej klasy szczelności.

$$\frac{G'}{G''} > \left(\frac{G'}{G_{\max}''} \right)_{\text{dop}} \quad (47)$$

gdzie:

$$G_{\max}'' = G' + \sum_{i=1}^n L_{P_i} \cdot K_S \quad (48)$$

Przewody pracujące w systemie nadciśnienia narażone są na odpływ powietrza suszącego do otoczenia przez nieszczelne połączenia. Ilość powietrza wypływającego przez nieszczelności określono jako część powietrza wpływającego do przewodu (rys. 3), (49). Wartość ta nie może być większa, niż określona przez klasę szczelności połączeń na przewodzie powietrznym.



Rys. 3. Schemat węzła, w którym następuje podział strumienia powietrza

Fig 2. The diagram of two air jets distribution

$$G = p \cdot G + (1 - p) \cdot G \quad (49)$$

O szczelności przewodu pracującego w systemie nadciśnienia można wnioskować na podstawie zależności (47, 48, 50)

$$\frac{G'}{G''} < \left(\frac{G'}{G''_{\min}} \right)_{dop} \quad (50)$$

gdzie:

$$G''_{\min} = G' - \sum_{i=1}^n L_{p_i} \cdot K_S \quad (51)$$

Kolejnym problemem spotykanym w instalacjach suszarniczych jest zła izolacja przewodów powietrznych. Przewody powietrzne transportują powietrze suszące o temperaturze wyższej niż 50°C. Przy ich projektowaniu obowiązuje więc norma [7]. Często jednak zdarza się, że przewody nie są wcale izolowane, lub izolacja uległa zniszczeniu (Rys. 4).



Rys.4. Przewody powietrzne ze zniszczoną izolacją
Fig 3. Air ducts with damaged insulation

Wg [7] ocena trwałości izolacji powinna być przeprowadzona na podstawie oględzin instalacji, pomiaru zwisu materiału izolacyjnego, oceny gęstości izolacji, pomiaru temperatury zewnętrznej izolacji za pomocą termometru powierzchniowego oraz pomiaru jednostkowych strat ciepłych metodą ścianki pomocniczej za pomocą kompensacyjnego miernika strumienia ciepła. Podczas badań instalacja powinna znajdować się w stanie równowagi cieplnej, czyli wg [7] powinna pracować nieprzerwanie ponad 8 godzin przy obciążeniu równym 80% mocy znamionowej. Pomiar gęstości izolacji powinny być wykonane przez pobranie próbek izolacji, zważenie i zmierzenie ich. Badania takie należy wykonywać co 2 lata. Podczas eksploatacji suszarni przeznaczonych do suszenia zbóż nie są przeprowadzane badania jakości izolacji, a tym samym nie dba się o minimalizację strat ciepła. Ocena jakości izolacji może być przeprowadzona na podstawie wyznaczenia entalpii w różnych punktach przewodów powietrznych i analizy odpowiednich wskaźników. Wykorzystanie systemu ekspertowego analizującego wartości zmiennych procesowych podczas pracy suszarni

mogło by informować obsługę o zmianach jakości izolacji cieplnej.

Wartości maksymalnych strat ciepłych z przewodów powietrznych nie powinny przekraczać wartości normatywnych o więcej niż 9%. Po dwuletniej eksploatacji wartość strat ciepłych nie powinna być większa niż 10% od strat ciepłych wyznaczonych podczas odbioru instalacji.

W normie [7] nie podano wprost maksymalnego współczynnika przenikania ciepła ścian przewodów, a podano dopuszczalną wartość jednostkowych strat ciepła dla przewodów. Tabela została opracowana przy założeniu, że średni, obliczeniowy współczynnik przenikania ciepła ścian przewodów nie może być większy od 0,45 W/m²K, maksymalny, wyznaczony przy odbiorze współczynnik przenikania ciepła nie powinien być większy od 0,5 W/m²K. Po dwóch latach eksploatacji wartość współczynnika przenikania ciepła dla przewodów nie powinna przekraczać 0,55 W/m²K. Współczynnik przenikania ciepła przewodów nieizolowanych, przedstawionych na rysunku 4 wynosi 16,6 W/m²K.

W celu spełnienia wymagań [7] strata ciepła wyznaczona na podstawie różnicy entalpii w dwóch punktach przewodu powietrznego nie powinna być większa niż 10% od dopuszczalnej straty ciepła przez przenikanie (52).

$$\frac{Q_{str \max}}{\Delta Q} \geq 0,91 \quad (52)$$

gdzie maksymalne normatywne straty ciepła określa zależność (53) $Q_{str \max}$ po scałkowaniu równania (9) i przyjęciu granic całkowania $l=0, t=t', l=l_p, t=t''$.

$$Q_{str \max} = k_{\max} F \left(\frac{(t' - t_z) - (t'' - t_z)}{\ln \left(\frac{t' - t_z}{t'' - t_z} \right)} \right) \quad (53)$$

$$\Delta Q = Q' - Q'' \quad (54)$$

Zastosowanie zgodnej z normą izolacji zapewnia 0,3% stratę ciepła w stosunku do entalpii powietrza na wlocie do przewodu. W systemie ekspertowym o jakości izolacji można wnioskować na podstawie jednej z zależności (52, 55, 56, 57):

$$\frac{\Delta Q}{Q'} \leq 0,003 \quad (55)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q''} \leq 0,003 \quad (56)$$

$$\frac{Q'}{Q''} \geq 0,997 \quad (57)$$

7.2. Kolumna susząca

Stopień wysuszenia materiału zależy od rodzaju materiału, przeznaczenia, początkowej wilgotności i czasu działania temperatury na materiał. Biorąc pod uwagę te czynniki można określić żadaną końcową wilgotność materiału. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie ilości ciepła niezbędnego do usunięcia założonej ilości wody (60). Wartość ta może być zwiększona o 6-8% w celu uwzględnienia strat na promieniowanie [12]. Dostarczone ciepło wykorzystywane jest na podgrzanie materiału (58), podgrzanie wody zawartej w materiale (59) opuszczającym suszarkę oraz na odparowanie założonej ilości wody (12).

$$Q_M = M_s c_M (t_M'' - t_M') \quad (58)$$

$$Q_W = M_s c_W u'' (t_M'' - t_M') \quad (59)$$

$$Q = Q_M + Q_W + Q_{uż} \quad (60)$$

$$Q = G_s (c_p + c_{pw} x') (t_g' - t_g'') \quad (61)$$

Z bilansu ciepła i masy (58, 59, 60, 61) możliwe jest wyznaczenie ilości powietrza G' , które powinno być dostarczone w rozpatrywanym czasie do suszonego materiału, w celu usunięcia z niego założonej ilości wody. W celu oceny pracy suszarni między innymi można wykorzystać wskaźniki (62, 63, 64, 65, 66):

$$\frac{M'}{G'} - \text{wejściowy strumień materiału suszonego przypadający na wejściowy strumień powietrza suszącego} \quad (62)$$

$$\frac{u'}{G'} - \text{wejściowa zawartość wody w materiale suszonym przypadająca na wejściowy strumień powietrza suszącego} \quad (63)$$

$$\frac{u''}{G'} - \text{wyjściowa zawartość wody w materiale suszonym przypadająca na wejściowy strumień powietrza suszącego} \quad (64)$$

$$\frac{Q_{uż}}{Q_{dost}} - \text{ilość ciepła wykorzystana na odparowanie wody przypadająca na ilość ciepła dostarczonego z powietrzem suszącym} \quad (65)$$

$$\frac{Q_{dost}}{M_s \Delta u} - \text{ilość ciepła dostarczonego przypadająca na ilość odparowanej wody} \quad (66)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_{zal}} - \text{rzeczywiste zmniejszenie zawartości wody w materiale suszonym w stosunku do zmniejszenia założonego} \quad (67)$$

Po wyznaczeniu wskaźników rzeczywistych na podstawie wartości zmiennych procesowych oraz wskaźników teoretycznych można wnioskować o poprawnej pracy kolumny suszącej. Na podstawie analizy powyższych wskaźników możliwe jest wyznaczenie takich wartości zmiennych procesowych, żeby przy określonych ograniczeniach nakładanych przez otoczenie (ceny paliw i energii, koszty stałe i zmienne) efektywność systemu (41) była w danych warunkach największa.

8. PODSUMOWANIE

Wyznaczone wskaźniki efektywności energetycznej mogą być wyznaczone jako wskaźniki chwilowe, które mogą być wykorzystane do sterowania procesem, wskaźniki dotyczące wybranych cykli pracy systemu suszącego, służące doborowi określonych, opłacalnych warunków suszenia oraz wskaźniki odniesione do całego okresu eksploatacji, dające możliwość maksymalizacji efektywności systemu w całym sezonie suszarniczym lub w całym cyklu życia obiektu.

Wyznaczanie wskaźników efektywności energetycznej umożliwi określenie przydatności projektowanych systemów suszących oraz aktualnej przydatności eksploatowanego systemu suszącego. Możliwa również będzie ocena przedsięwzięć mających na celu poprawę efektywności energetycznej, określenie czasu ich użytkowania oraz porównywanie różnych systemów suszących, możliwych do wykorzystania w określonych warunkach. Możliwa stanie się również ocena, czy przedmiotowy system suszący może być dalej eksploatowany, czy zasadna jest modernizacja systemu, czy należy go przestać użytkować.

LITERATURA

- [1] Cempel C.: Diagnostyka maszyn. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom.1992.
- [2] Fiłonienko G.: Urządzenia suszarnicze. WNT, Warszawa 1956.
- [3] Marecki J.: Podstawy przemian energetycznych. WNT, Warszawa 2000.
- [4] Pawlak M.: Systemy ekspertowe w eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996.
- [5] Michalski R., Niziński S.: Diagnostyka obiektów technicznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa, Sulejówek, Olsztyn, Radom, 2002.
- [6] Olesen H.T.: Grain Drying. Innovation Development Engineering ApS., Thisted, Denmark 1987.
- [7] Polska norma PN-77/M-34030: Izolacja cieplna urządzeń energetycznych. Wymagania i badania.
- [8] Powierża L.: Efektywność eksploatacyjna maszyn rolniczych. Rozprawa habilitacyjna. IBMER, Warszawa 1981.

- [9] Strumiłło Cz.: Podstawy teorii i techniki suszenia. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975.
- [10] Walczak Renata: 2004, Identyfikacja zmiennych procesowych w systemie Symuneuron w aspekcie doboru suszarki oraz diagnostyki procesu suszenia. Diagnostyka nr 32/2004.
- [11] Walczak R. Ocena efektywności energetycznej suszarni rolniczych. Artykuł przekazany na X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych. Stare Jabłonki Wrzesień 2005.
- [12] Urbaniec K.: Suszarnia wysłodków. Stowarzyszenie Techników Cukrowników, Warszawa 1993.
-



Dr inż. Renata WALCZAK
Wydział Budownictwa,
Mechaniki i Petrochemii
Politechniki Warszawskiej.
W swojej pracy naukowej
zajmuje się zagadnieniami
sztucznej inteligencji oraz
ekonomiki eksploatacji
maszyn.