

Włodzimierz CIESIELCZYK, Joanna SKONECZNA-LUCZKÓW, Jarosław KURTYKA

e-mail: wlodek@indy.chemia.pk.edu.pl

Katedra Reaktorów Chemicznych i Kinetyki Ruchu Masy, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Porównanie wyników bilansów energetycznego i egzergetycznego wybranego węzła technologicznego

Wstęp

Analiza egzergetyczna [Szargut i Petela, 1965] pozwala wskazać te etapy, gdzie energia jest degradowana podczas przebiegu procesu, co umożliwia jego usprawnienia. Ponadto analiza egzergetyki umożliwia określenie stopnia użyteczności ciepła w stosunku do temperatury odniesienia. Głównym celem analizy egzergetycznej jest identyfikacja przyczyn oraz obliczenie strat energii. Zastosowanie tej metody pozwala na stosunkowo dokładne określenie tych miejsc instalacji technologicznej, w których istnieje możliwość poprawy wskaźników techniczno-ekonomicznych [Rosen i Dincer, 2003].

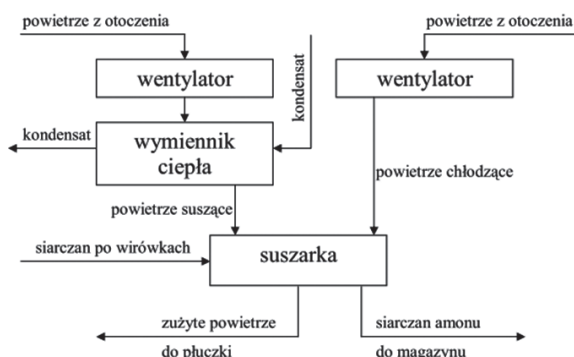
Tworząc klasyczny bilans energetyczny nie uwzględnia się niejednakowej jakości różnych sposobów przekazywania energii. Dlatego oparta na tym bilansie sprawność energetyczna (termiczna) pozwala jedynie na porównywanie procesów tego samego typu, nie może być natomiast używana za miarę stopnia doskonałości danego procesu [Scott, 2003].

Inaczej jest w przypadku sprawności egzergetycznej. Przy jej obliczaniu bierze się pod uwagę fakt, że różne postacie i sposoby przekazywania energii mają niejednakową jakość. Sprawność egzergetyczna określa stopień oddalenia procesu rzeczywistego od procesu idealnego przebiegającego odwracalnie [Szargut i Petela, 1965; Tsatsaronis, 2007]. Bilans egzergetyczny pozwala wykryć i przeanalizować wszystkie straty energetyczne występujące w całej instalacji, w tym również straty wynikające z nieodwracalności procesów, czego nie można zrealizować, stosując klasyczny bilans energetyczny.

Przykładowe porównanie wyników bilansów: energetycznego i egzergetycznego węzła suszenia siarczanu amonu jest przedmiotem niniejszej pracy.

Charakterystyka analizowanego węzła technologicznego

Analizowano węzeł suszenia instalacji do produkcji siarczanu amonu. W instalacji pracują dwie równoległe linie technologiczne A i B składające się z wentylatora nadmuchowego powietrza suszącego, nagrzewnicy powietrza, suszarko-schładzarki oraz wentylatora nadmuchowego powietrza chłodzącego (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat technologiczny linii suszenia siarczanu amonu [Opracowanie własne]

Proces suszenia wilgotnego siarczanu amonu dostarczanego z wirówek realizowany jest w suszarko-chładzarkach wibrofluidyzacyjnych [Ciesielczyk i in., 2005] składających się z dwu komór. W pierwszej komorze zasilanej gorącym powietrzem, osiągnięta jest wilgotność na poziomie 0,3% wag. Produkt o temperaturze około 50°C przechodzi do komory z chłodnym powietrzem, gdzie osiąga temperaturę około 35°C.

Ogrzewanie powietrza zachodzi w krzyżowo-prądowym wymienniku ciepła, gdzie czynnikiem grzewczym jest kondensat powstały po skropleniu oparów z procesu krystalizacji siarczanu amonu.

Pomiary i obliczenia

W celu wyznaczenia składników bilansów energetycznego i egzergetycznego i zebrania odpowiednich wartości parametrów technologicznych wykonano pomiary na instalacji suszenia siarczanu amonu [Ciesielczyk i in., 2005; Kurtyka, 2012].

Składniki bilansu

Egzergia nie podlega prawu zachowania w związku z tym ogólne równanie bilansu egzergetycznego można zapisać [Szargut i Petela, 1965]:

$$\sum Ex_{we} - \sum Ex_{wy} = \sum Ex_{dest} \quad (1)$$

gdzie:

$\sum Ex_{dest}$ – suma egzergetyki zniszczonej w procesie,

$\sum Ex_{we}$ – suma egzergetyki dostarczonej do układu,

$\sum Ex_{wy}$ – suma egzergetyki wyprowadzonej z układu.

Egzergia materiału jest jednym ze składników bilansu i może być obliczona ze wzoru [Syahrul i in., 2002; Tsatsaronis, 2007]:

$$Ex_m = G_m c_m \left[T_m - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie:

c_m – ciepło właściwe siarczanu amonu dane zależnością:

$$c_m(t) = 0,02095t + 1,3697 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (3)$$

Egzergia powietrza wilgotnego jest kolejnym składnikiem bilansu i można ją obliczyć z zależności:

$$Ex_p = G_p (c_p + Y c_v) \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \right] + (1 + 1,6078Y) R_p T_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) + R_v T \left[(1 + 1,6078Y) \ln \left(\frac{1 + 1,6078Y_0}{1 + 1,6078Y} \right) + 1,6078Y \ln \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right] \quad (4)$$

Egzergia na odparowanie wilgoci może być wyznaczona ze wzoru:

$$Ex_{odp} = \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \Delta W r \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta W r$ – ciepło potrzebne do odparowania wilgoci.

W procesach wykorzystujących urządzenia napędzane energią elektryczną, egzergia jest tożsama z energią wykorzystanego prądu.

$$Ex = \sqrt{3} I U \cos \varphi \quad (6)$$

Sprawności procesu

Ze względu na konstrukcję badanej suszarki (jednoczesne suszenie i chłodzenie) we wzorze na sprawność energetyczną należało uwzględnić udział powietrza chłodzącego w procesie suszenia:

$$\eta = \frac{G_m r (X_1 - X_2)}{G_{pS} t_{pS} + G_{pCh} t_{pCh}} \quad (7)$$

Sprawność energetyczna wymiennika ciepła była obliczana ze wzoru:

$$\eta_{wc} = \frac{G_k c_k (t_{k0} - t_{k1})}{G_{pS} c_p (t_{p1} - t_{p0})} \quad (8)$$

Sprawność egzergetyczna w literaturze najczęściej jest definiowana jako stosunek egzergetyki wyprowadzonej, stanowiącej użyteczny efekt procesu, do egzergetyki napędowej.

Egzergia wprowadzona to pożądaný rezultat wygenerowany przez rozważany układ. W procesie suszenia jest to egzergia zużyta na odprowadzenie wilgoci (5).

Egzergia napędowa to zasoby zużywane w celu uzyskania egzergii wprowadzonej, w procesie suszenia jest to egzergia powietrza (4), zatem:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{odp}}{Ex_{pS1} + Ex_{pCh1}} \quad (9)$$

Dla wymiennika ciepła zastosowano wzór uwzględniający zużyta egzergię w stosunku do możliwej do wykorzystania egzergii:

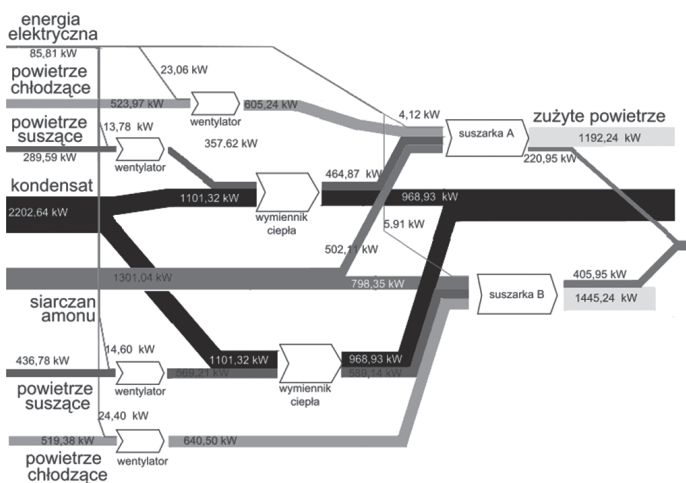
$$\eta_{exwc} = \frac{Ex_{pS1} - Ex_{pS0}}{Ex_{k0} + Ex_{k1}} \quad (10)$$

gdzie egzergię kondensatu określono z zależności:

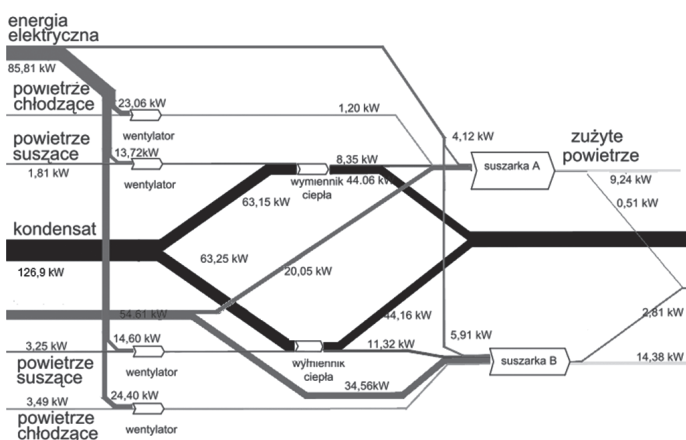
$$Ex_k = G_k C_k \left[T_k - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_k}{T_0} \right) \right] \quad (11)$$

Wyniki analizy bilansów

Wyniki analizy bilansów zostały pokazane na rys. 2 i 3, gdzie za pomocą szerokości pasm przedstawiono poszczególne wartości składników bilansu. Na rys. 2 przedstawione są składniki klasycznego bilansu energetycznego, który uznaje wszystkie rodzaje energii za równoważne. W bilansie egzergetycznym (Rys. 3) można zauważyć zmianę proporcji szerokości poszczególnych pasm. Najwyraźniej widać to na przykładzie szerokości pasma odpowiadającego energii elektrycznej.



Rys. 2. Wykres pasmowy przepływu energii w węzle suszenia siarczanu amonu [Kurtyka, 2013]



Rys. 3. Wykres pasmowy przepływu egzergii w węzle suszenia siarczanu amonu [Kurtyka, 2013]

W tab. 1 zebrane zostały wyniki obliczeń sprawności energetycznej i egzergetycznej suszarki i wymiennika ciepła. Niska sprawność energetyczna suszarki wynika z rozwiązania technologicznego łączącego w jednym aparacie suszenie i chłodzenie siarczanu amonu. Uwzględ-

nienie energii powietrza chłodzącego w obliczeniach wpływa znacząco na wartość sprawności. Parametry powietrza chłodzącego nie różnią się znacząco od powietrza otoczenia, więc egzergia tego powietrza jest stosunkowo niska.

Tab. 1. Sprawności energetyczne i egzergetyczne dla linii technologicznych A i B

Rodzaj sprawności	A	B
sprawność energetyczna suszarki	0,122	0,138
sprawność egzergetyczna suszarki	0,175	0,251
sprawność energetyczna wymiennika ciepła	0,656	0,435
sprawność egzergetyczna wymiennika ciepła	0,352	0,406

Wnioski

Straty egzergii w analizowanym procesie suszenia wynikają głównie z nieodwracalnego przepływu ciepła w grzejniku i komorze suszenia, z dodatniej wartości egzergii czynnika odpływającego z komory suszenia do otoczenia oraz zużycia znacznej ilości energii elektrycznej do napędu urządzeń przesyłowych.

Otrzymane wyniki świadczą o istotnym znaczeniu analizy egzergetycznej i mogą być podstawą działań innowacyjnych w kierunku zmniejszenia energochłonności analizowanego węzła technologicznego.

Oznaczenia

- c – ciepło właściwe [kJ/(kg·K)],
- Ex – strumień egzergii [kJ/s],
- G – strumień masowy [kg/s],
- I – natężenie prądu [A],
- P – ciśnienie [Pa],
- R – stała gazowa indywidualna [kJ/(kg·K)],
- T – temperatura [K],
- t – temperatura [°C],
- U – napięcie prądu [V],
- X – zawartość wilgoci w materiale [kg wilgoci/kg suchego materiału],
- Y – wilgotność bezwzględna powietrza [kg wilgoci/kg suchego powietrza],
- η – sprawność [-].

Indeksy

- Ch – dotyczy powietrza chłodzącego,
- ex – dotyczy egzergii,
- k – dotyczy kondensatu,
- m – dotyczy siarczanu amonu,
- p – dotyczy powietrza,
- S – dotyczy powietrza suszącego,
- v – dotyczy pary wodnej,
- wc – dotyczy wymiennika ciepła,
- 0 – dotyczy stanu odniesienia, wielkości przed wymiennikiem,
- 1 – dotyczy wielkości za wymiennikiem, przed suszarką,
- 2 – dotyczy wielkości za suszarką.

LITERATURA

Ciesielczyk W., Szymczak J., Wais J., Wolff A., 2005. Efekty zmiany metody suszenia na instalacji produkcyjnej siarczanu amonu. *Inż. Ap. Chem.*, **44**, nr 6, 3-6

Kurtyka J., 2012. *Bilans energetyczny węzła suszenia siarczanu amonu*. Praca inżynierska. Inst. Inż. Chem. i Proc., Pol. Krakowska

Rosen M.A., Dincer I., 2003. Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal systems and processes. *Energy Conversion and Management*, **44**, nr 10, 33-1651. DOI: 10.1016/S0196-8904(02)00179-6

Scott D., 2003. Exergy. *Int. J. Hydr. Energy*, **28**, nr 4, 369-375. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00040-X

Syahru S., Hamdullahpur F., Dincer I., 2002. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *App. Therm. Eng.*, **22**, nr 5, 1763-1775. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00079-0

Szargut J., Petela R., 1965. *Egzergia*, WNT, Warszawa

Tsatsaronis G., 2007. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, **32**, nr 4, 249-253. DOI: 10.1016/j.energy.2006.07.002

Praca była finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N209 105739.