

Model matematyczny instalacji termicznego przekształcania odpadów medycznych

Mathematical model of a medical waste thermal treatment plant

JANUSZ BUJAK, SEBASTIAN MAJKOWSKI

DOI 10.36119/15.2019.10.2

W artykule przedstawiono model matematyczny, z uwzględnieniem bilansu strumieni energii i bilansu strumieni masy, instalacji termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii. Model matematyczny umożliwia wyznaczanie sprawności eksploatacyjnych ciepłno-elektrycznych podobnych instalacji. Utworzony model matematyczny umożliwia dokonanie oceny poszczególnych elementów w zakresie sprawności układu na etapie projektowania i eksploatacji instalacji.

Instalacja termicznego przekształcania odpadów (zwana dalej także ITPO) składa się z zespołu przygotowania i załadunku odpadów, pieca obrotowego, komory termoreaktora, kotła parowego odzyskowego, turbiny parowej oraz układu odzysku ciepła w postaci wody gorącej. Do weryfikacji modelu matematycznego został wykorzystany układ z piecem obrotowym i komorą dopalania o wydajności 150 kg/h, pracujący w systemie ciągłym.

Słowa kluczowe: instalacja termicznego przekształcania, model matematyczny, odpady medyczne, sprawność cieplna, sprawność elektryczna.

This paper presents a mathematical model of a thermal waste management plant with an energy recovery system, including energy flow balance and mass flow balance. This mathematical model enables determination of thermal and electrical operating efficiency of similar plants. The mathematical model conceived herein enables evaluation of individual components for system efficiency at the stage of plant design and operation.

The waste thermal treatment plant (hereinafter referred to as WTPP) consists of a waste preparation and loading unit, a rotary kiln, a thermoreactor chamber, a steam recovery boiler, a steam turbine, and a system recovering heat as hot water. Verification of the mathematical model involved a system with a rotary kiln and an afterburner chamber in continuous operation with a throughput of 150 kg/h.

Keywords: thermal treatment plant, mathematical model, medical waste, thermal efficiency, electrical efficiency

Wstęp

Obecnie stosuje się kilka technologii przeznaczonych do termicznego unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych:

- proces spalania odpadów niebezpiecznych w piecu z paleniskiem rusztowym stałym lub ruchomym – system trudny w eksploatacji, w którym trzeba stosować wielostopniowy system oczyszczania spalin,
- proces spalania odpadów niebezpiecznych w piecach fluidalnych, które muszą być wyposażone w wysokosprawny system odpylenia i oczyszczania spalin, a odpady przeznaczone do utylizacji muszą być ujednorodnione i o stabilnej wartości opałowej,
- proces pirolizy wraz z dopaleniem gazów pirolitycznych wymagający bardzo dokładnego układu oczyszczenia spalin z zanieczyszczeń,
- proces współspalania odpadów niebezpiecznych w piecach cementowych, w których dużym problemem jest proces

oczyszczenia spalin oraz zanieczyszczenie produktu końcowego,

- proces spalania odpadów niebezpiecznych w piecu obrotowym oraz proces dopalania spalin w komorze dopalania – w technologii tej wymagane są sprawne systemy odpylające i oczyszczające spalinę,
- proces współspalania odpadów niebezpiecznych w urządzeniach energetycznych, gdzie występują problemy z oczyszczeniem spalin oraz zwiększeniem się toksyczności popiołów,
- proces termicznego niszczenia odpadów niebezpiecznych w urządzeniach mikrofalowych – jest to technologia opracowana głównie dla odpadów szpitalnych i stabilnych termicznie odpadów organicznych,
- proces termicznego niszczenia odpadów niebezpiecznych w plazmie – metoda ta jest odpowiednia dla wysokotoksycznych odpadów.

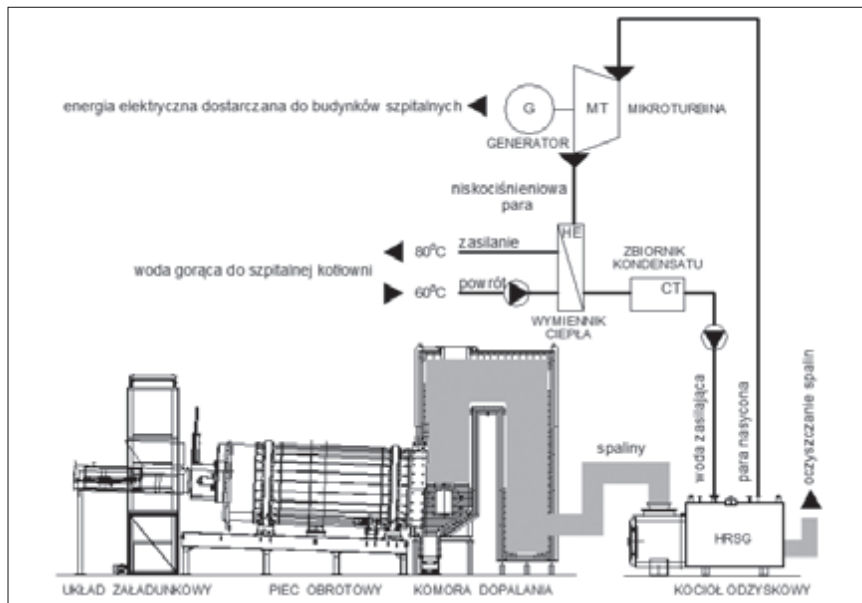
Do termicznej utylizacji odpadów najczęściej wykorzystuje się instalacje z obrotową komorą spalania i komorą dopalania, zwaną

także termoreaktorem [1, 2, 3, 4]. W technologii tej polska nomenklatura używa określenia „proces spalania” natomiast normy brytyjskie [5, 6, 7, 8] używają sformułowania „proces spoielania”.

W celu projektowania i wyznaczania parametrów pracy ITPO wykonany został model matematyczny, który umożliwia wyznaczanie sprawności eksploatacyjnych ciepłno-elektrycznych podobnych instalacji. Zastosowanie modelu matematycznego pozwoli dokonać oceny wpływu poszczególnych składników bilansu energii na wartość sprawności eksploatacyjnej ciepłno-elektrycznej instalacji termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii.

Opis instalacji ITPO medycznych z odzyskiem ciepła i produkcją prądu

Na rysunku 1 został przedstawiony schemat technologiczny ITPO z piecem obrotowym, dla której utworzono model matematyczny. Instalacja technologiczna składa się z następujących elementów:



Rys. 1. Schemat technologiczny ITPO medycznych
Fig. 1. Technological chart of the installation for medical waste thermal treatment

- instalacja termicznej utylizacji odpadów,
- układ odzysku ciepła z instalacji termicznej utylizacji odpadów,
- mikroturbina do produkcji prądu,
- układ oczyszczania spalin,
- układ odbioru popiołów powstających po procesie spalania,
- układ pomiaru emisji spalin do atmosfery.

Model matematyczny ITPO medycznych z odzyskiem ciepła i produkcją prądu

Model matematyczny szpitalnego systemu termicznej utylizacji odpadów medycznych z odzyskiem energii został stworzony na podstawie równania (1) [9], które przedstawia bilans strumieni energii wprowadzonych, odprowadzonych i utraconych z instalacji termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii. W stworzonym modelu matematycznym można założyć liczbę okresów bilansowych, a każdy okres bilansowy może być dowolnym przedziałem czasowym.

W utworzonym modelu matematycznym instalacji termicznej utylizacji odpadów z odzyskiem energii zostały przyjęte następujące założenia:

- uwzględni się ustalony stan pracy instalacji,
- nie uwzględni się rozruchu i zatrzymania instalacji,
- nie uwzględni się przerw na czyszczenie kotła,
- nie uwzględni się stanów awaryjnych.

Na podstawie założeń przyjętych dla modelu matematycznego i wykorzystując równanie bilansu strumieni energii (1), sformułowano moduły do obliczeń strumieni energii dla szpitalnego systemu termicznej utylizacji odpadów medycznych z odzyskiem energii.

W równaniu (1) bilansu strumieni energii przepływających w ITPO po lewej stronie znaj-

dują się wszystkie strumienie energii dostarczonych do instalacji, a po prawej stronie wszystkie strumienie energii odprowadzone oraz strumienie energii utracone z instalacji:

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{w-odp} + \dot{E}_{w-pald-ks} + \dot{E}_{w-powdp-ks} + \\ & + \dot{E}_{w-powd-ks} + \dot{E}_{w-pald-kd} + \dot{E}_{w-powdp-kd} + \\ & + \dot{E}_{w-powd-kd} + \dot{E}_{w-wz-su} = \dot{E}_{u-ot-ks} + \\ & + \dot{E}_{u-ot-kd} + \dot{E}_{u-ot-kb} + \dot{E}_{u-pop-ech} + \\ & + \dot{E}_{u-pop-ef} + \dot{E}_{u-sp-zko-ech} + \dot{E}_{u-sp-zko-ef} + \\ & + \dot{E}_{u-ot-ko} + \dot{E}_{u-odm-ko} + \dot{E}_{u-ods-ko} + \\ & + \dot{E}_{u-ot-par} + \dot{E}_{o-el-mt} + \dot{E}_{u-mt} + \\ & + \dot{E}_{o-wg-wym} + \dot{E}_{u-ot-wym} + \dot{E}_{u-ot-zk} \quad (1) \end{aligned}$$

- gdzie:
- $\dot{E}_{o-el-mt}$ – strumień energii elektrycznej wyprodukowanej w mikroturbinie [kW],
 - $\dot{E}_{o-wg-wym}$ – strumień entalpii wody gorącej odprowadzany z wymiennika do bufora ciepła w kotłowni [kW],
 - \dot{E}_{u-mt} – strata strumienia energii z mikroturbiny [kW],
 - $\dot{E}_{u-odm-ko}$ – strata strumienia entalpii odmulin z kotła odzyskowego [kW],
 - $\dot{E}_{u-ods-ko}$ – strata strumienia entalpii odsolin z kotła odzyskowego [kW],
 - $\dot{E}_{u-ot-kb}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni kanału betonowego do otoczenia [kW],
 - $\dot{E}_{u-ot-kd}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni komory dopalania do otoczenia [kW],
 - $\dot{E}_{u-ot-ks}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni płaszcza komory spalania do otoczenia [kW],
 - $\dot{E}_{u-ot-ko}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni kotła odzyskowego do otoczenia [kW],
 - $\dot{E}_{u-ot-par}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni rurociągu pary do otoczenia [kW],

- $\dot{E}_{u-ot-wym}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni wymiennika do otoczenia [kW],
- $\dot{E}_{u-ot-zk}$ – strata strumienia ciepła utraconego z powierzchni zbiornika kondensatu do otoczenia [kW],
- $\dot{E}_{u-pop-ech}$ – strata strumienia entalpii chemicznej popiołu usuwanego z komory dopalania [kW],
- $\dot{E}_{u-pop-ef}$ – strata strumienia entalpii fizycznej popiołu usuwanego z komory dopalania [kW],
- $\dot{E}_{u-sp-zko-ech}$ – strata strumienia entalpii chemicznej spalin za kotłem odzyskowym (ciepło odpadowe bezużyteczne) [kW],
- $\dot{E}_{u-sp-zko-ef}$ – strata strumienia entalpii fizycznej spalin za kotłem odzyskowym (ciepło odpadowe bezużyteczne) [kW],
- \dot{E}_{w-odp} – strumień entalpii chemicznej odpadów medycznych wprowadzanych do pieca obrotowego [kW],
- $\dot{E}_{w-pald-kd}$ – strumień entalpii chemicznej paliwa dodatkowego, wprowadzanego do komory dopalania [kW],
- $\dot{E}_{w-pald-ks}$ – strumień entalpii chemicznej paliwa dodatkowego, wprowadzanego do komory spalania [kW],
- $\dot{E}_{w-powd-kd}$ – strumień entalpii fizycznej powietrza dodatkowego wprowadzanego do komory dopalania, biorący udział w procesie dopalania gazów [kW],
- $\dot{E}_{w-powd-ks}$ – strumień entalpii fizycznej powietrza dodatkowego wprowadzanego do komory spalania, biorący udział w procesie spalania odpadów [kW],
- $\dot{E}_{w-powdp-kd}$ – strumień entalpii fizycznej powietrza dodatkowego, użytego do spalania paliwa dodatkowego w komorze dopalania [kW],
- $\dot{E}_{w-powdp-ks}$ – strumień entalpii fizycznej powietrza dodatkowego, użytego do spalania paliwa dodatkowego w komorze spalania [kW],
- $\dot{E}_{w-wz-su}$ – strumień entalpii wody ze stacji uzdatniania wody do zbiornika kondensatu [kW].

Na podstawie równania bilansu energii (1) model matematyczny umożliwia wyznaczenie sprawności eksploatacyjnych dla poszczególnych elementów:

- sprawność eksploatacyjna cieplna komory spalania i komory dopalania,

$$\begin{aligned} & \eta_{se-mm-kskd} = \\ & \frac{\int_0^T E_{p-sp-zkd-ef}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{p-sp-zkd-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-ks}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-kd}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-pop-ech}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-pop-ef}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (2) \end{aligned}$$

- sprawność eksploatacyjna cieplna kanału betonowego łączącego komorę dopalania i kocioł odzyskowy,

$$\eta_{se-mm-kb} = \frac{\int_0^T E_{p-sp-pko-ef}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{p-sp-pko-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-kb}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (3)$$

- sprawność eksploatacyjna cieplna kotła odzyskowego,

$$\eta_{se-mm-ko} = \frac{\int_0^T E_{p-par-zko}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{p-wz-ko}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{p-par-zko}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{p-wz-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-sp-zko-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-odm-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ods-ko}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (4)$$

- sprawność eksploatacyjna cieplna strony pierwotnej (spalinowej) z kotłem odzyskowym,

$$\eta_{se-mm-ksko} = \frac{\int_0^T E_{p-par-zko}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{p-wz-ko}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{p-par-zko}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{p-wz-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-ks}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-kd}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-kb}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-pop-ech}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-pop-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-sp-zko-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-odm-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ods-ko}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (5)$$

- sprawność eksploatacyjna cieplno-elektryczna całego układu,

$$\eta_{se-mm-cu} = \frac{\int_0^T E_{o-el-mt}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{o-wg-wym}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{o-el-mt}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{o-wg-wym}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-ks}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-kd}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-kb}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-pop-ech}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-pop-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-sp-zko-ef}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-odm-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ods-ko}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-mt}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-wym}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{u-ot-zk}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (6)$$

Wyniki badań

W utworzonym modelu matematycznym mogą zostać wyznaczone sprawności eksploatacyjne cieplno-elektryczne oraz przepływy energii odprowadzonych i energii utraconych dla poszczególnych części i całej instalacji termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii. Przykładowe wyniki uzyskane z obliczeń w utworzonym modelu matematycznym zostały przedstawione w tabeli 1.

Wnioski

Przedstawiony model matematyczny dla termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii umożliwia przeprowadzenie badań w zakresie:

- wyznaczenia sprawności eksploatacyjnych cieplno-elektrycznych dla poszczególnych układów i całości instalacji,
- przepływu i konwersji strumieni energii dla poszczególnych układów i całości instalacji,
- wyznaczenia strumieni strat energii w instalacji,
- poszukiwania sposobów na uzyskanie maksymalnych efektywności cieplno-ener-

- getycznych instalacji zarówno nowo projektowanych jak też eksploatowanych,
- zmian konstrukcyjnych w instalacji, np. oceny w jaki sposób zmiana rodzaju izolacji i jej grubości w komorze spalania może wpłynąć na stratę strumienia energii,
- zmian układu odzysku strumienia energii, np. oceny w jaki sposób zmiana mikroturbiny na agregat absorpcyjny wody lodowej wpłynie na przepływ strumienia energii w instalacji,
- oszacowania niepewności pomiarowych badanego układu,
- oceny dopasowania modelu matematycznego do danych z badań doświadczalnych.

Wykonany model matematyczny jest narzędziem przydatnym zarówno w fazie projektowania jak i eksploatacji instalacji termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii. W kolejnym etapie, badania można prowadzić w kierunku wzbogacenia modelu matematycznego o aspekty dynamiczne (np. rozruchów i zatrzymań instalacji). Dalsze badania można prowadzić w kierunku dokładniejszej oceny jakościowej i ilościowej procesów zachodzących w instalacjach termicznej utylizacji odpadów z układem odzysku energii oraz efektywne zarządzanie produkcją i użytkowaniem energii.

LITERATURA

- [1] SCHENCK H.W., WENDT J.O.L., KERSTEIN A.R., *Mixing characterization of transient puffs in a rotary kiln incinerator*. Combustion Science and Technology, Vol. 116-117, 1996, s. 427-453.
- [2] OWENS W.D., GEOFFREY SILCOX G.D., LIGHTY J.S., DENG X.X., PERSHING D.W., CUNDY V.A., LEGER C.B., JAKWAY A.L., *Thermal analysis of rotary kiln incineration: Comparison of theory and experiment*. Combustion and Flame Vol. 86, 1991, s. 101-114.
- [3] MARIAS F., *A model of a rotary kiln incinerator including processes occurring within the solid and the gaseous phases*. Computers & Chemical Engineering, Vol. 27, 2003, s. 813-825.
- [4] BUJAK J., *New insights into waste management - Meat industry*. Renewable Energy, Vol. 83, 2015, s. 1174-1186.
- [5] British Standard. *Incinerators. Part 1. Specification for standard performance requirements for incineration plant for the destruction of hospital waste*. BS 3316, Part 1, 1987.
- [6] British Standard. *Incinerators. Part 2. Methods of test and calculation for the performance of incineration plant for the destruction of hospital waste*. BS 3316, Part 2, 1987.
- [7] British Standard. *Incinerators. Part 3. Method for specifying purchasers' requirements for incineration plant for the destruction of hospital waste*. BS 3316, Part 3, 1987.
- [8] British Standard. *Incinerators. Part 4. Code of practice for the design, specification, installation and commissioning of incineration plant for the destruction of hospital waste*. BS 3316, Part 4, 1987.
- [9] BUJAK J., MAJKOWSKI S., OKOŃSKI R., *Sprawność eksploatacyjna instalacji termicznego przekształcania odpadów medycznych*. Instal 5/2018, s. 8-13.

Tabela 1 Sprawność eksploatacyjna cieplno-elektryczna oraz przepływ energii dla poszczególnych elementów układu termicznej utylizacji odpadów z odzyskiem energii

Lp.	Układ:	Sprawność eksploatacyjna cieplno-elektryczna układu: η_{se-m}	Przepływ energii w układzie: $E_o + E_u$
		[%]	[GJ]
1.	komory spalania i komory dopalania	85,2	4568,9
2.	kanalu betonowego	89,2	3960,0
3.	kotła odzyskowego	76,8	3459,9
4.	strony pierwotnej z kotłem odzyskowym	58,2	4562,3
5.	całej instalacji	54,1	4554,2