

Sprawność eksploatacyjna cieplna kotłowni parowej

Operational efficiency of a steam boiler plant

JANUSZ BUJAK, SEBASTIAN MAJKOWSKI, RYSZARD OKOŃSKI

DOI 10.36119/15.2020.11.2

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych sprawności eksploatacyjnej cieplnej kotłowni parowej. Instalacja kotłowni parowej składa się z zespołu kotłów parowych płomienicowo-płomieniówkowych oraz instalacji technologicznej.

W niniejszym artykule omówiono problematykę związaną ze sprawnością eksploatacyjną cieplną kotłowni parowej, kotłów parowych płomienicowo-płomieniówkowych opalanych paliwami gazowymi i ciekłymi. Przedstawiono wyniki badań sprawności eksploatacyjnej kotła parowego w funkcji jego obciążenia cieplnego. Badania prowadzono przez okres 18 miesięcy w kotłowni parowej Szpitala Wojewódzkiego. Wyniki badań otrzymane na rzeczywistym obiekcie porównano z obliczeniami według PN-EN 12953-11. Badania dowiodły, że rzeczywista sprawność eksploatacyjna cieplna jest niższa niż wyznaczona według normy. Wynika to z tego, że w warunkach rzeczywistych liczba składników odpowiedzialnych za jego straty energii jest większa niż norma nakazuje przyjąć do jego obliczenia.

Słowa kluczowe: kotłownia parowa; kotły płomienicowo-płomieniówkowe; bilans cieplny; sprawność eksploatacyjna.

The article presents the results of experimental studies on the operational efficiency of a steam boiler house. The installation of a steam boiler house consists of a set of shell boilers and a technological installation.

The article discusses the issues related to the thermal operational efficiency of a steam boiler house with steam shell boilers fired by gaseous and liquid fuels. The results of tests of the operational efficiency of a steam boiler in its operating conditions are presented. The research was carried out for 18 months in the steam boiler room of the Provincial Hospital. Test results obtained at the real object were compared to research results according to PN-EN 12953-11. The tests proved that the actual thermal operational efficiency is lower than that determined by the standard. This is due to the fact that under real conditions the amount of components responsible for its loss is larger than the norm for its calculation.

Keywords: steam boiler plant; shell boilers; heat balance; operational efficiency.

Wstęp

W ostatnich latach w naszym kraju powstaje dużo nowoczesnych i zaawansowanych technologicznie źródeł ciepła, opalanych paliwami ciekłymi i gazowymi. Projektując tego typu źródła ciepła projektanci skupiają się głównie na doborze jednostek kotłowych, utożsamiając ich sprawność ze sprawnością całego źródła. Producenci kotłów w katalogach określają sprawność cieplną urządzeń odnosząc się zwykle do nominalnego obciążenia cieplnego. Do rzadkości należą producenci, którzy podają wielkość sprawności średniorocznej urządzeń lub charakterystykę zmienności sprawności cieplnej w zależności od zmiennego obciążenia cieplnego. Wartość sprawności cieplnej uwzględnia najczęściej stratę kominową, stratę ciepła przez zewnętrzną powierzchnię kotła do otoczenia i stratę niepełnego spalania. W rzeczywistości, w każdym

źródle ciepła występuje zdecydowanie więcej strat cieplnych, wynikających z warunków techniczno-eksploatacyjnych, które mają wpływ na efektywność wytwarzania ciepła.

Zagadnienia w zakresie badania sprawności eksploatacyjnej cieplnej całych kotłowni parowych (w przedziale mocy od 0,5-20 MW), w literaturze lub w publikacjach praktycznie nie występują. Najczęściej można spotkać charakterystyki cieplne wyłącznie samych kotłów. W pozycji [1] autorzy opisali sprawność kotła w funkcji obciążenia. Charakterystykę sprawności eksploatacyjnej cieplnej kotła podzielili na trzy strefy:

- strefa nierobocza: spalanie w tej strefie obciążeń jest nieekonomiczne, gdyż przy bardzo małych wartościach sprawności występują wysokie wskaźniki zużycia paliwa,
- strefa ekonomicznych obciążeń: występują optymalne warunki pracy kotła,

- strefa forsowania: sprawność w tym przedziale zaczyna maleć wraz ze wzrostem obciążenia.

Autorzy wskazują, że eksploatacja kotłów powinna odbywać się jedynie w strefie ekonomicznych obciążeń. Z kolei w innej publikacji [2] dokonano oceny pracy kotłów WR-25. Na podstawie wykonanych pomiarów energetycznych oraz pomiarów emisji dwóch jednostek WR-25 (tradycyjnych) i 3 jednostek WR-25 ze ścianami szczelnymi, określono przebieg zmienności sprawności w funkcji obciążenia cieplnego. Krzywa sprawności dla kotłów ze ścianami szczelnymi (po modernizacji) miała przebieg bardzo płaski, co umożliwiało eksploatację kotła w szerokim przedziale obciążeń. Sprawność brutto kotła w strefie obciążeń ekonomicznych wahała się w przedziale 82%-86%. W materiałach firmy Viessmann [3] pokazano sprawność nominalną kotłów parowych w funkcji obciążenia cieplnego.

prof.dr hab.inż. Janusz Bujak, <https://orcid.org/0000-0003-4228-4147>; dr inż. Ryszard Okoński – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz; dr inż. Sebastian Majkowski – PPM PROMONT Bujak Sp. z o.o. – Sp. K., Bydgoszcz

Przedstawiono charakterystyki sprawności nominalnych kotłów o różnym ciśnieniu pracy. Są to kotły płomienicowo-płomieniówkowe opalane paliwem ciekłym lub gazowym. Zakres mocy od 415 kW do 16200 kW, a ciśnienia dopuszczalne od 6 barów do 16 barów. Charakterystyki sprawności nominalnej mają kształt płaski w szerokim przedziale obciążeń cieplnych (od 40% do 100%). Krzywe sprawności nominalnej poniżej obciążenia cieplnego 40% nie zostały zilustrowane. Sprawność nominalna kotłów parowych zawiera się w przedziale 88% – 92% w zależności od mocy cieplnej i ciśnienia pracy. W kolejnej pozycji [4] autor szeroko przedstawił straty występujące w procesie produkcji energii elektrycznej i ciepła. Przedstawiono szczegółowy bilans energetyczny elektrociepłowni. W bilansie uwzględniono straty energetyczne:

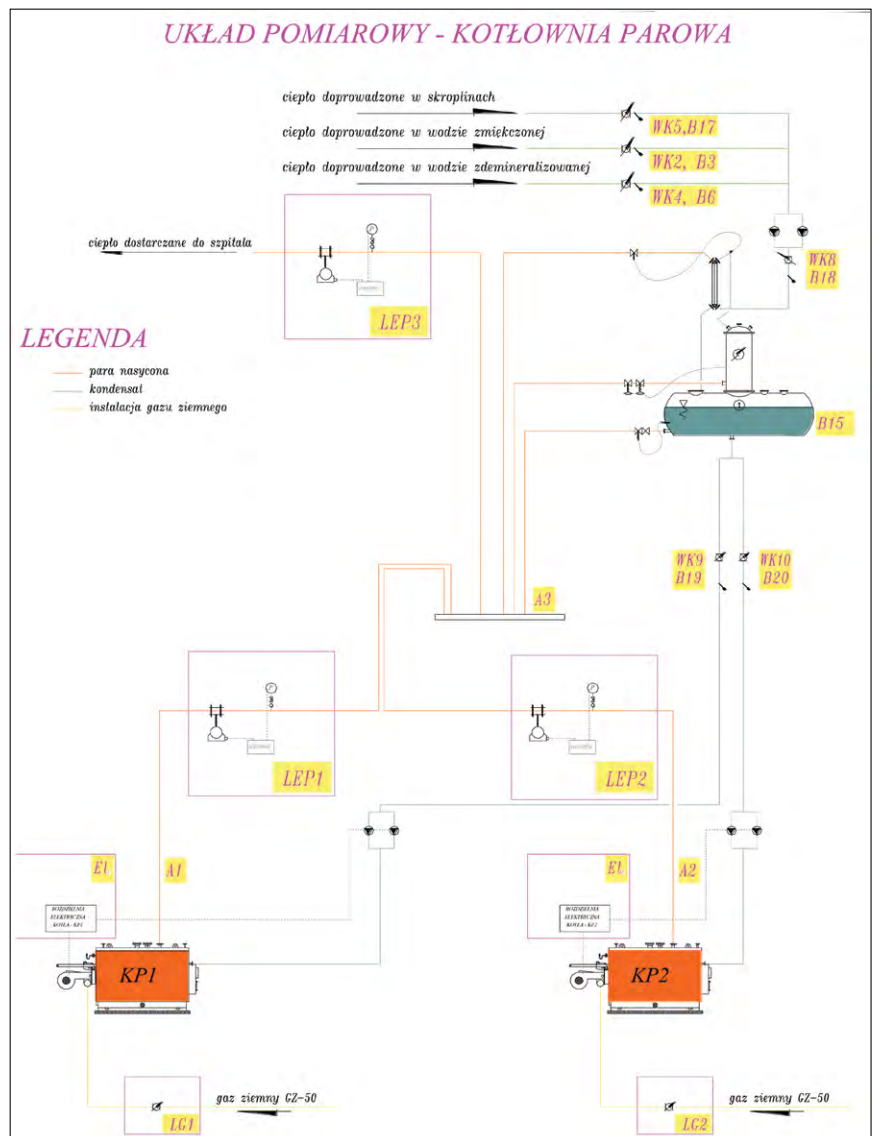
- kotłów parowych,
- instalacji technologicznej kotłowni parowej (rurociągi, armatura, odgazowywacz itd.),
- generatorów i turbozespołów.

Po uwzględnieniu wszystkich strat energetycznych sprawność elektrociepłowni wyniosła 70%. Przeglądając literaturę, publikacje i materiały techniczne można stwierdzić, że zagadnienia dotyczące sprawności eksploatacyjnej cieplnej kotłowni parowych w przedziale mocy 0,5-20 MW (zakres zagadnień ciepłowniczych) nie występują. Dopiero kiedy mamy do czynienia z energetyką zawodową, zwykle powyżej 50 MW (najczęściej źródła skojarzone), można spotkać publikacje ukazujące charakterystykę sprawności energetycznej całych układów. Wydaje się zatem celowe podjęcie badań w zakresie efektywności źródeł ciepła występujących w systemach ciepłowniczych i przemysłowych [5].

Opis badanego układu

Na rysunku 1 przedstawiony został schemat technologiczny badanej kotłowni parowej, która jest wyposażona w dwa kotły parowe wysokociśnieniowe firmy Viessmann typu TURBOMAT RN-HD o mocy $Q = 655$ kW i wydajności pary $G_{\text{pary}} = 1000$ kg/h i ciśnieniu dopuszczalnym $p_{\text{max}} = 16$ barów. Kotły te są kotłami trójciągowymi z obniżoną zawartością tlenków azotu w spalinach. Zostały one wyposażone w palniki produkcji Weishaupt.

Zastosowane kotły parowe wytwarzają parę nasyconą na potrzeby pralni, kuchni, komory dezynfekcyjnej, sterylizatorów oraz węzła c.w. Część wytworzonej



Rys. 1. Schemat technologiczny kotłowni parowej
 Fig. 1. Technological diagram of a steam boiler plant

para używana jest na potrzeby własne kotłowni w kolumnie odgazowywacza oraz podgrzewania zbiornika wody zasilającej kotły parowe.

Dane techniczne kotłów parowych Kocioł parowy Viessmann TURBOMAT RN – HD o mocy $Q = 655$ kW

- DANE PODSTAWOWE
- maksymalne ciśnienie robocze $p_{\text{max}} = 16$ barów,
 - gwarantowana moc cieplna $Q = 655$ kW,
 - wydajność pary $G_{\text{max}} = 1,0$ t/h,
 - gwarantowana sprawność $\eta_g = 90\%$,
 - spodziewana sprawność $\eta_s = 92 - 94\%$,
 - minimalne obciążenie $Q_{\text{min}} = 20\%$,
 - gwarantowana emisja NO_x – gaz < 35 g/GJ,
 - rodzaj paliwa gaz ziemny GZ-50.

Przygotowanie pary technologicznej na potrzeby szpitala prowadzone jest w dwóch kotłach parowych. Wytwarzana

para o ciśnieniu 11 barów poprzez istniejące rozdzielacze i reduktory zasila: kuchnię, pralnię oraz komorę dezynfekcyjną i sterylizatory. Część pary wykorzystana jest na potrzeby własne kotłowni – odgazowywanie wody i podgrzew zbiornika wody zasilającej.

W celu uzupełnienia ubytków skroplin (67%) wykonano układ uzupełniający z systemem uzdatniania wody. Woda uzupełniająca spełnia wymogi fizyko-chemiczne, które szczegółowo określa firma Viessmann dla swoich kotłów w materiałach, pt.: „Wymogi stawiane wodzie zasilającej i wodzie kotłowej” [3].

W celu spełnienia wymogów producenta kotłów zastosowano stację uzdatniania wody, do uzupełniania układu wodą zdeminiaralizowaną, a w razie potrzeby zmieszaną z wodą zmiękczoną.

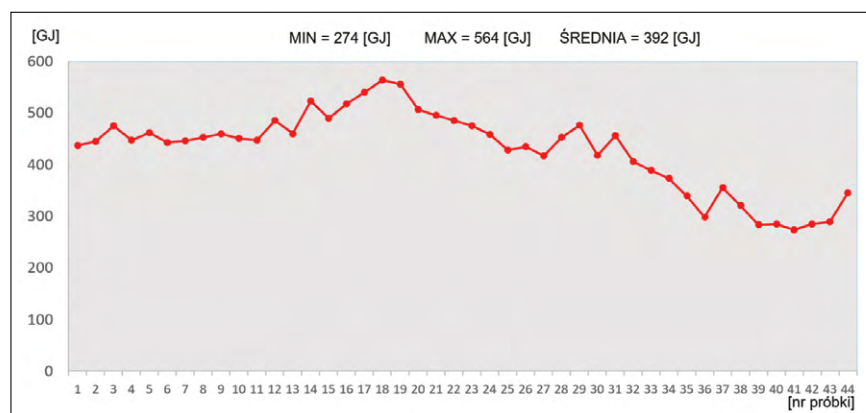
Kotły są wyposażone w palniki niskiemisyjne firmy Weishaupt. Kotły parowe

o mocy $Q = 0,655$ MW wyposażone są w palniki GL5/1-D-2D. Wszystkie palniki są produkowane seryjnie, co gwarantuje przy współpracy z kotłami trójciągowymi firmy Viessmann bardzo niską emisję zanieczyszczeń. W trakcie prowadzonych badań kotłownia była opalana gazem ziemnym GZ-50.

Sprawność eksploatacyjna ciepła kotłowni parowej

Badania sprawności eksploatacyjnej ciepłej kotłowni parowej były prowadzone przez okres 18 miesięcy, który został podzielony na 12-dniowe przedziały bilansowe. W ten sposób uzyskano 44 okresy bilansowe. Badania doświadczalne zostały przeprowadzone w pracującej kotłowni szpitala wojewódzkiego.

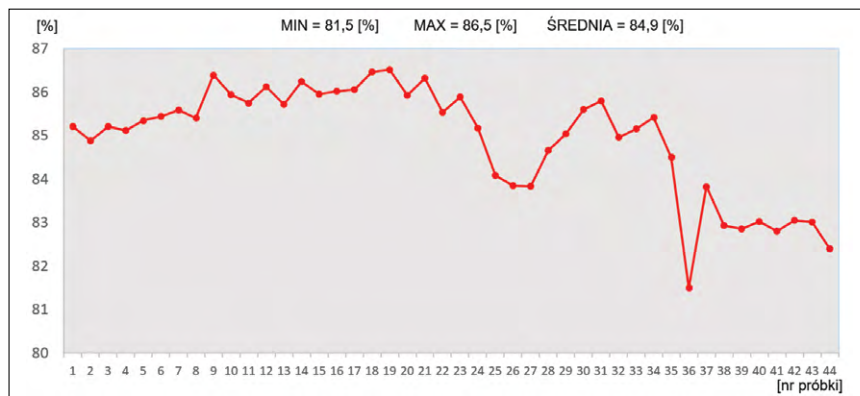
W trakcie przeprowadzonych badań doświadczalnych produkcja ciepła przez układ kotła parowego KP1 (kocioł wiodący zwany także podstawowym) w rozpatrywanym okresie wahała się od 274 GJ do 564 GJ, osiągając średnią wartość 392 GJ. Na rysunku 2 przedstawiono



Rys. 2. Ilość ciepła pary nasyconej wyprodukowanej przez kocioł parowy KP1 w 44 okresach bilansowych
Fig. 2. The amount of thermal energy of saturated steam produced by the KP1 steam boiler for 44 balance periods

wykres produkowanego ciepła przez kocioł parowy KP1 dla każdego z okresów bilansowych.

W kolejnym etapie testów zbadano zmienność sprawności eksploatacyjnej ciepłej układu kotła parowego KP1 w rozpatrywanych 44 okresach bilansowych. Sprawność eksploatacyjna ciepła układu kotła parowego KP1 (kocioł podstawowy) w tym okresie wahała się od wartości 81,5% do 86,5%, osiągając średnią wartość 84,9%. Kocioł KP1 w całym przedziale pracy osiągał zbliżone wartości sprawności eksploatacyjnej ciepłej. Sprawność eksploatacyjną ciepłą układu kotła parowego KP1 obrazuje rysunek 3.



Rys. 3. Sprawność eksploatacyjna ciepła kotła parowego KP1 w 44 okresach bilansowych
Fig. 3. Thermal operational efficiency of the KP1 steam boiler for 44 balance periods

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono sprawność eksploatacyjną ciepłą kotła parowego KP1 według wzoru:

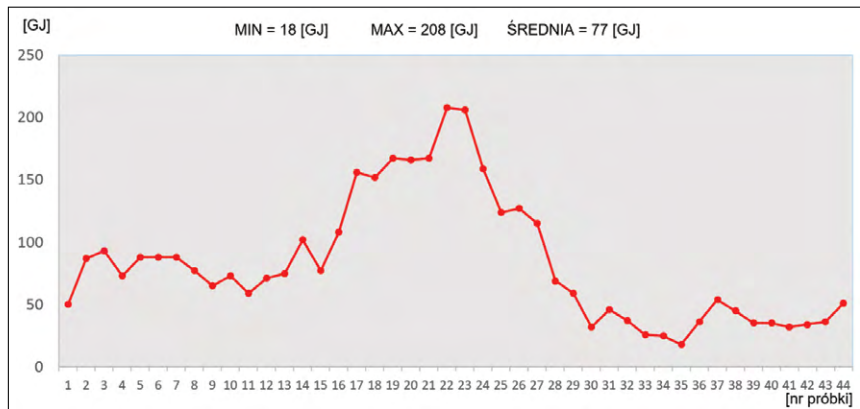
$$\eta_{KP1} = \frac{\int_0^T E_{KP1-par}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{KP1-wz}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{KP1-gaz}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:
 $E_{KP1-gaz}$ – entalpia chemiczna paliwa do-

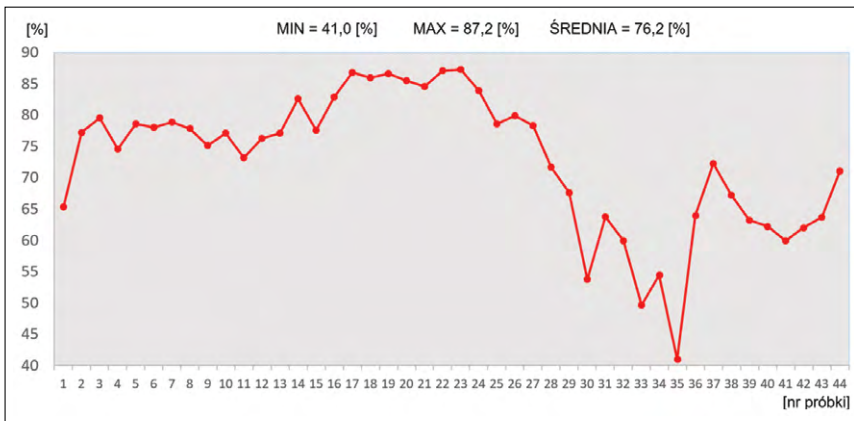
starzonego do kotła parowego KP1 [kW],
 $E_{KP1-par}$ – entalpia pary nasyconej wyprodukowanej przez kocioł parowy KP1 [kW],
 E_{KP1-wz} – entalpia wody zasilającej kocioł parowy KP1 [kW].

Produkcję ciepła przez kocioł parowy KP2 w rozpatrywanych okresach bilansowych przedstawiono na rysunku 4.

Produkcja ciepła przez układ kotła parowego KP2 (kocioł szczytowy zwany także dochodzącym) w rozpatrywanym okresie czasu wahała się od 18 GJ do 208 GJ, osiągając średnią wartość 77 GJ. W kolejnym etapie zbadano sprawność eksploatacyjną ciepłą kotła parowego KP2 w funkcji czasu. Sprawność eksploatacyjna ciepła układu kotła parowego KP2 (kocioł szczytowy) w rozpatrywanym okresie wahała się od 41,0% do 87,2%, osiągając średnią wartość 76,2%. Kocioł KP2 w całym przedziale pracy osiągał znacznie bardziej zróżnicowane wartości sprawności eksploatacyjnej ciepłej niż kocioł KP1. Sprawność eksploatacyjną ciepłą układu kotła parowego KP2 obrazuje rysunek 5.



Rys. 4. Ilość ciepła pary nasyconej wyprodukowanej przez kocioł parowy KP2 w 44 okresach bilansowych
Fig. 4. The amount of thermal energy of saturated steam produced by the KP2 steam boiler for 44 balance periods



Rys. 5.
Sprawność eksploatacyjna ciepła kotła parowego KP2 w 44 okresach bilansowych
Fig. 5. Thermal operational efficiency of the KP2 steam boiler for 44 balance periods

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono sprawność eksploatacyjną ciepłą kotła parowego KP2 według wzoru:

$$\eta_{KP2} = \frac{\int_0^T E_{KP2-par}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{KP2-wz}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{KP2-gaz}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (2)$$

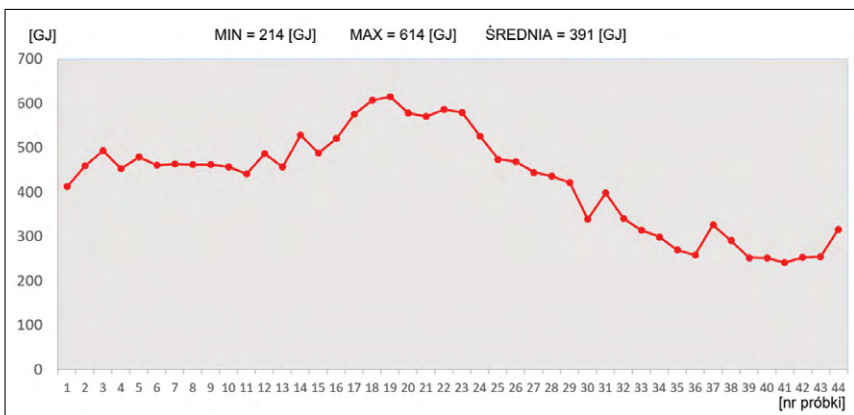
gdzie:

$E_{KP2-gaz}$ – entalpia chemiczna paliwa dostarczonego do kotła parowego KP2 [kW],

$E_{KP2-par}$ – entalpia pary nasyconej wyprodukowanej przez kocioł parowy KP2 [kW],

E_{KP2-wz} – entalpia wody zasilającej kocioł parowy KP2 [kW].

Ilość ciepła przesłanego przez instalację technologiczną na potrzeby szpitala w rozpatrywanym okresie przedstawiono na rysunku 6. Ilość ciepła przesłana na potrzeby szpitala w postaci pary nasyconej wahała się od 241 GJ do 614 GJ, osiągając średnią wartość 391 GJ.



Rys. 6.
Ilość ciepła pary nasyconej przesłanej przez instalację technologiczną na potrzeby szpitala w 44 okresach bilansowych
Fig. 6. The amount of thermal energy of saturated steam sent by the technological installation for the needs of the hospital for 44 balance periods

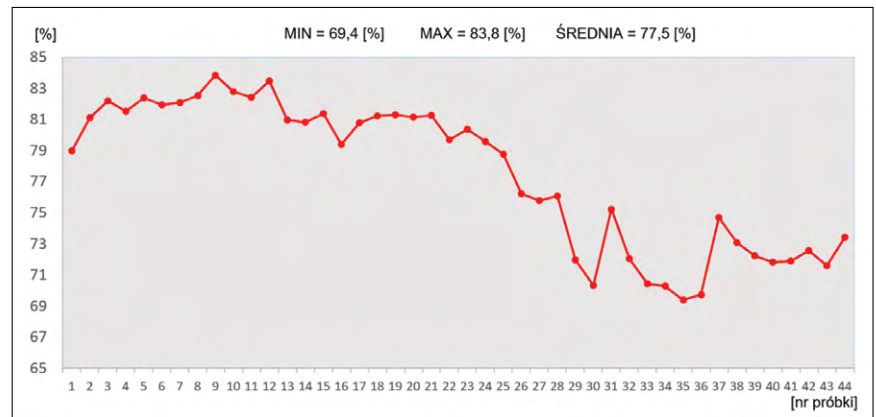
Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono sprawność eksploatacyjną ciepłą całej kotłowni parowej według wzoru:

$$\eta_{kot} = \frac{\int_0^T E_{par-tech}(\tau) d\tau - \int_0^T E_{odg-wz}(\tau) d\tau}{\int_0^T E_{KP1-gaz}(\tau) d\tau + \int_0^T E_{KP2-gaz}(\tau) d\tau} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

$E_{KP1-gaz}$ – entalpia chemiczna paliwa dostarczonego do kotła parowego KP1 [kW],

$E_{KP2-gaz}$ – entalpia chemiczna paliwa dostarczonego do kotła parowego KP2 [kW],



Rys. 7.
Sprawność eksploatacyjna ciepła całej kotłowni parowej dla 44 okresów bilansowych
Fig. 7. Thermal operational efficiency of the entire steam boiler house for 44 balance periods

W kolejnym etapie zbadano zmienność sprawności eksploatacyjnej ciepłej całej kotłowni parowej w funkcji czasu. Sprawność eksploatacyjna ciepła kotłowni parowej w okresie badawczym wahała się od 69,4% do 83,8% osiągając średnią wartość 77,5%. Wykres wartości sprawności eksploatacyjnej ciepłej w czasie pokazano na rysunku 7.

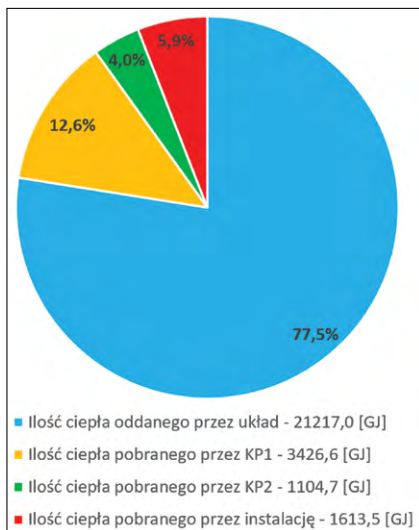
E_{odg-wz} – entalpia wody zasilającej zbiornik odgazowywacza [kW],

$E_{par-tech}$ – entalpia pary nasyconej przesłanej do instalacji technologicznej [kW].

Bilans ciepła kotłowni parowej

Badania doświadczalne kotłowni parowej w szpitalu wojewódzkim były prowadzone przez okres 18 miesięcy. W trakcie prowadzonych badań całkowita ilość ciepła dostarczonego do kotłowni po stronie spalinywej (pierwotnej) w tym okresie wynosiła 27361,8 GJ.

Łączna ilość ciepła wyprodukowanego przez kotły parowe wyniosła 22830,5 GJ, z czego kocioł parowy KP1 wyprodukował 19287 GJ, a kocioł parowy KP2 3543,5 GJ. Para nasycona wytworzona przez jednostki grzewcze pokryła potrzeby szpitala oraz potrzeby własne kotłowni. Ilość ciepła dostarczonego na potrzeby szpitala w okresie badawczym wyniosła 21217 GJ, a na potrzeby własne kotłowni 6144,8 GJ, co stanowiło 22,5% łącznej produkcji ciepła całej kotłowni parowej. W okresie badawczym uzyskano średnią



Rys. 8. Bilans cieplny całej kotłowni parowej w 44 okresach bilansowych.
Fig. 8. Heat balance of the steam boiler house for 44 balance periods

sprawność eksploatacyjną cieplną kotłowni parowej na poziomie 77,5%, układu kotła parowego KP1 (kocioł wiodący) 84,9%, układu kotła parowego KP2 (kocioł szczytowy) 76,2%. Bilans cieplny całej kotłowni parowej przedstawiono w formie graficznej na rysunku 8. W trakcie całego okresu prowadzonych badań zwrot skroplin z instalacji technologicznej szpitala wyniósł 31,3%. Oznacza to, że udział procentowy wody uzupełniającej w kotłowni parowej wyniósł 68,7%.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych kotłowni parowej przedstawiono wyniki badań sprawności eksploatacyjnej cieplnej kotłów i całej kotłowni. Badania prowadzono przez okres 18 miesięcy w kotłowni parowej szpitala wojewódzkiego. W trakcie prowadzonych badań doświadczalnych dla kotła parowego KP1 sprawność eksploatacyjna cieplna kotła KP1 wahała się od wartości 81,5% do 86,5%, osiągając średnią wartość 84,9%. Uwzględniając wyniki badań sprawności eksploatacyjnej cieplnej kotła KP2 w rozpatrywanym okresie wahała się ona od 41,0% do 87,2%, osiągając średnią wartość 76,2%. Kocioł KP1 pracował jako podstawowy, a kocioł KP2 pracował jako szczytowy. Wyniki badań otrzymane na rzeczywistych kotłach parowych zainstalowanych w obiekcie porównano z obliczeniami według PN-EN 12953-11 [6]. Badania dowiodły, że rzeczywista sprawność eksploatacyjna cieplna jest niższa niż wyznaczona według normy [6]. Dla całej kotłowni parowej rzeczywista sprawność eksploatacyjna cieplna w okresie badawczym wahała się od 69,4% do 83,8% osiągając średnią wartość 77,5%. Przedstawione wyniki badań doświadczalnych można wykorzystać na etapie projektowania i eksploatacji, uwzględniając rzeczywiste warunki pracy.

Na etapie projektowania zasadniczą sprawą jest właściwy dobór kotła parowego i parametrów instalacji do potrzeb cieplnych danego odbiorcy. Jednostka parowa nie powinna być przewymiarowana. Nadmiar mocy cieplnej oznacza jej częstą pracę w zakresie niskich obciążeń cieplnych (poniżej 40%), a w konsekwencji niską sprawność eksploatacyjną cieplną i duże ilości zużytego paliwa.

LITERATURA

- [1] Budny J., Groman A.: *Gospodarka energetyczna zakładu mleczarskiego*. Warszawa 1974, Zakład Wydawnictw CRS.
- [2] Popiołkiewicz R.: *Ekonomiczno-ekologiczne aspekty zastosowania ścian szczelnych w kotłach typu WR-25*. COW, wrzesień 1999
- [3] Vitomax 200 HS. *Dane techniczne kotłów parowych*. Materiały techniczne firmy Viessmann.
- [4] Buczek K.: *Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w małych elektrociepłowniach*. Krosno 2001, Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”.
- [5] Bujak, J. (2007): *The influence of heat losses arising during combustion chamber ventilation on the coefficient of thermal performance rate of a steam boiler*. Instal. 10:6-9. (in Polish).
- [6] PN-EN 12953-11. (2006). *Shell boilers – Part 11 : Acceptance tests*.

Racjonalizacja zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym

Autorzy: Tomasz Cholewa, Alicja Siuta-Olcha
 Warszawa 2016

Wydawca: Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”



Ocena efektywności energetycznej oraz kosztów z tytułu ogrzewania i przygotowania c.w.u. w systemach grzewczych stosowanych w budynkach wielorodzinnych to tytuł rozdziału w książce dr inż. Tomasza Cholewy i dr inż. Alicji Siuta – Olcha pt. "Racjonalizacja zużycia energii w budow-

nictwie mieszkaniowym". Rozdział ten zawiera też przykład analizy techniczno – ekonomicznej trzech rodzajów systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody, które obecnie najczęściej występują w budynkach wielorodzinnych. **Przedstawiony materiał jest pomocny do określenia efektywności energetycznej budynku.**

Cała książka ukazuje praktyczne możliwości zmniejszania zużycia energii w budynkach mieszkalnych poprzez modernizację systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody oraz poprzez edukację mieszkańców w tym zakresie. W pracy przedstawiono szereg wyników długoterminowych badań eksploatacyjnych, umożliwiających określenie i sprawdzenie wpływu różnych przedsięwzięć modernizacyjnych na zużycie energii, szczególnie w istniejących budynkach wielorodzinnych.

Do każdego rozpatrywanego przypadku starano się wybrać reprezentatywną grupę budynków, aby zakres przeprowadzonych prac modernizacyjnych pozwolił, w możliwie jednoznaczny sposób, pokazać wpływ danego działania modernizacyjnego na zużycie ciepła w danej grupie budynków, a nie był tylko przypadkowym wynikiem otrzymanym dla pojedynczego obiektu. Każdy przykład poprzedzony jest krótkim wstępem teoretycznym, który w przystępny sposób wprowadza Czytelnika w zakres tematyczny danego zagadnienia, jak również przedstawia wyniki badań oraz osiągnięcia innych Autorów, odnoszące się do racjonalizacji zużycia energii w sektorze mieszkaniowym.

Z tego też względu publikacja przydatna może być projektantom i wykonawcom systemów grzewczych oraz administratorom budynków.

Książka została wydana w twardej oprawie w formacie B5, objętość 214 stron. Cena 1 egz. 64 zł + 5% VAT.

Zamówienia przyjmuje: Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”

02-674 Warszawa, ul. Marynarska 14; tel./fax (22) 843 77 71

e-mail: wydawnictwo@informacjainstal.com.pl, redakcja@informacjainstal.com.pl