

Możliwość wykorzystania ciepła odpadowego w przemyśle mineralnym

SŁOWA KLUCZOWE

ciepło odpadowe, układy ORC, przemysł cementowy, przemysł szklarski

KEY WORDS

waste heat, ORC systems, cement industry, glass industry

dr inż. Ewa Głodek-Bucyk

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono możliwość zwiększenia efektywności energetycznej w przemyśle poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego. Obecnie istnieje znaczny potencjał wykorzystania ciepła odpadowego w przemyśle, które nie jest w pełni wykorzystywane. Ciepło to nie jest wykorzystywane ze względu na bariery techniczne, ekonomiczne oraz lokalizacyjne. Do konwersji ciepła odpadowego do innych użytecznych form energii wykorzystuje się technologie aktywne i pasywne. Dobór odpowiedniej technologii zależy w dużej mierze od temperatury czynnika. W przypadku branży cementowej i szklarskiej do dyspozycji jest ciepło średnio lub wysokotemperaturowe, które można wykorzystać do wytworzenia energii elektrycznej.

SUMMARY

The article presents possibility of increasing energy efficiency in mineral industry through the use of waste heat. Nowadays there is a significant amount of waste heat that is not fully exploited. It is related to technical, economic and location barriers. Passive and active technologies are used to convert waste heat to other useful forms of energy. The selection of appropriate technology depends heavily on the temperature of the medium. In the cement and glass industries there is medium and high temperature waste heat that can be used to produce electricity.

WPROWADZENIE

Jednym ze strategicznych celów polityki energetycznej i ekologicznej Unii Europejskiej jest poprawa efektywności energetycznej we wszystkich sektorach gospodarki. Efektywność energetyczna wiąże się z obszarem wykorzystywania i użytkowania energii i jest szczególnie ważna w procesie zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii, ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych oraz wzrostu konkurencyjności przedsiębiorstw. W 2007 r. przywódcy UE wyznaczyli cel dotyczący zmniejszenia rocznego zużycia energii przez Unię o 20% do 2020 r. W 2018 r. w pakiecie „Czysta energia dla wszystkich Europejczyków” wyznaczono nowy cel zmniejszenia zużycia energii o co najmniej 32,5% do 2030 r.

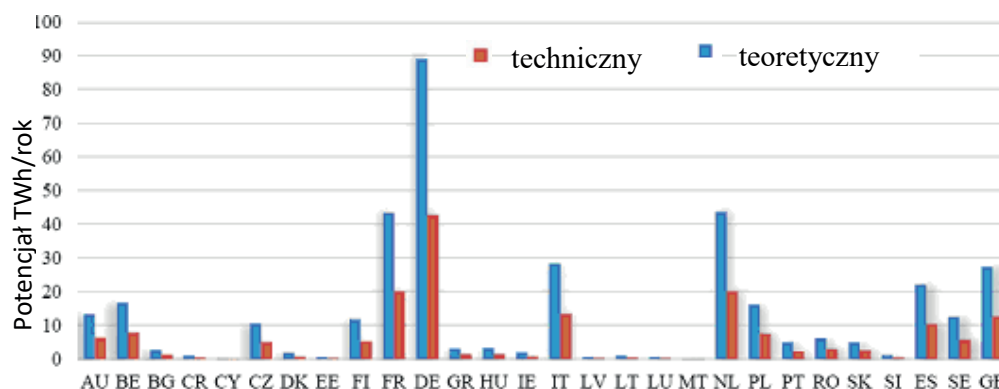
Jednym z elementów poprawy efektywności energetycznej jest wykorzystanie ciepła odpadowego powstającego w przemyśle. Z ekologicznego punktu widzenia energia użytkowa z ciepła odpadowego jest neutralna pod względem emisji CO₂, gdyż do jej uzyskania nie są potrzebne dodatkowe nośniki energii pierwotnej. Dodatkowo uzyskana energia użytkowa zastępuje energię, którą należałoby wytworzyć wykorzystując inne nośniki energii pierwotnej co skutkuje oszczędnością paliw i daje pozytywny efekt ekologiczny (zmniejsza emisję szkodliwych substancji odprowadzanych do otoczenia)

oraz ekonomiczny (oszczędności przy zakupie paliwa i energii elektrycznej).

Energia odpadowa definiowana jest jako energia beżużytecznie odprowadzana do otoczenia, mimo tego, że dzięki wysokiej jakości (egzergii) nadaje się do dalszego wykorzystania w sposób ekonomicznie opłacalny. Temperatura, w której dostępne jest ciepło odpadowe, zmienia się w bardzo szerokim zakresie, od około 50 °C do nawet 1000 °C i więcej. Zakresy temperatur ciepła odpadowego można podzielić na trzy kategorie:

- niskotemperaturowe (LT) <150°C,
- średniotemperaturowe (MT) 150-500°C,
- wysokotemperaturowe (HT) >500°C.

W przemyśle europejskim istnieje znaczący potencjał wykorzystania ciepła odpadowego, który wynosi 370,41 TWh/rok (potencjał teoretyczny) i 173,99 TWh/rok (potencjał techniczny) [1] (rys.1). Największe



Rys.1. Potencjał teoretyczny i techniczny ciepła odpadowego w UE. [1]

możliwości wykorzystania ciepła odpadowego występują w przemyśle żelaza i stali (27%), petrochemicznym (22%) oraz mineralnym (17%) [1].

Mimo dużego potencjału, przemysłowe ciepło odpadowe nie jest obecnie w pełni wykorzystywane. Ekonomicznie opłacalne technologie odzyskiwania ciepła odpadowego ograniczały się dotąd głównie do źródeł ciepła o średniej lub wysokiej temperaturze. Wynikało to wynikać z jednej strony z przyczyn technicznych i ekonomicznych w stosowaniu konwencjonalnych metod odzysku ciepła, a z drugiej strony z czasowych lub geograficznych niedopasowań między uwolnioną energią, a jej zapotrzebowaniem na ciepło. (Wykorzystane ciepło nie może być transportowane na duże odległości. Zagospodarowania ciepła odpadowego powinno odbywać się jak najbliżej źródła jego generacji, najlepiej. na terenie zakładu).

Przewiduje się, że wielkość światowego rynku odzysku ciepła odpadowego może osiągnąć 65,87 mld USD do 2021 r. [2]. Szacuje się także, iż szybko rozwijający się sektor budowlany, związany z rosnącym popytem na cement, żelazo i stal będzie napędzał rynek, a w szczególności w zakresie aplikacji związanych z produkcją energii elektrycznej.

TECHNOLOGIE ZAGOSPODAROWANIA CIEPŁA ODPADOWEGO

Technologie odzysku ciepła można sklasyfikować jako pasywne lub aktywne [4]. Pasywny odzysk ciepła wykorzystuje wymienniki ciepła różnych typów (regeneracyjne, ekonomizery, podgrzewacze powietrza, rurki ciepła, parowniki itp.) do przenoszenia ciepła ze źródła o wyższej temperaturze do źródła o niższej temperaturze. Technologie pasywnego odzysku ciepła, w przeciwieństwie do aktywnych, nie wymagają zastosowania urządzeń mechanicznych, ani elektrycznych, z wyjątkiem wyposażenia pomocniczego, takiego jak pompy czy wentylatory. Technologie aktywne obejmują przemysłowe pompy ciepła, absorpcyjne i adsorpcyjne urządzenia chłodnicze oraz systemy skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej.

Przy konwersji ciepła odpadowego do energii elektrycznej można zastosować: klasyczny obieg parowy Clausiusa-Rankina (CR), organiczny obieg Rankine'a (ORC) lub obieg Kaliny. Układy ORC działają w oparciu o ten sam obieg, co konwencjonalne obiegi parowe, z tą różnicą, że jako czynniki robocze wykorzystują czynniki organiczne lub ich mieszaniny. Układ ORC jest przeważnie układem dwuobiegowym. Pierwszy obieg to tzw. obieg pośredni, w którym krąży pośred-

niczący czynnik roboczy odbierający ciepło bezpośrednio ze źródła, np. olej termiczny, natomiast drugi, zasadniczy obieg, jest realizowany przez czynnik roboczy odbierający ciepło od czynnika pośredniczącego, np. węglowodory czy syntetyczne czynniki chłodnicze. Układ dwuobiegowy stosuje się ze względu na bezpieczeństwo pracy instalacji ORC, gdyż wykorzystywane czynniki robocze stwarzają zagrożenie wybuchowo-pożarowe lub są niebezpieczne dla środowiska. W przypadku odparowania czynnika w obiegu pośredniczącym następuje drastyczny spadek efektywności odbioru ciepła, mogący skutkować uszkodzeniem instalacji. Pary czynników roboczych mają znacznie niższy współczynnik przejmowania ciepła, niż czynniki w postaci ciekłej, dlatego ważne jest utrzymanie odpowiednio wysokiego ciśnienia w obiegu pośrednim, powyżej ciśnienia nasycenia. Układy ORC mogą również pracować w oparciu o bezpośrednią wymianę ciepła pomiędzy źródłem a czynnikiem roboczym, eliminując konieczność stosowania obiegu pośredniczącego. Skutkuje to zmniejszeniem kosztów związanych z instalacją i eksploatacją instalacji ORC.

Dostawcy technologii ORC zapewniają rozwiązania o szerokim zakresie temperatur i mocy. Przykładowo, firma Enogia oferuje jednostkę o najmniejszej mocy – 10 kW_{el}, natomiast firma Turboden o najwyższej – ponad 10 MW_e [8]. Oferowane jednostki różnią się także temperaturą zasilania, sposobem chłodzenia skraplacza (ciecz, powietrze), czynnikiem roboczym czy urządzeniem rozprężającym (turbina, rozprężarka śrubowa).

Liderem na rynku europejskim jest firma Turboden. Innymi producentami dostarczającymi układy ORC są firmy: ABB, Ormat, Adoratec, Electrathem, Enertime, Enogia, Exergy, General Electric, GMK, Kaishan, Triogen, UTC Power [8].

Przykładowe instalacje ORC do produkcji energii elektrycznej z ciepła odpadowego działające w przemyśle cementowym i szklarskim, zamieszczono w tabeli 1.

WYKORZYSTANIE CIEPŁA ODPADOWEGO W PRZEMYSŁE MINERALNYM

Przemysł szklarski i cementowy należą do branż energochłonnych, co oznacza duże zapotrzebowanie na energię do przeprowadzenia określonego procesu technologicznego. Zużycie ciepła w sektorze szklarskim wynosi ok. 8 GJ na tonę wyprodukowanego szkła. Dla

Tab. 1. Instalacje ORC do produkcji energii elektrycznej z ciepła odpadowego wykonane przez firmę Turboden. [9]

Moc zainstalowana	Lokalizacja	Inwestor	Stan
Przemysł cementowy			
2 MW _{el}	Ait Baha, Maroko	Ciments du Maroc (Grupa Heidelberg)	Pracuje od 2010 r.
4 MW _{el}	Aleșd, Rumunia	Holcim SA	Pracuje od 2012 r.
5 MW _{el}	Rohožník, Słowacja	CRH	Pracuje od 2014 r.
3,8 MW _{el}	Fieni, Rumunia	S.C. Carpatcement Holding S.A. (Grupa Heidelberg)	Pracuje od 2015 r.
2,3 MW _{el}	Möriken-Wildegg, Szwajcaria	Jura-Cement-Fabriken AG (Grupa CRH)	Pracuje od 2016 r.
2 MW _{el}	Piacenza, Włochy	Industria Cementi Giovanni Rossi	Pracuje od 2019 r.
6,4 MW _{el}	Kahramanmara, Turcja	Cimco Narli Cement	Pracuje od 2019 r.
1,3 MW _{el}	Eclépens, Szwajcaria	Cadcime SA / Holcim Suisse Eclépens (Grupa Lafarge Holcim)	W budowie
7,3 MW _{el}	Adana Yumurtalık, Turcja	Sönmez Çimento	W budowie
Przemysł szklarski			
6,2 MW _{el}	DÜZCE, TURcja	DÜZCE CAM	Pracuje od 2018 r.
1,3 MW _{el}	CUNEO, ITALY	AGC GLASS EUROPE	Pracuje od 2012 r.
1,2 MW _{el}	India Pvt.Ltd. - Chennai	Saint-Gobain	Pracuje od 2019 r.
960kW _{el}	Pisa	Saint-Gobain	Pracuje od 2019 r.

przemysłu szkła opakowaniowego średnie zużycie ciepła to 6,4 GJ/tonę. W przypadku szkła płaskiego jest wyższe o około 40% [6]. Natomiast zużycie ciepła w przemyśle cementowym wynosi 3,7 GJ na tonę klinkieru [7]. Z procesem przemysłowym związana jest zawsze strata energii do otoczenia. Jest to energia związana z produktami odpadowymi, spalinami lub ze stratami ciepła z urządzeń do otoczenia. Zarówno w przemyśle cementowym jak i szklarskim powstają duże ilości ciepła odpadowego.

W przemyśle cementowym głównymi źródłami ciepła odpadowego są gazy odlotowe z pieca obrotowego do wypalania klinkieru (280°C < T_g < 400°C metoda sucha) oraz powietrze nadmiarowe z chłodnika (250°C < T_g < 330°C). Straty z gazami odlotowymi z wieży wymiennika oraz z powietrzem nadmiarowym z chłodnika stanowią około 30%. Obecnie w cementowniach entalpia gazów odlotowych z instalacji wypalania klinkieru wykorzystywana jest głównie na zaspokojenie własnych potrzeb związanych z suszeniem surowca, paliw i dodatków do cementu [3]. Poziom wykorzystania entalpii gazów odlotowych (z pieca obrotowego i chłodnika) w cementowniach średnio wynosi 55% [3].

W przemyśle szklarskim całkowita sprawność termiczna nowoczesnego pieca regeneracyjnego do produkcji szkła opakowaniowego wynosi około 50%, przy stratach gazów odlotowych wynoszących ok. 25-35% (ok. 14 – 20%, kiedy stosowane jest wstępne podgrzewanie zestawu i stłuczki) [5]. W piecu regeneracyjnym temperatura gazów wynosi 1300-1400°C, natomiast w przypadku pieców rekuperacyjnych maksymalnie 750 – 800 °C. Sprawność termiczna pieca rekuperacyjnego, bez dodatkowego odzysku ciepła, wynosi 20 – 30%. Typowa temperatura gazów odlotowych z regeneracyjnych pieców szklarskich kształtuje się na poziomie 400-500°C. W przypadku pieców rekuperacyjnych może osiągnąć 700°C i więcej.

W przemyśle szklarskim i cementowym występuje ciepło odpadowe średnio lub wysokotemperaturowe, istnieje więc możliwość konwersji entalpii gazów odlotowych do energii elektrycznej bazującej na układzie ORC. Moc układu ORC można w sposób uproszczony określić przy pomocy poniższego wzoru.

$$N \text{ [kW]} = A \times W \times c_p \times (T_g - T_k) \times \eta_{\text{ORC}} / 3600$$

A - współczynnik określający ilość gazów odlotowych [m³_n/kg_{prod}]

W - wydajność instalacji [t_{prod}/h]

c_p - ciepło właściwe gazów [kJ/m³_nK]

T_g - temperatura gazów odlotowych na wejściu do układu ORC [°C]

T_k - temperatura gazów odlotowych na wyjściu z układu ORC [°C]

Tab. 2. Oszacowanie mocy układu ORC

Wyszczególnienie	Przemysł cementowy	Przemysł szklarski
Wydajność instalacji [t/dobę]	4200	400
Gazy odlotowe:		
A [m³_n/kg_{prod}]	1,52	1,3
T_g [°C]	400	700
c_p [kJ/m³_ndeg]	1,5	1,5
A [m³_n/kg_{prod}]	1,1	-
T_g [°C]	280	-
Układ ORC – moc [MW_{el}]	2,7	1,3

W przemyśle cementowym moc elektryczna turbozespołów uzależniona jest od wielkości i dostępności źródła energii i zależy przede wszystkim od wydajności pieca, wilgotności surowców, paliw oraz konfiguracji układu. Przykładowo, dla wydajności układu wypalania klinkieru wynoszącej 4200 t/dobę ilość ciepła z gazami odlotowymi z wieży wymiennika i chłodnika wynosi ok. 230 GJ/h. Przy założeniu, iż 80% ciepła z gazów za wieżą wymiennika i 40% ciepła powietrza nadmiarowego z chłodnika, zostanie zagospodarowane na potrzeby technologiczne, to ilość ciepła odpadowego wynosi ok. 66 GJ/h. Przy dostępności ciepła odpadowego na w.w poziomie można skonstruować układ wypalania klinkieru z układem ORC o mocy ok. 2,7 MW_{el} (tabela 2).

W przemyśle szklarskim tak jak i w branży cementowej moc elektryczna turbozespołów związana jest przede wszystkim z wydajnością pieca i konfiguracją układu. Przykładowo, dla pieców rekuperacyjnych o wydajności 400 ton/dobę i temperaturze gazów odlotowych 700°C oszacowana moc układu ORC wyniesie 1,3 MW_{el} (tabela 2).

WNIOSKI

Przemysły szklarski i cementowy należą do branż wysoko energochłonnych, w których istnieje duży potencjał odzyskiwania ciepła odpadowego. W obecnej chwili nie jest on w pełni wykorzystany, związane jest to przede wszystkim z barierą ekonomiczną. W przypadku branży cementowej i szklarskiej występuje ciepło odpadowe średnio lub wysokotemperaturowe, które można wykorzystać do wytworzenia energii elektrycznej. Od kilku lat obserwuje się wzrost liczby instalacji do konwersji ciepła odpadowego do energii elektrycznej (układy ORC). Moc elektryczna turbozespołów uzależniona jest od wielkości i dostępności źródła energii i zależy przede wszystkim od wydajności pieca, zapotrzebowania ciepła na potrzeby technologiczne oraz konfiguracji układu.

LITERATURA

- [1] Gregoris P.Panayiotou, Giuseppe Bianchi, Giorgos Georgiou, Lazaros Aresti., Maria Argyrou, Rafaela Agathokleous, Konstantinos M.Tsamos, Savvas A.Tassou, Georgios Florides, Soteris Kalogirou, Paul Christodoulides: Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries Energy Procedia Volume 123, September 2017, Pages 335-345
- [2] Waste Heat Recovery System Market by Application (Preheating and Steam & Electricity Generation), End-Use Industry (Petroleum Refining, Metal Production, Cement, Chemical, Paper & Pulp, and Textile) - Global Trends & Forecasts to 2021 <https://www.researchandmarkets.com/reports/3927165/waste-heat-recovery-system-market-by-application>
- [3] Głodek-Bucyk E., Śląderek F., Kalinowski W.: Możliwości wykorzystania układów ORC w przemyśle cementowym, Prace ICiMB 2016 nr 27 str. 26-34
- [4] Laia Miró, Jaume Gasia, Luisa F. Cabeza: Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review Applied Energy 179 (2016), 284-301
- [5] BREF przemysł szklarski
- [6] Christina-Stavrula Hatzilau, Sotirios Karellas, Ioannis Dolianitis, Dionysios Giannakopoulos, Georgios Skarpetis, Theodoros Zitounis Energy saving incentives for the European glass industry in the frame of the EU Emissions Trading Scheme
- [7] 2020 Przemysł cementowy w liczbach, Biuletyn SPC <https://www.polskicement.pl/2020-informator-spc-przemysl-cementowy-w-liczbach/>
- [8] Kajurek, J., Rusowicz, A. Zastosowanie organicznego obiegu Rankine'a (ORC) zasilanego niskotemperaturowymi źródłami ciepła do produkcji energii elektrycznej, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna 2017 | T. 22, nr 3 | 159-173
- [9] www.turboden.com