

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 27**  
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok IX**

**Warszawa–Opole 2016**

---

*EWA GŁODEK-BUCYK\**  
*FRANCISZEK SŁADECZEK\*\**  
*WOJCIECH KALINOWSKI\*\*\**

## Możliwości wykorzystania układów ORC w przemyśle cementowym

**Słowa kluczowe:** przemysł cementowy, ciepło odpadowe, ORC.

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania ciepła odpadowego do produkcji energii elektrycznej z układów wypalania klinkieru zlokalizowanych w Polsce. Ilość dostępnego ciepła odpadowego uzależniona jest od zapotrzebowania ciepła w procesach suszenia surowców i paliw. Poziom wykorzystania entalpii gazów odlotowych w cementowniach waha się w granicach od 63 do 100%, natomiast dla powietrza nadmiarowego wynosi od 0 do 100%. Dla analizowanych instalacji wypalania klinkieru łączna moc turbozespołów wyniesie ok. 27,5 MWel, natomiast roczna produkcja energii elektrycznej wynosi potencjalnie 177 GWh.

### 1. Wprowadzenie

Dbłość o środowisko naturalne, ciągły wzrost cen energii i paliw oraz wymagane ograniczenia w emisji dwutlenku węgla do atmosfery skłaniają do stosowania energooszczędnych technologii, zwiększania efektywności energetycznej procesów produkcji w przemyśle oraz odzyskiwania energii odpadowej. Przemysł cementowy jest branżą energochłonną, dlatego też dążenie do optymalnego wykorzystania pobranej i wytworzonej w procesach technologicznych energii jest jak najbardziej uzasadnione. W przemyśle cementowym powstają duże ilości ciepła odpadowego [1], którego głównymi źródłami są: gazy odlotowe z układu wypalania oraz powietrze nadmiarowe z chłodnika. Temperatura gazów odlotowych z wieży wymienników uzależniona jest od ilości stopni cyklonów i rodzaju spala-

---

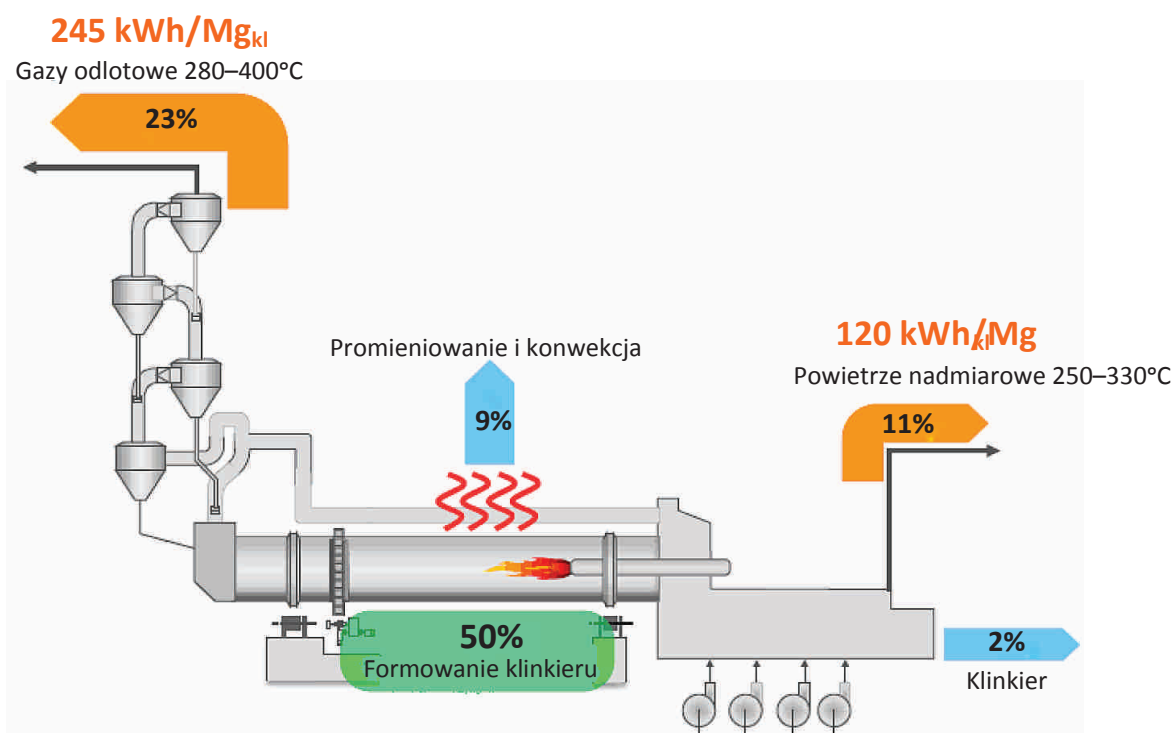
\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, e.glodek@icimb.pl

\*\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, f.sladeczek@icimb.pl

\*\*\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, w.kalinowski@icimb.pl

nych paliw. Dla metody suchej NSP (*suspension preheater dry process*) wynosi od 280 do 400°C. Natomiast temperatura powietrza nadmiarowego z chłodnika kształtuje się w zakresie 250–330°C. Typowe wartości strumieni ciepłych przedstawiono na rycinie 1.

Entalpia gazów odlotowych z procesu wypalania klinkieru wykorzystywana jest na potrzeby własne instalacji, tj. w procesie suszenia i/lub przemiału surowców, paliw oraz komponentów cementu. Teoretycznie ok. 2,26 GJ jest potrzebne do odparowania 1 tony wody z surowca. W praktyce młyny wymagają jednak ok. 4,0–5,5 GJ/Mg<sub>wody</sub> w zależności od rodzaju młyna, wydajności oraz wilgotności nadawy.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Wykorzystanie ciepła w układzie wypalania klinkieru

Często jednak ze względu na wysoki poziom energetyczny gazów odlotowych i niską wilgotność surowców występuje nadmiar ciepła, który można w sposób efektywny wykorzystać do produkcji energii elektrycznej. Potencjał produkcji energii elektrycznej z gazów technologicznych instalacji wypalania klinkieru uzależniony jest od dostępnego strumienia ciepła odpadowego i może wynosić 25–45 kWh/Mg<sub>kl</sub> [2].

Przy konwersji ciepła odpadowego do energii elektrycznej można zastosować:

- klasyczny obieg parowy Clausiusa-Rankine'a – (CR),
- organiczny obieg Rankine'a – (ORC),
- obieg Kaliny.

Zarówno obiegi CR, ORC, jak i Kaliny znalazły już praktyczne wykorzystanie w przemyśle cementowym. Liderem światowym we wdrażaniu układów kogeneracyjnych WHR (*waste heat recovery*) w przemyśle cementowym, bazujących na obiegu CR, jest japońska firma Kawasaki Heavy Industries (KHI), która w 1980 r. w cementowni Sumitomo Osaka Cement wybudowała i uruchomiła pierwszą instalację WHR. Do roku 2010 Kawasaki uruchomiła 106 takich instalacji o łącznej mocy elektrycznej 1413 MW [3]. Szczególnie intensywny rozwój technologii WHR obserwuje się w Chinach.

Ze względu na stosunkowo niską temperaturę gazów odlotowych z pieca obrotowego i powietrza nadmiarowego z chłodnika (ok. 250–400°C), poszukuje się innych technik wytwarzania energii elektrycznej. Technologia ORC – *Organic Rankine Cycle* jest znana z zastosowań w elektrowniach geotermalnych. W technologii tej czynniki termodynamiczne obiegu stanowią ciecze organiczne o niższej temperaturze parowania. W kilku cementowniach wykorzystywany jest ten sposób odzysku energii z ciepła odpadowego (tab. 1).

Tabela 1

Układy ORC w przemyśle cementowym [4–6]

Dostawca	Rok instalacji	Moc [MWel]	Firma	Lokalizacja
Ormat	2007	4,00	Ultratech Cement	Indie
Ormat	1999	1,30	Heidelberg Cement Group	Niemcy
Turboden	2000	2,00	Ciment du Maroc	Maroko
Turboden	2014	4,97	CRH	Słowacja
Turboden	2012	4,00	Holcim SA	Rumunia
Turboden	2015	3,80	Heidelberg Cement Group	Rumunia
Turboden	2016	2,30	Jura Cement	Szwajcaria
Turboden	2017	2,00	Industria Cementi Giovanni Rossi	Włochy
Atlas Copco	2015	2,00	Holcim SA	Szwajcaria
Cryostar	2013	0,10	Holcim SA	Niemcy

Podobnym rozwiązaniem do układu ORC, bazującym również na obiegu Rankine'a, jest obieg Kaliny. Zasadnicza różnica cyklu Kaliny w stosunku do cyklu ORC polega na wykorzystaniu innego czynnika roboczego. W cyklu Kaliny w miejsce cieczy organicznej zastosowano mieszaninę dwuskładnikową (wody z amoniakiem). Układ Kaliny w takim samym zakresie temperatur jest ok. 15–25% bardziej wydajny w stosunku do ORC. Cykl Kaliny stosowany jest podobnie jak ORC do niskiej i średniej temperatury ciepła odpadowego (120–450°C). Obecnie w czasie budowy są dwie tego typu instalacje: o mocy 8,6 MWel w Khairpur Cement Plant (Pakistan) [7] i w Emiratach Arabskich (cementownia Ras Al Khaimah) o mocy 4,75 MWel [7].

## 2. Stan wykorzystania entalpii gazów technologicznych w cementowniach w Polsce

W celu określenia strumienia ciepła odpadowego w cementowniach przeanalizowano wszystkie działające zakłady cementowe w Polsce. Cementownie zakodowano numerami od 1 do 10. Obecnie (2016 r.) w cementowniach entalpia gazów odlotowych wykorzystywana jest głównie w młynach surowca i w młynach węgla, natomiast entalpia powietrza nadmiarowego zagospodarowywana jest w procesie suszenia paliw i dodatków do cementu (tab. 2).

Tabela 2

*Stan wykorzystania entalpii gazów technologicznych w cementowniach w Polsce (2016 r.)*

Cementownia	Gazy odlotowe za wymiennikiem		Powietrze nadmiarowe		
	MS	MW	MW	SDC	SPA
1	1	0	1	0	0
2	1	0	1	1	0
3	1	0	1	1	0
4	1	0	0	0	1
5	1	1	0	0	1
6	1	0	0	1	0
7	1	0	1	0	0
8	1	1	0	1	1
9	1	1	0	0	1
10	1	1	0	1	0

MS – młyn surowca,

MW – młyn węgla,

SDC – suszarnia dodatków do cementu,

SPA – suszarnia paliw alternatywnych.

Źródło: Opracowanie własne.

Przy określeniu strumienia energii odpadowej przyjęto, iż dane eksploatacyjne (strumień, temperatura gazów odlotowych i powietrza nadmiarowego, wydajność pieca, suszarni, młynów, czas pracy urządzeń, jednostkowe zużycie ciepła w suszarniach/młynach surowca, żużla, węgla) są zgodne z parametrami technicznymi analizowanych instalacji produkcji klinkieru. W tabeli 3 zestawiono wyniki analizy entalpii gazów technologicznych, strumienia ciepła wykorzystywanego w procesie suszenia oraz ciepła odpadowego. Przy entalpii gazów procesowych na poziomie 2,6 TJ (4,558 tys. GWh) entalpia gazów odpadowych stanowi ok. 0,8 TJ/h (2,018 tys. GWh).

Tabela 3

*Ciepło odpadowe w instalacjach produkcji klinkieru w Polsce*

## a) MOC CIEPLNA

Cementownia	Gazy procesowe [MJ]			Wykorzystanie gazów procesowych [MJ]				Ciepło odpadowe [MJ]	
	GOW	PN	razem	MS	MW	SDC	razem	GOW	PN
1	316 122	137 974	454 096	316 305	5 677	0	321 982	0	132 297
2	200 119	123 052	323 171	207 104	19 037	24 461	250 602	0	79 555
3	80 347	23 611	103 958	52 631	3 385	20 144	76 160	27 716	23 611
4	340 662	83 136	423 798	231 304	0	19 497	250 801	109 358	63 639
5	131 661	86 755	218 416	75 685	7 299	1 186	84 170	48 678	85 569
6	31 750	24 613	56 362	31 582	0	22 504	54 086	0	0
7	35 521	2 974	38 495	35 521	2 974	0	67 588	0	0
8	411 440	153 950	565 390	367 317	16 219	24 461	407 997	27 903	129 489
9	145 236	64 395	209 631	112 931	4 564	9 993	127 487	27 742	54 402
10	138 443	85 939	224 382	99 889	13 516	42 831	156 236	38 554	29 592
Razem	1 831 300	786 399	2 617 700	1 530 269	72 670	16 5077	1 797 110	279 951	598 154

## b) ENERGIA CIEPLNA W SKALI ROKU

Cementownia	Gazy procesowe [MWh]			Wykorzystanie gazów procesowych [MWh]				Ciepło odpadowe [MWh]	
	GOW	PN	razem	MS	MW	SDC, SPA	razem	GOW	PN
1	530 382	231 490	761 873	419 574	8 020	0	427 594	110 808	223 470
2	270 994	166 633	437 627	192 614	28 674	35 332	256 620	78 381	102 627
3	156 788	46 074	202 862	73 786	1 948	29 097	104 831	83 002	15 029
4	654 829	159 806	814 635	444 617	0	28 162	472 780	210 211	131 644
5	253 118	166 787	419 905	111 031	5 247	1 714	117 991	136 841	165 073
6	62 344	48 330	110 674	47 441	0	32 506	79 947	14 903	15 824
7	60 514	5 066	65 580	37 512	2 673	0	40 185	23 002	2 393
8	674 304	252 306	926 611	508 915	13 557	35 332	557 804	151 833	216 974
9	293 457	130 114	423 571	224 171	7 391	14 435	245 997	61 895	115 679
10	243 813	151 349	395 161	168 769	5 171	61 867	235 807	69 873	89 481
Razem	3 200 544	1 357 955	4 558 500	2 228 430	72 681	238 445	2 539 556	940 749	1 078 195

PN – powietrze nadmiarowe za chłodnikiem,

GOW – gazy odlotowe za wymiennikiem,

MS – młyn surowca,

MW – młyn węgla,

SDC – suszarnia dodatków do cement,

SPA – suszarnia paliw alternatywnych.

Źródło: Opracowanie własne.

Ilość ciepła odpadowego możliwego do energetycznego zagospodarowania w cementowniach, co oczywiste, uzależniona jest od zapotrzebowania ciepła w procesach suszenia. Wilgotność złożowa surowców, stosowanych do produkcji klinkieru jest mocno zróżnicowana, od bardzo wilgotnych surowców kredowych do niemal suchych, twardych wapieni. Przeciętna wilgotność surowców waha się w zakresie 8–10%. Dla surowców o wysokiej zawartości węglanów wapnia, zwłaszcza w złożach twardszych wapieni, wilgotność surowców jest niższa i z reguły nie przekracza poziomu 4–5%. Tak zwane surowce niskie (CaO poniżej 50%) oraz surowce ilaste charakteryzują się zawartością wilgoci na poziomie 10–12%. Iły jako cenny składnik surowcowy ze względu na skład mineralogiczny i chemiczny zawierają 15–20% wody. Dlatego też przy wilgotności surowców wapiennych stosowanych do produkcji klinkieru wynoszącej ok. 8–10% niemal całkowity strumień energii cieplnej gazów odlotowych jest efektywnie wykorzystywany w procesie przygotowania surowca. W branży cementowej zaledwie w jednym zakładzie metody suchej stosuje się surowce, dla których średnia wilgotność nadawy młyna surowca wynosi ok. 5,0%.

Przeprowadzona analiza wykazała, iż poziom wykorzystania entalpii gazów odlotowych w cementowniach średnio wynosi 73%. W czterech cementowniach w Polsce całość gazów odlotowych z wymiennika wykorzystuje się w procesie suszenia surowca. W pozostałych sześciu instalacjach wypalania klinkieru występuje nadmiar ciepła i istnieje możliwość jego energetycznego wykorzystania przez cały okres pracy pieca obrotowego (tab. 3 a). Ze względu na różny czas pracy instalacji piecowej i młynów surowca istnieje teoretyczna możliwość dodatkowego wykorzystywania entalpii gazów odlotowych (tab. 3 b).

Poziom wykorzystania entalpii powietrza nadmiarowego waha się od 0 do 100%, średnio wynosi 35%. W większości cementowni, przy uwzględnieniu konieczności zapewnienia strumienia energii cieplnej do procesu suszenia węgla i żużła, istnieje pewna jego nadwyżka. W dwóch cementowniach całkowicie wykorzystuje się ciepło odpadowe z chłodników (tab. 3 a).

### **3. Analiza możliwości wytwarzania energii elektrycznej z ciepła odpadowego**

Analizę konwersji entalpii strumienia ciepła odpadowego do energii elektrycznej w cementowniach przeprowadzono na podstawie danych zamieszczonych w podrozdziale 2. Obliczenia wykonano przy następujących założeniach:

- 1) strumień ciepła odpadowego do energetycznego wykorzystania przyjęto zgodnie z tabelą 3 a;
- 2) temperatura końcowa gazów technologicznych przy odzysku ciepła odpadowego do celów energetycznych wynosi odpowiednio:

- dla gazów odlotowych –  $t_{gk} = 110^{\circ}\text{C}$ ,
- dla powietrza nadmiarowego z chłodnika –  $t_{pnk} = 90^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) sprawność układu energetycznego wynosi 20%;
- 4) czas pracy modułu energetycznego jest równy czasowi pracy pieca obrotowego.

Wyniki oszacowania mocy elektrycznej turbozespołów oraz rocznej produkcji energii elektrycznej z ciepła odpadowego w cementowniach w Polsce przedstawiono w tabeli 4.

T a b e l a 4

*Oszacowanie możliwości produkcji energii elektrycznej z ciepła odpadowego*

Cementownia	Ciepło do energetycznego wykorzystania [MW]			Moc turbozespołu [MWel]			Produkcja energii elektrycznej [MWh/rok]
	GOW	PN	razem	GOW	PN	razem	
1	0,000	24,816	24,816	0,000	5,460	5,460	32 976
2	0,000	17,025	17,025	0,000	3,745	3,745	18 259
3	6,251	4,242	10,494	1,375	0,933	2,309	16 218
4	0,000	12,471	12,471	0,000	2,744	2,744	18 986
5	9,556	17,185	26,741	2,102	3,781	5,883	40 716
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
8	5,720	0,000	5,720	1,258	0,000	1,258	7 425
9	5,566	9,599	15,165	1,225	2,112	3,336	24 269
10	7,560	5,305	12,865	1,663	1,167	2,830	17 944
Razem	34,654	90,644	125,298	7,624	19,942	27,566	176 794

PN – powietrze nadmiarowe za chłodnikiem,  
GOW – gazy odlotowe za wymiennikiem.

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Moc elektryczna w układach niskotemperaturowego odzysku ciepła odpadowego uzależniona jest od dostępności źródła energii. Zależy przede wszystkim od wydajności pieca, wilgotności surowca oraz konfiguracji układu. Dla analizowanych instalacji moc turbozespołu wynosi od 1,2 do 5,8 MWel. Łączna moc układów wytwarzania energii elektrycznej kształtuje się na poziomie 27,5 MWel. Natomiast roczna produkcja energii może osiągnąć wartość ok. 176,8 GWh/rok.

Cała wyprodukowana energia może być wykorzystana w miejscu wytworzenia. Najwięcej energii elektrycznej pochłaniają procesy przemiału surowca i cementu, gdzie zapotrzebowanie wynosi ok. 60% całkowitego jej zużycia w cementowni. Całkowite zużycie energii elektrycznej, obejmujące wszystkie operacje techno-



logiczne, wynosi średnio 90–130 kWh/Mg cementu [8], w zależności od stosowanej technologii (parametrów urządzeń) oraz od gatunku produkowanego cementu. Przy rocznej produkcji cementu kształtującej się na poziomie 14 mln Mg zapotrzebowanie na energię elektryczną wynosi więc ok. 1400 GWh/rok. Wytworzona energia elektryczna w układzie ORC lub w układzie Kaliny może zaspokoić potrzeby własne w cementowniach w ok. 12,6%. Jest to istotne, ponieważ koszty zakupu energii elektrycznej stanowią ok. 25% kosztów produkcji. Warto jednocześnie zwrócić uwagę, że wykorzystanie ciepła odpadowego do produkcji energii elektrycznej jest jednym ze sposobów pośredniego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz zanieczyszczeń do środowiska. Skojarzenie produkcji klinkieru cementowego i energii elektrycznej wpływa również na poprawę efektywności energetycznej procesu wytwarzania cementu.

## 4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że:

- w warunkach krajowego przemysłu cementowego istnieje 8 linii technologicznych, w których można efektywnie wykorzystać ciepło odpadowe z gazów odlotowych i/lub powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru;
- poziom wykorzystania entalpii gazów odlotowych w cementowniach waha się w granicach 63–100%. W czterech cementowniach w Polsce całość gazów odlotowych wykorzystuje się w procesie suszenia surowca. W pozostałych sześciu instalacjach wypalania klinkieru występuje nadmiar energii cieplnej w stosunku do potrzeb technologii i możliwość jej energetycznego wykorzystania przez cały okres pracy pieca obrotowego;
- poziom wykorzystania entalpii powietrza nadmiarowego waha się w granicach od 0 do 100%, średnio wynosi 35%. W dwóch cementowniach ciepło odpadowe z chłodnika jest całkowicie wykorzystywane, natomiast w większości cementowni istnieje nadwyżka ciepła;
- entalpia gazów odpadowych z instalacji wytwarzania cementu wynosi ok. 2,6 TJ;
- w przemyśle cementowym, ze względu na stosunkowo niską temperaturę gazów odpadowych wynoszącą ok. 250–380°C, najkorzystniejszym sposobem produkcji energii elektrycznej jest zastosowanie procesu ORC lub Kaliny. Moc elektryczna turbozespołów uzależniona jest od wielkości i dostępności źródła energii i zależy przede wszystkim od wydajności pieca, wilgotności surowców i konfiguracji układu. Dla analizowanych instalacji wypalania klinkieru moc turbozespołów może wynosić od 1,2 do 5,8 MWel. Łączna moc produkowanej energii elektrycznej kształtuje się na poziomie 27,5 MWel, co odpowiada rocznej produkcji ok. 177 GWh;

- cała wyprodukowana energia elektryczna może zaspokoić potrzeby własne w cementowniach w ok. 12,6%;
- skojarzenie produkcji klinkieru cementowego i energii elektrycznej wpływa na poprawę efektywności energetycznej procesu wytwarzania cementu, a ponadto, ograniczając emisję zanieczyszczeń, stanowi działalność proekologiczną\*.

## Literatura

- [1] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu, Opole 2004.
- [2] Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier analysis; june 2014, [http://www.iipnetwork.org/62730%20WRH\\_Report.pdf2](http://www.iipnetwork.org/62730%20WRH_Report.pdf2) (10.12.2015).
- [3] Waste Heat Recovery Power Plant in Cement Plant Kawasaki Plant System, [www.csc.org.sa/Arabic/BusinessCouncils/.../1/.../012\\_BusCom.pdf](http://www.csc.org.sa/Arabic/BusinessCouncils/.../1/.../012_BusCom.pdf) (10.12.2015).
- [4] Urs Herzog: Technical and economical experiences with large ORC systems using industrial waste heat streams of cement plants, ORC-Symposium – 6. November 2015 – HSLU Hochschule Luzern – Technik & Architektur Horw, <https://www.hslu.ch> (10.02.2016).
- [5] Strona internetowa firmy Turboden, <http://www.turboden.eu> (12.11.2016).
- [6] Strona internetowa firmy Ormat, <http://www.ormat.com/> (12.11.2016).
- [7] Strona internetowa firmy Enhanced Systems Technologies Limited, <http://estl.com.au/> (19.11.2016).
- [8] ECRA Development of state of the art techniques in cement manufacturing: Trying to look ahead 4 june 2009, <http://www.wbcscement.org/pdf/technology/Technology%20papers.pdf> (12.12.2015).

EWA GŁODEK-BUCYK  
FRANCISZEK ŚLADECZEK  
WOJCIECH KALINOWSKI

### POSSIBILITIES OF USING ORC SYSTEMS IN CEMENT INDUSTRY

**Keywords:** cement industry, waste heat, ORC.

The paper presents an analysis of using waste heat for electricity production in clinker burning systems. The quantity of available waste heat depends on the heat demand in the raw materials and fuels drying process. The level of use of the enthalpy of exhaust gases varies from 63 to 100%, whereas the excess air is from 0 to 100%. Total turbine power will be approx. 27,5 MWel for the analyzed system clinker burning. While the annual electricity production is potentially 177 GWh.

---

\* Praca zrealizowana została ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.