

*JERZY DUDA**

Dlaczego ORC jest najlepszym rozwiązaniem do wykorzystania energii odpadowej w cementowni

Słowa kluczowe: piec obrotowy, energia odpadowa, kogeneracja.

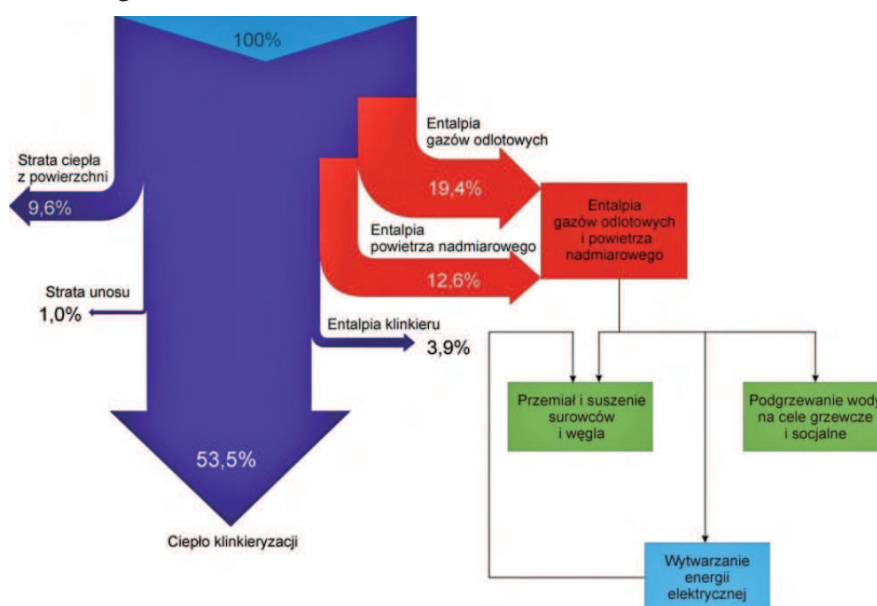
Tradycyjne metody wykorzystania ciepła odpadowego z pieca obrotowego w procesie suszenia surowców i węgla są już niewystarczające. W związku z tym poszukuje się innych sposobów wykorzystania tej energii odpadowej. Metodą, która na świecie jest najczęściej stosowana, jest – na wzór typowej kogeneracji w energetyce – skojarzenie pieca obrotowego z układem do wytwarzania energii elektrycznej. Na przykładzie stosowanych rozwiązań w światowym przemyśle cementowym w artykule uzasadniono wybór metody opartej na układzie ORC.

1. Wprowadzenie

Jednym z warunków intensyfikacji produkcji cementu, zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju, jest wdrożenie „czystych”, bez zużycia paliw kopalnych i emisji szkodliwych gazów, technik spalania paliw i produkcji energii ze źródeł odnawialnych. Zarówno Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2001/77/WE oraz Pakiet klimatyczno-energetyczny 3 x 20, który zakłada uzyskanie do roku 2020 ograniczenie o 20%: emisji gazów cieplarnianych (baza 1990) i zużycia energii oraz zwiększenie o 20% udziału energii ze źródeł odnawialnych (OZE), wymuszają zmianę podejścia do problemu energochłonności. Dotyczy to szczególnie przemysłów, które charakteryzują się dużym zużyciem energii i paliw nieodnawialnych; do tej grupy zalicza się również przemysł cementowy. Wysoka energochłonność produkcji cementu wynika głównie z wysokotemperaturowego procesu wypalania klinkieru. W związku z tym zasadniczym celem jest obniżenie energochłonności produkcji cementu. Szczególnie w ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój i wdrażanie nowych, energooszczędnych technik wypalania klinkieru. Praktycznie na obecnym poziomie techniki dalsze obniżenie jednostkowego zużycia ciepła w procesie wypalania jest już

* Dr hab. inż., prof. PO, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska.

nieopłacalne [1]. Dlatego poszukuje się innych, pośrednich metod poprawienia sprawności wytwarzania cementu i ograniczenia szkodliwego oddziaływania na środowisko. Przykładem tych zmian jest nowy, z maja 2010, BREF (*BAT Reference Document*) dla przemysłu cementowego, który uwzględnia pośrednie metody obniżenia energochłonności i emisji gazów cieplarnianych. Nowe podejście do problemu energochłonności wynika z wysokiego poziomu technicznego procesu wypalania klinkieru metodą suchą. Na rycinie 1 przedstawiono typowy bilans cieplny pieca obrotowego. Główną stratą ciepła w procesie wypalania klinkieru, wynoszącą ponad 30%, jest entalpia gazów odlotowych i powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru.



Ryc. 1. Bilans cieplny pieca obrotowego i sposoby wykorzystania entalpii odpadowej [1]

Tradycyjne metody wykorzystania ciepła odpadowego w procesie suszenia surowców i węgla są już niewystarczające. Obecnie metodą najczęściej stosowaną na świecie jest skojarzenie pieca obrotowego z układem wytwarzania energii elektrycznej z ciepła odpadowego (produkcja tzw. *clean energy* – bez dodatkowego obciążenia środowiska), na wzór typowej kogeneracji w energetyce [2–3]. Nowoczesne instalacje wytwarzania energii elektrycznej, tzw. WHR (*Waste Heat Recovery*), stosowane w przemyśle cementowym, zabezpieczają już ponad 30% zapotrzebowania cementowni na energię elektryczną. Wytwarzanie energii elektrycznej w cementowni z odpadowego ciepła z pieca obrotowego może zostać zrealizowane za pomocą:

- klasycznego obiegu parowego (cykl Clausiusa-Rankine'a);
- organicznego cyklu Rankine'a (ORC);

- cyklu Kaliny;
- innych rozwiązań wywodzących się z cyklu Rankine'a, jak np. instalacje z parowym silnikiem śrubowym.

Praktycznie wszystkie te metody wywodzą się z klasycznego obiegu Clausiusa–Rankine'a. Zarówno obieg ORC, jak i Kaliny znalazły już praktyczne wykorzystanie w przemyśle cementowym. Nowym rozwiązaniem są silniki śrubowe. Zaletą układów z parowymi silnikami śrubowymi jest czynnik roboczy, którym może być zarówno para sucha, wilgotna lub gorąca woda. Przyszłościową techniką wykorzystania ciepła odpadowego (gorącej wody) w silnikach śrubowych są układy TFC (*Trilateral-Flasch-Cycle*). Zastąpienie w technologii TFC tradycyjnego procesu parowania wody procesem rozprężania z odparowaniem w silniku śrubowym, oprócz wyeliminowania strat cieplnych i wzrostu sprawności, pozwoli również na obniżenia kosztów instalacji. Rozwój nowych technik wytwarzania energii elektrycznej z ciepła odpadowego stworzył duże możliwości dalszego obniżenia energochłonności i kosztów produkcji cementu. Dzisiaj problemem, przed którym stoi przemysł, jest wybór optymalnego układu skojarzenia procesu wypalania z wytwarzaniem energii elektrycznej.

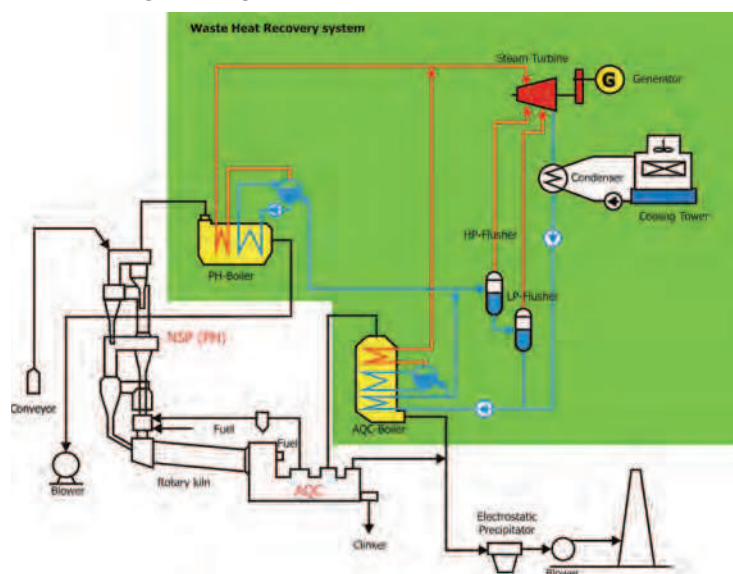
2. Układy WHR stosowane w przemyśle cementowym

Skojarzenie wysokotemperaturowego procesu wypalania klinkieru cementowego z wytwarzaniem energii elektrycznej nie jest innowacją. Już w latach siedemdziesiątych były prowadzone na świecie pierwsze prace nad wykorzystaniem entalpii odpadowej z pieca obrotowego do wytwarzania energii elektrycznej w klasycznym obiegu C–R (Clausiusa–Rankine'a). Ze względu na wysokie koszty takiej instalacji i stosunkowo niskie moce wytwarzanej energii elektrycznej (<10% mocy zainstalowanej) układy te nie wzbudziły wówczas praktycznie żadnego zainteresowania w przemyśle cementowym. Duży wpływ na małe zainteresowanie w tym czasie układami C–R miał również rozwój nowych, energooszczędnych technik wypalania i realizowane prace modernizacyjne (likwidacja metody mokrej, wstępna dekarbonizacja).

Pakiet klimatyczno-energetyczny 3 x 20, rozwój nowych technik WHR, pozwalający uzyskiwać znacznie wyższe moce energii elektrycznej oraz postępujący wzrost cen energii, zmieniły radykalnie pogląd przemysłu na skojarzenie procesu z wytwarzaniem energii elektrycznej. Obecnie – po etapie intensywnego rozwoju nowych energooszczędnych technik wypalania i przemiału (koniec XX wieku) oraz wykorzystania w procesie paliw z odpadów – zagospodarowanie ciepła odpadowego do produkcji energii elektrycznej jest jednym z ważniejszych priorytetów światowego przemysłu cementowego [4]. Światowym liderem we wdrażaniu układów kogeneracyjnych WHR w przemyśle cementowym jest japońska firma Kawasaki Heavy Industries (KHI), która w roku 1980 w cemen-

towni Sumitomo Osaka Cement wybudowała i uruchomiła pierwszą instalację WHR. Natomiast już w roku 1982 KHI uruchomiła w Taiheiyo Cement instalację o mocy elektrycznej 15 MW, zabezpieczającą ponad 30% zapotrzebowania mocy elektrycznej przez cementownię. Na rycinie 2 przedstawiono schemat technologiczny instalacji Kawasaki. Składa się on z dwóch współpracujących ze sobą kotłów odzyskowych. Jeden kocioł (PH) pracuje na gazach odlotowych z wymiennika ciepła, natomiast drugi (AQC) wykorzystuje entalpię powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru. Wytwarzana w kotłach para wodna napędza turbinę parową (cykl Clausiusa–Rankine’a) sprzężoną z generatorem [5].

W ostatnich latach, do roku 2009, firma Kawasaki uruchomiła 106 takich instalacji o łącznej mocy elektrycznej 1413 MW. Średni odzysk energii w nowych układach kogeneracyjnych w cementowni wynosi ok. 30–45 kWh/Mgk [3]. Szczególnie intensywny rozwój technologii WHR obserwuje się w Chinach. Duży wpływ miało na to utworzenie przez Anhui Conch i KHI w Chinach firmy Conch Kawasaki Engineering (CKE).



Ryc. 2. Schemat układu WHR Kawasaki [5]

W latach 2006–2008 uruchomiono w Chinach, tylko w przemyśle cementowym, 21 takich instalacji o łącznej mocy 186 MW. Technologia Kawasaki zintensyfikowała rozwój technologii wykorzystania ciepła odpadowego do wytwarzania energii elektrycznej z różnych procesów technologicznych. Na świecie w roku 2009 było 510 pracujących instalacji WHR, z tego 445 w Chinach. Przewiduje się, że do roku 2020, tylko w światowym przemyśle cementowym, zostanie wykonanych około 1600 instalacji WHR o łącznej mocy elektrycznej ok. 15 GW [6]. Tak intensywny rozwój i wykorzystanie w krajach azjatyckich technologii

WHR firmy Kawasaki w przemyśle cementowym wynika głównie z niskich wilgotności paliw i surowców.

Wysoka wilgotność surowców i węgla w Polsce wymaga znacznej ilości entalpii odpadowej w procesach suszenia tych materiałów. W związku z tym powielanie światowych rozwiązań WHR opartych na klasycznym obiegu Rankine'a jest w naszych warunkach mocno ograniczone. Skojarzenie procesu wypalania klinkieru z wytwarzaniem energii elektrycznej w cementowniach w kraju wymaga rozwiązań, które będą uwzględniały zapotrzebowanie ciepła do suszenia surowców.

W europejskim przemyśle cementowym technologia Clausiusa-Rankine'a została dotychczas wprowadzona tylko w cementowni Slite (Szwecja). Aby wyprodukować podobną moc do uzyskiwanych w układach Kawasaki, zdecydowano się zwiększyć straty cieplne pieca, podnosząc temperaturę gazów odlotowych z 643K do 678K oraz powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru z 523K do 583K. W ten sposób uzyskano moc wytwarzanej energii na poziomie 9 MW, co odpowiadało ponad 20% mocy zainstalowanej w cementowni [7].

3. Nowe techniki wytwarzania energii elektrycznej

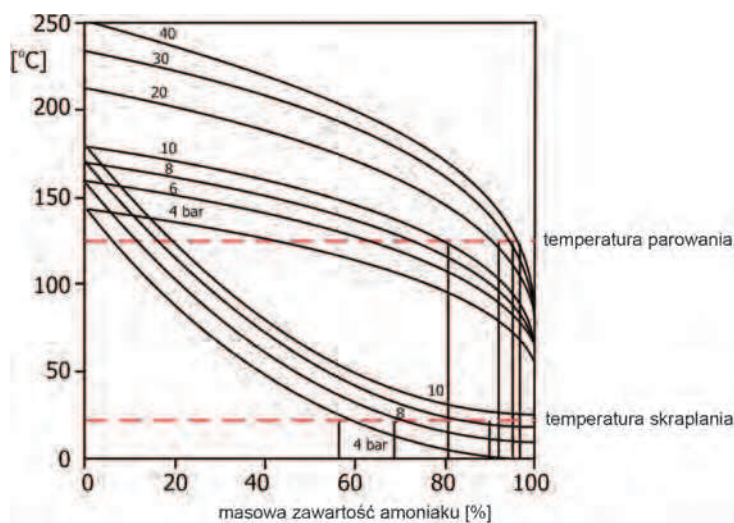
Stosunkowo niskie temperatury gazów odlotowych (ok. 620 K), duża zmienność entalpii powietrza nadmiarowego z chłodników (duże wahania temperatury) oraz wymagana energia cieplna w procesie suszenia wymagają innego niż klasyczna technologia Rankine'a sposobu wytwarzania energii elektrycznej z entalpii odpadowej. Aktualnym zatem zadaniem jest poszukiwanie innych technik, bazujących na obiegu Rankine'a, które mogą pracować przy niższych temperaturach ciepła odpadowego i przy dużych zmianach obciążenia. Jednym ze sposobów jest zastąpienie czynnika roboczego – wody inną cieczą, która charakteryzuje się niższą temperaturą wrzenia i niższą entalpią parowania. Płynami takimi są np. ciecze organiczne typu izopentan lub izobutan. Instalacje WHR z organicznym czynnikiem roboczym, których zasada działania oparta jest na klasycznym obiegu Rankine'a, określono jako ORC (*Organic Rankine'a Cycle*).

Cykl ORC jest układem dwuobiegowym: jeden obieg tworzy tzw. czynnik pośredni – grzewczy, np. termoolej, natomiast drugi obieg, zasadniczy, tworzy czynnik roboczy – płyn organiczny. Układ dwuobiegowy stosuje się ze względu na bezpieczeństwo pracy instalacji ORC. Procesowe ciepło odpadowe – entalpia gazów odlotowych i/lub powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru podgrzewa w kotle odzyskowy czynnik pośredni, najczęściej termoolej (olej silikonowy). Gorący termoolej wykorzystany jest następnie w parowniku do wytworzenia pary z cieczy organicznej, która napędza turbinę sprzężoną z generatorem.

Szwajcarska firma ABB w swoich układach ORC stosuje jako czynnik pośredni wodę o wysokim ciśnieniu, wynoszącym 1,8–2,2 MPa [8]. Zaletą takiej techno-

logii są niższe koszty eksploatacyjne i niższe zużycie energii na potrzeby własne układu ORC. Termoolej w danym zakresie temperatur charakteryzuje się prawie dwukrotnie mniejszą pojemnością cieplną niż woda oraz wyższą lepkością (większe opory hydrauliczne). Wynikiem tego jest większe (o ok. 35%) zużycie energii przez pompę obiegową termooleju w stosunku do zużycia energii przez pompę obiegową wody. Ważną zaletą wody jest również stałość jej parametrów termodynamicznych. Natomiast parametry termooleju ulegają zmianie w czasie eksploatacji, co wymaga częstej (co ok. 2 lata) jego wymiany i związanych z tym dodatkowych kosztów.

Podobnym rozwiązaniem do układu ORC, bazującym również na obiegu Rankine'a, jest cykl Kaliny, wynaleziony w Rosji w 1967 roku przez Aleksandra Kalinę i po raz pierwszy zastosowany w Paratunce na Kamczatce. Zasadnicza różnica cyklu Kaliny w stosunku do cyklu ORC polega na zmianie czynnika roboczego. W cyklu Kaliny w miejsce cieczy organicznej zastosowano mieszaninę dwuskładnikową (wody z amoniakiem), tzw. system binarny. Temperatura wrzenia mieszaniny ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) zależy od udziału w niej wody i amoniaku. Na rycinie 3 przedstawiono wpływ koncentracji amoniaku w mieszaninie na proces Kaliny.



Ryc. 3. Wpływ koncentracji amoniaku na parametry termodynamiczne pary i kondensatu [9]

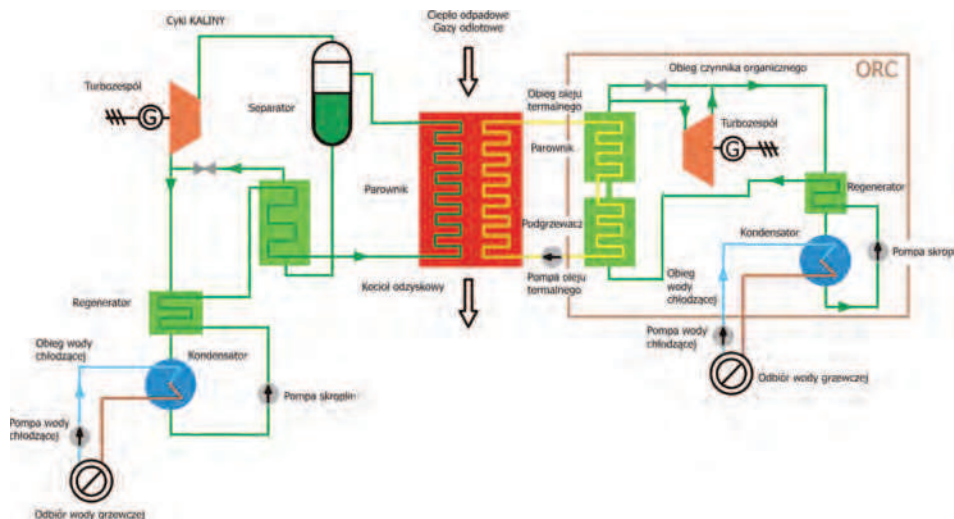
Z przedstawionych danych wynika, że im wyższa zawartość w mieszaninie amoniaku, tym niższa temperatura parowania i skraplania. Aby uzyskać wyższą moc, spadek ciśnienia powinien być duży. W związku z tym dąży się do uzyskania wysokiego ciśnienia na wlocie do turbiny i niskiego ciśnienia w kondensatorze. Dzięki temu, że czynnik roboczy jest mieszaniną dwufazową, różniącą się tem-

peraturami wrzenia każdego składnika, można zmieniać parametry termodynamiczne pary i kondensatu.

W cyklu Kaliny, przy zadanej temperaturze źródła ciepła i założonej różnicy temperatur (para–kondensat), istnieje możliwość zmiany ciśnienia poprzez zmianę koncentracji amoniaku. Na przykład: obniżenie ciśnienia w skraplaczu można uzyskać poprzez zmniejszenie koncentracji amoniaku w kondensacie, co umożliwia doprowadzenie (ubogiej w amoniak) cieczy z separatora. Na przedstawionym wykresie (ryc. 3) widać również dużą wrażliwość cyklu na drobne zmiany koncentracji amoniaku. Dotyczy to szczególnie zakresu wysokich koncentracji, gdzie występuje duże zagęszczenie izobar. Małe zmiany udziału amoniaku powodują duże zmiany ciśnienia [9].

Zazwyczaj udział ten wynosi 70% amoniaku i 30% wody. Mieszanina ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) w stosunku do cieczy jednorodnej – wody wrze w szerokim zakresie temperatur, dzięki czemu ilość energii odzyskanej ze strumienia ciepła odpadowego jest znacznie (o 15–25%) wyższa w porównaniu z wodą. Dobór proporcji czynników amoniak–woda pozwala na dostosowanie się do temperatury źródła ciepła odpadowego.

Cykl Kaliny jest coraz częściej użytkowaną techniką wykorzystania ciepła odpadowego do produkcji energii elektrycznej. Stosowany jest podobnie jak cykl ORC do niskich i średnich temperatur ciepła odpadowego (400–700K). Podobieństwo pomiędzy ORC i cyklem Kaliny wynika z tego, że są to rozwiązania pochodzące od klasycznego obiegu Clausiusa–Rankine’a. Ważną zaletą obiegu ORC i Kaliny, szczególnie w układach współpracujących z piecem obrotowym, gdzie można spodziewać się dużych zmian entalpii powietrza nadmiarowego, jest mniejsza wrażliwość na zmiany obciążenia niż w klasycznym obiegu C–R, bardzo na nie wrażliwym. Aby porównać oba obiegi, na rycinie 4 przedstawiono układy ORC i Kaliny, pracujące równolegle na jednym źródle ciepła odpadowego. W wyniku dostarczenia ciepła (entalpia gazów odlotowych) do kotła odzyskowego w cyklu Kaliny następuje odparowanie czynnika roboczego – mieszaniny (wody i amoniaku). Następnie w separatorze z powstałej fazy parowej wydzielona zostaje para o dużej zawartości amoniaku, która napędza turbinę. Natomiast wodna faza z separatora przepływa przez wymiennik i następnie miesza się z rozprężoną w turbinie parą amoniaku. Powstała mieszanina pary i wody doprowadzona zostaje poprzez rekuperator do kondensatora. Powstały kondensat przepompowany zostaje pompą obiegową poprzez regeneratory i następnie wymiennik-podgrzewacz do parownika.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Schemat obiegu ORC i Kaliny

Z przedstawionego na rycinie 4 porównania wynika, że oba układy różnią się zasadniczo tylko czynnikiem roboczym oraz zastosowanym w układzie ORC pośrednim czynnikiem grzewczym. Zarówno w obiegu ORC oraz Kaliny rozprężona po turbinie para, przed doprowadzeniem do kondensatora, przepływa przez rekuperator, gdzie wstępnie podgrzewa kondensat. W cyklu Kaliny stosunek amoniaku do wody zmieniany jest w zależności od procesu występującego w obiegu i nie jest on stały podczas wszystkich zachodzących w nim przemian. Dodatkowo cykl Kaliny, ze względu na binarny czynnik roboczy, musi być wyposażony w separator pary. Natomiast w instalacjach ORC separator stosowany jest tylko w wyjątkowych przypadkach, kiedy ze względu na parametry źródła ciepła i czynnik organiczny może grozić wystąpienie w parze kropli płynu.

4. Wybór najkorzystniejszego rozwiązania

Jak wynika z doświadczeń krajowych i zagranicznych oraz analizy kosztów, najkorzystniejszym rozwiązaniem zagospodarowania ciepła odpadowego o temperaturze powyżej 650K jest klasyczny obieg Clausiusa–Rankine’a. Natomiast dla tzw. źródeł niskotemperaturowych (< 600K) zalecany jest obieg ORC lub Kaliny, które charakteryzują się niższymi temperaturami wrzenia cieczy roboczej. W tabeli 1 przedstawiono wybrane większe, dostępne źródła entalpii odpadowej z pieców obrotowych pracujących w kraju.

Uwzględniając średnią zawartość wody (7–9%) w krajowych surowcach naturalnych do produkcji cementu i wynikającą z tego wymaganą minimalną temperaturę gazów do suszenia ok. 540K, dostępne źródła ciepła do wykorzystania będą

T a b e l a 1

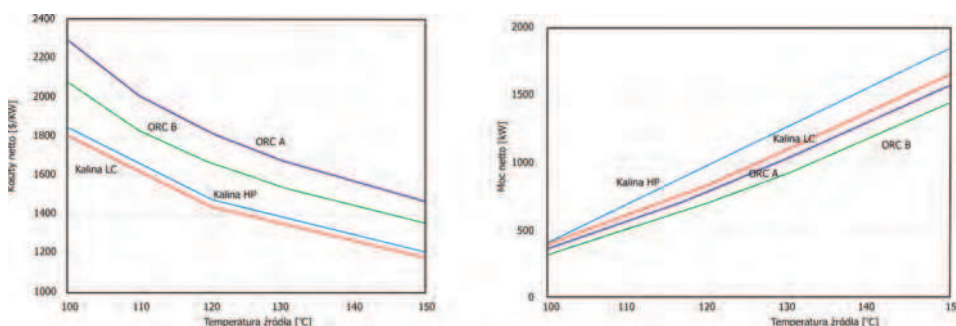
Wybrane entalpie czynników z cementowni krajowych

Zakład	Entalpia gazów odlotowych	Entalpia powietrza nadmiarowego	Gazy odlotowe		Powietrze nadmiarowe	
	[kJ/kgkl]	[kJ/kgkl]	[m ³ n/kgkl]	temperatura [K]	[m ³ n/kgkl]	temperatura [K]
I	800,79	371,78	1,43	656	1,23	520
II	801,60	231,30	1,59	615	–	–
III	641,31	411,81	1,46	630	1,15	560
IV	777,80	427,09	1,49	635	1,31	540
V	857,47	198,50	1,55	635	0,68	560

Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

o niższej entalpii niż przedstawione w tab. 1. W związku z tym w dalszej ocenie wyboru układu WHR ograniczono się tylko do układów niskotemperaturowych – ORC i Kaliny.

W stosunku do klasycznego obiegu Clausiusa–Rankine’a i organicznego ORC cykl Kaliny charakteryzuje się znacznie lepszymi sprawnościami. Wynika to z różnicy procesów termodynamicznych w cyklu Kaliny w stosunku do procesów w obiegu Rankine’a. Klasyczny obieg Rankine’a i ORC składa się m.in. z izobaryczno-izotermicznej przemiany parowania i izobaryczno-izotermicznego skraplania rozprężonej pary. Natomiast w cyklu Kaliny stosuje się nieizotermiczny proces parowania i kondensacji mieszaniny. Zakładając straty ciepłne kotła odzyskowego, turbiny i kondensatora, identyczne dla wszystkich układów, sprawność cyklu Kaliny będzie wyższa o 15–25% od porównywalnych obiegów Rankine’a. Podobnie na korzyść cyklu Kaliny, w porównaniu z ORC, przedstawiają się koszty instalacji i możliwej do wyprodukowania energii elektrycznej. Na wykresie (ryc. 5) porównano obiegi ORC i Kaliny pod względem kosztów

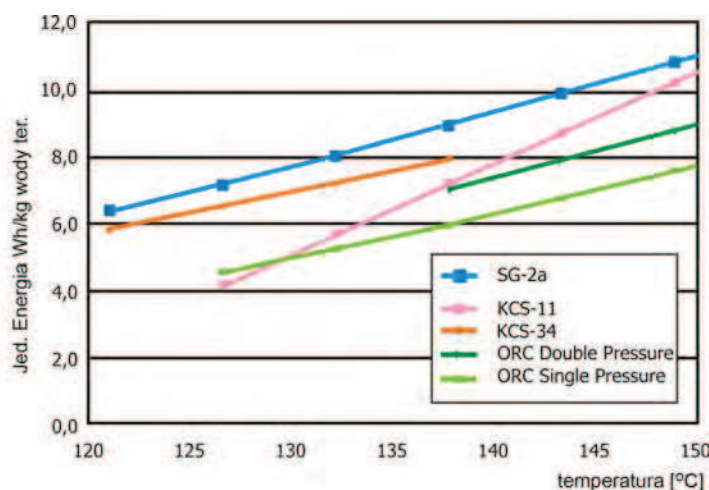


Ryc. 5. Porównanie kosztów i mocy energii obiegu ORC i Kaliny w zależności od temperatury źródła ciepła [10]

i wytwarzanej mocy, w zależności od temperatury dostępnego źródła energii odpadowej [10].

Porównano dwa różne układy ORC (A i B) z dwoma układami Kaliny. Układ ORC (A) charakteryzował się wysokimi kosztami i uzyskaną ilością energii. Natomiast ORC (B) niskimi kosztami i niską mocą. Podobnie Kalina (LC) to układ o niskich kosztach, natomiast Kalina (HP) to układ o wysokiej mocy i kosztach. Zarówno koszty wytwarzania energii, jak i wielkość mocy w każdym przypadku okazały się korzystniejsze w obu układach Kaliny.

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój technik Kaliny, co odnosi się zarówno do rozwiązań układu, jak i możliwości zastosowania. Rozwój ten wynika z większych teoretycznie możliwości cyklu Kaliny i lepszych wskaźników eksploatacyjnych, zwłaszcza przy wykorzystaniu niskotemperaturowej energii odpadowej. Na wykresie (ryc. 6) przedstawiono jednostkowe wskaźniki wytworzonej energii elektrycznej ze źródeł geotermalnych w różnych rozwiązaniach ORC i Kaliny.



Ryc. 6. Wpływ temperatury źródła ciepła i sposobu wytwarzania na jednostkowy wskaźnik wytwarzanej energii [11]

Z przedstawionych danych wynika, że rozwiązania oparte na cyklu Kaliny charakteryzują się lepszymi wskaźnikami niż ORC. Mimo zalet technologia Kaliny nie znalazła dotychczas większego zastosowania, które, podobnie jak w początkowym okresie obiegu ORC, ograniczone zostało głównie do kilku siłowni geotermalnych (w Japonii, USA, Niemczech i Islandii). O rozwoju technologii Kaliny i coraz większym jej wykorzystaniu świadczy duże zainteresowanie tą techniką nie tylko czołowych firm z branży energetycznej, ale również firm specjalizujących się w produkcji urządzeń do innych technologii. Przykładem jest np. duńska firma FLSmidth, producent maszyn i urządzenia dla cemen-

towni, która zakupiła licencję cyklu Kaliny. W roku 2012 firma FLS uruchomi już pierwszą swoją instalację WHR (Khairpur Kalina Cycle®) o mocy 8,6 MW w Khairpur Cement Plant (Pakistan) [12].

Dotychczasowe małe zainteresowanie układami Kaliny wynika ze stosunkowo krótkiego czasu od uruchomienia pierwszej instalacji i braku większego doświadczenia eksploatacyjnego. Jest to ciągle jeszcze rozwijana, prototypowa technologia. W związku z tym wydaje się, że układ ORC jest obecnie najlepszym rozwiązaniem w cementowni. Za układem ORC przemawia duża liczba wdrożonych z powodzeniem instalacji oraz różnorodność zastosowania. Są to układy sprawdzone i bezpieczne w eksploatacji. Ważną zaletą jest też stosunkowo prosty układ, który pozwolił na modułową konstrukcję instalacji.

Natomiast cykl Kaliny znajduje się ciągle jeszcze na etapie unowocześniania i rozwoju, podobnie jak 30 lat temu ORC. Z jednej strony, dzięki możliwości zmiany stosunku amoniak/woda w czasie procesu, można dopasowywać się do istniejących warunków w cyklu, z drugiej jednak strony jest to układ trudniejszy eksploatacyjnie. Dużym problemem jest sprawność układu separacji (maksymalne ograniczenie części wodnej w parze amoniaku) i mieszania rozprężonej pary z roztworem wody z separatora. Jakość separacji i mieszania ma duży wpływ na stabilność procesu i żywotność turbiny. Para o zwiększonej zawartości wody może spowodować uszkodzenie hydromechaniczne łopatek turbiny. Dodatkowo własności chemiczne amoniaku stwarzają duże zagrożenie korozyjne dla instalacji, która w związku z tym musi być wykonana z wysokogatunkowej stali nierdzewnej.

5. Podsumowanie

Skojarzenie procesu wypalania z instalacją do wytwarzania energii elektrycznej jest obecnie jednym z głównych działań, zgodnych z pakietem klimatyczno-energetycznym 3 x 20. Rozwój nowych technik wytwarzania energii elektrycznej umożliwi produkcję czystej energii elektrycznej z procesowego ciepła odpadowego. Uwzględniając dotychczasowe doświadczenia z eksploatacji układów ORC i Kaliny oraz badania modelowe nowych rozwiązań cyklu Kaliny, można stwierdzić, że są to rozwiązania przyszłościowe dla przemysłu cementowego. Cykl Kaliny, który charakteryzuje się najlepszymi sprawnościami, może być, po wyeliminowaniu obecnych trudności, podstawowym układem w cementowni. Technologia ta znajduje się obecnie na podobnym etapie rozwoju jak 30 lat temu ORC, kiedy również, ze względu na brak doświadczenia (referencji), trudno było znaleźć chętnych do jej wdrożenia. Praktycznie dopiero pod koniec XX wieku (po ok. 50 latach od pierwszych prób) układy ORC znalazły szerokie zastosowanie. Wdrożenie i rozpowszechnienie cyklu Kaliny będzie z pewnością szybsze ze względu na duże podobieństwo i zdobyte doświadczenia w eksploatacji instalacji ORC.

Literatura

- [1] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, „Prace IMMB”, Opole 2004.
- [2] D u d a J., B o s k i P., *Możliwości skojarzonej produkcji cementu i energii elektrycznej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej” 2002, nr 280, s. 187–193.
- [3] D u d a J., *Methods for utilization of waste heat from the clinker burning process*, *Heat Transfer and Renewable Sources of Energy* 2008. Red. J. Mikielwicz, W. Nowak, A.A. Stachel, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2008, s. 435–441.
- [4] D u d a J., J e s i o n e k K., *Zagospodarowanie procesowego ciepła odpadowego na przykładzie Cementowni*, „Prace Naukowe”, Politechnika Warszawska, Warszawa 2011, s. 47–53.
- [5] Prospekt. Oferta Kawasaki.
- [6] H a r d e r J., *Trends in power generation from waste heat in cement plants*, „Zement-Kalk-Gips” 2011, No 5, s. 36–47.
- [7] L y b e r g A., *Cogeneration*, „World Cement” 2002, No 4, s. 51–54.
- [8] B ü r k i T., B ö r r n e r t T., *The way forward to more efficient energy usage*, „World Cement” 2010, 2 March, s. 78–85.
- [9] K ö h l e r S., S a a d a t A., *Thermodynamic Modeling of Binary Cycles Looking for Best Case Scenarios*, International Geothermal Conference, Reykjavík, September 2003.
- [10] V a l d i m a r s s o n P., E l i a s s o n L., *Factors influencing the economics of the Kalina power cycle and situations of superior performance*, International Geothermal Conference, Reykjavík, September 2003, s. 32–40.
- [11] R e n z M., E n g e l h a r d M., *The New Generation Kalina Cycle*, Contribution to the conference „Electricity Generation from Enhanced Geothermal Systems”, Strasbourg 14 September 2006.
- [12] Global Licensing Agreement with FLSmidth for the Kalina Cycle® in Cement & Lime Industries, ASX – Announcement, 20 June 2011.

JERZY DUDA

WHY ORC IS THE BEST OPTION TO RECOVER THE WASTE ENERGY
IN CEMENT PLANT

Keywords: rotary kiln, waste energy, cogeneration

Traditional methods of utilization of waste heat from the rotary kilns for drying of raw materials and coal are no longer sufficient. Therefore, other ways of waste energy recovering have been explored. The most common method applying in the world wide is electricity generation associated with rotary kiln system, similar to a typical cogeneration in power industry. In the paper, on the example of solutions in the used world cement industry, the choice of method based on the ORC system been justified.