

Analiza termodynamiczna wykorzystania egzergii gazu wielkopieczowego w turbinie odzyskowej suchej i mokrej

Łukasz Nyżnyk*
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska
e-mail: lukasznyznyk@gmail.com

Słowa kluczowe: wielki piec, egzergia, energia odpadowa, turbina odzyskowa TRT, metalurgia

Streszczenie

Proces wielkopieczowy jest wciąż technologią dominującą w światowej produkcji stali, dlatego szczególnie istotne jest prowadzenie prac mających na celu zmniejszenie jego energochłonności jak i sprawienie by był on bardziej przyjazny dla środowiska naturalnego. W niniejszym projekcie inżynierskim przedstawiono algorytm oraz wyniki obliczeń, które dotyczą dwóch wariantów wykorzystania egzergii produkowanego gazu wielkopieczowego - turbiny odzyskowej suchej (w układzie z mokrą oczyszczalnią gazu i palnikiem strumieniowym) oraz mokrej. Następnie porównano obie technologie m.in. z uwagi na bezpośrednią korzyść wynikającą z instalacji turbozespołów (produkcja energii elektrycznej) oraz korzyści ekologiczne (zmniejszenie emisji CO₂). Wyniki obliczeń świadczą o tym, że zastosowanie obu technologii wpływa na oszczędność energii chemicznej w krajowej gospodarce energetycznej oraz zmniejszenie emisji CO₂ względem kondensacyjnej elektrowni odniesienia, której sprawności wytwarzania energii elektrycznej i przesyłu energii założono. Dokładna analiza obu przypadków znajduje się w Rozdziale 4.

* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym inżynierskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką dra hab. inż. Marcina Szegi, Prof. w Pol. Śl.

Spis najważniejszych oznaczeń występujących w pracy

CO_2, CO, H_2, CH_4, N_2 - udziały poszczególnych składników w produkowanym gazie wielkopieczowym, kmol i/kmol g.s.

cp_g - ciepło właściwe gazu wielkopieczowego, kJ/(kgK)

cp_w - ciepło właściwe wody, kJ/(kgK)

cp_{h_2o} - ciepło właściwe pary wodnej, kJ/(kgK)

e_{ch} - wskaźnik zużycia energii chemicznej, -

\dot{E}_{ch1} - zużycie energii chemicznej w elektrowni odniesienia, kW

\dot{E}_{ch2} - zużycie energii chemicznej w układzie turbiny TRT, kW

$-\Delta\dot{E}_{ch}$ - strumień zaoszczędzonej energii chemicznej w krajowej gospodarce energetycznej po instalacji turbiny odzyskowej, kW

i - molowa entalpia fizyczna (właściwa), kJ/kmol

l_i - jednostkowa praca wewnętrzna rozprężania gazu w turbinie, kJ/kg

\dot{m} - strumień gazu wielkopieczowego, kg/s

\dot{n} - strumień molowy produkowanego suchego gazu wielkopieczowego, kmol/s

N_{el} - moc elektryczna turbiny, kW

p - ciśnienie czynnika, MPa

R - indywidualna stała gazowa, kJ/(kgK)

R_u - uniwersalna stała gazowa, kJ/(kmolK)

r - ciepło parowania wody- izobaryczny przyrost entropii, kJ/(kgK)

Δs - różnica entropii czynnika, kJ/(kgK)

t - temperatura czynnika, °C

W_d - molowa wartość opałowa suchego gazu w temperaturze otoczenia, kJ/kmol

φ_1 - wilgotność względna produkowanego gazu wielkopieczowego, %

η_i - sprawność wewnętrzna turbiny, -

η_{me} - sprawność wnętrza turbiny odzyskowej, -

η_{Eel} - sprawność energetyczna elektrowni kondensacyjnej zastąpionej częściowo przez instalację turbiny TRT, -

v'_i - liczba kmoli i-tego składnika odniesiona do 1kmola spalanego gazu suchego, kmol i/kmol s.g.s.

v''_i - liczba kmoli i-tego składnika spalin przypadająca na 1kmol spalanego suchego gazu wielkopieczowego, kmol i/kmol s.g.s.

ζ - stosunek gazu spalonego w palniku strumienicowym do strumienia gazu produkowanego w procesie wielkopieczowym., -

Δn - strumień spalanego gazu wielkopieczowego, kmol/s

X'' - stopień zawilżenia gazu, kg h₂o/kg g.s.

Oznaczenia indeksów występujące w pracy

1, 2, 3, 4 - dotyczy parametrów czynnika w danym punkcie układu

0 - dotyczy punktu potrójnego

o_t - dotyczy otoczenia

o - dotyczy tlenu

a - dotyczy powietrza

o_{2min} - dotyczy tlenu przy spalaniu stechiometrycznym

s - dotyczy parametrów czynnika za turbiną po izentropowym rozprężaniu

n - dotyczy stanu nasycenia

g_1, g_2 - dotyczy parametrów gazu wielkopiecowego odniesionych do ilości gazu wilgotnego, w której jest zawarty 1 kmol gazu suchego w punktach 1 i 2

1 Wstęp

Metalurgia to gałąź przemysłu, której celem jest wytworzenie produktu, którym są wyroby wykonane ze stopów metali. Przemysł ten cechuje duża energochłonność procesów składowych wytwarzania. Do wyzwań metalurgii w dzisiejszych czasach należą między innymi ograniczenie zużycia energii chemicznej zużywanych paliw jak i ograniczenie emisji CO₂.

W metalurgii żelaza stal powstaje z surówki żelaza, która powstaje w procesie wielkopiecowym. W spiekalni uzyskuje się gruboziarnisty spiek żelaza. Koks, który jest paliwem używanym w procesie wielkopiecowym powstaje w wyniku obróbki węgla w baterii pieców koksowniczych. Spiek i koks stanowią wsad do wielkiego pieca, gdzie w wysokich temperaturach następuje topienie i redukcja tlenków żelaza. Następnym etapem wyrobu stali jest transport surówki w odpowiednich kadziach do stalowni, gdzie w konwertorach tlenowych wytapia się stal. Na tym etapie do surówki dodaje się złom i topniki. Surówkę przedmucha się tlenem, w taki sposób by powstały dane gatunki stali. Wytopioną stal transportuje się do wydziału odlewania gdzie następuje proces ciągłego odlewania stali. Powstają tam półprodukty, np. kęsiska. Ostatnim etapem jest przetwarzanie półproduktów w wyrób końcowy na drodze walcowania (gorącego i zimnego) [8]. Ciąg produkcyjny z punktu widzenia materiału zawierającego żelazo wyglądają następująco:

Spiekalnia→Wielki piec→Stalownia→Wydział ciągłego odlewania stali→Walcownia

1.1 Technologie ograniczające energochłonność procesu wielkopiecowego i emisję CO₂

Dla każdego z istniejących etapów wytwarzania stali istnieją dedykowane technologie – istniejące bądź na etapie badań, które mają na celu zmniejszenie energochłonności procesu oraz zmniejszenie emisji CO₂. Przedmiotem rozważań tego projektu jest turbina odzyskowa TRT – jedna z technologii pozwalających na uczynienie procesu wytwarzania stali bardziej efektywnym. Turbina ta wykorzystuje energię gazu wielkopiecowego w celu wytwarzania energii elektrycznej. Do pozostałych technologii służących usprawnieniu procesu wytwarzania stali na etapie procesu wielkopiecowego należą wdmuchiwanie pyłu węglowego (PCI) oraz regeneracyjne podgrzewanie powietrza.

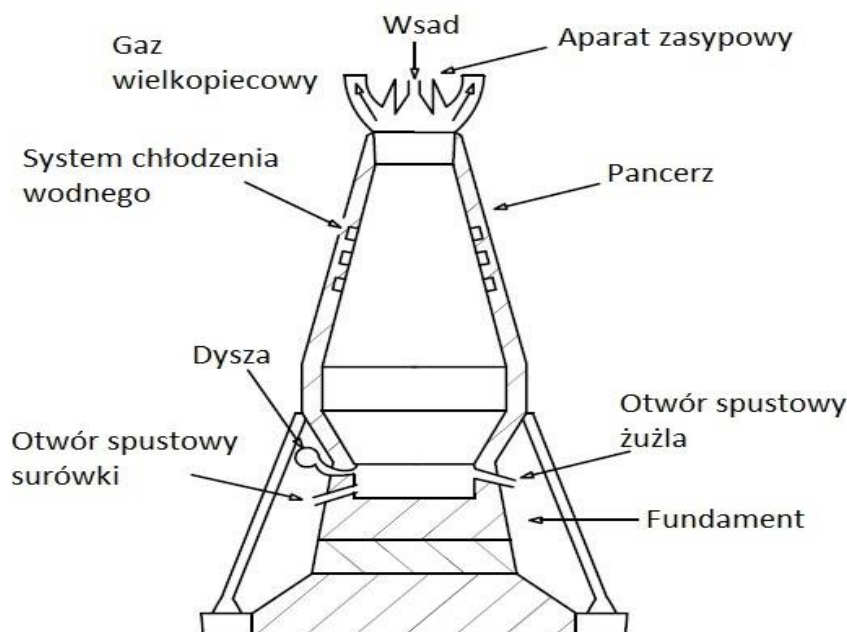
Tabela 1: Technologie stosowane w układzie wielkiego pieca [4]

Zastosowana technologia	Oszczędność Energii elektrycznej, kWh/Mg surówki	Oszczędność Energii chemicznej Paliwa, GJ/Mg surówki	Redukcja emisji CO ₂ , kg/Mg surówki
Turbina TRT	50	-	45
PCI	-	1,55	147
Regenerator	-	0,08	7,8

1.2 Charakterystyka wielkiego pieca

Wielki piec to typ pieca hutniczego, którego zadaniem jest wytwarzanie surówki w procesie redukcyjnym. Przestrzeń robocza wielkich pieców definiowana jako objętość użyteczna zawiera się w zakresie od 484 do 3200 m³ w przypadku pieców znajdujących się w hutach na terenie Polski [9].

Proces technologiczny zachodzący w wielkim piecu jest przeciwprądowy. Z góry pieca w jego dół przemieszcza się wsad – składający się obecnie w tej technologii ze spieku wielkopiecowego zawierającego rudy żelaza oraz koksu, natomiast z dołu do góry gazy redukcyjne [15]. Załadunek tworzyw do wielkiego pieca ma miejsce w górnej jego części przy pomocy urządzenia zasypowego. Materiały, które są doprowadzane do gardzieli pieca stykają się z gorącymi gazami uchodzącymi z niego. Gazy te powstają w wyniku spalania koksu i początkowo mają temperaturę 1950°C. Gorący dmuch (będący powietrzem o podwyższonym ciśnieniu, oraz temperaturze 900÷1200°C) wprowadzany jest do pieca w jego dole przez zestaw dysz. Dmuch doprowadzony do garu pieca umożliwia spalanie określonej ilości koksu, co wiąże się z wytworzeniem określonej ilości surówki. Z dmuchem wprowadza się paliwa zastępcze, jak np. pył węgla kamiennego. Działanie to ma na celu redukcję zużycia koksu oraz intensyfikację procesu wielkopiecowego. Dmuch do wielkiego pieca jest podgrzewany w nagrzewnicach. Pracują one w sposób okresowy. Nagrzewnica dmuchu jest wymiennikiem ciepła pracującym jako regenerator. Spaliny powstałe w procesie spalania gazu wielkopiecowego nagrzewają ogniotrwałą kratownicę, a następnie następuje przepływ ciepła od kratownicy do dmuchu.



Rysunek 1: Uproszczony schemat wielkiego pieca

1.3 Procesy zachodzące w wielkim piecu.

Podczas procesu wielkopiecowego mają miejsce reakcje chemiczne, główne z nich to:

a) Reakcje, w których jednym z substratów jest koks. Są to:

- Spalanie zupełne – przed wlotem dysz (towarzyszy mu nadmiar tlenu)
- spalanie niezupełne – reakcja zachodzi w dalszej odległości od dysz (towarzyszy mu niedobór tlenu)
- redukcja dwutlenku węgla do tlenku węgla – reakcja ma miejsce powyżej dysz, przy temperaturze $>950^{\circ}\text{C}$
- częściowe odgazowanie frakcji lotnych koksu

b) Redukcja tlenków żelaza – redukcja tlenków zachodzi stopniowo. Łańcuch reakcji jest następujący:



Ten sposób redukcji tlenków żelaza zwany jest redukcją bezpośrednią.

c) Pozostałe procesy jak: redukcja tlenków manganu, krzemionki, tlenków fosforu, itd. [11].

1.4 Produkty procesu wielkopiecowego i możliwość ich wykorzystania

Do produktów procesu wielkopiecowego należą surówka żelaza, żużel oraz gaz wielkopiecowy. Surówka żelaza to główny produkt tego procesu, używany w dalszym ciągu produkcyjnym huty. Żużel i gaz wielkopiecowy stanowią produkty uboczne.

Gaz wielkopiecowy (BFG) zawiera 20-28% CO, 1-5% H₂, 50-55% N₂, 17-25% CO₂, pył (duże ilości), związki siarki i cyjanku. Wartość opałowa tego gazu wynosi 2,7-4,0 MJ/Nm³, a jego produkcja to 1200-2000 Nm³/Mg surówki. BFG może stanowić paliwo po wzbogaceniu go gazami o wyższej wartości opałowej, jak np. gaz ziemny. Gaz ten zasila nagrzewnice dmuchu wielkopiecowego (bez potrzeby wzbogacania) [12]. Ze względu na dużą zawartość pyłu gaz ten poddawany jest procesowi oczyszczania. Warto zwrócić uwagę na podwyższone ciśnienie tego gazu odpadowego. Jest ono większe od ciśnienia otoczenia, zatem gaz posiada zdolność do wykonania pracy (posiada niezerową egzergię). Gaz ten można zastosować do napędzania zespołu turbina-generator i w efekcie produkcji energii elektrycznej. Żużel natomiast wykorzystywany jest do produkcji cementu, dodatek do betonów zbrojonych i do wyrobu kruszyw i lekkich betonów [11].

1.5 Koncepcja turbiny odzyskowej TRT

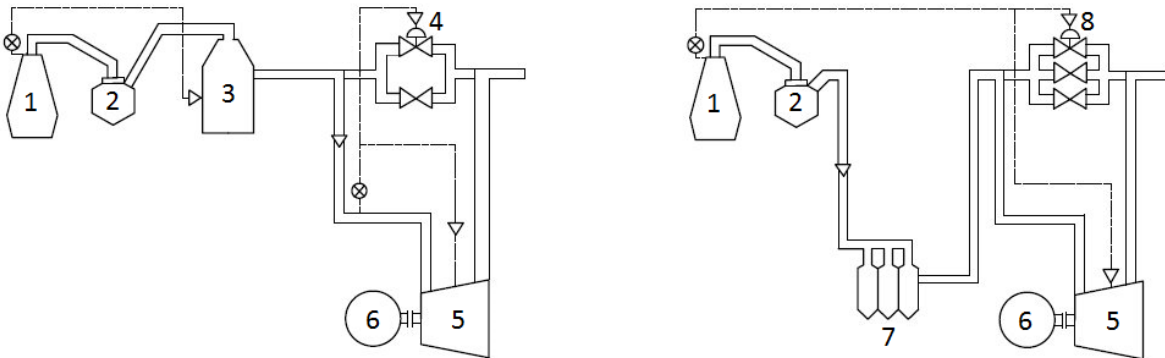
Procesy energetyczne powinny być przeprowadzane w taki sposób by energia napędowa (nakład energetyczny) była wykorzystywana w jak największym stopniu jeśli towarzyszą temu korzyści ekonomiczne i pozwalają na to możliwości techniczne. W wielu procesach technologicznych pojawia się zagadnienie wykorzystania energii odpadowej. Energia odpadowa to energia odprowadzana do otoczenia, która charakteryzuje się stosunkowo wysoką egzergią, zatem mającą potencjał do wykorzystania w sposób uzasadniony ekonomicznie. Użyteczność nośnika energii odpadowej może wynikać z jego własności fizycznych (np. wysoka entalpia fizyczna gazów odlotowych spowodowana ich wysoką temperaturą lub/i podwyższone ciśnienie tych gazów) lub z własności chemicznych (np. energia chemiczna gazów odlotowych) [3].

Proces wielkopiecowy jest procesem, który charakteryzuje podwyższone ciśnienie gazów odlotowych. Jest to spowodowane podwyższonym ciśnieniem wewnątrz układu, które utrzymuje się dla uzyskania korzystnych warunków (pod względem termodynamicznym) dla przebiegu procesu. Przeprowadzenie procesu dławienia gazu wielkopiecowego jest niekorzystne, ponieważ dławienie jest procesem generującym znaczne straty egzergii. Korzystniejszym rozwiązaniem technicznym jest instalacja turbiny TRT. Turbina odzyskowa (Top gas pressure recovery turbine – TRT) to maszyna, we wnętrzu której gaz wielkopiecowy rozpręża się – w wyniku czego wykonuje pracę. Energia wyprodukowana przez turbinę TRT może pokryć 25-30% zapotrzebowania na energię układu wielkiego pieca (napędzanie dmuchawy wielkopiecowej). Drugą funkcją jej turbiny jest kontrola ciśnienia w szybie wielkiego pieca [5]. Zatem jest to pożyteczny element układu spełniający funkcje regulacyjne oraz wytwórcze. Sam pomysł turbiny odzyskowej wiąże się ponadto z faktem egzergii produkowanego gazu wielkopiecowego wynikającej z jego podwyższonego ciśnienia, a co za tym idzie potencjału do wykonania przez niego pracy.

Istnieją 2 typy turbin odzyskowych – „mokra” (TRT wet) i „sucha” (TRT dry). Turbina sucha może osiągnąć większe moce niż turbina mokra [1]. Szacuje się, że turbina „sucha” jest w stanie osiągać 1,6 razy większą moc niż turbina „mokra” w danych warunkach [14]. W obu metodach pył początkowo usuwany jest w odpylaczu, lecz następnie w metodzie mokrej gaz kierowany jest do płuczki Venturiego, a w metodzie suchej gaz wędruje do układu suchego oczyszczania gazu. Kiedy gaz usuwany jest z użyciem metod suchych spadek temperatury gazu jest znikomy. Inaczej jest w przypadku układu wykorzystującego płuczkę Venturiego. Różnica temperatury gazu przed turbiną w obu układach jest dość znaczna, przykładowo może ona wynosić 55°C w turbinie „wet” i 150°C w turbinie „dry” [5].

Zaletą turbiny „mokrej” jest prostota budowy układu w jakim występuje, choć niekorzystny jest fakt, że przez cały czas ekspansji występuje wykroplenie pary wodnej zawartej w gazie, przez co turbina jest narażona na szybszą erozję niż turbina „sucha”, której należy zapewnić

taką wartość temperatury gazu na dolocie by po rozprężaniu nie miało miejsce wykroplenie wody.



Rysunek 2: Instalacje turbin: TRT „wet” (z lewej) oraz TRT „dry” (z prawej)

Oznaczenia na rysunku 2: 1 – wielki piec, 2 – odpylacz, 3 – płuczka Venturiego, 4 – zawór obejściowy, 5 – turbina odzyskowa, 6 – generator, 7 – układ suchego oczyszczania gazu, 8 – zasuwa

1.6 Zalety turbin odzyskowych

Zdecydowaną zaletą turbiny odzyskowej jest to, że do jej pracy nie potrzeba żadnego dodatkowego paliwa (jako wyjątek można uznać układy, w których pewna część gazu wielkopieczowego zostaje spalona a następnie zmieszana z resztą gazu wielkopieczowego w celu podwyższenia temperatury mieszanki, a co za tym idzie jej entalpii właściwej). TRT to jedna z technologii, które pozwalają zmniejszyć energochłonność procesu wielkopieczowego. Turbiny te cechuje brak emisji CO₂, co stanowi kolejną zaletę – jest to technologia przyjazna środowisku. Kolejną zaletą turbiny, która wiąże się z jej drugą funkcją, którą jest utrzymywanie odpowiedniego ciśnienia w wielkim piecu, jest generowanie mniejszego hałasu niż w przypadku „tradycyjnego” rozwiązania zapewnienia odpowiedniego ciśnienia - sposobu z użyciem zasuwy (sluice valve) [13]. Technologię turbin odzyskowych charakteryzują niskie koszty inwestycyjne oraz znaczące korzyści ekonomiczne [15]. Koszty układu turbiny typu „wet” są niższe, a spodziewany czas zwrotu inwestycji podaje się jako 3,6 lat. Czas życia turbiny TRT jest długi. Turbiny te wykazują dużą odporność na proces abrazji [4].

1.7 Przykładowy katalog turbin TRT

Tabela 2: Turbiny mokre firmy Kawasaki [5]

Model turbiny	KSA-50H	KSA-70H	KSA-100H	KSA-140H
N_T , MW	5	7	10	14
$T_{1,max}$, °C			120	
$p_{1,max}$, MPa	0,22	0,25	0,25	0,3
T_{1d} , °C			55	
p_{1d} , MPa	0,12	0,15	0,18	0,22
p_{2d} , MPa			0,01	
φ_{1d} , (%)			100	
V_d (tyś. Nm ³ /h gazu suchego)	<430	300-500	420-630	510-730
n , 1/min			3000/3600	
Liczba stopni			2	

Tabela 3: Turbiny suche firmy Kawasaki [5]

Model turbiny	KDA-80H	KDA-125H	KDA-200H	KDA-315H
N_T , MW	8	12,5	20	31,5
$T_{1,max}$, °C			240	
$p_{1,max}$, MPa			0,3	
T_{1d} , °C			150	
p_{1d} , MPa	0,12	0,15	0,18	0,22
p_{2d} , MPa			0,01	
φ_{1d} , (%)			3	
V_d (tyś. Nm ³ /h gazu suchego)	270	360	520	680
n , 1/min			3000/3600	
Liczba stopni			2	

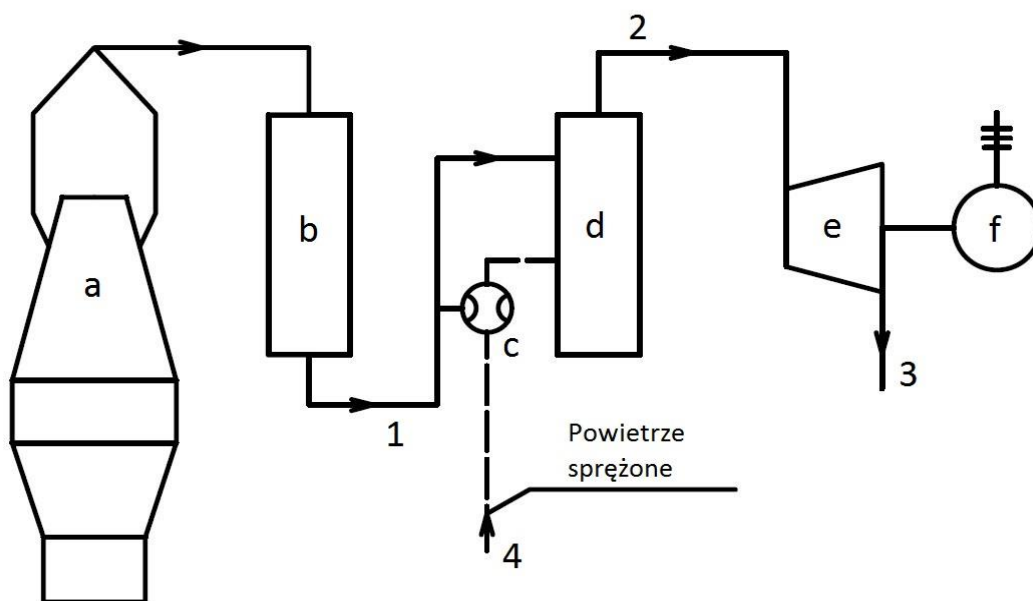
Wielkości użyte w Tabelach 1 i 2: N_T – moc turbiny, $T_{1,max}$ – maksymalna temperatura gazu dolotowego, $p_{1,max}$ – maksymalne ciśnienie gazu dolotowego, T_{1d} – projektowa temperatura gazu dolotowego, p_{1d} – projektowe ciśnienie gazu dolotowego, p_{2d} – projektowe ciśnienie gazu odlotowego, φ_{1d} – projektowa wilgotność gazu dolotowego, V_d – strumień suchego gazu wielkopieczowego, n – prędkość obrotowa

1.8 Turbiny odzyskowe na świecie

Technologia jest stosowana m.in. w Europie Zachodniej, Japonii i Chinach. Turbiny odzyskowe zostały zainstalowane we wszystkich największych wielkich piecach w Japonii [6]. Firma Kawasaki (będąca pionierem tego typu technologii) dostarczyła wiele jednostek TRT na całym świecie. Turbiny te zostały zainstalowane w takich krajach jak Japonia (26), Chiny (7), Taiwan (6), Brazylia (4), Korea (3), Stany Zjednoczone (2) (stan na wrzesień 2016). 18 z 22 turbin eksportowanych poza Japonię było turbinami typu „wet” [13]. Firma ArcelorMittal zastosowała turbiny TRT w 4 zakładach produkcyjnych. Wdrożenie spowodowało 3% obniżenie opłat za energię elektryczną przez ArcelorMittal Flat Carbon Europe [7]. Budowa układu turbiny TRT ma obecnie miejsce w firmie ArcelorMittal Poland w Dąbrowie Górniczej [16].

2 Układ turbiny suchej

2.1 Schemat obliczeniowy układu turbiny suchej i jego charakterystyka



Rysunek 3: Schemat obliczeniowy turbiny suchej

a - wielki piec, b - oczyszczalnia gazu (mokra), c - palnik strumienicowy, d - komora mieszania, e - turbina TRT, f - generator

Przedstawiony układ trudno dopasować do podziału turbin przedstawionego w rozdziale 1, gdzie układy turbin odzyskowych podzielono na mokre i suche. Jest to obiekt mieszany, gdyż łączy cechy obu układów. Sama turbina pracuje jako turbina sucha (wysoka temperatura gazu dopływającego do ekspandera, niska wilgotność względna na dolocie). Temperatura ta wyni-

ka ze spalania pewnej części gazu wielkopiecowego i zmieszania go z resztą gazu. Cechą różniącą ten układ od klasycznego rozwiązania jest obecność mokrej oczyszczalni gazu.

2.2 Dane wejściowe

Tabela 4: Dane użyte w obliczeniach dotyczących układu turbiny suchej

Dana	Wartość liczbowa	Jednostka
CO_2	12,5	%
CO	27,5	%
H_2	2,5	%
CH_4	0,2	%
N_2	57,3	%
\dot{n}	5,022	$kmol/s$
t_1	60	°C
p_1	0,22	MPa
φ_1	100	%
t_2	150	°C
p_2	0,22	MPa
p_3	0,11	MPa
$t_4 = t_{ot}$	10	°C

2.3 Przyjęte założenia

W obliczeniach przyjęto następujące założenia:

- Gaz zachowuje się jak gaz półdoskonały,
- Gazy mieszają się przeponowo,
- Spalanie jest zupełne i przebiega przy $\lambda=1$,
- Straty ciepła do otoczenia w instalacji są pomijalnie małe,
- Energję elektryczną wyprodukowaną w rozpatrywanym układzie zużywa się całkowicie w hucie,
- Powietrze doprowadzane do układu jest suche,
- Sprawność wewnątrz turbiny odzyskowej wynosi $\eta_i=0,8$, a sprawność mechaniczno-elektryczna $\eta_{me}=0,95$,
- Sprawność energetyczna elektrowni kondensacyjnej zastąpionej częściowo przez instalację turbiny TRT $\eta_{El}=0,34$.

2.4 Algorytm obliczeń

Algorytm obliczeń oparto o metodykę zamieszczoną w [2]. Strumień spalanego gazu wielkopiecowego w palniku strumienicowym wyznaczono z bilansu energii (1). Wewnątrz osłony bilansowej znalazł się palnik wraz z mieszalnikiem.

$$\Delta\dot{n} \cdot W_d + \dot{n} \cdot i_{g1} + \Delta\dot{n} \cdot v'_a \cdot i_4 = (\dot{n} - \Delta\dot{n}) \cdot i_{g2} + \Delta\dot{n} \cdot \sum_i v''_i \cdot i_{i2} \quad (1)$$

Entalpia powietrza w równaniu (1) wynosi 0 kJ/kg, ponieważ za temperaturę odniesienia przyjęto temperaturę otoczenia. Z równania bilansu energii (1) można obliczyć strumień spalanego gazu $\Delta\dot{n}$, a następnie wskaźnik ζ (2), określający stosunek strumienia gazu spalanego w palniku strumienicowym do strumienia gazu produkowanego w procesie wielkopieczowym.

$$\zeta = \frac{\Delta\dot{n}}{\dot{n}} \quad (2)$$

Wyznaczono wielkości v'_i w celu użycia ich w równaniach opisujących stechiometrię spalania.

$$v'_C = CO_2 + CO + CH_4 \quad (3)$$

$$v'_{H_2} = H_2 + 2 \cdot CH_4 \quad (4)$$

$$v'_{N_2} = N_2 \quad (5)$$

$$v'_{O_2} = CO_2 + 0,5 \cdot CO \quad (6)$$

$$v'_a = \frac{v_{O_2min}}{0,21} \quad (7)$$

Wartości wielkości v''_i będące liczbą kilomoli i-tego składnika spalin odniesioną do 1kmola gazu spalanego w palniku obliczono z równań stechiometrii spalania (8-10).

$$v'_C = v''_{CO_2} \quad (8)$$

$$v'_{H_2} + X_{zg} = v''_{H_2O} \quad (9)$$

$$v'_{N_2} + 0,79 \cdot v'_a = v''_{N_2} \quad (10)$$

Moc elektryczną turbiny odzyskowej obliczono według zależności (11).

$$N_{el} = \dot{n} \cdot (i_2 - i_3) \cdot \eta_{me} \quad (11)$$

Wartość entalpii i_3 obliczono z wzoru (12) opisującego sprawność wewnętrzną turbiny.

$$i_3 = i_2 - \eta_i \cdot (i_2 - i_{3s}) \quad (12)$$

Temperaturę t_{3s} oblicza się iteracyjnie z warunku stałej entropii (13)

$$s_{p2} - s_{p3s} = R_u \cdot \ln \frac{p_2}{p_3} \quad (13)$$

$$i_2 = (1 - \zeta) \cdot i_{g2} + \zeta \cdot \sum_i v''_i \cdot i_{i2} \quad (14)$$

$$s_{p2} = (1 - \zeta) \cdot s_{pg2} + \zeta \cdot \sum_i v''_i \cdot s_{pi2} \quad (15)$$

Wartość zużycia energii chemicznej \dot{E}_{ch2} w instalacji turbiny odzyskowej oblicza się według zależności (16).

$$\dot{E}_{ch2} = \Delta \dot{n} \cdot W_d \quad (16)$$

Aby wyznaczyć zużycie energii chemicznej \dot{E}_{ch1} jakie musiałyby wystąpić w elektrowniach zawodowych by pokryć produkcję energii elektrycznej przez rozpatrywaną turbinę TRT należy założyć wartości sprawności energetycznej elektrowni kondensacyjnej η_{Eel} , sprawności przesyłania i transformacji energii elektrycznej dostarczanej do huty η_p . Ostatecznie \dot{E}_{ch1} wyznacza się z zależności (17).

$$\dot{E}_{ch1} = \frac{1}{\eta_p \cdot \eta_{Eel}} \cdot \dot{n} \cdot (i_2 - i_3) \cdot \eta_{me} \quad (17)$$

Znając wartości wielkości \dot{E}_{ch1} i \dot{E}_{ch2} można wyznaczyć strumień zaoszczędzonej energii chemicznej z zależności (18).

$$-\Delta \dot{E}_{ch} = \dot{E}_{ch1} - \dot{E}_{ch2} \quad (18)$$

Ponadto korzystając z równania (19) obliczono wskaźnik zużycia energii chemicznej, określający stosunek zużycia energii chemicznej w układzie turbiny do mocy elektrycznej układu.

$$e_{ch} = \frac{\dot{E}_{ch2}}{N_{el}} \quad (19)$$

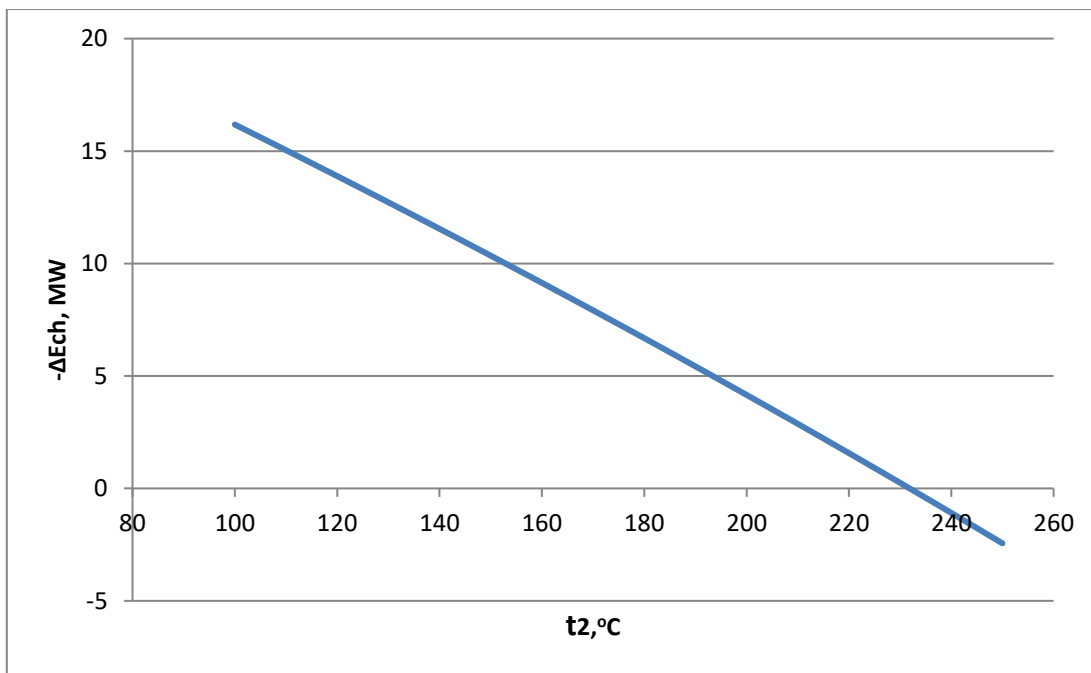
2.5 Zestawienie wyników obliczeń

Tabela 5: Wyniki obliczeń dotyczących turbiny suchej

Wielkość	Wartość	Jednostka
ζ	3,7	%
N_{el}	8,559	MW
$-\Delta \dot{E}_{ch}$	10,348	MW
e_{ch}	1,855	-
i_2	4837	kJ/kmol
i_3	3043	kJ/kmol
t_{3s}	85,6	°C

2.6 Wpływ temperatury t_2 na oszczędność energii chemicznej paliwa

Zauważono istotny wpływ temperatury t_2 na strumień zaoszczędzonej energii chemicznej w krajowej gospodarce energetycznej $-\Delta\dot{E}_{ch}$. Wraz ze wzrostem wartości temperatury t_2 , wartość $-\Delta\dot{E}_{ch}$ maleje. Zatem jeśli celem jest stworzenie jednostki wytwórczej charakteryzującej się możliwie wysoką oszczędnością energii chemicznej należy spalać mniejsze ilości gazu wielkopieczowego w palniku by temperatura przed turbiną nie była zbyt wysoka. Istnieje progowa wartość temperatury na dolocie do turbiny, powyżej której analizowany układ zużywa więcej energii chemicznej na jednostkę produkowanej energii elektrycznej niż kondensacyjna elektrownia odniesienia. Wynosi ona 232°C . Jest to dość wysoka wartość temperatury. Przykładowo dla turbin Kawasaki [5] maksymalna wartość temperatury t_2 wynosi 240°C więc jest ona bliska otrzymanej wartości progowej. Zatem turbina sucha w przedstawionym układzie charakteryzuje się pracą przy $-\Delta\dot{E}_{ch} > 0$ niemal w całym zakresie pracy maszyny zakładając maksymalną wartość t_2 wg [5]. Zależność $-\Delta\dot{E}_{ch} = f(t_2)$ przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4: Zależność strumienia zaoszczędzonej energii chemicznej paliwa od temperatury t_2

2.7 Minimalna temperatura t_2 na dolocie do turbiny

W układzie turbiny odzyskowej suchej spalanie pewnej ilości gazu ζ nie wynika głównie z chęci podwyższenia mocy turbiny. Podgrzew ma na celu przede

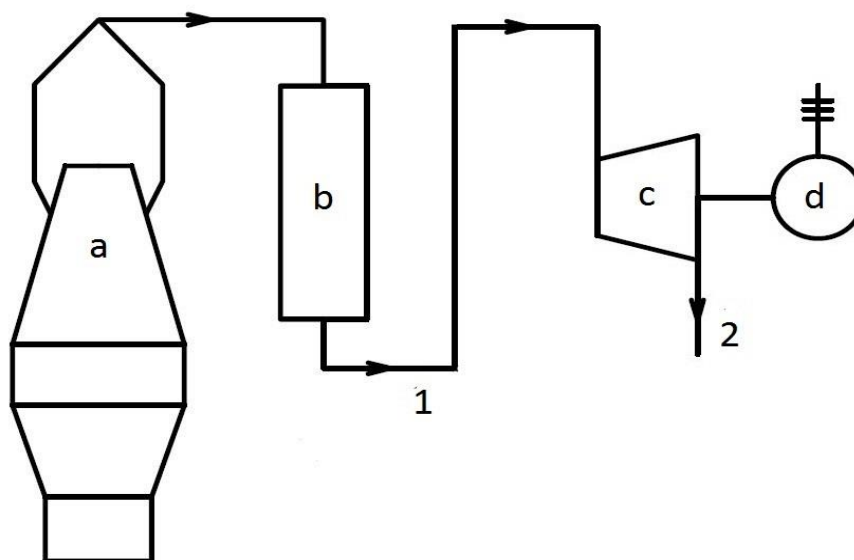
wszystkim zapobiegnięciu wykroplenia się kropeł wody podczas ekspansji. Okazuje się, że podwyższanie temperatury gazu przed turbiną w ten sposób nie jest efektywne energetycznie. Powinno się stosować tylko podgrzew zapobiegający uzyskaniu temperatury poniżej temperatury punktu rosy na wylocie z turbiny [3]. W związku z tym korzystając z warunku $t_3 = t_s(p_{h2o,3})$ wyznaczono minimalną wartość temperatury $t_2=91^\circ\text{C}$ w układzie zapewniającą brak wykroplenia wody podczas rozprężania oraz charakterystyczne wielkości pracy układ w tych warunkach. Wyniki zestawiono w Tabeli 6.

Tabela 6: Wyniki obliczeń dotyczących turbiny suchej dla $t_2=91^\circ\text{C}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
N_{el}	7,360	MW
$-\Delta\dot{E}_{ch}$	17,193	MW
e_{ch}	0,7289	-
ζ	1,26	%

3 Układ turbiny mokrej

3.1 Schemat obliczeniowy układu turbiny mokrej i jego charakterystyka



Rysunek 5: Schemat obliczeniowy turbiny mokrej

a - wielki piec, b - oczyszczalnia gazu (mokra), c - turbina TRT, d - generator

Przedstawiony układ jest typowym układem turbiny odzyskowej mokrej. Wskazuje na to m.in. niska temperatura na dolocie do ekspandera oraz obecność mokrej oczyszczalni gazu, przez co gaz wielkopiecowy jest nasycony wilgocią.

3.2 Dane wejściowe

Tabela 6: Dane użyte w obliczeniach dotyczących układu turbiny mokrej

Dana	Wartość liczbowa	Jednostka
CO_2	12,5	%
CO	27,5	%
H_2	2,5	%
CH_4	0,2	%
N_2	57,3	%
\dot{n}	5,022	kmol/s
t_1	60	°C
p_1	0,22	MPa
φ_1	100	%
p_2	0,11	MPa

3.3 Przyjęte założenia

W obliczeniach przyjęto następujące założenia:

- Gaz zachowuje się jak gaz doskonały,
- Straty ciepła do otoczenia w instalacji są pomijalnie małe,
- Energję elektryczną wyprodukowaną w rozpatrywanym układzie zużywa się całkowicie w hucie,
- Sprawność wewnątrz turbiny odzyskowej wynosi $\eta_i=0,8$, a sprawność mechaniczno-elektryczna $\eta_{me}=0,95$,
- Sprawność energetyczna elektrowni kondensacyjnej zastąpionej częściowo przez instalację turbiny TRT $\eta_{El}=0,34$.

3.4 Algorytm obliczeń

Korzystając warunku stałej entropii $\Delta s=s_{2s}-s_1=0$ (20) [2] wyznaczono temperaturę T_{2s} po izentropowym rozprężeniu gazu w turbinie.

$$\Delta s = (cp_g + X_1''cp_{h_2o}) \ln \frac{T_1}{T_{2s}} - R \left(\ln \frac{p_1 - p_{n1}}{p_2 - p_{n2}} + X_1'' \ln \frac{p_{n1}}{p_{n2}} + (X_1'' - X_2'') \left[\frac{r_0}{T_0} - (cp_w - cp_{h_2o}) \ln \frac{T_{2s}}{T_0} - R \ln \frac{p_{n2}}{p_{n0}} \right] \right) \quad (20)$$

Następnie znając wartość temperatury T_{2s} po izentropowej ekspansji przystąpiono do wyznaczenia jednostkowej pracy wewnętrznej rozprężania gazu l_i (21) [2].

$$l_i = \left\{ \begin{array}{l} (cp_g + X_1'')(T_1 - T_{2s}) + \\ + (X_1'' - X_2'')[r_0 - (cp_w - (cp_{h_2o})(T_{2s} - 273,15))] \end{array} \right\} \eta_i \quad (21)$$

Moc elektryczną turbiny odzyskowej określa zależność (22).

$$N_{el} = \dot{m} l_i \eta_{me} \quad (22)$$

3.5 Zestawienie wyników obliczeń

Tabela 7: Wyniki obliczeń dotyczących turbiny mokrej

Wielkość	Wartość	Jednostka
N_{el}	7,697	MW
$-\Delta \dot{E}_{ch}$	23,58	MW
l_i	55,02	kJ/kg
t_{2s}	39,6	°C

4 Podsumowanie i wnioski końcowe

Każdy proces technologiczny powinien być przeprowadzany w możliwie tak by energia napędowa, która stanowi nakład była wykorzystywana w jak największym stopniu. Powinno się dążyć do zwiększenia stopnia wykorzystania energii napędowej jeśli towarzyszą temu korzyści ekonomiczne i pozwalają możliwości techniczne. Jednym ze sposobów podwyższenia efektywności prowadzonego procesu jest wykorzystanie tzw. energii odpadowej. Jest to energia, która jest odprowadzana do otoczenia, charakteryzująca się stosunkowo wysoką egzergią, zatem mającą potencjał do wykorzystania w sposób uzasadniony ekonomicznie. Użyteczność nośnika energii odpadowej może wynikać z jego własności fizycznych (np. temperatura lub/i ciśnienie gazów odlotowych wyższe od parametrów otoczenia) lub własności chemicznych (np. energia chemiczna gazów odlotowych). Proces wielkopiecowy jest procesem, który charakteryzuje podwyższone ciśnienie gazów odlotowych. Jest to spowodowane wysokim ciśnieniem wewnątrz układu, które utrzymuje się dla uzyskania korzystnych warunków (pod względem termodynamicznym) dla przebiegu procesu. Przeprowadzenie procesu dławienia gazu wielkopiecowego jest niekorzystne, ponieważ dławienie jest procesem generującym znaczne straty egzergii. W związku z niedoskonałością takiego rozwiązania i egzergią fizyczną gazu wielkopiecowego wynikającą z jego podwyższonego ciśnienia, która może być wykorzystana do wytworzenia energii elektrycznej powstała koncepcja turbiny odzyskowej TRT.

Jest to maszyna, we wnętrzu której gaz wielkopiecowy rozpręża się – w wyniku czego wykonuje pracę. Maszyna sprzężona z generatorem służy produkcji energii elektrycznej.

Istnieją 2 typy turbin odzyskowych – „mokra” (TRT wet) i „sucha” (TRT dry). Turbina sucha może osiągnąć wyższe moce niż turbina mokra (dla temperatury na dolocie do turbiny wg [5] moc wyższą o 11%). Turbiny „mokre” występują w układach z mokrą oczyszczalnią gazu, a sam gaz wielkopiecowy nie jest spalany w żadnym punkcie układu. Z uwagi na nasycenie gazu wilgocią następuje wykroplenie gazu podczas całego procesu ekspansji. Z kolei turbina „sucha” cechuje się wyższymi wartościami temperatury dolotowej niż turbina „mokra”. Na tyle wysoką, aby na jej wylocie nie wystąpiło wykroplenie wody. Może występować w układach z suchą oczyszczalnią gazu lub w układach z mokrą oczyszczalnią, choć w takim przypadku należy zastosować spalenie pewnej ilości produkowanego gazu wielkopiecowego a następnie zmieszanie go z pozostałą jego częścią, aby uzyskać na tyle wysoką temperaturę dolotową by w turbinie nie wykropliła się woda. Z punktu widzenia doskonałości termodynamicznej należy spalać możliwie jak najmniejsze ilości produkowanego gazu. W projekcie inżynierskim przeprowadzono obliczenia dotyczące układów obu turbin (w przypadku obu instalacji zastosowano mokrą oczyszczalnię gazu). Obliczono wielkości charakteryzujące pracę turbiny jak np. moc elektryczna oraz wielkości opisujące oszczędności wynikające z instalacji turbin, np. $-\Delta\dot{E}_{ch}$ będące strumieniami zaoszczędzonej energii chemicznej w krajowej gospodarce energetycznej.

Zaletą analizowanego układu turbiny „suchej” jest możliwość zmiany mocy, z jaką pracuje turbina (przez zwiększenie strumienia gazu kierowanego do palnika) przy jednoczesnym zachowaniu oszczędności chemicznej paliwa względem elektrowni odniesienia, choć wraz ze zwiększaniem ilości spalanego gazu ta oszczędność maleje. Turbina ta nie jest narażona aż tak znacząco na procesy niszczenia jak turbina „mokra” z powodu braku wykroplenia wody w maszynie. Wadą układu turbiny „dry” względem układu turbiny „wet” jest jego większa złożoność, przez co układ jest droższy i wykazuje się potencjalnie większą awaryjnością.

Instalacja obu turbin przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂ w krajowej gospodarce energetycznej. Jest to związane z oszczędnościami energii chemicznej względem elektrowni odniesienia, czyli brakiem spalania oszczędzonej ilości paliwa, a więc uniknięciem emisji CO₂. Jako, że turbina „mokra” cechuje się wyższymi oszczędnościami energii chemicznej niż turbina „sucha” (2,3 razy większą dla temperatury dolotowej do turbiny wg [5] oraz 1,4 razy większą w przypadku zastosowania minimalnej temperatury podgrzewu gazu by zapobiec wykropleniu wody w maszynie) jest to rozwiązanie korzystniejsze pod względem ekologicznym. W rozdziale 2 wspomniano, że spalanie gazu wielkopiecowego, a następnie zmieszanie go z resztą produkowanego gazu nie jest korzystne pod względem termodynamicznym, zatem tego rodzaju niedoskonałość termodynamiczna nie występuje tutaj. Układ turbiny „mokrej” jest układem cechującym się prostotą konstrukcji, jest tańszy inwestycyjnie niż układ turbiny

suchej jak i jest mniej awaryjny. Niestety procesy niszczenia w tej turbinie są intensywniejsze niż w turbinie „suchej” z powodu wykroplenia wody w maszynie. Termodynamicznie lepszym rozwiązaniem jest układ turbiny mokrej.

W projekcie inżynierskim przedstawiono obliczenia związane z obu układami i wskazano na różnice wynikające z ich budowy, parametrów pracy, potencjału zmniejszenia emisji CO₂ i oszczędności energii chemicznej względem kondensacyjnej elektrowni odniesienia. Aby ostatecznie stwierdzić, który układ jest korzystniejszy należy przeprowadzić analizę w całym cyklu istnienia obu układów i wynikające z ich instalacji korzyści ekonomiczne i ekologiczne.

Literatura

- [1] S. Shanthi Priya, R.G.Patil, BF gas utilization and power generation in steel plant using TRT, 2014
- [2] J. Szargut (red.), Zbiór zadań z gospodarki cieplnej. Skrypt Uczelniany Pol. Śl. w Gliwicach nr 1020. Wyd. Pol. Śl. Wyd. 3. Gliwice 1981.
- [3] J. Szargut, A. Ziębik, Podstawy energetyki cieplnej, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1998
- [4] Technologies customized list & Technologies one by one sheets for Technology Transfer to Indian Iron and steel industry with regard to energy, dostęp 03.12.2017
<http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/eco/docs/IndiaTechnologiesCustomizedListv2.pdf>,
dostęp 03.12.2017
- [5] Strona internetowa firmy Kawasaki:
<http://global.kawasaki.com/en/energy/equipment/blast.html>, dostęp 03.12.2017
- [6] Strona internetowa firmy Kawasaki:
http://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/20120110_1.html, dostęp 03.12.2017
- [7] Wydawnictwo firmy ArcelorMittal:
http://flateurpe.arcelormittal.com/repository2/fce/Brochures/PL_UpdateFCE_Nov12.pdf,
dostęp 03.12.2017
- [8] Strona internetowa ArcelorMittal Poland
<http://poland.arcelormittal.com/produkty/proces-produkcyjny/jak-powstaje-stal.html>,
dostęp 03.12.2017
- [9] <http://student.agh.edu.pl/~kgodlews/procwielkopic.html>, dostęp 03.12.2017
- [10] http://home.agh.edu.pl/~zmsz/en/pliki/Technologia_i_Podstawy_Sterowania_Procesami_Redukcji.pdf,
dostęp 03.12.2017
- [11] <http://bc.pollub.pl/Content/8711/metalurgia.pdf>, dostęp 03.12.2017
- [12] https://www.mos.gov.pl/fileadmin/introduction/images/15_BAT_w_produkcyjnej_zelaza_i_stali.pdf,
dostęp 03.12.2017

- [13] https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron_steel/S-08.pdf dostęp 03.12.2017
- [14] <https://www.ctc-n.org/products/top-pressure-recovery-turbine-trt> dostęp 03.12.2017
- [15] <http://www.nhiindiainternational.in/trt-blast-furnace-gas-turbine.htm> dostęp 03.12.2017
- [16] http://energetyka.wnp.pl/arcelormittal-w-dabrowie-buduje-nowoczesna-turbine,278181_1_0_0.html, dostęp 03.12.2017

Thermodynamic analysis of blast furnace gas exergy usage in wet and dry recovery turbine

Łukasz Nyżnyk

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska
e-mail: lukasznyznyk@gmail.com

Key words: blast furnace, exergy, waste energy, TRT recovery turbine, metallurgy

Abstracts

Blast furnace process is still most popular steel production method in the world, so it is important to make it less energy-intensive and less harmful for environment. This thesis shows algorithm and results of calculations for both variants of blast furnace gas exergy usage – dry recovery turbine (layout with wet gas cleaning system and ejector burner) and wet recovery turbine. Both technologies were compared for the direct benefit of turbine (electricity generation) and ecological benefits (reduction of CO₂ emission). The results of the calculations show that the use of both technologies affects the energy savings of the national energy economy and the reduction of CO₂ emissions relative to the condensing power plant which efficiency of electricity generation and transmission were assumed. More complex analysis is showed in Chapter 4.