

# Modelowanie i konfiguracja układów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła z gazu, z podziemnego zgazowania węgla brunatnego

Piotr MOCEK, Marek BIENIECKI\* – Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2014, 68, 12, 1040–1055

## Wstęp

Badania energetycznego wykorzystania gazu z procesu podziemnego zgazowania węgla kamiennego prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa umożliwiają określenie podstawowych elementów urządzeń i optymalnych układów procesu konwersji energii. Stanowi to główny element analizy sensowności inwestycji w daną technologię energetycznego wykorzystania gazu z PZW. W rezultacie prac możliwe jest takie skonfigurowanie obiegu, aby w jak najbardziej efektywny sposób wykorzystać energię węgla w złożu z wytworzeniem odpowiednich ilości mocy cieplnej i energetycznej. Analiza tego typu stanowi wstęp do realizacji procesu w układzie pilotowym, lub instalacji przemysłowej.

Z uwagi na specyfikę procesu podziemnego zgazowania węgla zastosowane urządzenia często muszą zostać w sposób specjalny dopasowane do procesu energochemicznej konwersji w złożu węgla.

Celem publikacji jest przedstawienie wybranych wyników analiz obliczeniowych konwersji energii energetycznej gazu z procesu podziemnego zgazowania węgla. Gaz jest oczyszczany a następnie spalany w atmosferycznych komorach spalania. Obieg energochemiczny wykorzystywany jest do skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Zaprezentowano wyniki badań dwóch rozwiązań obiegów energochemicznych: **obieg I** – połączenie podziemnego zgazowania węgla z obiegiem Rankine'a i turbiną przeciwprężną wyposażoną w jeden upust regulowany, oraz **obieg II** – składa się z instalacji zgazowania, oczyszczania oraz obiegu parowo-gazowego, z tym, że obieg gazowy jest zasilany energią spalin pośrednio ogrzewających powietrze z kompresora w układzie rekuperacji. Dla każdego z wariantów przeprowadzono obliczenia dla wariantu A – wytwarzania maksimum mocy elektrycznej oraz B – wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

## Stosowane metody badawcze

W ramach opisywanych w artykule prac opierano się na modelu obliczeniowym bazującym na „metodzie entalpowej” i bilansowaniu poszczególnych węzłów instalacji z wykorzystaniem arkusza Excel i wielokrotnych wywoływaniach operacji SOLVER w jednym arkuszu (co umożliwiło optymalizację procesów konwersji węgla w złożu). Zastosowany model rozbudowany o procedury własne opiera się na bazach danych, i tak: w zakresie danych termodynamicznych mieszanin gazowych poza parą wodną bazowano na bazie danych JANAF [1]; w zakresie danych termofizycznych pary wodnej o parametrach ciśnienia w zakresie od 5 do 50 MPa zastosowano bazę danych stworzoną w oparciu o dane zawarte w [2]; dla niższych wartości ciśnień oparto się na pracach [3]. Do obliczeń symulacyjnych wykorzystano program Cycle Tempo 5.1 [4]. Program ten umożliwia analizę energetyczną i optymalizację obiegów energetycznych. Przyjęto następujące główne założenia do modelowania:

1. Wszystkie urządzenia analizowanych obiegów, to znaczy: instalacja wytwarzania tlenu (ASU – Air Separation Unit) rurociągi doprowadzające utleniacz i odprowadzające gaz procesowy, instalacja zga-

zowania, układy oczyszczania i układ energetycznej konwersji gazu z PZW są elementami obiegu. Takie podejście umożliwia analizę wykorzystania entalpii fizycznej gazu z PZW.

2. Parametry związane ze spadkami ciśnienia w instalacji zostały określone w trakcie realizacji badań i projektowania obiektu pilotażowego [5].
3. W przypadku instalacji oczyszczania gazów jednostkowe zapotrzebowanie energii i opory przepływu przyjęto wskaźnikowo uwzględniając analizę całego ciągu technologicznego oczyszczania. Wartości te są funkcją wielkości strumienia gazu z PZW i wymaganego stopnia jego oczyszczenia.
4. W analizie energetycznej obiegów wyznaczane są trzy grupy sprawności:
  - a. sprawności procesu podziemnego zgazowania wraz z energetyczną konwersją energii uzyskanego gazu, w grupie których określono:
    - sprawność wytwarzania energii rozumianej jako stosunek wytworzonego strumienia energii użytecznej (energia elektryczna, ciepło) w całym analizowanym układzie, obejmującym instalację dostarczania substratów, proces podziemnego zgazowania, instalację oczyszczania gazu z PZW i instalację energetycznej jego konwersji.

Zgodnie z takim podejściem, sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto  $\eta_{b,el}$ , zdefiniowano jako stosunek mocy wyznaczonych na zaciskach wszystkich generatorów elektrycznych  $\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto}$ , odniesionej do strumienia entalpii chemicznej zgazowanego węgla (zdefiniowanego za pomocą iloczynu wartości opalowej  $W_{dc}$  i strumienia węgla  $\dot{m}_c \dot{m}_c W_{dc}$ )

$$\eta_{b,el} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto}}{\dot{m}_c W_{dc}} \quad (1)$$

Sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto  $\eta_{netto,el}$ , wyznaczono uwzględniając pomniejszenie mocy na zaciskach generatorów (licznik ułamka we wzorze (1)) o potrzeby własne instalacji (pompy, wentylatory, separacja tlenu, itd.)  $\sum_{j=1}^m N_{el,j,pw}$ .

$$\eta_{netto,el} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto} - \sum_{j=1}^m N_{el,j,pw}}{\dot{m}_c W_{dc}} \quad (2)$$

Sprawność wytwarzania mocy termicznej  $\eta_{th}$ , określono jako stosunek uzyskanej (obliczonej w toku analiz) mocy termicznej  $N_{th}$  do strumienia entalpii chemicznej zgazowanego węgla

$$\eta_{th} = \frac{N_{th}}{\dot{m}_c W_{dc}} \quad (3)$$

Sprawność całkowitą wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w obiegu energochemicznym będącą odniesieniem sumy całkowitej wyznaczonej mocy energii elektrycznej netto i mocy cieplnej do strumienia entalpii chemicznej zgazowanego węgla, co przekłada się na wyrażenie

$$\eta = \eta_{netto,el} + \eta_{th} \quad (4)$$

Autor do korespondencji:

Mgr inż. Marek BIENIECKI, e-mail: marekbieniecki@gig.eu

b. sprawności procesu podziemnego zgazowania wraz z energetyczną konwersją energii oczyszczonego gazu z PZW, z uwzględnieniem jego entalpii chemicznej i fizycznej, w grupie których określono:

- sprawność wytwarzania energii elektrycznej z uwzględnieniem entalpii fizycznej gazu z PZW po jego oczyszczeniu. Jest to stosunek wartości wytworzonego strumienia energii do strumienia entalpii niesionej w oczyszczonym gazie z PZW i powietrza podgrzanego w obiegu rekuperacji. W konsekwencji zależności (1) ÷ (4) przyjmują postać:  
Sprawność konwersji energii brutto w układzie termochemicznym

$$\eta_{b,el,PZW} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto}}{\dot{m}_{PZW}(W_{dPZW} + i_{f,PZW}) + \dot{m}_a i_{f,a}} \quad (5)$$

gdzie  $\dot{m}_a i_{f,PZW}$  to strumień nadwyżki entalpii fizycznej gazu z PZW, zaś  $\dot{m}_a i_{f,a}$  to strumień entalpii fizycznej powietrza podgrzanego w układzie odzyskowym.

Sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto

$$\eta_{netto,el,PZW} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto} - \sum_{j=1}^m N_{el,j,pw}}{\dot{m}_{PZW}(W_{dPZW} + i_{f,PZW}) + \dot{m}_a i_{f,a}} \quad (6)$$

Sprawność wytwarzania ciepła

$$\eta_{th,PZW} = \frac{N_{th}}{\dot{m}_{PZW}(W_{dPZW} + i_{f,PZW}) + \dot{m}_a i_{f,a}} \quad (7)$$

Sprawność skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w układzie energochemicznym

$$\eta_{PZW} = \eta_{netto,el} + \eta_{th} \quad (8)$$

c) sprawność wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w wyniku konwersji energii oczyszczonego gazu z PZW w instalacji powierzchniowej, bez uwzględnienia powiązań energetycznych z układem zgazowania i oczyszczania gazu; jest to układ odpowiadający elektrociepłowni gazowej zasilanej gazem sieciowym.

Sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto

$$\eta_{b,el,g} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto}}{\dot{m}_{PZW} W_{dPZW}} \quad (9)$$

Sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto:

$$\eta_{netto,el,g} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{el,i,brutto} - \sum_{j=1}^m N_{el,j,pw}}{\dot{m}_{PZW} W_{dPZW}} \quad (10)$$

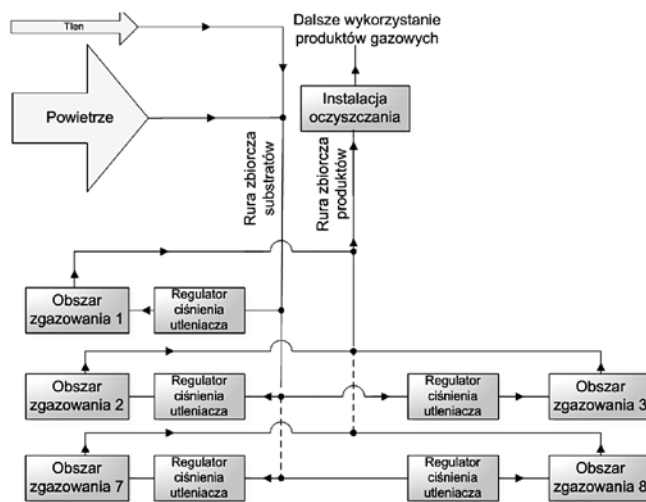
Sprawność wytwarzania ciepła

$$\eta_{th,g} = \frac{N_{th}}{\dot{m}_{PZW} W_{dPZW}} \quad (11)$$

Sprawność wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu

$$\eta_g = \eta_{netto,el,g} + \eta_{th,g} \quad (12)$$

5. W modelu przyjęto, że zgazowywany jest pojedynczy obszar. W praktyce, w przemysłowej instalacji konwersji energii gazu z PZW, konieczne będzie prowadzenie zgazowania równocześnie w kilku georeaktorach (kilku instalacjach podziemnego zgazowania) z odpowiednim układem regulacji (Rys. 1). W analizach przyjęto uproszczenie w postaci pojedynczego reaktora (georeaktora) zgazowania, co nie wpływa na wyniki obliczeń układów statycznych.



Rys. 1. Sposób połączenia kilku georeaktorów zgazowania [5]

6. Temperatura produktów zgazowania opuszczających część podziemną – przyjęto 350°C. Wartość ta wynika z opracowanej w Głównym Instytucie Górnictwa technologii prowadzenia procesu [5,6]. Stosunkowo niewielka długość podziemnych odcinków rurociągów PZW brunatnego i ich konfiguracja spowodują, że gaz opuszczający część podziemną będzie charakteryzował się większą energią, niż ma to miejsce w przypadku podziemnego zgazowania węgla kamiennego.
7. Przyjęto niską temperaturę spalin opuszczających obiegi. Obecnie materiały, technologie i wiedza związana z kondensacją wody i kwaśnych składników spalin pozwalają na uzyskiwanie wysokich stopni ich schłodzenia. Założono, że temperatura spalin za ostatnim stopniem niskotemperaturowego wymiennika ciepła wyniesie 55–60°C.
8. Przyjęto moc elektryczną netto analizowanych układów rzędu  $N_{el} \approx 20$  MW.
9. Skład węgla w złożu zgazowywanym, uwzględniony w analizach obliczeniowych przedstawiono w Tabelcy I.

Tabelca I

Skład węgla brunatnego, dla którego prowadzone były analizy obliczeniowe

Skład pierwiastkowy węgla	Stan powietrzno- suchy, a	Stan roboczy, r
C	50,7	28,16
H	3,9	2,17
N	1,3	0,72
S	1,9	1,06
A	8,4	4,67
W	14,5	52,5
O	19,3	10,72
Wartość opałowa $W_g$ , kJ/kg	18 881	12 247

Opisany w Tabelcy I węgiel w stanie roboczym zawiera dużo wilgoci. Jego autotermiczne zgazowanie w złożu z dodatkiem powietrza, jako czynnika zgazowującego nie jest w takim układzie możliwe. W procesie powinno się zatem wzbogacać powietrze w tlen, co istotnie wpływa na potrzeby własne urządzeń zgazowania.

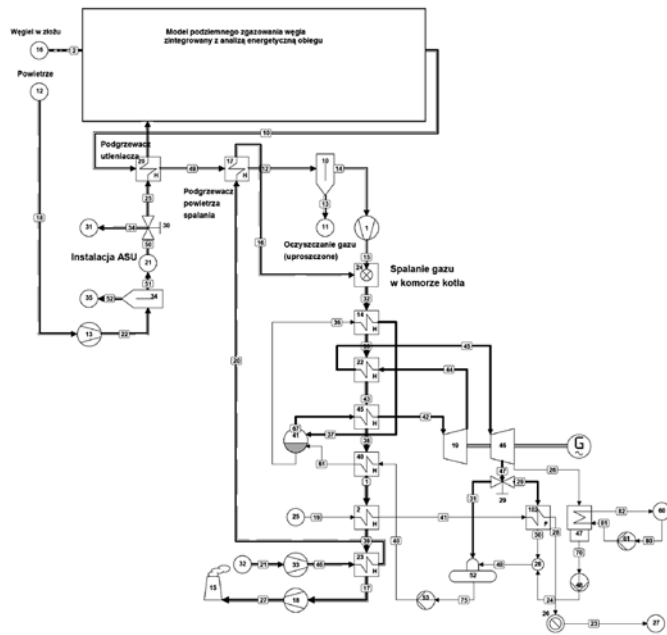
10. W obliczeniach przyjęto jako jedyną metodę zgazowania, konwersję węgla w strumieniu tlenu technicznego pochodzącego z instalacji produkcji tlenu. Dane dotyczące instalacji ASU zaczerpnięto z dostępnych danych producenta [6].

Zaprezentowano wyniki badań dwóch rozwiązań obiegów energochemicznych: **obieg I** – połączenie podziemnego zgazowania węgla z obiegiem Rankine'a i turbiną przeciwną wyposażoną w jeden

upust regulowany, oraz **obieg II** – składający się z instalacji zgazowania, oczyszczania gazu z PZW oraz obiegu parowo-gazowego, z tym, że obieg gazowy jest zasilany energią spalin pośrednio ogrzewających powietrze z kompresora w układzie rekuperacji. Dla każdego z wariantów przeprowadzono obliczenia dla wariantu A – wytwarzania maksimum mocy elektrycznej oraz B – wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

**Układ wytwarzania energii z wykorzystaniem obiegu I (parowego)**

Na Rysunku 2 zamieszczono schemat rozpatrywanego obiegu I. Część opisująca proces podziemnego zgazowania węgla została uproszczona, z uwagi na fakt, iż nie jest on przedmiotem prezentowanych badań.



Rys. 2. Schemat połączonego układu energetycznego wytwarzania energii z gazu pochodzącego ze zgazowania węgla brunatnego – obieg I

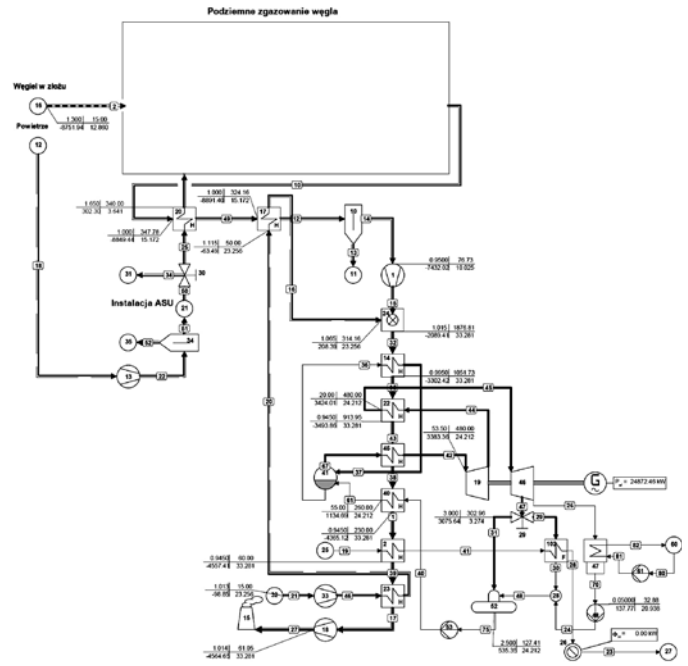
**Opis obiegu I**

Węgiel w złożu (16) ulega zgazowaniu w strumieniu tlenu technicznego (25) wytworzonego w instalacji ASU. Powietrze do instalacji separacji gazów dostarczane jest z otoczenia (12). Gaz uzyskiwany w procesie zgazowania przesyłany jest rurociągiem odbiorczym (10). Temperatura gazu z PZW opuszczającego część podziemną wynosi ok. 350°C. Surowy gaz z PZW podgrzewa tlen za ASU w wymienniku ciepła (20), oraz powietrze doprowadzane do spalania w wymienniku ciepła (17). W rozpatrywanym układzie funkcjonalnym, do komory spalania (24) nie można doprowadzać gorącego gazu z uwagi na konieczność jego wcześniejszego oczyszczenia, sprężenia a także uwarunkowania przepisów dotyczących bezpiecznej eksploatacji, które wymagają zastosowania przerywacza dla mogącego się cofnąć z komory spalania płomienia. Powietrze podgrzane w wymienniku (17) i gaz z PZW za dmuchawą (1) spalane jest w komorze spalania (kotle) (24) z liczbą nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,1$ . Produkty spalania o temperaturze maksymalnej 1900°C omywają pęczki parowacza (14), przegrzewacza przegrzewu wtórnego (22) i przegrzewu pierwotnego (45) a następnie przepływają przez podgrzewacz wody (40), podgrzewacz wstępny wody obiegu grzewczego (2) i podgrzewacz wstępny powietrza podawanego do spalania (23). Ostatnie stopnie podgrzewaczy wykonane są z materiałów odpornych na korozję – z uwagi na zakładany, znaczny stopień schłodzenia spalin. Energia elektryczna i ciepło odbierane są z układu poprzez zaciski generatora G turbin parowych (19,46) oraz poprzez wymiennik ciepłowniczy (26). Ilość ciepła odprowadzana z układu jest regulowana poprzez upust (29) turbiny (46).

**Sprawności wytwarzania energii elektrycznej w obiegu I**

W analizie obliczeniowej określono wartość strumienia zgazowywanego węgla dla uzyskania mocy elektrycznej netto na poziomie 20 MW<sub>el</sub>. W kolejnym kroku określane są parametry obiegu dla maksymalnego strumienia mocy grzewczej oraz analizowane są sprawności liczone dla gazu oczyszczonego. Z uwagi na zastosowanie odzysku energii z surowego gazu PZW w wymiennikach (17, 20), przeprowadzono również analizę sprawności instalacji bez udziału tych układów odzyskowych i bez członu instalacji odpowiedzialnego za podziemne zgazowanie.

Na Rysunku 3 zamieszczono rezultaty obliczeń obiegu dla wytwarzania ok. 20 MW<sub>el</sub> mocy netto.



Rys. 3. Wyniki modelowania obiegu I, wariant A

W Tabelcy 2 zamieszczone zostały rezultaty obliczeń podstawowych parametrów obiegu w wariantcie A, w którym wytwarzane jest maksimum energii elektrycznej (ok. 20 MW<sub>el</sub>).

Tabelca 2

**Zestawienie parametrów obiegu I w wariantcie A**

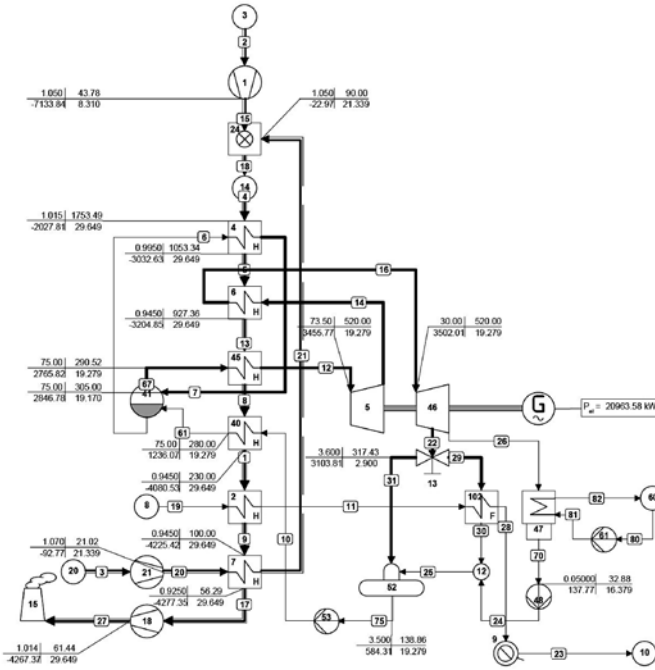
Numer urządzenia	Typ urządzenia	Wartość
16	Strumień energii wprowadzany z węglem, kW	134890
G	Moc na zaciskach generatora turbiny, kW	24873
13	Zapotrzebowanie energii kompresora instalacji ASU, kW	3498
18	Zapotrzebowanie energii wentylatora spalin, kW	358
I	Zapotrzebowanie energii ssawy gazu PZW, kW	237
33	Zapotrzebowanie energii dmuchawy powietrza spalania, kW	298
48	Zapotrzebowanie energii pompy kondensatu, kW	9,13
53	Zapotrzebowanie energii pompy obiegowej, kW	201
61	Zapotrzebowanie energii pompy chłodni, kW	278
<b>Sprawności</b>		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		18,44%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		14,82%
<b>Sprawności w odniesieniu do oczyszczonego gazu PZW</b>		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		26,41%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		21,24%
Sprawność bez uwzględniania potrzeb własnych instalacji zgazowania i oczyszczania		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		31,61%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		30,19%

Tablica 3

Wybrane rezultaty modelowania instalacji

Numer urządzenia	Typ urządzenia	Wartość
16	Strumień energii wprowadzany z węglem, kW	134890
G	Moc na zaciskach generatora turbiny, kW	14208
26	Strumień entalpii gorącej wody, kW	39884
13	Zapotrzebowanie energii kompresora instalacji ASU, kW	3498
18	Zapotrzebowanie energii wentylatora spalin, kW	358
1	Zapotrzebowanie energii ssawy gazu PZW, kW	237
33	Zapotrzebowanie energii dmuchawy powietrza spalania, kW	298
48	Zapotrzebowanie energii pompy kondensatu, kW	0,87
53	Zapotrzebowanie energii pompy obiegowej, kW	201
61	Zapotrzebowanie energii pompy chłodni, kW	21,5
<b>Sprawności</b>		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		10,5%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		7,11%
Wytwarzania ciepła użytkowego		29,6%
Całkowita		36,7%
<b>Sprawności w odniesieniu do oczyszczonego gazu PZW</b>		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		15,09%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		10,19%
Wytwarzania ciepła użytkowego		42,36%
Całkowita		52,55%
<b>Sprawność bez uwzględnienia potrzeb własnych instalacji zgazowania i oczyszczania</b>		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		18,4%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		17,3%
Wytwarzania ciepła użytkowego		51,2%
Całkowita		68,5%

Na Rysunku 4 przedstawiono rezultaty obliczeń spalania gazu ze zgazowania węgla brunatnego w wariantcie nieuwzględniającym zapotrzebowania energii w procesie zgazowania.

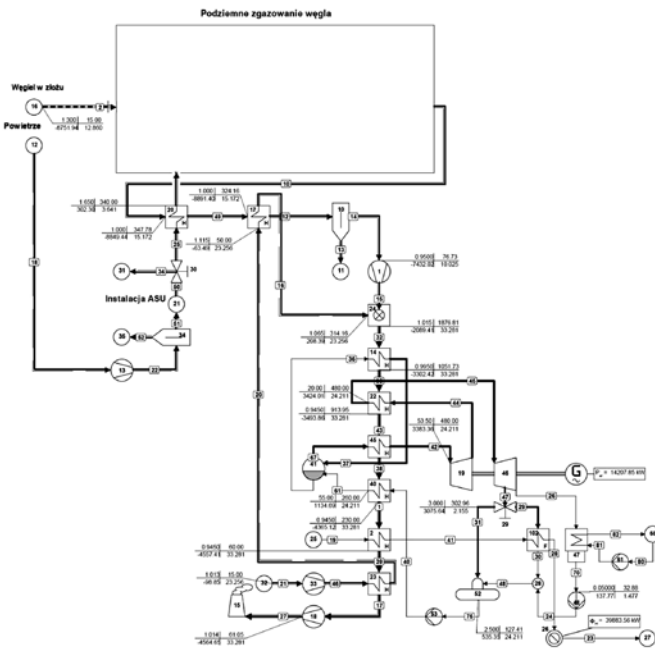


Rys. 4. Rezultaty obliczeń konwersji energetycznej gazu pochodzącego z podziemnego zgazowania węgla brunatnego w obiegu I, wariant A, bez części podziemnej

**Obliczenia wariantu B dla skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w obiegu I**

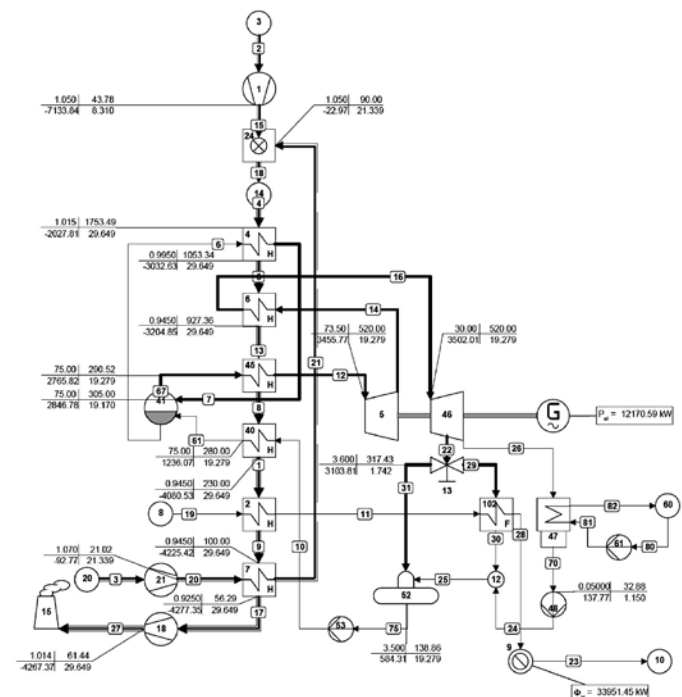
W obliczeniach poszukiwano optimum możliwej mocy termicznej uzyskiwanej poprzez upust części pary (29) i odbieranej na zaciskach generatora G mocy elektrycznej. Poszczególne mieszanki składników rurociągów zamieszczono w Tabelcy 5.

Na Rysunku 5 zamieszczono rezultaty obliczeń dla obiegu uwzględniającego oczyszczanie i podziemne zgazowanie węgla w wariantcie B (skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej).



Rys. 5. Rezultaty obliczeń konwersji energetycznej gazu pochodzącego z podziemnego zgazowania węgla brunatnego – obieg I, wariant B z uwzględnieniem części podziemnej

W Tabelcy 3 zamieszczone zostały odpowiednie sprawności i zapotrzebowania instalacji

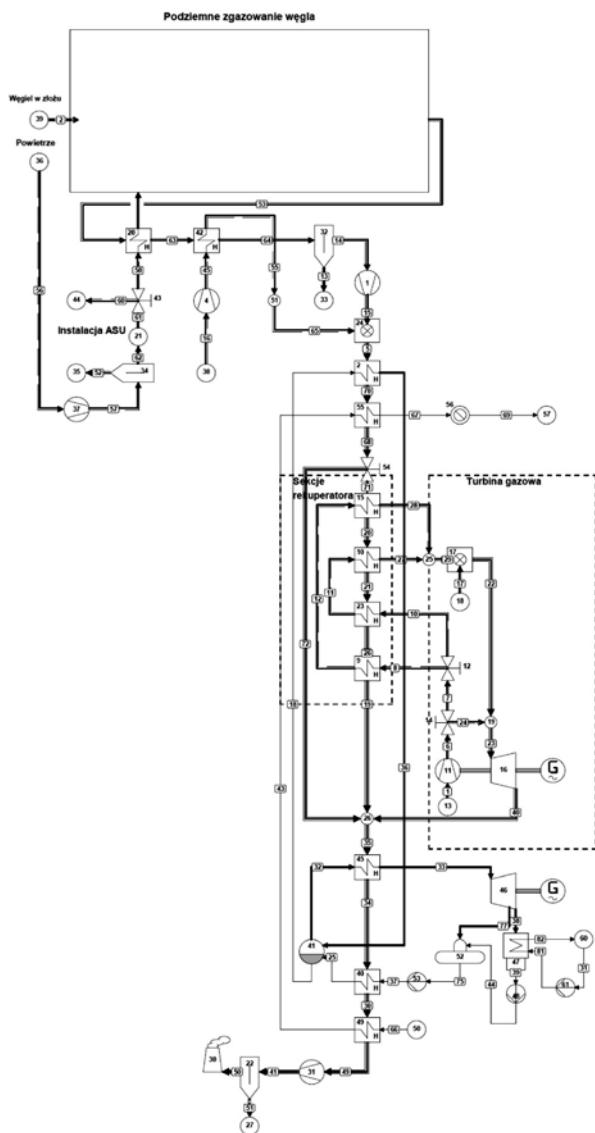


Rys. 6. Rezultaty obliczeń dla obiegu I w wariantcie B bez uwzględnienia części podziemnej i oczyszczania gazu

Na Rysunku 6 przedstawione zostały rezultaty modelowania obiegu I, w wariacie B bez uwzględnienia części podziemnej. Układ taki charakteryzuje się wyższą sprawnością z uwagi na pominięcie potrzeb własnych instalacji zgazowania; z drugiej strony nie uwzględnia się możliwego odzysku entalpii fizycznej gorącego gazu PZW. Różnice w sprawności wpływają na ilość gazu konieczną do dostarczenia dla uzyskania odpowiedniej mocy układu. W przypadku analizy procesu z uwzględnieniem potrzeb instalacji zgazowania i oczyszczania, wymagana ilość gazu PZW wynosi ok. 10,025 kg/s, a w przypadku dostarczenia do układu gazu oczyszczonego, ilość ta wynosi 8,310 kg/s. Przekłada się to na uzyskiwaną moc termiczną obiegu. W skojarzeniu uzyskiwane jest 39,9 MW dla układu uwzględniającego tylko proces konwersji gazu z PZW, oraz 33,95 MW dla całego obiegu zgazowania, oczyszczania i energetycznej konwersji.

### Opis układu II wytwarzania energii z turbiną gazową i turbiną parową

Kolejnym z analizowanych rozwiązań jest układ kombinowany, złożony z reaktora zgazowania wraz z instalacją ASU, instalacją oczyszczania, komory spalania, obiegu turbiny gazowej i turbiny parowej oraz układu wymienników pozwalających zasilić obieg ciepłowniczy.



Rys. 7. Schemat połączonego układu energetycznego wytwarzania energii z gazu pochodzącego ze zgazowania węgla brunatnego w układzie II

Układ przyjęty do analiz jest nietypowy z uwagi na fakt, iż turbina gazowa jest podgrzewana przeponowo. Przeponą jest układ wymienników typu konwekcyjno-radiacyjnego, którego zastosowanie

wynika zarówno z zakresu temperaturowego, jak i charakteru spalnego gazu. Zastosowanie turbiny gazowej ogrzewanej w sposób przeponowy, nakłada istotne ograniczenia na konstrukcję instalacji. Optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie turbiny gazowej o stosunkowo niskim stopniu kompresji, ponieważ sprężone powietrze za kompresorem uzyskuje niezbyt wysoką temperaturę, co pozwala na odpowiednie wykorzystanie spalin. Zastosowana turbina ma stosunek sprężania (ciśnienia za kompresorem  $p$  do ciśnienia atmosferycznego  $p_{atm}$ ) wynoszący  $p/p_{atm} = 1,1$ . Na Rysunku 7 przedstawiono schemat opisywanego obiegu.

### Opis układu obliczeniowego w wariacie II

Jak zamieszczono na Rysunku 7 powietrze do zgazowania doprowadzane jest z (36) do układu separacji, za którym uzyskiwany tlen podgrzewany jest w układzie odzysku entalpii fizycznej gazu z PZW (20). Węgiel brunatny do zgazowania (39) ma skład, jak w Tabelcy 1. Uzyskiwany gaz z PZW ma temperaturę ok. 350°C. Przesyłany jest on rurociągiem (53) poprzez instalację odzysku entalpii (20) do tlenu kierowanego do zgazowania oraz poprzez rekuperator (42) do powietrza podawanego do spalania. Wstępne schłodzenie gazu pozwala na wprowadzenie go do instalacji oczyszczania (32), za którą gaz uzyskuje temperaturę ok. 70°C. Podciśnienie w instalacji zapewnia wentylator (1). Za wentylatorem (1) gaz PZW trafia do komory spalania (24), w której spala się w palnikach dyfuzyjnych z liczbą nadmiaru  $\lambda = 1,1$ . Pozwala to na uzyskanie temperatury w strefie spalania wynoszącej do ok. 1900°C. Za strefą spalania gaz oddaje część nadwyżki entalpii do parowacza obiegu turbiny parowej (2). Za parowaczem znajduje się końcowy stopień podgrzewacza wody obiegu grzewczego (55). Spaliny za podgrzewaczem mogą zostać przesłane poprzez kanał obejściowy (54) bezpośrednio do obiegu parowego. Wówczas możliwe jest uzyskanie maksymalnej mocy cieplnej obiegu wody użytkowej (w wymienniku 56). W przypadku funkcjonowania instalacji przy maksymalnych obciążeniach generatorów elektrycznych, proponowane jest zastosowanie wymienników rekuperacyjnych (9, 10, 15, 23) podgrzewających powietrze sprężone w kompresorze (11) turbiny gazowej. Z tego względu należy zapewnić stosunkowo niskie temperatury podgrzewu powietrza sprężonego. W tym przypadku pierwsza sekcja rekuperatora (15) obciążana jest maksymalnie temp. 955°C. Powietrze podgrzane w pęczkach układu rekuperacji (do 930°C) trafia do kolektora (25), a następnie do komory spalania. Komora spalania ciśnieniowa (17) pozwala na rozgrzanie układu turbinowego i opcjonalnie na podniesienie mocy uzyskiwanej na ekspanderze poprzez spalanie gazu ziemnego wysokometanowego z sieci. W rozpatrywanym przypadku gaz ten nie jest spalany. Podgrzane powietrze sprężone po przejściu przez ekspander (16) połączony z generatorem turbiny gazowej G, trafia do kolektora (26), w którym miesza się ze spalinami ze spalania gazu PZW. Mieszanka gazu omywa pęczki przegrzewacza obiegu parowego (45), następnie podgrzewacza wody obiegu parowego (40) i wody w podgrzewaczu wody obiegowej (49), a następnie przez wentylator odciągowy (31) oraz filtr (22) trafia do komina (30).

### Wyniki symulacji dla wariantu II

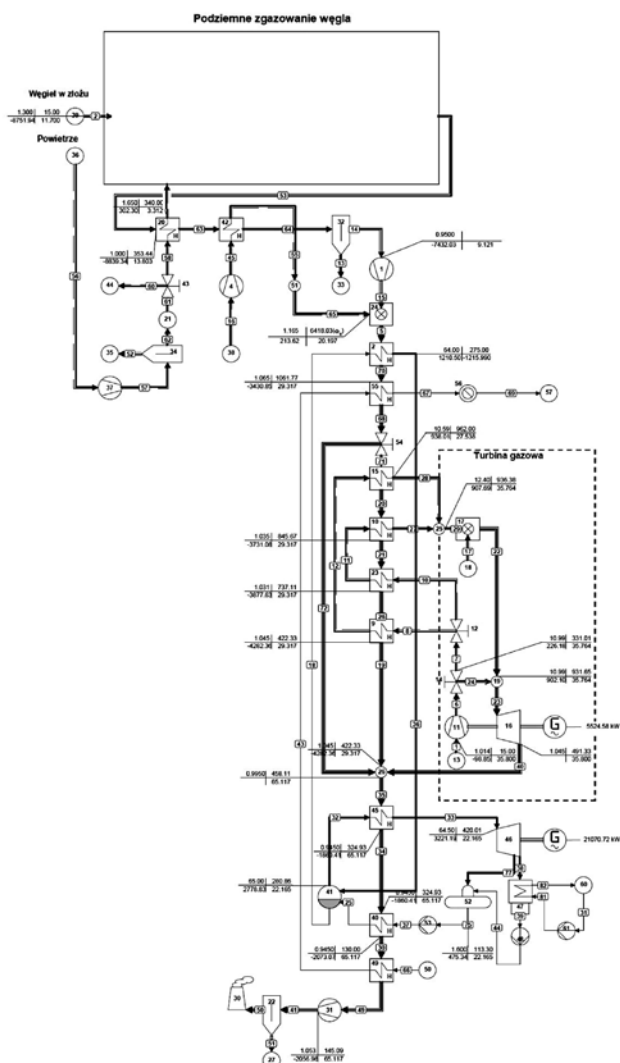
W Tabelcy 4 zamieszczone zostały wyniki symulacji dla maksimum wytwarzania energii elektrycznej, obiegu II w wariacie A. Obliczenia wymagały wielokrotnej iteracji następujących parametrów: strumienia węgla zgazowywanego, strumienia strat energii w części podziemnej, obciążenia cieplnego rekuperatora, obciążenia cieplnego wymienników obiegu parowego. W kolejnych iteracyjnych obliczeniach poszukiwano punktu pracy, w którym strumień mocy cieplnej z węzła (56) będzie minimalny i jednocześnie moc netto na zaciskach generatorów będzie maksymalna, przy czym moc ta powinna wynosić ok. 20 MW<sub>el</sub>.

Tablica 4

Wybrane rezultaty obliczeń dla obiegu II – wariant A

Numer urządzenia	Typ urządzenia	Wartość
39	Strumień energii wprowadzany z węglem, kW	122720
G	Moc na zaciskach generatora turbiny gazowej, kW	5525
G	Moc na zaciskach generatora turbiny parowej, kW	21071
56	Strumień entalpii gorącej wody, kW	0
I	Zapotrzebowanie energii ssawy gazu PZW, kW	387
31	Zapotrzebowanie energii wentylatora spalin, kW	1069
37	Zapotrzebowanie energii sprężarki ASU, kW	3182
4	Zapotrzebowanie energii dmuchawy powietrza spalania, kW	478
48	Zapotrzebowanie energii pompy kondensatu, kW	5,54
53	Zapotrzebowanie energii pompy obiegowej, kW	234
61	Zapotrzebowanie energii pompy chłodni, kW	143
Sprawności		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		21,7%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		17,2%
Sprawności w odniesieniu do oczyszczonego gazu PZW		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		31,3%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		24,8%
Sprawność bez uwzględniania potrzeb własnych instalacji zgazowania i oczyszczania		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		35,2%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		32,3%

Na Rysunku 8 zamieszczono rezultaty obliczeń obiegu II, wariant A.



Rys. 8. Rezultaty modelowania obiegu II w wariantcie A z uwzględnieniem części podziemnej

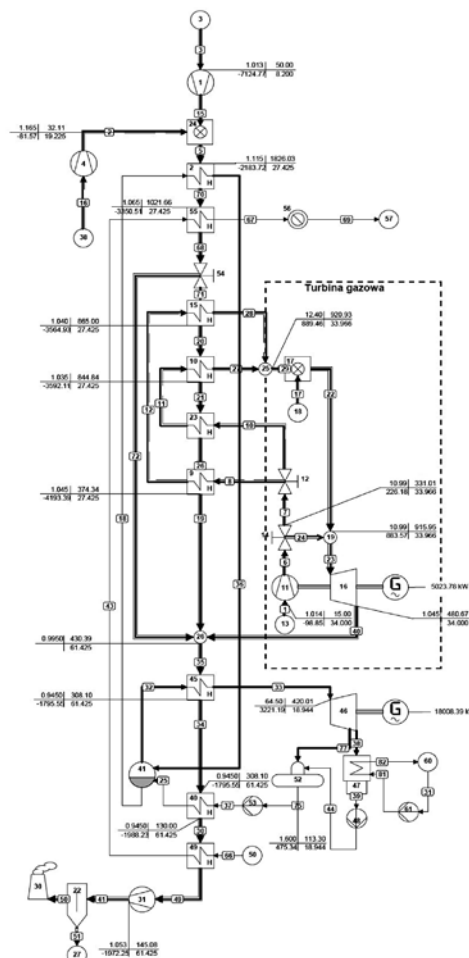
W Tabelcy 5 zestawiono rezultaty obliczeń instalacji w wariantcie 2 oraz przypadku, kiedy wytwarzane jest maksimum mocy grzewczej.

Tablica 5

Rezultaty obliczeń obiegu II w wariantcie B

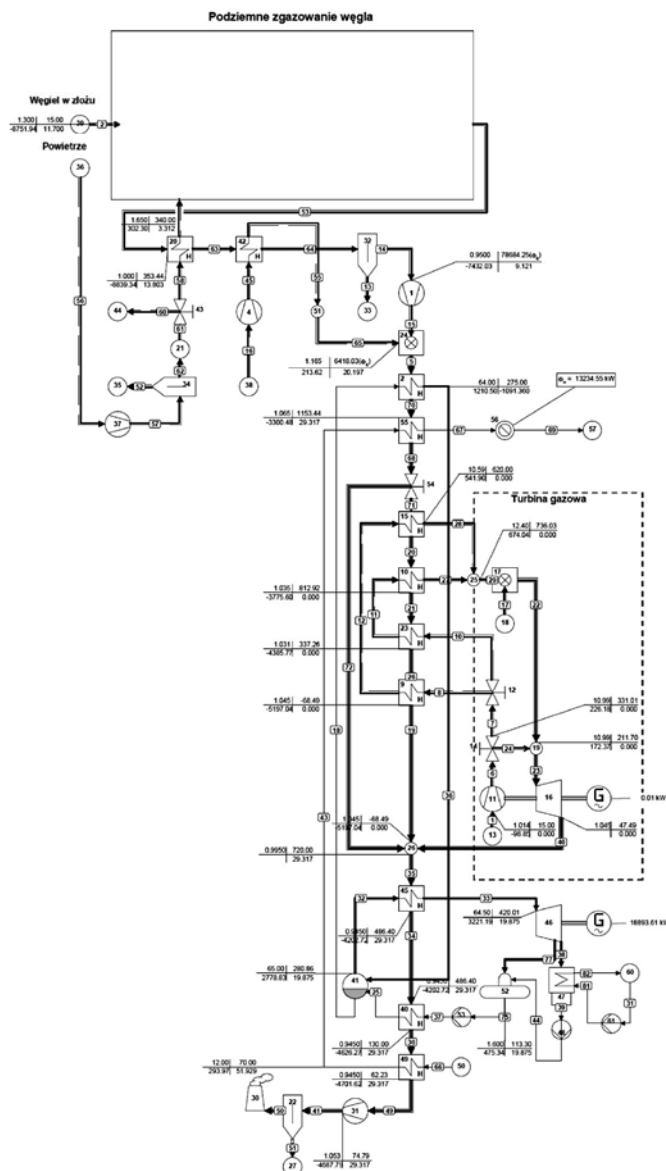
Numer urządzenia	Typ urządzenia	Wartość
39	Strumień energii wprowadzany z węglem, kW	122720
G	Moc na zaciskach generatora turbiny gazowej, kW	0
G	Moc na zaciskach generatora turbiny parowej, kW	18894
56	Strumień entalpii gorącej wody, kW	13235
I	Zapotrzebowanie energii ssawy gazu PZW, kW	387,3
31	Zapotrzebowanie energii wentylatora spalin, kW	433
37	Zapotrzebowanie energii sprężarki ASU, kW	3182
4	Zapotrzebowanie energii dmuchawy powietrza spalania, kW	478
48	Zapotrzebowanie energii pompy kondensatu, kW	5,00
53	Zapotrzebowanie energii pompy obiegowej, kW	210
61	Zapotrzebowanie energii pompy chłodni, kW	128,2
Sprawności		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		15,4%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		11,5%
Podgrzewu czynnika grzewczego		10,8%
Calkowita		22,3%
Sprawności w odniesieniu do oczyszczonego gazu PZW		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		22,2%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		16,5%
Podgrzewu czynnika grzewczego		15,6%
Calkowita		32,1%
Sprawność bez uwzględniania potrzeb własnych instalacji zgazowania i oczyszczania		
Brutto wytwarzania energii elektrycznej		35,2%
Netto wytwarzania energii elektrycznej		32,3%
Podgrzewu czynnika grzewczego		14,3%
Calkowita		46,6%

Na Rysunku 9 zamieszczono wyniki obliczeń dla przypadku, w którym nie uwzględnia się zapotrzebowania instalacji zgazowania i oczyszczania gazu z PZW

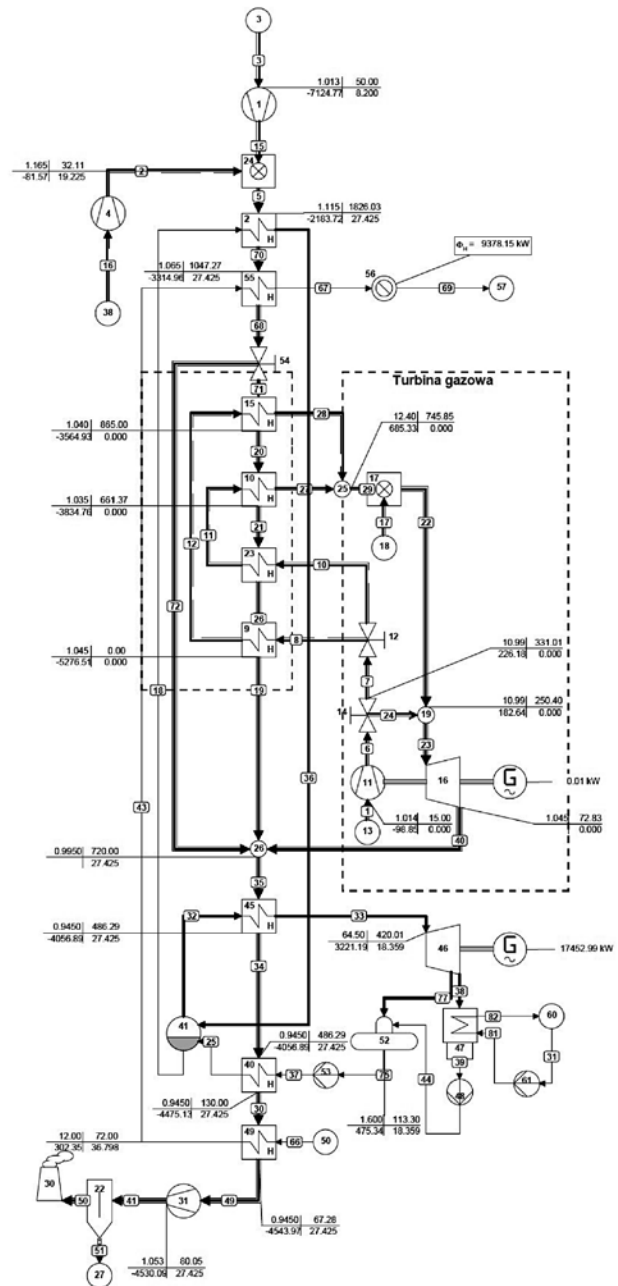


Rys. 9. Wyniki obliczeń dla spalania gazu oczyszczonego PZW bez potrzeb własnych instalacji zgazowania i oczyszczania. Obieg II, wariant A

Na Rysunku 10 przedstawiono rezultaty obliczeń dla układu funkcjonującego w skojarzeniu. Wyniki obliczeń obiegu dla układu uwzględniającego tylko spalanie gazu oczyszczonego widoczne są na Rysunku 11.



Rys. 10. Wyniki modelowania obiegu II z wariantu B



Rys. 11. Wyniki modelowania obiegu II z wariantu B

**Podsumowanie**

W ramach badań przeprowadzono analizę dwóch obiegów energo-chemicznych:

- w układzie I – dla zgazowania, oczyszczania i spalania gazu PZW wraz z konwersją do energii elektrycznej i ciepła
- w układzie II – dla zgazowania, oczyszczania i spalania gazu PZW wraz z konwersją do energii elektrycznej w obiegu kombinowanym z przeponowo ogrzewaną turbiną gazową i obiegiem parowym.

W Tabelcy 7 zestawiono uzyskane wyniki wariantowe pokazujące  **sprawności energetyczne dla obydwu rozwiązań funkcjonujących w skojarzeniu**. W układzie I – parowym w analizach uzyskano wyższe sprawności wytwarzania ciepła niż w układzie II parowo-gazowym. Układ parowo-gazowy ze względu na wyższe sprawności wytwarzania energii elektrycznej jest korzystniejszy w przypadku wysokiego zapotrzebowania na energię elektryczną i znikomego na ciepło grzewcze.

**Tabela 7**

**Zestawienie sprawności (wartości zaokrąglone do trzech cyfr znaczących) uzyskanych w trakcie analiz dla skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej**

Wyszczególnienie	Obieg I Wariant A/B	Obieg II Wariant A/B
<b>Sprawności</b>		
1 Brutto wytwarzania energii elektrycznej	10,5%	15,4%
2 Netto wytwarzania energii elektrycznej	7,11%	11,5%
3 Wytwarzania ciepła użytkowego	29,6%	10,8%
4 Całkowita	36,7%	22,3%
<b>Sprawności w odniesieniu do oczyszczonego gazu PZW</b>		
6 Brutto wytwarzania energii elektrycznej	15,1%	22,2%
7 Netto wytwarzania energii elektrycznej	10,2%	16,5%
8 Wytwarzania ciepła użytkowego	42,4%	15,6%
9 Całkowita	52,6%	32,1%
<b>Sprawność bez uwzględnienia potrzeb własnych instalacji zgazowania i oczyszczania</b>		
11 Brutto wytwarzania energii elektrycznej	18,4%	35,2%
12 Netto wytwarzania energii elektrycznej	17,3%	32,3%
13 Wytwarzania ciepła użytkowego	51,2%	14,3%
14 Całkowita	68,5%	46,6%

Porównując uzyskane rezultaty należy wziąć pod uwagę, że nie prowadzi się badań w rachunku ciągłym pełnej sprawności konwersji węgla brunatnego od jego wydobycia do spalania w tradycyjnym bloku węglowym. Wartość sprawności bloku elektrociepłowni o mocy 20 MW jest około 5 do 8% (względnie) niższa niż ma to miejsce w przypadku dużych bloków energetycznych.

W warunkach zgazowania podziemnego węgla brunatnego konieczne jest stosowanie instalacji wytwarzania tlenu, który jako czynnik zgazowujący zapewnia autotermiczność procesu.

Artykuł powstał w wyniku realizacji zadania pt.: „**Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektrycznej produkcji paliw i energii elektrycznej**” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”

## Literatura

1. Chase Malcolm, NIST-JANAF, *Thermochemical Tables – Fourth Edition*, J. of Phys. and Chem. Ref. Data, Monograph No. 9, 1998.
2. International Association for the Properties of Water and Steam. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. 1997.
3. International Formulation Committee. The 1967 IFC Formulation for Industrial Use, Verein Deutscher Ingenieure. 6th International Conference on the Properties of Steam Düsseldorf, 1967.
4. [www.asimptote.nl/software/cycle-tempo](http://www.asimptote.nl/software/cycle-tempo)
5. Mocek P, Gil I., Świądrowski J.: *Process installation for hybride underground coal gasification technology*. Przemysł Chemiczny 1. 2014.
6. Mocek P, Gil I.: *Gas transfer process from the underground coal gasification*. Polish Mining Review 2(2013)107–115.
7. [www.prometgas.pl](http://www.prometgas.pl).

Dr inż. Piotr MOCEK ukończył studia na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej (2003). W 2008 r. otrzymał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Śląskiej. Jest adiunktem w zakładzie Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza Głównego Instytutu Górnictwa. Specjalność energetyka procesowa, modelowanie numeryczne i matematyczne procesów przenoszenia masy, pędu i energii w układach i urządzeniach przemysłowych i instalacjach oczyszczania; optymalizacja i projektowanie obiegów, w szczególności układów odzysku energii z procesów wysokotemperaturowych.

\*Mgr inż. Marek BIENIECKI absolwent Wydziału Mechanicznego – Energetycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach (1989) – magister inżynier mechanik w specjalności: ciepłe systemy energetyczne. Aktualne zainteresowania koncentrują się na czystych technologiach wytwarzania oraz efektywnych energetycznie technologiach użytkowania energii. Kierownik Laboratorium Efektywnego Wytwarzania i Użytkowania Energii w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach  
e-mail: [marekbieniecki@gig.eu](mailto:marekbieniecki@gig.eu)

## Aktualności z firm

News from the Companies

Dokończenie ze strony 1039

### Budowa drugiego etapu farmy wiatrowej Marszewo

TAURON Ekoenergia podpisał na początku listopada br. umowę na budowę drugiego etapu farmy wiatrowej Marszewo o mocy 18 MW. Farmę wybuduje wyłonione w postępowaniu przetargowym konsorcjum złożone z podmiotów: Iberdrola Engineering and Construction Poland Sp. z o.o. (lider konsorcjum) oraz Iberdrola Ingeniería Y Construcción SAU. z Hiszpanii (partner konsorcjum). Inżynierem kontraktu jest Tractebel Engineering SA. W ramach przedsięwzięcia wybudowanych zostanie dziewięć turbin wiatrowych o mocy 2 MW każda. Inwestycja o wartości 100 mln PLN (wraz z trzyletnim serwisem gwarancyjnym) ma zostać zrealizowana w ciągu ok. 12 miesięcy. To drugi etap budowy farmy wiatrowej Marszewo; w ramach pierwszego w październiku 2013 r. oddano do użytku 41 turbin o mocy 2 MW każda. Po zrealizowaniu drugiego etapu, farma wiatrowa Marszewo (zlokalizowana w województwie zachodniopomorskim, w gminie Postomino, w pobliżu Nosalina) będzie składać się z 50 turbin o łącznej mocy 100 MW. (kk)

(<http://media.tauron-pe.pl/>, 7.11.2014)

### LERG w Specjalnej Strefie Ekonomicznej

27 października br. nastąpiło oficjalne włączenie LERG SA do Strefy Ekonomicznej EURO-PARK Mielec. LERG zamierza zrealizować projekt inwestycyjny polegający na wybudowaniu nowego zakładu produkcyjnego oraz wyposażeniu go w specjalistyczne maszyny, urządzenia i system informatyczny pozwalające na uruchomienie planowanej produkcji. Dzięki niej LERG poszerzy gamę oferowanych produktów oraz zdobędzie nowe rynki zbytu, co przyczyni się do wzrostu liczby zatrudnionych osób na terenie gminy. (kk)

(<http://www.lerg.pl>, 5.11.2014)

### Evonik rozpoczyna produkcję sfunkcjonalizowanych polibutadienów

Grupa Evonik Industries AG otworzyła w Marl (Niemcy) nowy zakład produkujący hydroksylowane polibutadieny (HTPB). Grupa zainwestowała kwotę kilku mln EUR w zakład, który ma zagwarantować produkcję rzędu kilku tysięcy ton rocznie. Evonik będzie sprzedawał HTPB pod marką POLYVEST® HT. (kk)

(Evonik, 03.11.2014)

Dokończenie na stronie 1055