

*Stefan Lechner\**, *Hans-Bernd Rombrecht\**, *Hans Joachim Krautz\**

## SUSZENIE PARĄ W ZŁOŻU FLUIDALNYM POD CIŚNIENIEM (SPZFC) I ODDZIELANIE DWUTLENKU WĘGLA PRZEZ PŁUCZKĘ GAZOWĄ — NOWE WYZWANIE DLA WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z WĘGLA BRUNATNEGO

---

### 1. Suszenie węgla

Wysoka zawartość wody obniża sprawność i opłacalność wytwarzania energii elektrycznej z węgla brunatnego. Węgiel brunatny posiada zawartość wody w zakresie od 30 do 70%. Suszenie wstępne umożliwia poprawę procesu spalania.

Zalety suszenia wstępnego wynikają z dwóch różnych aspektów, które też reprezentują różne metody:

- w dzisiejszej elektrowni węgiel brunatny jest nadal suszony gorącymi spalinami (ca. 900°C), które bezpośrednio wlatują do młyna wentylacyjnego (mielenie połączone z suszeniem). Suszenie wstępne potrzebuje tylko pary w zakresie temperaturowym od 130 do 180°C. Zmniejszenie wysokiej różnicy temperatur obniży utratę egzergii;
- drugim aspektem jest możliwość użycia ciepła kondensacji pary, która pochodzi od wody z węgla w obiegu cieplnym.

Klasyczną metodą suszenia wstępnego węgla brunatnego jest suszarka bębnowa, w której węgiel brunatny jest osuszany w rurach ogrzewanych parą. Opary wylatują bez wykorzystania.

Nowoczesne metody próbują wykorzystywać te opary. Do tego służą przede wszystkim suszarki złoża fluidalnego, które pracują atmosferycznie lub pod ciśnieniem.

Para fluidyzuje złożo, dlatego odparowana woda z węgla może skraplać się izotermicznie przy ciśnieniu i temperaturze odpowiedniej dla systemu.

---

\* Lehrstuhl Kraftwerkstechnik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Cottbus, Germany

Suszenie w złożu fluidalnym odbywa się między 100°C i temperaturą rozkładu węgla. Aktualne projekty zakładają, że proces suszenia odbywa się między 1 i 6 bar.

Liczne projekty badań zajmują się wariantami atmosferycznymi i do dnia dzisiejszego istnieje tylko jeden projekt zajmujący się wariantem ciśnieniowym. Istnieje już kilka instalacji pilotażowych, które wykorzystują atmosferyczne złożo fluidalne. Największe ma przepustowość 210 t/h [3–5]. Proces suszenia pod ciśnieniem jeszcze nie osiągnął tej wydajności. Największe dotychczas zbudowane urządzenie eksperymentalne ma przepustowość 10 t/h [2].

## 2. Skład węgla brunatnego surowego

Węgiel brunatny surowy wyróżnia się wysoką zawartością wody. Na przykład Łużycki Węgiel Brunatny Surowy (ŁWBS) zawiera między 53 i 57% wody. Zawartość węgla pierwiastkowego wynosi około 27%. Tabela 1 pokazuje skład ŁWBS, który wykorzystano dla ilustracji procesu.

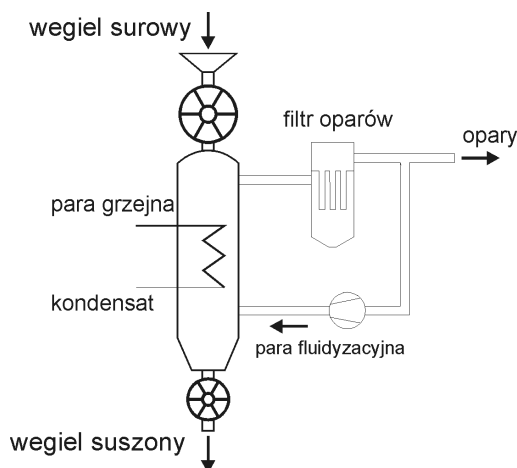
TABELA 1  
Skład węgla brunatnego surowego

ŁWBS		
woda	m-%	57
popiół	m-%	2,5
c	m-%	27,3
h	m-%	2,5
n	m-%	0,3
s	m-%	0,3
LHV	MJ/kg	8.600

## 3. Sposób działania SPZFC

Rysunek 1 pokazuje zasadę procesu suszenia wstępnego w parowym złożu fluidalnym w elektrowni węgla brunatnego. Węgiel łużycki zostaje osuszony od około 56% do zawartości docelowej 12%.

Ogrzewanie następuje pośrednio przez płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła, które są gęsto rozmieszczone i zabudowane w złożu fluidalnym oraz przewodzą energię ciepłą pochodzącą ze skraplającej się pary upustowej z turbozespołu. Zaletą złoża fluidalnego jest dobre mieszanie, prawie takie, jak w przypadku procesu izotermicznego, i wysokie osiągi współczynników przejmowania ciepła.



Rys. 1. Schemat procesu SPZFC

Suszenie odbywa się w słabo przegrzanej i czystej atmosferze parowej, która umożliwia izotermiczną kondensację i tym samym całkowite wykorzystanie energetyczne odparowanej wody węglowej. Stopień przegrzania pary odpowiada za finalną zawartość wody w węglu. Odparowana woda z węgla (opary) jest odprowadzona po procesie filtrowania z suszarki i przechodzi do następnego etapu wykorzystania energetycznego. Część pary stale cyrkuluje w suszarce, żeby fluidyzować system. Ciśnienie suszenia dobiera się według potrzeb do zawartości ok. 6 bar.

### 3.1. Utrata pary

Nie całkowicie szczelne zamknięcia śluzowe wlotu i wylotu powodują częściową utratę pary ze złoża fluidalnego, w przypadku ruchomego złoża atmosferycznego będzie utrzymywane tylko małe nadciśnienie (100–300 mbar), w celu uniknięcia dostępu powietrza z zewnątrz. Jeżeli chodzi o suszenie pod ciśnieniem, niemożliwe jest uniknięcie większych strat. Wielkością projektową jest 5% straty na uszczelnieniu. Nowoczesne badania zakładają 1% straty pary uszczelniającej dla wielkiej suszarki [12].

### 3.2. Przenoszenie ciepła i współczynniki przenikania ciepła

Wielkość suszarki uzależniona jest też od przenoszenia ciepła do węgla. Dlatego celem stawianym badaniom jest ustalenie i zwiększenie współczynnika przenikania ciepła (wartość —  $k$ ) suszarki fluidalnej, względnie energii cieplnej przekazywanej na jednostkę objętości.

Wartość —  $k$  zależy od zawartości wody i ziarnistości węgla oraz geometrii i przegrzania (nadwyżka temperaturowa powyżej parametrów nasycenia) w suszarce. Różnica temperatur między parą ogrzewania, a złożem fluidalnym leży w praktyce w zakresie od 30 do 40 K.

### 3.3. Zawartość wody w surowym węglu brunatnym

Końcowa zawartość wody w surowym węglu brunatnym zależy przede wszystkim od wybranej różnicy temperatur między parą grzejną a węglem. Wodę węglową dzieli się ogólnie na dwa rodzaje. Z jednej strony jest łatwo odparowywana woda powierzchniowa, z drugiej strony istnieje woda kapilarna. Aby oddzielić wodę powierzchniową potrzebna jest tylko entalpia odparowania. W ten sposób węgiel brunatny może być suszony do około 20% zawartości wody. W dalszym procesie suszenia trzeba będzie też pokonać kapilarne siły wody. To wymaga nie tylko wyższego przegrzania, ale też podwyższonego nakładu energii, żeby przezwyciężyć entalpię wiązania. Aktualne metody suszą węgiel brunatny aż do 12% zawartości wody. Przy niskiej zawartości wody suszony węgiel pozostaje bardzo reaktywny i jest skłonny do zapalenia samoczynnego.

## 4. Aktualne koncepcje korzystania z oparów

Istnieją 3 koncepcje wykorzystania z oparów w elektrowni opalanej węglem brunatnym:

- 1) Użycie oparów do podgrzewania kondensatu elektrowni jest stosunkowo proste. Wadą jednak jest to, że przeważnie całkowite wykorzystanie nie jest możliwe, ponieważ energia cieplna oparów jest większa niż możliwość odbioru ciepła przez podgrzewany kondensat.
- 2) Dalsza możliwość polega na rozprężeniu oparów w turbinie bezpośrednio lub za pomocą podgrzewacza parowego. To umożliwia całkowite wykorzystanie z oparów powiększając sprawność ogólną w porównaniu do podgrzewania kondensatu. Wylatująca para niskociśnieniowa z turbiny pozostanie skroplona przez wodę chłodzącą.
- 3) Inna koncepcja ogrzewania suszarki polega na sprężeniu odprowadzanych oparów do parametrów pary cieplnej i doprowadzenia ich do węzownic grzejnych suszarki. Zapotrzebowanie na parę grzejną zmniejsza się do znikomej wartości („w dużej mierze będzie to samoogrzewająca się suszarka”). Wadą jest to, że sprężanie oparów wymaga napędu elektrycznego lub zastosowania własnej turbiny napędowej. I choć w tym procesie nie powstaje nadmiar ciepła, to jest on technicznie skomplikowany i mało sprawdzony.

## 5. Porównanie różnych ciśnień systemu

W tabeli 2 zestawiono istotne parametry różnych suszarek w złożu fluidalnym.

Obliczenia symulacyjne pokazują, że zintegrowane suszenie wstępne węgla brunatnego (nie tylko w złożu atmosferycznym, ale też pod ciśnieniem) poprawia sprawność elektrowni bez wydzielania CO<sub>2</sub> od dzisiejszych 43,6 do 48,6% [7]. (Kom. Tak wysoka sprawność jest możliwa nie tylko poprzez suszenie węgla lecz także przez odzysk ciepła ze spalin).

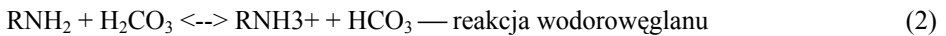
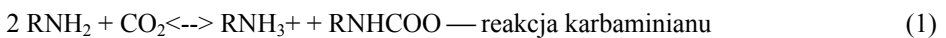
TABELA 2

**Główne cechy suszenia atmosferycznego i pod ciśnieniem [5, 12]**

Cechy	Jednostka	Złoże atmosferyczne	Złoże ciśnieniowe
Ciśnienie suszarki	bar	1,1–1,3	4–6
$\Delta T$ para grzejna — złoże fluidalne	K	30–40	30–40
Podgrzanie w suszarce	K	10	5–10
Oczekiwana strata pary na skutek przecieku	%		1
Ciśnienie oparów	bar	1	4
Ziarnistość węgla	mm	0–2	0–2
Ciśnienie pary grzejnej	bar	4	10
Największa dotychczas zrealizowana wydajność (węgiel surowy)	t/h	210	10

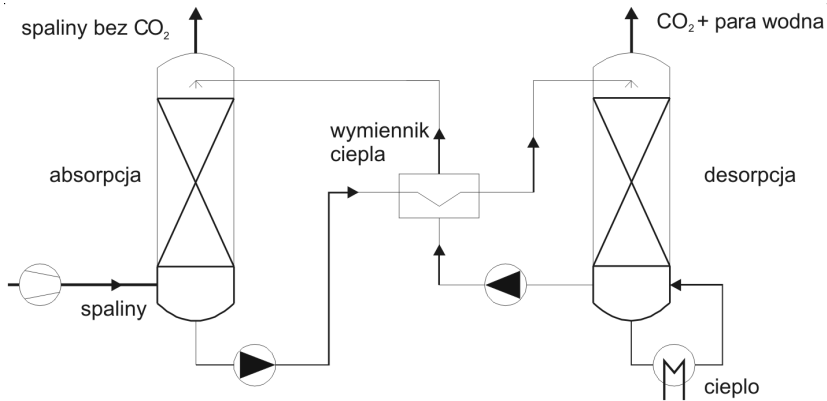
**6. Płuczka CO<sub>2</sub>**

W płuczках do usuwania dwutlenku węgla stosuje się dzisiaj przede wszystkim płuczke aminową. Przy tym dwutlenek węgla reaguje w płuczce razem ze związkami aminowymi do karbaminianu lub wodorowęglanu według równania 1 i 2. Powstająca temperatura reakcji wynosi około 40°C i musi być odprowadzona.



Obiegowym środkiem w płuczce jest monoetanolamin (MEA), oprócz tego branych jest pod uwagę wiele innych środków. Tu przykładowo do obliczeń wykorzystuje się MEA. Po reakcji, nasycony roztwór aminowy jest usuwany z płuczki i pompowany do desorpcji. Tam odbywa się reakcja odwrotna przy temperaturze zwykle do 135°C (powyżej tej temperatury dochodzi do degradacji termicznej rozpuszczalnika MEA).

Dwutlenek węgla o wysokim stężeniu jest odprowadzany dla potrzeb dalszych procesów. Aktualne metody wymagają desorpcji od 3,2 do 3,6 GJ/t<sub>CO<sub>2</sub></sub> [10]. Spalenie 1 t ŁWBS dostarcza około 1 t CO<sub>2</sub>, ale tylko 8,6 GJ ciepła (wartość opałowa dolna). To znaczy, że płuczka spalin potrzebuje wysoką część tej energii. Aktualne badania z różnymi płuczkami aminowymi wykazują energię desorpcji 2,75 GJ/t<sub>CO<sub>2</sub></sub> [9].



Rys. 2. Schemat płuczki spalin

Poza płuczką aminową dyskutuje się wiele innych metod, ponieważ nie tylko energia desorpcji odgrywa ważną rolę, ale też takie aspekty jak trwałość, korozja, stężenie roztworu, prędkość reakcji, ciśnienie pary, toksyczność, cena itd. Przegląd aktualnego stanu techniki ukazuje [10].

## 7. Pobieranie ciepła

Ciepło dla procesu desorpcji pochodzi zwykle z przestrzeni między turbiną średnio-ciśnieniową a niskociśnieniową, gdzie para jest jeszcze bardzo przegrzana. Para o ciśnieniu 10 bar ma tam temperaturę 375 °C, a para o ciśnieniu 4 bar 275 °C. Żeby nie przekroczyć temperatury maksymalnej desorpcji, preferowana jest para nasycona. Dlatego albo miesza się parę przegrzewaną z kondensatem aż do osiągnięcia temperatury nasycenia, albo odpowiednio schładza w podgrzewaczu wody zasilającej. W omówionych przykładach wychodzi się z założenia, że para zawsze jest odprowadzana w stanie nasyconym do suszarki i desorpcji.

## 8. Zapotrzebowanie na ciepło do desorpcji

Przy spalania 2 kg/s ŁWBS powstaje 2 kg/s CO<sub>2</sub>. Moc cieplna desorpcji wynosi więc razem 6,4 MW, przy założeniu, że jednostkowe zużycie ciepła to 3,2 GJ/t<sub>CO2</sub>. Jeżeli desorpcja odbywa się pod ciśnieniem 3 bar względnie 133°C, to ta potrzeba ciepła może być pokryta skropleniem 2,95 kg/s pary nasyconej. Z tego wynika rezerwa na straty przesyłowe w rurociągach i dla różnicy temperaturowej w desorpcji o wartości maksymalnej 1 bar. Ten przykład jest obliczany za pomocą programu Epsilon i pokazany na rysunku 3.

## 9. Potrzeba ciepła w procesie suszenia atmosferycznego

3 135 kW ciepła jest potrzebne do suszenia 2 kg/s ŁWBS przy 1,3 bar z 56% do uzyskania wartości 12% zawartości wody. W tym przykładzie bilansuje się strumień węgla suchego o wydajności dokładnie 1,0 kg/s. 1,47 kg/s pary nasyconej (4 bar) Straty na rurociągach nie zostały tutaj uwzględnione. Opary mają ciśnienie 1 bar (rys. 3).

## 10. Potrzeba ciepła SPZFC

Susząc 2kg/s ŁWBS przy 4 bar od 56 do 12% zawartości wody, potrzeba 3 219 kW ciepła i 52 kW prądu. Ten proces wymaga 1,60 kg/s pary nasyconej (10 bar). Dodatkowa energia (3 271 kW) powinna zostać wprowadzona dla wytworzenia oparów (2 601 kW) i dla pokonania entalpii wiązania wody węglowej (452 kW). Uwzględnić należy, że entalpia wiążąca wodę węglową silnie zależy od poszczególnego rodzaju węgla. Zastosowano tu wielkości zadane programowi Epsilon. 81 kW pozostaje w gorącym strumieniu suchego węgla. Ponieważ suszarka pod ciśnieniem zawsze musi wykazywać parę przeciekową, 137 kW wylatuje jako para nie dająca się odzyskać (założenie: 5% utrat w wyniku szczelności). Dlatego użytkowy strumień oparów wynosi tylko 0,95 kg/s (rys. 4).

## 11. Kombinacja SPZFC i płuczki CO<sub>2</sub>

### 11.1. SPZFC — wariant bazowy

Jeżeli desorpcja płuczki CO<sub>2</sub> jest prowadzona przy 133 °C, to znaczy, że para grzejna musi wykazywać ciśnienie minimalne 3 bar. Opary mają 4 bary. Więc również tutaj jest rezerwa dla utraty ciśnienia i różnic temperatur w desorpcji 1 bar. Skroplenie oparów (0,95 kg/s) dostarcza 2 062 kW. 1,6 kg/s skondensowanej pary grzejjnej opuszcza suszarkę z ciśnieniem 10 bar. Rozprężanie do 4 bar dostarcza dodatkowego strumienia pary tj. 0,12 kg/s względnie 257 kW mocy grzewczej w desorpcji. W wyniku tej kaskady mogą zostać zastąpione 1,07 kg/s (2 319 kW) z 2,95 kg/s (6 400 kW) przez ciepło odpadowe pochodzące z SPZFC. To odpowiada udziałowi 36,2%.

### 11.2. SPZFC — wariant 1

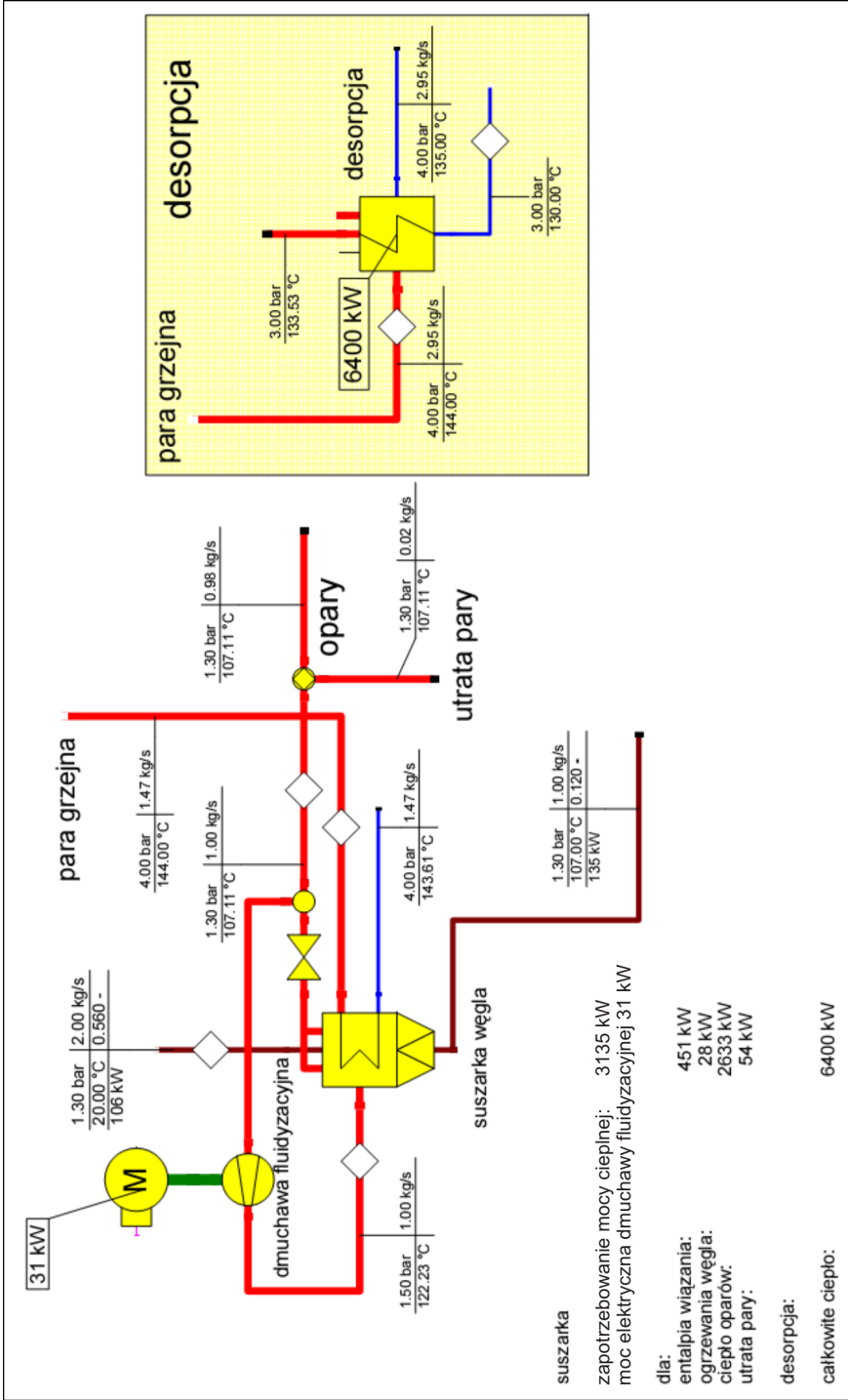
Węgiel brunatny często nie zostaje osuszony poniżej 12% zawartości wody, ponieważ poniżej tej wartości entalpia wiązania mocno wzrasta. Wprowadzona energia powiększa przez to przede wszystkim wartość opałową węgla, ale nie przyczynia się istotnie do obniżenia zawartości wody. Niska zawartość wody w suszonym węglu zwiększa niebezpieczeństwo. Może dojść do zapalenia. Ponadto, wysoka wartość opałowa wymaga wzmocnionej recykulacji spalin, co podwyższa koszt instalacji.

TABELA 3

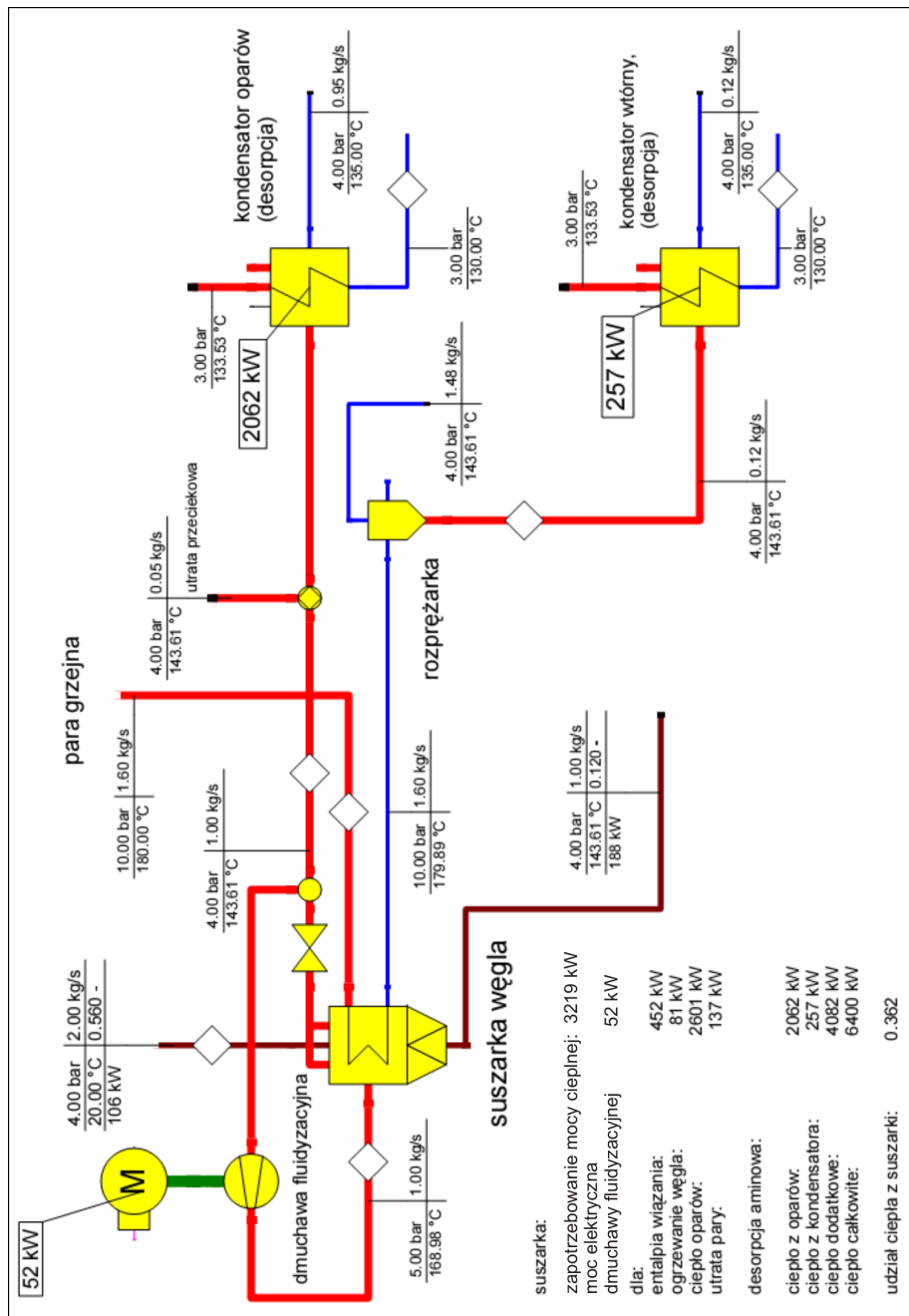
## Porównanie suszenia atmosferycznego - SPZFC dla każdorazowo 2 kg/s LWBS

Wariant	Suszarka	Cisnienie suszarki, bar	Zawartość wody w węglu, %	Specyficzne ciepło desorpcji, GJ/CO <sub>2</sub>	Para 10 bar, kg/s	Para 4 bar, kg/s	Para przeciekowa, kg/s
Bazowy	SPZFC	4	12	3,2	1,6	1,88	0,05
1	SPZFC	4	5	3,2	1,85	1,75	0,01
2	SPZFC	4	5	2,75	1,85	1,33	0,01
Bazowy	atmosferyczna	1,3	12	3,2	-	4,42	0,02
1	atmosferyczna	1,3	5	3,2	-	4,66	0,01
2	atmosferyczna	1,3	5	2,75	-	4,24	0,01

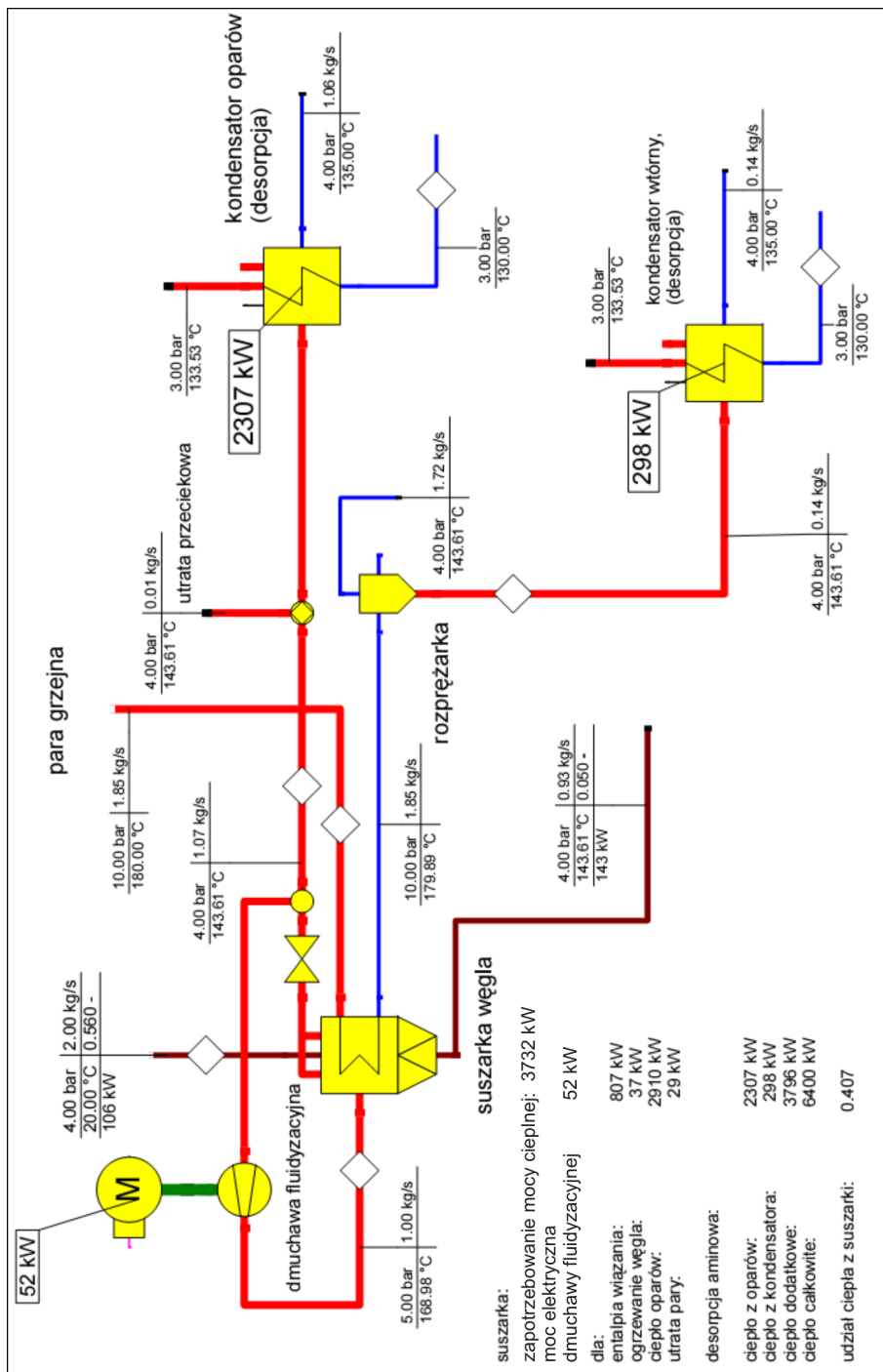




**Rys. 3.** Suszenie atmosferyczne węgla brunatnego i płuczka spalin



**Rys. 4.** Połączenie suszenia węgla brunatnego i płuczki spalin (wariant bazowy)



Rys. 5. Połączenie suszenia węgla brunatnego i płuczki spalin (wariant 1)

Przy założeniu 1% przecieku pary, którą według [12] stwierdzono dla wielkiej suszarki i docelową zawartością wody 5%, ciepło suszarki może zastępować 40,7% ciepła desorpcji (rys. 5).

### 11.3. SPZFC — wariant 2

Jak wspomniano powyżej zostały zbadane procesy płukania, które wykazują niższe zużycie energii. Dokonując obliczeń z wartościami wariantu 1 i specyficznym zapotrzebowaniem desorpcji za jedyne 2,75 GJ/t<sub>CO<sub>2</sub></sub>, może część ciepła suszarki wzrosnąć do desorpcji 47,4%.

## 12. Porównanie suszenia atmosferycznego — SPZFC

Suszenie atmosferyczne (12%) potrzebuje 1,47 kg/s pary grzejnej (4 bar) dla suszenia i 2,95 kg/s dla desorpcji, więc razem 4,42 kg/s. Przy odpowiednim połączeniu SPZFC i desorpcji będzie potrzebne 1,6 kg/s pary grzejnej o ciśnieniu 10 bar i 1,88 kg/s o ciśnieniu 4 bar, więc razem 3,48 kg/s.

Suszac aż do 5% zawartości wody i przyjmując tylko 1% pary przeciekowej dla SPZFC (wariant 1), suszenie atmosferyczne potrzebuje 4,66 kg/s pary grzejnej (4 bar). SPZFC potrzebuje 1,85 kg/s (10 bar) i 1,75 kg/s (4 bar) pary grzejnej.

Rozważając wariant 2, całkowita potrzeba pary grzejnej w desorpcji jest równa 2,53 kg/s. Zatem suszenie atmosferyczne potrzebuje 4,24 kg/s (4 bar), natomiast SPZFC 1,85 kg/s (10 bar) i 1,33 kg/s (4 bar) pary grzejnej.

Poza aspektami energetycznymi również praktyczne rozważania pobierania pary przemawiają za tym włączeniem. Pobieranie pary procesowej i uwzględnienie jego skutków są opisane szczegółowo w [11].

Wyżej wymienione obliczenia oparte są zawsze tylko na suszeniu węgla używanego w elektrowni. Jeżeli istnieje możliwość suszenia większej ilości surowego węgla brunatnego, np. dla zewnętrznych odbiorców, to wzrasta udział ciepła suszarki używanego w desorpcji.

## 13. Podsumowanie

Suszenie parowe w złożu fluidalnym atmosferycznym i pod ciśnieniem ma wady i zalety. Wspólną cechą jest to, że powstające ciepło oparów nie zawsze mogło być całkowicie wykorzystane w biegu cieplnym. W najnowszych koncepcjach elektrowni, płuczka CO<sub>2</sub> jest nowym użytkownikiem ciepła w zakresie od 130 do 150°C, która może pochłaniać ciepło, uwalniane w procesie suszenia węgla brunatnego pod ciśnieniem.

To umożliwia około 40% oszczędności desorpcji ciepła, względnie cały odbiór ciepła z turbiny może zostać zredukowany o 25%. Efekt synergii dodatkowo wzrośnie, jeżeli będzie osuszona większa, od potrzeb własnych elektrowni, ilość węgla brunatnego.

## LITERATURA

- [1] STEAG KETEK IT GmbH: Ebsilon Professional Version 9.0, 2010
- [2] *Höhne O., Martin J.S., Jentsch N., Thannhäuser L.*: Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) von Braunkohlen: Inbetriebnahme des 10 t/h-Versuchstrockner der Vattenfall Europe AG und erste Betriebsergebnisse; 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, Oktober 2008
- [3] *Klutz H.J. et al.*: WTA-Feinkomttrocknung, Baustein für die Braunkohlekraftwerke der Zukunft. VGB PowerTech 2006, 11, 57–61
- [4] *Klutz H.J.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines Wirbelschichttrockners für Braunkohle, Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2008
- [5] *Klutz H.J., Moser C., Block D.*: Stand der Entwicklung der Wirbelschicht-Trocknung mit interner Abwärmenutzung (WTA) für Braunkohle bei der RWE Power AG<sup>44</sup> in: Beckmann, M., Hurtado, A. (Hrsg.); Kraftwerkstechnik 2, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden 2010, Tagungsband, ISBN 978-3-935317-53-3, TK Verlag, Neuruppin, 2010, s. 427–441
- [6] *Lechner S. et al.*: Pressurized steam fluidized bed drying (PSFBD) of lignite. Proceedings of XII Polish Drying Symposium — Łódź, s. 734–741, 2009
- [7] *Lechner S., Höhne O., Krautz H.J.*: Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) von Braunkohlen: Bauliche Verfahrensoptimierungen an der BTU-Versuchsanlage und Ergebnisse. 41. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, Oktober 2009
- [8] *Merzsch M., Silbermann R., Krautz H.J.*: Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) von Braunkohlen: Neueste Betriebsergebnisse von der BTU-Versuchsanlage in: Beckmann, M., Hurtado, A. (Hrsg.); Kraftwerkstechnik 2, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden 2010, Tagungsband, ISBN 978-3-935317-53-3, TK Verlag, Neuruppin, 2010, s. 419–426
- [9] *Moser P., Schmidt S., Sieder G., Garcia H., Stoffregen T., Rösler F.*: Versuchsergebnisse aus der Post Combustion Capture Pilotanlage in Niederaußem in: Beckmann, M., Hurtado, A. (Hrsg.); Kraftwerkstechnik 2, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden 2010, Tagungsband, ISBN 978-3-935317-53-3, TK Verlag, Neuruppin, 2010, s. 97–108
- [10] *Oexmann J., Kather A.*: Post-Combustion CO<sub>2</sub> — Abtrennung in Kohlekraftwerken; VGB PowerTech; 1/2 of 2009; s. 92–103
- [11] *Pieper N. et al.*: Varianten zur Auskopplung großer Prozessdampfmenngen (CCS) im exergetischen Vergleich in: Beckmann, M., Hurtado, A. (Hrsg.); Kraftwerkstechnik 2, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden 2010, Tagungsband, TK Verlag, Neuruppin, 2010, s. 301–314
- [12] *Porsche T., Thannhäuser L., Jentsch B., Rauer T., Martin J., Höhne O.*: Trockenbraunkohleproduktion unter Hochdruck — Betriebserfahrungen der Versuchsanlage zur druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) in: Beckmann, M., Hurtado, A. (Hrsg.); Kraftwerkstechnik 2, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden 2010, Tagungsband, TK Verlag, Neuruppin, 2010, s. 407–418