

# **Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce**

## **Nauki techniczne i inżynieryjne**

Część II



[www.mlodzinaukowcy.com](http://www.mlodzinaukowcy.com)

Poznań 2019

**Redakcja naukowa**

dr inż. Jędrzej Nyckowiak, UPP

dr hab. Jacek Leśny prof. UPP

**Wydawca**

Młodzi Naukowcy

[www.mlodzinaukowcy.com](http://www.mlodzinaukowcy.com)

[wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com](mailto:wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com)

**ISBN (całość 978-83-66139-81-7)**

**ISBN (wydanie online 978-83-66392-44-1)**

**ISBN (wydanie drukowane 978-83-66392-43-4)**

Ilość znaków w książce: 583 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 14.6

Data wydania: sierpień 2019

Niniejsza pozycja jest monografią naukową. Jej rozdziały zostały wydrukowane zgodnie z przesłanymi tekstami po ich zaakceptowaniu przez recenzentów. Odpowiedzialność za zgodne z prawem wykorzystanie użytych materiałów ponoszą autorzy poszczególnych rozdziałów.

## Spis treści

<b>1. Analiza wpływu starzenia krótkoterminowego lepischer asfaltowych na właściwości reologiczne z wykorzystaniem testu MSCR</b>	<b>7</b>
<i>Baranowska Wiktoria, Błażejowski Krzysztof, Wójcik-Wiśniewska Marta</i>	
<b>2. Badanie wpływu gradacji mączki drzewnej na wytrzymałość mechaniczną kompozytu zbrojonego dyspersyjnie</b>	<b>15</b>
<i>Kacper Cieślak, Mateusz Śliwka</i>	
<b>3. Badanie wpływu stopnia wypełnienia próbek drukowanych na własności wytrzymałościowe</b>	<b>22</b>
<i>Kacper Cieślak, Mateusz Śliwka, Tymoteusz Kubok</i>	
<b>4. Analiza siłowni nadkrytycznych oraz ultranadkrytycznych</b>	<b>29</b>
<i>Stanisław Głuch</i>	
<b>5. Wybrane algorytmy poszukiwania zbiorów częstych na potrzeby reguł asocjacyjnych</b>	<b>37</b>
<i>Ignatiuk Katarzyna</i>	
<b>6. Ocena algorytmów data mining w klasyfikacji osób na podstawie geometrii dłoni</b>	<b>46</b>
<i>Ignatiuk Katarzyna</i>	
<b>7. Obrotowe niehigroskopijne wymienniki do odzysku ciepła z powietrza wywiewanego w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych</b>	<b>55</b>
<i>Paulina Kanaś</i>	
<b>8. Szronienie i techniki zabezpieczania przed szronieniem obrotowych wymienników do odzysku ciepła</b>	<b>64</b>
<i>Paulina Kanaś</i>	
<b>9. About the designing of steel connections</b>	<b>73</b>
<i>Kamil Kmiecik</i>	
<b>10. Dynamic loads for steel trestle with cranes</b>	<b>80</b>
<i>Kamil Kmiecik</i>	
<b>11. Effective cross-section of slender steel plate girders</b>	<b>89</b>
<i>Kamil Kmiecik</i>	
<b>12. Badanie rozkładu koncentracji naprężeń w kołowych płytach perforowanych przy określonych warunkach brzegowych</b>	<b>97</b>
<i>Mateusz Marcin Konieczny</i>	
<b>13. Projektowanie płyt perforowanych - aktualny stan zagadnienia</b>	<b>105</b>
<i>Mateusz Marcin Konieczny</i>	
<b>14. Historia zębatych pomp waporowych</b>	<b>111</b>
<i>Mielewska Małgorzata, Towarnicki Krzysztof</i>	
<b>15. Historia pomp wykorzystywanych w wodociągach i kanalizacji</b>	<b>119</b>
<i>Mielewska Małgorzata, Towarnicki Krzysztof</i>	
<b>16. Analiza możliwości obniżenia temperatury zagęszczania mieszanek mineralno – asfaltowych wytwarzanych w technologii na ciepło</b>	<b>126</b>
<i>Ostrowski Przemysław</i>	
<b>17. Zastosowanie metod numerycznych do analizy płyt perforowanych będących elementem konstrukcji wymienników ciepła</b>	<b>133</b>
<i>Dawid Piwowarski, Mateusz Marcin Konieczny</i>	

<b>18. Metody statystyczne wykorzystywane w analizie zależności struktura-retencja chromatograficzna</b>	<b>141</b>
<i>Rosenthal-Głuch Mirosława</i>	
<b>19. Porównanie efektów obróbki skrawaniem za pomocą konwencjonalnego wytaczaka i narzędzia z mechanicznym tłumikiem drgań</b>	<b>147</b>
<i>Skowronek Hubert, Waszczuk Kamil</i>	
<b>20. Rodzaje systemów dachów składanych w samochodach typu cabrio</b>	<b>155</b>
<i>Skowronek Hubert, Waszczuk Kamil</i>	
<b>21. Hydrauliczne układy wspomagające w urządzeniach przemysłowych</b>	<b>163</b>
<i>Towarnicki Krzysztof</i>	
<b>22. Przegląd układów hydraulicznych w dzielarkach do bułek oraz krajalnicach do chleba</b>	<b>172</b>
<i>Towarnicki Krzysztof</i>	
<b>23. Trendy rozwojowe w obróbce skrawaniem</b>	<b>181</b>
<i>Waszczuk Kamil, Skowronek Hubert, Piórkowski Paweł</i>	
<b>24. Modelling of manufacturing process a car suspension component in CAM environment</b>	<b>189</b>
<i>Waszczuk Kamil, Skowronek Hubert, Piórkowski Paweł</i>	



## **4. Analiza siłowni nadkrytycznych oraz ultranadkrytycznych**

Analysis of supercritical and ultrasupercritical power plants

Stanisław Głuch

Katedra energetyki i aparatury przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska

Stanisław Głuch: stanislaw.gluch@pg.edu.pl

Słowa kluczowe: turbiny parowe, elektrownie parowe, obieg Clausiusa-Rankinea

### **Streszczenie**

Niniejszy artykuł zawiera przegląd istniejących rozwiązań siłowni nadkrytycznych oraz ultra nadkrytycznych. Przedstawiono historię rozwoju bloków na parametry nadkrytyczne. Obecny stan technologii został zaprezentowany – są to następujące parametry pary świeżej: 650°C oraz 330 bar. W Polsce istnieje 8 bloków pracujących na parametry nadkrytyczne. Ich parametry pracy zostały przedstawione w tekście. Z kolei elektrownią parową posiadającą najwyższą sprawność netto jest Avedoere 2. Funkcjonowanie nadkrytycznych obiegów parowych jest przedstawione w publikacji, z uwzględnieniem nowej koncepcji o nazwie Master Cycle. Autor przedstawia wybrane komponenty bloku nadkrytycznego. Obecnie jest prowadzony program AD700 mający na celu zbudowanie bloku parowego mogącego przekroczyć 50% sprawności netto.

### **1. Wstęp**

Po drugiej wojnie światowej budowano głównie elektrownie działające w zakresie parametrów podkrytycznych pary wodnej. Sprawność większości tych elektrowni wahała się w okolicach 30% (Koltz 2008). Wraz z rozwojem techniki podnoszono parametry budowanych elektrowni. Elektrownie podkrytyczne zatrzymały się na temperaturze 540°C oraz 17 MPa, co pozwala osiągnąć 37% sprawności bloku. Pozwalało to na poprawę ekonomii generowania energii elektrycznej. W 1957 uruchomiono pierwszy komercyjny blok działający na parametry nadkrytyczne w elektrowni w elektrowni Philo w USA. (Piwowarski 2009). Osiągnęła ona sprawność o 13% wyższą niż większość elektrowni pracujących w tamtym czasie. Mogła okresowo pracować w zakresie parametrów super ultranadkrytycznych, jednak parametry te nie mogły być utrzymane z powodu ograniczonej wytrzymałości zastosowanych materiałów. Wpływ wzrostu parametrów pary na sprawność elektrowni działającej w obiegu Clausiusa-Rankine'a zaprezentowano na rysunku 1.1. Dopiero od lat 80 dwudziestego wieku zaczęto często budować bloki nadkrytyczne. Była to pierwsza generacja, której parametry wynosiły 26 MPa, 565°C dla pary świeżej oraz 585°C dla pary wtórnie przegrzanej (Koltz 2008). Od lat 90 zaczęto budować elektrownie drugiej generacji, których parametry wynosiły 28 MPa 580°C dla pary świeżej oraz 600°C dla pary wtórnie przegrzanej (Nameki 1998). Para świeża ma niższą temperaturę od pary wtórnie przegrzanej w celu ograniczenia grubości rur w kotle w przegrzewaczu wysokiego ciśnienia. Rozwój parametrów pary stosowanych w elektrowniach zaprezentowano na rysunku 2.2.

### **2. "The state of Art" - obecny stan technologii**

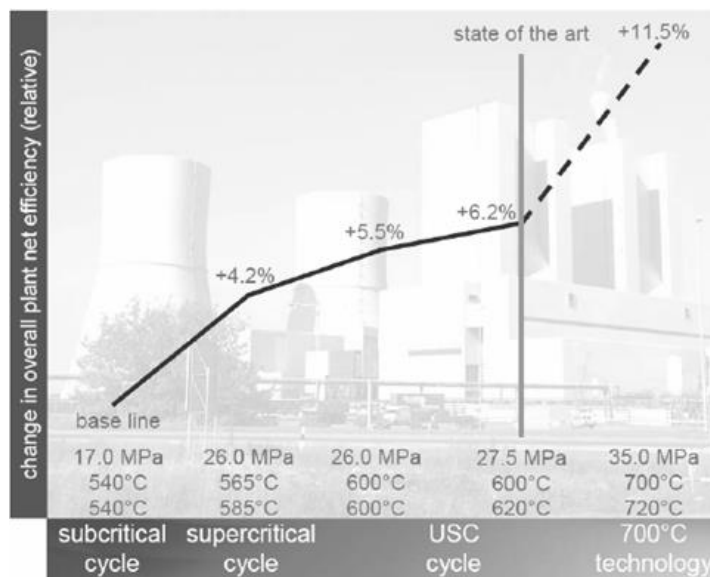
Najnowsze działające elektrownie nadkrytyczne należą do trzeciej generacji. Parametry te są najczęściej nazywane w literaturze super ultranadkrytycznymi i dochodzą do 30 MPa, 600°C dla pary świeżej oraz 620°C dla pary wtórnie przegrzanej. Najbardziej efektywne elektrownie tej generacji osiągają sprawność przewyższającą 47%. Obecnie poza podnoszeniem sprawności bardzo ważne jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń, w tym głównie dwutlenku węgla. Podniesienie sprawności zmniejsza koszty emisji dwutlenku węgla. Do niedawna uważano, że niewielkie podnoszenie parametrów pary świeżej jest nieopłacalne oraz wskazywano na konieczność dokonania skoku technologicznego.

Parametry trzeciej generacji są ograniczone poprzez zastosowane materiały. Użycie stopów niklu jest konieczne w celu osiągnięcia temperatur przewyższających 700°C. Na rynku jest obecnych

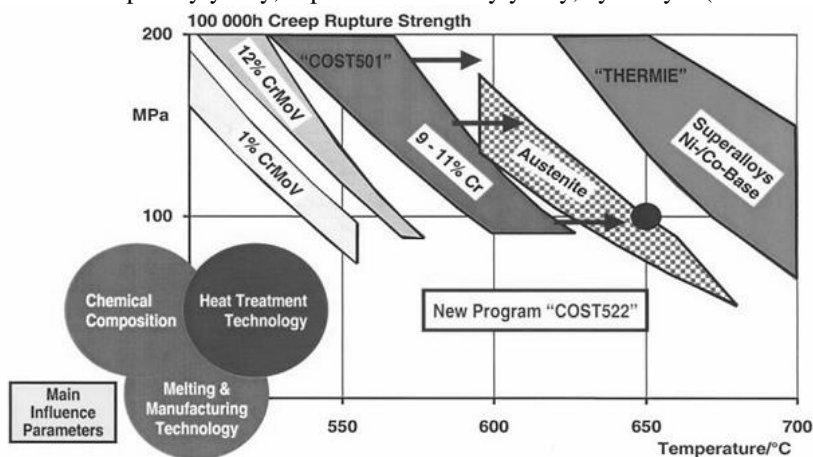


wiele materiałów, które potrafią znieść warunki pracy w ekstremalnie wysokich temperaturach, ponieważ turbiny gazowe pracują w temperaturach znacznie przewyższających 1000°C, jednakże działają one w dużo niższych ciśnieniach. Dlatego bezpośrednia implementacja tych materiałów bez uprzednich badań nie jest możliwa. Powstało kilka programów mających na celu rozwinięcie technologii 700°C. Badania są prowadzone w USA, Europie, Chinach i Rosji. Najbardziej znanym z tych programów jest zapoczątkowany w 1998 roku Thermie AD700 (Tumanovskii 2017). Na rysunku 1.3 zaprezentowano materiały stosowane dla poszczególnych zakresów temperatur.

W trakcie badań okazało się, że możliwe jest zastosowanie wyższych parametrów pary bez konieczności stosowania drogich superstopów na bazie niklu. Pozwala to na podniesienie parametrów pary świeżej bez znacznego wzrostu kosztu nakładów inwestycyjnych. (Tumanovskii 2017) Według pracowników duńskiej firmy DONG, Svena Kjaera oraz Franka Drinhaus, jest możliwe osiągnięcie sprawności 50% przy zastosowaniu obecnych używanych stopów (Kjaer i Drinhaus 2010). Firma GE w najnowszej ofercie przedstawia wyższe parametry pary 33 MPa, 650°C dla pary świeżej oraz 670°C dla pary wtórnie przegrzanej (GE 2018). Na chwilę obecną nie ma dostępnych informacji, o budowie bloku działającego na tych parametrach.



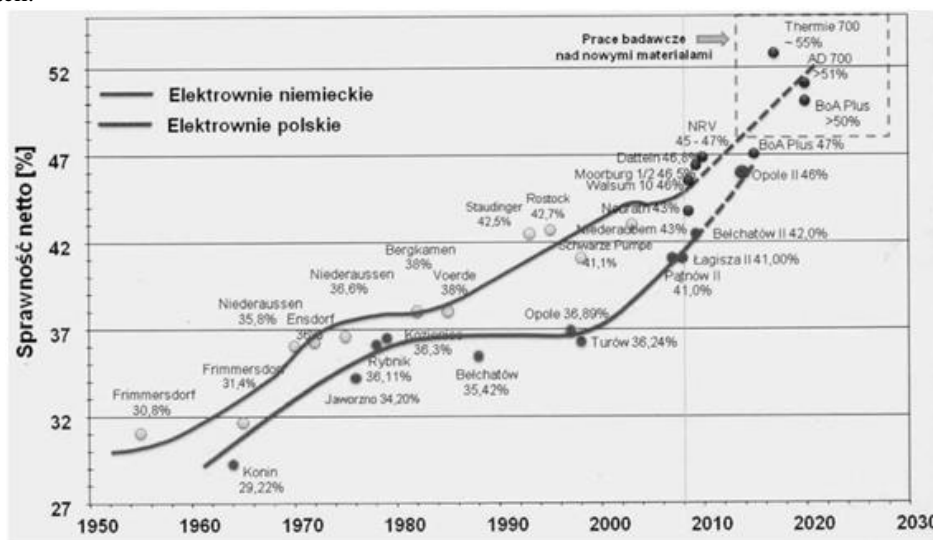
**Rys. 4.** Wpływ parametrów pary świeżej na sprawność elektrowni parowych dla konstrukcji firmy ALSTOM. Subcritical- podkrytyczny, supercritical-nadkrytyczny, cycle-cykl (Koltz 2008).



**Rys. 2.** Wpływ temperatury na zmianę materiałów części wlotowych turbin parowych (Witchman i Depolt 2006). Temperature-temperatura, creep rupture strenght - wytrzymałość na pełzanie.

### 3. Elektrownie nadkrytyczne w Polsce i na świecie

Do niedawna średnia sprawność polskich elektrowni była niska i wynosiła niewiele ponad 30%. Pierwszy blok nadkrytyczny w Polsce wybudowano dopiero w 2008 roku w elektrowni Pątnów. Od tego czasu wybudowano jeszcze trzy inne bloki nadkrytyczne. Na Rysunku 2.6. zamieszczono porównanie sprawności elektrowni polskich i niemieckich. Widać na nim opóźnienie w budowie bloków nadkrytycznych jakie wystąpiło względem państw zachodnich. W tabeli 2.1. zestawiono parametry oraz dane dotyczące eksploatowanych i budowanych polskich bloków nadkrytycznych. W tabelach 2.2. i 2.3. przedstawiono parametry wybranych elektrowni na parametry nadkrytyczne. W obecnie działających elektrowniach nie przekroczono progu 30 MPa oraz 620°C. Warto zwrócić uwagę na blok Avedoere 2. Posiada on najwyższe ciśnienie pary świeżej wynoszące 30 MPa. Niektóre źródła podają wartość 31 MPa. Podwójny przegrzew pary wtórnej oraz chłodzenie wodą morską pozwalają na osiągnięcie bardzo wysokiej sprawności produkcji energii elektrycznej. W literaturze można znaleźć różne dane dotyczące sprawności netto tej elektrowni. Wartości wahają się od 47% do 49,5%. (Noppenhau 2003) Sprawność skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej wynosi 95%. Korzystając z tych nieścisłości firma GE twierdzi, że elektrownia Karlsruhe 8 (RDK8) jest najbardziej sprawna elektrownią węglową na świecie. RDK8 osiąga 47,5% sprawności netto. Posiada ona jeden przegrzew wtórny pary. Jej ciśnienie jest nieco niższe, ale temperatury pary są nieco wyższe niż w elektrowni Avedoere 2. Szczegółowe parametry tych elektrowni przytoczono w poniższych tabelach.



Rys. 3. Porównanie sprawności elektrowni polskich na tle elektrowni niemieckich (Koltz 2008).

Tab. 4. Polskie bloki nadkrytyczne (Piwowarski 2009).

Nazwa	Rok oddania	Moc [MW]	Sprawność [-]	Temperatura pary świeżej [°C]	Ciśnienie pary świeżej [MPa]	Temperatura pary przegrzanej [°C]	Ciśnienie pary przegrzanej [MPa]
Pątnów II	2008	474	brutto 44	544	27,4	580	5,46
Łagisza	2009	460	brutto 44	560	27,5	580	5,46
Belchatów II	2011	460	Netto 41	550	25,2	580	5,4
Kozłmin 11	2017	1075	brutto 45,6	603	25	621	5,5
Turów	planowany 2020	460	netto 42,5	603	28,5	610	-
Opole	2018 i 2019	2x 910	brutto 45,5	603	28,5	621	6,3
Jaworzno	2019	910	netto 45,9	603	28,5	621	6,3
Ostrołęka	planowany 2024	1000	netto 46	600	27,1	620	

Tab. 1. Turbiny na parametry nadkrytyczne pierwszej i drugiej generacji (Deckers i in. 2005).

Nazwa elektrowni	Kraj	Moc brutto	Parametry pary			Rok uruchomienia
			MPa	°C	°C	
		MW				
Council Bluffs	USA	790	25.5	565	565	2007
Weston 4	USA	500	26.2	580	580	2007
Comanche 3	USA	750	26.2	570	570	2009
Elm Road1&2	USA	2 x 600	26.2	570	570	2009
Latan 2	USA	900	25.5	585	585	2010
Genesee 3	Kanada	495	25.0	570	568	2005
RPP NRW <sub>60Hz</sub>	USA	800	28.5	600	610	2010
Lippendorf	Niemcy	934	26.7	554	583	1999
Boxberg 1	Niemcy	907	26.6	545	581	2000
Niederaussem	Niemcy	1027	27.5	580	600	2003
RPP NRW	Niemcy	600	28.5	600	620	2008
Boa 2 Neurath	Niemcy	2 x 1100	26.0	595	595	2010
N ordjylland 3	Dania	411	29.0	582	580	1998
Avedoere 2	Dania	450	30.0	580	600	2002
Hemweg 8	Holandia	680	26.5	540	568	1994
TachibanaWan	Japonia	1050	25.9	600	610	2000
Hitachi-Naka1	Japonia	1000	25.4	604	602	2003
Isogo 1	Japonia	600	28.0	605	613	2002
Changshu	Chiny	3 x 600	24.8	543	571	2006
Wangqu	Chiny	2 x 600	27.5	571	569	2007
Waigaoqiao	Chiny	2 x 900	27.9	542	562	2004
Zovxian IV	Chiny	2 x 1000	27.0	600	600	2008
Huaneng	Chiny	4 x 1000	26.5	600	600	2008

Tab. 2. Turbiny na nadkrytyczne parametry trzeciej generacji produkcji ALSTOM [2].

Nazwa elektrowni	Kraj	Moc	Rok uruchomienia	Parametry pary świeżej		Parametry pary wtórnie przegrzanej	
				°C	bar	°C	bar
		MW					
Sostanj 6	Słowenia	600	2014	600	275	610	57
Mannheim 9	Niemcy	910	2013	597	275	609	57
Moorburg-Lot Unit A	Niemcy	838	2012	596	273	608	51
Moorburg-Lot Unit B	Niemcy	838	2012	596	273	608	51
Boxberg Block R	Niemcy	676	2011	596	276	608	50
Karlsruhe 8 (RDK8)	Niemcy	912	2011	600	275	620	62
Maasvlakte 3	Niemcy	1113	2011	600	275	620	58
Datteln	Niemcy	1100	2010	596	275	619	58
Neurath Unit F	Niemcy	1100	2010	591	260	605	55
Neurath Unit G	Niemcy	1100	2010	591	260	605	55
Staudinger 6	Niemcy	1100	2010	596	275	619	58

Blok 11 elektrowni Kozienice jest to najnowszy polski blok na parametry nadkrytyczne. Należy on do drugiej generacji. Podczas pracy w polskim systemie energetycznym osiągnął moc 1130 MW. Rysunki 2.7, 2.8, i 2.9, przybliżają szczegóły konstrukcji tej jednostki. Na rysunku 2.8, widać, że stosunek średnicy podziałowej do długości łopatki wynosi około 2. Starsze pozycje literatury zalecają, aby stosunek ten nie spadał poniżej wartości 3. Można na nich zobaczyć jak wygląda



schemat budowy tej elektrowni, oraz fragmenty turbiny niskoprężnej. Blok ten jest chłodzony za pomocą chłodni kominowej, ponieważ pozostałe bloki elektrowni Kozienice wyczerpują limit możliwości chłodzenia wodą rzeczną pochodząca z Wisły. Wysokość kotła wynosi 107 metrów, a wysokość chłodni kominowej przekracza 180 metrów.

#### **4. Obiegi nadkrytyczne**

Budowa elektrowni nadkrytycznej wiąże się z dużymi kosztami inwestycyjnymi, dlatego wszystkie tego typu jednostki wytwórcze są elektrowniami dużej mocy. Elektrownie dużej mocy posiadają zazwyczaj do 9 wymienników regeneracyjnych. Dalsze zwiększanie liczby wymienników wiąże się ze zwiększeniem kosztów inwestycyjnych i komplikacją obiegu, dając bardzo mały zysk sprawności.

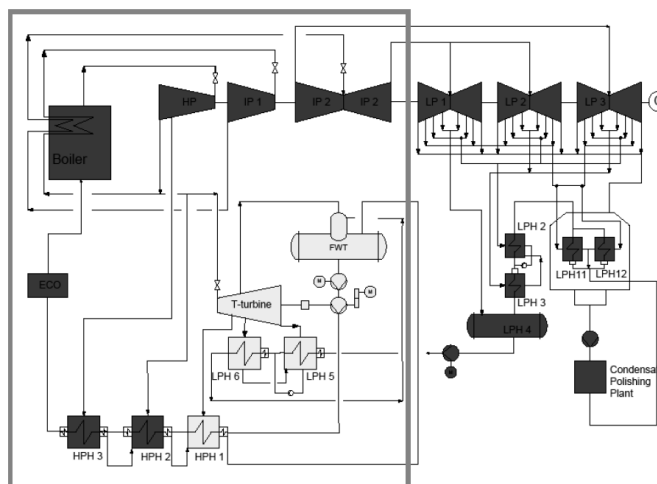
Wszystkie elektrownie nadkrytyczne posiadają co najmniej jeden przegrzew pary wtórnej. Podwójny przegrzew pary jest szczególnie popularny w USA. Najbardziej sprawna elektrownia na świecie posiada dwa przegrzewy. Według źródła (Tumanovskii 2017) zastosowanie drugiego przegrzewu pozwala na podniesienie sprawności generowania energii elektrycznej o 1,2%. Wartość ta pokrywa się z obliczeniami przeprowadzonymi przez autora, które zaprezentowano w rozdziale drugim. Drugi przegrzew redukuje problemy związane z zawilgoceniem pary na ostatnim stopniu. Ciśnienia przegrzewów należy dobrać na podstawie obliczeń optymalizacyjnych. Są to wartości różne w zależności od konfiguracji wymienników, parametrów pary świeżej oraz wylotu. Ich wpływ na sprawność maksymalną jest płaski w dużych zakresach (Kjaer i Drinhaus 2010). Przy ich ustalaniu należy wziąć pod uwagę konstrukcje turbiny i eksploatację bloku. W tabeli 2.4. zaprezentowano przybliżony wpływ zmiany parametrów na sprawność bloku. Na rysunku 2.10 zaprezentowano schemat obiegu elektrowni w Datteln. Warto zwrócić uwagę na zastosowanie szeregowo połączonych skraplaczy oraz wymiennik schładzający gazy wylotowe. Na rysunku 2.11 zaprezentowano obieg z podwójnym przegrzewem pary wtórnej. Warto zwrócić uwagę na zastosowanie aż 10 wymienników regeneracyjnych.

W obiegach podkrytycznych maksymalna temperatura wody zasilającej kocioł jest ograniczona przez temperaturę parowania wody przy zastosowanym ciśnieniu. W obiegach nadkrytycznych taki warunek nie występuje. Autorzy publikacji (Kjaer i Drinhaus 2010) przy pomocy obliczeń termodynamicznych wykazali, że istnieje optimum temperatury wody zasilającej. Wartość temperatury optymalnej różni się w zależności od parametrów i konfiguracji analizowanego obiegu. Według przytoczonego źródła może ona wynieść nawet 365°C. Podczas ustalania tej wartości należy wziąć pod uwagę sprawność kotła. Dzięki zastosowaniu obrotowego regeneratora ciepła gazów wylotowych jest możliwe schłodzenie spalin do temperatury 115°C przy zastosowaniu temperatury wody zasilającej o wartości 330°C. Według autorów publikacji 115°C to minimalna temperatura do której można schładzać spaliny w Danii. Wpływ podnoszenia temperatury wody zasilającej na sprawność obiegu jest niewielki. Z uwagi na eksploatację wymienników dla elektrowni o mocy przewyższających 800 MW należy być ostrożnym przy przekraczaniu 310°C (Kjaer i Drinhaus 2010).

Master Cycle to modyfikacja obiegu z podwójnym przegrzewem wtórnym. Ma ona na celu rozwiązanie problemów z bardzo wysoką temperaturą pary upustowej za przegrzewami. Para pobierana do upustu pochodzi z obszaru nadkrytycznego. Zaprojektowanie wymiennika regeneracyjnego działającego na tych parametrach jest trudne, ponieważ dokładne właściwości pary w tym zakresie są niedostatecznie poznane. Szczególnie problematyczna jest praca takich wymienników podczas warunków pracy na niepełnej mocy. Dodatkowo dochodzi do utraty energii niedawno przegrzanej pary (Kjaer i Drinhaus 2010). Ta modyfikacja pozwala również podnieść sprawność obiegu. Master Cycle polega na zastosowaniu specjalnej turbiny pomocniczej z upustami wymienników regeneracyjnych. Upusty z części średnioprężnej o nadkrytycznych temperaturach upustowych zostają przesunięte na turbinę pomocniczą. Dzięki temu do wymienników nie będzie trafiała para o temperaturach nadkrytycznych o wysokiej energii. Schemat tego rozwiązania zaprezentowano na rysunku 2.12, a na rysunku 2.13 zaprezentowano linie ekspansji tego rozwiązania wraz z zaznaczonymi upustami. Turbina pomocnicza może napędzać pompę główną, oraz posiadać własny generator w celu oddawania nadwyżki mocy.

Tab. 3. Wpływ modyfikacji obiegu na sprawność (Tumanovskii 2017, (Kjaer i Drinhaus 2010).

Zmiana w obiegu	wzrost sprawności [%]
wzrost temperatury pary świeżej o 1 °C	0.02
Wzrost ciśnienia pary świeżej o 1MPa	0.1
wzrost temperatury pary przegrzanej o 1 °C	0.015
użycie drugiego przegrzewu wtórnego	1.2
obniżenie ciśnienia w kondensatorze o 1 kPa	1.0
Wzrost temperatury wody zasilającej o 1°C	0.01
zastosowanie modyfikacji Master Cycle	0.05



Rys. 4. Schemat obiegu Master cycle (Kjaer i Drinhaus 2010).

### 5. Komponenty elektrowni nadkrytycznych

Nowoczesne elektrownie nadkrytyczne cechują się wysokimi parametrami pary oraz dużą mocą. Często pociąga to za sobą konieczność zastosowania komponentów innych niż w elektrowniach podkrytycznych, które zazwyczaj są niewielkiej mocy.

Parametry nadkrytyczne pociągają za sobą konieczność użycia koła Bensona. Jest to kocioł przystosowany do generowania pary o parametrach nadkrytycznych. W ciśnieniu nadkrytycznym nie dochodzi do klasycznego procesu wrzenia. Zmiany fazy ciekłej w fazę nadkrytyczną jest łagodna i nie wymaga zastosowania walczaka. Dlatego kocioł Bensona pomija ten element i składa się z długich rur. Największym wyzwaniem jest użycie odpowiednich materiałów. Muszą to być żarowytrzymałe stopy, które są w stanie wytrzymać wysokie naprężenia w wysokich temperaturach, co pociąga za sobą wysoka cenę tych materiałów.

Obecnie stosowane łopatki pierwszych stopni nie wymagają chłodzenia. Może to ulec zmianie po wprowadzeniu temperatur przewyższających 700°C. Obecnie kształt łopatek jest optymalizowany przy użyciu zaawansowanych numerycznych obliczeń przepływowych.

Dużym wyzwaniem jest zaprojektowanie ostatnich łopatek części niskoprężnej. Na nich skupiają się istotne problemy związane z drganiami, zawilgoceniem pary, oraz zapewnieniem odpowiedniego pola powierzchni wylotowej. Duża powierzchnia wylotów pociąga za sobą ekstremalne długości łopatek wirnikowych ostatniego stopnia co prowadzi do występowania wysokich wartości naprężeń rozciągających. W celu redukcji kosztów inwestycyjnych dąży się do ograniczenia liczby turbin niskoprężnych z 6 do 4. W elektrowni Kozienice 11 zastosowano

ekstremalnie długie łopatki ostatniego stopnia o długości 1,6 m. Pozwoliło to na zapewnienie 16 m<sup>2</sup> powierzchni wylotowej przy 4 kadłubach niskoprężnych. Łopatki ostatniego stopnie muszą być również dopasowane do zmiennych warunków przepływu na różnych średnicach.

## 6. AD 700

Pod koniec XX wieku czołowi producenci turbin parowych doszli do wniosku, że dalsze podnoszenie sprawności obiegów wymaga zastosowania superstopów na bazie niklu, co umożliwiłoby skokowy wzrost parametrów pary świeżej. W latach 90 w Europie zapoczątkowano program AD 700. Brali w nim udział najważniejsi producenci bloków energetycznych oraz energii elektrycznej. Warto wspomnieć, że jeden z pierwotnych uczestników, firma ABB, w trakcie trwania programu dwukrotnie zmieniła właściciela. Program miał na celu między innymi opracowanie nowych technologii i przetestowanie materiałów wytypowanych do konstrukcji kotłów oraz elementów turbin wysokoprężnych. Pierwszym etapem projektu było potwierdzenie zasadności przeprowadzenia badań pod kątem technicznym i ekonomicznym oraz wytypowanie materiałów do dalszych badań. Drugim etapem były badania dotyczące produkcji tych materiałów oraz ich zachowania w trakcie pracy w bloku energetycznym. Trzecim etapem było stworzenie demonstracyjnego bloku małej mocy. Czwartym etapem miało być wybudowanie demonstracyjnej elektrowni o pełnej mocy. Blok trzeciego etapu nazywa się NRWPP70 (North-Rhine Westphalia Power Plant 700°C). Budowa elektrowni etapu czwartego została wstrzymana z powodu zbyt wysokich kosztów inwestycyjnych nieuzasadnionych ekonomicznie oraz ograniczeniem emisji dwutlenku węgla. Budowa ta kosztowałaby co najmniej 700 milionów euro, co odpowiada 2500 dolarów za 1 kW zainstalowanej mocy (Tumanovskii 2017). W Japonii, USA, oraz Chinach uruchomiono niezależne programy mające na celu opracowanie technologii pozwalającej przekroczyć 50% sprawności elektrowni parowej.

## 7. Podsumowanie

Obiegi ultranadkrytyczne to przyszłość rozwoju obiegów parowych. Podnoszenie parametrów pary świeżej pozwala uzyskać wyższą sprawność netto elektrowni, co pozwala na ograniczenie emisji zanieczyszczeń i maksymalizację zysków. Nowe modyfikacje obiegu parowego takie jak Master Cycle również pozwalają na podniesienie sprawności elektrowni. Na świecie jest budowanych coraz więcej elektrowni pracujących na parametry nadkrytyczne. Prowadzone są badania mające na celu umożliwienie budowy bloku dla którego temperatura pary świeżej będzie przekraczała 700°C.

## 8. Literatura

- Witchman A, Depolt M(2006) State of the art 800 steam power plant innovative supercritical and ultrasupercritical steam turbine generator sets. Power Generation Siemens,
- Cziesla F, Bewerunge J, Senzel A (2009) Lünen – State-of-the-Art Ultra Supercritical Steam Power Plant Under Construction. POWER-GEN Europe 2009
- Deckers M, Wichtmann A, Ulm W (2005) Advanced Steam Turbine Technology for High Efficient Ultra supercritical Power Plants. Siemens Westinghouse Power Corporation. Proc. China Power GE (2018) <https://www.ge.com/power/case-studies/rdk8> (dostęp 23.05.2018 r.).
- Kjaer S, Drinhaus F (2010) A Modified Double Reheat Cycle Conference. ASME 2010 Power Conference
- Klotz H, Brandt C (2008) Alstoms Target and Most Advanced Steam Turbine Generator Set E. ON'S Power Plant Datteln 4. Power Gen. Europe Conf.
- Malko J, Wojciechowski H (2016) Bloki na horyzoncie. Zmagania z progiem 50 % sprawności obiegu parowego Rankine'a. Energetyka Ciepła i Zawodowa
- Nameki Y, i inni (1998 ) Development of Tandem Compound 1000 WM Steam Turbine and Generator, Hitachi Rev.
- Noppenau H (2003 ) Concept and first operating experience with Avedøre 2. Research gate
- Piwoński M (2009) Optimization of steam cycles with respect to supercritical parameters. PMR

GE (2018) Smarter. Cleaner. Steam Power. 2018 STEAM POWER PRODUCT CATALOG - NEW BUILD UNITS

Tumanovskii A i inni (2017) Review of the Coal-Fired, Over-Supercritical and Ultra-Supercritical Steam Power Plants. Thermal Engineering

Zirn U, Haraguchi M (2010) Hitachi turbine generator technology. General Electric Reports

Ziółkowski P, Kowalczyk T, Kornet S, Badur J (2017) On low-grade waste heat utilization from a supercritical steam power plant using an ORC-bottoming cycle coupled with two sources of heat. Energy Conversion and Management

Mikielewicz D, Wajs J, Ziółkowski P, i inni, (2016) Utilisation of waste heat from the power plant by use of the ORC aided with bleed steam and extra source of heat. Energy

