



Poprawa algorytmu sterowania trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej

Piotr Pyrka^{a,*}

REKOMENDOWANE PRZEZ: *prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski*^a

^a Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Politechnika Wroclawska,

* Adres do korespondencji: piotr.pyrka@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE

W artykule opisana jest zasada działania chłodziarki adsorpcyjnej na przykładzie trójzłożowej dwuparownikowej chłodziarki pracującej na parze silikażel – woda. Przedstawiony jest oryginalny algorytm sterowania oraz opisane są modyfikacje, którym został poddany. W artykule zaprezentowane zostały wyniki z pracy agregatu pod kontrolą nowego algorytmu oraz wspomniane zostały dodatkowe możliwości jego poprawy. Modyfikacja algorytmu poprawiła COP o ponad 10% oraz pozytywnie wpłynęła na stabilność pracy urządzenia.

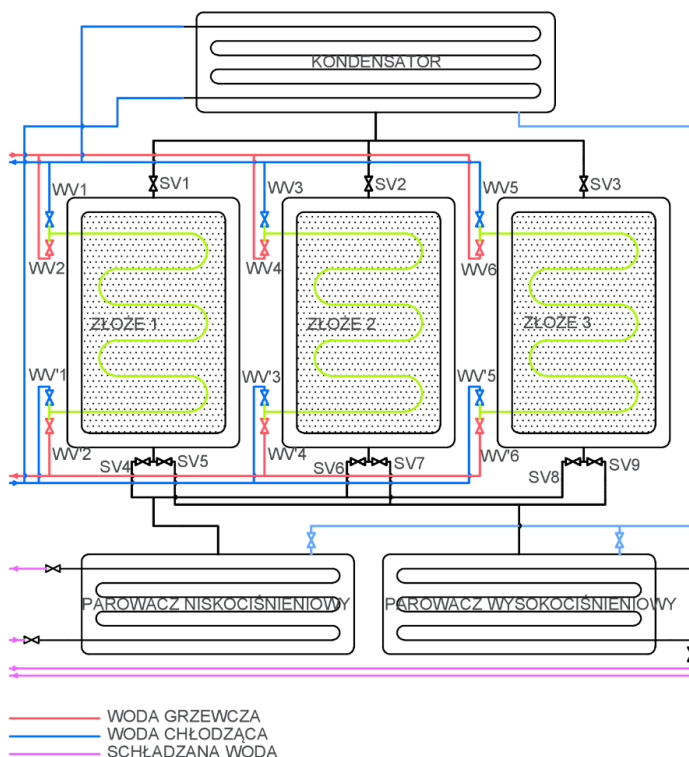
SŁOWA KLUCZOWE: *chłodziarka adsorpcyjna, trigeneracja, sterowanie*

1. WPROWADZENIE

Trigeneracja jest systemem umożliwiającym równoczesne wytwarzanie energii elektrycznej, ciepła i chłodu, przy czym chłód jest uzyskiwany z wykorzystaniem technologii sorpcyjnych i z użyciem ciepła pochodzącego z kogeneracji. Do wytworzenia chłodu możliwe jest również wykorzystanie ciepła z kolektorów słonecznych i pochodzącego z procesów przemysłowych. Efektywny system trigeneracyjny powinien mieć zdolność konwersji na chłód ciepła o jak najniższej temperaturze, co pozwala na uzyskanie wysokiej efektywności kogeneracji. Dostępne komercyjnie technologie absorpcyjne (chłodziarki z wodnym roztworem LiBr) umożliwiają wykorzystanie ciepła o temperaturze nie niższej niż około 85 °C. Mogą one być zespolone z systemami kogeneracyjnymi w bezpośrednim sąsiedztwie kogeneratorów, ale nie mogą być zasilane pochodzącym z kogeneracji ciepłem rozprowadzanym sieciami ciepłowniczymi i charakteryzującym się w okresie letnim temperaturą wynoszącą około 65 °C. Obecnie badana i rozwijana technologia chłodnictwa adsorpcyjnego umożliwia konwersję na chłód ciepła o temperaturze nie niższej niż 50 °C.

2. BUDOWA CHŁODZIARKI ADSORPCYJNEJ

Badania prowadzone są na chłodziarce adsorpcyjnej trójzłożowej dwuparownikowej wykorzystującą parę roboczą silikażel–woda. Chłodziarka składa się z 3 głównych elementów: kondensatora (skraplacza), złożów wypełnionych adsorbentem oraz parowaczy (parowników). Złoża mogą być ogrzewane lub chłodzone w zależności czy przepływa przez nie woda grzewcza, czy chłodząca. Dodatkowo każde złożo ma połączenia próżniowe wraz z zaworami do obu parowaczy i skraplacza. Złoża wypełnione są silikażelem, który jest materiałem higroskopijnym (czyli pochłaniającym wodę). Schemat urządzenia pokazano na rysunku 1. Z wnętrza chłodziarki odpompowane zostało powietrze i jedyną substancją, która się tam znajduje jest czynnik roboczy – woda. W wyniku adsorpcji zachodzącej na powierzchni adsorbentu wypełniającego złoża następuje pochłanianie pary wodnej, co skutkuje obniżeniem ciśnienia do momentu, w którym woda w parownikach zacznie wrzeć. Intensywne parowanie wody na powierzchni miedzianych rurek, przez które tłoczona jest woda lodowa, jest źródłem mocy chłodniczej. Parowanie odbywa się przy ciśnieniu 500–1200 Pa, czyli zbliżonym do ciśnienia pary nasyconej przy temperaturze około 5 °C (parownik niskociśnieniowy) i około 12 °C (parownik wysokociśnieniowy).



Rys. 1: Schemat trójzłożowej dwuparownikowej chłodziarki adsorpcyjnej

Adsorber ma skończoną chłonność, czyli może zaadsorbować określoną ilość wody. W podwyższonej temperaturze chłonność adsorbera jest znacznie mniejsza, co umożli-

liwia desorpcję części zaadsorbowanego adsorbentu. Z podgrzanego złoża uwalnia się para wodna, którą skrapla się przy ciśnieniu 3500–6000 Pa w kondensatorze. Złoże, z którego zdesorbowano część pary wodnej jest złożem zregenerowanym.

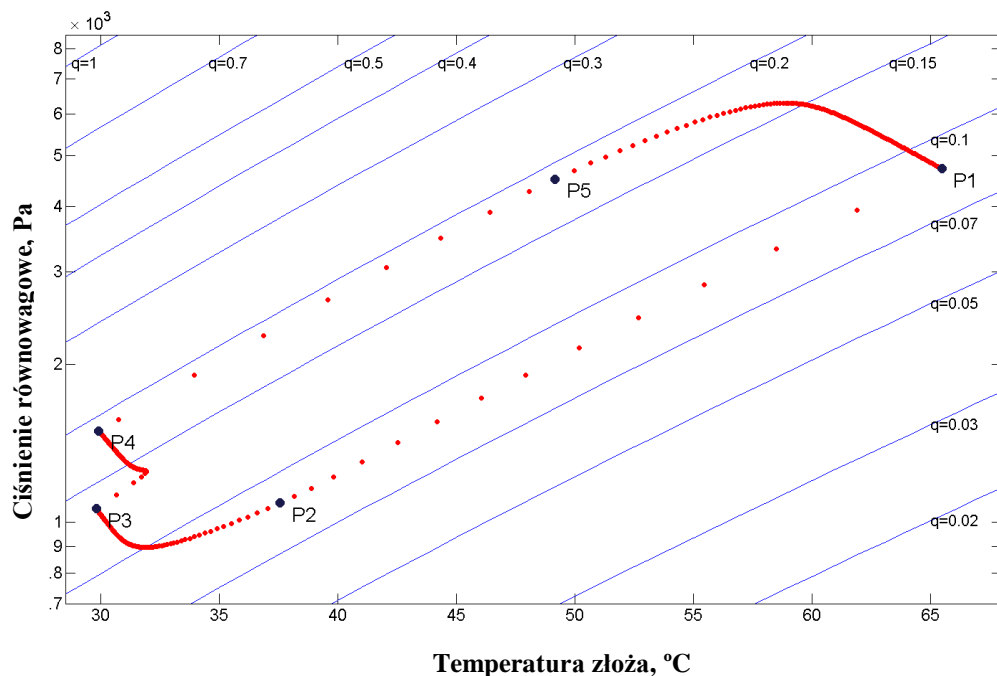
3. ZASADA DZIAŁANIA

Praca chłodziarki jest cykliczna. Na pełny cykl złoża składają się 3 główne etapy jego pracy. Cykle pracy poszczególnych złożów są względem siebie przesunięte w czasie i mogą być podzielone na trzy etapy pokazane w tabeli 1, czasy etapów są sobie równe i wynoszą $\frac{1}{3}$ czasu całego cyklu. Dwa z etapów pracy mają dodatkowe podetapy związane z czasem potrzebnym na ogrzanie lub ochłodzenie złoża. Etapy pracy złożów składające się na pełen cykl wraz z sekwencją otwierania zaworów (pokazanych na schemacie z rys. 1) przedstawione zostały w tabeli 1.

Praca urządzenia będzie przeanalizowana na przykładzie pełnego cyklu pracy jednego złoża. Na pierwszy etap pracy składa się podetap, w którym schładzane jest złoże, które zostało zregenerowane (rys. 2 linia pomiędzy punktami P1 a P2). W momencie, gdy ciśnienie panujące w złożu spadnie poniżej ciśnienia w parowaczu niskociśnieniowym, otwarty zostaje zawór łączący te elementy. W tym momencie zaczyna się drugi podetap – adsorpcja niskociśnieniowa (rys. 2 linia pomiędzy punktami P2 a P3). Gdy efektywność adsorpcji (oraz moc chłodnicza) spadnie poniżej założonego poziomu przełączany jest parownik niskociśnieniowy na wysokociśnieniowy (rys. 2 P3–P4). Wzrost ciśnienia umożliwia kontynuowanie procesu adsorpcji, a etap ten nazywamy adsorpcją wysokociśnieniową. Analogicznie do poprzedniego etapu kończy się on w momencie, gdy stopień zaadsorbowania zbliży się do stanu równowagi adsorpcyjnej (co zmniejszy efektywność adsorpcji). Następnie adsorber przechodzi w stan regeneracji, poprzedzony wcześniejszym podgrzaniem złoża (rys. 2 linia pomiędzy punktami P4 a P5). Regeneracja polegająca na ogrzewaniu adsorbentu połączonego ze skraplaczem, w wyniku czego desorbowana jest zaadsorbowana we wcześniejszych etapach woda (rys. 2, droga pomiędzy P5 a P6).

Tab. 1: Cykl pracy chłodziarki wraz z sekwencją otwierania zaworów – oryginalny algorytm

	Etap 1		Etap 2		Etap 3	
Złoże 1	schładzanie	adsorpcja LP	adsorpcja HP		ogrzewanie	regeneracja
Złoże 2	adsorpcja HP		ogrzewanie	regeneracja	schładzanie	adsorpcja LP
Złoże 3	ogrzewanie	regeneracja	schładzanie	adsorpcja LP	adsorpcja HP	
Złoże 1	WV1, WV'1	WV1, WV'1, SV4	WV1, WV'1, SV5		WV2, WV'2	WV2, WV'2, SV1
Złoże 2	WV3, WV'3, SV7		WV4, WV'4	WV4, WV'4, SV2	WV4, WV'4	WV4, WV'4, SV6
Złoże 3	WV6, WV'6	WV6, WV'6, SV3	WV5, WV'5	WV5, WV'5, SV8	WV5, WV'5, SV9	



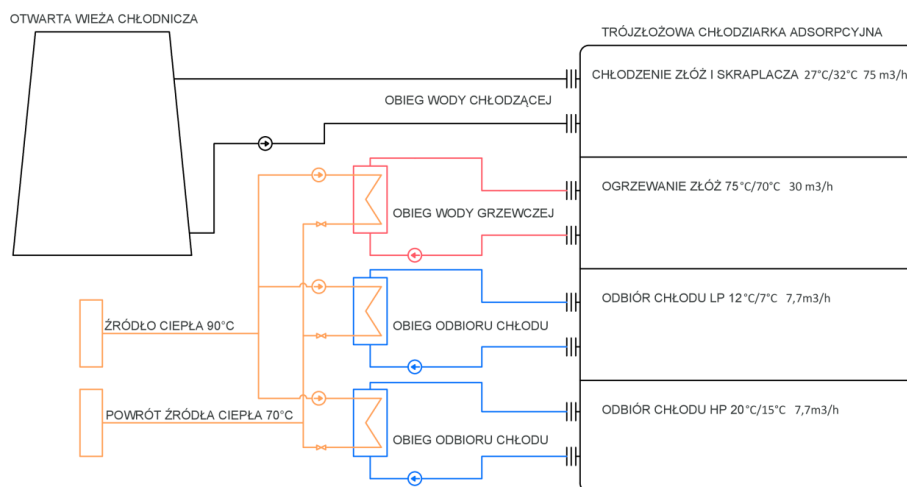
Rys. 2: Cykl pracy złoża pokazany na wykresie ciśnienia równowagowego od temperatury z pokazanymi izosterami adsorpcji. Ponumerowane zostały punkty, w których przełączane są etapy pracy (P1–P2: schładzanie złoża, P2–P3: adsorpcja niskociśnieniowa, P3–P4: adsorpcja wysokociśnieniowa, P4 – P5: ogrzewanie złoża, P5–P1: desorpcja). Jeden punkt symbolizuje 5 sekund pracy złoża. Symbolem q oznaczony został stopień zaadsorbowania silikażelu [kg zaadsorbowanej wody/kg suchego silikażelu]



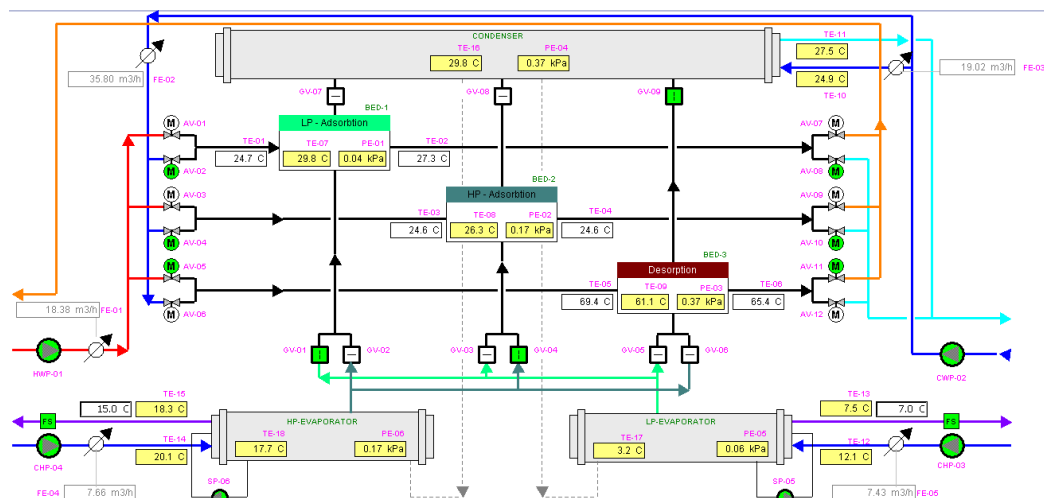
Rys. 3: Widok chłodziarki (po lewej) oraz stanowiska pomiarowego (po prawej)

4. BADANIA CHŁODZIARKI

Długotrwałe badania prototypowej trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej (pokazana na rys. 3) prowadzone są we Wrocławskim Parku Technologicznym. Parametry chłodziarki adsorpcyjnej zostały przedstawione w tabeli 2. Na rysunku 4 pokazany jest uproszczony schemat instalacji pomiarowej. Chłodziarka wyprodukowana została przez polskie przedsiębiorstwo NET S.A. Nominalna moc chłodnicza wynosi 90 kW. Chłodziarka oraz stanowisko pomiarowe zostało opomiarowane: mierzone są temperatury oraz przepływy we wszystkich obiegach wody oraz ciśnienia i temperatury w elementach składowych chłodziarki (pokazane na zrzutach ekranu panelu operatorzyńskiego na rys. 5).



Rys. 4: Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego



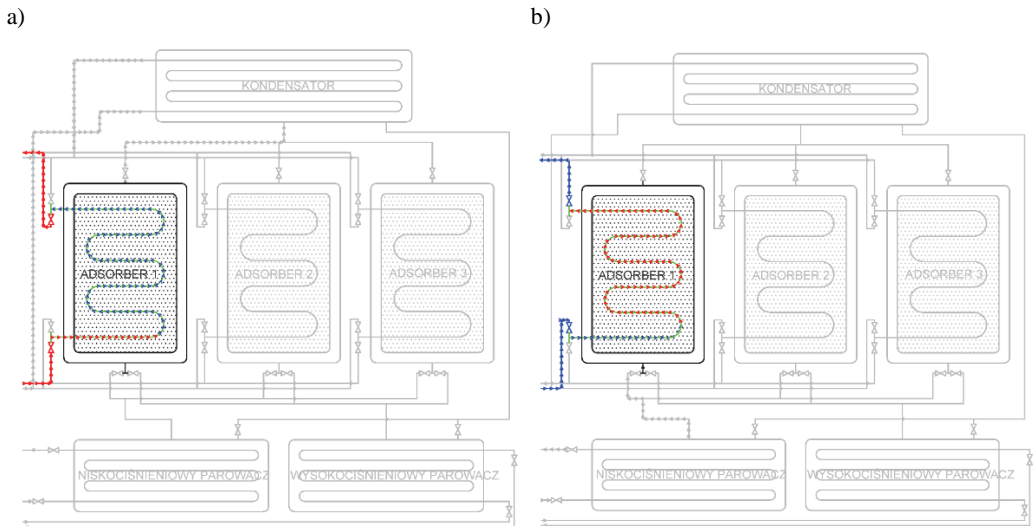
Rys. 5: Zrzut ekranu panelu operatorzyńskiego, widok chłodziarki

Tab. 2: Parametry chłodziarki adsorpcyjnej zainstalowanej w budynku Omega WPT

Parametr	Wartość
Nominalna moc chłodziacza	$2 \cdot 45 \text{ kW} = 90 \text{ kW}$
Temperatura regeneracji ziół	50–85 °C
Odbiór chłodu na poziomach temperatury	~15 °C i ~7 °C
Temperatura wody chłodzącej	20–35°C
Układ adsorbent–adsorbat	silikażel–woda
Rodzaj agregatu adsorpcyjnego	trójzłozowy, dwuparowaczowy o złożach zorientowanych pionowo

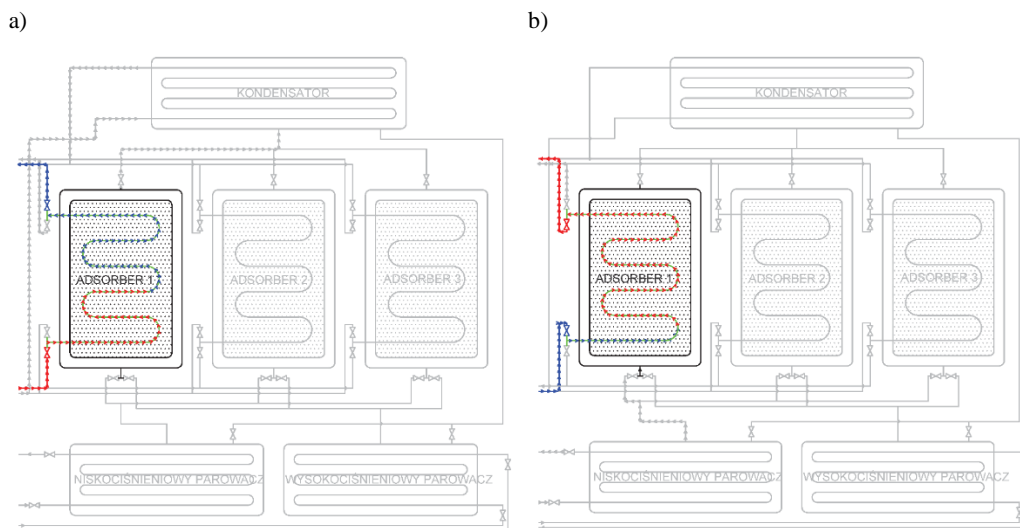
5. MODYFIKACJA ALGORYTMU STERUJĄCEGO

Głównym powodem, który przemawiał za zmodyfikowaniem oryginalnego algorytmu sterowania był moment przełączania ziół dla zmiany z ogrzewania na chłodzenie oraz z chłodzenia na ogrzewanie. W momencie tym zamykane były zawory zasilania i powrotu obiegu medium grzewczego/chłodzącego i otwierane zawory drugiego z tych mediów. W efekcie do układu wody grzewczej włączane było ponad 70 litrów chłodnej wody, a do układu wody chłodzącej wyrzucana była taka sama ilość ciepłej wody, sytuacja pokazana jest na rysunku 6.



Rys. 6: Oryginalny algorytm: (a) przełączanie złoza z chłodzenia na ogrzewanie – etap pracy: pre-heating, (b) przełączanie złoza z grzania na chłodzenie – etap pracy: pre-cooling

W nowym algorytmie postanowiono zmodyfikować ten etap pracy przez opóźnienie przełączenia zaworu powrotu do momentu, w którym temperatury wody opuszczającej złoza w etapie pre-heatingu i pre-coolingu zblizą się do siebie. Eksperymentalnie wyznaczono, że następuje to po około 35 s. Innymi słowy przez 35 s odzyskiwane jest ciepło ze złoza, które wcześniej było regenerowane, a właśnie jest chłodzone. Modyfikacja ta nazywana jest regeneracją ciepła (rys. 7).



Rys. 7: Zmodyfikowany algorytm: (a) przełączanie złoże z chłodzenia na ogrzewanie – etap pracy: pre-heating, (b) przełączanie złoże z grzania na chłodzenie – etap pracy: pre-cooling

5.1. DODATKOWE MODYFIKACJE ALGORYTMU STERUJĄCEGO

– PROGRAM LP_BOOST:

Postanowiono wykorzystać możliwość modyfikacji algorytmu do kolejnych usprawnień pracy agregatu. Priorytetem była poprawa stabilności produkcji chłodu przez parownik niskociśnieniowy. W przebiegu temperatury wody lodowej opuszczającej ten parownik występuje kilkudziesięciosekundowy pik spowodowany czasem potrzebnym na ochłodzenie zregenerowanego złoże, zanim rozpocznie ono prowadzić adsorpcję niskociśnieniową. W celu zwiększenia przepływu wody chłodzącej przez to złoże zamknięto na ten czas przepływ wody przez złoże, które weszło w etap pracy adsorpcji wysokociśnieniowej. Złoże współpracujące z parownikiem wysokociśnieniowym z racji zwiększenia ciśnienia adsorpcji oraz wychłodzonego wymiennika ciepła z ponad 70 litrami chłodnej wody, pomimo wyłączenia przepływu wody chłodzącej, w dalszym ciągu prowadzi intensywnie adsorpcję, natomiast złoże w etapie pre-cooling z powodu większego przepływu o kilka procent szybciej może być schłodzone. Modyfikacja ta nazywana jest LP_boost.

– PROGRAM REGENERACJA_MASY:

Ostatnią wprowadzoną modyfikacją była regeneracja masy. Tą nazwą określamy połączenie parowe złoże, które kończy być regenerowane (i panuje w nim ciśnienie $\sim 3,5$ kPa) ze złoże kończącym etap adsorpcji wysokociśnieniowej (panuje w nim ciśnienie $\sim 1,5$ kPa). W obu tych złożach proces adsorpcji/desorpcji w danych warunkach był już mało efektywny, jednak dla uśrednionego ciśnienia ($\sim 2,5$ kPa) staje się on bardzo intensywny. Dodatkowo z martwej objętości świeżo zregenerowanego złoże odsysana jest pewna masa pary wodnej, która w przypadku standardowego etapu pracy musiałaby zostać zaadsorbowana ponownie na tym złoże w etapie pre-cooling.

Niestety chłodziarka niema niezależnego połączenia próżniowego złożeń, dlatego do regeneracji masy wykorzystano kolektor parownika wysokociśnieniowego (i pośrednio też parownik wysokociśnieniowy, którego nie da się odłączyć od tego kolektora). Eksperymentalnie wyznaczono, że regeneracja masy trwająca do 10 sekund nieznacznie tylko pogarsza pracę parownika wysokociśnieniowego (kilkusekundowy pik w temperaturze wody lodowej opuszczającej ten parownik, nierejestrowany za buforem wody lodowej). Pogorszenie pracy parownika wysokociśnieniowego jest nieistotne w stosunku do poprawy pracy parownika niskociśnieniowego oraz zwiększenia sprawności agregatu.

– UDERZENIA HYDRAULICZNE:

W nowym algorytmie w celu uniknięcia uderzeń hydraulicznych (wynikających z gwałtownego hamowania rozpędzonej cieczy) zastosowano regułę, że przed zamknięciem zaworu otwierany jest drugi zawór, co zapewni stały przepływ wody. Rozważano również możliwość wyłączenia pompy na krótką chwilę przed przełączaniem zaworów jednak nie było to konieczne – odpowiednie sterowanie zaworami zapobiega powstawaniu uderzeń hydraulicznych.

– OGRANICZENIE ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ:

W zmodyfikowanym algorytmie skupiono się na optymalizacji termicznej działania agregatu. Istnieją możliwości optymalizacji zużycia energii elektrycznej przez agregat, jednak jeszcze nie zostały zaimplementowane. Oszczędność w energii elektrycznej polegać by miała na cyklicznej pracy pomp zraszających rurki w parownikach. Pompy te o mocy 1,1 kW już po kilkunastu sekundach pracy zapewniają zwilżenie rurek w parowniku, a po ich wyłączeniu potrzeba kilkudziesięciu sekund (~50 s) na odparowanie wody z ich powierzchni. Dodatkowo pompa ta nie musi pracować w parowniku niskociśnieniowym w etapie pre-cooling. Kolejnym elementem, w którym rozważano oszczędność energii elektrycznej, była pompa wody grzewczej – zapotrzebowanie na moc cieplną chłodziarki zmienia się od około 300 kW do około 50 kW podczas etapu pracy, ta zależność mogłaby zostać wykorzystana do sterowania wydajnością pompy wody grzewczej. Ograniczenie jej mocy pod koniec etapu pracy mogłoby nieznacznie zmniejszyć wydajność urządzenia (najwięcej ciepła można dostarczyć przy maksymalnym przepływie przez wymiennik), jednak zyskujemy znaczny procent energii elektrycznej wykorzystywanej przez tę pompę (o mocy 3,4 kW). Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest większa różnica temperatury między zasilaniem a powrotem wody grzewczej, co jest istotne dla sieci ciepłowniczej.

6. WYNIKI BADAŃ

Od początku 2015 roku chłodziarka pracowała pod kontrolą nowego sterownika. Przez pierwsze tygodnie pomiarów modyfikowany był program sterujący oraz wyznaczane były optymalne parametry pracy (czas odzysku ciepła i regeneracji masy). Następnie prowadzone były badania chłodziarki działającej pod nowym algorytmem. W tabeli 3 zaprezentowane są wyniki z pomiarów pod kontrolą nowego oprogramowania w formie tabeli. Pomiar z dnia 29.01.15 jest wykonany dla znacznie niższych temperatur wody lodowej (HP – 14°C, LP – 9°C, dla reszty pomiarów HP – 20°C, LP – 12,5°C). Dla pomiarów z pozostałych dni COP wynosi przynajmniej 0,64, a maksymalna zarejestrowana wartość

COP to 0,71. Maksymalne COP dla oryginalnego algorytmu wynosiło 0,64. Pod kontrolą oryginalnego oprogramowania z przeszło 150 pomiarów tylko dwa pomiary charakteryzowały się COP o wartości większej od 0,60.

Tab. 3: Wyniki badania chłodziarki adsorpcyjnej pracującej pod kontrolą zmodyfikowanego algorytmu

data:	T_{etap} [s]	T_{WG} [°C]	T_{WCH} [°C]	P_{LP} [kW]	P_{HP} [kW]	P_{SUM} [kW]	P_{WG} [kW]
21.01	900	55,0	25	28,6	48,0	76,6	115,3
19.01	900	57,5	25	31,8	53,1	84,9	119,1
16.01	900	60,0	25	35,7	47,7	83,3	131,3
15.01	900	62,5	25	43,4	44,3	87,6	131,2
14.01	750	62,5	25	42,0	47,6	89,6	139,9
29.01	900	62,5	21	44,5	47,9	92,4	156,6

7. PODSUMOWANIE

Modyfikacja algorytmu sterowania chłodziarką przyniosła oczekiwany efekt. Średnie COP wzrosło o ponad 10 punktów procentowych oraz poprawiła się stabilność pracy. Planowane są kolejne modyfikacje algorytmu sterowania, w celu redukcji zużycia energii elektrycznej przez badany agregat.

PODZIĘKOWANIA

Praca współfinansowana ze środków CUW EDF, środków statutowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



LITERATURA

- [1] Uyun A.S., Miyazaki T., Ueda Y., Akisawa A., *Experimental investigation of a three-bed adsorption refrigeration chiller employing an advanced mass recovery cycle*, Energies, Vol.2, No.3, 531–544.
- [2] Wang D.C., Xia Z.Z., Wu J.Y., Wang R.Z., Zhai H., Dou W.D., *Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction*, Int. J. Refrigeration, 28 1073–1083, 2005.
- [3] Pyrka P., *Modelowanie trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej*, Zeszyty Energetyczne Tom I, 205–216, 2014.
- [4] Rahman A., Miyazaki T., Ueda Y., Saha B., Akisawa A., *Performance Comparison of Three-Bed Adsorption Cooling System With Optimal Cycle Time Setting*, Heat Transfer Engineering, 34, 938–947, 2013.