

Na prawach rękopisu



Politechnika Wroclawska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Praca doktorska

Zbigniew Rogala

Analiza termodynamiczna intensyfikacji
procesów adsorpcyjnego suszenia
powietrza w chłodnictwie

Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Kolasiński

Wrocław, 2017

Na powstanie i ostateczny kształt mojej pracy doktorskiej miało wpływ wiele osób, którym chciałbym serdecznie podziękować.

Spis treści

Spis treści	iii
Spis rysunków	v
Spis tabel	x
Wstęp	1
Teza, cel, zakres i metody badań	2
Teza pracy	2
Cele badawcze	2
Przedmiot i zakres badań	2
Metody badań	2
1 Wprowadzenie	3
1.1 Wstęp	3
1.2 Rewolucja w chłodnictwie	3
1.3 Konwersja ciepła na chłód	5
1.4 Nowe technologie w chłodnictwie	6
1.4.1 Rozwój alternatywnych technologii chłodniczych	6
1.4.2 Wprowadzenie	7
1.4.3 Chłodnictwo strumienicowe	17
1.4.4 Chłodnictwo absorpcyjne	19
1.4.5 Chłodnictwo adsorpcyjne	20
1.4.6 Chłodnictwo Desiccant Cooling	23
1.5 Podsumowanie	28
2 Badania eksperymentalne	30
2.1 Wstęp	30
2.2 Przegląd literatury	30
2.3 Stanowisko badawcze	32
2.4 Aparatura pomiarowa	33

2.5	Procedura pomiarowa	36
2.6	Przetwarzanie danych pomiarowych	36
2.7	Błędy pomiarowe	38
2.8	Zakres badań	38
2.9	Wyniki i Dyskusja	40
3	Model fizyczny	56
3.1	Wstęp	56
3.2	Przegląd literatury	56
3.3	Model fizyczny	58
3.4	Wyniki	65
4	Efekt parametrów sterowania	79
4.1	Wstęp	79
4.2	Przegląd literatury	79
4.3	Modelowanie	81
4.4	Wyniki i dyskusja	84
4.4.1	Wpływ średnicy ziarna adsorbentu	84
4.4.2	Wpływ czasu przełączania złożeń	88
4.4.3	Wpływ prędkości powietrza w złożu	90
4.4.4	Wpływ wysokości zasypania złoża	95
5	Analiza egzergetyczna fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej	100
5.1	Wstęp	100
5.2	Przegląd literatury	100
5.3	Fluidalna chłodziarka adsorpcyjna	101
5.4	Analiza egzergetyczna	101
5.5	Wyniki i Dyskusja	109
6	Potencjalne metody intensyfikacji procesów adsorpcyjnych w chłodnictwie	118
6.1	Wstęp	118
6.2	Modyfikacja kształtu ziaren adsorbentu	118
6.3	Rozwiązania wielozłożowe	122
7	Podsumowanie	129
	Załącznik 2.1	133
	Opis skryptu	133
	Skrypt	133
	Załącznik 3.1	143
	Opis skryptu	143

Skrypt	143
Załącznik 4.1	151
Opis skryptu	151
Skrypt	151
Załącznik 5.1	160
Opis skryptu	160
Skrypt	160
Bibliografia	185

Spis rysunków

1.1	Udział kogeneracji w produkcji energii elektrycznej w Europie w latach 2005 i 2009 na podstawie [39].	7
1.2	Zapotrzebowanie na ciepło sieciowe w latach 2010-2013 we Wrocławiu [25]	8
1.3	Klasyfikacja technologii chłodniczych [12]	9
1.4	Przykładowy lewobieżny obieg chłodniczy: 1 - Układ w równowadze z otoczeniem, 2- Wzrost uporządkowania układu poprzez sprężenie gazu, 3 - Dążenie układu do równowagi cieplnej z otoczeniem, 4 - Układ w równowadze cieplnej z otoczeniem, 5 - Spadek uporządkowania układu poprzez rozprężenie gazu, spadek temperatury układu.	10
1.5	Chłodziarka sprężarkowa: a) Schemat, b) Przemiany na wykresie logp-h, c) Przemiany na wykresie T-s.	11
1.6	Kombinowany obieg Carnot na wykresie T-s. [12]	11
1.7	COP kombinowanego obiegu Carnot w zakresie temperatury górnego źródła 40 - 70°C, temperatury chłodu od -10°C do 15°C dla temperatury chłodzenia 27°C.	12
1.8	Ciepło parowania wybranych czynników chłodniczych w temperaturze nasycenia 5°C	13
1.9	Orientacyjne ceny wybranych czynników chłodniczych.	14
1.10	Ciśnienie nasycenia wybranych czynników chłodniczych w zakresie temperatur wrzenia od -20 do 20°C	15
1.11	Maksymalny stopień zaadsorbowania pary wodnej w zależności od temperatury i ciśnienia dla silikazelu typu A i RD na podstawie izoterm adsorpcji wyznaczonych przez [28]	16
1.12	Chłodziarka strumieniowa: a) Przemiany na wykresie T-s, b) Schemat [12]	17
1.13	Zasada działania strumienicy	18

1.14	Podobieństwo między chłodziarkami absorpcyjnymi i sprężarkowymi	19
1.15	Podobieństwo między chłodziarkami adsorpcyjnymi i sprężarkowymi	20
1.16	Zasada działania sprężarki termicznej chłodziarki adsorpcyjnej	21
1.17	Temperatura i stopień zaabsorbowania adsorbentu oraz ciśnienie adsorbentu podczas pełnego cyklu pracy złoża adsorpcyjnego	22
1.18	Ogólna zasada działania chłodziarek Desiccant Cooling [30]	24
1.19	Rodzaje osuszaczy: a) Złoże stałe, b) Koło osuszające, c) Wymiennik powlekany adsorbentem.	25
1.20	Zasada działania złoża fluidalnego.	26
1.21	Ilość publikacji wg Web of Science nt. adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji z podziałem na charakter pracy: teoretyczny, eksperymentalny lub wdrożeniowy. Publikacje wielotematyczne (np. teoretyczno - eksperymentalne) są liczone wielokrotnie.	27
2.1	Schemat stanowiska badawczego: 1 - Wentylator odśrodkowy, 2 - Pomiar prędkości przepływu, 3 - Nagrzewnica powietrza, 4 - Rura elastyczna typu spiro, 5 - pomiar spadku ciśnienia, 6 - Pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza, 7 - Adsorpcyjne złoże fluidalne, 8 - Komputer.	33
2.2	Zdjęcie stanowiska badawczego: 1 - Wentylator odśrodkowy, 2 - Anemometr skrzydełkowy, 3 - Nagrzewnica powietrza, 4 - Rura elastyczna typu spiro, 5 - U-rurka, 6 - Rejestrator pomiarów temperatury i wilgotności powietrza, 7 - Adsorpcyjne złoże fluidalne, 8 - Komputer.	34
2.3	Czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza SHT31 [99].	35
2.4	Anemometr skrzydełkowy CHY361 - zdjęcie producenta [35].	36
2.5	Przykładowa procedura pomiarowa.	37
2.6	Błędy pomiarowe wilgotności bezwzględnej powietrza: a) Błąd względny, b) Błąd bezwzględny.	39
2.7	Przebadane próbki silikażelu: a) Frakcja 0,6 - 1 mm, b) Frakcja 1 - 2 mm, c) Frakcja 2 - 3 mm, d) Frakcja 3 - 4 mm, e) Frakcja 4 - 5 mm	40
2.8	Seria pomiarowa nr 3.	43
2.9	Seria pomiarowa nr 4.	43
2.10	Seria pomiarowa nr 5.	43
2.11	Seria pomiarowa nr 6.	44
2.12	Seria pomiarowa nr 7.	44
2.13	Seria pomiarowa nr 8.	44
2.14	Seria pomiarowa nr 9.	45
2.15	Seria pomiarowa nr 10.	45
2.16	Seria pomiarowa nr 11.	45
2.17	Seria pomiarowa nr 12.	46
2.18	Seria pomiarowa nr 13.	46
2.19	Seria pomiarowa nr 16.	46
2.20	Seria pomiarowa nr 17.	47

2.21	Seria pomiarowa nr 18.	47
2.22	Seria pomiarowa nr 19.	47
2.23	Seria pomiarowa nr 20.	48
2.24	Seria pomiarowa nr 26.	48
2.25	Seria pomiarowa nr 27.	48
2.26	Seria pomiarowa nr 29.	49
2.27	Seria pomiarowa nr 30.	49
2.28	Seria pomiarowa nr 33.	49
2.29	Seria pomiarowa nr 34.	50
2.30	Seria pomiarowa nr 38.	50
2.31	Seria pomiarowa nr 39.	50
2.32	Seria pomiarowa nr 40.	51
2.33	Seria pomiarowa nr 41.	51
2.34	Seria pomiarowa nr 42.	51
2.35	Seria pomiarowa nr 44.	52
2.36	Porównanie sumarycznych zmian stopnia zaadsorbowania podczas pierwszych 500 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikażelu.	52
2.37	Porównanie sumarycznych zmian stopnia zaadsorbowania między 500 s a 1000 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikażelu.	53
2.38	Porównanie względnych zmian stopnia zaadsorbowania w okresach 0-500 s i 500-1000 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikażelu.	54
3.1	Schemat modelowanego złoża fluidalnego.	59
3.2	Zależność liczby Nusselta od liczby Reynoldsa opisana równaniami 3.6 i 3.7.	60
3.3	Mechanizmy kontrolujące wymianę masy podczas adsorpcji i desorpcji.	61
3.4	Porównanie spadku ciśnienia na złożu stałym i złożu fluidalnym. Zapożyczone z [21].	63
3.5	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 3.	66
3.6	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 4.	66
3.7	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 6.	66
3.8	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 8.	67
3.9	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 9.	67
3.10	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 10.	67
3.11	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 11.	68
3.12	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 12.	68
3.13	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 13.	68
3.14	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 14.	69
3.15	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 15.	69
3.16	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 16.	69
3.17	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 17.	70
3.18	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 18.	70

3.19	Zbiorcze porównanie zbieżności wyników eksperymentalnych i teoretycznych temperatury powietrza dla adsorpcji.	71
3.20	Zbiorcze porównanie zbieżności wyników eksperymentalnych i teoretycznych stopnia zawiżenia powietrza dla adsorpcji.	72
3.21	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 23. . . .	72
3.22	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 25. . . .	73
3.23	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 26. . . .	73
3.24	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 28. . . .	73
3.25	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 29. . . .	74
3.26	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 30. . . .	74
3.27	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 31. . . .	74
3.28	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 33. . . .	75
3.29	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 34. . . .	75
3.30	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 35. . . .	75
3.31	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 36. . . .	76
3.32	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 37. . . .	76
3.33	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 38. . . .	76
3.34	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 39. . . .	77
3.35	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 39. . . .	77
3.36	Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 39. . . .	78
4.1	[20]	80
4.2	[23]	80
4.3	Schemat analizowanej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. 1 - Nawilżacz, 2 - Chłodnica powietrza, 3 - Złoża fluidalne, 4 - Wentylator, 5 - Chłodnica powietrza, 6 - Nagrzewnica powietrza, 7 - Regenerator ciepła, 8 - Wentylator.	82
4.4	Ogólny schemat procedury realizowanej przez wykorzystane skrypty.	84
4.5	Minimalna i maksymalna prędkość fluidyzacji w zależności od średnicy ziarna adsorbentu [116, 20].	85
4.6	The influence of the desiccant particle diameter on adsorption characteristics.	87
4.7	The influence of the desiccant particle diameter on desorption characteristics.	88
4.8	The variation of thermal COP, electric COP and SCP vs. desiccant particle diameter obtained for optimum switching time.	89
4.9	Wpływ czasu przełączania złożeń na efektywność chłodniczą FCA: a) Ciepłne COP, b) Elektryczne COP, c) Właściwa Wydajność Chłodnicza	90
4.10	Wpływ czasu przełączania złożeń na przebieg adsorpcji i desorpcji.	91
4.11	Wpływ prędkości powietrza w złożu na przebieg adsorpcji	92
4.12	Wpływ prędkości powietrza w złożu na przebieg desorpcji	93
4.13	Wpływ prędkości powietrza w złożach na: a) Ciepłne COP, b) Elektryczne COP, c) Właściwą Wydajność Chłodniczą.	94
4.14	Wpływ wysokości zasypania złoża na charakterystykę adsorpcji.	96

4.15	Wpływ wysokości zasypania złoża na charakterystykę desorpcji.	97
4.16	Wpływ wysokości zasypania złoża i predkości powietrza w złożach fluidalnych (obie prędkości równe) na efektywność chłodniczą fluidalnej chłodzairki adsorpcyjnej: a) Ciepłone COP, b) Elektryczne COP, c) Właściwą Wydajność Chłodniczą.	98
5.1	Schemat analizowanej fluidalnej chłodzairki adsorpcyjnej. 1 - Nawilżacz, 2 - Chłodnica powietrza, 3 - Złoża fluidalne, 4 - Wentylator, 5 - Chłodnica powietrza, 6 - Nagrzewnica powietrza, 7 - Regenerator ciepła, 8 - Wentylator.	102
5.2	Punkty charakterystyczne pracy fluidalnej chłodzairki adsorpcyjnej	103
5.3	Bilans egzergetyczny wentylatora	103
5.4	Bilans egzergetyczny nagrzenicy/chłodnicy powietrza.	104
5.5	Bilans egzergetyczny regeneracyjnego wymiennika ciepła RHX	106
5.6	Bilans egzergetyczny złoża fluidalnego	107
5.7	Bilans egzergetyczny nawilżacza powietrza (DEC)	108
5.8	Ogólna zasada działania skryptów.	109
5.9	Zmiany temperatury powietrza (a), stopnia zawilżenia powietrza (b), właściwej destrukcji egzergii (c) i sprawności egzergetycznej (d)poszczególnych elementów systemu podczas adsorpcji. Oznaczenia na są zgodne z oznaczeniami Rysunku 5.1.	110
5.10	Zmiany temperatury powietrza (a), stopnia zawilżenia powietrza (b), właściwej destrukcji egzergii (c) i sprawności egzergetycznej (d)poszczególnych elementów systemu podczas desorpcji. Oznaczenia na są zgodne z oznaczeniami Rysunku 5.1.	112
5.11	Straty egzergii i sprawności egzergetyczne poszczególnych elementów fluidalnej chłodzairki adsorpcyjnej: FB - złoża fluidalne, RHX - regeneracyjny wymiennik ciepła, AC1 - chłodnica powietrza przez złożem , AC2 - chłodnica powietrza za złożem , DEC - nawilżacz powietrza, AH - nagrzewnica powietrza.	114
5.12	Inluence of NTU_{RHX} on exergy destruction of FDC. Components abbreviations corresponds to Fig. 19.	115
5.13	Destrukcja egzergii z podziałem na ich pochodzenia (temperatura, ciśnienie, stopień zawilżenia) dla adsorpcji i desorpcji	115
5.14	Udziały poszczególnych elementów w destrukcji egzergii z podziałem na pochedzenie: a) Destrukcja egzergii związana z temperaturą podczas adsorpcji, b) Destrukcja egzergii związana z ciśnieniem podczas adsorpcji, c) Destrukcja egzergii związana ze stopniem zawilżenia podczas adsorpcji, d) Destrukcja egzergii związana z temperaturą podczas desorpcji, a) Destrukcja egzergii związana z ciśnieniem podczas desorpcji, a) Destrukcja egzergii związana ze stopniem zawilżenia podczas desorpcji.	116
6.1	. . . . .	119
6.2	Wpływ modyfikacji kształtu ziarna względem ziarna sferycznego o średnicy 1 mm: a) względne zmiana spadku ciśnienia, b) względna zmiana U_{mf} , c) względna zmiana najkrótszej drogi dyfuzji, d) względna zmiana ρ_{sor} , e) względna zmiana a_{sor} , f) Względna zmiana wymiarów osi ziarna	121

6.3	Wpływ modyfikacji kształtu ziarna względem ziarna sferycznego o średnicy 1 mm na efektywność chłodniczą: a) COP elektryczne, b) COP cieplne, c) Właściwa Wydajność Chłodnicza. Parametry symulacji:	122
6.4	. . . . .	123
6.5	. . . . .	125
6.6	. . . . .	126
6.7	. . . . .	127
6.8	. . . . .	128

Spis tabel

1.1	Harmonogram redukcji zużycia czynników HFC w UE w latach 2015-2030 [81]. *- roczne średnie zużycie z roku 1989	4
1.2	Harmonogram redukcji zużycia czynników HFC w UE w latach 2015-2030 [1]. *- roczne średnie zużycie z lat 2009-2012	5
1.3	Opracowania nt. prognoz zapotrzebowania na chłodzenie w XXI wieku	6
1.4	Informacje nt. toksyczności i wybuchowości/palności wybranych czynników chłodniczych	13
1.5	Porównanie poszczególnych typów osuszaczy adsorpcyjnych	25
2.1	Zakres badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji w [45].	31
2.2	Zakres badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji w [85].	31
2.3	Zakres badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji w [21].	31
2.4	Specyfikacja elementów stanowiska pomiarowego.	35
2.5	Podstawowe dane techniczne wykorzystanych czujników i urządzeń pomiarowych z odwołaniami do pełnej specyfikacji producenta.	35
2.6	Wartości współczynników $A_1 - A_7$ z Równania 2.2 wyznaczone na podstawie danych z programu RefProp [62]	38
2.7	Wartości współczynników $B_1 - B_4$ z Równania 2.4 wyznaczone na podstawie danych z programu RefProp [62]	38
2.8	Informacje nt. próbek silikazelu wykorzystanych podczas badań	39
2.9	Informacje nt. serii pomiarowych dla adsorpcji	41
2.10	Informacje nt. serii pomiarowych dla desorpcji	42
3.1	Parametry z równania 3.13 dla silika żelu typu A i RD [28].	62

3.2	Równania, korelacje lub liczby kryterialne wykorzystane w modelowaniu	64
3.3	Parametry wykorzystane w modelowaniu.	65
4.1	Zakres parametrów pracy użytych w symulacjach.	85
5.1	Parametry wykorzystane do analizy egzergetycznej poszczególnych elementów systemu	111
5.2	Parametry wykorzystane do modelowania źróź fluidalnych [88, 91]	113
6.1	Parametry wykorzystane do analizy egzergetycznej poszczególnych elementów systemu	124

Skróty

AC	<i>Air Cooler (Chłodnica powietrza), n.d.</i>
AH	<i>Air Heater (Nagrzewnica powietrza), n.d.</i>
COP	<i>Coefficient Of Performance (współczynnik efektywności chłodniczej), -</i>
FCA	<i>Fluidalna Chłodziarka Adsorpcyjna, n.d.</i>
NTU	<i>Number of heat Transfer Units (Ilość jednostek ciepła), n.d.</i>
SCP	<i>Specific Cooling Power (Właściwa Wydajność Chłodnicza), Wkg^{-1}</i>
RHX	<i>Regenerative Heat Exchanger (Regeneracyjny wymiennik ciepła), n.d.</i>

Stałe

Przyspieszenie ziemskie	g	$9,81 ms^{-2}$
Uniwersalna stała gazowa	R	$8315 Jmol^{-1}K^{-1}$
Indywidualna stała gazowa pary wodnej	R_w	$415,75 Jkg^{-1}K^{-1}$

Symbole

A	Powierzchnia wymiany ciepła	m^2
a_{sor}	Właściwa powierzchnia złoża	$m^2 kg^{-1}$
A_{sor}	Powierzchnia złoża	m^2
b	Parametr równowagi adsorpcji	–
c	Ciepło właściwe	$J kg^{-1} K^{-1}$
D	Współczynnik dyfuzji	$m^2 s^{-1}$
d_p	Srednica ziarna sorbentu	m
D_0	Maksymalna dyfuzja	$m^2 s^{-1}$
D_{bed}	Średnica złoża fluidalnego	m
E	Energia aktywacji	JK^{-1}
E	Parametr wymiennika ciepła	–
ex	Egzergia właściwa	$J kg^{-1}$
$\dot{E}x$	Strumień egzergii	W
$\dot{e}x_{dest}$	Właściwa destrukcja egzergii	$J kg^{-1}$
$\dot{E}x_{dest}$	Strumień destrukcji egzergii	W
F	Współczynnik korekcyjny	–
h	Entalpia właściwa	$J kg^{-1}$
h_m	Współczynnik wymiany masy	$kg m^{-2} s^{-1}$
h_{th}	Współczynnik wymiany ciepła	$W m^{-2} K^{-1}$
H_{ads}	Ciepło adsorpcji	$J kg^{-1}$
H_{bed}	Wysokość złoża fluidalnego	m
H_{ev}	Ciepło parowania	$J kg^{-1}$
H_{sor}	Wysokość zasypiania złoża	m
k	Współczynnik przewodzenia ciepła	$W m^{-1} K^{-1}$
k	Współczynnik przenikania ciepła	$W m^{-2} K^{-1}$
K_0	Stała równowagi adsorpcji	$kg kg^{-1} kPa^{-1}$
l	Wymiar kanału wymiennika ciepła	m
\dot{m}	Strumień masy	$kg s^{-1}$
M_{sor}	Masa sorbentu w złożu	kg
M_{ads}	Masa sorbentu	kg
\dot{N}	Moc	W
p	Ciśnienie	Pa
P	Stosunek temperatur	–
\dot{Q}	Strumień ciepła	W
\dot{Q}_0	Moc chłodnicza	W
R_c	Stosunek ciepł właściwych	–
s	Entropia właściwa	$J kg^{-1} K^{-1}$
t	Czas	s
t_{sw}	Czas przełączania złożeń	s
T	Temperatura	$K, ^\circ C$
U	Prędkość powietrza w złożu	$m s^{-1}$
U_{mf}	Minimalna prędkość fluidyzacji	$m s^{-1}$

V_a	Objętość obliczeniowa powietrza	m^3
V_{bed}	Objętość złoża	m^3
V_p	Objętość ziaren w złożu (bez porowatości)	m^3
W	Stopień zaadsorbowania	$kgkg^{-1}$
X_a	Stopień zawilżenia powietrza	$kgkg^{-1}$
X_{a-p}	Stopień zawilżenia powietrza w warstwie przyściennej ziarna	$kgkg^{-1}$

Δp	Spadek ciśnienia na złożu	Pa
ΔT_{mean}	Średni spadek temperatury powietrza podczas regeneracji silikażelu	K
ΔW	Zmiana stopnia zaadsorbowania	$kgkg^{-1}$
ε	Porowatość złoża	—
ε_0	Porowatość złoża ziaren sferycznych	—
$\varepsilon_{d/D}$	Porowatość złoża o skończonych wymiarach	—
ε_ϕ	Porowatość złoża ziaren niesferycznych	—
η	Sprawność	%
μ	Lepkość dynamiczna	$Pa s^{-1}$
ν	Lepkość kinematyczna	$m^2 s^{-1}$
ρ_{sor}	Gęstość nasypowa złoża	kgm^{-3}
ρ_p	Gęstość ziarna	kgm^{-3}
ϕ_w	Sferyczność	$kgkg^{-1}$

Indeksy dolne

0	chłodnicza (dolne źródło ciepła), stan martwy
<i>a</i>	powietrza
<i>ads</i>	adsorpcja, adsorbent
<i>bed</i>	złoża
<i>Carnot</i>	odnosi się do obiegu Carnot
<i>comp</i>	sprężania
<i>des</i>	desorpcja
<i>dest</i>	destrukcja
<i>dry</i>	suchy
<i>exp</i>	rozprężania
<i>el</i>	elektryczne
<i>eq</i>	nasycenia, równowagowe
<i>ex</i>	egzergetyczne
<i>f</i>	fluidalne
<i>fan</i>	wentylatora
<i>g</i>	gazu
<i>h</i>	wilgotny
<i>H</i>	grzewcza (górne źródło ciepła)
<i>in</i>	na wlocie
<i>L</i>	chłodzenia (pośrednie źródło ciepła)
<i>min</i>	minimalne
<i>max</i>	maksymalne
<i>out</i>	na wylocie
<i>p</i>	ziarna
<i>sor</i>	sorbentu
<i>th</i>	cieplne
<i>v</i>	pary wodnej
<i>w</i>	wody

Liczby kryterialne

Ar	Liczba Archimedesesa	$d_p^3 \rho_a (\rho_p - \rho_a) g \mu_a^{-2}$
Le	Liczba Lewisa	$h_a D_{w-a}^{-1}$
Pr	liczba Prandtla	$c_p \mu k^{-1}$
Nu	Liczba Nusselta	$h D k^{-1}$
Re	Liczba Reynoldsa	$U D \mu^{-1}$

Wstęp

Ogólnosiwiatowy trend mający na celu ochronę środowiska i racjonalne gospodarowanie zasobami przyczynia się do rozwoju technologii chłodniczych alternatywnych w stosunku do wciąż dominującego chłodnictwa sprężarkowego.

Wyzwania stojące przed państwami produkującymi znaczną część energii w skojarzeniu (w tym Polski) ukierunkowały część z prac rozwojowych na technologie chłodnicze zasilane niskotemperaturowym ciepłem.

Zjawiskiem umożliwiającym konwersję niskotemperaturowego ciepła na chłód jest adsorpcja fizyczna, w szczególności para adsorpcyjna para wodna - silikażel. Czynnikiem chłodniczym w tego typu instalacjach jest woda, która jest nie tylko przyjazna środowisku, ale wyróżnia się także pod względem pojemności cieplnej oraz ciepła parowania.

Niezależnie od tego czy czynnikiem roboczym jest woda (co wymusza pracę chłodziarki pod obniżonym ciśnieniem) czy powietrze wilgotne (co pozwala na pracę chłodziarki w ciśnieniu otoczenie) oraz niezależnie od rodzaju zastosowanego złoża wyzwaniem technologii adsorpcyjnych pozostaje intensyfikacja procesów wymiany ciepła i masy.

Stosunkowo nowym i mało poznanym zagadnieniem jest zastosowanie procesu fluidyzacji w celu intensyfikacji procesów adsorpcyjnego suszenia powietrza wykorzystywanego w chłodnictwie. Mimo rosnącego zainteresowania, widocznego w ilości publikowanych w tej tematyce badań, nadal brak jest solidnych podstaw w zakresie metod modelowych oraz optymalizacyjnych.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie rzetelnych metod modelowania procesów adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji oraz przeprowadzenie analiz racjonalizacyjnych i optymalizacyjnych dotyczących nie tylko samego procesu adsorpcyjnego suszenia powietrza, ale również adsorpcyjnej chłodziarki fluidalnej jako całości.

Teza, cel, zakres i metody badań

Teza pracy

Cele badawcze

- Opracowanie modelu fizycznego zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji
- Określenie parametrów sterujących oraz ich wpływu na procesy adsorpcji i desorpcji w złożu fluidalnym
- Optymalizacja oraz racjonalizacja procesów adsorpcji podczas fluidyzacji
- Określenie newralgicznych elementów adsorpcyjnych chłodziarek fluidalnych

Przedmiot i zakres badań

Metody badań

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1 Wstęp

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie pełnego obrazu czynników natury politycznej, społecznej, energetycznej, naukowej i technicznej, które miały wpływ na podjęcie tematyki intensyfikacji procesów adsorpcyjnego suszenia powietrza w chłodnictwie. Rozdział prezentuje polityczne, społeczne i energetyczne przyczyny rozpoczęcia rewolucji chłodniczej i obrania pewnego kierunku rozwoju chłodnictwa, a następnie, przedstawiając ogół technologii umożliwiających konwersję niskotemperaturowego ciepła na chłód, przedstawia argumenty natury technicznej i naukowej uzasadniając podjęcie ww. tematyki.

1.2 Rewolucja w chłodnictwie

Podpisanie protokołu Montrealskiego w 1987 roku zapoczątkowało rewolucje w rozwoju technik chłodniczych. W celu przeciwdziałania zubożeniu warstwy ozonowej, zastosowanie czynników charakteryzujących się wysokim współczynnikiem ODP (ang. Ozone Depletion Potential) zostało w pierw ograniczone, a następnie zakazane. Wśród nich znalazły się czynniki typu CFC (chloro- i fluoropochodne węglowodórów alifatycznych) - stosowane na szeroką skalę w instalacjach chłodniczych. W niedługim czasie ograniczenia objęły również czynniki typu HCFC (chlorofluorowęglowodory). Tab.1 przedstawia założenia protokołu Montrealskiego odnośnie redukcji i eliminacji czynników zubożających warstwę ozonową [81]. Protokół Montrealski zakładał wycofanie czynników CFC z użycia do 1996 roku w krajach rozwiniętych, a w krajach rozwijających do 2010 roku. Stosowanie czynników HCFC jest, na dzień dzisiejszy, silnie ograniczone, a planowane wycofanie z użycia ma nastąpić w 2020 i 2040 roku, odpowiednio w krajach rozwiniętych i rozwijających się.

Podpisany w 1997 roku protokół z Kioto wprowadził dalsze ograniczenia w stosowaniu czynników chłodniczych. Głównym celem tego porozumienia było ograniczenie emisji tzw. gazów cieplarnianych m.in. czynników HFC, które zastąpiły, wycofywane w myśl postanowień protokołu Montrealskiego, czynniki CFC i HCFC. Tab.2 przedstawia założenia odnośnie redukcji czynników HFC

Tabela 1.1: Harmonogram redukcji zużycia czynników HFC w UE w latach 2015-2030 [81]. *- roczne średnie zużycie z roku 1989

Lata	Dotyczy	Założenia protokołu Montrealskiego
1989	kraje rozwinięte	Utrzymanie zużycia CFC (Aneks A)
1993	kraje rozwinięte	80% zużycia CFC względem 1989 roku (Aneks B)
1994	kraje rozwinięte	25% zużycia CFC względem 1989 roku (Aneks B) 25% zużycia CFC względem 1986 roku (Aneks A)
1996	kraje rozwinięte	Wycofanie CFC z użycia 100% zużycia HCFC względem 1989 roku
1999	kraje rozwijające	Utrzymanie zużycia CFC z lat 1995-97 (Aneks A)
2003	kraje rozwijające	80% zużycia CFC względem średniej z lat 1998-2000 (Aneks B)
2004	kraje rozwinięte	65% zużycia HCFC względem 1989 roku
2005	kraje rozwijające	50% zużycia HCFC względem średniej z lat 1995-97 (Aneks A)
2007	kraje rozwijające	15% zużycia CFC względem średniej z lat 1995-97 (Aneks A) 15% zużycia CFC względem średniej z lat 1998-2000 (Aneks B)
2007	kraje rozwijające	15% zużycia CFC względem średniej z lat 1995-97 (Aneks A)
2010	kraje rozwinięte	35% zużycia HCFC względem roku 1989
	kraje rozwijające	Wycofanie CFC z użycia
2015	kraje rozwinięte	10% zużycia HCFC względem roku 1989
	kraje rozwijające	Utrzymanie zużycia HCFC
2020	kraje rozwinięte	Wycofanie HCFC z użycia
2040	kraje rozwijające	Wycofanie HCFC z użycia

obowiązujące kraje członkowskie Unii Europejskiej [1]. Zastosowanie HFC będzie stopniowo redukowane, aż do 21% zużycia referencyjnego (z lat 2009-2012) w roku 2030.

Przez ostatnie dekady obserwowany jest również stopniowy wzrost zapotrzebowania na chłodzenie [60, 102, 15, 51, 6, 70]. Przyczyną takiego stanu rzeczy są wzrost temperatur związany z globalnym ociepleniem [6, 15], postępujący rozwój gospodarczy oraz wzrost populacji [102]. Te czynniki doprowadziły w pierwszej dekadzie XXI wieku do znaczącego wzrostu zapotrzebowania na klimatyzację budynków: w Stanach Zjednoczonych o około 15% [70], w Szwajcarii o około 10% [15]. Tab. 2 przedstawia zestawienie prac nt. prognozowanego wzrostu zapotrzebowania budynków na klimatyzację w XXI wieku wynikającego z ww. czynników. Prognozy przewidują wzrost zapotrzebowania na chłodzenie budynków w zakresie od 11% do 89%.

Wspomniane powyżej porozumienia międzynarodowe doprowadziły lub, w perspektywie kolejnych 20 lat, doprowadzą do wycofania albo znacznego ograniczenia zużycia powszechnie stosowanych czynników chłodniczych CFC, HCFC i HFC. Jednocześnie obserwowany jest wzrost zapotrzebowania na chłodzenie, wynikający ze zmian klimatycznych, rozwoju gospodarczego i wzrostu populacji, który wg dostępnych analiz ta tendencja zostanie utrzymana. Stopniowe wycofywanie dotychczas stosowanych czynników chłodniczych, wytworzyło swoistą próżnię technologiczną, dodatkowo

Tabela 1.2: Harmonogram redukcji zużycia czynników HFC w UE w latach 2015-2030 [1]. *- roczne średnie zużycie z lat 2009-2012

Lata	Procent zużycia podstawowy	referencyjnego* specjalny
2015	100%	100%
2016-17	93%	93%
2018-20	63%	58%
2021-23	45%	40%
2024-26	31%	26%
2027-29	24%	19%
2030	21%	16%

wzmocnią rosnącym zapotrzebowaniem na chłodzenie. Doprowadziło to, na przełomie XX i XXI wieku do wzmożonego zainteresowania i rozwoju, alternatywnych w stosunku do dotychczasowych metod, technologii chłodniczych.

1.3 Konwersja ciepła na chłód

Porozumienia międzynarodowe i globalny wzrost zapotrzebowania na chłodzenie zainicjowały rozwój alternatywnych technologii chłodniczych. Natomiast kierunki rozwoju są wyznaczone przez lokalne uwarunkowania takie jak np. specyfika infrastruktury energetycznej krajów leżących w umiarkowanym klimacie, w tym Polski. Znacząca część energii elektrycznej i ciepłej jest produkowana w skojarzeniu, co potwierdzają dane Eurostat przedstawione na Rys. 1.1 [39]. W przypadku Polski około 10 GW mocy elektrycznej i 25 GW ciepłej jest zainstalowane w skojarzeniu, co stanowi około 22% całkowitej mocy zainstalowanej. Produkcja energii w skojarzeniu pozwala na podwyższenie, kosztem sprawności elektrycznej, temperatury dolnego źródła ciepła do poziomu użytkowego. Skutkuje to poprawą ogólnej sprawności konwersji energii siłowni ciepłej, ale tylko pod warunkiem popytu na całość podaży energii elektrycznej i ciepła. Rys. 1.2 przedstawia profil rocznego zapotrzebowania na ciepło użytkowe we Wrocławiu w latach 2010 - 2013 [25]. Popyt na ciepło do 600 MW występuje tylko podczas miesięcy zimowych i przejściowych, natomiast w okresie letnim zapotrzebowanie spada do poziomu około 100 MW. W okresach wysokiego i stabilnego zapotrzebowania na ciepło sieciowe elektrociepłownie pracują zgodnie z przeznaczeniem, poprawiając sprawność wykorzystania energii pierwotnej. W okresach znikomego popytu na ciepło pracują jak niskosprawne elektrownie. Ponadto, ze względu na wysokie zapotrzebowanie na energię elektryczną w okresie letnim, spowodowanych w dużej mierze powszechnym używaniem klimatyzacji, elektrociepłownie pracują z pełnym obciążeniem produkując bezużyteczne w tym okresie ciepło sieciowe, które jest zrucane do otoczenia, np. do rzeki. Taki stan rzeczy przyczynia się do spadku sprawności konwersji energii pierwotnej, wzrostu emisji zanieczyszczeń w przeliczeniu na jednostkę wyprodukowanej energii ciepłej i do wzrostu kosz-

Tabela 1.3: Opracowania nt. prognoz zapotrzebowania na chłodzenie w XXI wieku

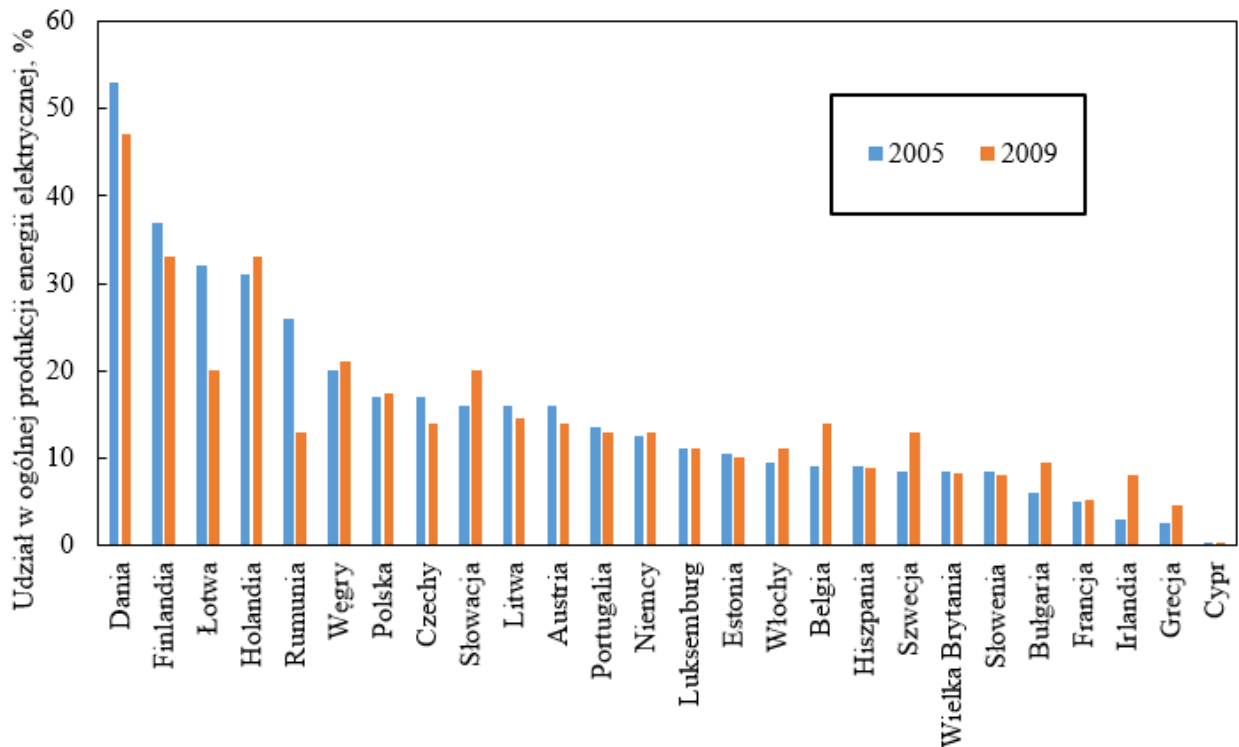
Autor	Państwo	Typ budynku budynku	Analizowany okres	Wzrost zapotrzebowania na chłodzenie
Guan [42, 43]	Australia	biurowy	do 2070	od 28% do 59%
Wan i in. [112]	Chiny	biurowy	do 2100	od 11% do 20%
Frank [40]	Szwajcaria	biurowy i mieszkalny	2100	od 223% do 1050%
Berger i in. [6]	Austria	biurowy	2050	od 28% do 91%
Dodoo i in. [32]	Szwecja	mieszkalny	2050 - 2100	od 33% do 49%
Jylha i in. [56]	Finlandia	mieszkalny	2030-2050-2100	od 40% do 80%
Asimakopoulos i in. [5]	Grecja	mieszkalny	2100	od 28% do 59%
Wang and Chen [113]	USA	mieszkalny, biurowy i publiczny	2040-2080	Tak
Radhi [82]	Zjednoczone Emiraty Arabskie	mieszkalny	2050-2100	23.5%
Huang i Hwang [49]	Taiwan	mieszkalny	2020-2050-2100	od 31% do 82%
Casagrande i Alvarez [14]	Brazil	biurowy	2020-2050-2080	od 10.7% do 25.6%

tów produkcji energii. Idealnym rozwiązaniem byłaby technologia umożliwiająca konwersję ciepła sieciowego o temperaturze około 65°C na tak potrzebną w tym okresie moc chłodniczą. Po pierwsze stworzony zostałby popyt na ciepło sieciowe, po drugie zapewniona zostałaby moc chłodnicza, a po trzecie zmniejszyłby się popyt na energię elektryczną. Opisane powyżej czynniki ukierunkowały część prac rozwojowych w dziedzinie chłodnictwa na rozwój technologii umożliwiających wykorzystanie ciepła o temperaturze nieprzekraczającej 65°C .

1.4 Nowe technologie w chłodnictwie

1.4.1 Rozwój alternatywnych technologii chłodniczych

Opisane we wcześniejszym rozdziale uwarunkowania przyczyniły się do rozwoju alternatywnych, w stosunku do chłodnictwa sprężarkowego, technologii chłodniczych. Rys. 1 przedstawia klasyfikację technologii chłodniczych wg [12]. Alternatywne technologie chłodnicze zostały sklasyfikowane w pięciu kategoriach ze względu na rodzaj energii zasilania: zasilane energią elektryczną, energią mechaniczną, energią akustyczną, energią magnetyczną oraz energią cieplną. Ze względu na przyjęty kierunek rozwoju, opisany w poprzednim rozdziale, omówione zostaną jedynie technologie zasilane



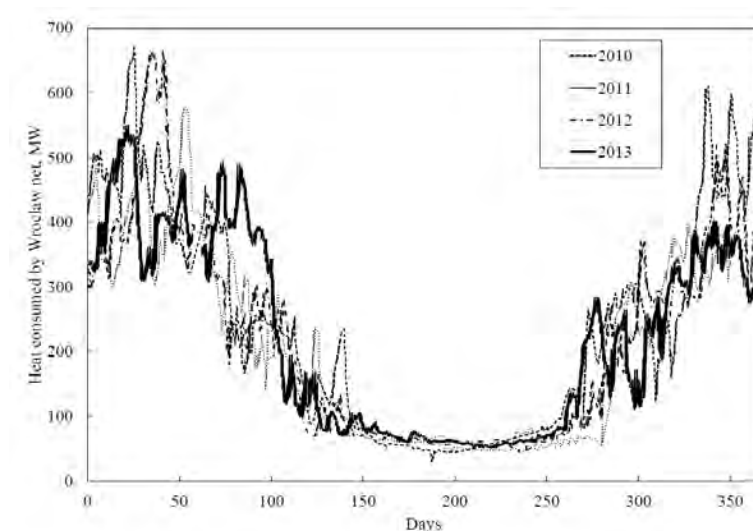
Rysunek 1.1: Udział kogeneracji w produkcji energii elektrycznej w Europie w latach 2005 i 2009 na podstawie [39].

ciepłem: chłodnictwo absorpcyjne, adsorpcyjne, strumieniowe.

1.4.2 Wprowadzenie

Przed omówieniem alternatywnych technologii chłodniczych zasilanych ciepłem zasadnym jest wprowadzenie pojęć i zagadnień wspólnych dla wszystkich omawianych rozwiązań. Pomogą one w lepszym zrozumieniu ograniczeń termodynamicznych oraz zwrócą uwagę na cechy wspólne wszystkich prezentowanych technologii.

Lewobieżny obieg termodynamiczny Wszystkie urządzenia chłodnicze działają w oparciu o lewobieżne obiegi termodynamiczne. Lewobieżne obiegi termodynamiczne charakteryzują się tym, że kosztem wykonania pracy transportują ciepło wbrew gradientowi temperatury. Odbywa się to poprzez początkowe uporządkowanie układu, np. poprzez podniesienie ciśnienia Rys. 1.4(2). Niezależnie od metody uporządkowania układu (sprężanie, siły magnetyczne) zawsze wymaga to wykonania pracy nad układem. Początkowo, temperatura uporządkowanego układu wzrasta (Rys.1.4(3)), co skutkuje oddaniem ciepła do otoczenia aż do wyrównania temperatur (Rys.1.4(4)). Zniesienie oddziaływań,

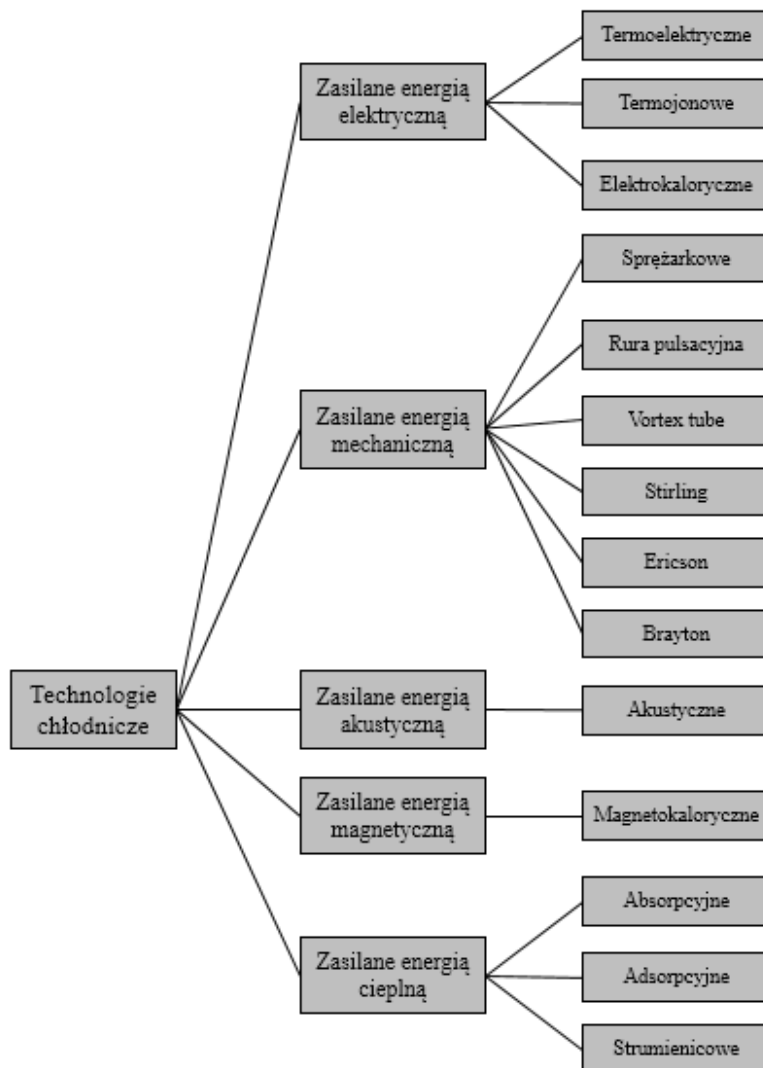


Rysunek 1.2: Zapotrzebowanie na ciepło sieciowe w latach 2010-2013 we Wrocławiu [25]

które doprowadziły do uporządkowania układu (np. obniżenie ciśnienia), skutkuje obniżeniem temperatury układu czyli wytworzeniem mocy chłodniczej (Rys. 1.4(5)). Każda chłodziarka wykorzystuje omówione powyżej zjawisko doprowadzając poprzez obniżenie entropii układu (czyli zwiększenie uporządkowania) do obniżenia temperatury. W chłodziarkach sprężarkowych do uporządkowania układu dochodzi poprzez sprężenie par czynnika (Rys.1.5a). Czynnik zostaje skroplony pod wyższym ciśnieniem, a następnie rozprężony na zaworze dławiącym. Czynnik jest odparowywany w niskim ciśnieniu, dzięki temu że sprężarka odsysa pary czynnika z parownika. Sprężenie i skroplenie czynnika prowadzi do obniżenia entropii czynnika, co po jego rozprężeniu pozwala na wygenerowanie mocy chłodniczej (Rys. 1.5c). Wszystkie omawiane w dalszej części pracy urządzenia chłodnicze bazują na wyżej opisanej zasadzie - czynnik jest odparowany pod niskim ciśnieniem, a powstałe w ten sposób pary zostają odessane z parownika i sprężone. Różnicę pomiędzy poszczególnymi urządzeniami chłodniczymi polegają przede wszystkim na rodzaju zastosowanej sprężarki lub sposobie jej zasilania.

Termodynamiczne ograniczenia sprawności konwersji ciepła na chłód Każda technologia konwersji ciepła na chłód podlega tym samym, uniwersalnym, ograniczeniom termodynamicznym. Obiegiem porównawczym, wyznaczającym maksymalne osiągalne sprawności konwersji energii, dla technologii konwersji ciepła na chłód jest kombinowany obieg Carnot, który jest przedstawiony na Rys.1.4. Kombinowany obieg Carnot jest połączeniem prawobieżnego i lewobieżnego obiegu Carnot w taki sposób, że praca rozprężania obiegu prawobieżnego 1-2-3-4 jest wykorzystana jako praca sprężania obiegu lewobieżnego 1-4-6-4.

Sprawność kombinowanego obiegu Carnot jest wyrażona jako sprawność prawobieżnej i lewo-



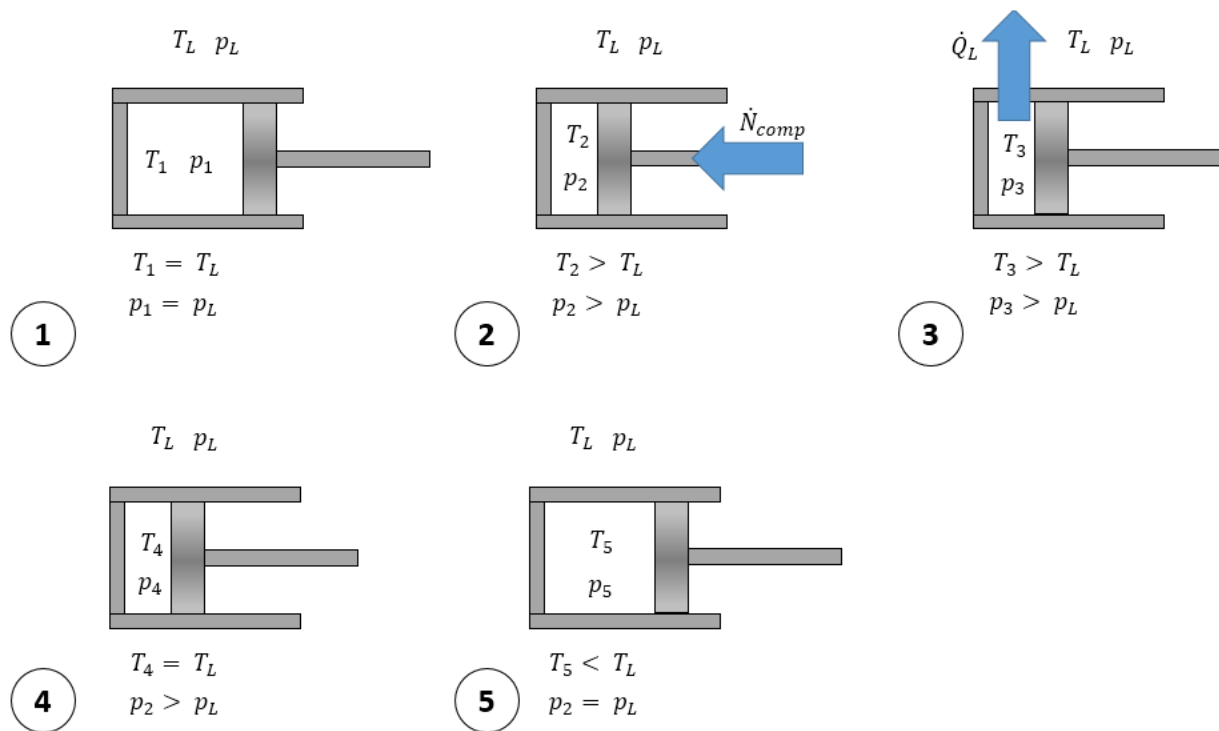
Rysunek 1.3: Klasyfikacja technologii chłodniczych [12]

bieżnej części obiegu:

$$\eta_{Carnot,pb} = \frac{\dot{N}_{exp}}{\dot{Q}_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1.1)$$

$$\eta_{Carnot,lb} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{N}_{comp}} = \frac{T_0}{T_L - T_0} \quad (1.2)$$

Przyrównując moc uzyskaną w obiegu prawobieżnym i moc potrzebną do sprężania w obiegu lewo-



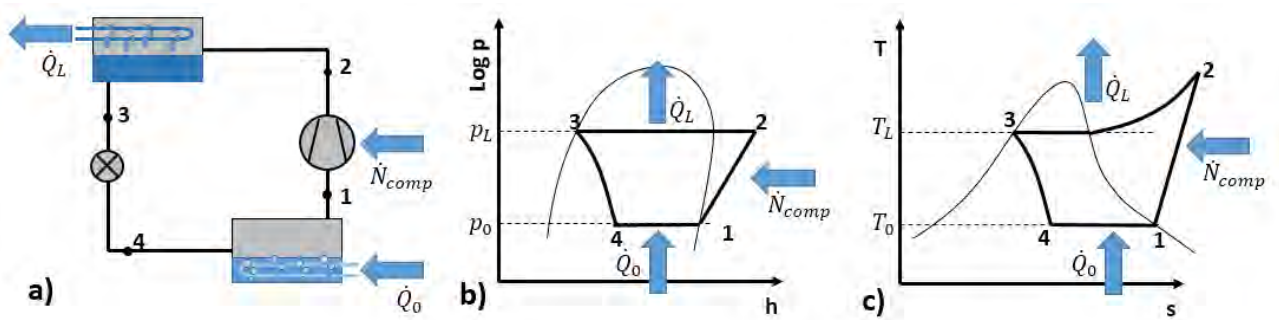
Rysunek 1.4: Przykładowy lewobieżny obieg chłodniczy: 1 - Układ w równowadze z otoczeniem, 2 - Wzrost uporządkowania układu poprzez sprężenie gazu, 3 - Dążenie układu do równowagi cieplnej z otoczeniem, 4 - Układ w równowadze cieplnej z otoczeniem, 5 - Spadek uporządkowania układu poprzez rozprężenie gazu, spadek temperatury układu.

bieżnym uzyskujemy wyrażenie na sprawność obiegu kombinowanego:

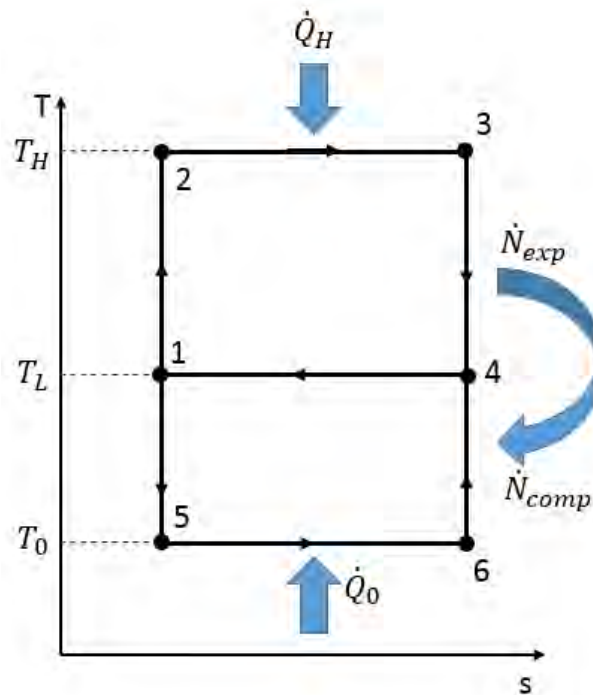
$$\eta_{Carnot,k} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = \frac{(T_H - T_L)T_0}{(T_L - T_0)T_H} \quad (1.3)$$

Sprawność kombinowanego obiegu Carnot $\eta_{Carnot,k}$ zależy od temperatury źródła ciepła T_H , temperatury zapewnionego chłodzenia T_L i temperatury chłodu T_0 . Rys. 1.7 przedstawia COP obiegu kombinowanego z założeniem, że temperatura chłodzenia wynosi $27^\circ C$. Sprawność kombinowanego obiegu Carnot w wybranym zakresie temperatur osiąga wartości od poniżej 0,5 do ponad 2,75. Tak więc, przyjmując temperaturę skraplania na poziomie $27^\circ C$, dysponując niskotemperaturowym ciepłem o temperaturze $65^\circ C$ i przyjmując temperaturę parowania jako $10^\circ C$ niemożliwe jest przekroczenie cieplnego COP około 1,75.

Woda jako czynnik chłodniczy Ograniczenia stosowania czynników chłodniczych z grup CFC, HFC i HCFC, które zapoczątkowały rewolucję chłodniczą, przyczyniły się także do badań i analiz



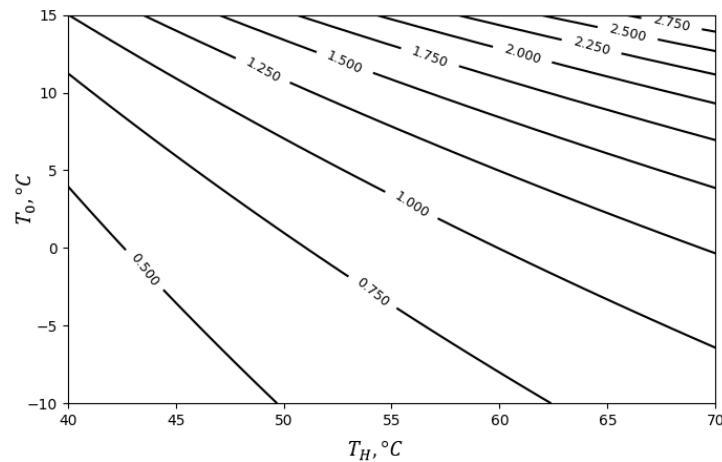
Rysunek 1.5: Chłodziarka sprężarkowa: a) Schemat, b) Przemiany na wykresie logp-h, c) Przemiany na wykresie T-s.



Rysunek 1.6: Kombinowany obieg Carnot na wykresie T-s. [12]

mających na celu wyłonić alternatywne czynniki chłodnicze. Idealny czynnik chłodniczy powinien posiadać następujące cechy:

1. Wysokim ciepłem parowania
2. Możliwością uzyskania temperatury parowania w zakresie od -20 do $20^{\circ}C$

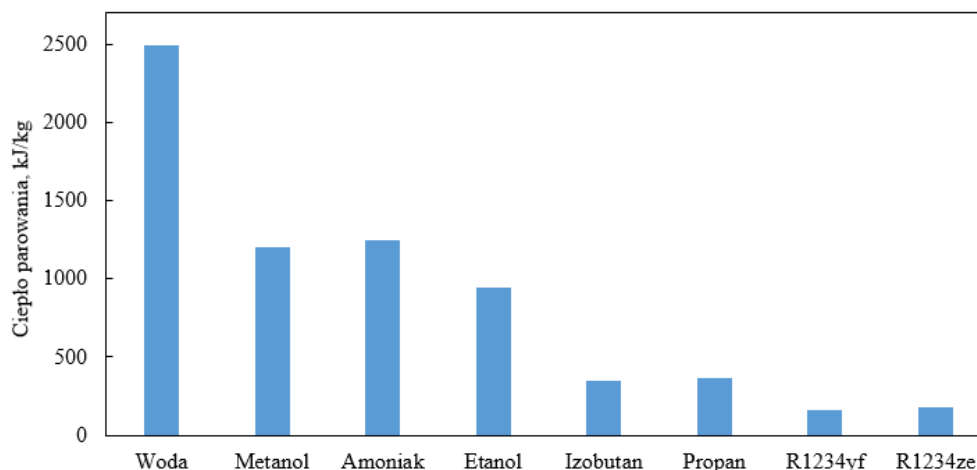


Rysunek 1.7: COP kombinowanego obiegu Carnot w zakresie temperatury górnego źródła $40 - 70^{\circ}\text{C}$, temperatury chłodu od -10°C do 15°C dla temperatury chłodzenia 27°C .

3. Odpowiednim ciśnieniem parowania w zakresie temperatur parowania
4. Znikomym negatywnym wpływem na środowisko i ludzi
5. Łatwą dostępnością
6. Wysoką stabilnością
7. Niską ceną

Bazując na powyższych wymaganiach wiele różnych substancji było analizowanych pod kątem możliwości zastosowania jako czynnik chłodniczy. Jedną z rozważanych możliwości było zastosowanie wody. Wodę wyróżnia wysokie ciepło parowania w porównaniu z innymi czynnikami chłodniczymi, co jest przedstawione na Rys.1.8. Woda z ciepłem parowania około 2500 kJ/kg dominuje zarówno nad czynnikami naturalnymi (amoniak, izobutan, metanol, etanol i propan) jak i syntetycznymi (R1234yf i R1234ze). Ponadto woda jest czynnikiem przyjaznym środowisku, nietoksycznym (w przeciwieństwie do np. metanolu, amoniaku), niepalnym (w przeciwieństwie do np. metanolu i etanolu) oraz niewybuchowym (w przeciwieństwie do np. propanu i izobutanu). Tab. 1.5 zawiera zestawienie informacji nt. toksyczności, palności i wybuchowości wybranych czynników chłodniczych.

Nie bez znaczenia jest również dostępność oraz cena czynnika chłodniczego. Wpływa to w sposób znaczący na koszty zarówno inwestycyjne jak i te związane z eksploatacją i serwisem. Rys. 1.9 przedstawia orientacyjne ceny wybranych czynników chłodniczych. Zestawienie wskazuje na pewne konsekwencje wprowadzanych regulacji mianowicie najdroższe są czynniki R1234ze i R1234yf, związki HFO będące zamiennikami wycofywanych czynników HFC, HCFC i CFC. Ceny czynników



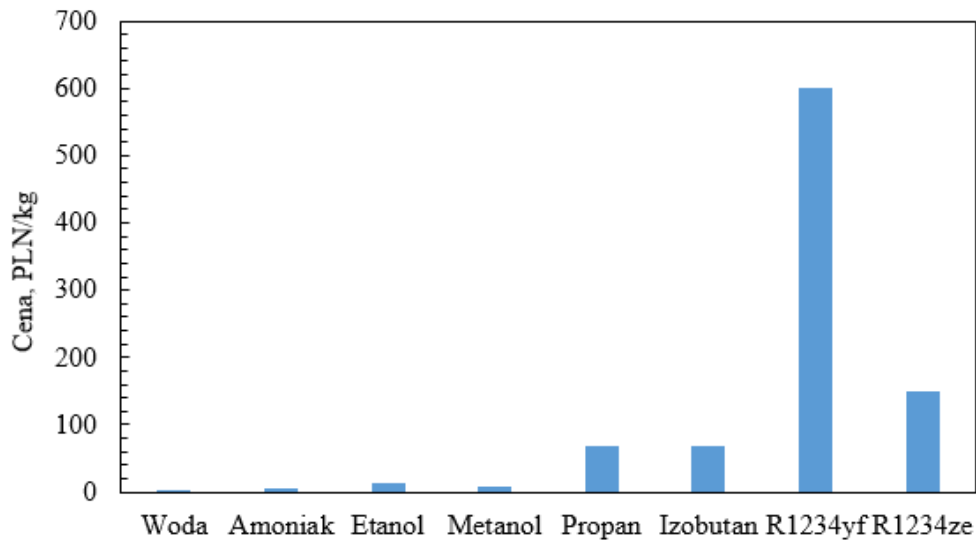
Rysunek 1.8: Ciepło parowania wybranych czynników chłodniczych w temperaturze nasycenia 5°C

Tabela 1.4: Informacje nt. toksyczności i wybuchowości/palności wybranych czynników chłodniczych

Czynnik	Toksyczność	Granice palności/ wybuchowości, % objętości
Woda	Nie	n.d.
Amoniak	Silnie toksyczny	15 - 28 [119]
Metanol	Silnie toksyczny	6,7 - 36 [119]
Etanol	Nie	3,3 - 19 [119]
Izobutan	Właściwości duszące	1,8 - 8,4 [119]
Propan	Właściwości duszące	2,1 - 9,5 [119]
R1234yf	Toksyczne produkty spalania	6,2 - 12,3 [67]
R1234ze	Toksyczne produkty spalania	b.d. [101]

naturalnych takich jak propan i izobutan są rzędu około 100 PLN/kg. Woda jest najtańszym czynnikiem chłodniczym w prezentowanym zestawieniu.

Wykorzystanie wody jako czynnika chłodniczego niesie ze sobą również pewne niedogodności np. konieczność odparowania wody pod ciśnieniem niższym niż atmosferyczne. Przykładowo, uzyskanie mocy chłodniczej na poziomie 5°C wymaga utrzymania ciśnienia rzędu 1kPa, co jest przedstawione na Rys. 1.10. Ma to znamieny wpływ na konstrukcję systemów chłodniczych (zbiorniki ciśnieniowe, szczelność połączeń), na zagadnienia związane z wymianą ciepła (np. spadek współczynnika wnikania ciepła przy wrzeniu) oraz na zagadnienia hydrauliczne (transport pary wodnej o wysokiej objętości właściwej). Istotnym ograniczeniem jest również temperatura zamarzania wody, uniemożliwiająca uzyskanie mocy chłodniczej na poziomie niższym niż 0°C.

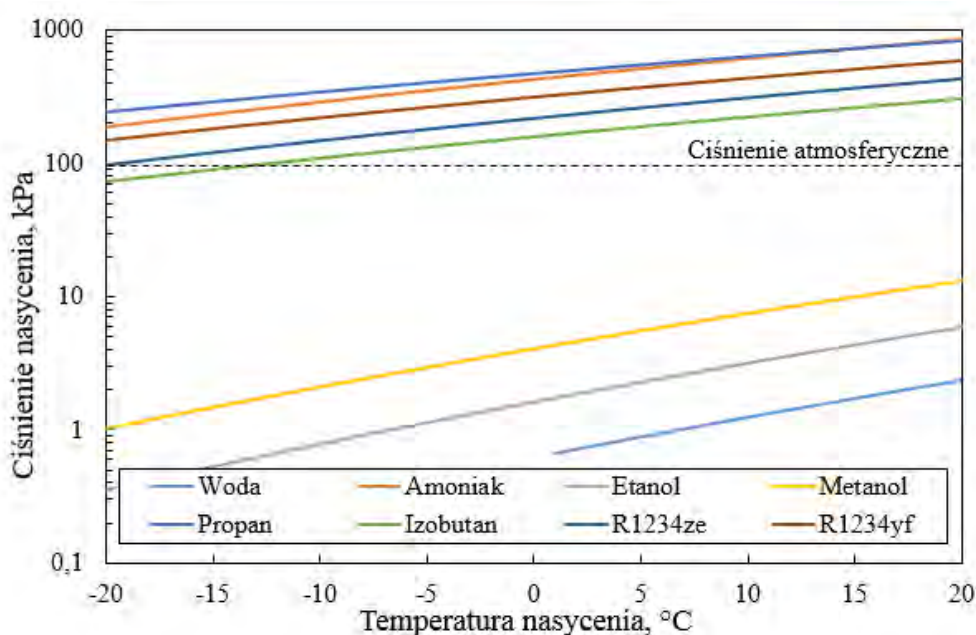


Rysunek 1.9: Orientacyjne ceny wybranych czynników chłodniczych.

Prawdopodobnie nie istnieje idealny czynnik chłodniczy. Właściwości fizyczne wody czynią ją bardzo obiecującą alternatywą dla konwencjonalnych czynników chłodniczych, mimo że jej zastosowanie wiąże się z pewnymi ograniczeniami i wymaganiami: minimalna temperatura uzyskiwanego chłodu to około $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, konieczne jest utrzymanie wysokiej jakości próżni. Ponadto, wysoka objętość właściwa pary wodnej w niskim ciśnieniu ma istotny wpływ na gabaryty urządzeń. Niemniej jednak woda posiada szereg zalet predestynujących ją do zastosowań chłodniczych: wyróżniająco wysokie ciepło parowania i ciepło właściwe. Co więcej woda jest przyjazna zarówno dla środowiska jak i człowieka, a przy tym jest łatwo dostępna i tania.

Adsorpcja fizyczna Wszystkie technologie umożliwiające konwersję ciepła na chłód bazują na idei obiegu chłodniczego przedstawionego w paragrafie "Lewobieżny obieg chłodniczy". Różnice między nimi polegają przede wszystkim na rodzaju procesu, który umożliwia sprężenie par czynnika. Jak zostanie przedstawione w dalszej części pracy, szereg rozwiązań, w celu sprężenia par czynnika, korzysta ze zjawiska adsorpcji fizycznej. Ze względu na ten fakt, w niniejszym paragrafie zostaną omówione podstawy zjawiska adsorpcji fizycznej. Adsorpcja fizyczna jest procesem w wyniku którego na powierzchni ciała stałego, zwanego adsorbentem, gromadzi się substancja w stanie ciekłym, zwana adsorbentem. Gromadzeniu adsorbentu na powierzchni adsorbentu towarzyszy uwalnianie tzw. ciepła adsorpcji, co wynika w dużej mierze ze skraplania się adsorbentu podczas adsorpcji oraz oddziaływań międzycząsteczkowych. Zdolność do adsorpcji zależy od temperatury adsorbentu i ciśnienia par adsorbentu. Do najpopularniejszych adsorbentów należą:

1. Silika żel - amorficzna krzemionka. Jeden z najpopularniej stosowanych adsorbentów, najczęściej w parze z wodą [27, 28]



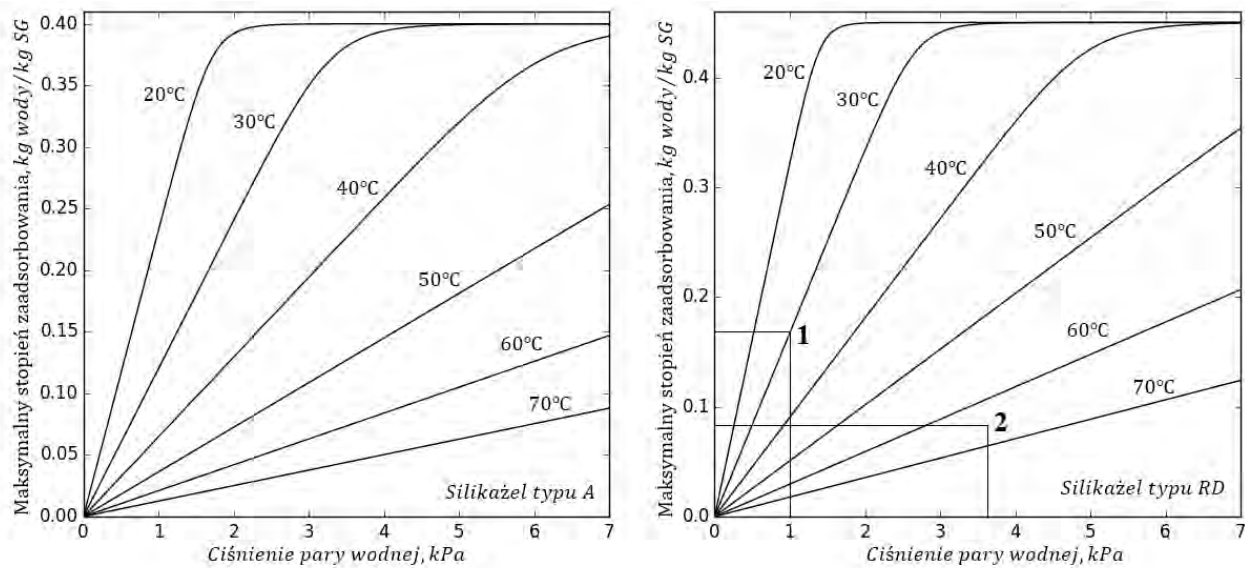
Rysunek 1.10: Ciśnienie nasycenia wybranych czynników chłodniczych w zakresie temperatur wrzenia od -20 do 20°C

2. Węgiel aktywny - w formie peletu lub włókien, najczęściej stosowany w parze z metanolem [95, ?], etanolem [95, 36] lub wodą [9]
3. Zeolity - grupa minerałów glinokrzemianowych pochodzenia naturalnego [58] lub syntetyczne [115], najczęściej stosowane w parze z wodą [115].

Ze względu na temperaturę górnego źródła ciepła około 65°C i temperaturę chłodzenia około 27°C niniejsza praca skupia się jedynie na parze adsorpcyjnej silikażel - woda. Według [27] układy pracujące na parze adsorpcyjnej silikażel-woda mogą pracować przy temperaturze górnego źródła ciepła nawet 45°C .

Rysunek 1.11 przedstawia zależność maksymalnego stopnia zaadsorbowania od temperatury i ciśnienia dla silikażelu typu A i RD na podstawie izoterm adsorpcji wyznaczonych przez [28].

Przykładowo przy temperaturze silika żelu 30°C i ciśnieniu 1kPa (odpowiadające temperaturze parowania wody 7°C) maksymalny stopień zaadsorbowania silika żelu typu RD wyniesie około $0,167\text{ kg/kg}$ (Rys.1.11 punkt 1.), a przy wzroście temperatury silika żelu do 65°C i ciśnienia do $3,6\text{ kPa}$ (odpowiadające temperturze skraplania wody 27°C) maksymalny stopień zaadsorbowania spadnie do $0,082\text{ kg/kg}^{-1}$ ((Rys.1.11 punkt 2.)). Podgrzanie silikażelu, a następnie jego ochłodzenie pozwoli na zaadsorbowanie $0,085\text{ kg}$ wody na każdy 1 kg silika żelu co odpowiada zaadsorbowaniu pary wodnej, która odparowując wytworzyła około 190 kJ chłodu w temperaturze około 7°C . Sama zmiana stopnia zaadsorbowania nie określa jednak tempa tych zmian i mocy chłodniczej jaka może być w ten sposób



Rysunek 1.11: Maksymalny stopień zaadsorbowania pary wodnej w zależności od temperatury i ciśnienia dla silikażelu typu A i RD na podstawie izoterm adsorpcji wyznaczonych przez [28]

wygenerowana z 1 kg adsorbentu czyli tzw. Właściwej Wydajności Chłodniczej SCP (ang. Specific Cooling Power), która jest wyrażona jako:

$$SCP = \frac{\dot{Q}_0}{M_{ads}} \quad (1.4)$$

Moc chłodnicza jaka może być wygenerowana z 1 kg silikażelu zależy od kinetyki adsorpcji [93]:

$$\frac{dw}{dt} = K(T_{sg})(w^* - w) \quad (1.5)$$

Kinetyka procesu adsorpcji zależy od współczynnika dyfuzji w ziarnie sorbentu oraz różnicy maksymalnego stopnia zaadsorbowania (Rys. 1.11) w danym ciśnieniu i temperaturze oraz bieżącego stopnia zaadsorbowania. Współczynnik dyfuzji jest wyrażony wzorem [93]:

$$K(T_{sg}) = 60 \frac{D_{s0}}{D_{sg}^2} \exp\left(\frac{-E}{RT_{sg}}\right) \quad (1.6)$$

Współczynnik dyfuzji w ziarnie adsorbentu zależy od średnicy ziarna sorbentu (im mniejsze ziarno, tym szybsza dyfuzja) i temperatury sorbentu (szybsza dyfuzja w wyższej temperaturze). Maksymalny stopień zaadsorbowania sorbentu, którego zależność od temperatury i ciśnienia została przedstawiona na Rys. 1.11, jest wyrażony jako [28]:

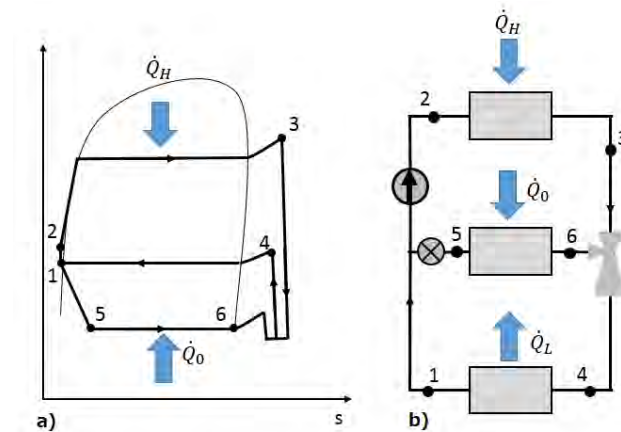
Adsorpcja pary wodnej na silikażelu prowadzi do wydzielania się ciepła adsorpcji H_{ads} , które w przypadku pary adsorpcyjnej silikażel-woda wynosi około 2690 kJ/kg . Wydzielone ciepło podwyższa temperaturę silikażelu, zmniejszając maksymalny stopień zaadsorbowania i w ten sposób hamując proces adsorpcji. Efektywna adsorpcja wymaga zatem nie tylko zapewnienia intensywnej dyfuzji

pary wodnej w ziarnie sorbentu, ale również intensywnej wymiany ciepła, która pozwoli sprawnie odprowadzić wydzielające się ciepło podczas adsorpcji bądź doprowadzić ciepło podczas desorpcji. Z ciepłem adsorpcji związane jest również zagadnienie granicznej efektywności układów chłodniczych wykorzystujących zjawisko adsorpcji COP_{max} . Zakładając sytuację idealną, w której całe ciepło dostarczone do silikażelu jest spożytkowane na pokrycie ciepła desorpcji (pomijając pojemność cieplną masy układu, który pozwala to ciepło doprowadzić, pomijając także pojemność cieplną trwale zaadsorbowanej wody oraz samego silikażelu). Zdesorbowany w ten sposób silikażel może zaadsorbować parę wodną, która odparowując wygenerowała chłód proporcjonalny do ciepła parowania wody H_{par} . Porównując zysk (chłód uzyskany z odparowania wody) oraz koszty (ciepło potrzebne do desorpcji) otrzymamy:

$$COP_{max} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = \frac{\Delta m H_{par}}{\Delta m H_{ads}} = 0.9 \quad (1.7)$$

Z przedstawionej powyżej analizy wynika, że oprócz ograniczenia termodynamicznego efektywność adsorpcyjnych układów chłodniczych jest ograniczona również stosunkiem ciepła parowania do ciepła adsorpcji do wartości około 0.9. Niemniej jednak, zjawisko adsorpcji fizycznej umożliwia sprężanie pary wodnej wykorzystując do tego celu niskotemperaturowe ciepło. Zagadnieniami, które mają krytyczne znaczenie dla wydajności i efektywności procesów adsorpcji są jednoczesna intensyfikacja procesów wymiany masy między parą wodną i ziarnami adsorbentu oraz procesów wymiany ciepła między adsorbentem, a układem grzejącym lub chłodzącym adsorbent.

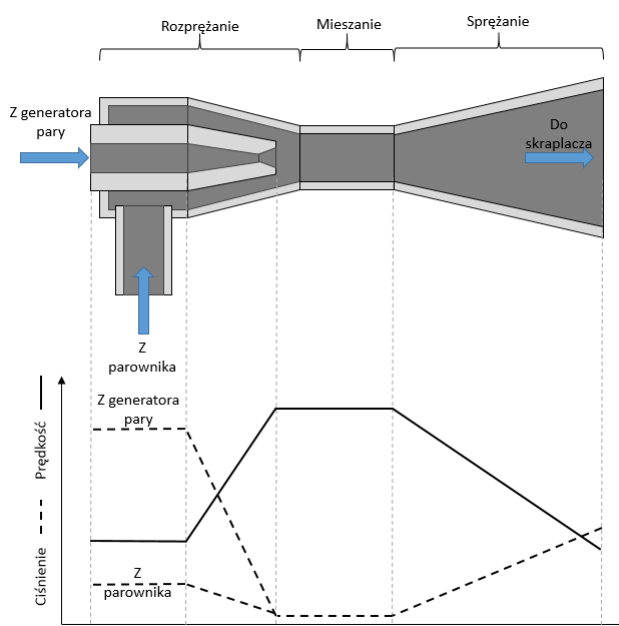
1.4.3 Chłodnictwo strumienicowe



Rysunek 1.12: Chłodziarka strumienicowa: a) Przemiany na wykresie T-s, b) Schemat [12]

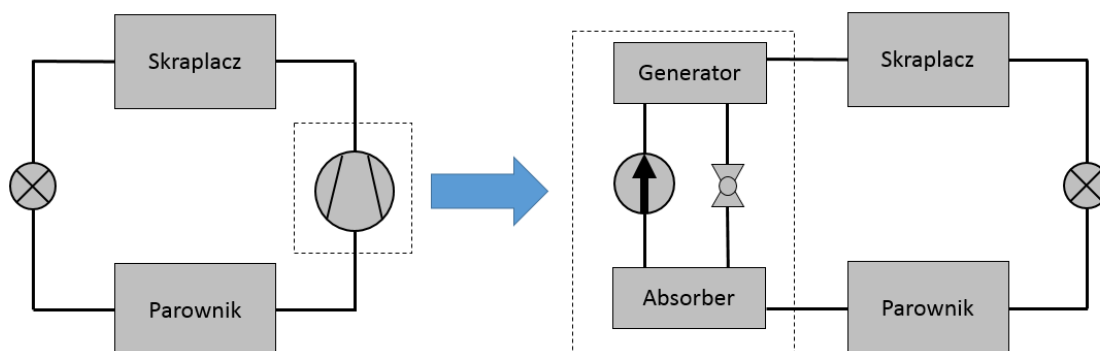
Chłodziarki strumienicowe upowszechniły się w technice chłodniczej na początku XX wieku [59], głównie ze względu na prostotę konstrukcji i niezawodność pracy. Zostały jednak szybko wyparte przez chłodnictwo sprężarkowe, co było związane z ich niskim współczynnikiem konwersji energii.

Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił powrót do prac rozwojowych nad tą technologią. W chłodziarkach strumienicowych elementem pełniącym rolę sprężarki jest strumienica zasilana parą czynnika pod wysokim ciśnieniem. Chłodziarki strumienicowe (Rys. 1.6b) realizują obieg zbliżony do kombinowanego obiegu Carnot. Obieg chłodziarki strumienicowej, przedstawiony na Rys. 1.6a, składa się z połączonych obiegów ORC oraz chłodniczego. Strumienica jest zasilana z generatora pary i dzięki temu utrzymuje stałe ciśnienie w parowniku odprowadzając odparowujący czynnik. Para zasilająca, przepływając przez dyszę, jest izentropowo rozprężana (wzrasta jej energia kinetyczna), do poziomu umożliwiającego odessanie par z parownika. Mieszanina par jest następnie izentropowo sprężana (kosztem energii kinetycznej) w dyszy rozbieżnej i kierowana do skraplacza.



Rysunek 1.13: Zasada działania strumienicy

Jak wspomniano we wstępie, zaletą chłodziarek strumienicowych jest prostota budowy oraz wysoka niezawodność. Z drugiej strony, chłodziarki strumienicowe korzystają z tych samych czynników co chłodziarki sprężarkowe, a ograniczenia stosowania czynników chłodniczych dotyczą je w takim samym stopniu jak chłodziarki sprężarkowe. Ponadto, chłodziarki strumienicowe zasilane niskotemperaturowym ciepłem osiągają COP nieprzekraczające 0,45 [104, 7]. Zdaniem autora, ze względu na swoją specyfikę, chłodnictwo strumienicowe nie jest realną alternatywą dla chłodnictwa sprężarkowego, aczkolwiek może być z powodzeniem stosowane tam gdzie priorytetem nad sprawnością jest niezawodność pracy lub kompaktowa budowa np. jako klimatyzacja samochodowa.



Rysunek 1.14: Podobieństwo między chłodziarkami absorpcyjnymi i sprężarkowymi

1.4.4 Chłodziactwo absorpcyjne

Chłodziarka absorpcyjna została wynaleziona w 1858 roku przez Ferdynanda Carre [117]. Podobnie jak chłodziarki strumienicowe, chłodziarki absorpcyjne były popularne na początku XX wieku, ale zostały wyparte przez bardziej efektywne chłodziarki sprężarkowe. Różnica polega na sposobie zwiększenia ciśnienia czynnika chłodniczego. W chłodziarkach absorpcyjnych, w celu zmniejszenia pracy związanej z podniesieniem ciśnienia czynnika, sprężarka jest zastąpiona tzw. sprężarką termiczną co ilustruje Rys. 1.8. Pary czynnika chłodniczego są wpieryw pochłaniane (absorbowane) przez ciekły sorbent, następnie razem z nim są pompowane. Wreszcie, pod wpływem doprowadzonego ciepła, czynnik chłodniczy i sorbent zostają rozdzielone. Sprężarka termiczna składa się więc z trzech elementów: pompy, generatora i absorbera. Zastosowanie sprężarki termicznej pozwala ograniczyć pracę związaną z podniesieniem ciśnienia par czynnika, ale wymaga dostarczenia ciepła, potrzebnego do desorpcji czynnika chłodniczego z ciekłego sorbentu. Wśród wielu dostępnych par absorpcyjnych (absorbent - czynnik chłodniczy) do najpopularniejszych, ze względu na wysoką efektywność chłodniczą, należą para woda-amoniak i bromek litu-woda [38]. Ze względu na zbyt wysoką temperaturę desorpcji, zarówno chłodziarki pracujące na parze absorpcyjnej woda-amoniak jak i bromek litu-woda nie mogą być zasilane niskotemperaturowym ciepłem o temperaturze do 65°C . Minimalna temperatura zasilania dla pary absorpcyjnej woda-amoniak wynosi 125°C , a dla pary bromek litu-woda 75°C [38]. Ponadto, autorzy [38] zwracają uwagę na szereg technicznych zagadnień utrudniających projektowanie i eksploatację chłodziarek absorpcyjnych bromek litu-woda:

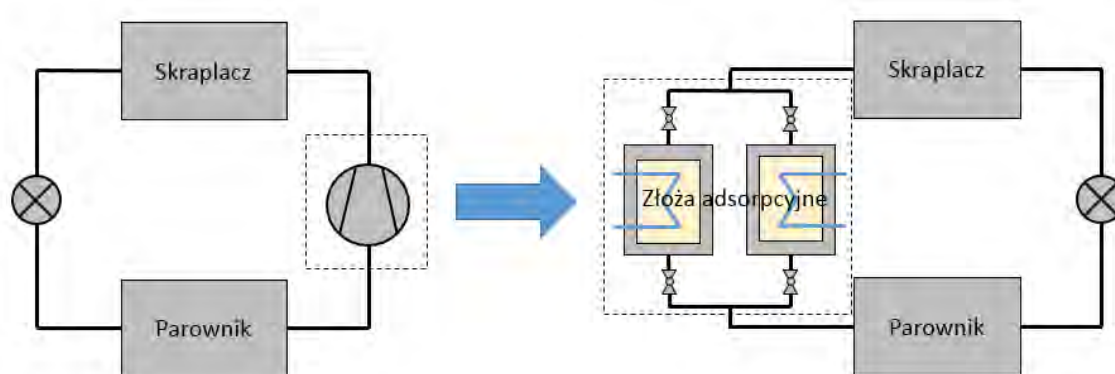
1. Możliwość krystalizacja absorbentu - wystąpienie krystalizacji bromku litu, możliwe ze względu na pracę urządzenia w temperaturach bliskich temperatury krzepnięcia bromku litu, może doprowadzić do zaburzeń pracy lub uszkodzenia chłodziarki.
2. Niskie ciśnienie pracy - moc chłodnicza jest uzyskiwana poprzez odparowanie wody przy ciśnieniu absolutnym rzędu pojedynczych kPa. Konieczna jest odpowiednio wytrzymała kon-

struktura urządzenia. Ma to istotny wpływ na masę i koszty instalacji. Ponadto, wymagana jest wysoka szczelność lub system regeneracji próżni.

3. Możliwość wystąpienia korozji stali miękkich - roztwory wodne bromku litu są korozyjne dla stali miękkich [64]. Konieczne jest stosowanie odpowiednich materiałów oraz dodatków anty-korozyjnych.

Ze względu na zbyt wysokie minimalne temperatury zasilania oraz ww. zagadnienia związane z eksploatacją i projektowaniem chłodziarek absorpcyjnych, technologia absorpcyjna nie stanowi realnej alternatywy dla chłodnictwa sprężarkowego, przynajmniej w rozważanym zakresie temperatur zasilania.

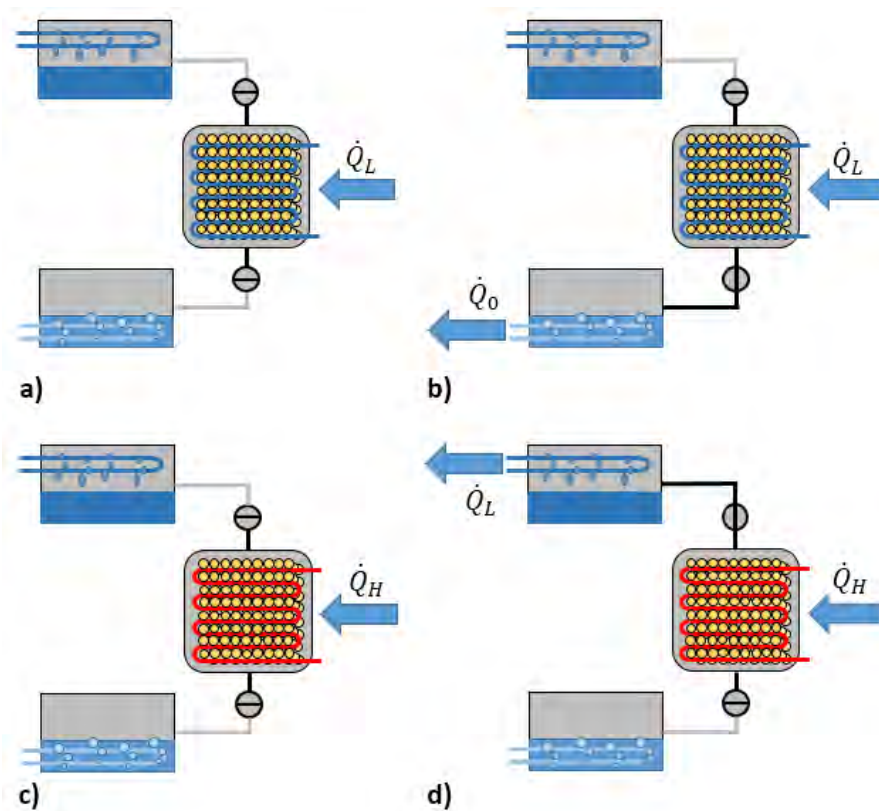
1.4.5 Chłodnictwo adsorpcyjne



Rysunek 1.15: Podobieństwo między chłodziarkami adsorpcyjnymi i sprężarkowymi

Kolejnymi urządzeniami wykorzystującymi wodę jako czynnik chłodniczy są chłodziarki adsorpcyjne [113]. Jest to również pierwsza z omawianych technologii wykorzystująca zjawisko adsorpcji fizycznej. W chłodziarkach adsorpcyjnych sprężanie par czynnika odbywa się za pomocą sprężarki termicznej, która składa się ze złożeń adsorpcyjnych i układu zaworów (Rys. 1.15). Zasada działania sprężarki termicznej chłodziarki adsorpcyjnej jest przedstawiona na Rys. 1.15. Ze względu na cykliczność procesów adsorpcji przedstawiono pełen cykl pracy pojedynczego złoża adsorpcyjnego. Ponadto, Rysunek 1.16 przedstawia zmiany parametrów złoża adsorpcyjnego: temperatury i stopnia zaadsorbowania sorbentu oraz ciśnienie pary wodnej w czasie pełnego cyklu pracy.

Cykl pracy złoża rozpoczyna się po uprzedniej regeneracji adsorbentu. Adsorbent na początku cyklu ma wysoką temperaturę i niski stopień zaadsorbowania. Przy zamkniętych zaworach łączących złożę z parownikiem i skraplaczem złożę jest wstępnie chłodzone, a ciśnienie w złożu obniża się (Rys.1.16a i Rys. 1.17a-b). Po osiągnięciu w złożu ciśnienia panującego w parowniku (Rys.1.16b) i otwarciu zaworu między złożem a parownikiem rozpoczyna się proces adsorpcji. Ciecz w parowniku odparowuje a pary czynnika są adsorbowane przez złożę (Rys. 1.16b). Zdolność złoża do dalszej

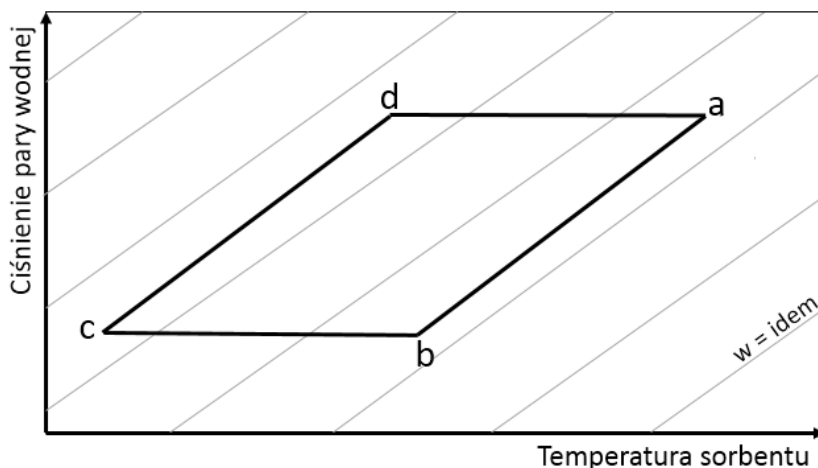


Rysunek 1.16: Zasada działania sprężarki termicznej chłodziarki adsorpcyjnej

adsorpcji spada w miarę wzrostu ilości już zaadsorbowanego czynnika. W końcu złożo nie jest już w stanie adsorbować par czynnika wystarczająco szybko by utrzymać odpowiednie ciśnienie parowania. Na tym etapie złożo wymaga regeneracji. Wpierw złożo jest wygrzewane przy zamkniętych obu zaworach (Rys. 1.16c i Rys.1.17c-d). Po osiągnięciu ciśnienia panującego w skraplaczu, otwiera się zawór łączący złożo ze skraplaczem i rozpoczyna się proces desorpcji / regeneracji (Rys. 1.16d i Rys.1.17d-a). Desorpcja jest kontynuowana do osiągnięcia odpowiedniego stopnia regeneracji złoża. Zapewnienie ciągłej pracy chłodziarki adsorpcyjnej wymaga zastosowania sprężarki termicznej o co najmniej dwóch złożach adsorpcyjnych. Do najczęściej stosowanych adsorbentów należą:

Na obecną chwilę chłodziarki adsorpcyjne osiągają COP około 0.7 [27, ?, 73]. Głównymi metodami podwyższania COP są:

1. Zastosowanie chłodziarek wielozłożowych [27, 24, 107, 96, 73]
2. zastosowanie chłodziarek wieloparownikowych [27, ?],
3. optymalizacja cyklu pracy chłodziarki [?, 123, 3],
4. zastosowanie odzysku masy i ciepła [123, 63, 110, 78, 2, 118].



Rysunek 1.17: Temperatura i stopień zaabsorbowania adsorbentu oraz ciśnienie adsorbentu podczas pełnego cyklu pracy złoża adsorpcyjnego

Ponadto obecne chłodziarki adsorpcyjne, pracujące na parze silika żel- woda, osiągają SCP do około 350 Wkg^{-1} [88]. Metodami umożliwiającymi poprawę SCP są:

1. Optymalizacja czasu cyklu [72, 115, 97, 111, 17],
2. prawidłowy dobór i optymalizacja złoża adsorpcyjnego [88, 55, 18, 72, 111],
3. optymalizacja grubości i konfiguracji ziaren sorbentu [4, 17].

Efektywna praca wszelkich urządzeń adsorpcyjnych (również tych omawianych w niniejszym rozdziale) zależy w dużej mierze od zagadnień związanych z wymianą ciepła i masy w złożu adsorpcyjnym. Zagadnieniami związanymi z wymianą masy w złożu są: kinetyka adsorpcji w ziarnie, migracja pary w warstwie ziaren oraz dyfuzja pary wodnej przez powierzchnię ziarna. Zagadnieniami związanymi z wymianą ciepła są natomiast: przewodzenie ciepła w warstwie ziaren, opory kontaktowe powierzchnia wymiennika - ziarna, budowa i konfiguracja adsorbentu. Dostępne analizy teoretyczne i eksperymentalne wskazują na konflikt optymalizacyjny poszczególnych elementów tzn. próba poprawy jednego z mechanizmów powoduje pogorszenie innego [88, 4, 17]. Przykładowo: zmniejszenie średnicy ziarna prowadzi do poprawy kinetyki adsorpcji, ale ogranicza migrację pary w warstwie ziaren. Następnym czynnikiem ograniczającym efektywność urządzeń adsorpcyjnych jest stosunek masy adsorbentu do masy martwej adsorbentu (masy samego wymiennika bez adsorbentu) $R_{s/m}$ [88]. Podczas każdego cyklu pracy, pewna część dostarczonego ciepła wygrzewa masę martwą adsorbentu i jest w ten sposób tracona. Przeprowadzone optymalizacje pracy złoża wskazują, że nadmierne ograniczanie stosunku masy adsorbentu i masy martwej negatywnie wpływa na powierzchnię wymiany ciepła złoża oraz niektóre mechanizmy wymiany ciepła i masy w złożu (szczególnie te związane

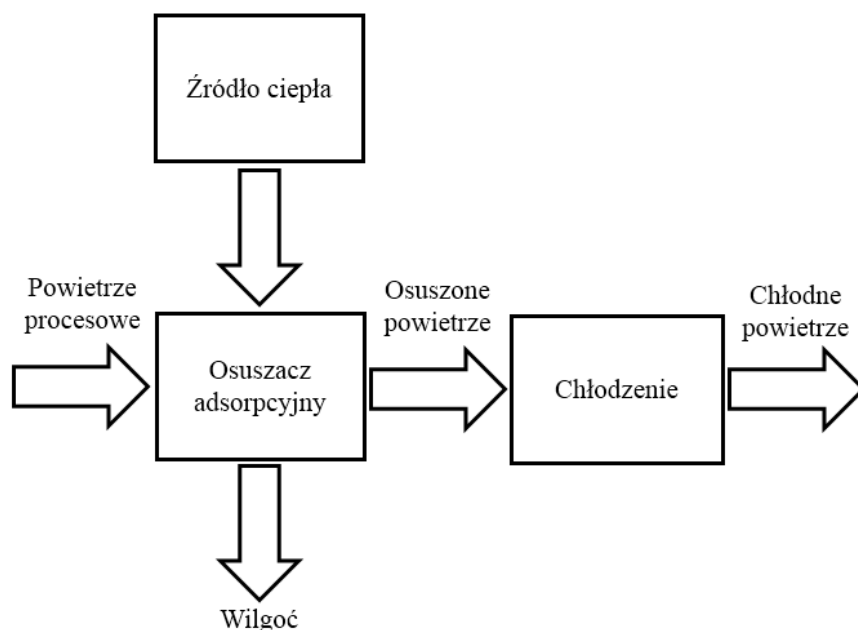
z grubością warstwy ziaren)[88]. Efektywna praca chłodziarek adsorpcyjny wymaga również utrzymania odpowiedniej próżni i szczelności instalacji. Nawet niewielka ilość powietrza w parowniku lub skraplaczu prowadzi do znaczącego spadku efektywności pracy instalacji. Ponadto, praca w podciśnieniu (1 - 8kPa) wymusza stosowania konstrukcji ciśnieniowych, co może istotnie wpływać na koszt urządzenia szczególnie przy większych mocach jednostek. Chłodziarki adsorpcyjne, działające w oparciu o zjawisko adsorpcji fizycznej, umożliwiają konwersję niskotemperaturowego ciepła na chłód. Ze względu na wzajemne powiązania szeregu mechanizmów wymiany ciepła i masy w złożu adsorpcyjnym, które mają kluczowe znaczenie w kwestii efektywności pracy chłodziarek adsorpcyjnych, do tej pory nie udało się przekroczyć wartości cieplnego COP 0,7 oraz SCP około 350 Wkg^{-1} dla pary adsorpcyjnej woda - silikażel. Zdaniem autora, dalsza poprawa efektywności może być bardzo trudna. Wymagałaby ona zasadniczych zmian w podejściu do adsorpcji.

1.4.6 Chłodnictwo Desiccant Cooling

Takim alternatywnym podejściem do adsorpcji, które pozwala wyeliminować część problemów omówionych w poprzednim rozdziale chłodziarek adsorpcyjnych jest technologia Desiccant Cooling DC [30]. Pierwszą z zalet chłodziarek tego typu jest ciśnienie pracy zbliżone do atmosferycznego. Jest to możliwe ze względu na zastąpienie jednoskładnikowej pary wodnej, mieszaniną pary wodnej i powietrza suchego. Ciśnienie parcjalne pary wodnej wynosi, podobnie jak w przypadku chłodziarek adsorpcyjnych, 1-8kPa, ale już ciśnienie powietrza wilgotnego jest zbliżone do ciśnienia atmosferycznego. Ogólna zasada działania chłodziarek DC jest przedstawiona na Rys.1.18. Chłodziarki składają się z dwóch zasadniczym elementom: Osuszacza adsorpcyjnego i chłodnicy wyparnej - układu schładzającego osuszone powietrze poprzez odparowanie wody. Osuszacz adsorpcyjny jest zasilany niskotemperaturowym ciepłem, które pozwala na regenerację adsorbentu. Osuszacze, w zależności od rodzaju, pracują w sposób ciągły lub cykliczny. Osuszone powietrze jest następnie chłodzone poprzez odparowanie wody. Można wyróżnić chłodnice wyparne bezpośrednie, pośrednie [30] lub kombinowane (w tym także oparte na tzw. obiegu Maisotsenki[68]). Stosuje się są różnego rodzaju osuszacze, przedstawione na Rysunku 1.19:

- Osuszacze ze złożami stałymi (Rys. 1.19a) [125, 29, 34, 52, 57, 71, 75, 83]
- koła osuszające (Rys.1.19b) [19, 54, 74]
- wymienniki powlekane sorbentem (Rys.1.19c) [48, 41, 92, 109, 124]

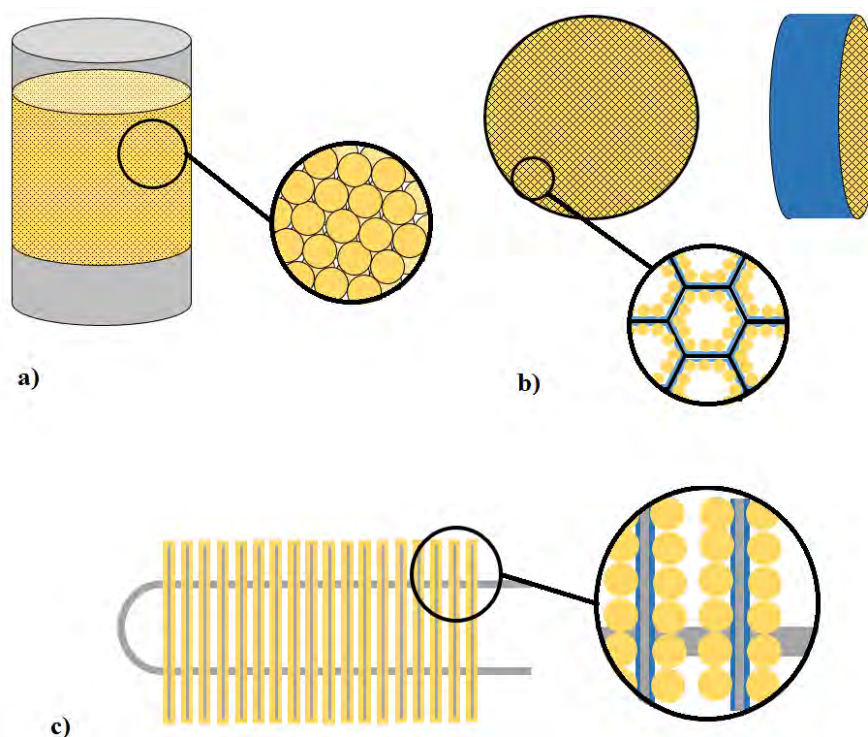
Osuszacze ze złożami stałymi charakteryzują się prostą konstrukcją. Ich zaletą jest również brak masy martwej, które podczas cyklu pracy byłyby podgrzane zmniejszając w ten sposób COP. Ze względu na gęste upakowanie ziaren złoża stałe charakteryzuje znaczny spadek ciśnienia [57] oraz niestabilność pracy złoża [22]. Osuszacz ze złożami stałymi pracuje cyklicznie dlatego osuszacz musi się składać z co najmniej dwóch złożów. Osuszacze z obracającym się kołem osuszającym, którego część osusza powietrze, a część jest w tym czasie regenerowana, pracują w sposób ciągły. Charakteryzują się one także znacznie niższymi spadkami ciśnień niż osuszacze ze złożami stałymi [103].



Rysunek 1.18: Ogólna zasada działania chłodziarek Desiccant Cooling [30]

Skomplikowana budowa powoduje że jest to rozwiązanie stosunkowo drogie, szczególnie w przypadku niewielkich instalacji [22]. Koła osuszające mają masę martwą - silikażel jest naniesiony na szkielet konstrukcyjnym (Rysunek 1.19b). W obu powyższych rozwiązaniach adsorbent jest chłodzony/grzany przez przepływające przez złożę powietrze [92]. Osuszacz z wymiennikami powlekanymi jest powrotem do koncepcji znanej z niskociśnieniowych chłodziarek adsorpcyjnych, gdzie adsorbent jest chłodzony bądź grzany bezpośrednio przez wymiennik. Osuszacze z powlekanymi wymiennikami również charakteryzują się niższymi spadkami ciśnienia niż osuszacze ze złożami stałymi. Osuszacze z wymiennikami powlekanymi mogą, z racji podobnej budowy, podlegać podobnym ograniczeniom wymiany masy i ciepła co złoża niskociśnieniowych chłodziarek adsorpcyjnych. W końcu, ze względu na skomplikowaną budowę i serwis powlekanych wymienników jest to rozwiązanie drogie zarówno pod względem inwestycyjnym i eksploatacyjnym [22].

Tabela 1.5 przedstawia porównanie cech poszczególnych typów osuszaczy adsorpcyjnych. Pomimo szeregu zalet takich jak prosta budowa, niskie koszty, brak masy martwej zastosowanie osuszaczy ze złożami stałymi jest, ze względu na wysokie spadki ciśnień, ograniczone. Osuszacze z kołami osuszającymi i wymiennikami powlekanymi adsorbentem pozwalają ograniczyć straty ciśnienia, ale są stosunkowo drogie i skomplikowane. W obu rozwiązaniach występuje również masa martwa, która negatywnie wpływa na cieplne COP. Ponadto konieczność klejenia adsorbentu do konstrukcji nośnej koła osuszającego lub do wymiennika może ograniczać kinetykę adsorpcji. Technologia Desiccant Cooling pozwala rozwiązać niektóre z problemów eksploatacyjnych chłodziarek adsorpcyjnych oraz przełamać ograniczenia związane z intensywnością procesów adsorpcji. Wyzwaniami



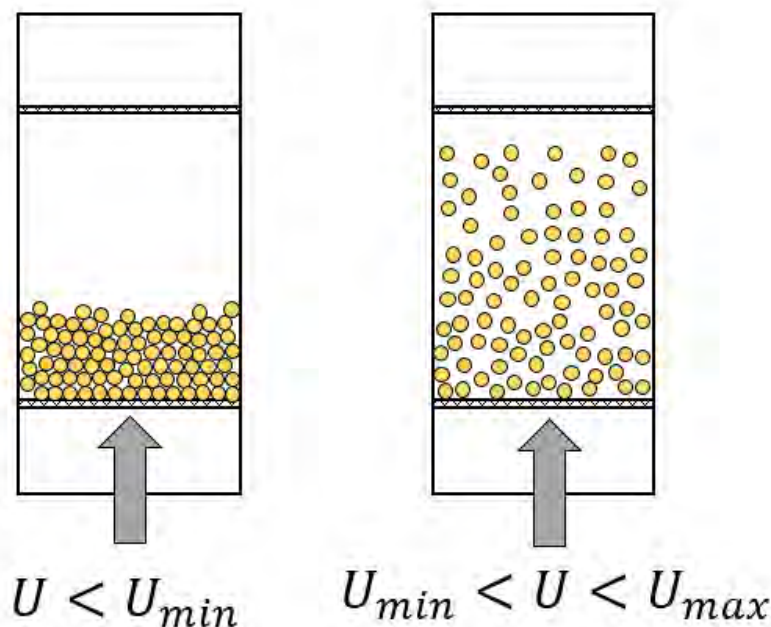
Rysunek 1.19: Rodzaje osuszaczy: a) Złoże stałe, b) Koło osuszające, c) Wymiennik powlekany adsorbentem.

Tabela 1.5: Porównanie poszczególnych typów osuszaczy adsorpcyjnych

Osuszacz	Spadek ciśnienia	Koszt	Budowa	Praca	Uwagi
Ze złożami stałymi	Wysoki	Niski Niski	Prosta	Cykliczna	Brak masy martwej
Koła osuszające	Niski	Wysoki	Skomplikowana	Ciągła	Masa martwa w postaci konstrukcji nośnej, wpływ kleju na adsorpcję
Wymienniki powlekane	Niski	Wysoki	Skomplikowana	Cykliczna	Masa martwa w postaci wymiennika, wymiana masy adsorbent-wymiennik, wpływ kleju na adsorpcję

technologii Desiccant Cooling pozostają: wysokie spadki ciśnienia na złożu, niska kinetyka adsorpcji, wysokie koszty inwestycyjne lub eksploatacyjne osuszaczy. Jako potencjalne rozwiązanie większości ww. kwestii został zaproponowany kolejny typ osuszacza adsorpcyjnego - osuszacz ze złożami fluidalnymi [20, 21, 44, 45, 47, 85, 86, 23]. To rozwiązanie pozwala, przy zachowaniu prostej budowy, zredukować spadki ciśnienia na złożu. Fluidyzacja znacząco intensyfikuje również wymianę ciepła

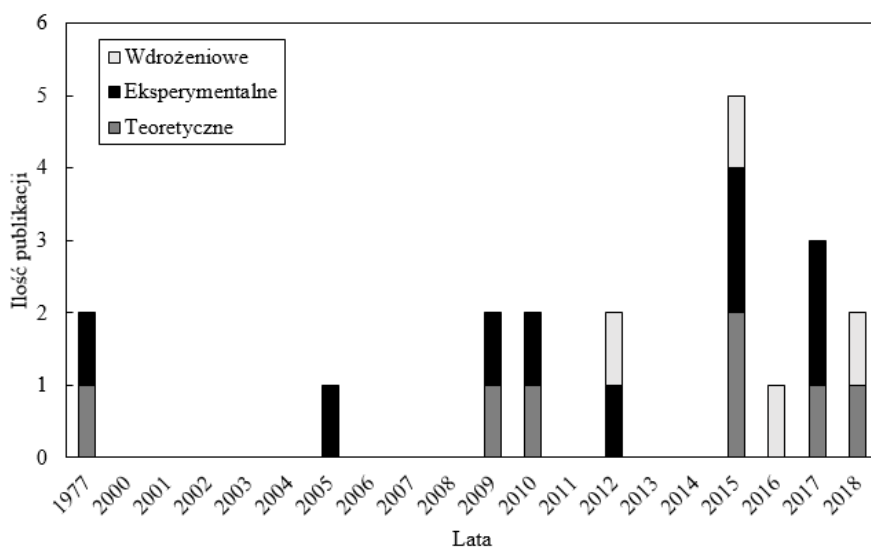
i masy między powietrzem wilgotnym i ziarnami adsorbentu [116]. Możliwa jest ciągła praca tego typu osuszaczy [23, 20, 65]. Schemat i zasada działania złoża fluidalnego są przedstawione na Rys. 1.20. Ziarna są luźno usypane w złożu nie wypełniając go całkowicie w przeciwieństwie do złoża sta-



Rysunek 1.20: Zasada działania złoża fluidalnego.

łego. W zakresie prędkości powietrza (który zależy m.in. od geometrii ziaren, własności fizycznych adsorbentu, fluidyzującego gazu) przepływającego przez złożo od dołu do góry, ziarna zostają wprowadzone w chaotyczny ruch nazywany fluidyzacją. Fluidyzacja może przybierać różne formy zależnie od fluidyzującego gazu i fluidyzowanego sypkiego ciała stałego oraz charakterystyki przepływu. Fluidyzacja znacząco intensyfikuje wymianę ciepła i masy pomiędzy ziarnami sorbentu i powietrzem [116] oraz ogranicza stratę ciśnienia na złożu [21]. Fluidyzacja jest procesem dobrze poznany i szeroko stosowanym w przemyśle [116]. Rysunek 1.21 przedstawia ilość opublikowanych prac przeprowadzonych w zakresie adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji z podziałem na prace teoretyczne, eksperymentalne i wdrożeniowe. Wykorzystanie fluidyzacji pod kątem intensyfikacji adsorpcji w chłodnictwie jest trendem ostatnich lat i mimo coraz liczniejszych opracowań jak dotąd brak zarówno solidnych podstaw teoretycznych jak i danych eksperymentalnych dotyczących samego zjawiska adsorpcji oraz analiz systemowych tj. dotyczących kompletnych systemów chłodniczych działających w oparciu o zjawisko adsorpcji. Ww. braki dotyczą w szczególności:

1. Opracowania modelu opisującego w sposób kompleksowy (wymianę ciepła i masy, spadki ciśnienia na złożu fluidalnym) adsorpcje i desorpcje pary wodnej przez silikażel w złożu fluidalnym. Dopiero taki model jest narzędziem umożliwiającym szeroko pojęte analizy teoretyczne



Rysunek 1.21: Ilość publikacji wg Web of Science nt. adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji z podziałem na charakter pracy: teoretyczny, eksperymentalny lub wdrożeniowy. Publikacje wielotematyczne (np. teoretyczno - eksperymentalne) są liczone wielokrotnie.

mające na celu z jednej strony intensyfikację samego zjawiska adsorpcji w złożu fluidalnym, z drugiej zaś poprawę efektywności chłodniczej chłodziarki działającej w oparciu o zjawisko adsorpcji.

- Przeprowadzenia analiz wpływu poszczególnych parametrów złoża fluidalnego (takich jak np. prędkość powietrza w złożu fluidalnym, geometria ziaren i ilość adsorbentu) na intensywność procesów adsorpcji pary wodnej przez silikażel oraz efektywność całych urządzeń chłodniczych.
- Przeprowadzenie analiz systemowych, które pozwolą wskazać główne źródła (elementy systemu chłodniczego) strat, wskazać metody poprawy efektywności chłodniczej oraz określić granicę poprawy tej efektywności.

Uzupełnienie ww. braków nie tylko poszerzy wiedzę na temat zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji, ale również adsorpcji podczas fluidyzacji jako takiej, co przyczyni się do poszerzenia wiedzy i rozwoju dziedzin pokrewnych np. adsorpcji dwutlenku węgla [114], wodoru [8] czy adsorpcji pary wodnej przez inne adsorbenty [121]. Solidna wiedza teoretyczna, zwłaszcza w zakresie technik modelowania zjawisk, stanowi również fundament dla prac optymalizacyjnych i pośrednio wdrożeniowych. Nie mniej ważna jest, zdaniem autora, ocena możliwości wykorzystania zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji w chłodnictwie poprzez przeprowadzenie analiz efektywności chłodniczej konkretnych instalacji, wskazanie ograniczeń i optymalizacja ich pracy oraz wskazanie potencjalnych dalszych metod na poprawę działania tego typu urządzeń

chłodniczych. Realizacja opisanych powyżej zadań pozwoli, zdaniem autora, dokonać rzetelnej oceny możliwości wdrożenia technologii opartych na zjawisku adsorpcji pary wodnej przez silikażel do chłodnictwa.

1.5 Podsumowanie

Celem niniejszego rozdziału było przedstawienie różnego rodzaju czynników, które skłoniły autora niniejszej pracy do podjęcia tematyki intensyfikacji procesów adsorpcyjnych podczas suszenia powietrza w chłodnictwie. Najważniejszymi czynnikami były:

- Wejście w życie międzynarodowych porozumień z Kyoto i Montrealu, które w celu ochrony warstwy ozonowej oraz zapobieganiu globalnemu ociepleniu, wprowadziły ograniczenia w stosowaniu czynników chłodniczych. Przyczyniło się to do intensywnego rozwoju alternatywnych technologii chłodniczych.
- Wytwarzanie energii elektrycznej w skojarzeniu z ciepłem w sposób znaczący podwyższa ogólną sprawność konwersji energii pierwotnej, o ile występuje popyt na wytworzone ciepło. W okresach letnich, ze względu na brak popytu na ciepło sieciowe, elektrociepłownie pracują de facto jak niskosprawne elektrownie. Jednocześnie, ze względu na wysokie temperatury powietrza, w okresach letnich wzrasta popyt na klimatyzacje. Przyczyniło się to do zainteresowania technologiami umożliwiającymi konwersję ciepła sieciowego (o temperaturze około 65°C) na chłód, co miałoby wielorakie zalety: z jednej strony umożliwiało wykorzystanie ciepła sieciowego a z drugiej zmniejszało zapotrzebowanie na energię elektryczną na cele klimatyzacji (zaspokojone już przez ciepło sieciowe).
- Ograniczenia stosowania tradycyjnych czynników przyczyniły się do prac nie tylko nad nowymi technologiami chłodniczymi, ale również nowymi czynnikami. Jednym z nowych czynników jest woda, którą wyróżnia bardzo wysokie ciepło parowania, dostępność i cena. Wyzwaniami związanymi z zastosowaniem wody jako czynnika chłodniczego jest temperatura zamrażania wody, która uniemożliwia uzyskania chłodu na poziomie temperatur niższym niż 0°C oraz konieczność utrzymania niskiego ciśnienia w zakresie 1-8 *kPa*.
- Zjawiskiem fizycznym, z którego korzysta szereg technologii chłodniczych zasilanych niskotemperaturowym ciepłem jest adsorpcja fizyczna. Adsorpcja pary wodnej przez silikażel umożliwia konwersję na chłód ciepła nawet o temperaturze 45°C . Wykorzystanie adsorpcji fizycznej w chłodnictwie wiąże się z ograniczeniem sprawności konwersji do cieplnego COP około 0,9.
- Opracowano szereg technologii chłodniczych wykorzystujących zjawisko adsorpcji fizycznej. Niektóre z nich wymagają utrzymania niskiego ciśnienia, inne poprzez wykorzystując powietrze wilgotne (o ciśnieniu parcjalnemu pary wodnej na poziomie 1-8 *kPa*) mogą pracować w ciśnieniu atmosferycznym. Wszystkie chłodnicze technologie adsorpcyjne mierzą się z podobnymi wyzwaniami dotyczącymi intensyfikacji procesów adsorpcji, która zależy od szeregu zagadnień

związanych m.in. z wymianą ciepłą i masy, konstrukcją adsorberów, sposobem dostarczenia ciepła do adsorbentu.

- Rozwiązaniem stosunkowo nowym, ale zyskującym w ostatnich latach na znaczeniu, są tzw. adsorpcyjne chłodziarki fluidalne. Rolę adsorbera, w którym albo osuszane jest powietrze wilgotne albo regenerowany sorbent, pełni złożo fluidalne. Powietrze przepływające przez złożo nie tylko dostarcza lub odprowadza ciepło, ale także wprawia ziarna adsorbentu w chaotyczny ruch, znacząco intensyfikujący wymianę ciepła i masy oraz pozwalający ograniczyć straty ciśnienia na złożu w stosunku do złożów stałych. Adsorpcyjne chłodziarki stanowią interesującą alternatywę dla lepiej poznanych technologii adsorpcyjnych. Brakuje jednak wiedzy zarówno teoretycznej jak i eksperymentalnej. Celem niniejszej pracy jest uzupełnienie ww. braków i przedstawienie metod intensyfikacji procesów adsorpcji w odniesieniu do samego złoża adsorpcyjnego oraz całego urządzenia chłodniczego.

Rozdział 2

Badania eksperymentalne

2.1 Wstęp

Niniejszy rozdział przedstawia przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej badania eksperymentalne zjawiska adsorpcji fizycznej pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji. Zasadniczym celem badań było zgromadzenie wyników badań umożliwiających walidację opracowanego modelu fizycznego zjawiska (Rozdział 3.). Ponadto, przeprowadzone badania znacząco poszerzyły dostępne dotychczas dane eksperymentalne z zakresu badanego zjawiska. Prezentowane zagadnienie było przedmiotem publikacji naukowej pt. "Modelling and experimental analyzes on air-fluidised silica gel-water adsorption and desorption" opublikowanej w czasopiśmie Applied Thermal Engineering wydawnictwa Elsevier [88].

2.2 Przegląd literatury

Specyfika zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji tj. duża zmienność kinetyki procesów w czasie, bezwładność układu pomiarowego, niemożność wykonania bezpośrednich pomiarów niektórych parametrów układu (np. temperatura i stopień zaadsorbowania ziaren adsorbentu) oraz czasochłonność, czyni jego badanie skomplikowanym. Niewiele prac eksperymentalnych dotyczących zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji zostało dotychczas przeprowadzonych i opublikowanych w literaturze naukowej [45, 85, 21]. Wynika to prawdopodobnie z ww. specyfiki oraz stosunkowa nowość tego zagadnienia. Najobszerniejsze badania eksperymentalne adsorpcji pary wodnej na ziarnach silikażelu podczas fluidyzacji przeprowadził [45]. Zakres przeprowadzonych badań jest podany w Tabeli 2.1.

Badania zostały wykonane dla temperatur desorpcji 98 i 129°C, a więc znacznie wyższych niż analizowane w niniejszej pracy, która skupia się na temperaturach desorpcji około 65°C. Autorzy [45], stosowali próbkowanie pomiarów co 15-30 s co, biorąc pod uwagę kinetykę procesów adsorpcji, może prowadzić do niesystematycznych błędów pomiarowych. Ponadto, autorzy wprowadzili współczynniki korygujące pomiar wilgotności powietrza, ze względu na zbyt długi w stosunku do tempa zmian wartości mierzonej czas odpowiedzi czujnika wilgotności powietrza. Badania zostały

Tabela 2.1: Zakres badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji w [45].

Adsorbent	Silikażel
Średnica ziaren	3 mm
Zakres temperatur adsorpcji	25,2 - 31,4°C
Zakres temperatur desorpcji	98,4 i 128,8 °C
Zakres wilgotności powietrza adsorpcja	13 - 20,6 gkg ⁻¹
Zakres wilgotności powietrza desorpcja	12,4 - 14,2 gkg ⁻¹
Prędkość powietrza	1,41-2,02 m s ⁻¹

przeprowadzone dla prędkości powietrza w zakresie 1,4 – 2 m s⁻¹ i ziaren silikażelu o średnicy 3 mm. Dane eksperymentalne zostały również opublikowane przez [85]. Autorzy przeprowadzili badania w zakresie temperatur adsorpcji 30 – 40,5°C. Zakres badań jest przedstawiony w Tabeli 2.2. Przeprowadzone badania dotyczyły jedynie adsorpcji, a ze względu na niekompletność informacji o eksperymencie możliwość dalszego wykorzystania danych jest ograniczona. W pracy [21] zaprezentowano

Tabela 2.2: Zakres badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji w [85].

Adsorbent	Silikażel
Średnica ziaren	b.d.
Zakres temperatur adsorpcji	30 - 40,5°C
Zakres wilgotności powietrza adsorpcja	12 - 14,1 gkg ⁻¹
Prędkość powietrza	1,25-1,52 m s ⁻¹

wyniki badań eksperymentalnych wykonanych dla silikażelu o średnicach ziaren 3 i 5 mm. Badania analizują wpływ rozmiaru ziarna, wysokości do jakiej zasypane jest złożo i prędkości powietrza w złożo na charakterystykę adsorpcji i desorpcji przebiegających przy temperaturach odpowiednio 30 i 40°C. Tabela 2.3 przedstawia zakres przeprowadzonych badań.

Tabela 2.3: Zakres badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji w [21].

Adsorbent	Silikażel
Średnica ziaren	3 i 5 mm
Zakres temperatur adsorpcji	25 i 30°C
Zakres temperatur desorpcji	40°C
Zakres wilgotności powietrza	14 - 16 gkg ⁻¹
Prędkość powietrza	2-3 m s ⁻¹
Wysokość zasypiania złoża	5 - 15 cm

Dostępność danych eksperymentalnych nt. zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji jest w literaturze naukowej niewielka. Dostępne dane dotyczą głównie ziaren sorbentu powyżej 3 mm. Część dostępnych danych jest niekompletna i dlatego nie jest możliwe ich wykorzystanie, np. do weryfikacji modelu fizycznego. Ponadto badania eksperymentalne były prowadzone dla temperatur desorpcji poza zasadniczym obszarem zainteresowań niniejszej pracy tj. około 65°C. Co więcej, badania były prowadzone głównie dla wilgotności powietrza z zakresu 12 - 20 gkg⁻¹. Zdaniem autora istnieje potrzeba poszerzenia bazy danych eksperymentalnych zjawiska adsorpcji fizycznej pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji. Dotyczy to szczególnie następujących zakresów parametrów procesu, powietrza i adsorbentu:

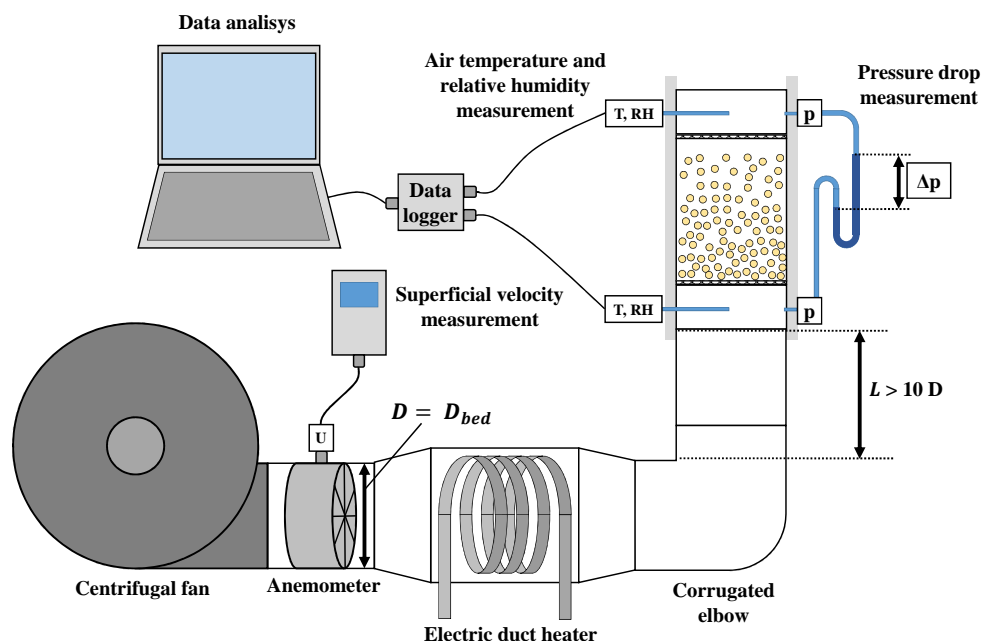
- Temperatury adsorpcji w zakresie 20 - 30°C,
- Temperatury desorpcji w zakresie 50 - 70°C,
- Średnice ziaren sorbentu w zakresie 0,5 - 3 mm,
- Prędkość powietrza w złożu w zakresie 2 - 6 m s⁻¹,
- Wysokość zasypania złoża fluidalnego w zakresie 2 - 10 cm.

W ramach pracy doktorskiej zaprojektowano oraz zbudowano stanowisko badawcze do badania ww. zjawiska, a następnie przeprowadzono najobszerniejsze dotąd badania eksperymentalne zjawiska adsorpcji fizycznej pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji. Efekty prowadzonych prac są prezentowane w tym rozdziale.

2.3 Stanowisko badawcze

Schemat zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska badawczego jest przedstawiony na Rysunku 2.1, a zdjęcie zbudowanego stanowiska przedstawia Rysunek 2.2. Zasadniczym celem stanowiska był pomiar ciągły temperatury i stopnia zawilżenia powietrza na wylocie ze złoża fluidalnego wypełnionego silikażelem. Wymagało to zapewnienia strumienia powietrza o stałych parametrach na wlocie do złoża fluidalnego oraz układ pomiarowy zdolny zarejestrować szybkie zmiany parametrów powietrza.

Wentylator promieniowy (1) sterowany za pomocą zewnętrznego regulatora PWM pozwalał na precyzyjną regulację strumienia objętości powietrza. Strumień objętości powietrza był mierzony metodą pośrednią zaraz za wentylatorem za pomocą anemometru skrzydełkowego (2). Średnica kanału, w którym mierzono prędkość była równa średnicy złoża fluidalnego. Następnie nagrzewnica z ceramicznymi elementami grzejnymi (3) podgrzewała powietrze do zadanej temperatury. Moc nagrzewnicy powietrza była regulowana za pomocą autotransformatora. Układ przygotowania powietrza był połączony ze złożem fluidalnym za pomocą elastycznej rury typu spiro (4). Złoże fluidalne (7) było opomiarowane: na wlocie i wylocie były umieszczone czujniki temperatury i wilgotności względnej powietrza (6) oraz różnicowy pomiar ciśnienia (5). Parametry powietrza, dynamicznie zmieniające się

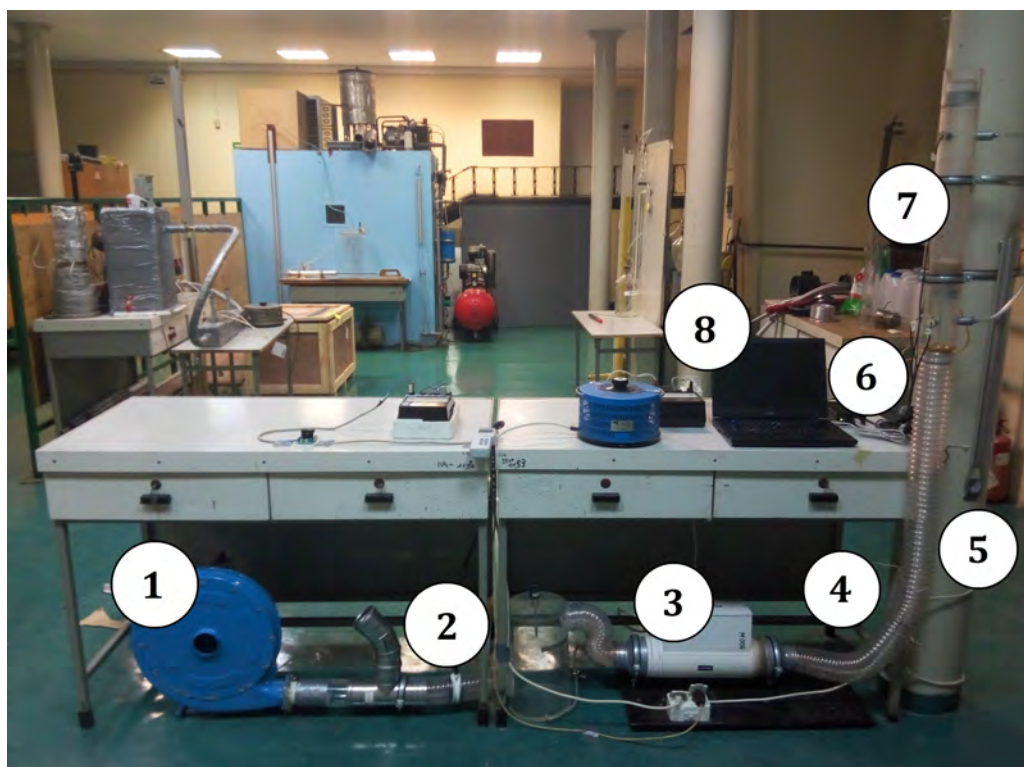


Rysunek 2.1: Schemat stanowiska badawczego: 1 - Wentylator odśrodkowy, 2 - Pomiar prędkości przepływu, 3 - Nagrzewnica powietrza, 4 - Rura elastyczna typu spiro, 5 - pomiar spadku ciśnienia, 6 - Pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza, 7 - Adsorpcyjne złożo fluidalne, 8 - Komputer.

podczas pomiarów, były rejestrowane za pomocą dedykowanego oprogramowania i zapisywane w pamięci komputera (8). Specyfikacja elementów układu jest zamieszczona w Tabeli 2.4 z wyłączeniem elementów pomiarowych (specyfikowanych osobno).

2.4 Aparatura pomiarowa

Zasadniczym celem pomiarów było precyzyjne zmierzenie zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie ze złoża fluidalnej. Ponadto mierzono również prędkość powietrza i spadek ciśnienia na złożu. Tabela 1.5 zawiera podstawowe dane techniczne wykorzystanych w tym celu czujników i urządzeń pomiarowych. Temperatura i wilgotność powietrza były mierzone za pomocą rejestratora EK-H4 [98] firmy Sensirion z czujnikami cienkowarstwowymi typu SHT31 [99],



Rysunek 2.2: Zdjęcie stanowiska badawczego: 1 - Wentylator odśrodkowy, 2 - Anemometr skrzydełkowy, 3 - Nagrzewnica powietrza, 4 - Rura elastyczna typu spiro, 5 - U-rurka, 6 - Rejestrator pomiarów temperatury i wilgotności powietrza, 7 - Adsorpcyjne złożo fluidalne, 8 - Komputer.

przedstawionymi na Rysunku 2.3. Szczególnie istotnym, z punktu widzenia przeprowadzanych pomiarów, jest krótki czas odpowiedzi czujnika wynoszący około 8 s. Według wiedzy autora jest to jeden z komercyjnych czujników o najkrótszym czasie odpowiedzi. Pomairy temperatury i wilgotności względnej powietrza były asekurowane: na wlocie i wylocie złoża fluidalnego były umieszczone po dwa czujniki. Sygnał z czujników był przetwarzany w dedykowanym rejestratorze EK-H4 i zapisywany w pamięci komputera w plikach o formacie .csv.

Prędkość powietrza przepływającego przez złożo była mierzona za pomocą anemometru skrzydełkowego CHY 361 firmy Elmer [35] który jest przedstawiony na Rysunku 2.4. Ze względu na ograniczone zakresy temperatury i wilgotności użytkowania anemometru pomiar był wykonywany bezpośrednio za wentylatorem przed podgrzaniem powietrza. Odczyt anemometru był kompensowany ze względu na późniejszą zmianę temperatury na nagrzewnicy powietrza.

Różnicowy pomiar ciśnienia, który miał charakter kontrolny, był realizowany za pomocą U-rurki wypełnionej wodą, mierzącej ciśnienie przed i za złożem fluidalnym. Błąd pomiarowy wyniósł 2 *mms.w.* (słupa wody).

Tabela 2.4: Specyfikacja elementów stanowiska pomiarowego.

Wentylator promieniowy (1) Producent/ Model Moc znamionowa Regulacja	zewnętrzny regulator PWM
Anemometr skrzydełkowy (2) Producent/ Model	Elmer/ CHY 361
Nagrzewnica powietrza (3) Producent/ Model Moc znamionowa Regulacja	autotransformator
Złoże fluidalne (7) Wysokość złoża Średnica złoża	0,7 m 0,08 m

Tabela 2.5: Podstawowe dane techniczne wykorzystanych czujników i urządzeń pomiarowych z odwołaniami do pełnej specyfikacji producenta.

Mierzona wielkość	Nazwa urządzenia	Błąd pomiarowy	Zakres pomiarowy	Czas odpowiedzi
Temperatura	SHT31 [99]/ EK-H4 [98]	0.3 °C	-40 - 90 °C	> 2 s
Wilgotność względna	SHT31/ EK-H4	2%RH	0 – 100%RH	8 s
Różnica ciśnień	U-rurka	2 mm.Aq	0 – 500 mm.Aq	-
Prędkość powietrza	Anemometr skrzydełkowy CHY 361[35]	3 %	0 - 60 °C < 75%RH 0 -30 ms ⁻¹	1 s

2.5 Procedura pomiarowa

Przed wykonaniem pomiarów silikażel był suszony w piecu w temperaturze 150°C przez około 6h. Tak osuszony silikażel był uznany za całkowicie pozbawiony wilgoci. Silikażel był hermetycznie przechowywany. Odmierzona masa silikażelu była następnie umieszczona w złożu. Pomiarzy rozpoczynały się od wstępnej desorpcji silikażelu. Następnie przeprowadzana była seria pomiarów dla adsorpcji (trwająca 30 - 45 minut), a po nich seria pomiarów dla desorpcji. Pomiędzy każdą serią pomiarową następował okres przygotowania trwający, ze względu na bezwładność nagrzewnicy powietrza, około 5 minut. Przykładowa procedura pomiarowa z zaznaczonymi poszczególnymi seriami pomiarowymi i okresami przygotowania jest przedstawiona na Rys. 2.3.

W czasie okresu przygotowania złożo było tymczasowo odcinane od reszty układu. W tym czasie temperatura powietrza zmienia się do wymaganego poziomu. W celu zachowania stałego wydatku wentylatora, mimo odłączonego złoża, stosowany jest regulowany tłumik. Tłumik symuluje opory



Rysunek 2.3: Czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza SHT31 [99].

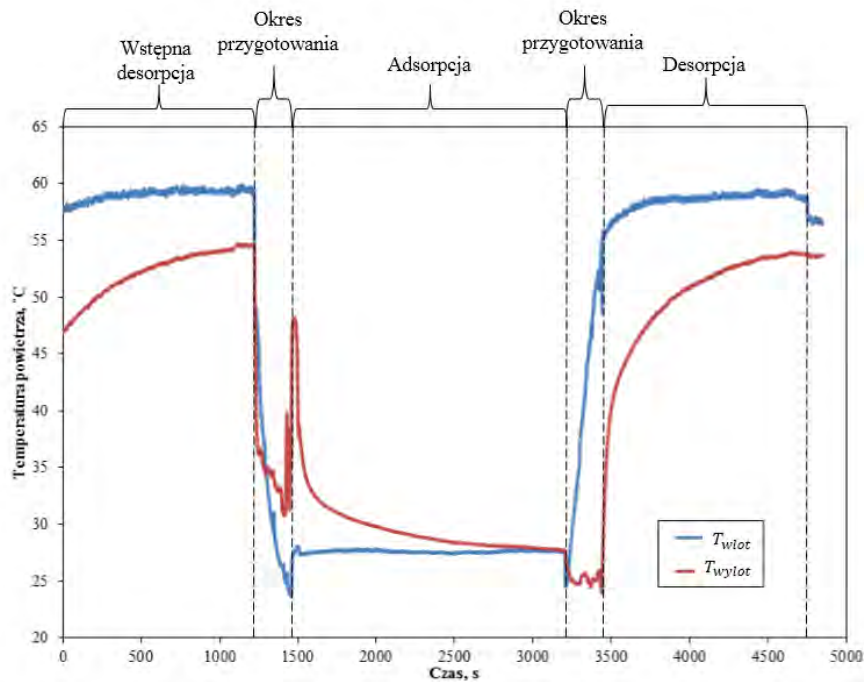


Rysunek 2.4: Anemometr skrzydełkowy CHY361 - zdjęcie producenta [35].

przepływu złoża. Po osiągnięciu wymaganej temperatury powietrza, złożo jest na powrót podłączane do układu przygotowania powietrza i rozpoczyna się seria pomiarowa. Pełna seria pomiarowa, obejmująca wstępną desorpcję, okres przygotowania przed adsorpcją, serię pomiarów adsorpcji, okres przygotowania przed adsorpcją oraz desorpcję, trwała od 1 do około 2 *h*.

2.6 Przetwarzanie danych pomiarowych

Dane pomiarowe parametrów powietrza na wlocie i wylocie ze złoża fluidalnego były rejestrowane i zapisywane w pamięci komputera jako pliki w formacie .csv. Opracowano skrypt w języku PYTHON przetwarzający dane pomiarowe (temperatury T_p i wilgotności względne RH w czasie z 4 czujników) na dane docelowe (temperaturę T_p i stopień zawilżenia powietrza X_p na wlocie i wylocie ze złoża fluidalnego). Opracowany skrypt stanowi Załącznik 2.1 do niniejszej pracy. Stopień



Rysunek 2.5: Przykładowa procedura pomiarowa.

zawilżenia powietrza X_p był obliczany na podstawie następującej zależności:

$$X_p = \frac{0,62198 p_n(T_p) * RH}{101325 - p_n(T_p) RH} \quad (2.1)$$

Gdzie $p_n(T_p)$ to ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze T_p wyrażone jako:

$$p_n(T_p) = A_1 * T_p^6 + A_2 * T_p^5 + A_3 * T_p^4 + A_4 * T_p^3 + A_5 * T_p^2 + A_6 * T_p + A_7 \quad (2.2)$$

Wartości współczynników $A_1 - A_7$ zostały wyznaczone na podstawie danych z programu RefProp [62] i są podane w Tabeli 2.3.

Skrypt umożliwia również uwzględnienie awarii jednego z czujników. Dane wyjściowe były zapisywane w plikach o formacie .csv oraz .xlsx. Ze względu na pomiar prędkości przepływu powietrze w temperaturze innej niż docelowa został wprowadzony współczynnik korekcyjny K_1 :

$$k_1 = \frac{\rho_p(T_0)}{\rho_p(T_{p,in})} \quad (2.3)$$

gdzie ρ_p to gęstość powietrza suchego wyrażona jako:

$$\rho_p(T) = B_1 T^3 + B_2 T^2 - B_3 T + B_4 \quad (2.4)$$

Wartości współczynników $B_1 - B_4$ zostały wyznaczone na podstawie danych z programu RefProp [62] i są podane w Tabeli 2.4.

Tabela 2.6: Wartości współczynników $A_1 - A_7$ z Równania 2.2 wyznaczone na podstawie danych z programu RefProp [62]

A_1	$-1,82379755742 * 10^{-9}$
A_2	$3,30502126111298 * 10^{-6}$
A_3	$2,16948165506992 * 10^{-4}$
A_4	$2,97520618785683 * 10^{-2}$
A_5	1,36324553614494
A_6	45,1229458855536
A_7	608,355698050183

Tabela 2.7: Wartości współczynników $B_1 - B_4$ z Równania 2.4 wyznaczone na podstawie danych z programu RefProp [62]

B_1	$-3,553041729430 * 10^{-8}$
B_2	$1,582113768577470 * 10^{-5}$
B_3	$-4,6560800653538 * 10^{-3}$
B_4	1,27559806043939

2.7 Błędy pomiarowe

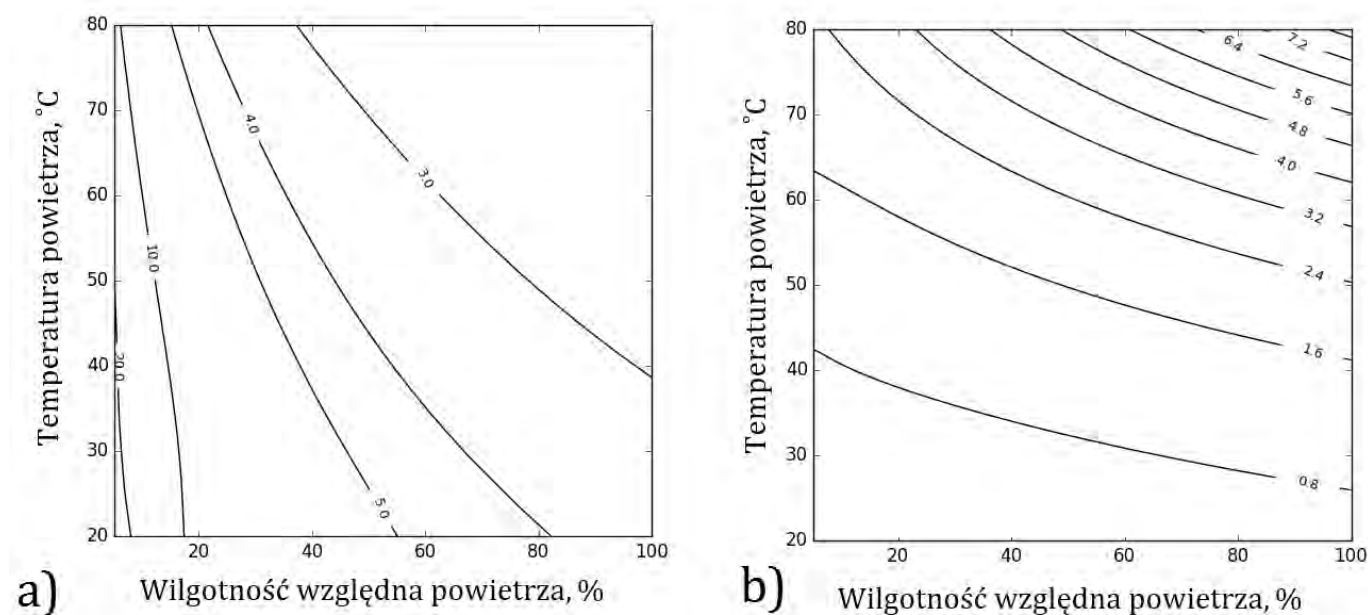
Założono, że błąd pomiarowy w przypadku pomiarów bezpośrednich (pomiar temperatury powietrza, prędkości powietrza w kanale) jest równy błędowi pomiarowemu urządzenia pomiarowego. W przypadku pomiarów pośrednich (pomiar stopnia zawilżenia powietrza) błędy zostały oszacowane metoda różniczkową:

$$\Delta X_{p, \text{zooony}} = \frac{dX(T_p, RH)}{dT_p} * \Delta T_p + \frac{dX(T_p, RH)}{dRH} * \Delta RH \quad (2.5)$$

Wartości względne i bezwzględne złożonego błędu pomiarowego stopnia zawilżania powietrza obliczonego powyższą metodą są przedstawione na Rysunku 2.5. Obliczono błędy w zakresie temperatur powietrza od 20 do 80 °C oraz wilgotności względnej powietrza od 0 do 100%. W analizowanym zakresie błąd względny mieści się w zakresie od 3 do 20%, a błąd bezwzględny w zakresie od 0,8 do 7,2 gkg⁻¹. Skrypt obliczeniowy złożonych błędów pomiarowych stopnia zawilżenia powietrza, napisany w języku PYTHON, stanowi Załącznik 2.2 do niniejszej pracy.

2.8 Zakres badań

Badania eksperymentalne były prowadzone w okresie listopad - grudzień 2016 roku. W sumie przeprowadzono około 50 serii pomiarowych. Przedbadano 5 próbek silikażelu, które są opisane w



Rysunek 2.6: Błędy pomiarowe wilgotności bezwzględnej powietrza: a) Błąd względny, b) Błąd bezwzględny.

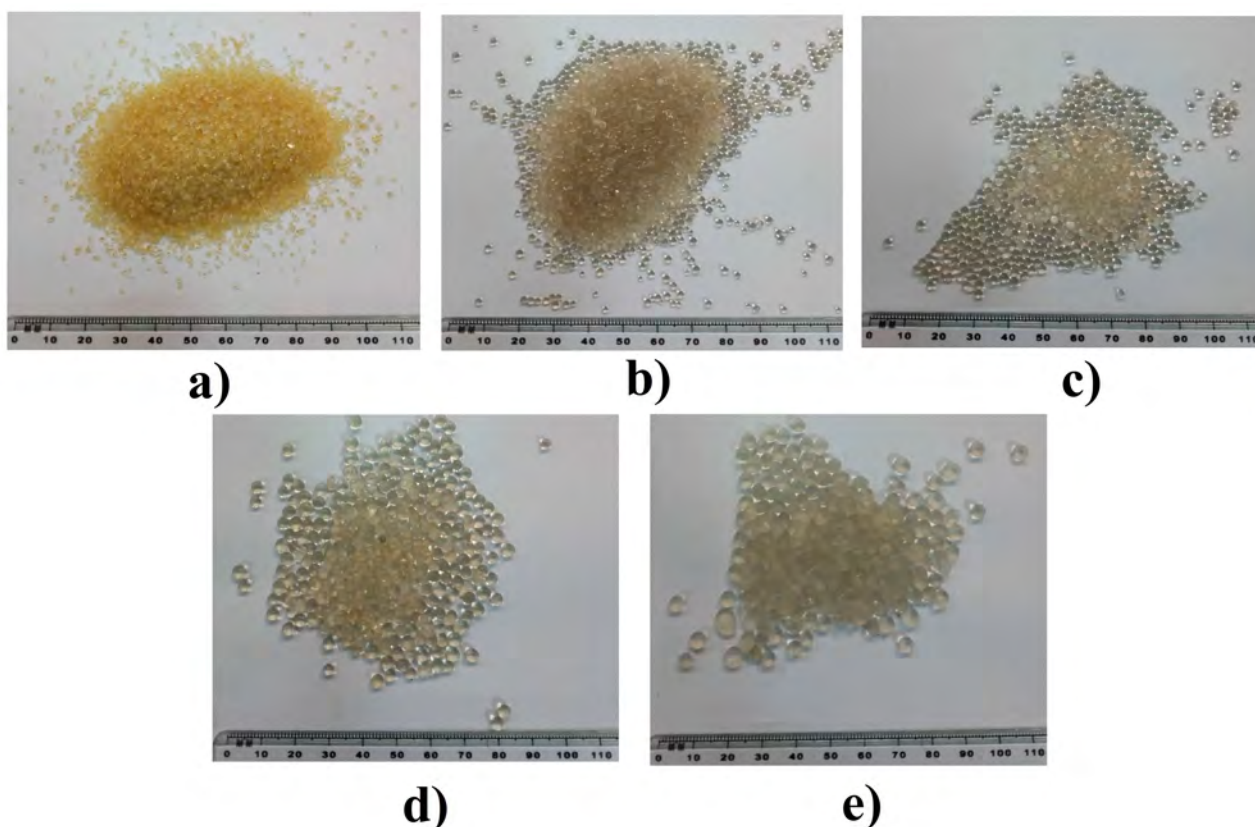
Tabela 2.8: Informacje nt. próbek silikażelu wykorzystanych podczas badań

Nr próbki	Typ silikażelu	Fracja	Gęstość nasypowa	Producent
1	RD	1 - 2 mm	933 kgm^{-3}	Sigma Aldrich
2	A	2 - 3 mm	816 kgm^{-3}	BASF
3	A	3 - 4 mm	745 kgm^{-3}	BASF
4	A	4 - 5 mm	816 kgm^{-3}	BASF
5	RD	0,6 - 1 mm	727 kgm^{-3}	Sigma Aldrich

Tabeli 1.6 oraz przedstawione na Rysunku 2.7. Próbki pochodziły od dwóch producentów: BASF i Sigma Aldrich. Silikażel został przesiany za pomocą sit wibracyjnych na odpowiednie frakcje. Gęstość nasypowa silikażelu została oszacowana metodą nasypową.

Tabele 1.7 i 1.8 zawierają informacje nt. przeprowadzonych serii pomiarowych odpowiednio dla adsorpcji i desorpcji.

Każda próbka silikażelu została przebadana podczas co najmniej 3 serii pomiarowych. Masa konkretnych próbek silikażelu w złożu fluidalnym nie była zmieniana w trakcie pomiarów i wynosiła w granicach 149 - 327 g. Temperatura adsorpcji wahała się głównie w granicach 20 - 30 °C, a temperatura desorpcji głównie w granicach 60 - 70 °C. Stopień zawilżenia pomiarów nie podlegał regulacji (zależał od aktualnego stopnia zawilżenia powietrza w hali pomiarowej) i wynosił w granicach 4 - 9



Rysunek 2.7: Przebadane próbki silikażelu: a) Frakcja 0,6 - 1 mm, b) Frakcja 1 - 2 mm, c) Frakcja 2 - 3 mm, d) Frakcja 3 - 4 mm, e) Frakcja 4 - 5 mm

gkg^{-1} . Nastawy prędkości powietrza w złożu fluidalnym mieściły się w zakresie 2 - 6,2 ms^{-1} . Przeprowadzone pomiary nie miały na celu oceny wpływu poszczególnych parametrów na intensywność adsorpcji. Pomiary miały przede wszystkim stanowić bazę umożliwiającą walidację zaproponowanego modelu fizycznego w możliwie szerokim spektrum nastaw parametrów.

2.9 Wyniki i Dyskusja

Uzyskane w toku badań wyniki są przedstawione na Rysunkach 2.8 - 2.35. (dla adsorpcji Rysunki 2.8 - 2.23, dla desorpcji 2.24 - 2.35). Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych wskazują na pewną prawidłowość procesów adsorpcji w złożu fluidalnym, która zostanie omówiona na przykładzie adsorpcji. Po rozpoczęciu ochładzania silikażelu w złożu, w pierwszej kolejności jest obserwowany gwałtowny spadek temperatury powietrza połączony z równie gwałtownym spadkiem wilgot-

Tabela 2.9: Informacje nt. serii pomiarowych dla adsorpcji

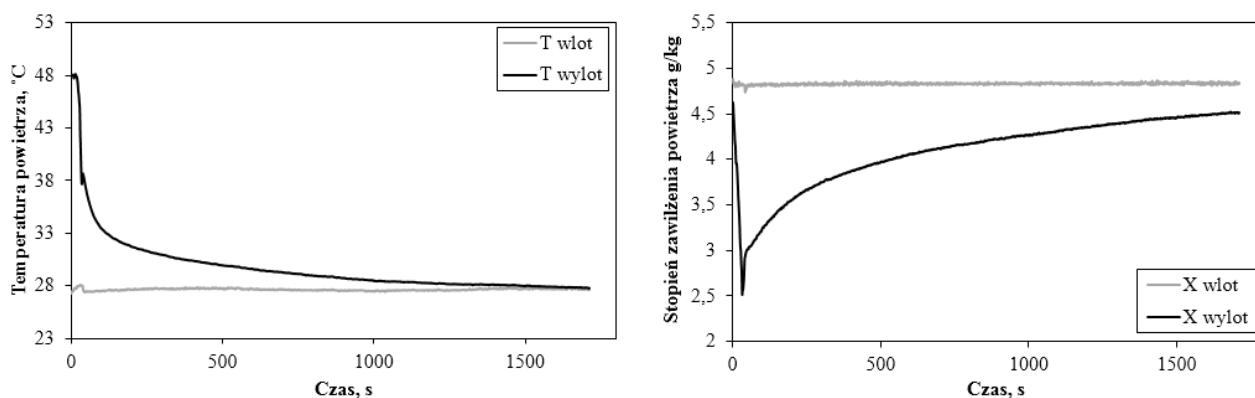
Nr serii	Nr próbki	Masa sorbentu w złożu <i>kg</i>	Temperatura początkowa <i>°C</i>	Temperatura powietrza <i>°C</i>	Wilgotność powietrza <i>kgkg⁻¹</i>	Prędkość powietrza <i>ms⁻¹</i>
1	2	0.2	62	27	0.0055	3.5
2	2	0.2	64	27	0.0055	4.3
3	2	0.2	60	27	0.0048	2.4
4	2	0.2	40	16	0.0041	3.2
5	2	0.2	52	20	0.0055	3.2
6	3	0.224	54	23	0.0059	3.85
7	3	0.224	65	19	0.0059	3.1
8	3	0.224	58	22	0.0068	4.2
9	3	0.224	56	20	0.0065	4.0
10	3	0.224	65	30	0.0069	5.4
11	4	0.286	63	26	0.0081	5.6
12	4	0.286	66	29	0.0071	4.8
13	4	0.286	55	25	0.007	5.8
14	4	0.286	66	38	0.0057	4.7
15	4	0.286	40	17	0.0045	4.8
16	1	0.149	41	17	0.0042	4.6
17	1	0.149	65	28	0.0062	3.7
18	1	0.149	72	36	0.006	2.5
19	5	0.327	65	30	0.0055	2.5
20	5	0.327	65	28	0.0048	2.8
21	5	0.327	50	26	0.006	3.0
22	5	0.327	50	25	0.0058	1.9

ności bezwzględnej powietrza na wylocie ze złoża. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że większość odbieranego ciepła to ciepło jawne silikażelu, a nie ciepło adsorpcji pary wodnej. Opisany etap trwa około 30 - 50 s i kończy się w momencie gdy zostają osiągnięte minimalna wilgotność bezwzględna powietrza. Po wstępnym, relatywnie szybkim, ochłodzeniu silikażelu rozpoczyna się proces adsorpcji. Zmiany temperatury powietrza na wylocie ze złoża fluidalnego tracą na intensywności. W miarę spadku potencjału silikażelu do dalszej adsorpcji, temperatura powietrza na wylocie zbliża się do wartości temperatury powietrza na wlocie do złoża. Opisana prawidłowość ma charakter uniwersalny - występuje niezależnie od parametrów konkretnego eksperymentu. Parametry konkretnej serii pomiarowej mają wpływ na długość etapu wstępnego ochładzania, minimalna wilgotność bezwzględna powietrza na wylocie ze złoża i czas trwania całego procesu. Analogiczne procesy są obserwowane podczas desorpcji: początkowy gwałtowny wzrost temperatury i stopnia zawilżenia powietrza aż do rozpoczęcia desorpcji, którą charakteryzują powolne zmiany temperatury powietrza na wylocie ze złoża. Na

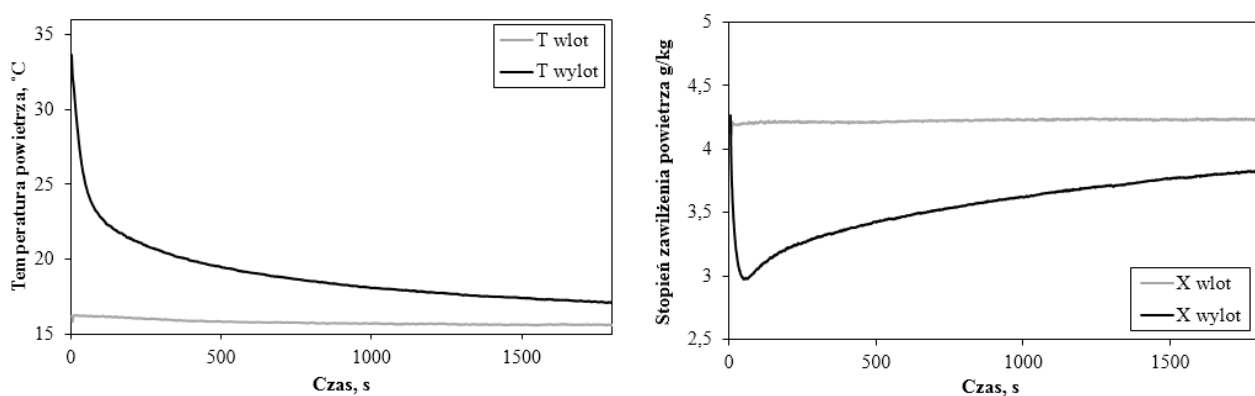
Tabela 2.10: Informacje nt. serii pomiarowych dla desorpcji

Nr serii	Nr próbki	Masa sorbentu w złożu <i>kg</i>	Temperatura początkowa <i>°C</i>	Temperatura powietrza <i>°C</i>	Wilgotność powietrza <i>kgkg⁻¹</i>	Prędkość powietrza <i>ms⁻¹</i>
23	2	0,2	27	62	0,0055	4,2
24	2	0,2	27	64	0,0055	4,3
25	2	0,2	27	60	0,0048	2,3
26	2	0,2	16	40	0,0041	4,0
27	2	0,2	20	52	0,0055	3,2
28	3	0,224	23	54	0,0059	3,5
29	3	0,224	19	65	0,0059	2,8
30	3	0,224	22	58	0,0068	4,7
31	3	0,224	20	56	0,0065	4,2
32	3	0,224	30	65	0,0069	4,2
33	4	0,286	26	63	0,093	5,0
34	4	0,286	29	66	0,0071	4,5
35	4	0,286	25	55	0,007	6,2
36	4	0,286	38	66	0,0057	4,4
37	4	0,286	17	40	0,0045	4,5
38	1	0,149	17	41	0,0042	4,5
39	1	0,149	28	65	0,0062	3,5
40	1	0,149	36	72	0,006	2,3
41	5	0,327	30	65	0,0055	3,0
42	5	0,327	28	65	0,0048	3,0
43	5	0,327	26	50	0,006	3,0
44	5	0,327	25	50	0,0058	1,7

podstawie przeprowadzonych pomiarów zostały sformułowane ogólne wnioski i hipotezy dotyczące procesów adsorpcji pary wodnej na silikażelu podczas fluidyzacji. Rysunek 2.36 przedstawia porównanie sumarycznych zmian stopnia zaadsorbowania silikażelu w czasie pierwszych 500s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek. Zmiana stopnia zaadsorbowania w trakcie pierwszych 500s w przypadku desorpcji w sposób znaczący zmienia się w zależności od badanej próbki. Dla próbek 1-4 im mniejsza jest średnica ziarna sorbentu tym większa zmiana stopnia zaadsorbowania. Taka zależność jest zgodna z zależnością kinetyki adsorpcji (dyfuzja powierzchniowa i dyfuzja wewnątrz ziarna sorbentu) od średnicy ziarna [88]. W przypadku adsorpcji nie występuje wyraźna zależność tempa adsorpcji od średnicy ziarna. Przyczyną takiego stanu rzeczy mogą być różne mechanizmy wymiany masy dominujące podczas adsorpcji i desorpcji. Ponadto na uwagę zasługuje znacząca różnica zmiany stopnia zaadsorbowania między adsorpcją i desorpcją w przypadku próbek 1 i 2. W najlepszym przypadku desorpcja jest prawie 3-krotnie szybsza niż adsorpcja. Dla większych średnic ziaren silika-

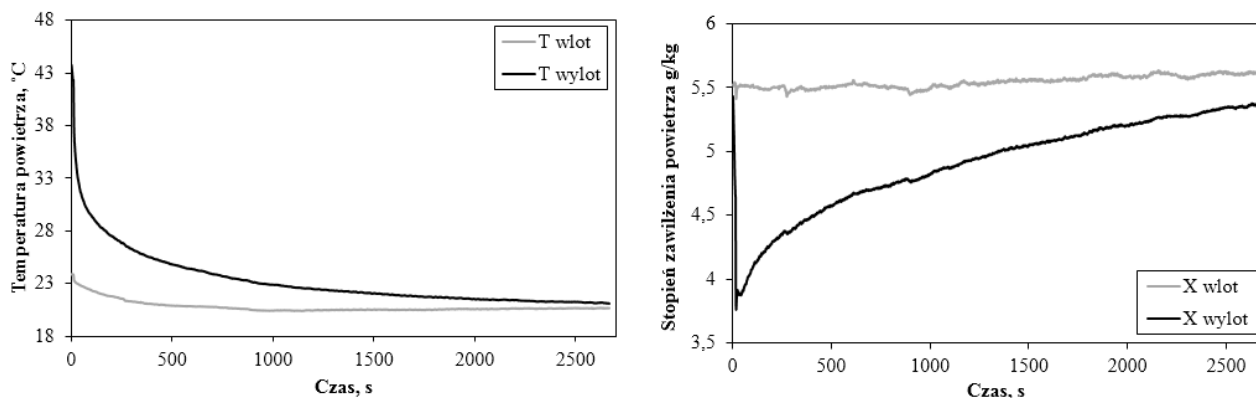


Rysunek 2.8: Seria pomiarowa nr 3.

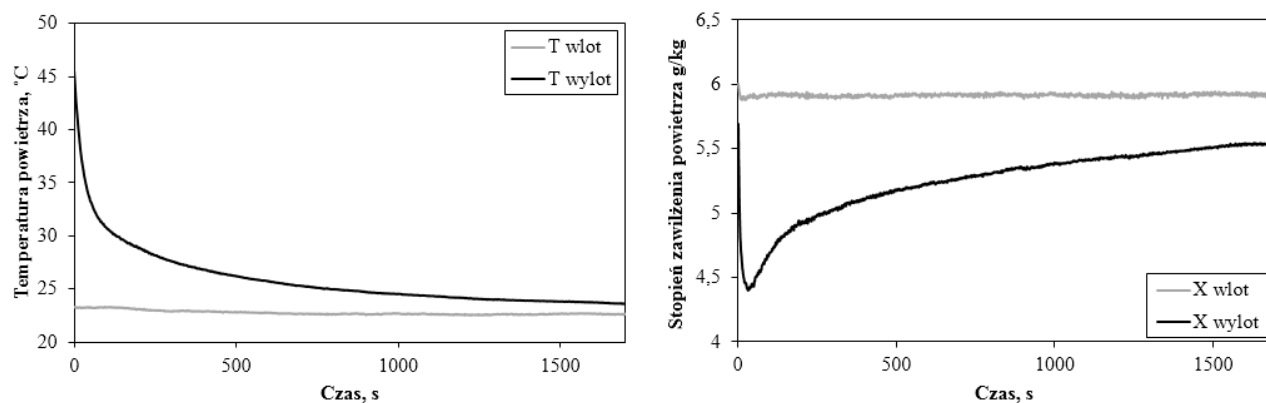


Rysunek 2.9: Seria pomiarowa nr 4.

żelu różnice w tempie adsorpcji i desorpcji stają się mniejsze (próbka nr 3 i 4). W przypadku próbki 5 kinetyka procesów adsorpcji i desorpcji była podobna. Mimo małej średnicy ziaren (0,6 - 1mm) desorpcja przebiegała najwolniej z analizowanych przypadków. Rysunek 2.37 przedstawia porównanie sumarycznych zmianę zaadsorbowania w okresie 500-1000 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikazelu. W przypadku desorpcji utrzymuje się tendencja opisana powyżej - zmiana stopnia zaadsorbowania jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości ziarna (dla próbek 1-4). Niemniej jednak desorpcja istotnie zwolniła w porównaniu do pierwszego okresu 500s. W okresie 500-1000s zmiana stopnia zaadsorbowania wynosiła w granicach 31-58% wartości stopnia zaadsorbowania w okresie 0 - 500s, co jest przedstawione na Rys. 2.38 Z drugiej strony, w przypadku adsorpcji, w okresie 500-1000s zmiana stopnia zaadsorbowania stanowiła między 41-74%. W przypadku próbki nr 5 zmiana stopnia zaadsorbowania dla adsorpcji i desorpcji w okresie 500-1000s jest zbliżone do tego z okresu 0-500s.



Rysunek 2.10: Seria pomiarowa nr 5.

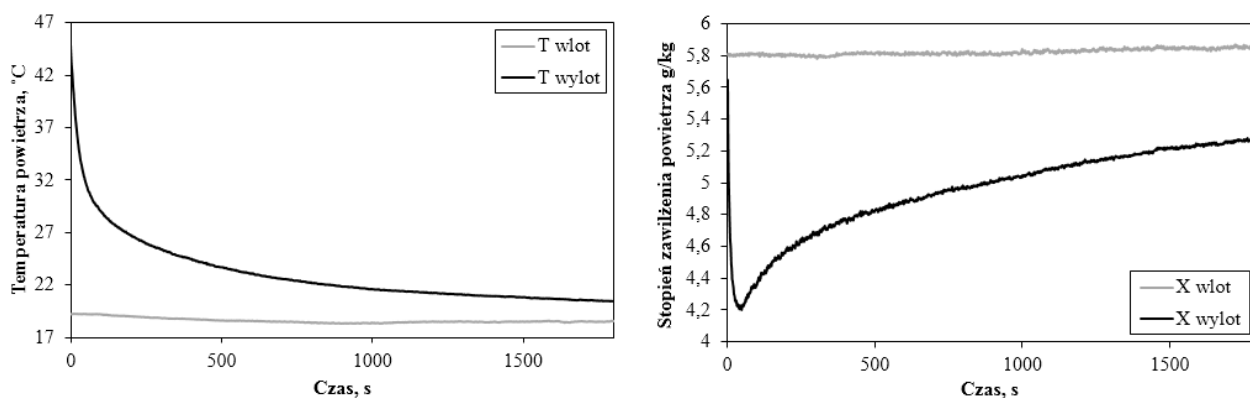


Rysunek 2.11: Seria pomiarowa nr 6.

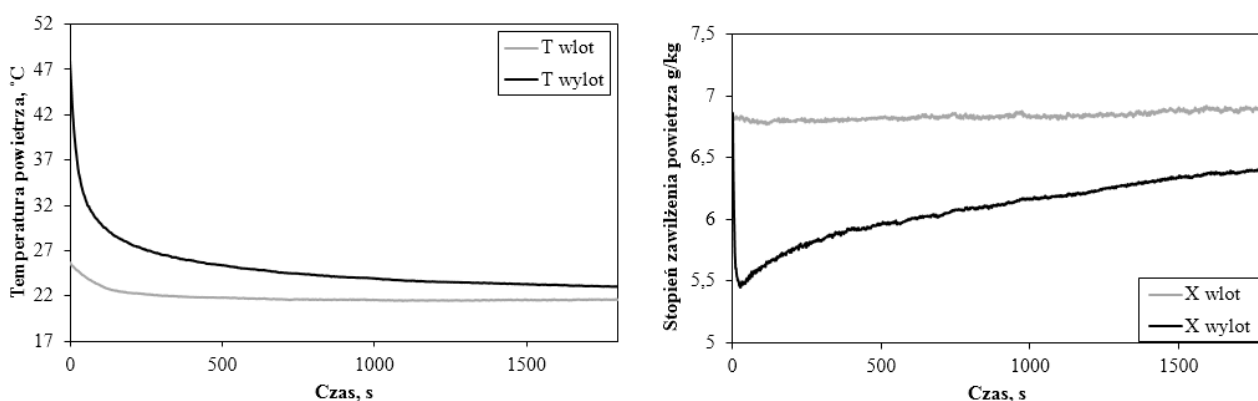
Wnioski

W niniejszym rozdziale zaprezentowano prace związane z badaniami eksperymentalnymi zjawiska adsorpcji fizycznej pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji, które obejmowały zaprojektowanie oraz budowę stanowiska, zaplanowanie oraz przeprowadzenie eksperymentu oraz przetwarzanie danych pomiarowych i analizę wyników. Na podstawie przeprowadzonych prac zostały sformułowane następujące wnioski:

1. Przeprowadzone badania nie miały na celu oceny wpływu parametrów powietrza sorbentu i procesu na zjawisko adsorpcji. Dane eksperymentalne stanowią przede wszystkim podstawę do przeprowadzenia rzetelnej walidacji modelu fizycznego zjawiska. Ponadto przeprowadzone badania w znacznym stopniu ubogacają dostępne dane eksperymentalne nt. badanego zjawiska.
2. W większości analizowanych próbek zmiana stopnia zaadsorbowania silikażelu podczas desorpcji jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy ziarna silikażelu, co jest zbieżne z zależno-



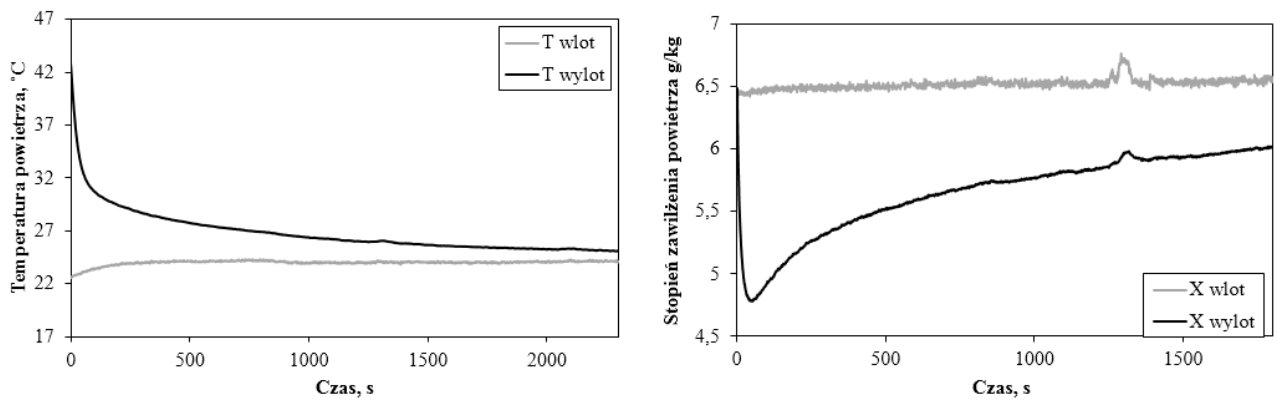
Rysunek 2.12: Seria pomiarowa nr 7.



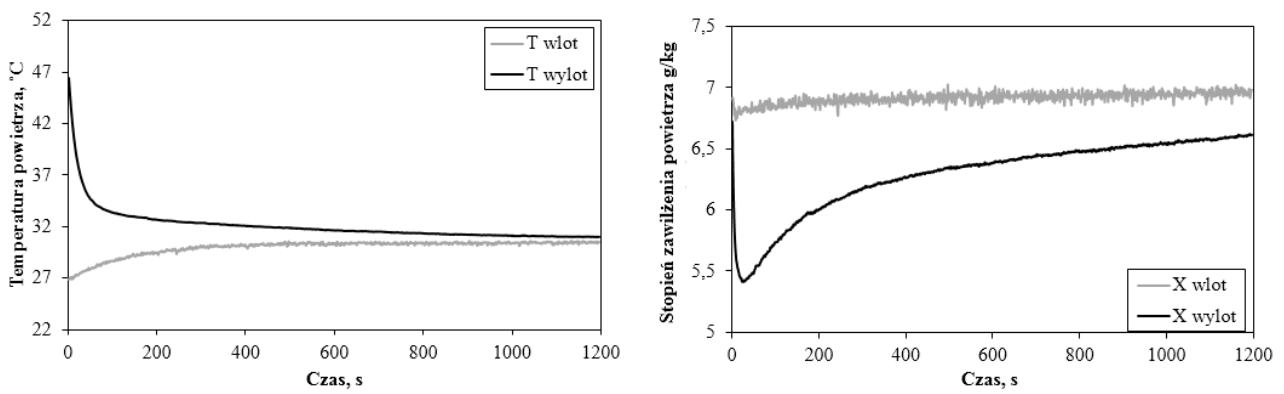
Rysunek 2.13: Seria pomiarowa nr 8.

ścią kinetyki adsorpcji (która zależy od dyfuzji w ziarnie) od średnicy ziarna. Może to wskazywać, że dominującym mechanizmem wymiany masy podczas desorpcji jest właśnie dyfuzja w ziarnie sorbentu.

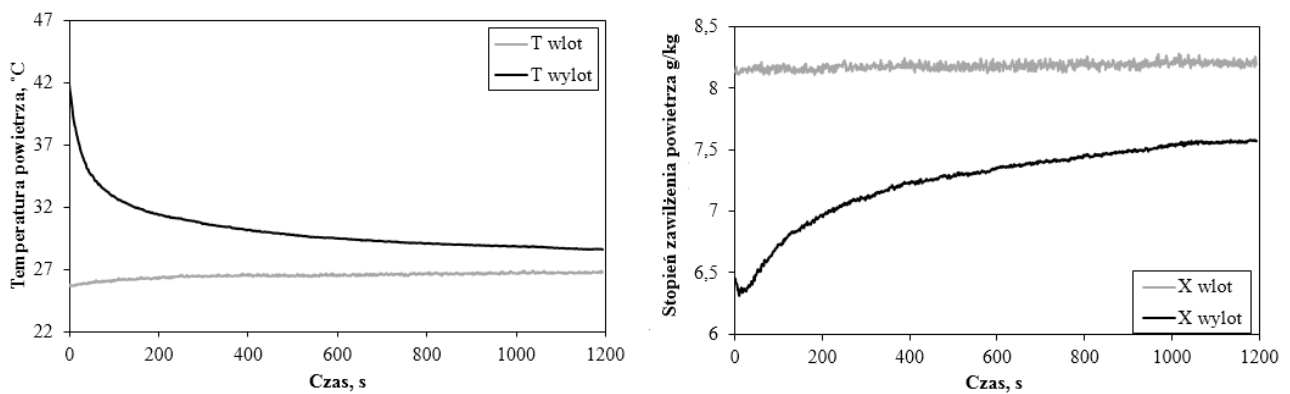
- Zmiana stopnia zaadsorbowania silikażelu podczas desorpcji nie wykazuje widocznej zależności od średnicy ziarna. Może to wynikać z faktu, że podczas adsorpcji dominuje mechanizm wymiany masy nie zależący w sposób znaczny od średnicy ziarna np. konwekcja pary wodnej między powietrzem a powierzchnią ziarna.
- Obserwacje wskazują na znaczące różnice kinetyki procesów desorpcji i adsorpcji podczas fluidyzacji dla ziaren o średnicach 1-3mm. Dla większych ziaren dysproporcje ulegają zmniejszeniu, a dla frakcji ziaren 3-4mm kinetyka obu procesów jest bardzo zbliżona.
- Wyniki eksperymentalne uzyskane dla próbki silikażelu nr 5 (frakcja 0,6 - 1mm) znacząco odbiegają od pozostałych. Wbrew oczekiwaniom, kinetyka desorpcji jest znacząco ograniczona i porównywalna z kinetyką desorpcji. Nie są znane przyczyny takiego stanu rzeczy.



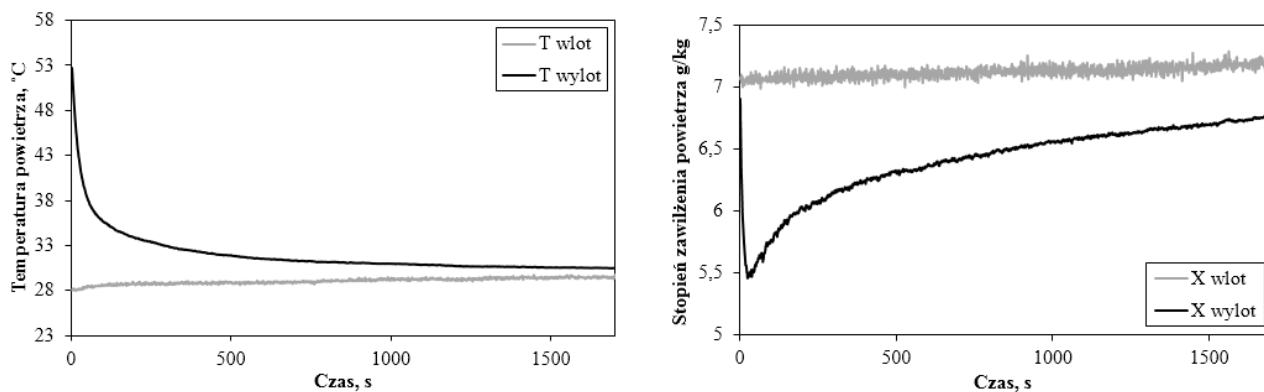
Rysunek 2.14: Seria pomiarowa nr 9.



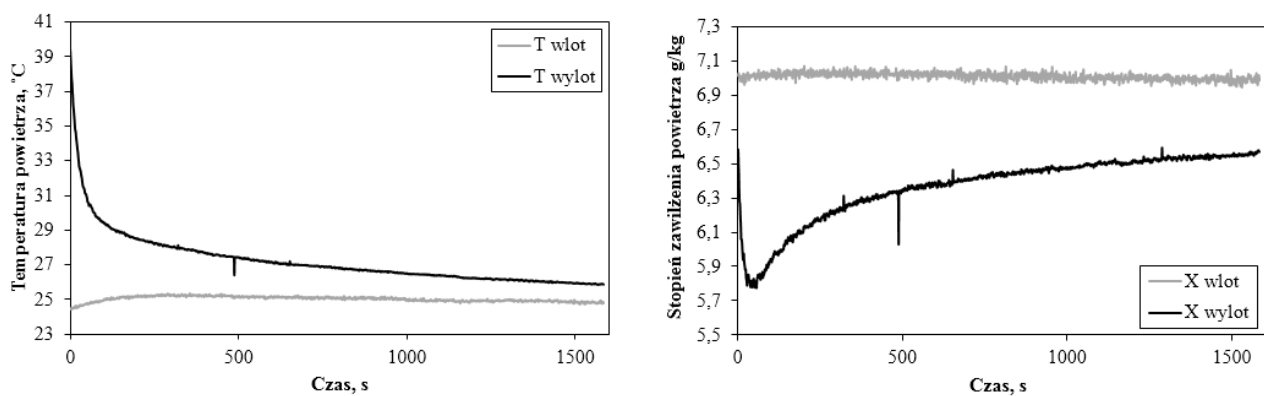
Rysunek 2.15: Seria pomiarowa nr 10.



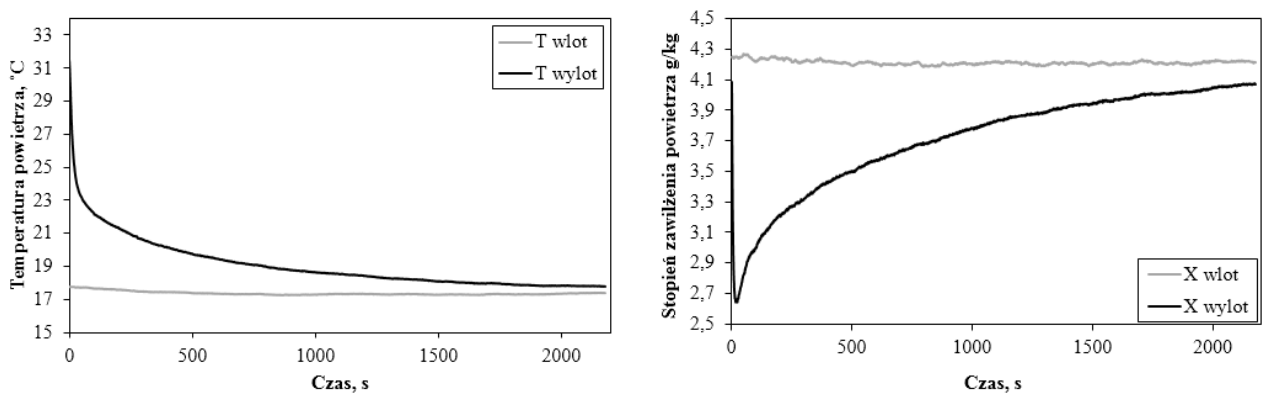
Rysunek 2.16: Seria pomiarowa nr 11.



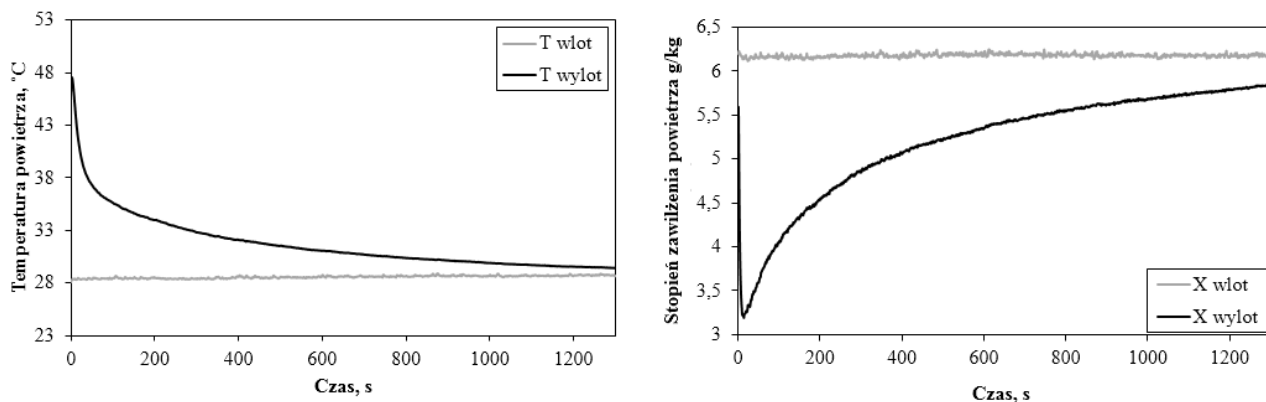
Rysunek 2.17: Seria pomiarowa nr 12.



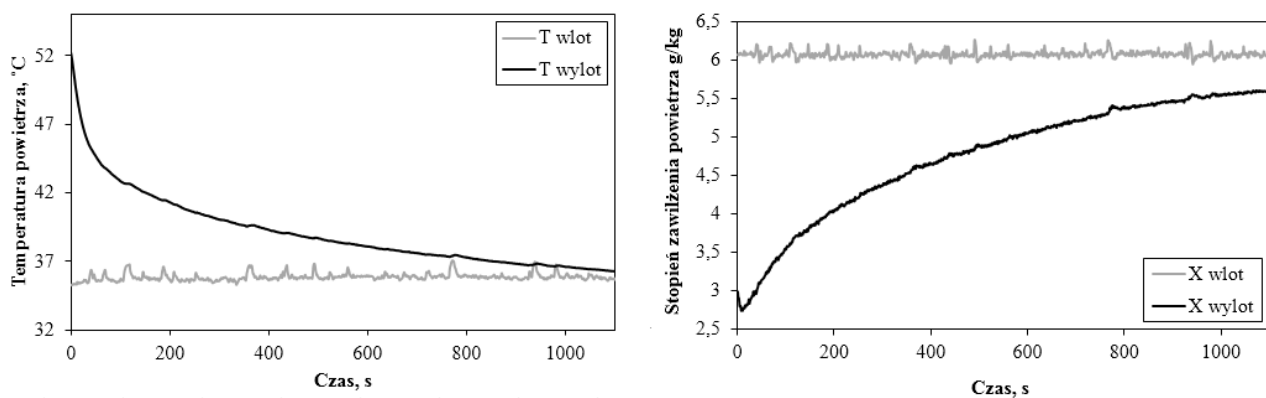
Rysunek 2.18: Seria pomiarowa nr 13.



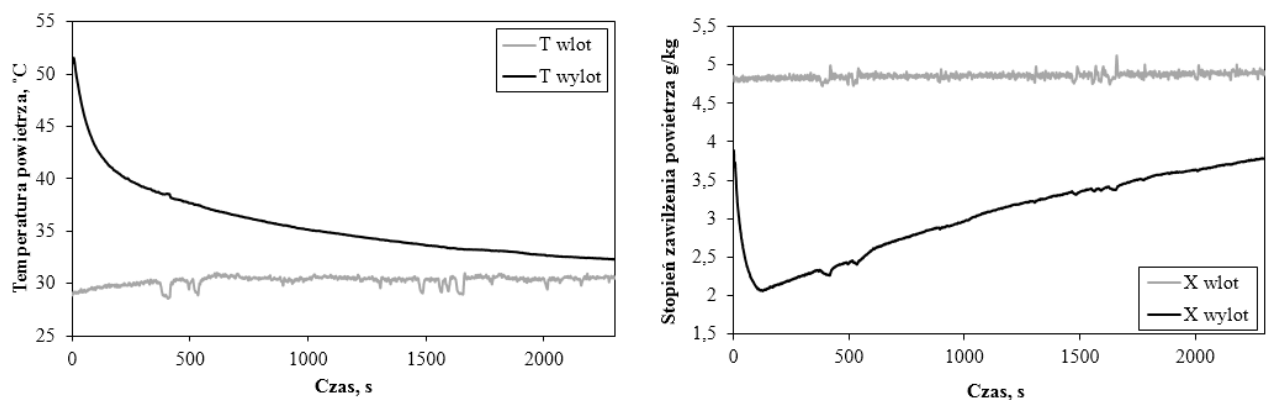
Rysunek 2.19: Seria pomiarowa nr 16.



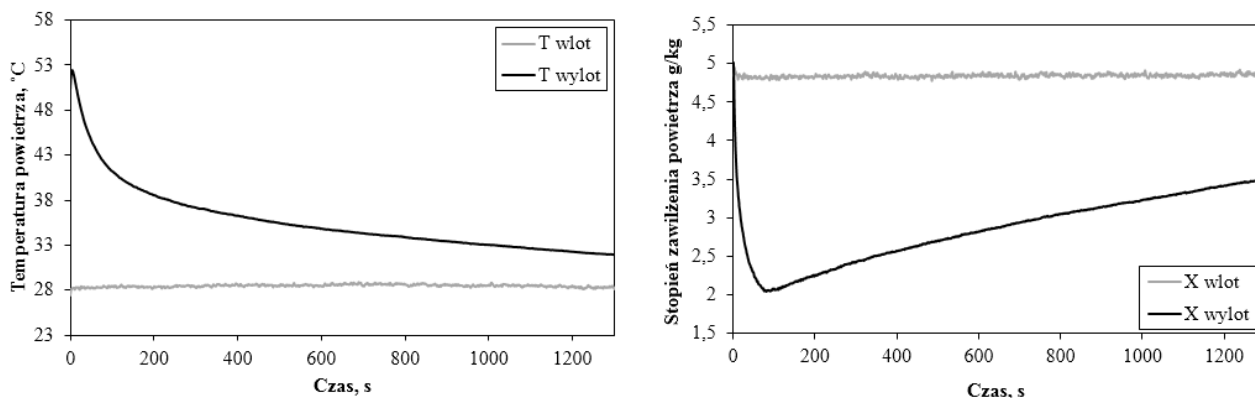
Rysunek 2.20: Seria pomiarowa nr 17.



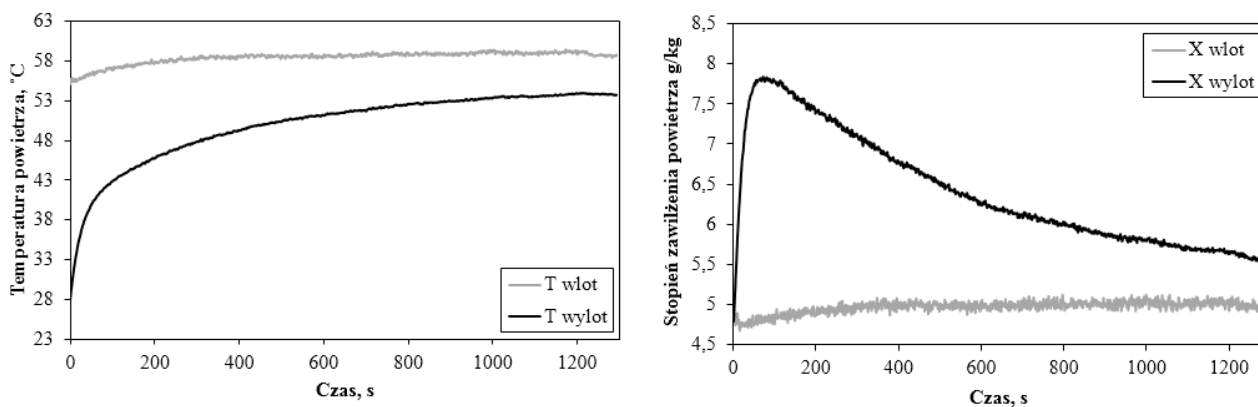
Rysunek 2.21: Seria pomiarowa nr 18.



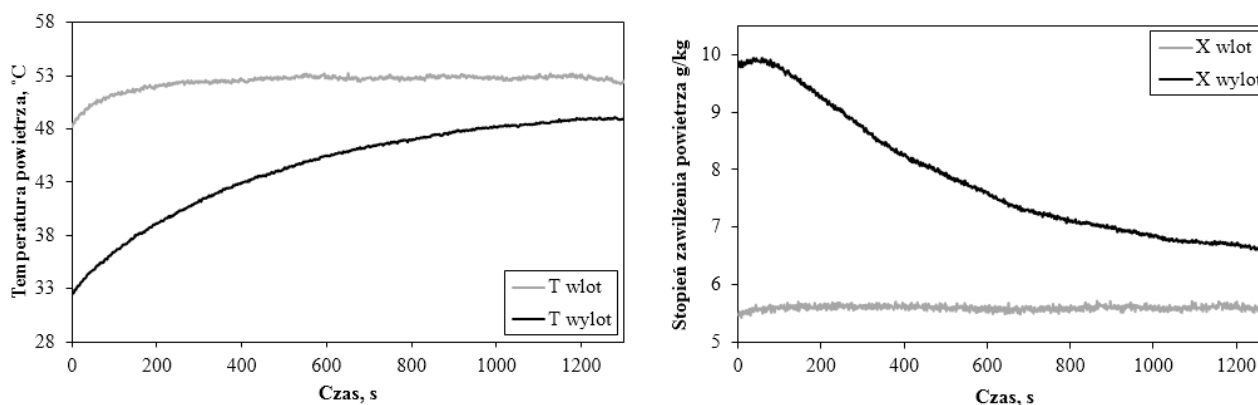
Rysunek 2.22: Seria pomiarowa nr 19.



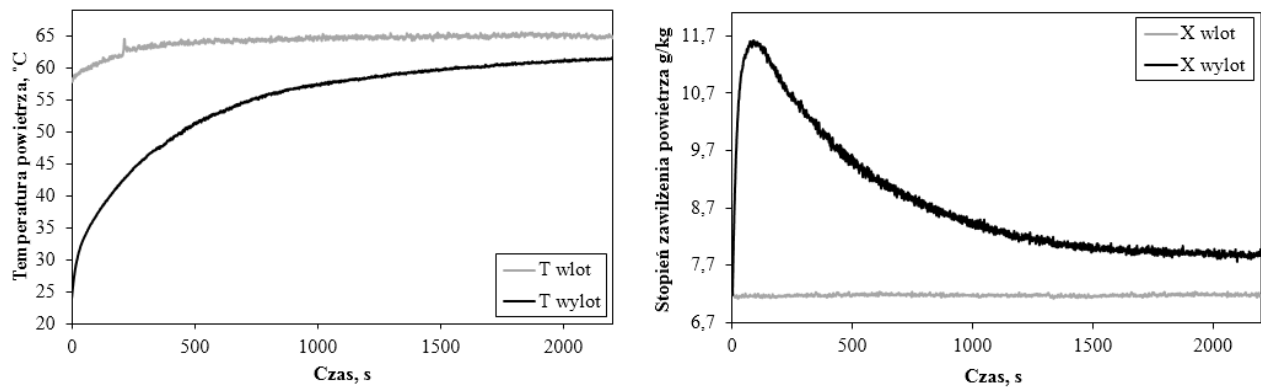
Rysunek 2.23: Seria pomiarowa nr 20.



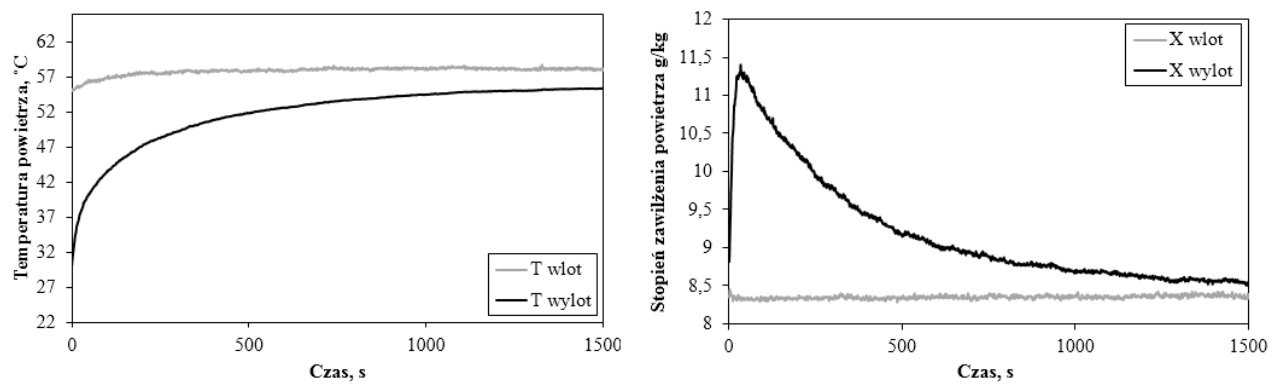
Rysunek 2.24: Seria pomiarowa nr 26.



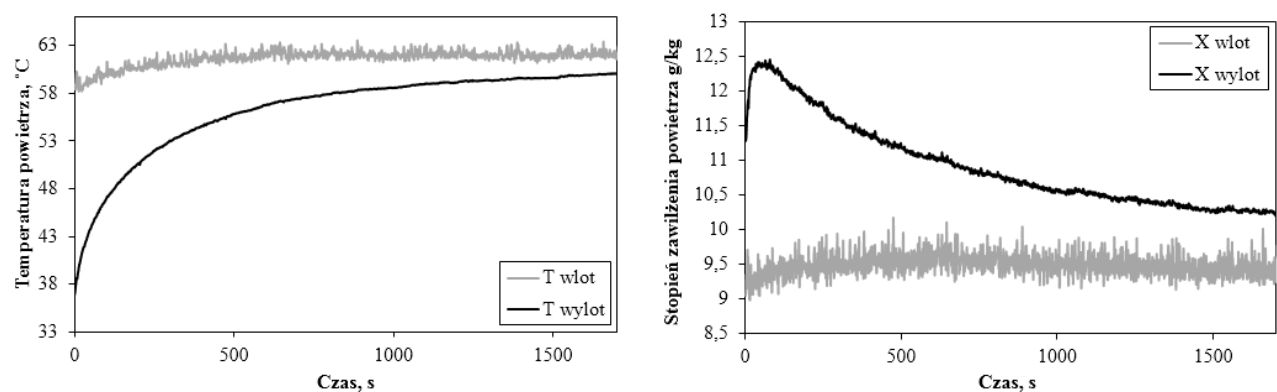
Rysunek 2.25: Seria pomiarowa nr 27.



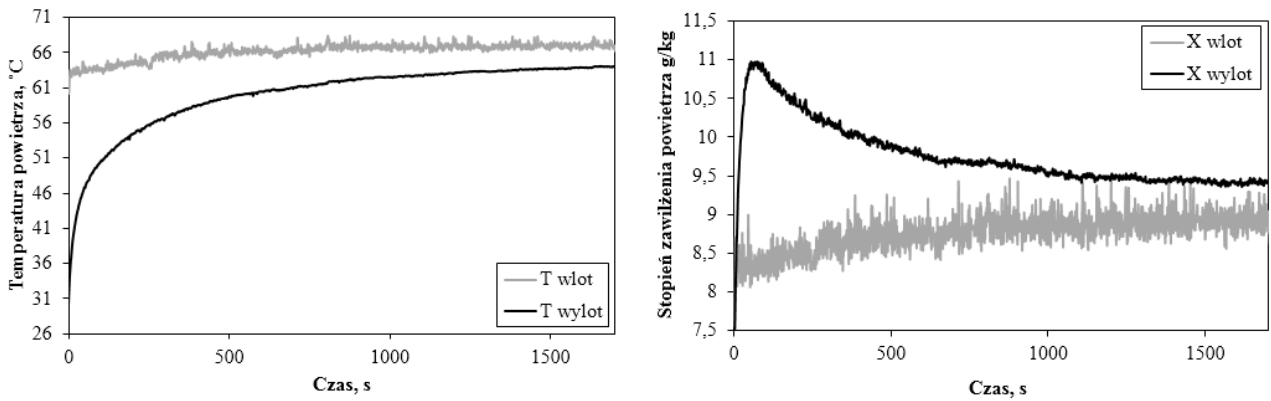
Rysunek 2.26: Seria pomiarowa nr 29.



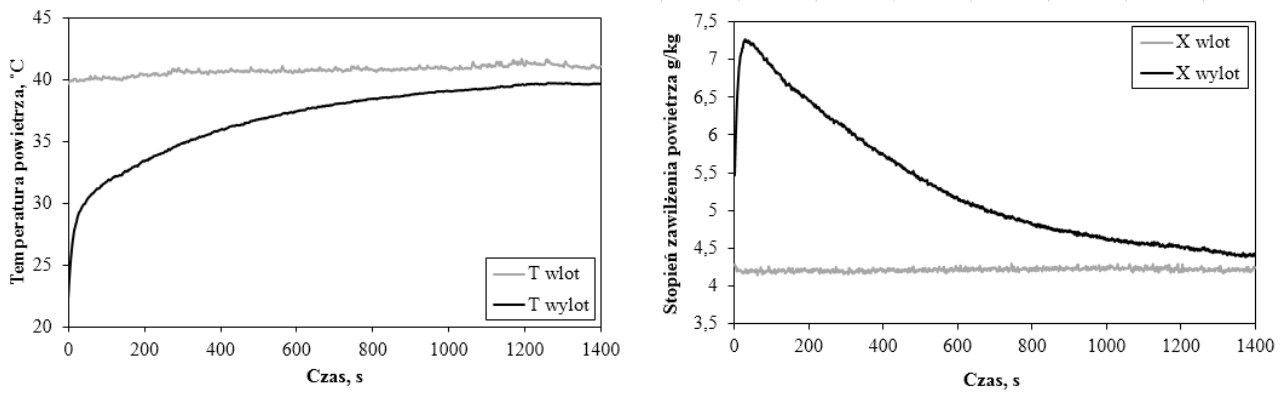
Rysunek 2.27: Seria pomiarowa nr 30.



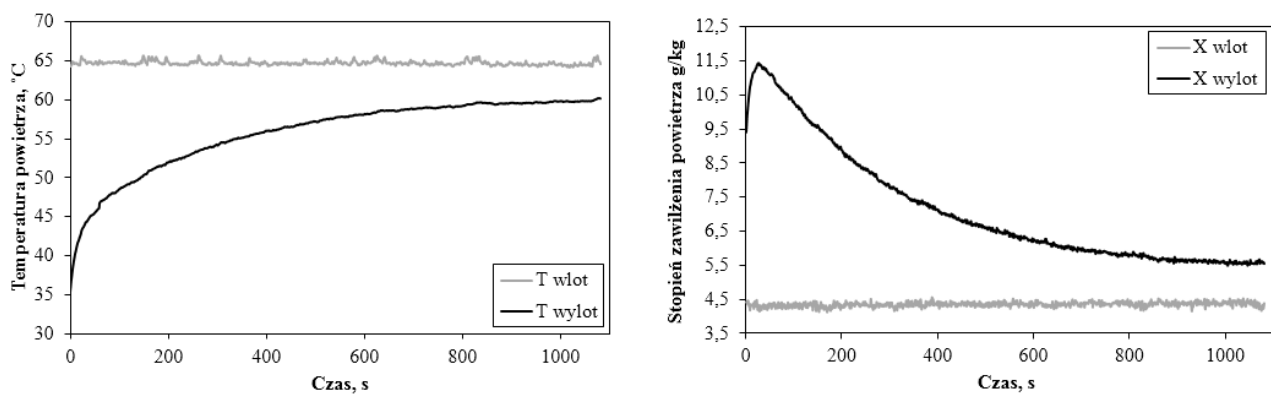
Rysunek 2.28: Seria pomiarowa nr 33.



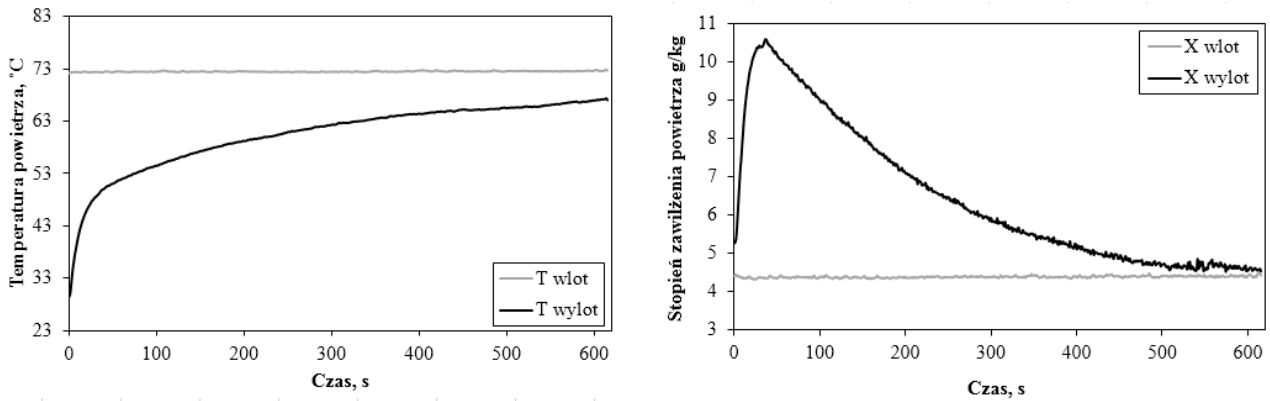
Rysunek 2.29: Seria pomiarowa nr 34.



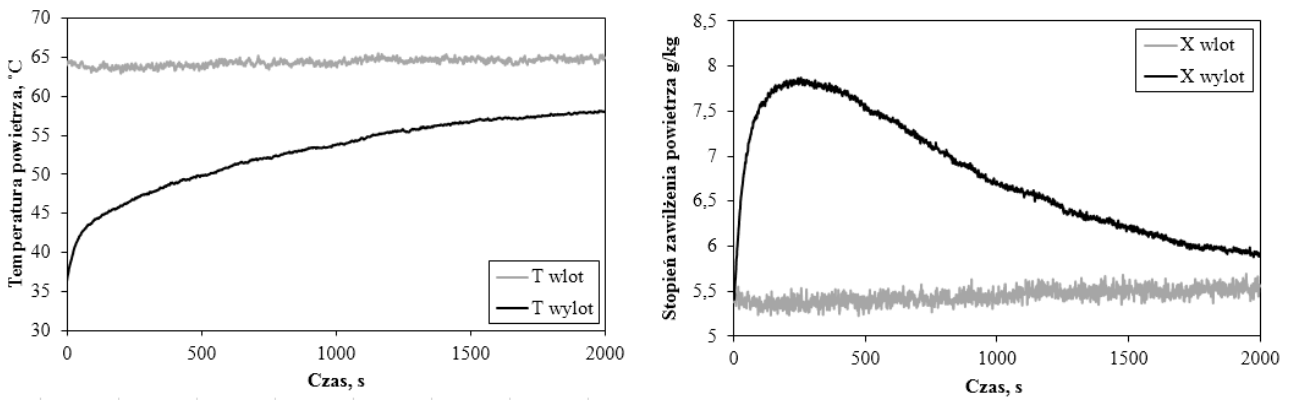
Rysunek 2.30: Seria pomiarowa nr 38.



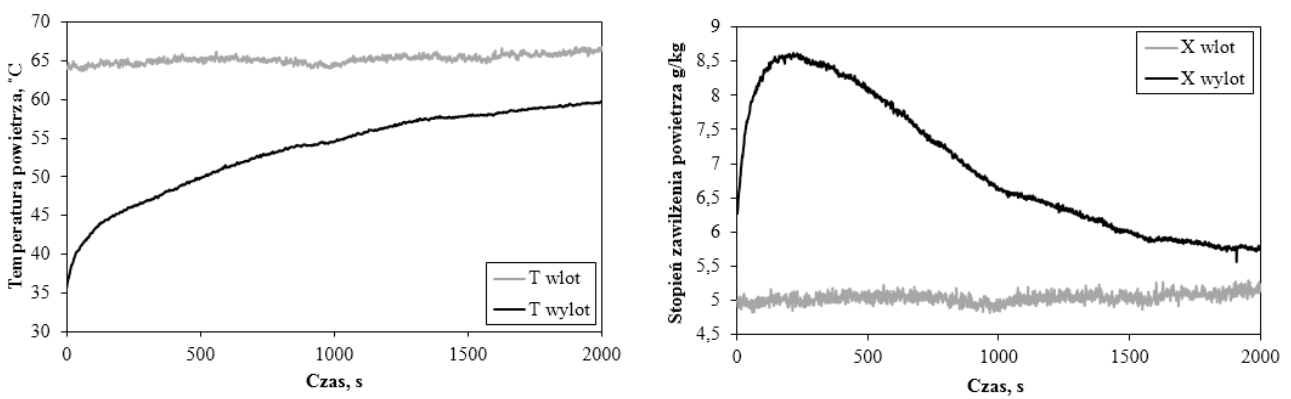
Rysunek 2.31: Seria pomiarowa nr 39.



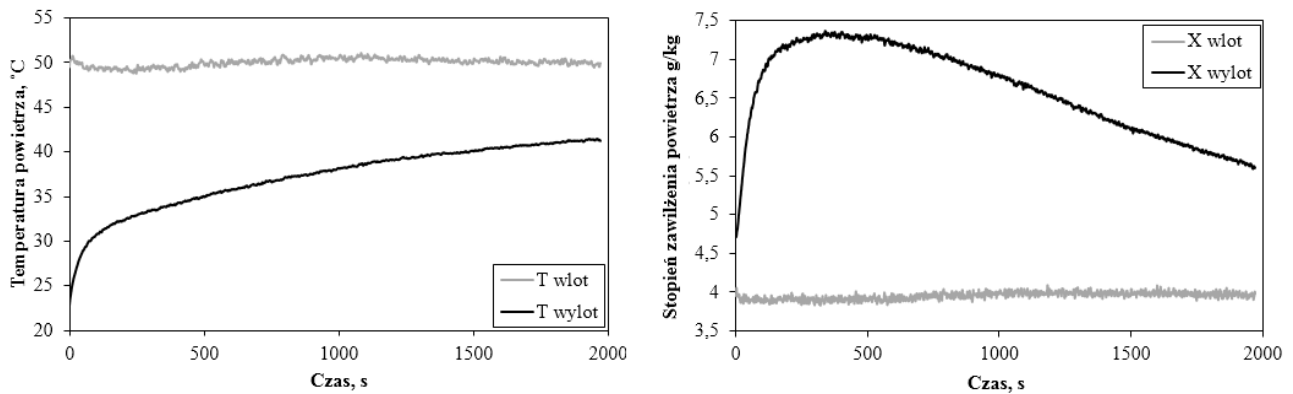
Rysunek 2.32: Seria pomiarowa nr 40.



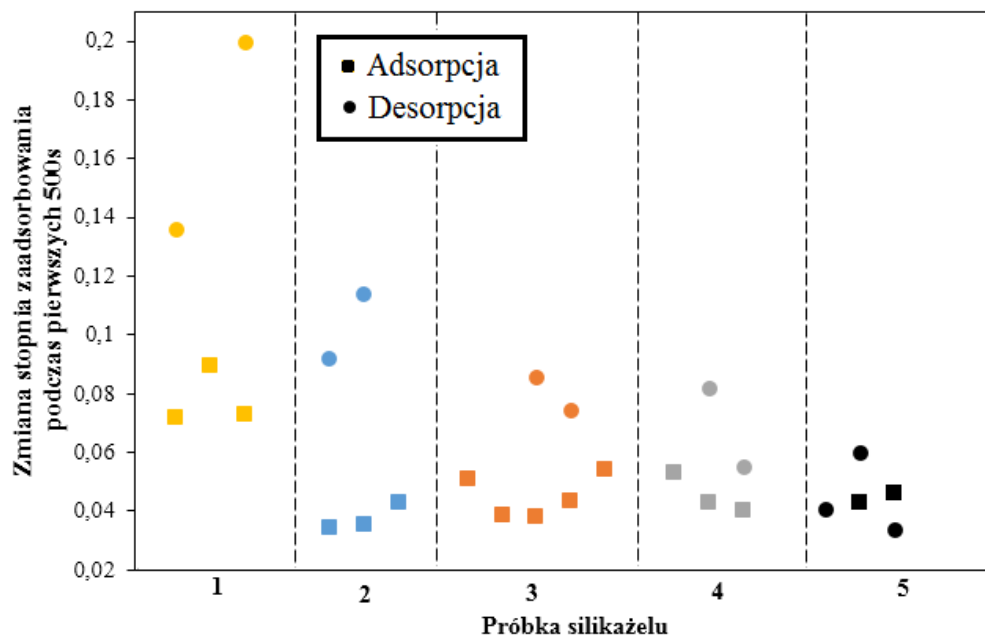
Rysunek 2.33: Seria pomiarowa nr 41.



Rysunek 2.34: Seria pomiarowa nr 42.

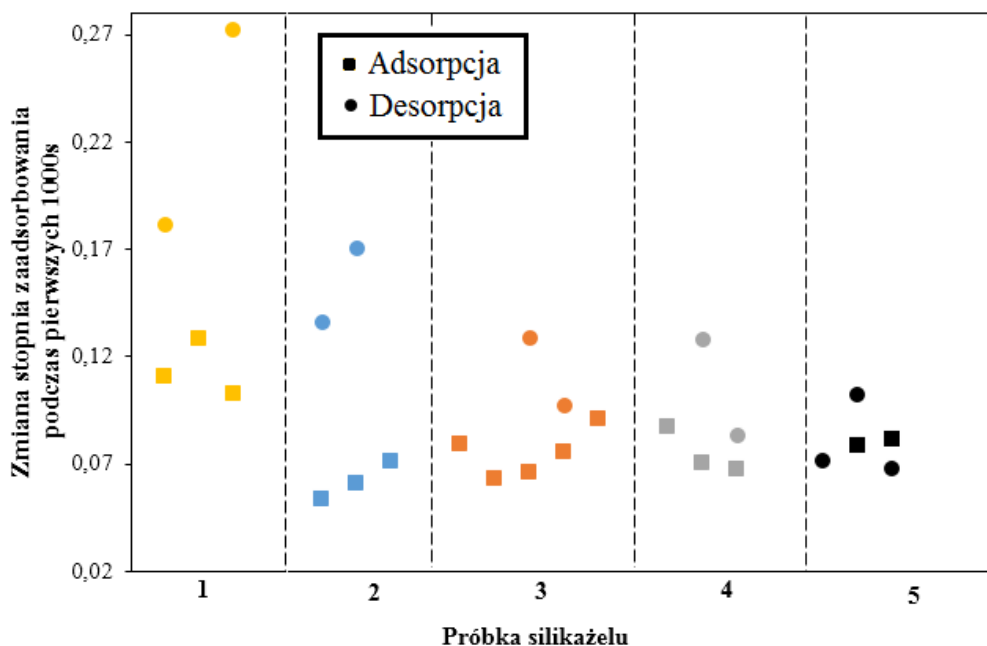


Rysunek 2.35: Seria pomiarowa nr 44.



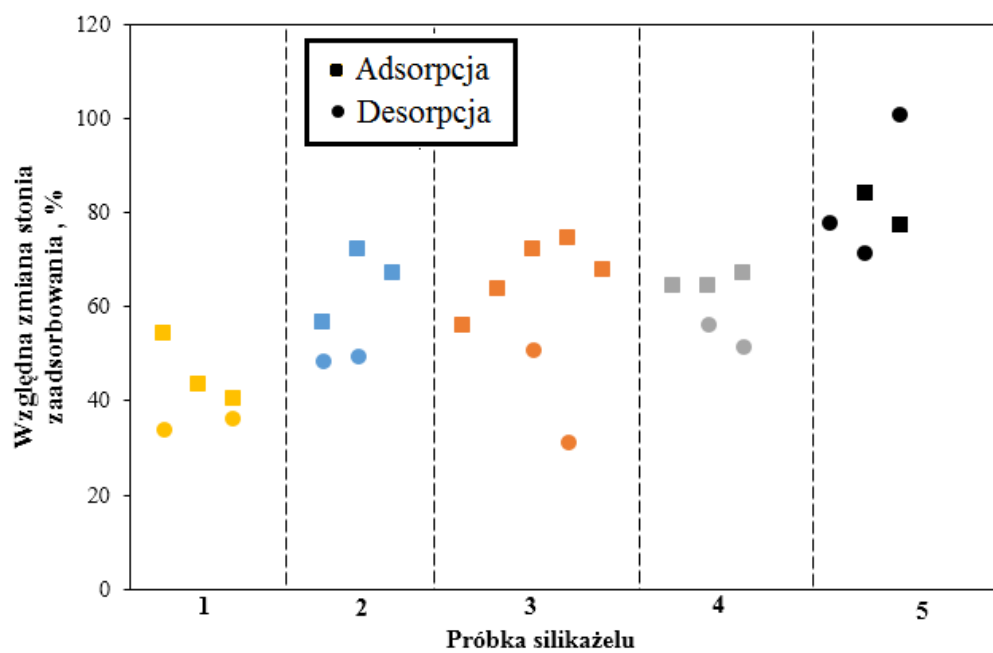
Rysunek 2.36: Porównanie sumarycznych zmian stopnia zaadsorbowania podczas pierwszych 500 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikażelu.

6. Z punktu widzenia intensyfikacji zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji optymalną średnicą ziaren jest frakcja 1-2 mm. Dla takich ziaren uzyskano najwyższą zmianę stopnia zaadsorbowania zarówno podczas adsorpcji jak i desorpcji. Maksymalna zmiana stopnia zaadsorbowania w trakcie pierwszych 500 s adsorpcji wyniosła 89g/kg co jest równoznaczne z mocą chłodniczą około 400 W z 1 kg silikażelu.
7. Niektóre z przeprowadzonych serii pomiarowych charakteryzują się niestabilną temperaturą



Rysunek 2.37: Porównanie sumarycznych zmian stopnia zaadsorbowania między 500 s a 1000 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikażelu.

powietrza na wlocie, głównie na początku serii pomiarowych. Dotyczy to szczególnie desorpcji i wynika przede wszystkim z bezwładności nagrzewnicy powietrza i niestabilności mających miejsce przy przechodzeniu układu z okresu przygotowania przed desorpcją do desorpcji. W celu eliminacji tego problemu badania mogą być prowadzone na dwuzłożowym stanowisku lub może zostać zastosowana stabilizacja temperatury przy użyciu grzałki o mniejszej bezwładności cieplnej. Mimo ww. niestabilności uzyskane wyniki są w pełni użyteczne do np. walidacji modelu fizycznego.



Rysunek 2.38: Porównanie względnych zmian stopnia zaadsorbowania w okresach 0-500 s i 500-1000 s adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych próbek silikażelu.

Rozdział 3

Model fizyczny

3.1 Wstęp

Niniejszy rozdział prezentuje autorski model fizyczny opisujący zjawisko adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji oraz jego walidację na podstawie danych eksperymentalnych przedstawionych w Rozdziale 2. Prezentowane zagadnienie było przedmiotem publikacji naukowej pt. "Modelling and experimental analyzes on air-fluidised silica gel-water adsorption and desorption" opublikowanej w czasopiśmie Applied Thermal Engineering wydawnictwa Elsevier [88].

3.2 Przegląd literatury

W literaturze naukowej funkcjonują modele częściowo lub w sposób kompleksowy opisujące zjawisko adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji [122, 21, 84, 45].

W 2009 roku [122] przedstawił model opisujący kinetykę wymiany masy podczas adsorpcji pary wodnej na silikażelu w złożu fluidalnym. Model uwzględnia opory związane z dyfuzją wewnętrzną (w gazie) i zewnętrzną (przez powierzchnie ziarna) oraz kinetykę adsorpcji. Autor zakłada, że ze względu na znaczną przewagę kinetyki adsorpcji nad mechanizmami dyfuzji, wpływ kinetyki adsorpcji jest pomijalny. Wymiana masy zależy od dyfuzji zewnętrznej oraz wewnętrznej. Współczynnik wymiany masy jest obliczany na podstawie danych eksperymentalnych. Autor przedstawił porównanie wyników teoretycznych i eksperymentalnych. Autor wskazuje na obszary dominacji dyfuzji wewnętrznej i zewnętrznej w wymianie masy. Przedstawiony model nie opisuje wymiany ciepła w złożu fluidalnym więc nie stanowi on kompleksowego rozwiązania kwestii modelowania zjawiska adsorpcji oraz desorpcji w złożu fluidalnym. Niemniej prezentowana walidacja modelu z eksperymentem wskazuje na jego wysoką zbieżność. Nie jest jasne, czy prezentowana metodologia może być użyta także do modelowania zjawiska desorpcji.

W 2010 roku Hamed i inni [45] podjęli próbę modelowania zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji bazując na wynikach własnych badań eksperymentalnych. Autorzy sformułowali równania analityczne opisujące względną zmianę stopnia zawilżenia oraz temperatury po-

wietrza w złożu. Walidacja modelu wskazuje na duże rozbieżności między wynikami eksperymentalnymi i teoretycznymi. Trzeba jednak zaznaczyć, że prezentowane wraz z modelem dane eksperymentalne stanowią jedno z najobszerniejszych dostępnych źródeł nt. badań eksperymentalnych zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji.

Autorzy [84] w 2015 roku przedstawili model kompleksowo opisujący adsorpcję pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji. Autorzy założyli, że dominującym mechanizmem wymiany ciepła i masy jest konwekcja masy z gazu wilgotnego do powierzchni ziarna. W celu obliczenia współczynników wymiany ciepła i masy autorzy wykorzystali tzw. analogię Chiltona-Colburne'a [16]. Model uwzględnia również rozkład porowatości złoża. Autorzy sformułowali równania zachowania masy i energii w złożu uwzględniając wpływ porowatości złoża na współczynniki wymiany ciepła i masy oraz powierzchnię właściwą złoża. Ponadto autorzy przeprowadzili badania eksperymentalne adsorpcji, które umożliwiły weryfikację zaproponowanego modelu. Wyniki teoretyczne zostały także porównane z danymi eksperymentalnymi dostępnymi w [44, 45]. Autorzy uzyskali rozbieżności wyników poniżej 6%. Prezentowany model stanowi dobre narzędzie do modelowania procesu adsorpcji, ale autorzy nie podejmują próby modelowania desorpcji w złożu fluidalnym.

Również w roku 2015, w pracy [21] autorzy także przyjęli dominację konwekcji z gazu do ziarna zarówno w procesach wymiany ciepła jak i masy. Wymiana masy w złożu jest obliczana za pomocą wzorów empirycznych uwzględniających porowatość złoża i charakter przepływu. Autorzy również skorzystali z analogii Chiltona-Colburne'a w celu określenia współczynnika wymiany ciepła w złożu. Poza metodologią obliczeń związanych z wymianą ciepła i masy między powietrzem a sorbentem w złożu, została również zaprezentowana metodologia obliczeń spadku ciśnienia w złożu. Wyniki teoretyczne są walidowane w oparciu o autorskie badania eksperymentalne. Prezentowany w [21] model również stanowi dobre narzędzie do modelowania zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji. Autorzy nie przedstawiają metodologii obliczeń dla desorpcji.

Przedstawiony przegląd literatury dotyczący modeli teoretycznych opisujący zjawisko adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji wskazuje na dwie zasadnicze kwestie.

- Prezentowane modele dotyczą jedynie zjawiska adsorpcji. Nie pojawia się w literaturze próba walidacji modelu dla desorpcji, a jedynie ogólne założenia, że oba procesy można opisywać w ten sam sposób, co nie zostało udowodnione i co nie jest zgodne z prezentowanymi w Rozdziale 2. danymi eksperymentalnymi. Pewne wątpliwości budzi również ilość prezentowanych porównań danych eksperymentalnych i teoretycznych.
- Przez ostatnie 10 lat zostały zaproponowane cztery różne metody modelowe (z czego dwie w przeciągu ostatnich trzech lat), co wskazuje z jednej strony na zainteresowanie tego typu narzędziem, z drugiej na wciąż istniejącą potrzebę zaproponowania narzędzia prezentującego odpowiednią dokładność i kompleksowość. Na podstawie analizy literatury w zakresie modelowania omawianego zjawiska zdaniem autora zasadne jest podjęcie próby opracowania modelu fizycznego opisującego zarówno adsorpcję i desorpcję pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji. W celu uwiarygodnienia proponowanego narzędzia konieczna jest jego obszerna walidacja na podstawie danych eksperymentalnych.

3.3 Model fizyczny

Prezentowany model został opracowany w oparciu o następujące założenia:

- (1) Ze względu na dużą intensywność wymiany ciepła w złożu fluidalnym [116] powietrza i adsorbent pozostają w równowadze termicznej. Ponadto, temperatura i wilgotność powietrza oraz temperatura i stopień zaadsorbowania adsorbentu w całej objętości złoża są jednorodne.
- (2) Dominującym mechanizmem wymiany masy podczas adsorpcji jest konwekcja masy z powietrza do warstwy przyściennej ziarna. Ponadto, warstwa przyścienna pozostaje w równowadze z ziarnem adsorbentu [20, 33].
- (3) Współczynnik konwekcji masy podczas adsorpcji jest szacowany na podstawie analogii Chilton'a - Colburn'a: proporcjonalnością między wymianą masy i ciepła, która jest szczegółowo wyjaśniona w [20, 16].
- (4) Dominującym mechanizmem wymiany masy podczas desorpcji jest dyfuzja wewnątrz ziarna sorbentu [76, 80, 61].
- (5) Złoże fluidalne jest traktowane jako jednorodnie porowate. Całe złożo jest traktowane jako jeden obszar obliczeniowy.

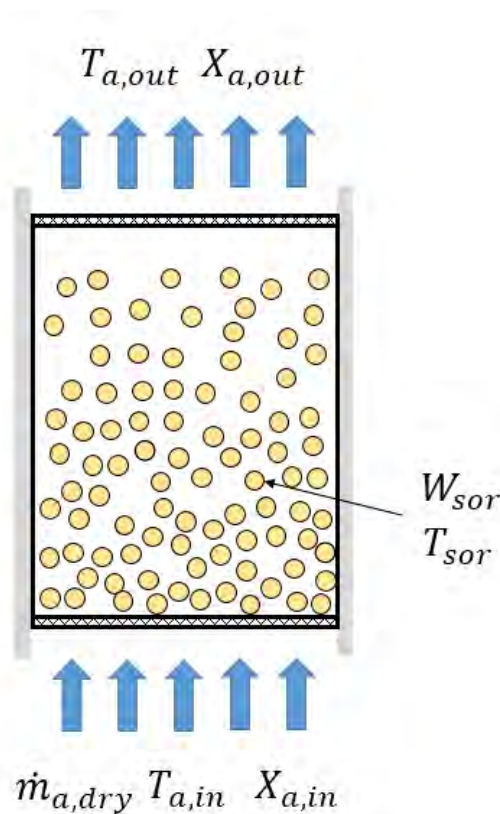
Rysunek 3.1 przedstawia schemat modelowanego złoża fluidalnego. Złoże jest zasilane od spodu strumieniem powietrza $\dot{m}_{a,dry}$ o temperaturze $T_{a,in}$ i wilgotności bezwzględnej $X_{a,in}$. Złoże jest wypełnione silikażelem o temperaturze początkowej T_{sor} i stopniu zaadsorbowania W_{sor} , które następnie zmieniają się na skutek wymiany ciepła i masy. Powietrze o temperaturze $T_{a,out}$ i wilgotności bezwzględnej $X_{a,out}$ opuszcza złożo. Procesy wymiany ciepła i masy zachodzące w złożu fluidalnym oraz towarzyszące im zmiany parametrów powietrza i adsorbentu są opisane równaniami zachowania energii i masy 3.1 - 3.3.

$$V_a \rho_a c_a dT_a = (\dot{m}_{a,dry} c_a ((1 + X_{a,in}) T_{a,in} - (1 + X_{a,out}) T_{a,out}) - h_{th} M_{sor} a_{sor} (T_{a,i} - T_{sor,i})) dt \quad (3.1)$$

$$M_{sor} c_{sor} dT_{sor} = h_{th} M_{sor} a_{sor} (T_{a,i} - T_{sor,i}) dt + H_{ads} M_{sor} dW_{sor} \quad (3.2)$$

$$V_a \rho_a dX_a = (\dot{m}_{a,dry} (X_{a,in} - X_{a,out})) dt - M_{sor} dW_{sor} \quad (3.3)$$

Równanie 3.1 opisuje zmiany temperatury powietrza w złożu wynikające z wymiany masy pomiędzy powietrzem i ziarnami adsorbentu. Natomiast równanie 3.2 opisuje zmiany temperatury adsorbentu w złożu wynikające z wymiany ciepła między powietrzem i ziarnami adsorbentu, ale także z ciepła towarzyszącego adsorpcji lub desorpcji pary wodnej. Równanie 3.3 opisuje dystrybucję pary wodnej



Rysunek 3.1: Schemat modelowanego złoża fluidalnego.

w układzie. Zmiana wilgotności bezwzględnej powietrza w złożu wynika z bilansu powietrza napływającego i puszczającego złożo oraz zmiany stopnia zaadsorbowania sorbentu, która jest opisana równaniem 3.4, w przypadku adsorpcji, lub 3.5, w przypadku desorpcji.

$$dW_{sor} = h_m a_{sor} (X_{a,i} - X_{a-p}) dt \quad (3.4)$$

$$dW_{sor} = 60 \frac{D}{d_p^2} (W_{eq} - W_{sor}) dt \quad (3.5)$$

Zgodnie z przedstawionymi założeniami modelu fizycznego wymiana masy przy adsorpcji jest wprost proporcjonalna do współczynnika wymiany masy h_m , powierzchni wymiany masy w złożu (czyli sumarycznej powierzchni ziaren) a_{sor} i gradientu wilgotności bezwzględnej między powietrzem $X_{a,i}$ a warstwą przyścienną wokół ziaren X_{a-p} , która jest w równowadze z adsorbentem.

Wymiana ciepła Współczynnik wymiany ciepła między powietrzem a adsorbentem h_{th} został policzony w oparciu o korelacje opracowane dla powietrza, zaproponowane przez [116] Dla $0.1 < Re_p <$

50 i $Pr = 0.7$:

$$Nu_p = 0.0282 Re_p^{1.4} Pr^{0.33} \quad (3.6)$$

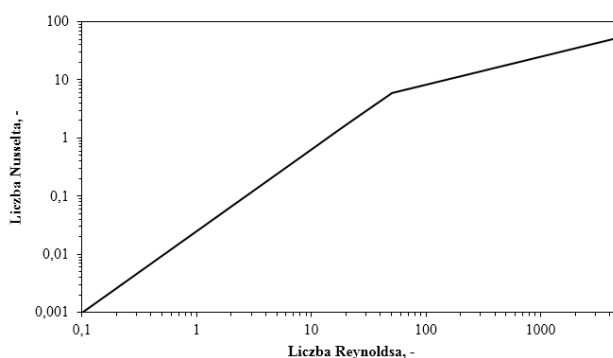
Dla $50 < Re_p < 10^4$ i $Pr = 0.7$:

$$Nu_p = 1.01 Re_p^{0.48} Pr^{0.33} \quad (3.7)$$

Re_p jest Liczbą Reynoldsa dla ziarna adsorbentu wyrażoną jako:

$$Re_p = \frac{U d_p \rho_a}{\mu_a} \quad (3.8)$$

gdzie d_p to średnica ziarna silikażelu. Zależność liczby Nusselta Nu_p od liczby Reynoldsa Re_p jest



Rysunek 3.2: Zależność liczby Nusselta od liczby Reynoldsa opisana równaniami 3.6 i 3.7.

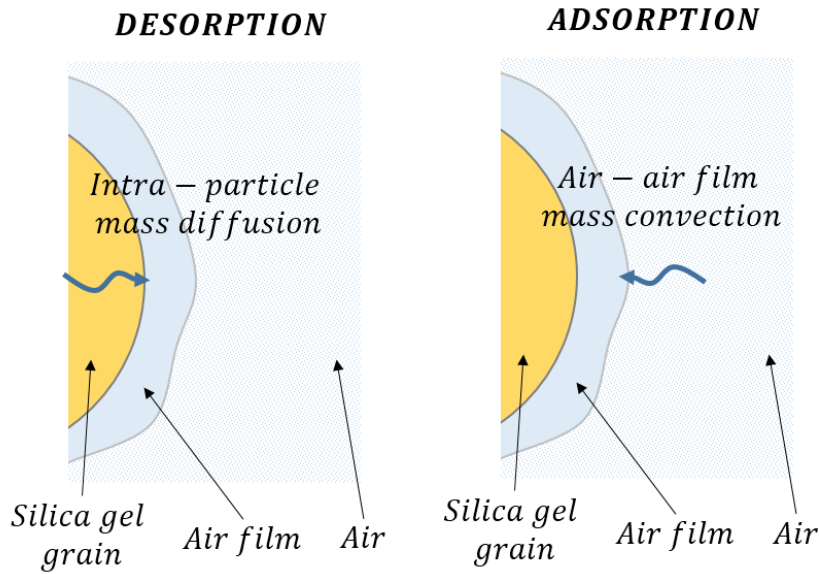
przedstawiona na Rysunku 3.2. Przedstawiona korelacja opisuje pogorszenie wymiany ciepła pojawiające się w przypadku mniejszych ziaren, co wynika z gorszego kontaktu cieplnego między gazem a ziarnami spowodowanym przepływem tłokowym [116]. Intensywność wymiany ciepła zależy także od powierzchni wymiany ciepła, która w przypadku złoża składającego się ziaren jest wyrażona jako:

$$A_{sor} = M_{sor} a_{sor} \quad (3.9)$$

gdzie a_{sor} to powierzchnia właściwa złoża, a M_{sor} masa adsorbentu w złożu. Przyjmując, że ziarna sorbentu w złożu są idealnie sferyczne i jednorodnej średnicy powierzchnia właściwa złoża jest wyrażona jako:

$$a_{sor} = \frac{A_{sor}}{M_{sor}} = \frac{6}{d_p \rho_{sor}} \quad (3.10)$$

Wymiana masy Dominujący mechanizm wymiany masy zależy od kierunku sorpcji: podczas adsorpcji jest to konwekcja masy z powietrza do warstwy przyściennej ziarna [20, 116], podczas desorpcji jest to dyfuzja wewnątrz ziarna sorbentu [76, 80, 61]. Ww. mechanizmy wymiany masy są zilustrowane na Rysunku 3.3. Przyjęto, że podczas adsorpcji warstwa przyścienna ziarna pozostaje w



Rysunek 3.3: Mechanizmy kontrolujące wymianę masy podczas adsorpcji i desorpcji.

równowadze z ziarnem [21]. Współczynnik wymianny masy h_m jest liczony w oparciu o podobieństwo między wymianą ciepła i masy (tzw. analogię Chilton'a - Colburn'a), która jest szczegółowo omówiona w [16]. Współczynnik wymiany masy jest proporcjonalny do współczynnika wymiany ciepła h_{th} , ciepła właściwego powietrza wilgotnego $c_{a,h}$ i liczby Lewisa Le .

$$h_m = \frac{h_{th}}{c_{a,h} Le^{0.66}} \quad (3.11)$$

Wilgotność bezwzględna warstwy przyściennej ziarna jest określona dla ciśnienia równowagowego pary wodnej p_{eq} [84]:

$$X_{a-p} = \frac{0.622 p_{eq}}{10^5 - p_{eq}} \quad (3.12)$$

Ciśnienie równowagowe pary wodnej p_{eq} jest określone na podstawie przekształconych równań równowagi adsorpcyjnej Toth'a:

$$p_{eq} = 0.5 \frac{(W_{sor,i}^{-b} - W_{eq}^{-b})}{K_0 \exp\left(\frac{H_{ads}}{R_w T_{sor}}\right)} \quad (3.13)$$

Parametry K_0 , H_{ads} , W_{eq} i b z równania 3.13 zostały określone eksperymentalnie przez [28] i są przedstawione w Tabeli 3.1.

Podczas desorpcji dominującym mechanizmem wymiany masy jest dyfuzja wewnątrz ziarna sili-kazelu, opisana równaniem 3.5, która zależy od dyfuzji D [93]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3.14)$$

Tabela 3.1: Parametry z równania 3.13 dla silika żelu typu A i RD [28].

Typ silika żelu	K_0 $kgkg^{-1}kPa^{-1}$	H_{ads} Jkg^{-1}	W_{eq} $kgkg^{-1}$	b -
A	$4.65 * 10^{-10}$	$2.71 * 10^6$	0.4	10
RD	$7.3 * 10^{-10}$	$2.693 * 10^6$	0.45	12

Dyfuzja wewnątrz ziarna silikażelu zależy od temperatury ziarna T , stałej dyfuzji D_0 , interpretowanej jako maksymalna dyfuzja w nieskończonej temperaturze, oraz energii aktywacji E_a . Według danych eksperymentalnych prezentowanych przez [76] stała dyfuzji i energia aktywacji wynoszą odpowiednio $3 * 10^{-3} m^2 s^{-1}$ i $4.2 * 10^4 JK^{-1}$. Równowagowy stopień zaadsorbowania W_{eq} z Równania 3.5 jest obliczany na podstawie Równania 3.13 przy użyciu parametrów podanych w Tabeli 3.1.

Porowatość złoża Objętość złoża, składającego się z usypanych luźno ziaren, jest w pewnym stopniu wypełniona powietrzem. Stosunek objętości zajmowanej przez powietrze i objętości całkowitej złoża to tzw. porowatość złoża:

$$\varepsilon = \frac{V_{bed} - V_p}{V_{bed}} \quad (3.15)$$

gdzie V_p to objętość adsorbentu. W przypadku nieskończonej liczby dużych złożeń upakowanych składających się z idealnie sferycznych ziaren o tej samej wielkości porowatość złoża ε_0 jest wartością stałą, niezależną od średnicy ziaren, i wynosi 0.41 [116]. Ze względu na wyższą porowatość przy krawędziach złoża porowatość skończonej liczby dużych złożeń sferycznych ziaren zmienia się zgodnie z zależnością przedstawioną przez [46]:

$$\varepsilon_{d/D} = 0.4 + 0.05 \left(\frac{d_p}{D_{bed}} \right) + 0.412 \left(\frac{d_p}{D_{bed}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Zmiany porowatości w przypadku złożeń o stosunku średnicy ziarna do średnicy złoża ($\frac{d_p}{D_{bed}} < 0.02$) są pomijalnie małe. Innym czynnikiem wpływającym na porowatość jest sferyczność ziaren, co opisuje równanie [11]:

$$\varepsilon_\phi = -0.4332\phi^3 + 1.2583\phi^2 - 1.589\phi + 1.1756 \quad (3.17)$$

Sferyczność silikażelu wynosi w granicach 0.7 - 0.9 [13]. Porowatość złoża niesferycznych ziaren o skończonym rozmiarze jest wyrażona jako:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{d/D}}{\varepsilon_0} * \varepsilon_\phi \quad (3.18)$$

Wzrost prędkości powietrza w złożu powyżej minimalnej prędkości fluidyzacji U_{mf} powoduje wzrost porowatości złoża. Nie są znane zależności porowatości złoża fluidalnego ε_f od prędkości i średnicy ziaren adsorbentu. Z obserwacji autora porowatość złoża fluidalnego waha się w granicach 0,7 - 0,9 w zależności od prędkości (wzrost prędkości = wzrost porowatości) i średnicy ziarna (spadek średnicy

ziarna = wzrost porowatości). Porowatość złoża fluidalnego ma wpływ na objętość powietrza w złożu fluidalnym V_a , występującej w równaniu 3.1:

$$V_a = 0.79 H_{bed,f} D_{bed}^2 \varepsilon_f \quad (3.19)$$

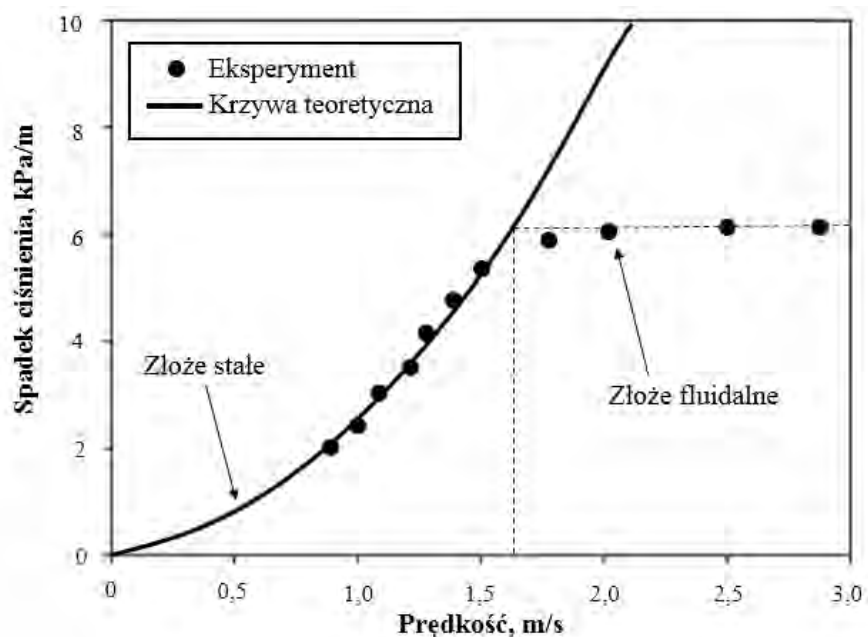
Wiedząc, że:

$$\frac{\varepsilon_f - 1}{\varepsilon - 1} = \frac{H_{bed}}{H_{bed,f}} \quad (3.20)$$

Objętość powietrza w złożu może być wyrażona jako:

$$V_a = 0.79 \frac{(\varepsilon - 1) \varepsilon_f}{\varepsilon_f - 1} H_{bed} D_{bed}^2 \quad (3.21)$$

Spadek ciśnienia Niemniej istotnym parametrem opisującym pracę złoża fluidalnego jest spadek ciśnienia generowany na złożu. Zaletą złożów fluidalnych jest redukcja spadku ciśnienia względem złożów stałych. Spadek ciśnienia na złożu fluidalnym jest równy spadkowi ciśnienia na złożu stałym przy minimalnej prędkości fluidyzacji, co jest przedstawione na Rysunku 3.4 zapożyczonym z [21]. Spadek



Rysunek 3.4: Porównanie spadku ciśnienia na złożu stałym i złożu fluidalnym. Zapoczązowane z [21].

ciśnienia na złożu fluidalnym jest opisany równaniem Ergun'a [116]:

$$\Delta p = \frac{\rho_a U_{mf}^2 H_{bed} (1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3 d_p} \left(\frac{150 (1 - \varepsilon_0) \mu_a}{U_{mf} d_p} + 1.75 \right) \quad (3.22)$$

Natomiast minimalna prędkość fluidyzacji U_{mf} jest wyrażona jako [20]:

$$U_{mf} = \frac{\mu_a}{\rho_a d_p} \left((1136 + 0.0408 Ar)^{0.5} - 33.7 \right) \quad (3.23)$$

Ar to Liczba Archimedesesa opisująca stosunek sił wyporu do lepkości:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_a (\rho_p - \rho_a) g}{\mu_a^2} \quad (3.24)$$

Gęstość ρ_p określa gęstość pojedynczego ziarna sorbentu i może być oszacowana na podstawie równania:

$$\rho_p = \frac{\rho_{sor}}{1 - \varepsilon_0} \quad (3.25)$$

Pewien wpływ na spadek ciśnienia mają również siatki ograniczające złożę, ale jest to wpływ pomijalnie mały [106]. Pozostałe równania, korelacje lub liczby kryterialne wykorzystane do modelowania adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji są zamieszczone w Tabeli 3.2. Ponadto, wartości parametrów powietrza, pary wodnej oraz adsorbentu wykorzystane w symulacjach są podane w Tab.3.3. Przedstawiony powyżej model fizyczny został zaimplementowany w dedykowanym autorskim skrypcie napisanym w języku PYTHON, który jest dołączony do niniejszej pracy jako Załącznik 3.1. Model był weryfikowany na podstawie zgromadzonych danych eksperymentalnych. W przypadku wahań temperatury powietrza na wlocie do złoża fluidalnego skrypt wczytywał dane eksperymentalne przebiegu temperatur.

Tabela 3.2: Równania, korelacje lub liczby kryterialne wykorzystane w modelowaniu

Równania	
Strumień masy powietrza suchego Ciepło właściwe częściowo zaadsorbowanego silikażelu Ciepło właściwe powietrza wilgotnego	$\frac{\pi}{4} U D_{bed}^2 \rho_{a,dry}$ $c_{sor} = c_{sor,dry} + c_w w_{sor}$ $c_{a,h} = \frac{c_{a,dry}(1-X_a) + X_a c_v}{(1+X_a)}$
Korelacje	
Ciśnienie nasycenia wody Przewodność cieplna powietrza suchego	$p_{w,sat} = -1,823 * 10^{-9} T^6 + 2,169 * 10^{-4} T^4 +$ $+3,305 * 10^{-6} T^5 + 2,975 * 10^{-3} T^3 +$ $+1.3696 T^2 + 44.85 T + 610.55$ $k_{a,dry} = 7,17443 * T * 10^{-5} + 2,40671360 * 10^{-2}$
Liczby kryterialne	
Liczba Reynoldsa ziarna Liczba Nusselta ziarna Liczba Lewisa	$Re_p = \frac{U d_p \rho_a}{\mu_a}$ $Nu_p = \frac{h_{th} d_p}{k_a}$ $Le = \frac{\alpha_a}{D_{w-a}}$

Tabela 3.3: Parametry wykorzystane w modelowaniu.

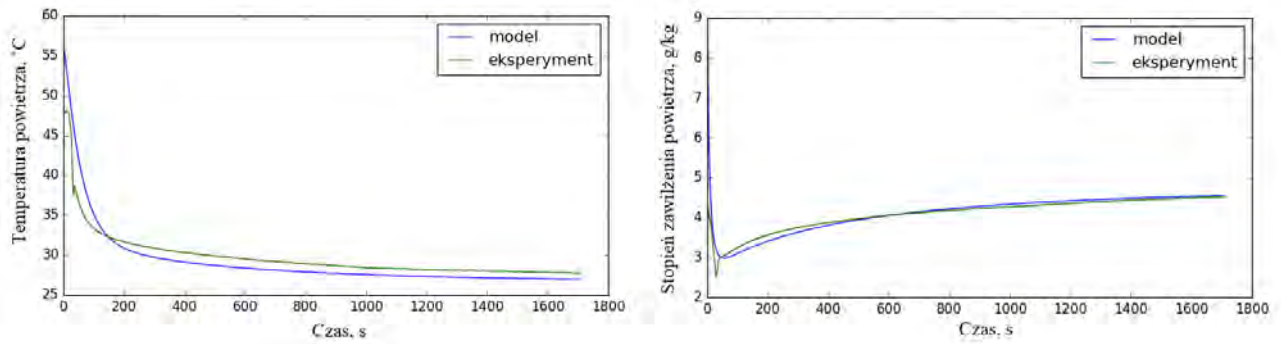
Nazwa	Symbol	Wartość	jednostka	Źródło
Ciepło właściwe powietrza suchego	$c_{a,dry}$	1004	$Jkg^{-1}K^{-1}$	[62]
Ciepło właściwe suchego silikażelu	$c_{sor,dry}$	921	$Jkg^{-1}K^{-1}$	[28]
Ciepło właściwe wody	c_w	4186	$Jkg^{-1}K^{-1}$	[62]
Ciepło właściwe pary wodnej	c_v	1950	$Jkg^{-1}K^{-1}$	[62]
Średnica złoża fluidalnego	D_{bed}	0.08	m	-
Energia aktywacji	E	$4.2 * 10^4$	$Jmol^{-1}$	[93]
Liczba Prandtla powietrza	Pr_a	0.716	-	[62]
Uniwersalna stała gazowa	R	8.315	$Jmol^{-1}K^{-1}$	-
Indywidualna stała gazowa wody	R_w	461.5	$Jkg^{-1}K^{-1}$	-
Porowatość złoża idealnie sferycznych ziaren	ε_0	0.41	-	[116]
Lepkość dynamiczna powietrza	μ_a	$1.82 * 10^{-5}$	$Pa \cdot s$	[62]
Gęstość powietrza suchego	$\rho_{a,dry}$	1.1	kgm^{-3}	[62]
Gęstość powietrza wilgotnego	$\rho_{a,h}$	1.2	kgm^{-3}	-

3.4 Wyniki

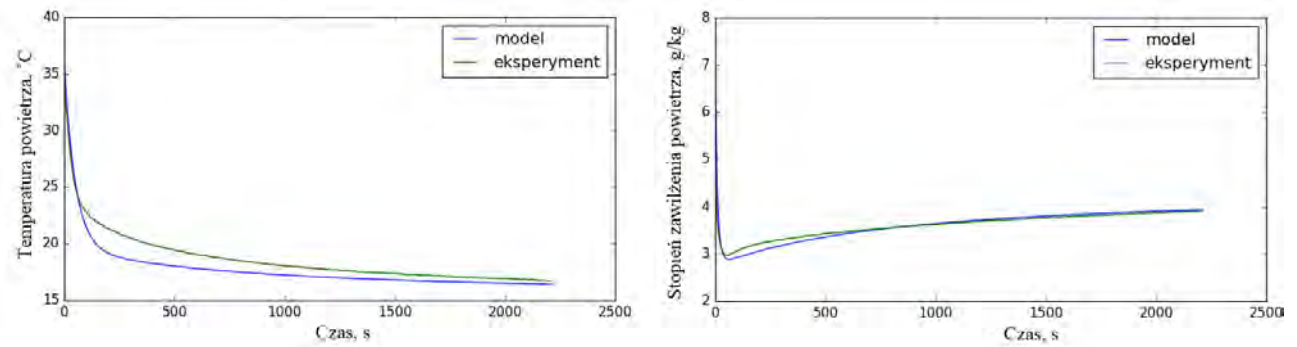
Na Rysunkach 3.5 -3.18 są przedstawione porównania wyników teoretycznych i eksperymentalnych dla adsorpcji. Oznaczenia serii pomiarowych odpowiadają oznaczeniom z Tabeli 2.9 i 2.10. Wyniki eksperymentalne i teoretyczne wykazują wysoką zbieżność: rozbieżności temperatury nie przekraczają $5^{\circ}C$, a rozbieżności stopnia zawilżenia $0.5 g/kg$. Największe rozbieżności pojawiają się w początkowym etapie adsorpcji, gdy ma miejsce gwałtowny spadek temperatury powietrza. Rysunek 3.19 przedstawia zbiorcze porównanie zbieżności wyników modelowych i eksperymentalnych, z wyszczególnieniem analizowanych próbek. W zakresie temperatur powietrza powyżej $40^{\circ}C$ model ma tendencję do przeszacowywania - rozbieżności mieszczą się w zakresie 0% do +20%. W przypadku adsorpcji wysokie temperatury występują głównie na początku procesu. Rozbieżności temperatury poniżej $40^{\circ}C$ mieszczą się w zakresie -10% do +10%. W przypadku rozbieżności stopnia zawilżenia, które są zbiorczo przedstawione na Rysunku 3.20 w całym zakresie rozbieżności mieszczą się w zakresie -10% do +10%. Przyjęte założenia modelowe pozwalają na stosunkowo dokładne modelowanie pracy złoża fluidalnego podczas adsorpcji, niezależnie od analizowanej próbki silikażelu.

Rysunki 3.21 - 3.34 przedstawiają wyniki eksperymentalne i teoretyczne uzyskane dla desorpcji z wyszczególnieniem analizowanych próbek silikażelu. Desorpcja nie jest zasymulowana równie dokładnie jak adsorpcja, niemniej jednak odwzorowuje trendy i generalne cechy desorpcji obserwowane dla badań eksperymentalnych np. początkowy, gwałtowny wzrost temperatury, któremu towarzyszy wzrost stopnia zawilżenia powietrza.

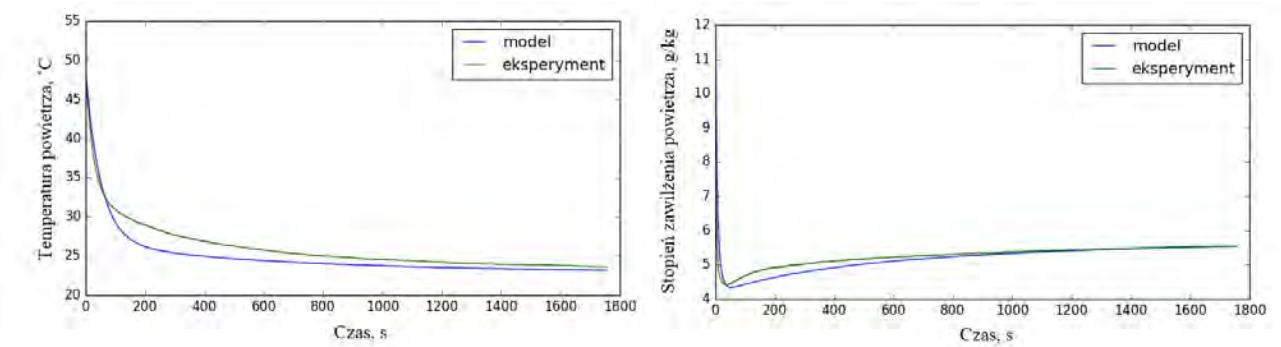
Rysunki 3.35 i 3.36 przedstawiają zbiorcze porównanie zbieżności wyników modelowych i eksperymentalnych desorpcji odpowiednio dla temperatury powietrza i stopnia zawilżenia powietrza. Model wykazuje ogólną tendencję do przeszacowywania temperatury powietrza - rozbieżności w



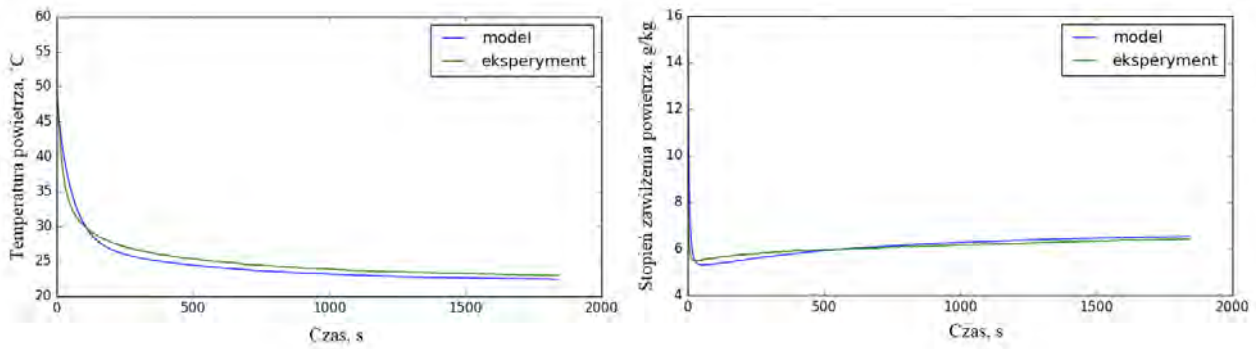
Rysunek 3.5: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 3.



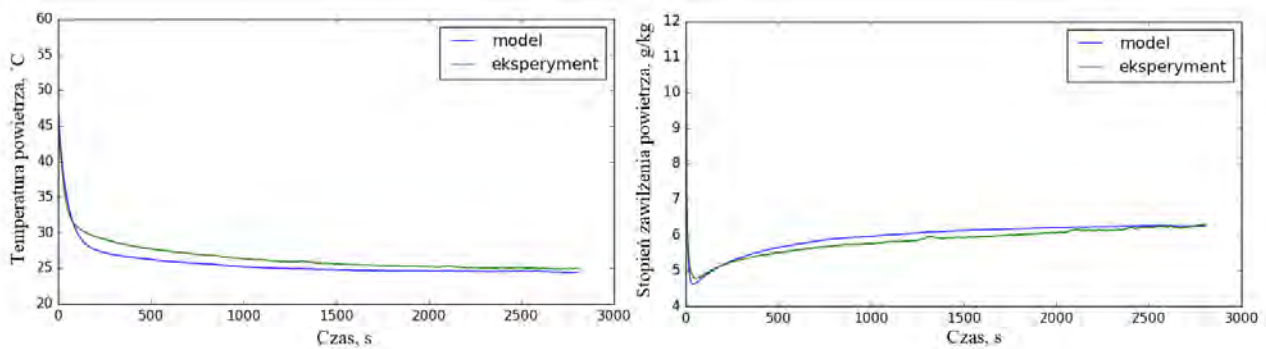
Rysunek 3.6: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 4.



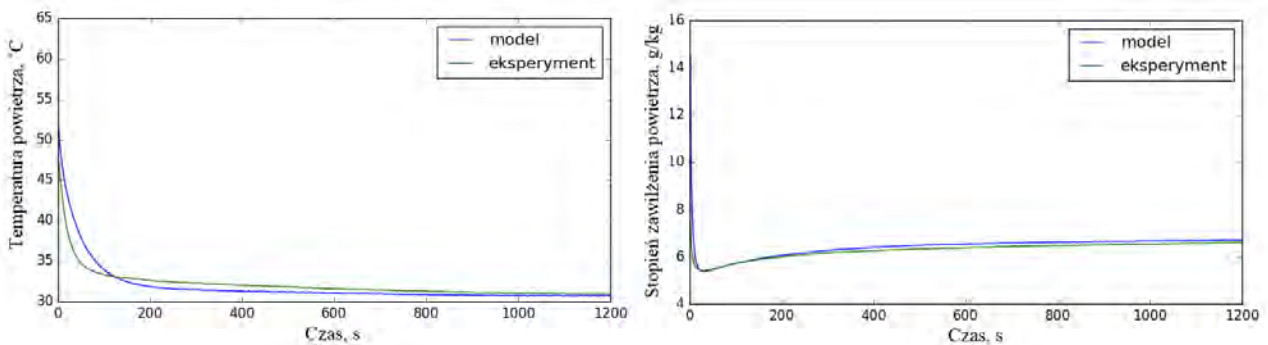
Rysunek 3.7: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 6.



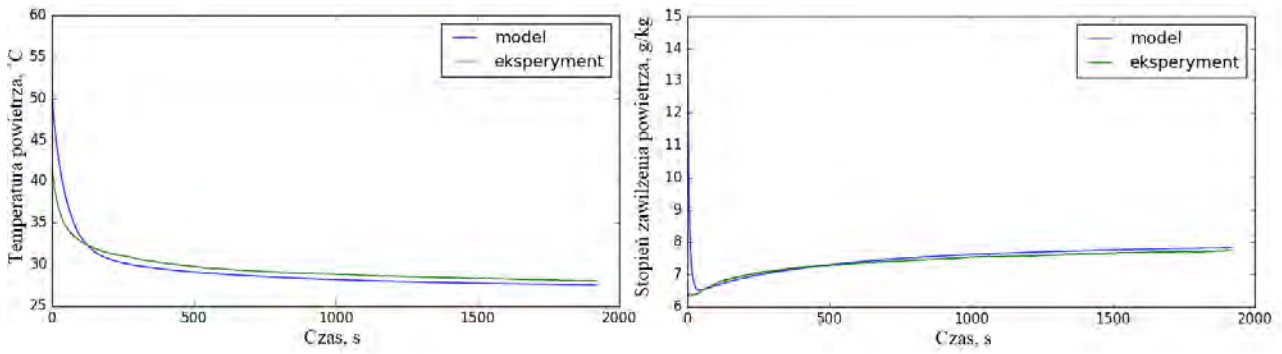
Rysunek 3.8: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 8.



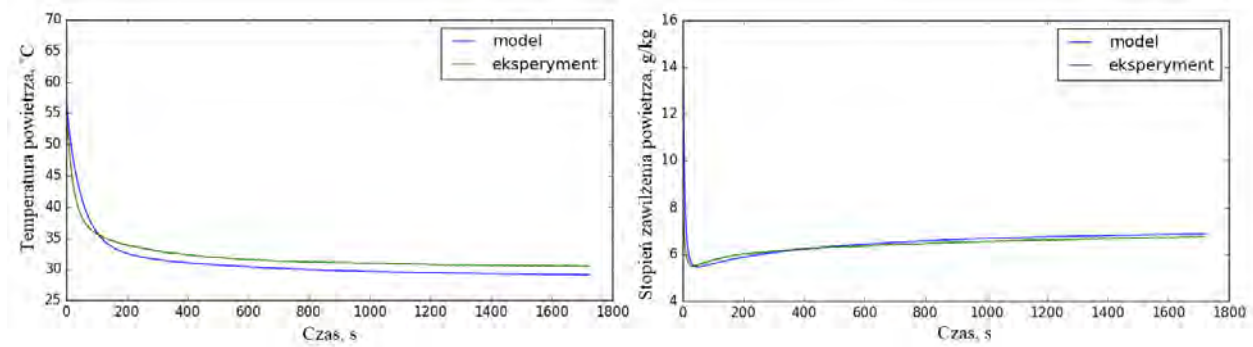
Rysunek 3.9: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 9.



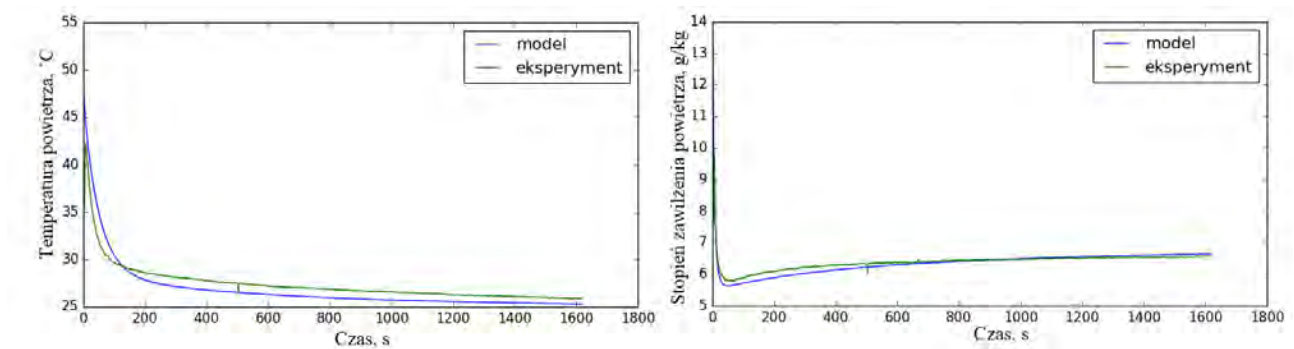
Rysunek 3.10: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 10.



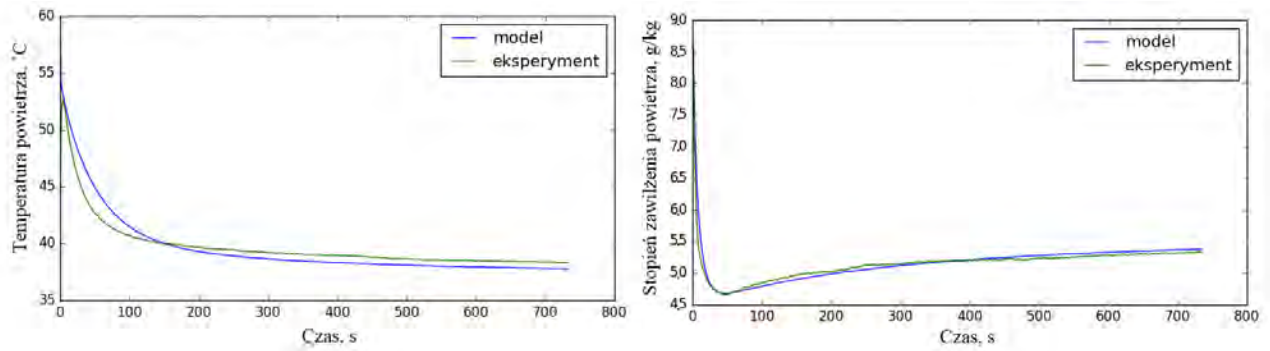
Rysunek 3.11: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 11.



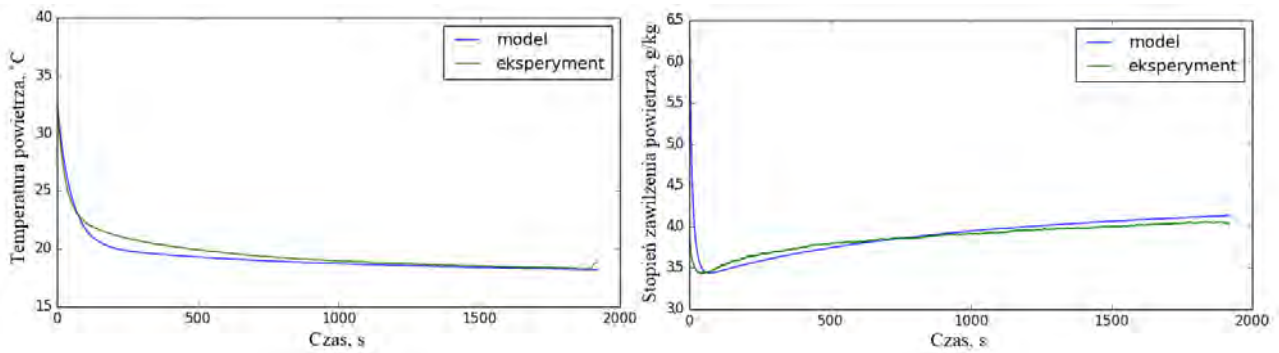
Rysunek 3.12: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 12.



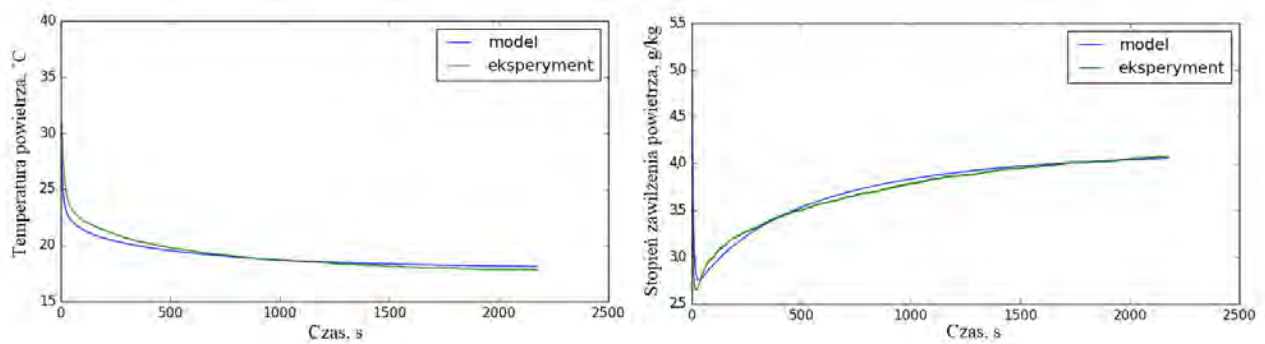
Rysunek 3.13: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 13.



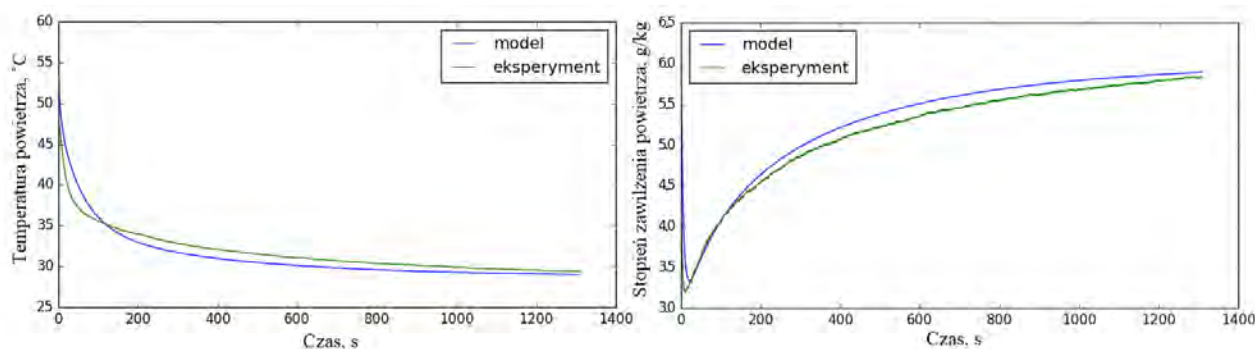
Rysunek 3.14: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 14.



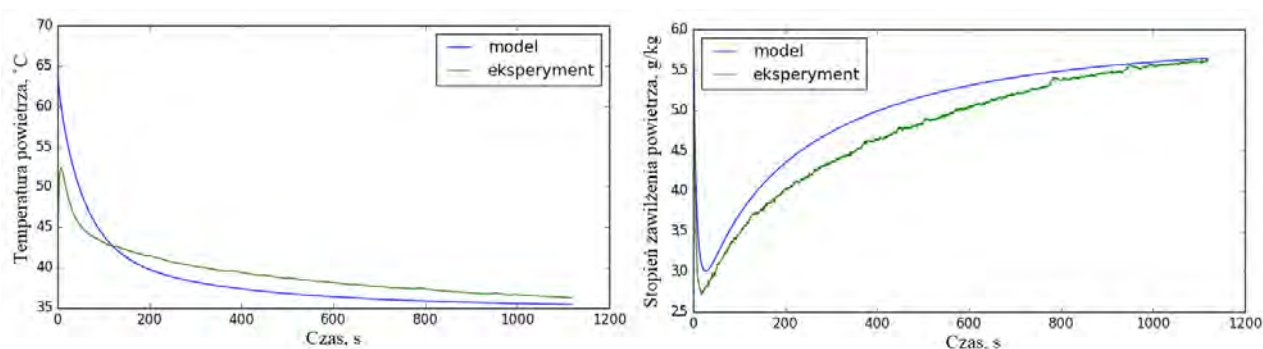
Rysunek 3.15: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 15.



Rysunek 3.16: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 16.



Rysunek 3.17: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 17.



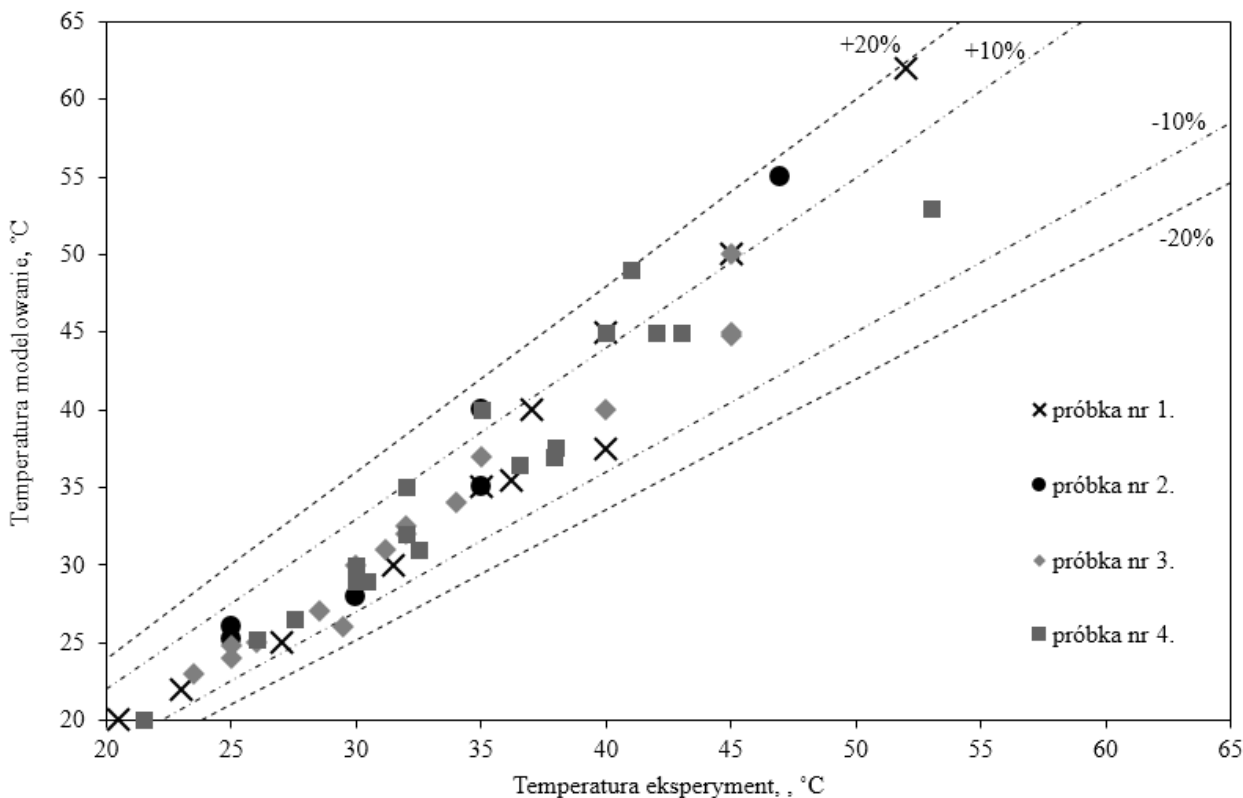
Rysunek 3.18: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 18.

większości mieszczą się w zakresie -5% do +30%. Z drugiej strony rozbieżności uzyskane dla próbki nr 1. (frakcja ziaren 1-2mm, patrz Tab. 2.6) mieszczą się w zakresie -5% do +10%. Natomiast stopień zawilżenia powietrza jest modelowany z rozbieżnościami w zakresie -30% do +20%. Wyniki modelowane dla próbki nr 1. były z reguły niedoszacowane do nawet -30%. Założenia modelowe zaproponowane w zakresie desorpcji pozwalają na modelowanie tego zjawiska w granicach błędów -30% do +30%.

Wnioski

W niniejszym rozdziale przedstawiono autorski model fizyczny zjawiska adsorpcji/desorpcji pary wodnej na silikażelu w złożu fluidalnym. Zaproponowano założenia modelowe dotyczące mechanizmów wymiany masy dominujących podczas adsorpcji oraz desorpcji. Opracowano równania modelowe oraz skrypt, który umożliwia ich rozwiązanie. Następnie model został zwalidowany w oparciu o własne dane eksperymentalne. Na podstawie ww. prac sformułowano następujące wnioski:

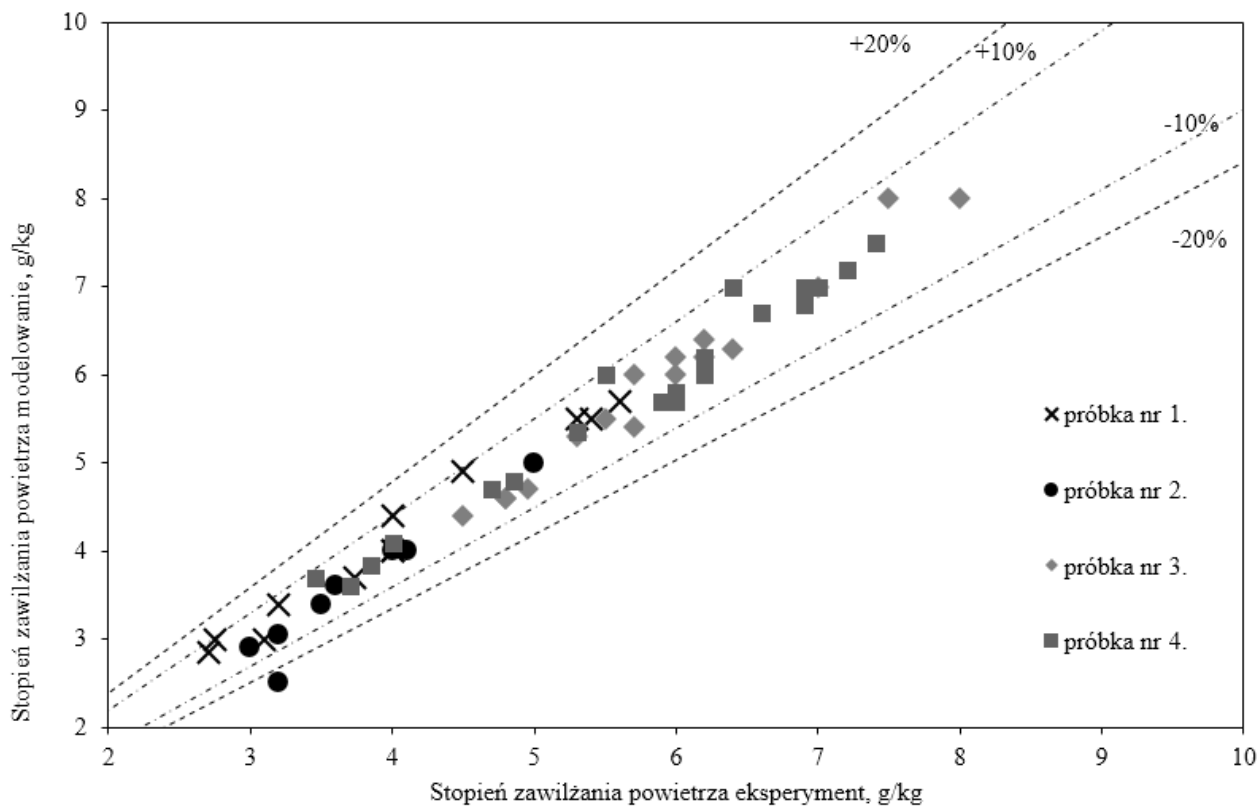
1. Zbieżność wyników teoretycznych i eksperymentalnych na poziomie -10% – 20% dla tempe-



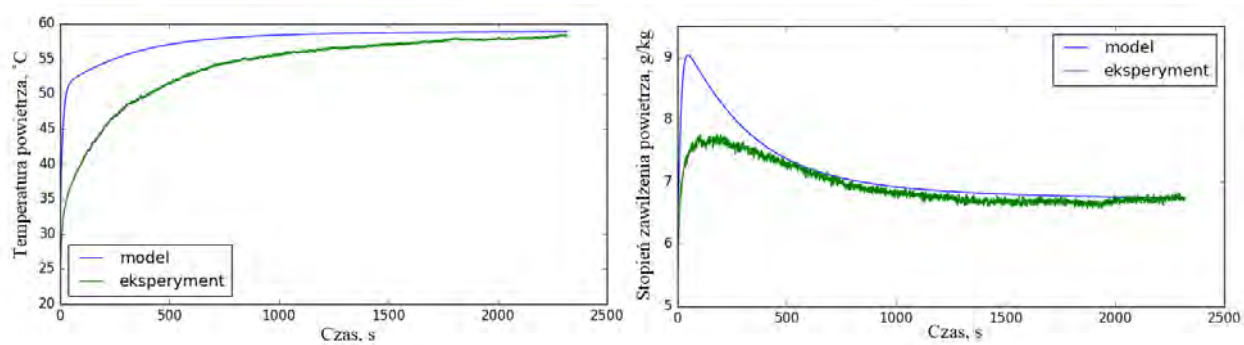
Rysunek 3.19: Zbiorcze porównanie zbieżności wyników eksperymentalnych i teoretycznych temperatury powietrza dla adsorpcji.

ratury powietrza i -10% – +10% dla stopnia zawilżenia powietrza potwierdza, że dominującym mechanizmem wymiany masy podczas adsorpcji jest konwekcja masy z powietrza do warstwy przyściennej ziarna. Ponadto słuszne wydaje się również założenie, że ww. warstwa przyścienne pozostaje w ciągłej równowadze z ziarnem silikażelu.

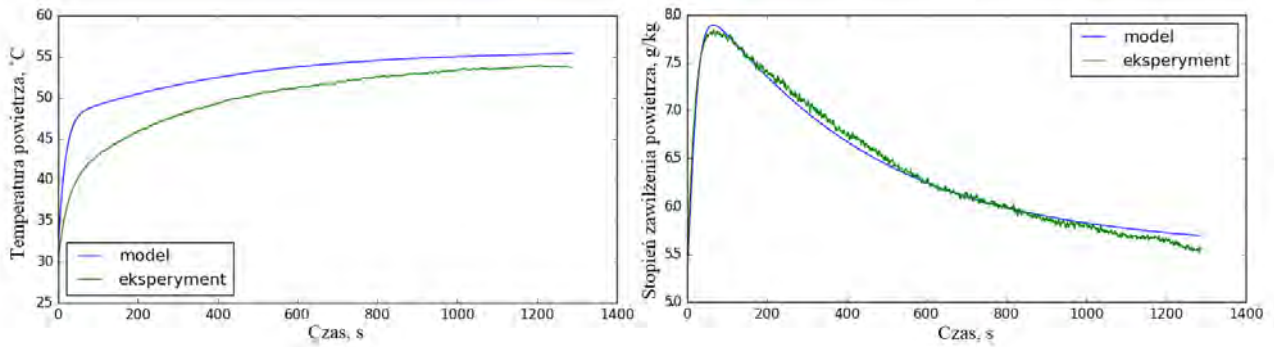
2. Desorpcja jest modelowana z rozbieżnościami w zakresie -5% do +30% dla temperatury powietrza i -30% – +20% dla stopnia zawilżenia powietrza. Ponadto wyniki modelowe odwzorowują trendy obserwowane dla wyników eksperymentalnych. Na tej podstawie można stwierdzić, że przyjęte założenie modelowe dotyczące dominującego mechanizmu wymiany masy podczas desorpcji jest częściowo potwierdzone.
3. Rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a modelowymi stopnia zawilżenia powietrza dla próbki nr 1.(frakcji silikażelu 1-2mm) mieszczą się w zakresie -5% do +10% dla adsorpcji i 0% do -30%. Ze względu na poprawę kinetyki procesów adsorpcji dla mniejszych średnic sorbentu właśnie ten zakres jest szczególnie interesujący z punktu widzenia dalszych analiz teoretycznych i optymalizacyjnych.



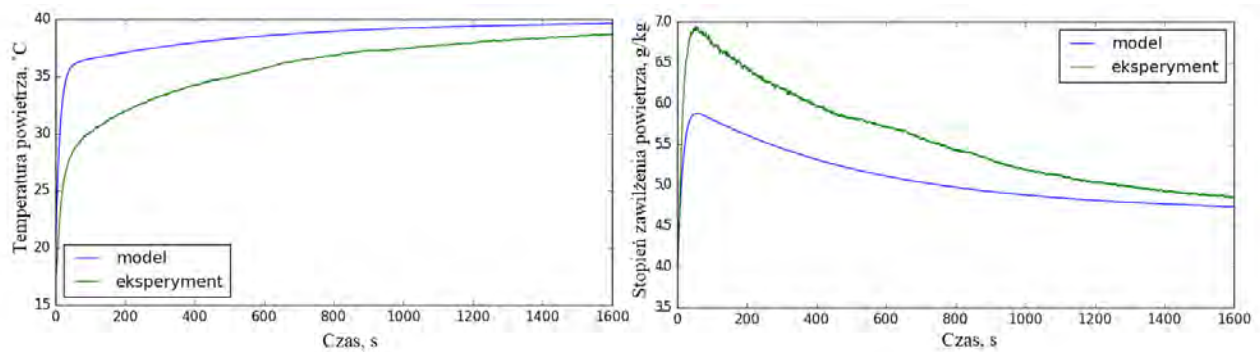
Rysunek 3.20: Zbiorcze porównanie zbieżności wyników eksperymentalnych i teoretycznych stopnia zawilżenia powietrza dla adsorpcji.



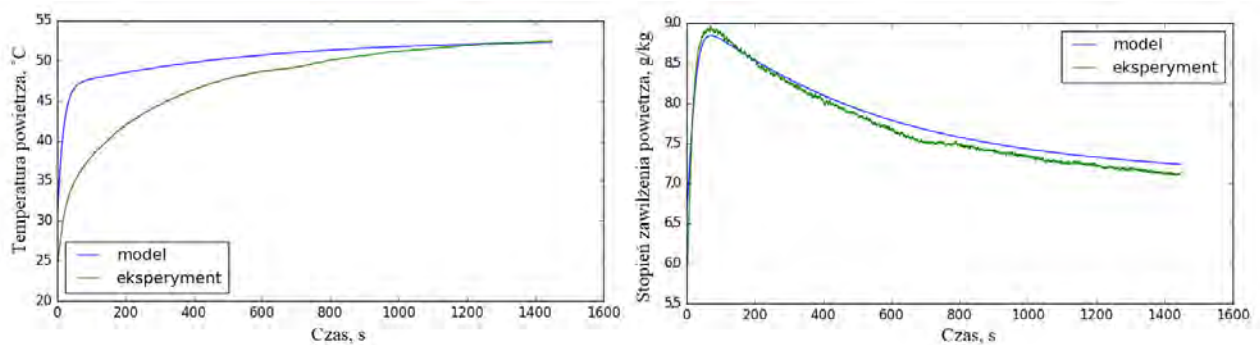
Rysunek 3.21: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 23.



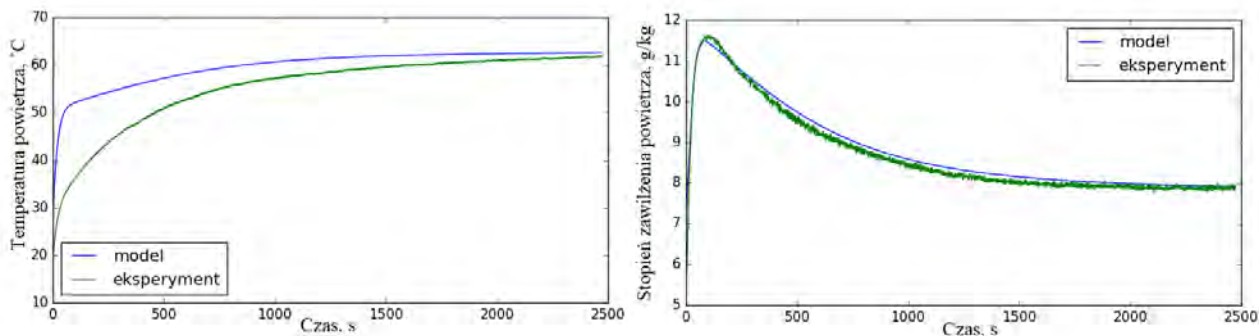
Rysunek 3.22: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 25.



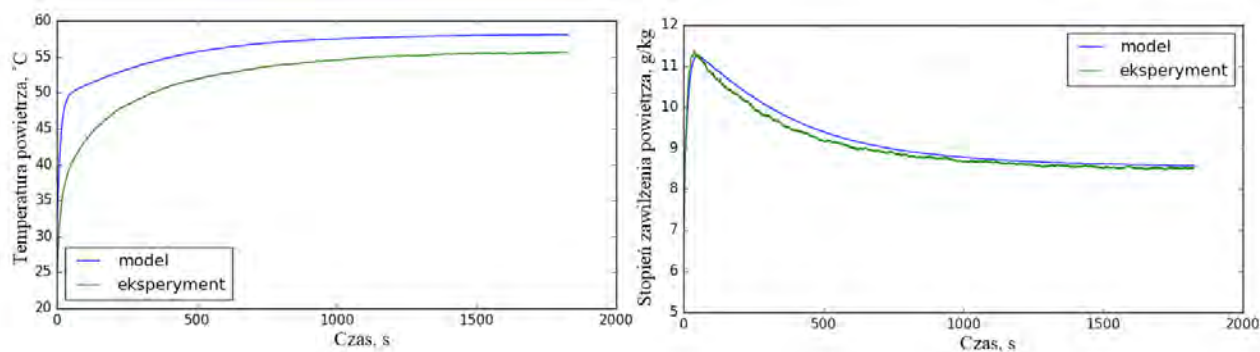
Rysunek 3.23: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 26.



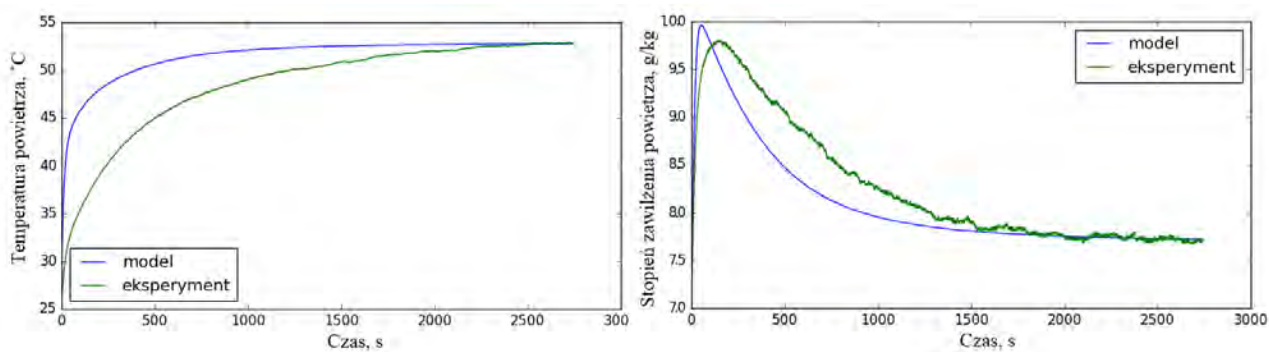
Rysunek 3.24: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 28.



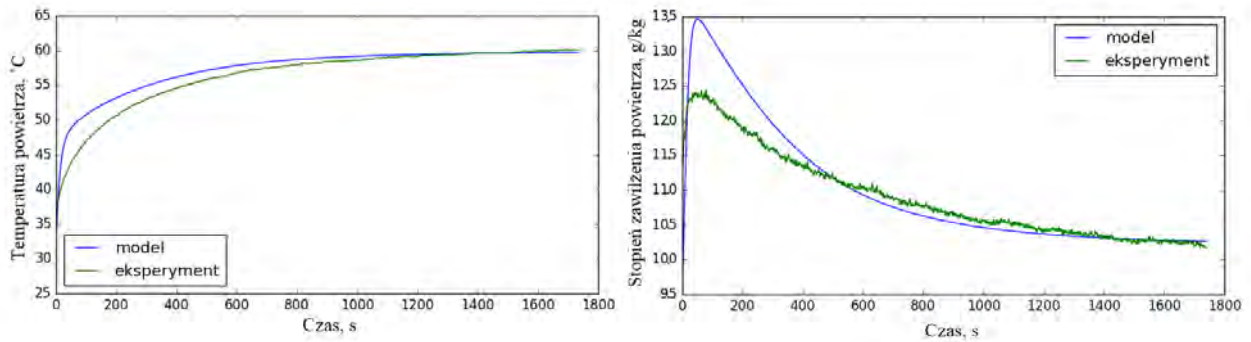
Rysunek 3.25: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 29.



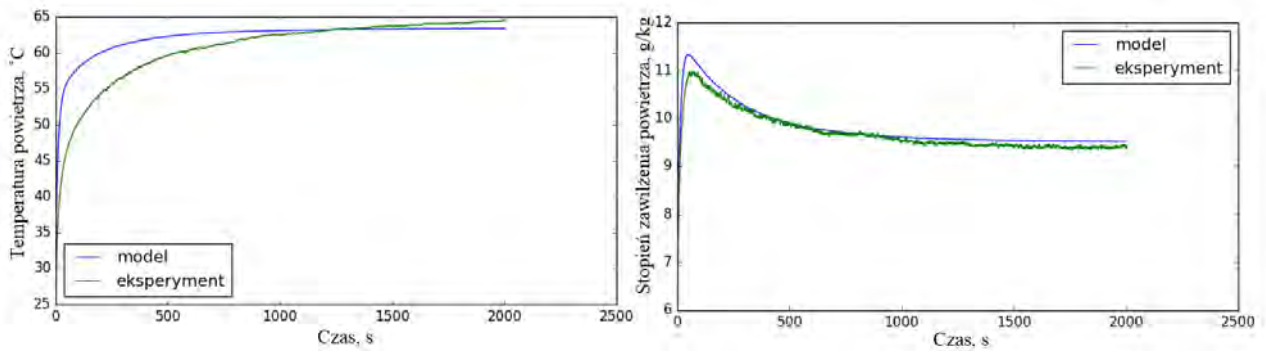
Rysunek 3.26: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 30.



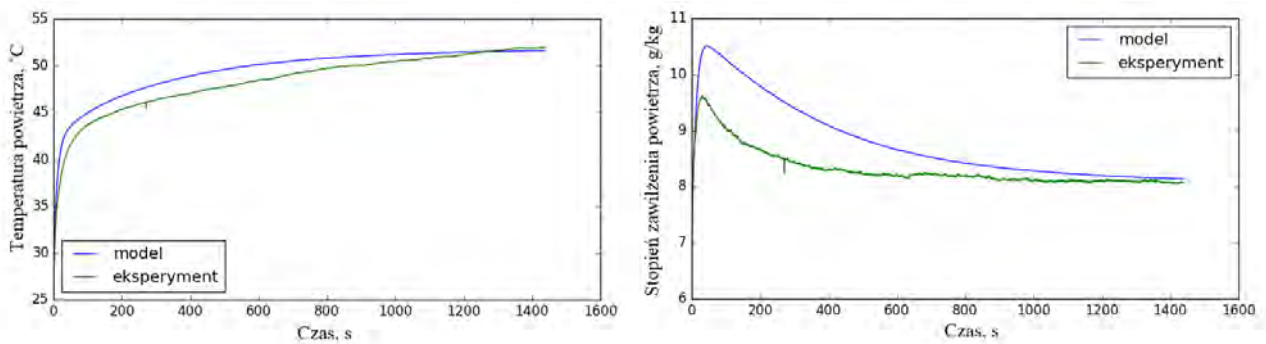
Rysunek 3.27: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 31.



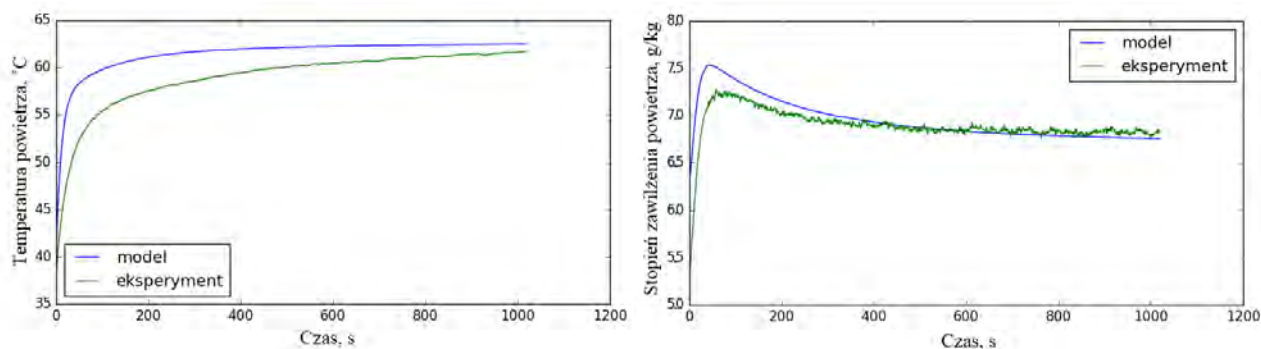
Rysunek 3.28: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 33.



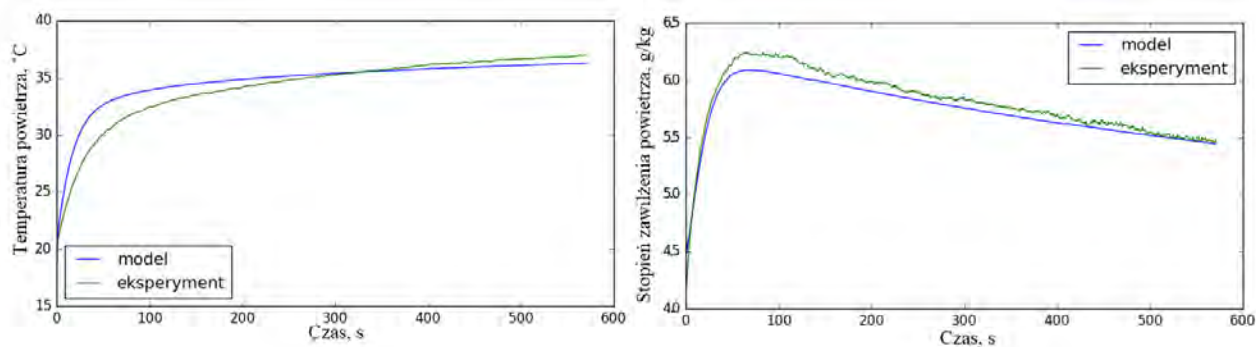
Rysunek 3.29: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 34.



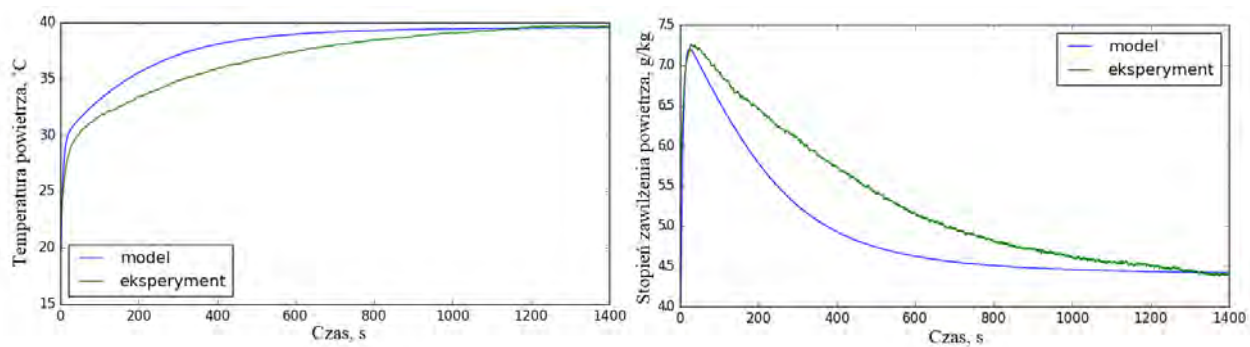
Rysunek 3.30: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 35.



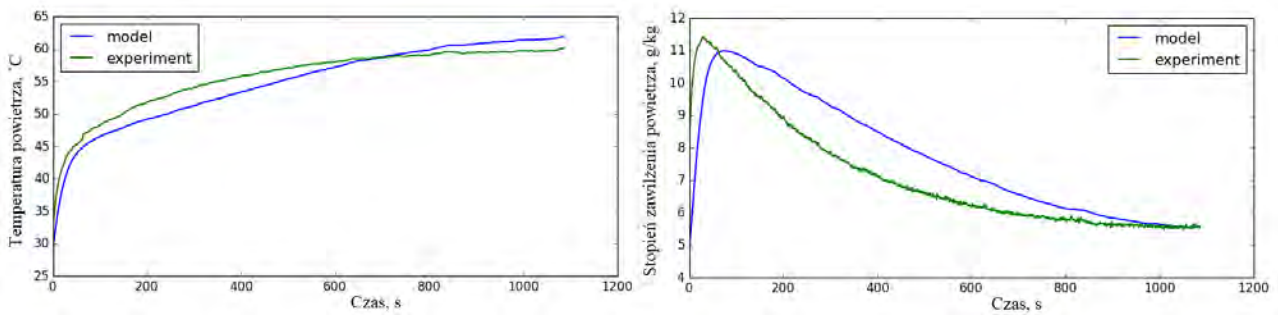
Rysunek 3.31: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 36.



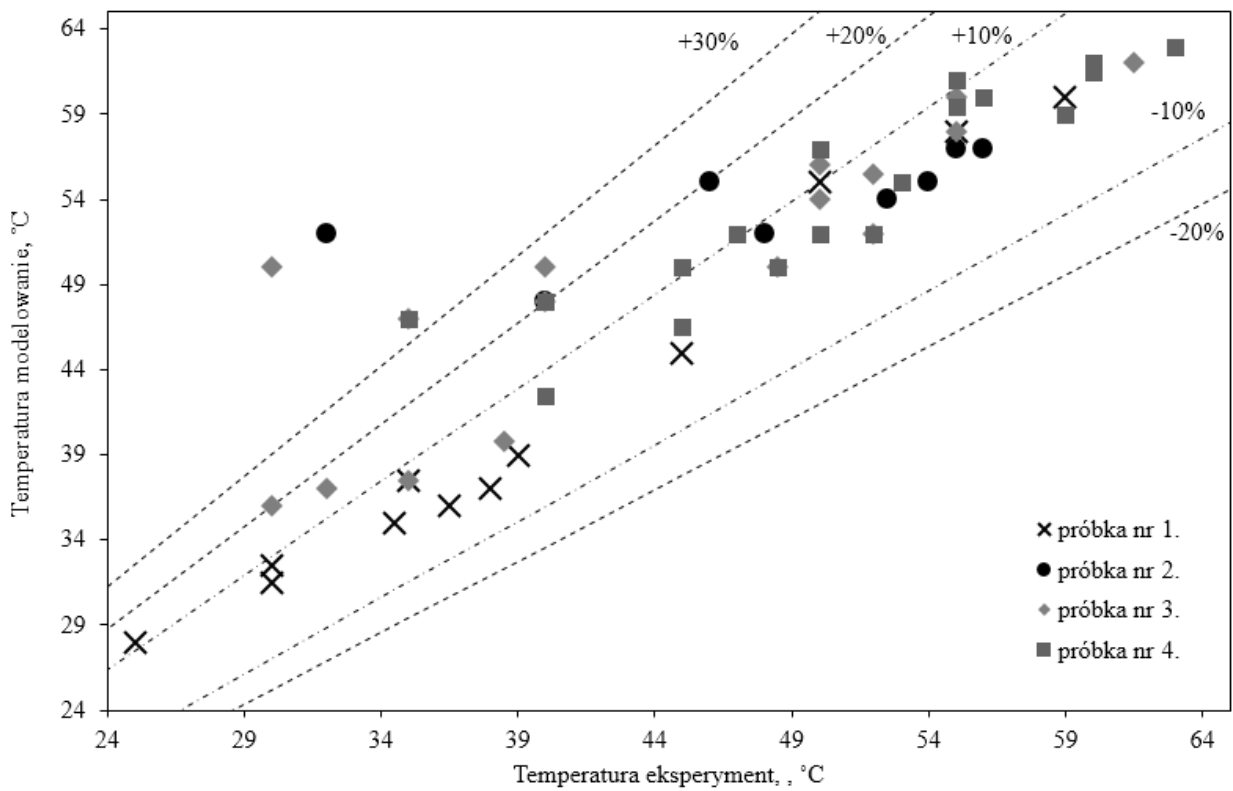
Rysunek 3.32: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 37.



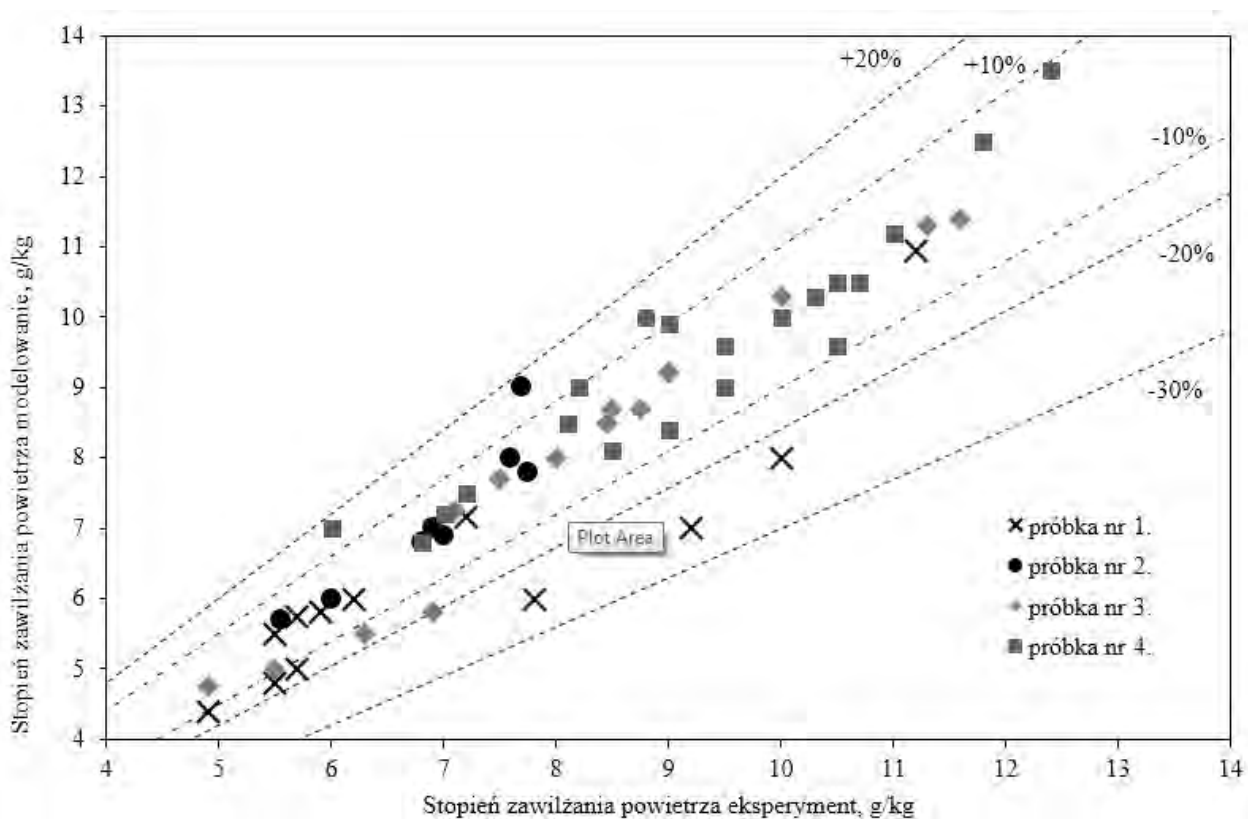
Rysunek 3.33: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 38.



Rysunek 3.34: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 39.



Rysunek 3.35: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 39.



Rysunek 3.36: Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych dla serii pomiarowej 39.

- Opracowany model umożliwia prowadzenie szeroko pojętych analiz optymalizacyjnych, egzergetycznych etc.

Rozdział 4

Efekt parametrów sterowania

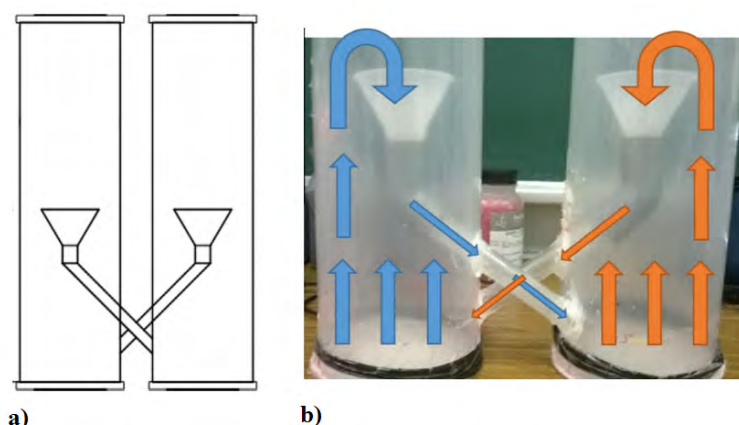
4.1 Wstęp

Niniejszy rozdział prezentuje analizę teoretyczną wpływu parametrów pracy adsorpcyjnego złoża fluidalnego (takich jak średnica ziarna sorbentu, czas przełączania złożeń, prędkość powietrza w złożu i wysokość napełnienia złoża) na efektywność adsorpcji/desorpcji oraz efektywność fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Przedstawione w niniejszym rozdziale analizy zostały zaprezentowane w artykule pt. "The influence of operating parameters on adsorption/desorption characteristics and performance of fluidised desiccant cooler" opublikowanym w czasopiśmie *Energies* wydawnictwa MDPI [89], oraz były przedmiotem prezentacji konferencyjnej i publikacji pokonferencyjnej pt. "Effect of operating conditions on performance of silica gel-water air-fluidised desiccant cooler" z ASEE2017 dostępnej w Web of Science [90].

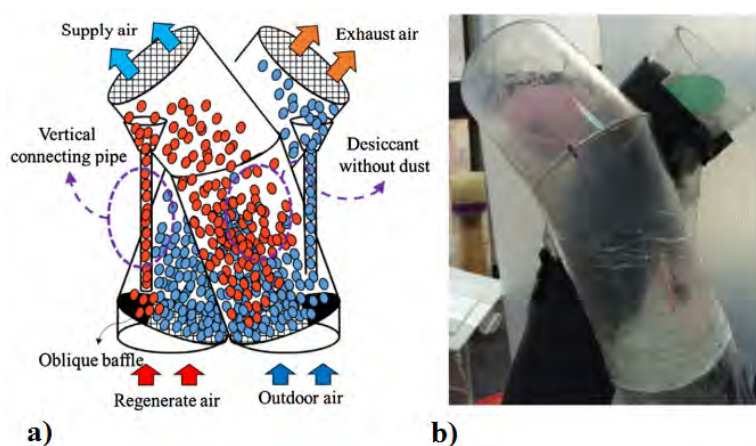
4.2 Przegląd literatury

Adsorpcyjne chłodziarki fluidalne ze złożami fluidalnymi wypełnionymi sorbentem mogą być alternatywą dla innych technologii adsorpcyjnych: chłodziarek adsorpcyjnych pracujących w niskim ciśnieniu [113, 26] lub chłodziarek o złożach stałych [21].

Technologia adsorpcyjnych chłodziarek fluidalnych jest we wczesnym, laboratoryjnym stadium rozwoju. Na chwilę obecną powstają prototypowe osuszacze fluidalne mające potwierdzić skuteczność tego rozwiązania w skali laboratoryjnej [20, 23, 65]. Autorzy [20] zaprezentowali prototypowy dwuzłożowy osuszacz cyrkulacyjny, który jest zaprezentowany na Rys. 4.1. Dzięki zastosowaniu połączeń między złożami zakończonych lejkami, sorbent samoistnie cyrkuluje między złożem adsorpcyjnym a desorpcyjnym. Ma to znaczący wpływ na uproszczenie systemu, ale wiąże się z utratą kontroli nad jednym z parametrów sterowania pracą złoża - czasem trwania adsorpcji i desorpcji dla poszczególnych ziaren. Na stanowisku wykonano szereg badań w zakresie temperatur desorpcji 40-60 °C, prędkości powietrza w złożu 4-6 m/s dla ziaren silikażelu większych niż 2mm. Według udostępnionych przez autorów danych teoretyczne wytworzenie 338 W mocy chłodniczej wymagało dostar-



Rysunek 4.1: [20]



Rysunek 4.2: [23]

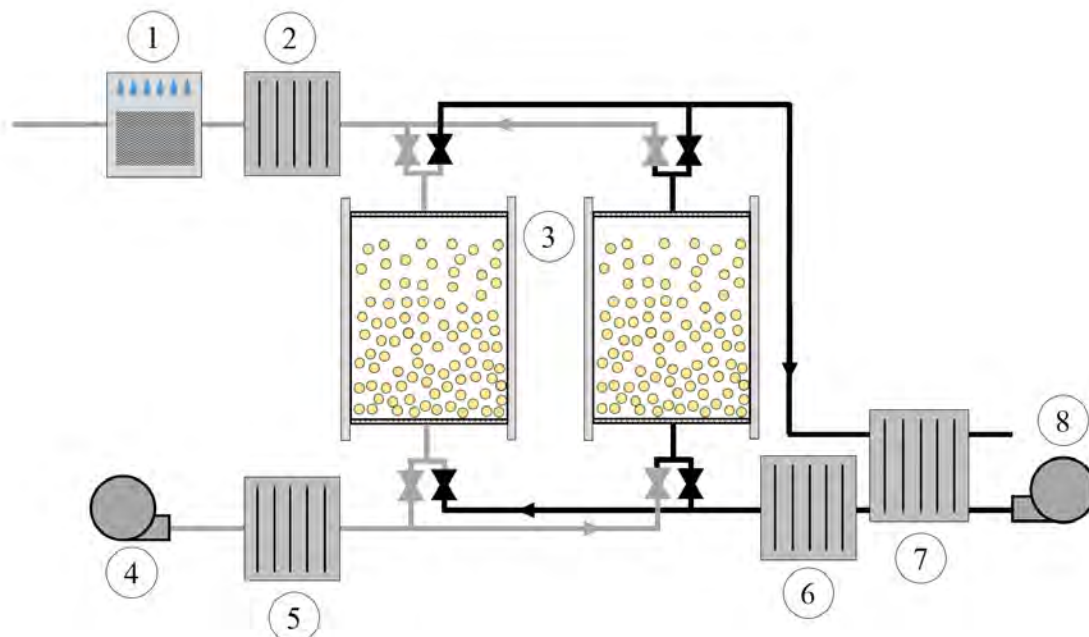
czenia około 1000 W mocy elektrycznej, co odpowiada COP elektrycznemu równemu około 0.33. Niesatysfakcjonujące wyniki skłoniły autorów do modyfikacji prototypu [23] do formy przedstawionej na Rysunku 4.2. Złoże zostało pochylone ograniczając w ten sposób spadek ciśnienia. Wprowadzone zmiany przyczyniły się do nieznacznej poprawy pracy prototypu: teoretyczne wytworzenie 367 W mocy chłodniczej (około 8,5% poprawy) kosztem 1000 W mocy elektrycznej. Kolejna modyfikacja [65] pozwoliła podnieść COP elektryczne o 40% w stosunku do rozwiązania pierwotnego. Wprowadzone zmiany mimo poprawy pracy nie zmieniają zasadniczego stanu rzeczy: w zaprezentowanej w [20, 23, 65] formie złoża fluidalne nie są konkurencyjne nie tylko wobec chłodziarek adsorpcyjnych, ale także chłodziarek sprężarkowych. Warto jednak zwrócić uwagę na osiągniętą w [20, 23] Właściwą Wydajność Chłodniczą SCP, która wyniosła odpowiednio 211 i 287 Wkg^{-1} . Osiągnięte SCP jest wyróżniające w porównaniu np. z niskociśnieniowymi chłodziarkami adsorpcyjnymi. Zdaniem autora zaprezentowana niesatysfakcjonująca praca osuszacza fluidalnego wynika z nieprawidłowego doboru

parametrów sterowania procesem: średnicy ziaren silikażelu, prędkości powietrza w złożu, wysokości zasypania złoża oraz braku kontroli nad czasem przełączania złoż. Przedstawione powyżej, nieudane próby budowy prototypów fluidalnych osuszaczy powietrza, kluczowego elementu fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej, wskazują na potrzebę dogłębnej analizy wpływu parametrów pracy na efektywność osuszania: wskazanie optymalnych zakresów pracy i osiąganych efektywności chłodniczych (zarówno pod względem cieplnym jak i elektrycznym). Niniejszy rozdział przedstawia analizę teoretyczną, bazującą na przedstawionym i zwalidowanym w Rodziale 3 modelu fizycznym, wpływu parametrów pracy osuszacza: średnica ziarna sorbentu (d_p), czas przełączania złoż (t_{sw}), prędkość w złożu podczas adsorpcji (U_{ads}) i desorpcji (U_{des}) oraz wysokość zasypania złoża (H_d) na zjawiska adsorpcji i desorpcji w złożu fluidalnym oraz wpływ na efektywność chłodniczą wyrażoną jako cieplne COP, elektryczne COP i Właściwa Wydajność Chłodnicza.

Efektywność chłodnicza fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej powinna być odniesiona do efektywności technologii alternatywnych: chłodziarek adsorpcyjnych [113] i chłodziarek sprężarkowych [77, 50]. Chłodziarki adsorpcyjne, przy podobnych parametrach zasilania, osiągają cieplne COP w zakresie od 0,5 do 0,6 [27]. Natomiast maksymalne SCP osiągane przez chłodziarki adsorpcyjne, również dla podobnych parametrów, wynosi około 300 W kg^{-1} [87]. Rozsądnym wymaganiem wobec fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych byłoby uzyskanie podobnego COP oraz dwa razy wyższego SCP. Z drugiej strony, chłodziarki sprężarkowe, zasilane wyłącznie energią elektryczną, osiągają elektryczne COP około 3 [77, 50]. Biorąc pod uwagę, że energia elektryczna w przypadku fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych jest jedynie pomocniczym źródłem zasilania, rozsądnym, zdaniem autora, jest osiągnięcie COP dwu- lub trzykrotnie wyższego niż w przypadku chłodziarek sprężarkowych. Spełnienie powyżej sformułowanych wymagań (COP cieplne porównywalne do chłodziarek adsorpcyjnych, SCP dwukrotnie wyższe niż chłodziarki adsorpcyjne oraz COP elektryczne trzykrotnie wyższe niż chłodziarki sprężarkowe) oznacza realną możliwość konkurowania z alternatywnymi technologiami chłodniczymi.

4.3 Modelowanie

Analiza została przeprowadzona dla prostej konfiguracji fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej przedstawionej na Rysunku 4.3. Chłodziarka składa się z dwóch, wypełnionych silikażelem, złoż adsorpcyjnych (3). Złoża są naprzemiennie zasilane gorącym lub chłodnym powietrzem za pomocą zaworów. Wentylator (4) wymusza przepływ powietrza przez chłodnicę (5). Schłodzone powietrze przepływając przez złoż (3) jest osuszane wskutek adsorpcji pary wodnej przez silikażel i podgrzewa się ze względu na wydzielające się ciepło adsorpcji. Następnie osuszone powietrze jest ponownie schładzane przez kolejną schłodnicę (2) i ostatecznie ochładza się w nawilżaczu (1). W tym samym czasie w drugim złożu, połączonym z obiegiem regeneracyjnym, zachodzi desorpcja. Wentylator (8) wymusza przepływ powietrza przez regenerację ciepła (7) i następnie nagrzewnicę powietrza (6). Gorące powietrze przepływa przez złoż desorbując zawartą w silikażelu wilgoć. Powietrze nawilża się wskutek desorpcji wody z silikażelu i ochładza na skutek odparowania tej wody. Zanim wilgotne powietrze opuszcza układ, przepływa jeszcze przez regenerację ciepła (7).



Rysunek 4.3: Schemat analizowanej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. 1 - Nawilzacz, 2 - Chłodnica powietrza, 3 - Złoża fluidalne, 4 - Wentylator, 5 - Chłodnica powietrza, 6 - Nagrzewnica powietrza, 7 - Regenerator ciepła, 8 - Wentylator.

Przedstawione w niniejszym rozdziale modelowanie zostało przeprowadzone w oparciu o zaprezentowanym w Rozdziale 3. model fizyczny, który pozwala określić parametry sorbentu w złożu i parametry powietrza opuszczającego złożo. Efektywność pracy fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej jest określona za pomocą cieplnego COP_{th} , elektrycznego COP_{el} i Właściwej Wydajności Chłodniczej SCP , które są zdefiniowane jako:

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} \quad (4.1)$$

$$COP_{el} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{N}_{el}} \quad (4.2)$$

$$SCP = \frac{\dot{Q}_0}{M_{sor}} \quad (4.3)$$

gdzie \dot{Q}_0 to maksymalna moc chłodnicza, jaka może być wygenerowana przez odparowanie wody do osuszonego powietrza, wyrażona jako:

$$\dot{Q}_0 = \frac{\Delta w H_{ev} M_{sor}}{t_{sw}} \quad (4.4)$$

\dot{Q}_h to moc cieplna jaka została wykorzystana w celu regeneracji złoża:

$$\dot{Q}_h = \Delta T_{mean} c_g \dot{m}_{des} \quad (4.5)$$

natomiast \dot{N}_{el} to moc elektryczna pobierana przez wentylatory:

$$\dot{N}_{el} = \Delta p A (U_{des} + U_{ads}) \frac{1}{\eta_{fan}} \quad (4.6)$$

Zakładając, że stopień zawilżenia powietrza na wlocie i wylocie z fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej się nie zmienia (moc chłodnicza jest jedynie efektem osuszenia powietrza, a nie wstępnego potencjału chłodniczego powietrza wynikającep z wilgotności względnej niższej niż 100%) oraz, że spadek ciśnienia powietrza na złożu jest wyrażony jako [21]:

$$\Delta p = H_d (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho_a) g \quad (4.7)$$

na podstawie Równań 4.1 - 4.7 efektywność chłodnicza może być wyrażona następująco:

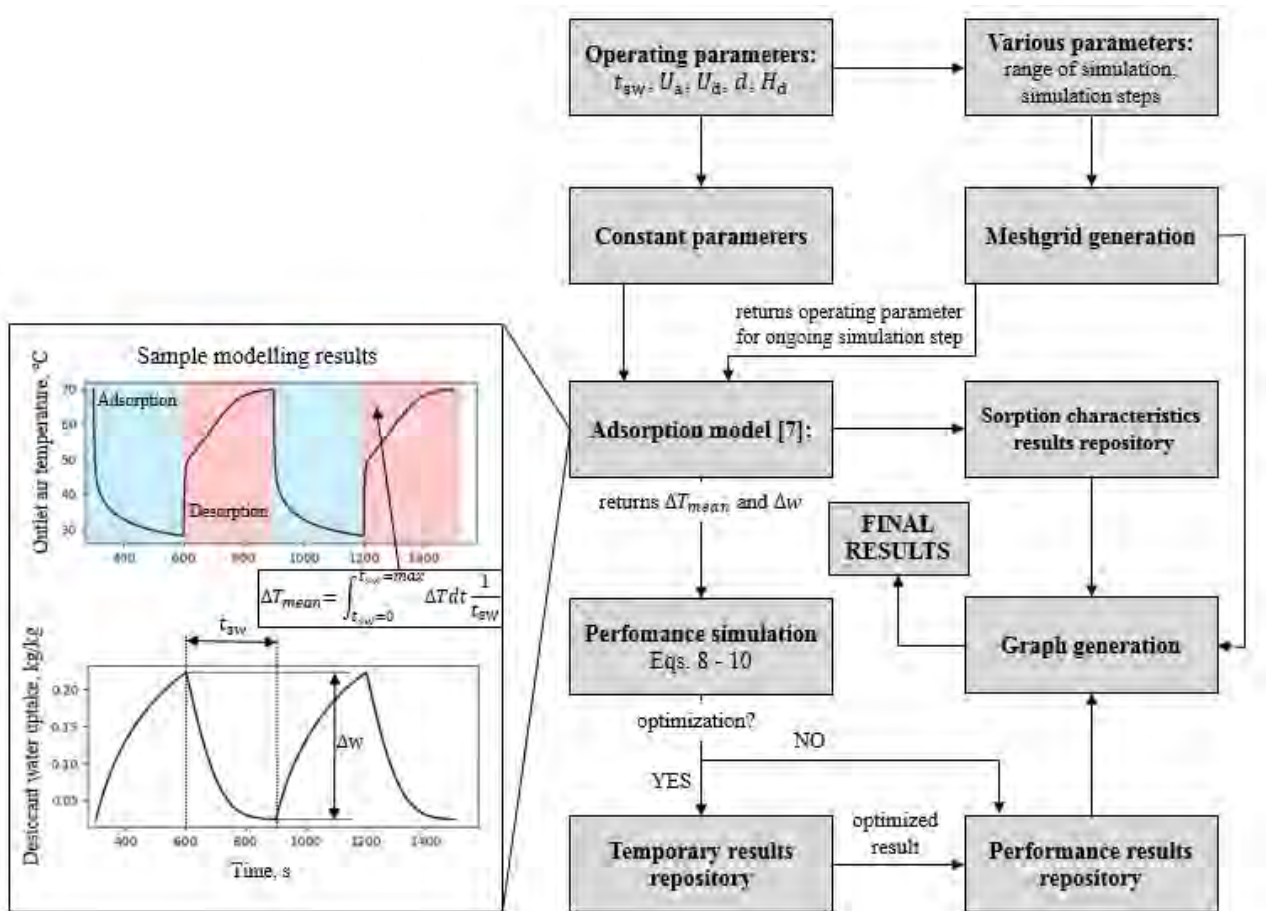
$$COP_{th} = \frac{\Delta w \rho_{sor} H_{ev} H_{sor}}{\rho_a \Delta T_{mean} U_{des} c_a t_{sw}} \quad (4.8)$$

$$COP_{el} = \frac{\Delta w H_{ev}}{(U_{ads} + U_{des}) g t_{sw} \eta_{fan}} \quad (4.9)$$

$$SCP = \frac{\Delta w H_{ev}}{t_{sw}} \quad (4.10)$$

gdzie Δw to amplituda stopnia zaadsorbowania w czasie pełnego cyklu pracy złoża (dwa razy czas przełączania złożeń t_{sw}), ΔT_{mean} to średni spadek temperatury powietrza na złożu podczas desorpcji.

Zaprezentowany powyżej model został zaimplementowany w skrypcie napisanym w języku PYTHON. Skrypt realizuje procedurę przedstawioną na Rysunku 4.4. Skrypt pozwala na modelowanie wpływu wybranych parametrów pracy nieefektywność chłodniczą fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Na podstawie wyboru parametrów pracy zmiennych podczas symulacji program generuje siatkę parametrów (jednego, dwóch lub trzech), dla których będą wykonywane kolejne obliczenia. Każde oczko siatki stanowi dane wejściowe dla kolejnej symulacji adsorpcji i desorpcji w złożu fluidalnym. Każda symulacja składa się z siedmiu cykli (4 desorpcji i 3 adsorpcji). Jest to najmniejsza ilość cykli eliminująca wpływ parametrów początkowych. Model dostarcza informacji nt. wartości parametrów wymaganych w równaniach 4.8 - 4.10: Δw oraz ΔT_{mean} . Efektywność chłodnicza dla danych parametrów pracy jest zapisywana w pamięci symulacji. Niektóre symulacje wymagają procedury optymalizacji np. symulacje wpływu średnicy ziarna. Dla każdego oczka siatki są wykonywane obliczenia w zadanym zakresie optymalizowanego parametru (zazwyczaj czasu przełączania złożeń t_{sw}) i wartość najwyższa jest zapisana w pamięci symulacji. Po zakończeniu obliczeń dla wszystkich oczek siatki generowane są wykresy. Pełna symulacja wpływu parametru/ parametrów pracy składa się z setek tysięcy pojedynczych symulacji. Czas trwania symulacji, w zależności od parametru, wynosił



Rysunek 4.4: Ogólny schemat procedury realizowanej przez wykorzystane skrypty.

od godzin do nawet paru dni. Wszystkie wykorzystane w niniejszych obliczeniach skrypty stanowią załączniki do niniejszej pracy (Załączniki 4.1-4.9).

Efektywność chłodnicza fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej była zamodelowana z zakresie parametrów pracy przedstawionych w Tabeli 4.1. Ze względu na bardzo dużą ilość zmiennych, temperatura adsorpcji, desorpcji oraz stopień zawiżenia powietrza były stałe i wynosiły odpowiednio $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $12\text{ }gkg^{-1}$.

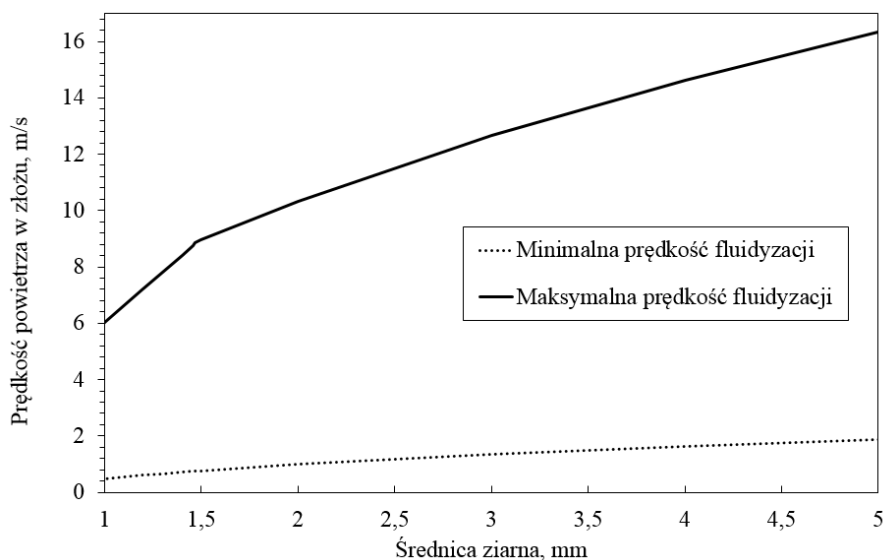
4.4 Wyniki i dyskusja

4.4.1 Wpływ średnicy ziarna adsorbentu

Pierwszym z analizowanych parametrów pracy jest średnica ziarna sorbentu. W przypadku złoża fluidalnego ziarna adsorbentu są po prostu luźno usypane w złożu, co powoduje, że pewne ograni-

Tabela 4.1: Zakres parametrów pracy użytych w symulacjach.

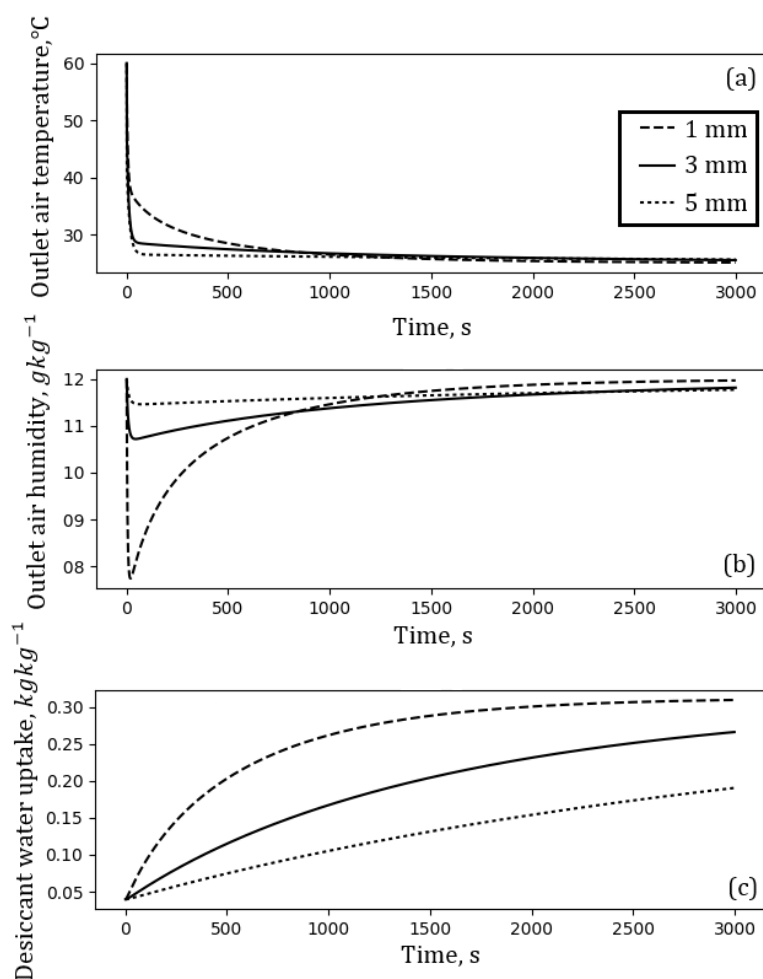
Parametr pracy złoża	d_p, mm	t_{sw}, s	$U_{ads}, m s^{-1}$	$U_{des}, m s^{-1}$	H_d, cm
Średnica ziarna sorbentu (Rysunek 4.6)	1, 3, 5	3000	2	2	5
Średnica ziarna sorbentu (Rysunek 4.7)	1, 3, 5	2000	2	2	5
Średnica ziarna sorbentu (Rysunek 4.8)	1- 5	optymalne	2	2	5
Czas przełączania złożów (Rysunek 4.9)	1, 3, 5	200 - 1500	2	2	4
Czas przełączania złożów (Rysunek 4.10)	1	200, 350, 650	2	2	4
Prędkość powietrza w złożu podczas adsorpcji (Rysunek 4.11)	1	2000	2, 4, 6	-	4
Prędkość powietrza w złożu podczas desorpcji (Rysunek 4.12)	1	1500	-	2, 4, 6	4
Prędkości powietrza w złożach (Rysunek 4.13)	1	optymalne	1 - 6	1 - 6	4
Wysokość zasypania złoża (Rysunek 4.14)	1	3000	2	-	1, 5, 10
Wysokość zasypania złoża (Rysunek 4.15)	1	optymalne	2	-	1, 5, 10
Wysokość zasypania złoża i prędkości powietrza w złożach (Rysunek 4.16)	1	optymalne	2 - 6	2	1 - 6



Rysunek 4.5: Minimalna i maksymalna prędkość fluidyzacji w zależności od średnicy ziarna adsorbentu [116, 20].

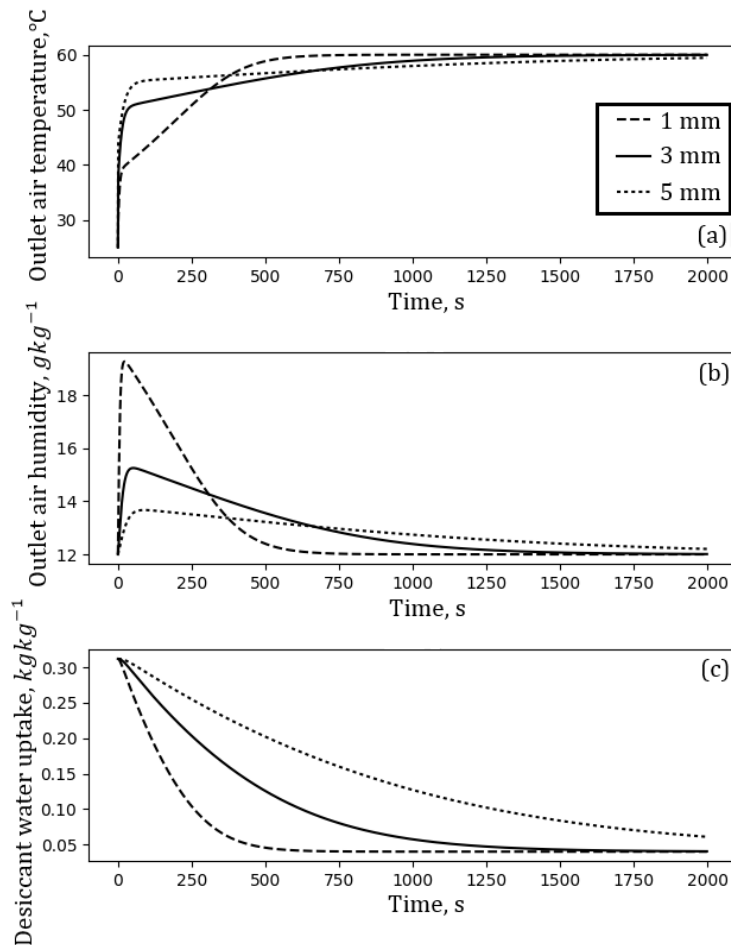
czenia związane z kinetyką procesów adsorpcji (które w dużym stopniu zależą od średnicy ziarna adsorbentu) nie występują, np. kontaktowy opór cieplny między źródłem ciepła a ziarnami adsorbentu czy opory przepływu w warstwie sypkich ziaren [10, 94]. Z drugiej strony, średnica ziaren sorbentu wpływa na minimalną [20] i maksymalną prędkość [116] przy której ziarna w złożu są fluidyzowane. Zakres występowania fluidyzacji, ograniczony minimalną i maksymalną prędkością fluidyzacji jest przedstawiony na Rysunku 4.5. Ziarna silikażelu o średnicy 5 mm podlegają fluidyzacji w szerokim zakresie prędkości powietrza: od około 2 do 16 ms^{-1} . Poniżej prędkości minimalnej złożo jest nieruchome (zachowuje się jak złożo stałe), powyżej ziarna są wywiewane ze złoża (zjawisko tzw. transportu pneumatycznego [116]). Im mniejsza jest średnica ziarna silikażelu tym węższy staje się zakres fluidyzacji. Ziarna o średnicy 1 mm podlegają fluidyzacji jedynie w zakresie 1 do 6 ms^{-1} . W przypadku mniejszych ziaren, które nie były analizowane zakres fluidyzacji jest prawdopodobnie jeszcze bardziej ograniczony.

Wpływ średnicy ziarna silikażelu na dynamikę adsorpcji pary wodnej podczas fluidyzacji jest przedstawiony na Rysunku 4.6. Adsorpcja została zamodelowana dla średnic ziarna sorbentu 1, 3 oraz 5 mm. Pozostałe parametry sterowania były dobrane zgodnie z Tabelą 4.1. Na Rysunku 4.6a widoczny jest znaczący wpływ średnicy ziarna silikażelu na temperaturę powietrza na wylocie ze złoża. Zmniejszenie średnicy ziarna przyspiesza początek adsorpcji - moment, w którym temperatura powietrza przestaje gwałtownie spadać, ze względu na wydzielające się ciepło adsorpcji. Adsorpcja rozpoczyna się gdy temperatura silikażelu w złożu wynosi około 40°C. Dla większych ziaren adsorpcja zaczyna się po osiągnięciu niższych temperatur. Pozwala to również przypuszczać, że użycie mniejszego ziarna adsorbentu umożliwia efektywne wykorzystanie źródła ciepła o niższych potencjałach (niższej temperaturze). Zmniejszenie ziarna silikażelu wpływa również pozytywnie na osuszenie powietrza, co jest przedstawione na Rysunku 4.6b. Początkowo powietrze suszone w złożu wypełnionym ziarnami 1 mm osiąga stopień zawilżenia poniżej 8 gkg^{-1} , przy około 11 gkg^{-1} dla złoża ziaren 3 mm. Większa dynamika adsorpcji w przypadku mniejszych ziaren znacząco skraca czas osiągnięcia stanu równowagi adsorpcyjnej, co jest widoczne na Rysunku 4.6c. Ziarna 1mm osiągają równowagę po około 2000 s. W tym czasie ziarna 3 i 5 mm są w stanie zaadsorbować odpowiednio około 80 i 50% ilości pary wodnej wynikającej z równowagi adsorpcyjnej. Podobny wpływ na dynamikę można zaobserwować w przypadku desorpcji (Rysunek 4.7). Mniejsza średnica ziaren sorbentu w złożu znacząco poprawia dynamikę procesu desorpcji co skutkuje rozpoczęciem desorpcji przy niższej temperaturze (Rysunek 4.7a), wyższym, początkowym stopniem zawilżenia powietrza (Rysunek 4.7b) oraz prawie dwukrotnie krótszym czasem pełnej desorpcji niż dla ziaren 3mm (Rysunek 4.7c). Na uwagę zasługują również różnica między całkowitym czasem adsorpcji i desorpcji ziaren silikażelu o średnicy 1mm: odpowiednio 2000 s i 600s. Przeanalizowano również wpływ średnicy ziarna silikażelu na efektywność chłodniczą fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej, co jest przedstawione na Rysunku 4.8. W celu wyeliminowania wpływu doboru czasu przełączania złoża na uzyskane wyniki symulacje zostały wykonane z dodatkową optymalizacją czasu przełączania złoża opisaną w Podrozdziale "Modelowanie". Przedstawione wyniki zostały uzyskane dla indywidualnych optymalnych czasów przełączania złoża (czas przełączania złoża, dla którego jest uzyskana maksymalna wartość SCP i COP_{el}). Ciepłe COP, przedstawione na Rysunku 4.8a, uzyskane dla optymalnych czasów przełączania złoża, nie zmie-



Rysunek 4.6: The influence of the desiccant particle diameter on adsorption characteristics.

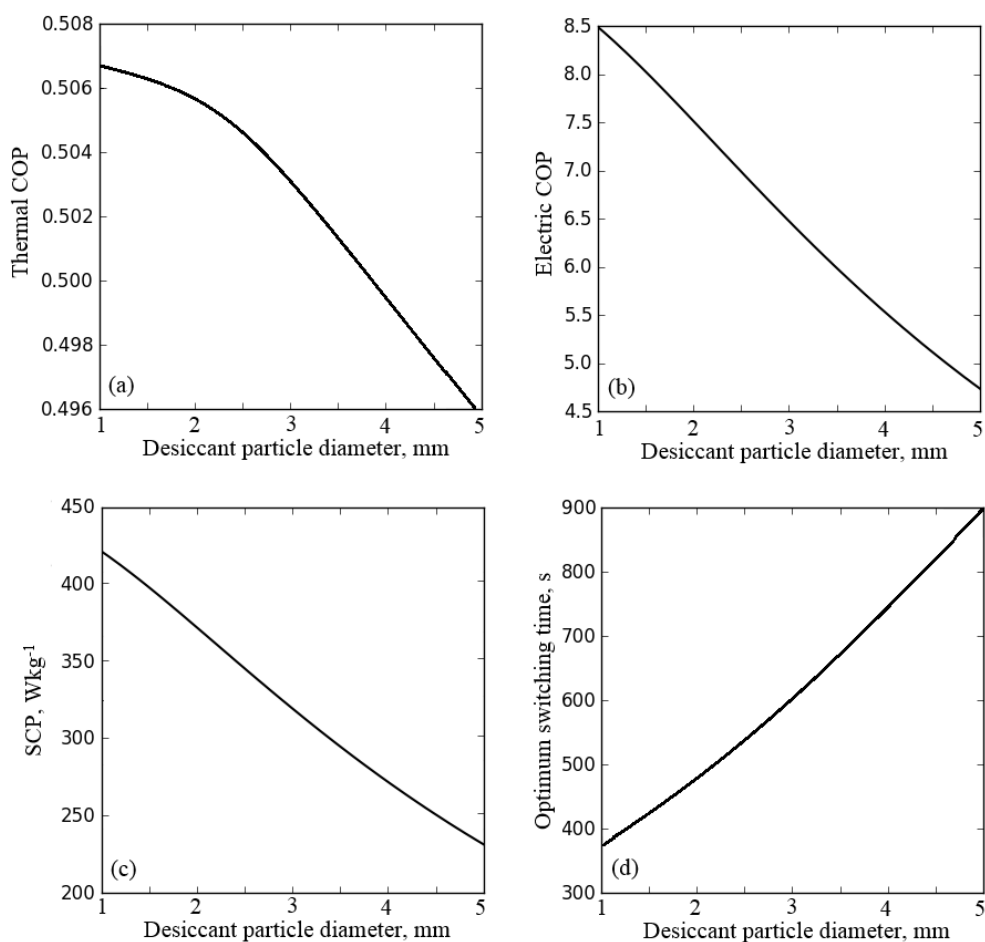
nia się znacząco w zależności od średnicy ziaren silikażelu - wynika to z istoty przyjętego kryterium optymalizacji. Większość efektów zmiany średnicy ziarna jest manifestowana zmianą wartości SCP oraz COP_{el} (odpowiednio Rysunki 4.8b i 4.8c). Przy zmniejszeniu średnicy ziarna silikażelu z 5 do 1 mm , SCP i COP_{el} prawie się podwajają. Jest to związane ze skróceniem się optymalnego czasu przełączania złożeń o ponad połowę (Rysunek 4.8d). Zmniejszenie średnicy ziarna ma znaczący wpływ na poprawę efektywności chłodniczej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej, a także stopień osuszenia powietrza (co ma wpływ, koniec końców, na poziom temperatury uzyskanej mocy chłodniczej). Z drugiej strony, zmniejszenie średnicy silikażelu prowadzi do ograniczenia prędkości powietrza w złożu i w przypadku ziaren poniżej 1 mm może skutkować ograniczeniem wydajności chłodniczej.



Rysunek 4.7: The influence of the desiccant particle diameter on desorption characteristics.

4.4.2 Wpływ czasu przełączania ziół

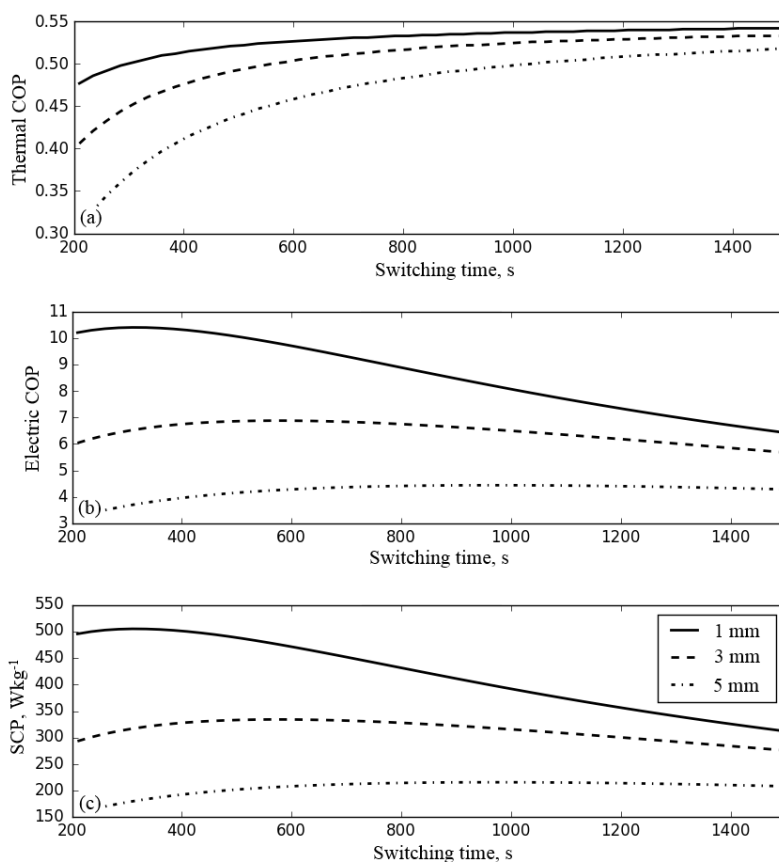
Wpływ czasu przełączania ziół na efektywność chłodniczą FCA, prezentowany na Rysunku 4.9, był analizowany w zakresie 200 - 1500 s. Analizę przeprowadzono dla średnic silikażelu 1,3 oraz 5 mm. Dla każdego z przypadków, przy pewnym czasie przełączania ziół t_{sw} (wspomnianym już wcześniej optymalnym czasie przełączania ziół), elektryczne COP (Rysunek 4.9b) i SCP (Rysunek 4.9c) osiągają wartości maksymalne. Im mniejsza średnica ziaren w ziołu, tym krótszy jest optymalny czas przełączania ziół: około 350s, 600 s i 1200s odpowiednio dla ziaren 1mm, 3 mm i 5 mm. Z kolei cieplne COP jest nieznacznie wyższe dla mniejszych ziaren silikażelu i rośnie w miarę wydłużania czasu przełączania ziół, co zostało wyjaśnione w [88]. W pierwszej kolejności ciepło dostarczane do zioła jest zużyte na podwyższenie temperatury silikażelu, a dopiero potem na regenerację zioła. W przypadku układów z regeneracją ciepła, powyżej pewnego czasu przełączania cykli cieplne COP zacznie spadać, wobec braku dalszego efektu regeneracji i ponoszenia ciągłej utraty ciepła podczas



Rysunek 4.8: The variation of thermal COP, electric COP and SCP vs. desiccant particle diameter obtained for optimum switching time.

regeneracji. Ten problem nie występuje (lub występuje w stopniu mniejszym) w niskociśnieniowych chłodziarkach adsorpcyjnych.

Wpływ czasu przełączania ziół na przebieg adsorpcji oraz desorpcji jest przedstawiony na Rysunku 4.10. Symulacja została wykonana dla ziaren silikażelu o średnicy 1 mm dla trzech wartości czasu przełączania ziół: 350 s (według Rysunku 4.9 optymalnego czasu przełączania ziół), 200 s i 650 s. Czas przełączania ziół wpływa na amplitudę stopnia zaadsorbowania silikażelu w czasie pełnego cyklu pracy zióła (Rysunek 4.10c). W czasie 650 s zióło jest praktycznie całkowicie wygrzane i zregenerowane - przez ostatnie 200 s spadek stopnia zaadsorbowania jest niewielki i odbywa się przy stałej temperaturze. Nie jest to natomiast wystarczający czas do pełnej adsorpcji. Im krótszy czas przełączania ziół tym mniejsza amplituda stopnia zaadsorbowania silikażelu. Rysunki 4.10b i 4.10c wskazują na korelacje pomiędzy minimalnym stopniem zaadsorbowania pod koniec regeneracji zióła

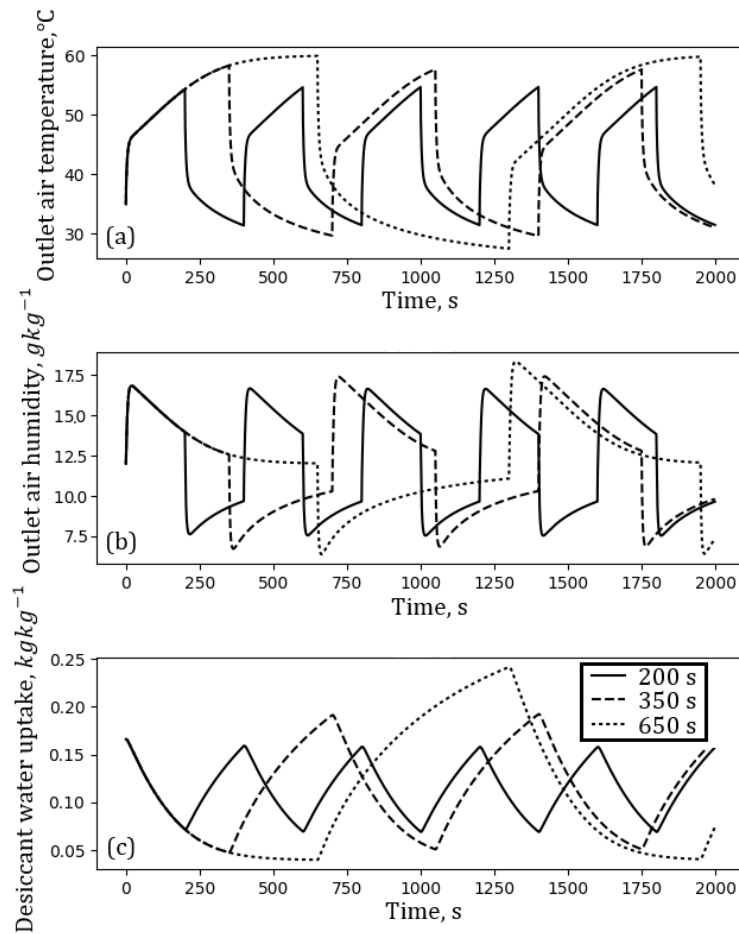


Rysunek 4.9: Wpływ czasu przełączania złożeń na efektywność chłodniczą FCA: a) Ciepłoty COP, b) Elektryczny COP, c) Właściwa Wydajność Chłodnicza

i początkowym stopniem zawilżenia osuszanego powietrza. Wpływ jest tym mniejszy im bliżej stanu równowagi jest silikażel pod koniec regeneracji. Z drugiej strony, wpływ wydłużenia czasu przełączania złożeń na maksymalny stopień zaadsorbowania jest znaczny i wynika z niższej kinetyki procesów adsorpcji. Rozwiązaniem, które mogłoby przyczynić się do poprawy efektywności chłodniczej FCA, jest zastosowanie więcej niż dwóch złożeń. Pozwoli to na wydłużenie czasu adsorpcji w stosunku do czasu desorpcji. Podobne rozwiązanie jest z powodzeniem stosowane w niskociśnieniowych chłodziarkach adsorpcyjnych i prowadzi do zauważalnego wzrostu cieplnego COP [27].

4.4.3 Wpływ prędkości powietrza w złożu

Innym rozwiązaniem kwestii różnic między kinetyką podczas adsorpcji i desorpcji jest zmiana prędkości powietrza w złożu podczas obu procesów. Z tego względu prędkość powietrza podczas adsorpcji i desorpcji jest analizowana osobno. Modelowanie zostało wykonane dla parametrów podanych w Tabeli 4.1: średnicy ziaren silikażelu 1 mm , wysokości zasypania złożeń 0.04 m i w zakresie

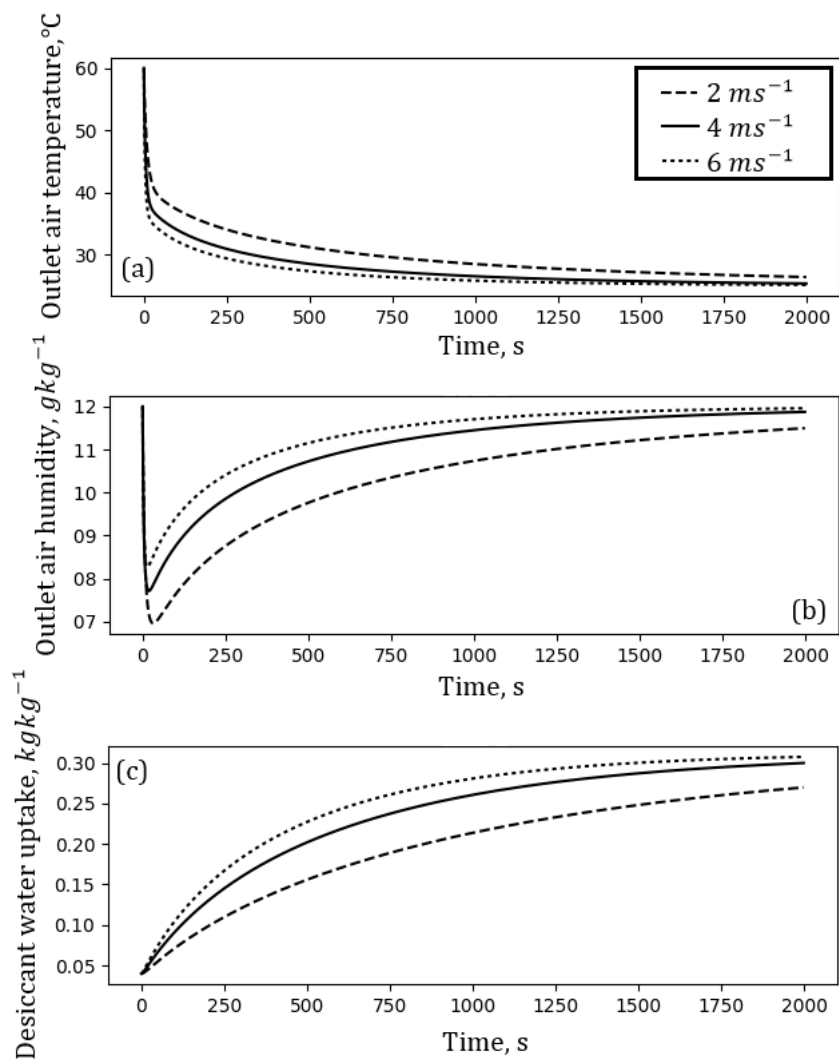


Rysunek 4.10: Wpływ czasu przełączania złożeń na przebieg adsorpcji i desorpcji.

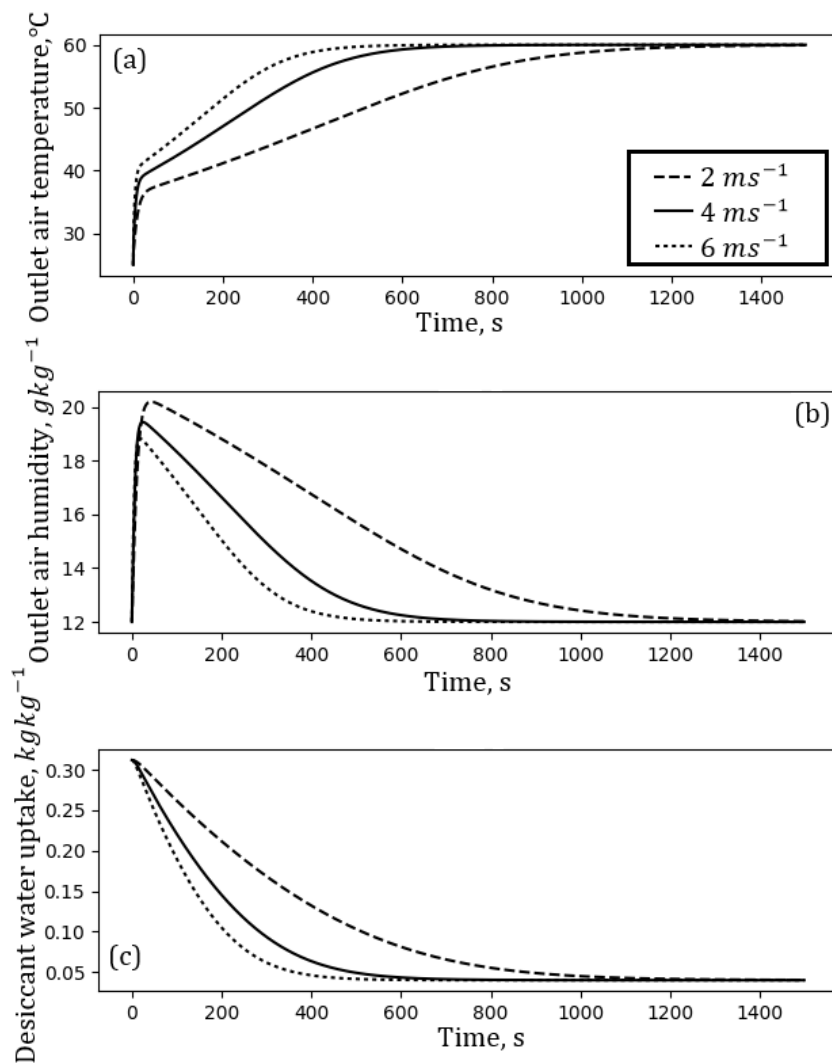
prędkości powietrza w złożu od 1 do 6 m s^{-1} . Symulacje były wykonywane z optymalizacją czasu przełączania złożeń. Wpływ prędkości powietrza w złożu fluidalnym (2 m s^{-1} , 4 m s^{-1} i 6 m s^{-1}) na przebieg adsorpcji jest przedstawiony na Rysunku 4.11.

Wzrost prędkości powietrza podczas adsorpcji zwiększa dynamikę tego procesu (4.11c). Mimo tego, ze względu na proporcjonalny wzrost strumienia objętości przepływającego przez złożę, wzrasta początkowy stopień zawilżenia powietrza z 7 g kg^{-1} , przy prędkości powietrza 2 m s^{-1} , do około 8.5 g kg^{-1} przy prędkości powietrza 6 m s^{-1} . Mimo tego, przy większych prędkościach adsorpcja zaczyna się przy niższej temperaturze (Rysunek 4.11c).

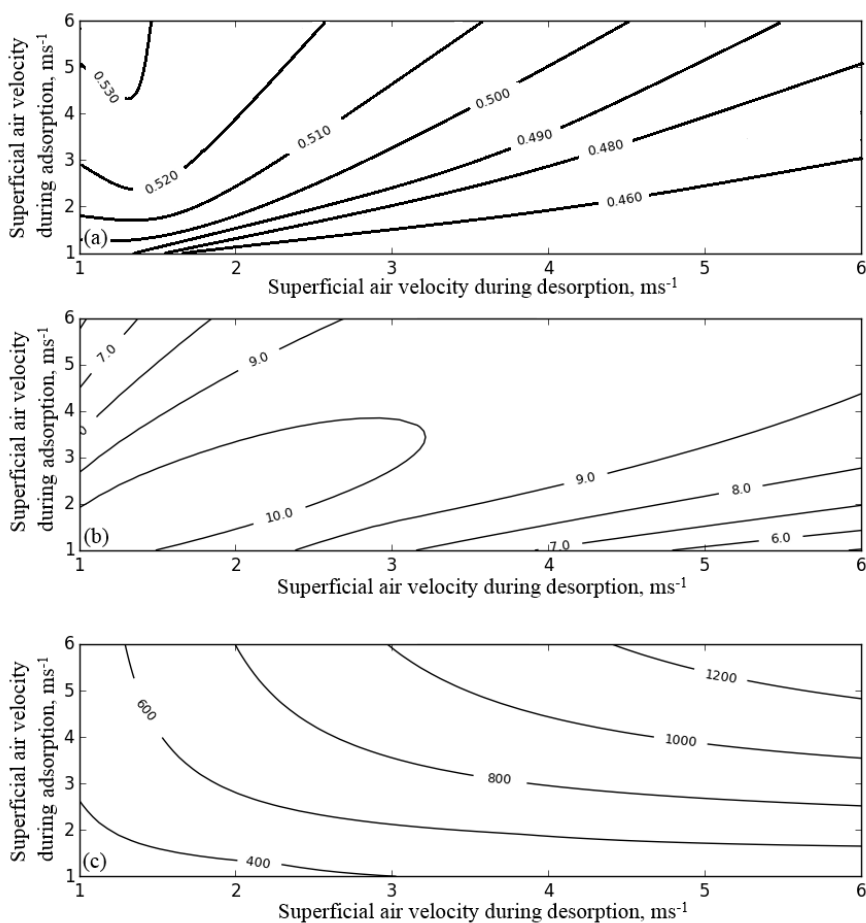
Podobny jest wpływ prędkości powietrza w złożu na przebieg desorpcji, który jest przedstawiony na Rysunku 4.12. Wyższa prędkość powietrza intensyfikuje procesy desorpcji, ale nie na tyle by utrzymać początkowy wzrost stopnia zawilżenia powietrza (Rysunek 4.12b). Mimo wyższej intensywności desorpcji, temperatura złoża rośnie znacznie szybciej ze względu na trzykrotnie wyższy



Rysunek 4.11: Wpływ prędkości powietrza w złożu na przebieg adsorpcji



Rysunek 4.12: Wpływ prędkości powietrza w złożu na przebieg desorpcji



Rysunek 4.13: Wpływ prędkości powietrza w złożach na: a) Ciepłne COP, b) Elektryczne COP, c) Właściwą Wydajność Chłodniczą.

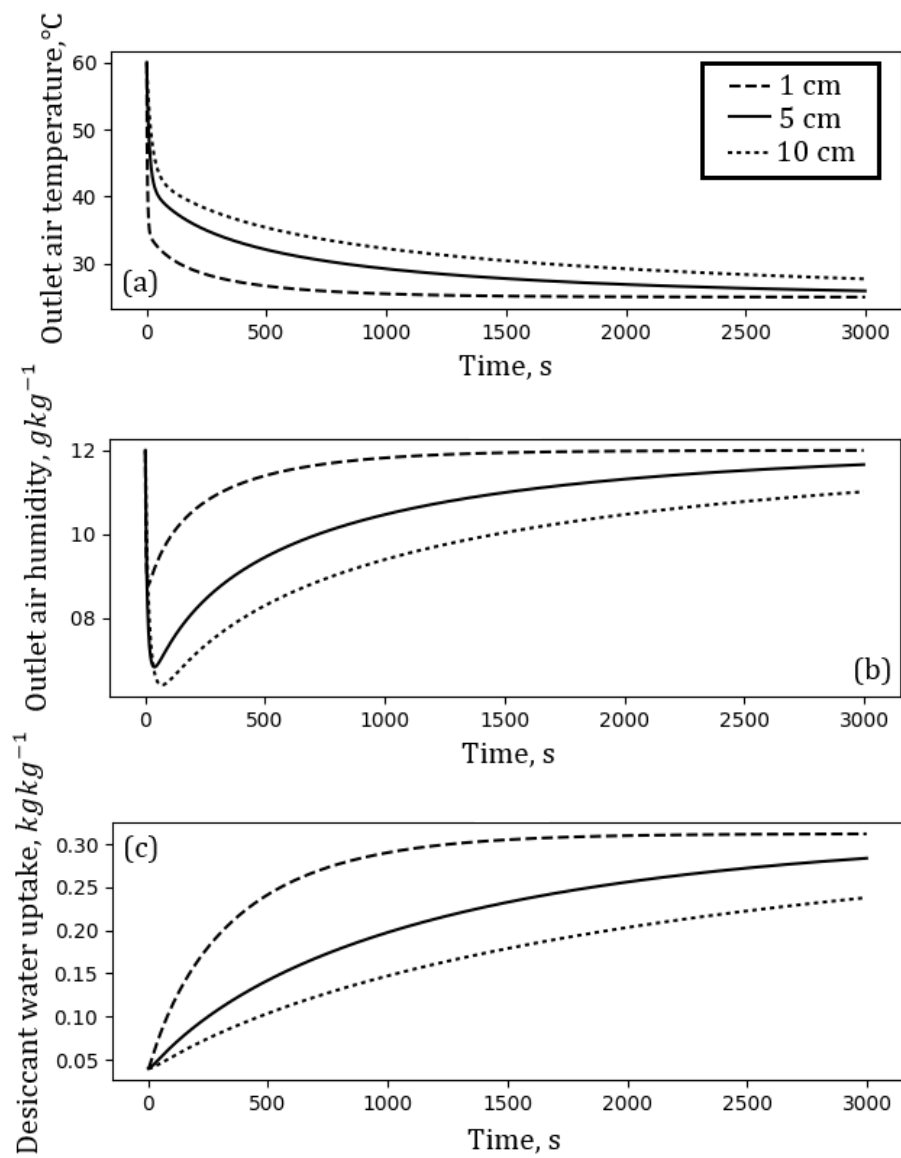
strumień objętości gorącego powietrza przepływający przez złożę (Rysunek 4.12a) Przeanalizowano również wpływ prędkości powietrza na efektywność chłodniczą FCA, co jest przedstawione na Rysunku 4.13. Ciepłne COP, którego zależność od prędkości powietrza w złożu jest przedstawiona na Rysunku 4.13a, osiąga maksymalne wartości dla wysokiej prędkości powietrza w złożu podczas adsorpcji i niskim podczas desorpcji co odpowiada wydłużaniu czasu trwania adsorpcji (w tym przypadku intensyfikację adsorpcji) i ograniczenie czasu desorpcji. Najniższe ciepłne COP jest uzyskane dla przypadku przeciwnym: przy niskiej prędkości adsorpcji i wysokiej prędkości adsorpcji. Elektryczne COP (Rysunek 4.13b) jest najwyższe w przypadku gdy prędkości powietrza podczas adsorpcji i desorpcji są podobne i nie przekraczają 3 m s^{-1} . Niemniej jednak przy podobnych prędkościach powietrza podczas adsorpcji i desorpcji elektryczne COP wynosi powyżej 9 w całym analizowanym zakresie. SCP rośnie wraz z intensywnością procesów sorpcji, a więc ze wzrostem prędkości powietrza. Przedstawione zależności wskazują, że maksymalizacja jednego z parametrów opisujących

efektywność chłodniczą zazwyczaj odbywa się kosztem innego. Przykładowo: uzyskanie wysokiego cieplnego COP, odbywa się kosztem elektrycznego COP i SCP. Warto zwrócić również uwagę, że praca instalacji przy niskich prędkościach podczas adsorpcji i wysokich podczas desorpcji jest nieefektywna pod względem każdego z parametrów efektywności chłodniczej i należy unikać takich nastaw.

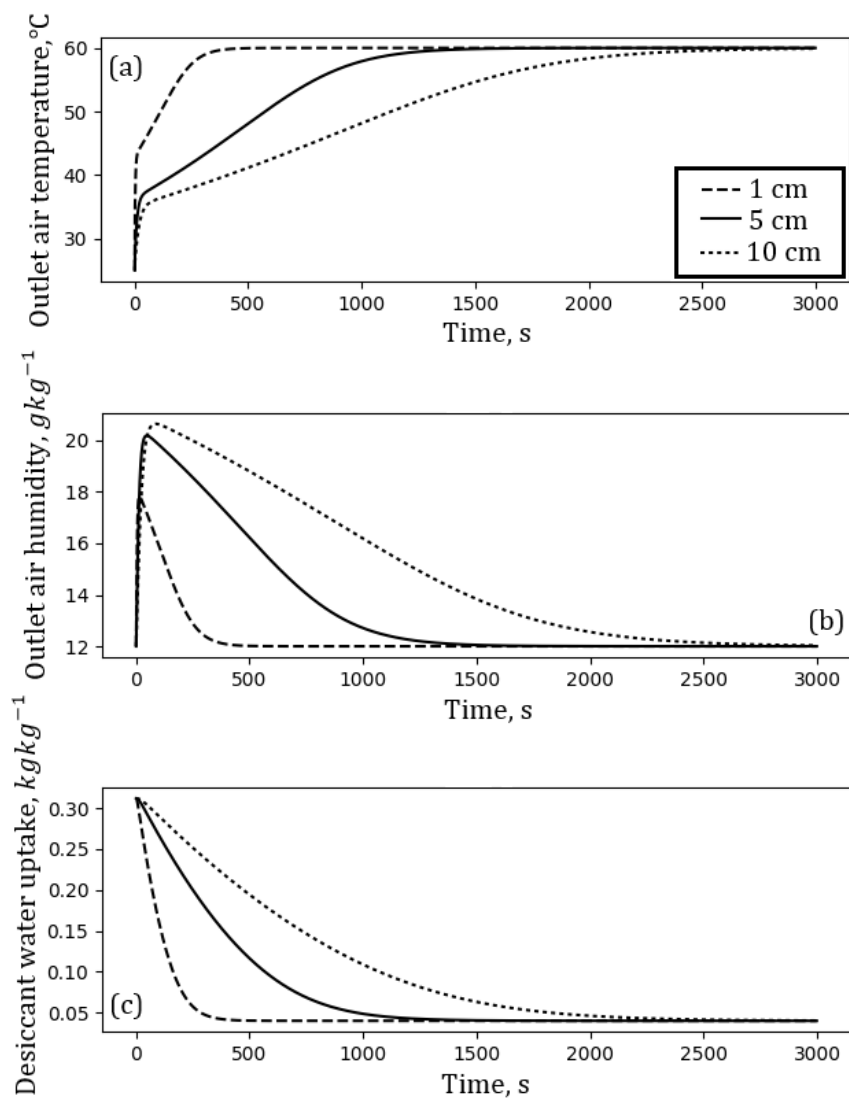
4.4.4 Wpływ wysokości zasypania złoża

Ostatnim z analizowanych parametrów pracy FCA jest wysokość zasypania złoża silikażelem H_{sor} . Wysokość zasypania złoża jest bezpośrednio związana z ilością adsorbentu w złożu i pozwala na analizę wpływu tego parametru niezależnie od pola przekroju złoża. Wpływ wysokości zasypania złoża był analizowany w zakresie od 0.01 do 0.1 m. Pozostałe parametry były dobrane zgodnie z Tabelą 4.1. Rysunek 4.14 przedstawia wpływ wysokości zasypania złoża na przebieg adsorpcji. Większa H_{sor} , równoznaczna z większą masą silikażelu w złożu, powoduje, że powietrze jest lepiej i dłużej osuszane (Rysunek 4.14b). Zwiększenie masy silikażelu podnosi również temperaturę powietrza na wylocie ze złoża (Rysunek 4.14a).

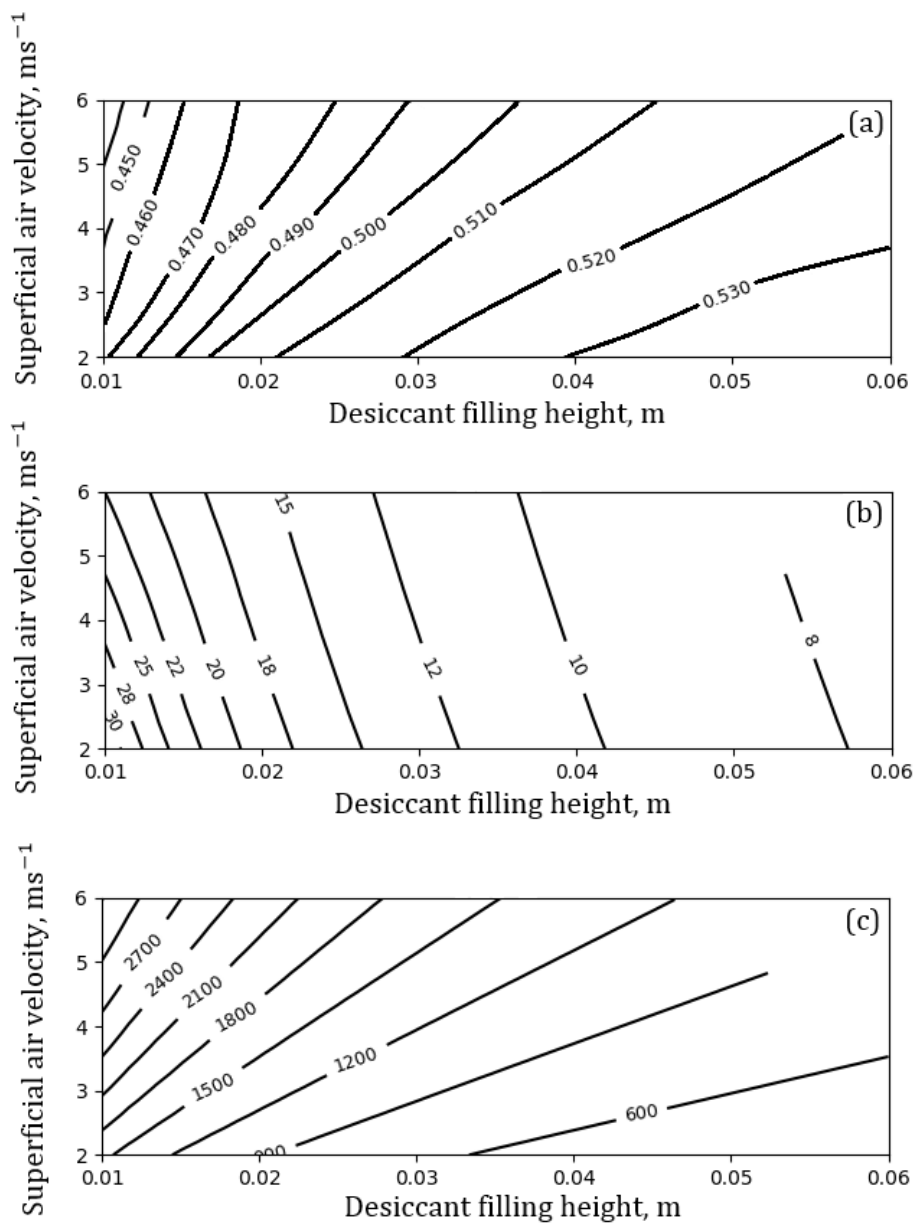
Podczas desorpcji (Rysunek 4.15) większa masa silikażelu, odpowiadająca większej wysokości zasypania złoża, obniża temperaturę powietrza na wylocie ze złoża, jednocześnie podwyższając stopień zawilżenia powietrza. Zwiększona masa umożliwia również znacznie dłuższe prowadzenie procesu desorpcji: około 2200 s przy H_{sor} wynoszącym 0.1 m i około 400 s przy H_{sor} 0.01 m. Przeanalizowano także wpływ wysokości zasypania złoża i prędkości powietrza w złożu (przyjęto, że podczas adsorpcji i desorpcji prędkości są równe) na efektywność chłodniczą FCA, której wyniki są przedstawione na Rysunku 4.16. Wysokość zasypania złoża ma zasadniczy wpływ na elektryczne COP - spadek ciśnienia na złożu jest wprost proporcjonalny do wysokości zasypania złoża. Uzyskanie COP_{el} powyżej 10 wymaga ograniczenia wysokości zasypania złoża do poniżej 4 cm. Ograniczenie H_{sor} ma pozytywny wpływ na uzyskiwane SCP. Wynika to ze zwiększenia strumienia objętości, który jest ściśle powiązany ze strumieniem ciepła dostarczanym do złoża, przepływającym przez złożę w stosunku do ilości adsorbentu w złożu. Z drugiej strony, zwiększenie wysokości zasypania złoża prowadzi do wzrostu cieplnego COP do wartości powyżej 0.53. Zwiększenie wysokości zasypania złoża przyczynia się do wzrostu zapotrzebowania na ciepło adsorbentu, które jest proporcjonalne do jego masy. Strumień ciepła, który jest dostarczany do złoża, jest proporcjonalny do prędkości powietrza w złożu. Jak wcześniej wspomniano, prędkość jest ograniczona ze względu na rozmiar ziarna silikażelu. W celu utrzymania wysokiego SCP i elektrycznego COP, wysokość zasypania musi być odpowiednio niska. Ogranicza to wydajność instalacji. Zwiększenie wydajności może być osiągnięte poprzez zwiększenie średnicy ziarna sorbentu co zgodnie z Rysunkiem 4.5 zwiększy maksymalną prędkość fluidyzacji.



Rysunek 4.14: Wpływ wysokości zasypania złoża na charakterystykę adsorpcji.



Rysunek 4.15: Wpływ wysokości zasypania złoża na charakterystykę desorpcji.



Rysunek 4.16: Wpływ wysokości zasypania złoża i predkości powietrza w złożach fluidalnych (obie prędkości równe) na efektywność chłodniczą fluidalnej chłodzairki adsorpcyjnej: a) Ciepłne COP, b) Elektryczne COP, c) Właściwą Wydajność Chłodniczą.

Wnioski

W oparciu o model fizyczny zjawiska adsorpcji podczas fluidyzacji opisany w Rozdziale 3., za pomocą autordkiego skryptu przeprowadzono analizy wpływu parametrów sterowania na przebieg adsorpcji oraz desorpcji oraz na efektywność chłodniczą fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Został przeanalizowany wpływ takich parametrów sterowania jak: średnica ziaren sorbentu d_p , czas przełączania złożeń t_{sw} , prędkość powietrza w złożu podczas adsorpcji i desorpcji U_{ads} i U_{des} oraz wysokość zasypania złoża H_{sor} . Przeprowadzona analiza pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Zmniejszenie średnicy ziaren silikażelu generalnie poprawia efektywność chłodniczą FCA ze względu na poprawę kinetyki adsorpcji i desorpcji i zwiększenie powierzchni właściwej złoża. Niemniej jednak, średnica ziaren adsorbentu wpływa na ograniczenie maksymalnej prędkości fluidyzacji: im większa średnica ziarna, tym większa maksymalna prędkość fluidyzacji.
- FCA powinny być eksploatowane z czasem przełączania złożeń nie krótszym niż optymalny. Optymalny czas przełączania złożeń pozwala zmaksymalizować SCP i elektryczne COP. Czas przełączania złożeń dłuższy niż optymalny skutkuje wzrostem cieplnego COP, kosztem dwóch pozostałych parametrów. Brak kontroli nad tym parametrem może skutkować znaczącym pogorszeniem efektywności chłodniczej FCA.
- W celu utrzymania wysokiego elektrycznego COP prędkość powietrza w złożu podczas adsorpcji i desorpcji powinny być podobne i nie przekraczać 3 m s^{-1} . Z drugiej strony, odpowiedni dobór prędkości powietrza w złożach może przyczynić się do wyrównywania różnic kinetyki między adsorpcją i desorpcją bez konieczności zmiany czasu przełączania złożeń lub zwiększania ilości złożeń.
- Wysokość zasypania złoża istotnie wpływa na efektywność chłodniczą fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Niższa wysokość zasypania złoża zwiększa SCP i elektryczne COP, wyższa poprawia cieplne COP. W celu uzyskania elektrycznego COP powyżej 10 wysokość zasypania złoża nie powinna przekraczać 4 cm . Ten fakt mocno ogranicza skalowalność systemów chłodniczych tego typu. Wysokość zasypania złoża jest przykładem parametru, którego zwiększanie istotnie uwydatnia efekty adsorpcji (lepsze osuszenie powietrza), ale pogarsza efektywność chłodniczą (w tym przypadku elektryczne COP). Wskazuje to na potrzebę holistycznego podejścia do zagadnienia intensyfikacji procesów adsorpcji: należy brać pod uwagę zarówno wpływ na intensyfikację samego procesu adsorpcji, ale również wpływ na całość urządzenia, które proces adsorpcji wykorzystuje.

Rozdział 5

Analiza egzergetyczna fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej

5.1 Wstęp

Niniejszy rozdział prezentuje analizę egzergetyczną fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej, która została przeprowadzona w celu identyfikacji komponentów fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej w największym stopniu odpowiedzialnych za powstające straty egzergii oraz optymalizację ich pracy. Uzyskane wyniki stanowią źródło informacji o charakterze zarówno naukowym jak i inżynierskim przydatnych przy optymalizacji i projektowaniu fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych. Prezentowana analiza jest przykładem holistycznego podejścia do intensyfikacji procesów adsorpcyjnego suszenia powietrza w chłodnictwie, która bierze pod uwagę nie tylko proces adsorpcji, ale także ogół procesów adsorpcji towarzyszących.

5.2 Przegląd literatury

Systemy konwersji energii cieplnej o niskim potencjale, w tym także fluidalne chłodziarki adsorpcyjne, są szczególnie wrażliwe na straty. Przykładowo: straty ciśnienia generowane podczas przepływu właściwie nie zależą od tego jaki strumień energii jest transportowany przez płyn. Im mniejszy jest strumień energii tym relatywnie wyższe są straty energii podczas przepływu. Przypadkiem skrajnym jest gdy straty energii transportu płynu przewyższają strumień energii przez ten płyn transportowany. Ponadto, samo zjawisko adsorpcji nakłada ograniczenie na sprawność konwersji energii cieplnej na chłód, co zostało opisane w Rozdziale 1. Nawet bezwzględnie niewielkie straty mogą, w przypadku adsorpcyjnych chłodziarek fluidalnych, skutkować względnie dużym spadkiem sprawności, dlatego bardzo istotna jest identyfikacja źródeł strat oraz ocena możliwości ich eliminacji lub mitygacji. Jednym z narzędzi umożliwiających przeprowadzenie opisywanej powyżej analizy jest analiza egzergetyczna [120, 69, 108, 79]. Według wiedzy autora, w literaturze naukowej nie zostały dotąd opublikowane żadne wyniki analizy egzergetycznej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej lub jej kluczowych elemen-

tów. Prezentowana analiza dostarczyła unikalnych informacji nt. głównych źródeł strat egzergii oraz możliwości ich redukcji.

5.3 Fluidalna chłodziarka adsorpcyjna

Analiza egzergetyczna została przeprowadzona dla prostej konfiguracji fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej (omówionej w Rozdziale 4.) przedstawionej na Rysunku 5.1. Chłodziarka składa się z dwóch, wypełnionych silikażelem, złożów adsorpcyjnych (3). Złoża są naprzemiennie zasilane gorącym lub chłodnym powietrzem za pomocą zaworów. Wentylator (4) wymusza przepływ powietrza przez chłodnicę (5). Schłodzone powietrze przepływając przez złożo (3) jest osuszane wskutek adsorpcji pary wodnej przez silikażel i podgrzewa się ze względu na wydzielające się ciepło adsorpcji. Następnie osuszone powietrze jest ponownie schładzane przez kolejną schłodnicę (2) i ostatecznie ochładza się w nawilżaczu (1). W tym samym czasie w drugim złożu, połączonym z obiegiem regeneracyjnym, zachodzi desorpcja. Wentylator (8) wymusza przepływ powietrza przez regenerator ciepła (7) i następnie nagrzewnicę powietrza (6). Gorące powietrze przepływa przez złożo desorbując zawartą w silikażelu wilgoć. Powietrze nawilża się wskutek desorpcji wody z silikażelu i ochładza na skutek odparowania tej wody. Zanim wilgotne powietrze opuszcza układ, przepływa jeszcze przez regenerator ciepła (7). Ponadto punkty charakterystyczne pracy fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej są przedstawione na wykresie psychrometrycznym na Rysunku 4.2.

5.4 Analiza egzergetyczna

Analiza egzergetyczna jest oparta na bilansie egzergetycznym, wynikającym z II Zasady Termodynamiki [31]:

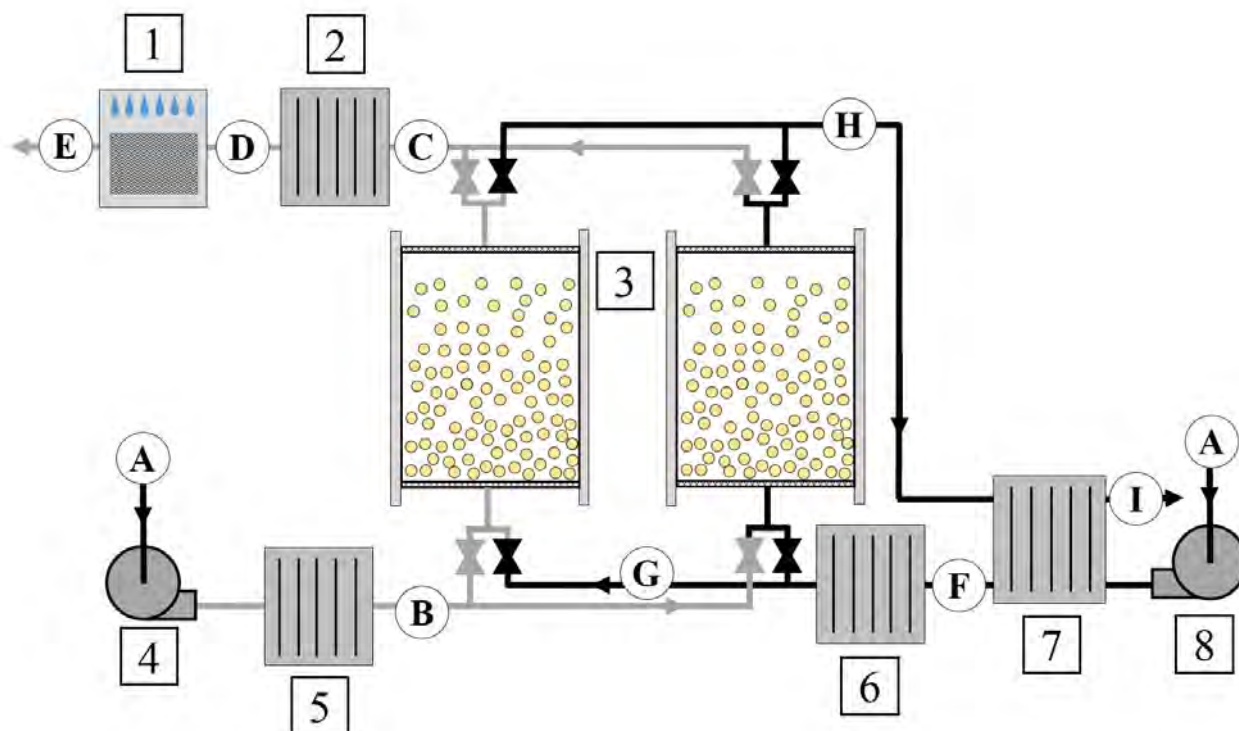
$$\sum_{in} \dot{E}x_{\dot{Q}} + \sum_{in} \dot{m}(ex) - \sum_{out} \dot{E}x_{\dot{Q}} - \sum_{out} \dot{m}(ex) - \dot{E}x_{dest} = 0 \quad (5.1)$$

W Równaniu 5.1 energia kinetyczna i potencjalna zostały pominięte. Bilans egzergii uwzględnia wlotowe i wylotowe strumienie egzergii związane z przepływem ciepła lub masy. Ze względu na nieodwracalność rzeczywistych procesów termodynamicznych całkowity strumień egzergii na wlocie i wylocie różni się o wartość strumienia straty egzergii $\dot{E}x_{dest}$. Egzergia właściwa ex , odniesiona do jednostki masy substancji, jest zdefiniowana jako [31]:

$$ex = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (5.2)$$

W przypadku układów psychrometrycznych (układów gdzie czynnikiem jest powietrze wilgotne) egzergia właściwa jest wyrażona jako [31]:

$$ex = (c_{p,a} + Xc_{p,v})T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + (1 + \bar{X})R_a T_0 \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + R_a T_0 \left((1 + \bar{X}) \ln\left(\frac{1 + \bar{X}_0}{1 + \bar{X}}\right) + \bar{X} \ln\left(\frac{\bar{X}}{\bar{X}_0}\right) \right) \quad (5.3)$$



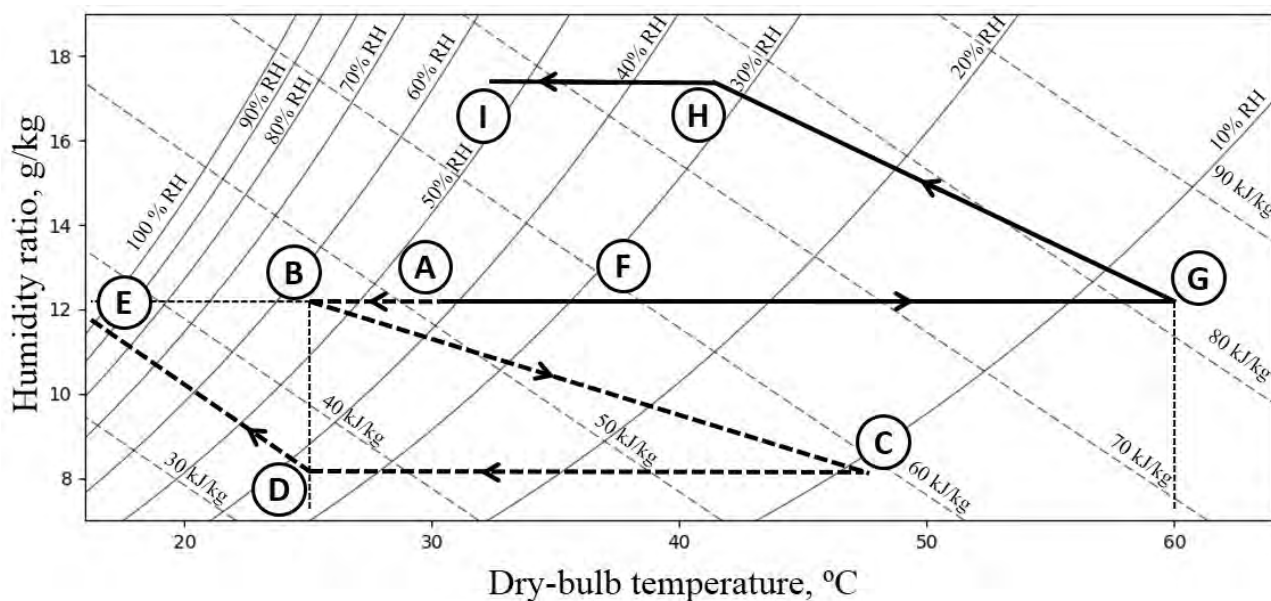
Rysunek 5.1: Schemat analizowanej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. 1 - Nawilzacz, 2 - Chłodnica powietrza, 3 - Złoża fluidalne, 4 - Wentylator, 5 - Chłodnica powietrza, 6 - Nagrzewnica powietrza, 7 - Regenerator ciepła, 8 - Wentylator.

Egzergia właściwa powietrza wilgotnego składa się z trzech składowych: odpowiednio egzergii związanej z temperaturą, ciśnieniem oraz stopniem zawilżenia powietrza. Parametry oznaczone indeksem dolnym '0' odnoszą się do tzw. stanu martwego, który jest punktem odniesienia dla obliczeń egzergii. Wybrane parametry stanu martwego (temperatura, stopień zawilżenia i ciśnienie powietrza) są podane w Tabeli 5.1. Efektywność analizowanych procesów i elementów systemu jest wyrażona za pomocą sprawności egzergetycznej η_{ex} która jest wyrażona jako [31]:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}x_{dest}}{\sum_{in} \dot{E}x_{\dot{Q}} + \sum_{in} \dot{m}(ex)} = \frac{\sum_{out} \dot{E}x_{\dot{Q}} + \sum_{out} \dot{m}(ex)}{\sum_{in} \dot{E}x_{\dot{Q}} + \sum_{in} \dot{m}(ex)} \quad (5.4)$$

W celu wyznaczenia sprawności egzergetycznej wszystkie wlotowe i wylotowe strumienie egzergii muszą zostać wyznaczone. Wszystkie elementy składowe i procesy mające miejsce we fluidalnej chłodziarce adsorpcyjnej zostały opisane za pomocą egzergetycznych równań bilansowych.

Wentylatory Wentylatory, których bilans egzergetyczny jest przedstawiony na Rysunku 5.3, zapewniają nadwyżkę ciśnienia równą całkowitemu spadkowi ciśnienia na instalacji. Strata egzergii



Rysunek 5.2: Punkty charakterystyczne pracy fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej

została oszacowana przy następujących założeniach:

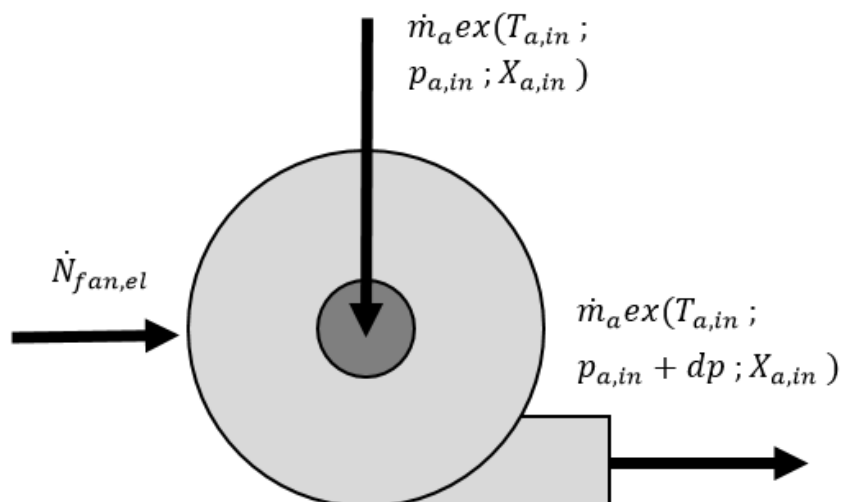
1. Sprawność izentropowa wentylatorów wynosi 70%,
2. Wzrost egzergii powietrza za wentylatorem związany ze wzrostem temperatury jest pominięty.

Nagrzewnica/chłodziła powietrza W celu określenia strat egzergii w nagrzewnicy/chłodziicy wodnej, przedstawionej na Rysunku 5.4 powietrza przyjęto następujące założenia:

1. Strata ciepła z wymiennika do otoczenia jest pomijalnie mała,
2. Pojemność cieplna wymiennika ciepła jest pominięta,
3. Strata ciśnienia po stronie wody jest pomijalnie mała,
4. Para wodna nie skrapla się na powierzchni wymiennika.

Bilans egzergiczny nagrzewnicy i chłodziicy powietrza różni się ze względu na przeznaczenie wylotowego strumienia wody grzewczej lub chłodzącej. W przypadku nagrzewnicy powietrza woda jest ponownie podgrzewana - egzergia wody jest ponownie wykorzystana. W przypadku chłodziicy powietrza, woda jest ponownie schładzana - egzergia jest bezpowrotnie tracona. Strata egzergii pojawia się ze względu na stratę ciśnienia wymiennika oraz różnicę temperatur przy wymianie ciepła. Temperatura powietrza na wylocie z wymiennika jest wyrażona jako:

$$T_{a,out} = \frac{T_{w,in}(E - 1) - T_{p,in}(R_c - 1)}{E - R_c} \quad (5.5)$$



Rysunek 5.3: Bilans egzergetyczny wentylatora

gdzie R_c to stosunek ciepła właściwego powietrza i wody:

$$R_c = \frac{\dot{m}_a c_a}{\dot{m}_w c_w} \quad (5.6)$$

a E jest wyrażone jako:

$$E = \exp(NTU_a(1 - R_c)) \quad (5.7)$$

Parametr NTU_a opisują geometrię wymiennika ciepła i jest wyrażona jako:

$$NTU_a = \frac{kAF}{\dot{m}_a c_a} \quad (5.8)$$

Ze względu na krzyżowy przepływ wody i powietrza w wymienniku ciepła w równaniu 5.11 pojawia się współczynnik korekcyjny F . Według [53] ten współczynnik może być wyrażony równaniem:

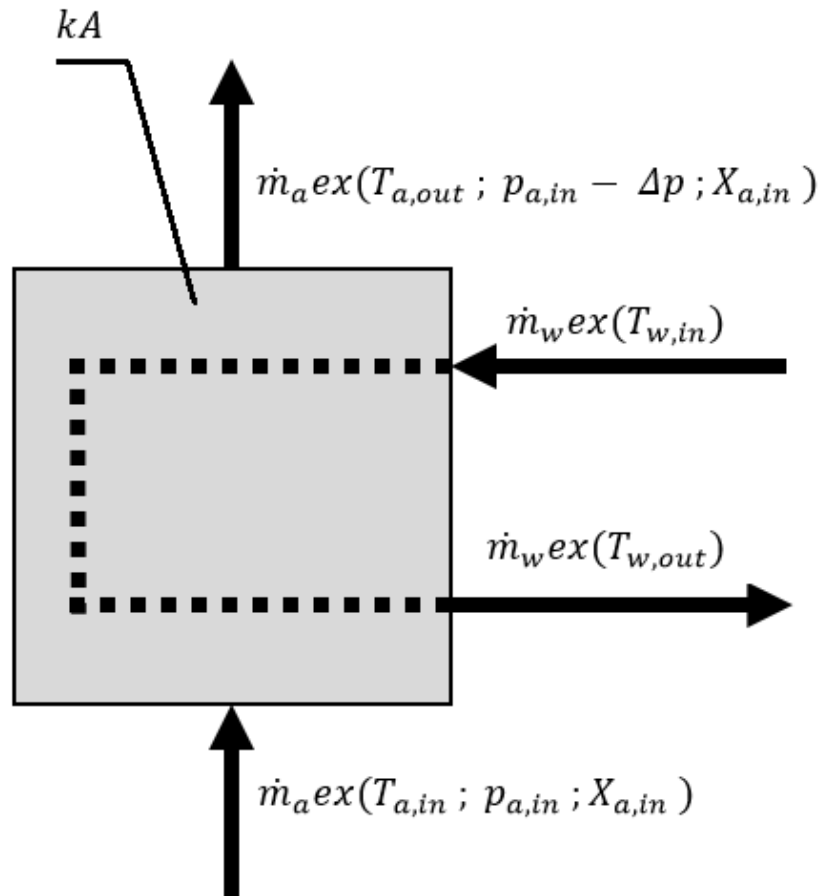
$$F = \frac{\ln\left(\frac{1-R_c P}{1-P}\right)}{NTU_w\left(\frac{1}{R_c} - 1\right)} \quad (5.9)$$

gdzie P to stosunek zmiany temperatury wody i powietrza:

$$P = \frac{T_{a,out} - T_{a,in}}{T_{w,in} - T_{a,in}} \quad (5.10)$$

a NTU_w jest wyrażone jako:

$$NTU_w = \frac{kAF}{\dot{m}_w c_w} \quad (5.11)$$



Rysunek 5.4: Bilans egzergetyczny nagrzenicy/chłodnicy powietrza.

Temperatura wody na wylocie z wymiennika może być obliczona na podstawie:

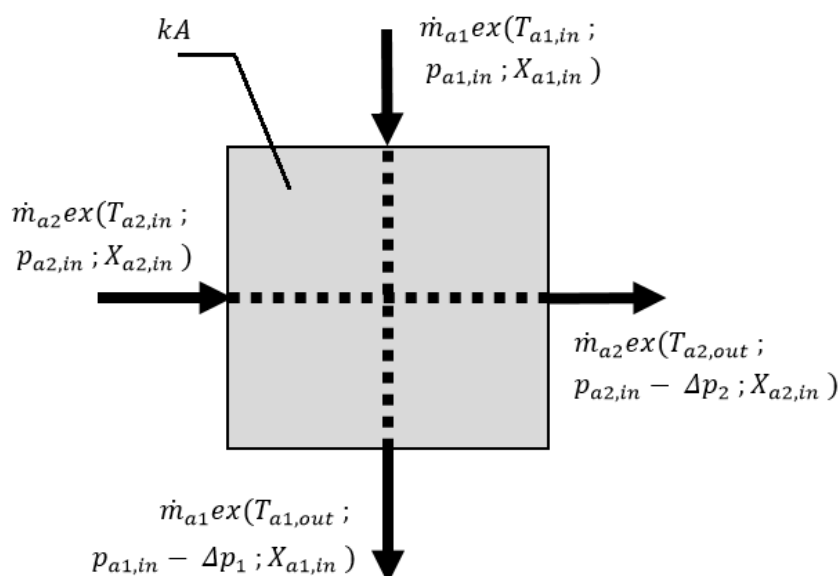
$$T_{w,out} = T_{w,in} - R_c(T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (5.12)$$

Równania 1.5 - 1.12 są rozwiązywane iteracyjnie (rozwiązania Równania 5.8 wymaga rozwiązania Równania 5.9 i vice versa). Przyjmując prędkość powietrza w wymienniku równą 3 m s^{-1} oraz współczynnik przenikania ciepła równy $50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [16] strata ciśnienia w nagrzewnicy/chłodnicy powietrza wynosi:

$$\Delta p_{AC/AH} = \frac{32 * U^2 \rho_a^2 A \mu}{l m_a} \quad (5.13)$$

Ze względu na przyjęte założenia przedstawiona metodologia obliczeń może być stosowana do wymienników ciepła pracujących zarówno w stanie ustalonym (przykładowo element (5) na Rysunku 5.1) i niustalonym (przykładowo elementy (2) i (6) na Rysunku 5.1)

Regeneracyjny wymiennik ciepła (RHX) Podczas desorpcji powietrze regeneracyjne, zanim jest wypuszczone do otoczenia, przepływa przez regeneracyjny wymiennik ciepła RHX. W niniejszej analizie regeneracyjny wymiennik ciepła zastosowano rekuperacyjny wymiennik ciepła ze względu na nieustalone parametry zasilania. Bilans egzergetyczny regeneracyjnego wymiennika ciepła jest przedstawiony na Rysunku 5.5. Przyjęto następujące założenia do obliczeń straty egzergii w rege-



Rysunek 5.5: Bilans egzergetyczny regeneracyjnego wymiennika ciepła RHX

racyjnym wymienniku ciepła:

1. Strata ciepła z wymiennika do otoczenia jest pomijalnie mała,
2. Pojemność cieplna wymiennika ciepła jest pominięta,
3. Para wodna nie skrapla się na powierzchni wymiennika.

Temperatura na wylocie z wymiennika może być oszacowana na podstawie równania energii, które przybiera formę:

$$T_{a1,out} = \frac{\dot{m}_a c_a T_{a1,in} + kAF T_{a2,in}}{kAF + \dot{m}_a c_a} \quad (5.14)$$

Ze względu na krzyżowy przepływ czynnika, do równania jest wprowadzony współczynnik korekcyjny F , który zależy od stosunku temperatur P (Równanie 5.10) oraz stosunku ciepła właściwego R_c (Równanie 5.6)[16]. W analizowanym przypadku R_c jest bliskie jedności, dlatego współczynnik korekcyjny jest jedynie funkcją stosunku temperatur P [16]:

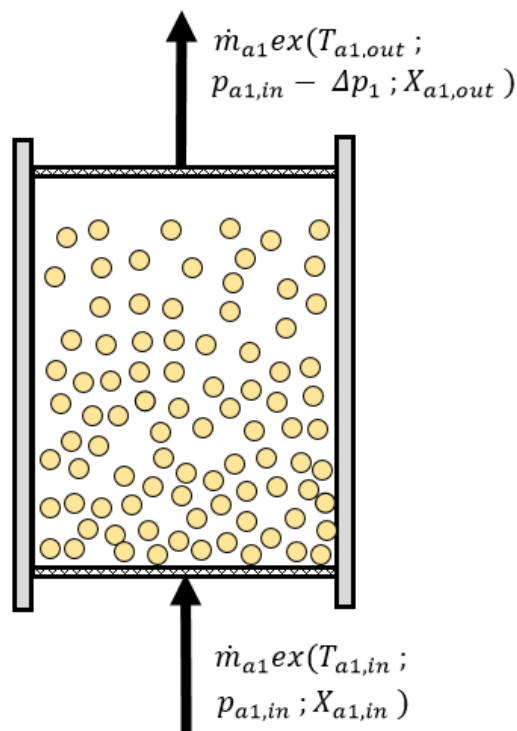
$$F = -2,6224 * P^4 + 2,2429 * P^3 - 0,9911 * P^2 + 0,073P + 1.0003 \quad (5.15)$$

Równania 5.14 i 5.15 są rozwiązywane iteracyjnie. Przyjmując prędkość powietrza po obu stronach wymiennika równą 3 m s^{-1} oraz współczynnik przenikania ciepła równy $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [16] strata ciśnienia w regeneracyjnym wymienniku ciepła wynosi:

$$\Delta p_{RHX} = 12.5 \frac{U^2 \rho_a^2 A \mu}{(l_1 + l_2) * m_a} \quad (5.16)$$

gdzie w i l to wymiary poprzeczne pojedynczego kanału wymiennika.

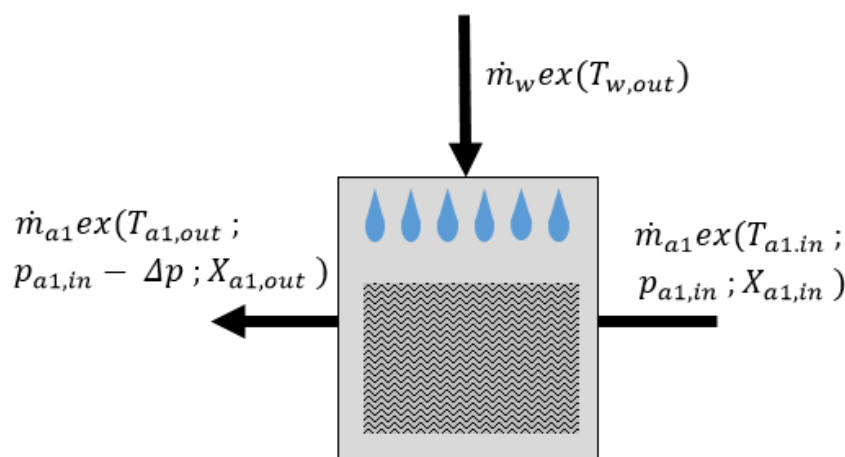
Złóża fluidalne Złóża fluidalne są głównym elementem fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Bilans egzergetyczny złoża fluidalnego jest przedstawiony na Rysunku 5.6. Złoże fluidalne jest zasilane od-



Rysunek 5.6: Bilans egzergetyczny złoża fluidalnego

powiednio przygotowanym, w zależności od bieżącej funkcji złoża, powietrzem. Przeprowadzony bilans egzergetyczny uwzględnia jedynie strumienie egzergii związane z wlotowym i wylotowym strumieniem powietrza, pomijając magazynowanie egzergii w złożu poprzez jego wygrzanie. Magazynowanie egzergii odbywa się cyklicznie: silikażel jest podgrzewany podczas desorpcji, podczas

adsorpcji jest ponownie chłodzony. Analizując osobno stratę egzergii podczas adsorpcji i osobno podczas desorpcji, można odnieść błędne wrażenie, że proces adsorpcji geneuje dodatkową egzergię. Analizując oba procesy razem wpływ magazynowania egzergii w złożu jest wyeliminowany. Starty egzergii w złożu fluidalnym związane ze stratami ciśnienia są szacowane na podstawie metodologii przedstawionej w Rozdziale 3.



Rysunek 5.7: Bilans egzergiczny nawilzacza powietrza (DEC)

Nawilzacz powietrza Bilans egzergiczny nawilzacza powietrza jest przedstawiony na Rysunku 5.7. Celem nawilzacza jest ochłodzenie powietrza poprzez bezpośrednie odparowanie wilgoci aż do osiągnięcia temperatury mokrego termometru. Dane eksperymentalne [105] wskazują, że temperatura mokrego termometru nie jest osiągalna. Przyjęto następujące założenia do obliczeń strat egzergii bezpośredniego nawilzacza powietrza:

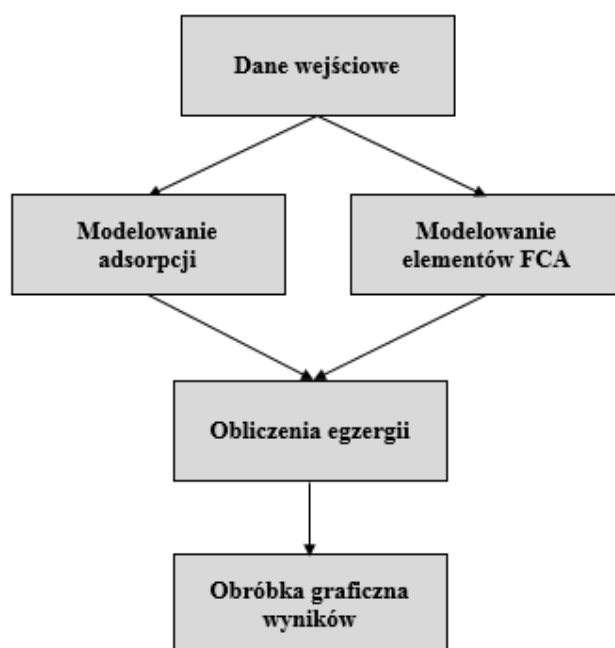
- (1) Strata ciepła z wymiennika do otoczenia jest pomijalnie mała,
- (2) Pojemność cieplna wymiennika ciepła jest pominięta,
- (3) Strumień wody doprowadzonej do nawilzacza ulega całkowitemu odparowaniu,
- (4) Nawilzacz generuje stały spadek ciśnienia na poziomie 25 Pa [37],
- (5) The heat of evaporation is exchanged at the temperature level of the outlet air.

Poza strumieniami egzergii przedstawionymi na Rysunku 5.7 w obliczeniach należy wziąć pod uwagę również egzergię parowania wody. Przyjęto, że strumień mocy chłodniczej, pochodzący z ciepła

parowania, jest wymieniany na poziomie temperatury wylotowej z nawilżacza $T_{a,out}$. W oparciu o powyższe założenia straty egzergii mogą być obliczone jako:

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{m}_a * ex_{a,in} + \dot{m}_w * \left(ex_{w,in} + H_{ev} * \left(1 - \frac{T_0}{T_{a,out}} \right) \right) - \dot{m}_a ex_{a,out} \quad (5.17)$$

Zaprezentowaną powyżej metodologię obliczeń zaimplementowano w autorskich skryptach napisanych w języku PYTHON. Wszystkie wykorzystane skrypty są dołączone do niniejszej pracy (Załączniki 5.1 - 5.3). Rysunek 5.8 przedstawia ogólną zasadę działania opracowanych skryptów. W oparciu



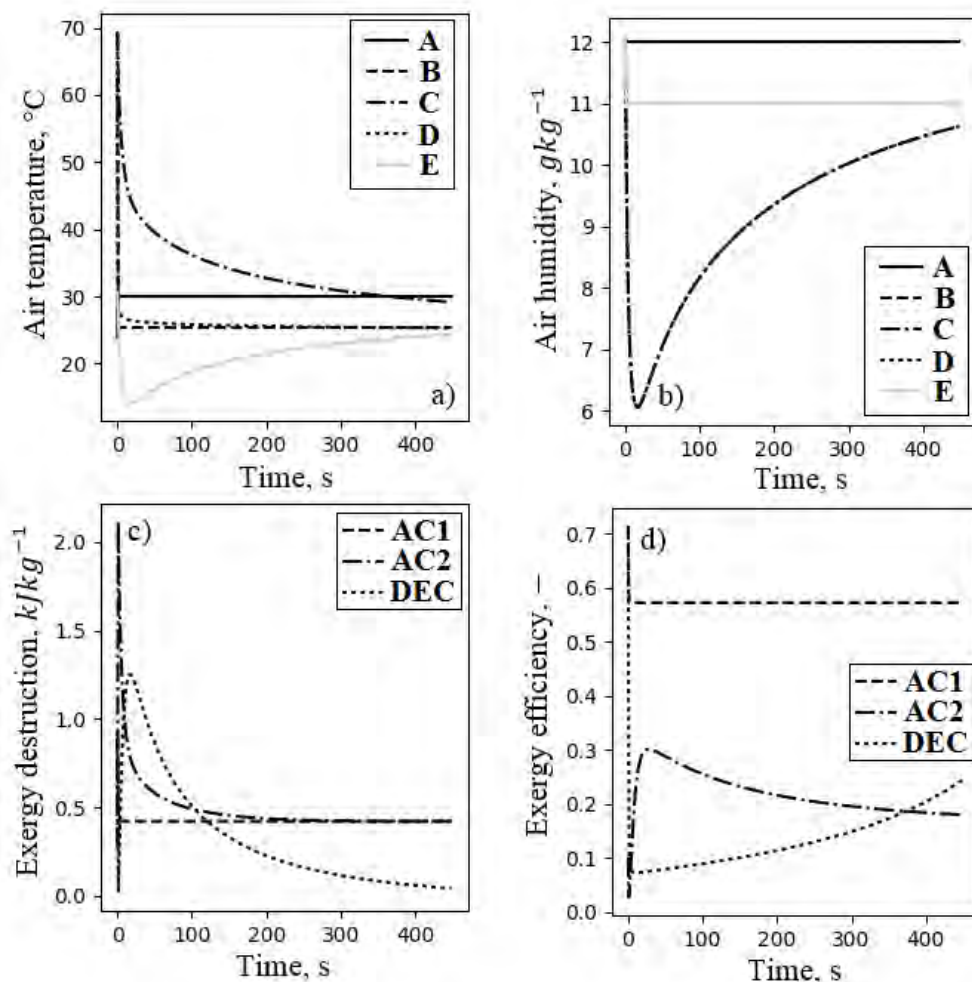
Rysunek 5.8: Ogólna zasada działania skryptów.

o dane wejściowe nt. parametrów pracy fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej oraz jej poszczególnych elementów były obliczane parametry powietrza na wylocie ze złoża (model przedstawiony w Rozdziale 3.) oraz parametry wszystkich elementów układu (metodologia z niniejszego rozdziału). Na podstawie pełnej informacji nt. zmienności parametrów powietrza w FCA były wykonywane obliczenia egzergii. Uzyskane dane były następnie poddane obróbce graficznej.

5.5 Wyniki i Dyskusja

Jednym z celów analizy egzergetycznej było określenie strat egzergii poszczególnych elementów układu. W pierwszej kolejności przeanalizowano sprawność egzergetyczną poszczególnych elementów (z wyłączeniem złoża fluidalnych, które są analizowane w dalszej części pracy) osobno dla

adsorpcji i desorpcji. Rysunek 5.9 przedstawia przebieg parametrów powietrza (temperatury i wilgotności) oraz właściwej destrukcji egzergii i sprawności egzergetycznej podczas adsorpcji. Oznaczenia na rysunku są zgodne z oznaczeniami Rysunku 5.1. Sprawność egzergetyczna nawilżacza powietrza



Rysunek 5.9: Zmiany temperatury powietrza (a), stopnia zawilżenia powietrza (b), właściwej destrukcji egzergii (c) i sprawności egzergetycznej (d) poszczególnych elementów systemu podczas adsorpcji. Oznaczenia na są zgodne z oznaczeniami Rysunku 5.1.

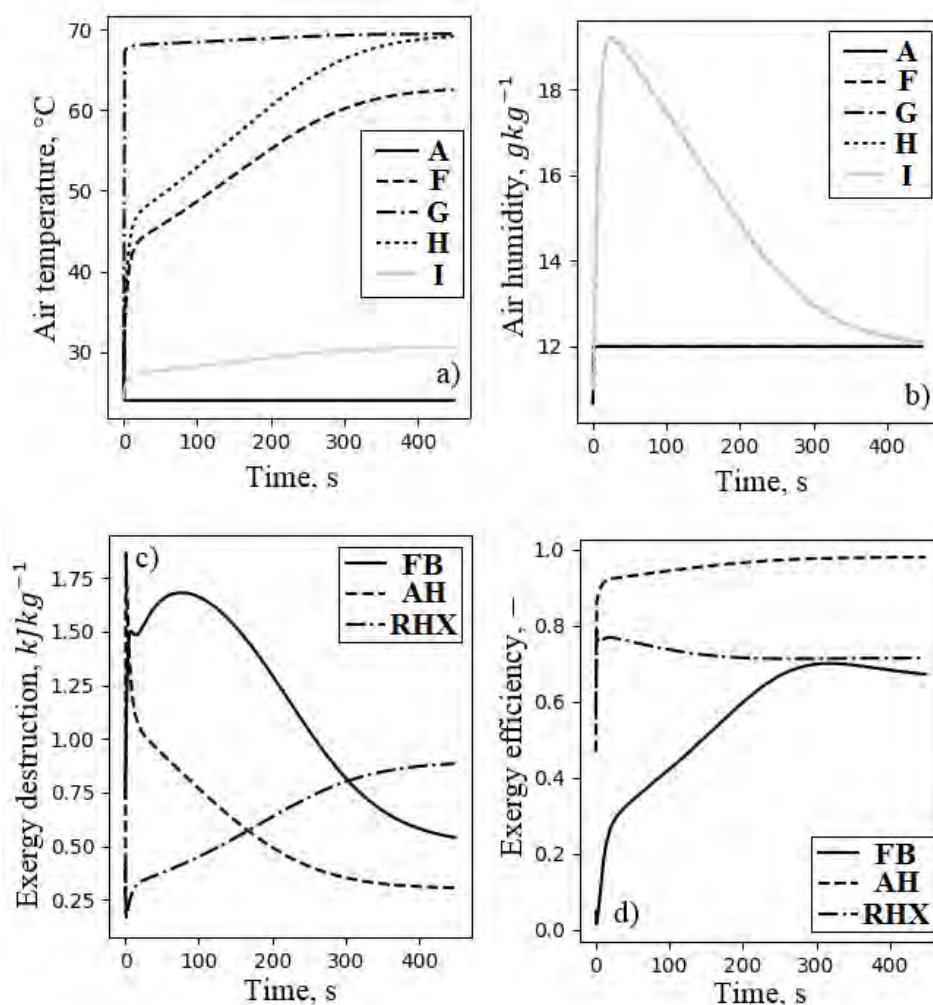
DEC i chłodnicy powietrza za złożem fluidalnym *AC*₂ nie przekracza 30%. Za najwyższą wartość właściwej destrukcji egzergii na początku cyklu adsorpcji odpowiada chłodnica powietrza za złożem *AC*₂. Wynika to z wysokiej temperatury powietrza za złożem. W miarę spadku temperatury powietrza zmniejsza się strata egzergii do poziomu $0.4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Natomiast sprawność egzergetyczna nawilżacza powietrza rośnie w miarę wzrostu stopnia zawilżenia powietrza na wlocie. Proces chłodzenia adiabatywnego jest z punktu widzenia egzergii bardzo nieefektywny. Głównym źródłem egzergii jest w

tym przypadku jest ciepło parowania wody nawilżającej powietrze. Sprawność egzergetyczna DEC rośnie w miarę spadku ilości odparowywanej wody. Ze względu na stałe parametry zasilania wstępna chłodnicę powietrza AC_1 charakteryzuje stała właściwa destrukcja egzergii i sprawność egzergetyczna. Destrukcja egzergii w przypadku chłodnic powietrza wynika, oprócz strat ciśnienia, z pełnionej w układzie funkcji: chłodnice usuwają do otoczenia ciepło niszcząc tym samym egzergię. Rozwiązaniem pozwalającym na mitygację tych strat egzergii jest zastosowanie regeneracji ciepła, która jest szczególnie skomplikowana ze względu na nieustaloność procesów zachodzących we fluidalnej chłodziarce adsorpcyjnej. Przeprowadzona analiza wskazuje, że nawilżacz powietrza w sposób bardzo nieefektywny realizuje proces odparowania wody. Problemem jest najprawdopodobniej sam proces chłodzenia adiabatycznego. Rozwiązaniem, które może poprawić sprawność egzergetyczną procesu odparowania wody jest zastąpienie nawilżacza bezpośredniego nawilżaczem typu pośredniego lub opartym na tzw. obiegu Maisotsenki [100, 66, 37]. Zastosowanie pośrednich nawilżaczy powietrza umożliwi poprawę sprawności egzergetycznej do około 50%, a zastosowanie nawilżaczy opartych na obiegu Maisotsenki nawet do 60% [37].

Tabela 5.1: Parametry wykorzystane do analizy egzergetycznej poszczególnych elementów systemu

Name	Symbol	unit	Quantity
Stopień zawilżenia powietrza stanu martwego	X_0	$kgkg^{-1}$	0.012
Ciśnienie stanu martwego	p_0	Pa	101300
Temperatura stanu martwego	T_0	$^{\circ}C$	30
Odległość między żebrami w AC/AH	d	m	0.003
Współczynnik przenikania ciepła w AC/AH	$k_{AC/AH}$	$Wm^{-2}K^{-1}$	50
Współczynnik przenikania ciepła w RHX	k_{RHX}	$Wm^{-2}K^{-1}$	25
Wymiar kanału w RHX	l_{RHX}	m	0.01
Wymiar kanału w RHX	w_{RHX}	m	0.003
Parametr NTU dla AC/AH	$NTU_{AC/AH}$	—	6
Parametr NTU dla RHX	NTU_{RHX}	—	20
Stosunek ciepła właściwego	$R_{c,AC/AH}$	—	0.2
Prędkość powietrza w wymiennikach	U	ms^{-1}	3

Rysunek 5.10 przedstawia zmiany parametrów powietrza (temperatury i stopnia zawilżenia) w punktach charakterystycznych układu oraz stratę egzergii i sprawność egzergetyczną poszczególnych procesów podczas desorpcji. Rysunek przedstawia również stratę egzergii i sprawność egzergetyczną obu złóż fluidalnych. Złóża są odpowiedzialne za istotną część strat egzergii, która w czasie całego cyklu zawiera się w granicach 0.6 - 1.7 $kJkg^{-1}$. Wynika to ze stosunkowo wysokiego spadku ciśnienia na złożu oraz degradacji temperatury powietrza. Strata egzergii maleje a sprawność egzergetyczna rośnie w miarę jak różnica temperatur powietrza na wlocie i wylocie maleje. Z czasem maleje również strata egzergii nagrzewnicy powietrza. Powietrze na wylocie ze złoża (na Rys.5.10a linia H) zasila regenerator. Temperatura na wylocie z regeneratora i wlocie do nagrzewnicy powietrza (na Rys.5.10a linia F) z czasem również rośnie, co zmniejsza strumień ciepła, który musi być dostarczony w na-



Rysunek 5.10: Zmiany temperatury powietrza (a), stopnia zawilżenia powietrza (b), właściwej destrukcji egzergii (c) i sprawności egzergetycznej (d) poszczególnych elementów systemu podczas desorpcji. Oznaczenia na są zgodne z oznaczeniami Rysunku 5.1.

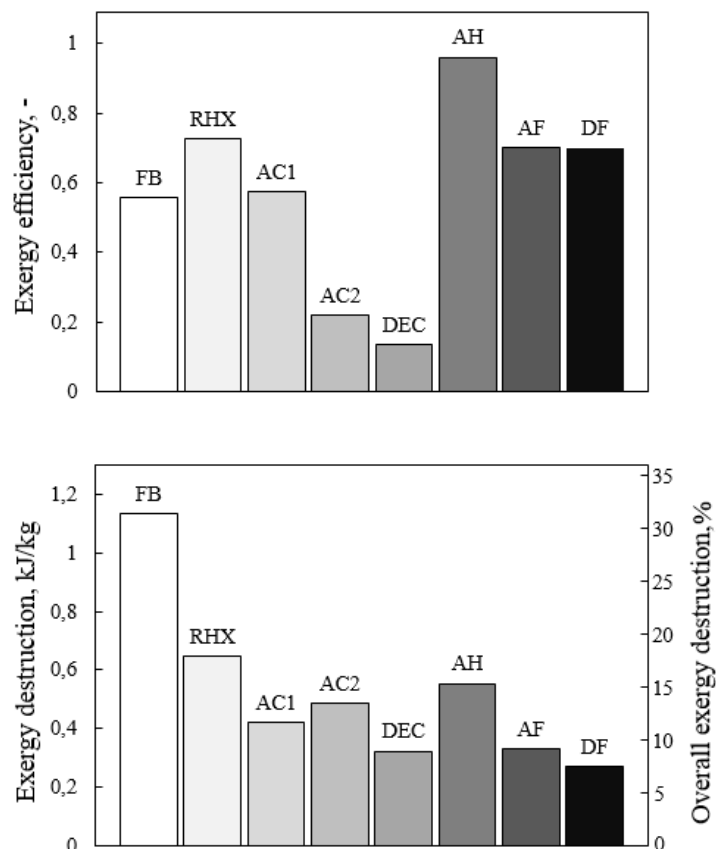
grzewnicy i pozwala zmniejszyć różnicę temperatur przy wymianie ciepła zmniejszając tym samym stratę egzergii. Z tego samego powodu rośnie w miarę upływu czasu strata egzergii regeneracyjnego wymiennika ciepła - wzrasta strumień regenerowanego ciepła i nieznacznie różnica temperatur przy wymianie ciepła. Niemniej sprawność egzergetycznego wymiennika regeneracyjnego pozostaje na stałym poziomie około 70%. Rysunek 5.11 przedstawia uśrednione straty egzergii i sprawności egzergetyczne wszystkich elementów systemu. Elementami generującymi największe straty egzergetyczne są złoża fluidalne, regeneracyjny wymiennik ciepła oraz nagrzewnica. Warto zwrócić uwagę, że

Tabela 5.2: Parametry wykorzystane do modelowania złóż fluidalnych [88, 91]

Name	Symbol	unit	Quantity
Wysokość zasypania złoża	H_{sor}	m	0.03
Czas przełączania złóż	t_{sw}	s	450
Prędkość powietrza w złożu	$U_{des/ads}$	ms^{-1}	3
Srednica ziarna silikażelu	d_{sor}	m	0.001
Wysokość złoża fluidalnego	h_{bed}	m	0.55
Srednica złoża fluidalnego	D_{bed}	m	0.28
Gęstość nasypowa złoża	ρ_{sor}	kgm^{-3}	850
Temperatura wlotowa wody grzewczej	T_H	$^{\circ}C$	70
Temperatura wlotowa wody chłodzącej	T_L	$^{\circ}C$	25

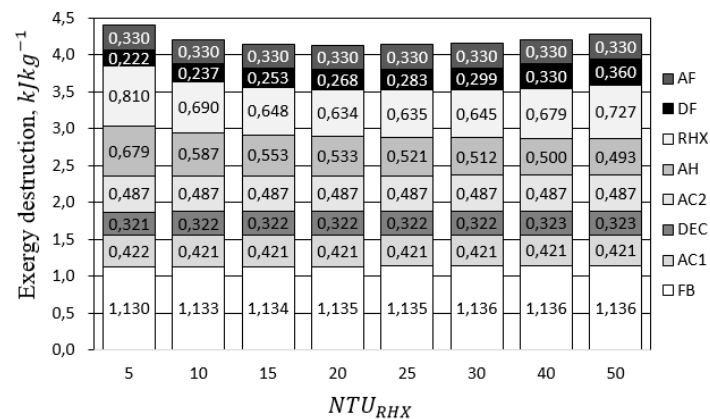
większość elementów generujących największe straty egzergii bierze udział w desorpcji. Im wyższa temperatura powietrza tym większa jego egzergia. Im wyższa egzergia tym potencjalnie wyższe jej bezwzględne straty. Najniższą sprawnością egzergetyczną charakteryzuje nawilżacz powietrza, chłodnicę powietrza za złożem adsorpcyjnym oraz złoża fluidalne. Poprawa sprawności dwóch pierwszych elementów systemu przyniosłaby stosunkowo niewielką korzyść (mimo niskiej sprawności egzergetycznej te elementy generują niską stratę egzergii), natomiast poprawa sprawności egzergetycznej złóż fluidalnych może przynieść zasadnicze korzyści. W analizowanym przypadku sprawność egzergetyczna układu wyniosła 57.7% przy stracie egzergii na poziomie 3.58 kJkg^{-1} powietrza suchego.

Przeprowadzono również analizę optymalizacyjną geometrii regeneracyjnego wymiennika ciepła (wyrażonej jako NTU_{RHX}), która jest przedstawiona na Rysunku 5.12. Rysunek przedstawia całkowite straty egzergii systemu z rozbiciem na poszczególne elementy. Początkowy wzrost NTU_{RHX} powoduje spadek strat egzergii systemu wynikający ze spadku strat zarówno regeneracyjnego wymiennika ciepła jak i nagrzewnicy powietrza. Dla NTU_{RHX} około 20 strata egzergii osiąga wartość minimalną. Dalszy wzrost NTU_{RHX} skutkuje ponownym wzrostem strat egzergii przy wciąż malejących stratach egzergii nagrzewnicy powietrza, ale rosnących stratach regeneracyjnego wymiennika ciepła. Wynika to prawdopodobnie z rosnących strat egzergii związanych ze stratami ciśnienia wymiennika (które rosną ze wzrostem NTU_{RHX}), które przewyższają korzyści ze zwiększonej powierzchni wymiany ciepła. Przeanalizowano również straty egzergii pod kątem ich pochodzenia. Równanie 5.3 wskazuje na trzy możliwości pochodzenia strat egzergii: straty związane z ciśnieniem, temperaturą i stopniem zawilżenia. Straty egzergii związane z ciśnieniem wynikają ze strat ciśnienia poszczególnych elementów systemu, natomiast straty związane z temperaturą są związane z wymianą ciepła. Rysunek 5.13 przedstawia straty egzergii z podziałem na ich pochodzenia dla adsorpcji i desorpcji. Większość strat egzergii, około 55%, jest związanych z temperaturą. Znaczące straty egzergii są związane z ciśnieniem. Wysokie straty ciśnienia wynikają z niskiej gęstości i pojemności cieplnej powietrza. Zmniejszenie strat ciśnienia może się przyczynić do znaczącego wzrostu sprawności egzergetycznej. Rysunek 5.14 przedstawia udziały poszczególnych elementów w stratach egzergii danego



Rysunek 5.11: Straty egzergii i sprawności egzergetyczne poszczególnych elementów fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej: FB - złoża fluidalne, RHX - regeneracyjny wymiennik ciepła, AC1 - chłodnica powietrza przez złożem, AC2 - chłodnica powietrza za złożem, DEC - nawilżacz powietrza, AH - nagrzewnica powietrza.

rodzaju (związanych z temperaturą, ciśnieniem lub stopniem zawilżenia). Dominującym źródłem strat egzergii związanej z temperaturą podczas desorpcji są złoża fluidalne (Rysunek 5.14d). Straty egzergii związane z ciśnieniem rozkładają się mniej więcej równo pomiędzy wszystkie elementy systemu (poza chłodnicą wyparną) zarówno podczas adsorpcji. Podczas desorpcji za około 40% strat egzergii związanych z ciśnieniem odpowiada regeneracyjny wymiennik ciepła. Zmniejszenie strat ciśnienia złożów fluidalnych przyczyniłoby się do obniżenia całkowitych strat egzergii związanych z ciśnieniem o około 30%.

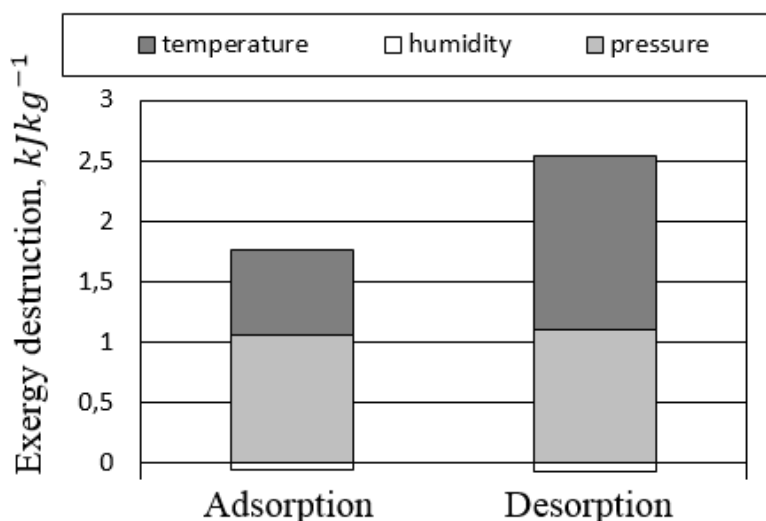


Rysunek 5.12: Influence of NTU_{RHX} on exergy destruction of FDC. Components abbreviations corresponds to Fig. 19.

Wnioski

W celu określenia głównych źródeł strat egzergii we fluidalnych chłodziarkach adsorpcyjnych przeprowadzono analizę egzergetyczną. Zostały opracowane bilanse egzergetyczne wszystkich elementów systemu i zaimplementowane w autorskim skrypcie napisanym w języku PYTHON. Przeprowadzono analizę strat egzergii i sprawności egzergetycznej wszystkich elementów systemu i systemu jako całości. Przeprowadzona analiza pozwoliła zidentyfikować elementy systemu będące głównymi źródłami strat egzergii. Racjonalizacja tych elementów może się w największym stopniu przyczynić do poprawy sprawności egzergetycznej. Ponadto, wyodrębniono straty egzergii fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej, mające różne pochodzenie: związane z temperaturą i ciśnieniem. Przeprowadzona analiza pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

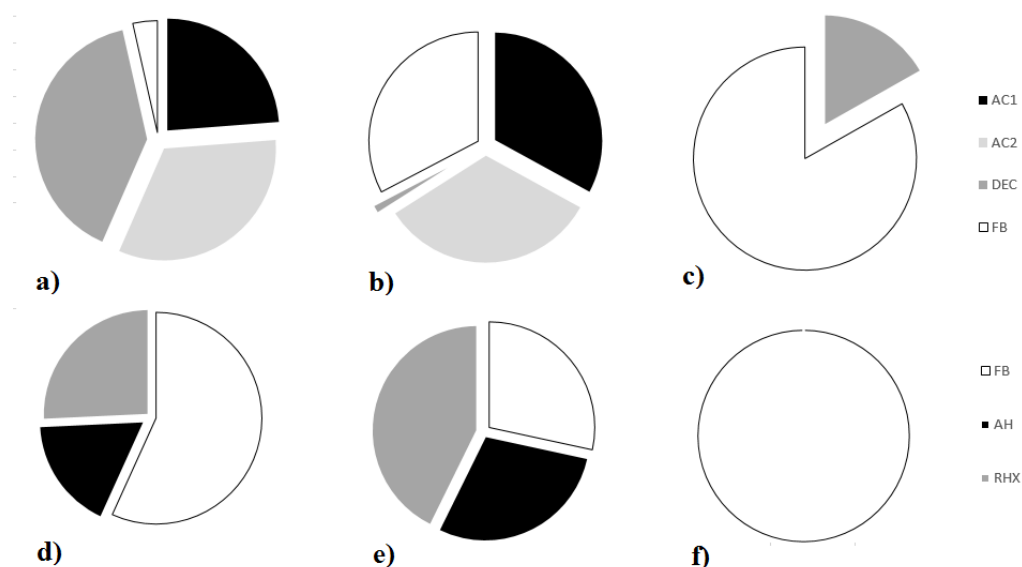
1. Całkowita strata egzergii analizowanego systemu wyniosła 4.163 kJ/kg^{-1} , a sprawność egzergetyczna 0.577. Ponad 40% egzergii dostarczonej do układu uległo destrukcji. Sprawność egzergetyczna nie jest równoważna ze stopniem odwzorowania obiegu Carnot, który dla fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej wynosi około 32%.
2. Głównymi źródłami strat egzergii we fluidalnej chłodziarce adsorpcyjnej są złoża fluidalne i regeneracyjny wymiennik ciepła. The elementy odpowiadają za, w kolejności, 30% and 20% całkowitych strat egzergii systemu. Niemniej jednak, oba elementy charakteryzują się stosunkowo wysoką sprawnością egzergetyczną odpowiednio 0.58 i 0.77.
3. Optymalizacja geometrii regeneracyjnego wymiennika ciepła opisanego parametrem NTU_{RHX} pozwala na ograniczenie strat egzergii nie tylko w tym wymienniku ale również w nagrzewnicy



Rysunek 5.13: Destrukcja egzergii z podziałem na ich pochodzenia (temperatura, ciśnienie, stopień zawilżenia) dla adsorpcji i desorpcji

powietrza. Początkowe zwiększanie NTU_{RHX} (czyli de facto zwiększanie powierzchni wymiany ciepła wymiennika) ogranicza stratę egzergii związaną z temperaturą, ale kosztem różnej straty egzergii związanej z ciśnieniem. Destrukcja egzergii w nagrzewnicy powietrza maleje wraz ze poprawą regeneracji ciepła. W analizowanym przypadku optymalne NTU_{RHX} wyniosło około 20. Biorąc pod uwagę duży udział regeneracyjnego wymiennika ciepła w całkowitej destrukcji egzergii, optymalizacja tego elementu jest kluczowa z punktu widzenia efektywności chłodniczej całego systemu.

4. Elementami fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej o najniższej sprawności egzergetycznej są chłodziarka wyparna powietrza oraz chłodziarka powietrza za złożem adsorpcyjnym: sprawność egzergetyczna wynosi odpowiednio 10% i 20%.
5. Niska sprawność chłodziarki wyparnej wynika z nieefektywnego wykorzystania adsorpcji parującej wody. W celu poprawy sprawności egzergetycznej procesu chłodzenia adiabatycznego, chłodziarka wyparna może zostać zastąpiona chłodziarką wyparną pośrednią lub opartą na obiegu Maisotsenki.
6. W przypadku chłodziarki powietrza niska sprawność wynika z początkowo wysokiej temperatury powietrza za złożem adsorpcyjnym. Całkowity odzysk tego ciepła umożliwiłby redukcję strat egzergii chłodziarki o około 25%.
7. Znacząca część strat egzergii jest związana ze spadkiem ciśnienia powietrza w elementach systemu. Zmniejszanie strat ciśnienia jest obiecującym kierunkiem redukcji strat egzergii. Ele-



Rysunek 5.14: Udziały poszczególnych elementów w destrukcji egzergii z podziałem na pochodzenie: a) Destrukcja egzergii związana z temperaturą podczas adsorpcji, b) Destrukcja egzergii związana z ciśnieniem podczas adsorpcji, c) Destrukcja egzergii związana ze stopniem zawilżenia podczas adsorpcji, d) Destrukcja egzergii związana z temperaturą podczas desorpcji, e) Destrukcja egzergii związana z ciśnieniem podczas desorpcji, f) Destrukcja egzergii związana ze stopniem zawilżenia podczas desorpcji.

mentami generującymi największą destrukcję egzergii związaną z ciśnieniem są złoża fluidalne i regeneracyjny wymiennik ciepła.

Rozdział 6

Potencjalne metody intensyfikacji procesów adsorpcyjnych w chłodnictwie

6.1 Wstęp

Celem niniejszego rozdziału jest wskazanie potencjalnych metod dalszej intensyfikacji procesów adsorpcyjnych w chłodnictwie, które zostały zidentyfikowane podczas prowadzonych prac, oraz ich wstępna analiza. Przedstawiane zagadnienia wykraczają poza zakres niniejszej pracy, niemniej jednak stanowią według autora kierunki przyszłego rozwoju badań w tej dziedzinie. Omawiane zagadnienia dotyczą pracy poszczególnych urządzeń oraz systemu jako całości.

6.2 Modyfikacja kształtu ziaren adsorbentu

W Rozdziale 5. pokazano, że destrukcja energii związana ze spadkami ciśnienia stanowi około 40% całkowitej destrukcji energii. Istotnym elementem składowym jest spadek ciśnienia generowany na złożu fluidalnym. Właściwy spadek ciśnienia na złożu fluidalnym może być według [21] wyrażony jako:

$$\Delta p/H_{bed} = \frac{150(1 - \varepsilon_0)^2 \mu_a U_{mf}}{\varepsilon_0^3 (\Phi_A d_{pe})^2} + \frac{1,75(1 - \varepsilon_0) \rho_a U_{mf}^2}{\varepsilon_0^3 \Phi_A d_{pe}} \quad (6.1)$$

gdzie U_{mf} to minimalna prędkość fluidyzacji, która jest wyrażona jako []:

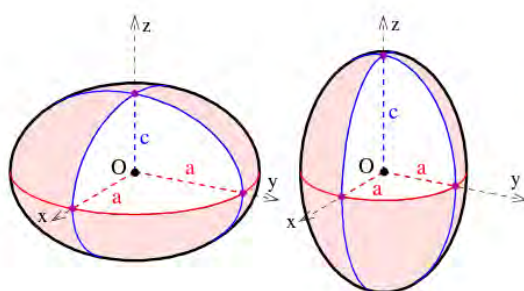
$$U_{mf} = \left(\frac{\varepsilon_0^3 \Phi_A d_{pe} (\rho_p - \rho_g) g}{1,75 \rho_g} \right)^{0,5} \quad (6.2)$$

Właściwy spadek ciśnienia na złożu fluidalnym zależy między innymi od geometrii fluidyzowanych ziaren: ich sferyczności powierzchniowej Φ_A i średnicy ekwiwalentnej d_{pe} (w przypadku ziaren

niesferycznych). Od geometrii ziaren zależą również minimalna prędkość fluidyzacji U_{mf} oraz porowatość złoża ε_0 . Spadek ciśnienia zależy jednak nie tylko od właściwego spadku ciśnienia, ale również wysokości zasypania złoża, która zależy od porowatości złoża:

$$H_{bed} = \frac{4m_{sor}(1 - \varepsilon_0)}{\pi D^2 \rho_p} \quad (6.3)$$

Modyfikacja kształtu ziarna w sposób kompleksowy wpływa na spadki ciśnienia w złożu fluidalnym. Badania eksperymentalne analizujące wpływ kształtu ziaren na spadki ciśnienia w złożu fluidalnym wskazują możliwość redukcji spadku ciśnienia poprzez modyfikację kształtu ziaren []. Przeprowadzono analizę teoretyczną wpływu kształtu ziarna na parametry złoża takie jak minimalna prędkość fluidyzacji U_{mf} , powierzchnia właściwa złoża a_{sor} , droga dyfuzji w ziarnie d_{dif} oraz spadki ciśnienia odniesione do masy sorbentu w złożu ΔP_m . Ponadto przeanalizowano wpływ kształtu na efektywność chłodniczą fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej omawianej w Rozdziale 4. Kształty ziaren poddane analizie to elipsoidy spłaszczone oraz wydłużone przedstawione na Rys. 6.1, w zakresie stosunku półosi $R_{a/b}$ od 0,3 do 2. Warto zaznaczyć, że elipsoida o stosunku półosi równym 1 to kula, która pełni w niniejszej analizie porównawczej rolę punktu odniesienia. Elipsoidalne ziarna są opisane sto-



Rysunek 6.1

sunkiem długości półosi $R_{a/b}$. Przyjmując, że wszystkie analizowane ziarna mają taką samą objętość długość półosi może być wyrażona jako:

$$a = \left(\frac{3}{4V_{ref} R_{a/b}^2} \right)^{1/3} \quad (6.4)$$

$$b = \frac{a}{R_{a/b}} \quad (6.5)$$

gdzie V_{ref} to objętość ziarna sferycznego. Powierzchnia ziarna elipsoidalnego jest wyrażona jako:
 dla $R_{a/b} > 1$:

$$A_p = 2\pi b \left(b + \frac{a * \arcsin(\epsilon)}{\epsilon} \right) \quad (6.6)$$

$$\epsilon = \left(1 - \left(\frac{1}{R_{a/b}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (6.7)$$

dla $R_{a/b} < 1$:

$$A_p = 2\pi b^2 + 2\pi a^2 \frac{\ln\left(\frac{1+\epsilon}{1-\epsilon}\right)}{\epsilon} \quad (6.8)$$

$$\epsilon = (1 - R_{a/b}^2)^{1/2} \quad (6.9)$$

Znając geometrię ziarna można wyznaczyć jej sferyczność powierzchniową oraz objętościową Φ_A oraz Φ_V , które są wyrażone jako:

$$\Phi_A = \frac{A_{ref}}{A_p} \quad (6.10)$$

$$\Phi_V = \frac{V_{ref}}{V_{p,max}} \quad (6.11)$$

gdzie A_{ref} to powierzchnia ziarna sferycznego o takiej samej objętości, a $V_{p,max}$ to objętości kuli opisanej na elipsoidzie. Na podstawie Φ_V wyznaczana jest porowatość złoża ε_0 oraz średnica zastępcza ziarna niesferycznego d_{pe} :

$$\varepsilon_0 = -0,4332\Phi_V^3 + 1,2583\Phi_V^2 - 1,589\Phi_V + 1,1756 \quad (6.12)$$

$$d_{pe} = d_{p,ref} \left(3,1781 - \frac{3,6821}{\Phi_V} + \frac{1,504}{\Phi_V^2} \right)^{1/3} \quad (6.13)$$

Na podstawie równań 6.4 - 6.13 jest możliwe wyznaczenie właściwego spadku ciśnienia $\Delta p/H_{bed}$, minimalnej prędkości fluidyzacji U_{mf} oraz wysokości zasypiania złoża H_{bed} . Ponadto gęstość nasypowa złoża sorbentu ρ_{sor} jest wyrażona jako:

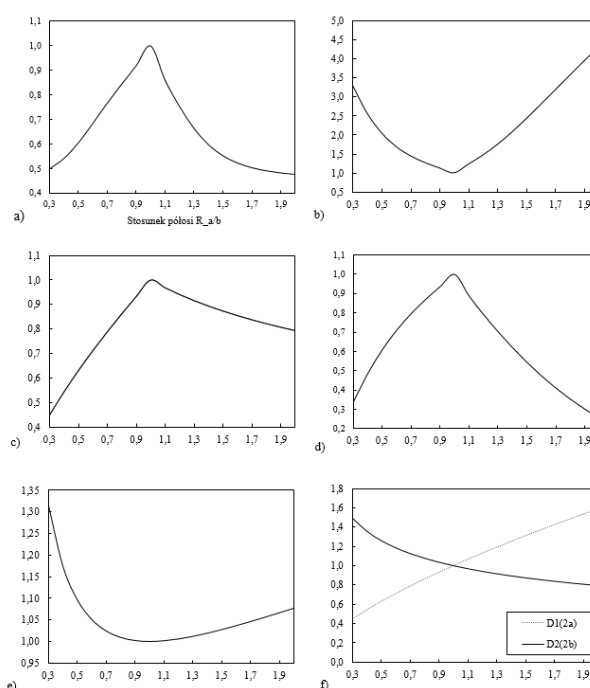
$$\rho_{sor} = \frac{\rho_p}{1 - \varepsilon_0} \quad (6.14)$$

Natomiast powierzchnia właściwa złoża jest wyrażona jako:

$$a_{sor} = \frac{A_p(1 - \varepsilon_0)}{V_{ref}\rho_{sor}} \quad (6.15)$$

Przedstawiona powyżej metodologia pozwala na określenie wpływu modyfikacji kształtu ziarna sorbentu na spadek ciśnienia na złożu fluidalnym, minimalną prędkość fluidyzacji, gęstość nasypową

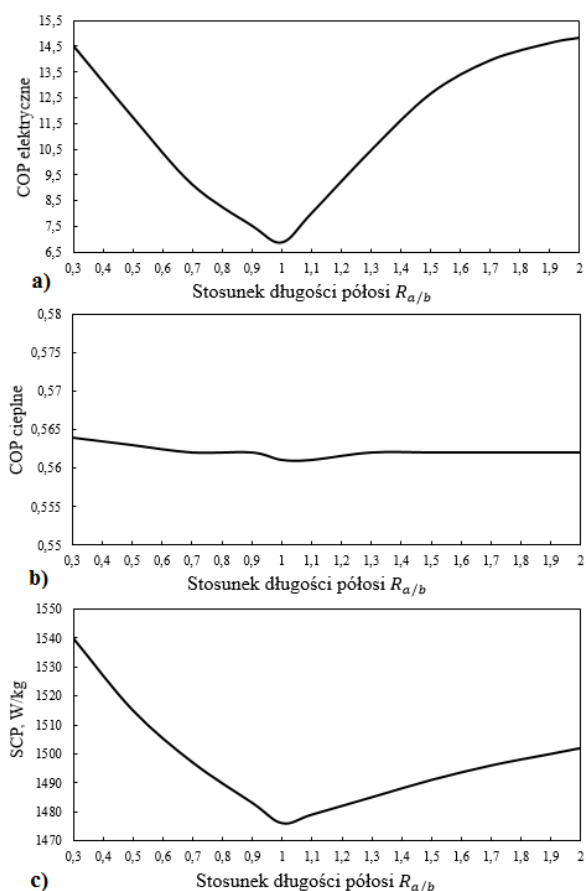
złoża, długość drogi dyfuzji w sorbencie oraz powierzchnię właściwą złoża co jest przedstawione na Rysunku 6.2. Kulisty kształt ziaren jest nieoptymalny z punktu widzenia spadku ciśnienia na złożu fluidalnym. Modyfikacja kształtu ziarna może istotnie zredukować straty ciśnienia, ale przy jednoczesnym zasadniczym spadku gęstości nasypowej złoża. Kształt ziarna wpływa także na minimalną prędkość fluidyzacji. Zwiększa się również powierzchnia właściwa ziaren s_{sor} : o nawet 30% dla ziaren elipsoidalnych spłaszczonych i o 10% dla ziaren elipsoidalnych wydłużonych. Może to mieć wpływ na kinetykę procesów wymiany ciepła i masy, które są wprost proporcjonalne do powierzchni ziaren. Nie bez znaczenia może być także zmniejszenie minimalnej drogi dyfuzji w ziarnie o ponad połowę w przypadku ziaren spłaszczonych.



Rysunek 6.2: Wpływ modyfikacji kształtu ziarna względem ziarna sferycznego o średnicy 1 mm: a) względne zmiana spadku ciśnienia, b) względna zmiana U_{mf} , c) względna zmiana najkrótszej drogi dyfuzji, d) względna zmiana ρ_{sor} , e) względna zmiana a_{sor} , f) Względna zmiana wymiarów osi ziarna

Ostateczną oceną zasadności modyfikacji kształtu ziaren sorbentu jest wpływ na efektywność chłodniczą, która jest przedstawiona na Rysunku 6.3. Modyfikacja ma zasadniczy wpływ na COP elektryczne które wzrasta nawet dwukrotnie wskutek redukcji spadku ciśnienia. W przypadku SCP obserwowane zmiany nie przekraczają 4%, natomiast wpływ na COP cieplne jest pomijalnie mały. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że poprawiane wskutek modyfikacji kształtu parametry nie stanowią dominującego ograniczenia kinetyki procesów.

Przeprowadzona wstępna analiza wpływu kształtu ziarna na efektywność chłodniczą fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych wskazuje na duży potencjał tego zagadnienia w zakresie poprawy zużycia



Rysunek 6.3: Wpływ modyfikacji kształtu ziarna względem ziarna sferycznego o średnicy 1 mm na efektywność chłodniczą: a) COP elektryczne, b) COP cieplne, c) Właściwa Wydajność Chłodnicza. Parametry symulacji:

energii elektrycznej i strat egzergii związanych ze spadkiem ciśnienia.

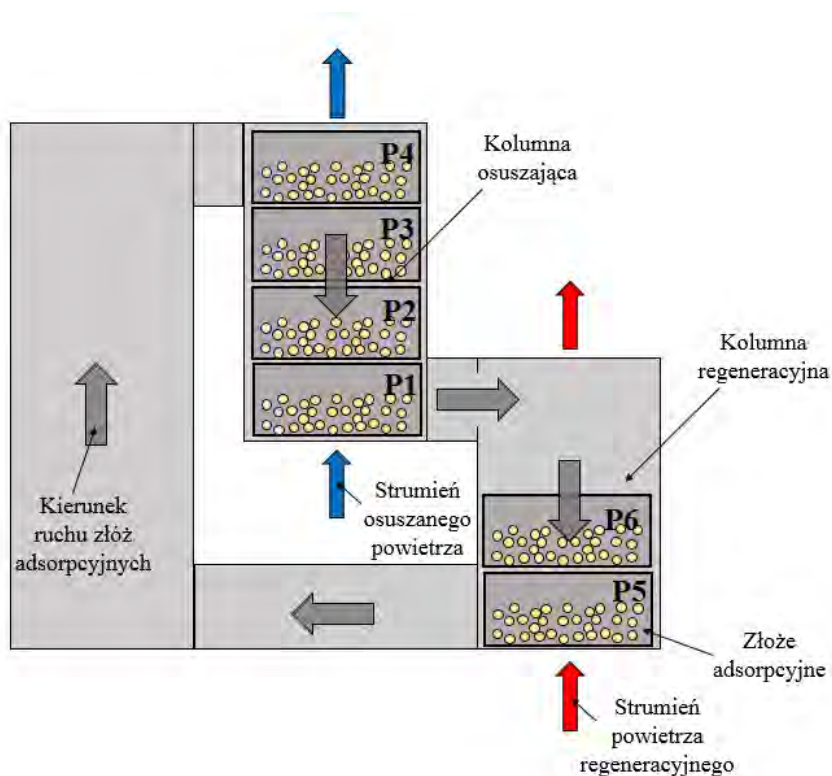
6.3 Rozwiązania wielozłożowe

Zostało już eksperymentalnie udowodnione, że wielozłożowe rozwiązania chłodziarek adsorpcyjnych pozwalają na poprawę efektywności chłodniczej [27]. Pozwala to np. na wydłużenie czasu adsorpcji względem czasu desorpcji. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem są chłodziarki trójzłożowe. Prosta budowa adsorpcyjnych złożeń fluidalnych pozwala nie tylko na stosowanie rozwiązań wielozłożowych, ale również na rozwiązania, w których złoża są elementami ruchomymi. Takie podejście może mieć szereg zalet:

- Możliwość zmiany ilości pracujących złożeń w zależności od bieżących potrzeb oraz dalszego

różnicowania czasu adsorpcji i desorpcji,

- Stabilizacja parametrów wylotowych powietrza: stabilizacja stopnia zawilżenia osuszanego powietrza istotna z punktu widzenia stabilności generowanej mocy chłodniczej i temperatury chłodu, stabilizacja temperatury powietrza osuszanego i regeneracyjnego co jest istotne z punktu widzenia możliwości efektywnej regeneracji ciepła,
- Możliwe lepsze osuszenie powietrza przy korzystnej konfiguracji przepływu osuszanego powietrza i ruchu złożeń,



Rysunek 6.4

Rysunek 6.4 przedstawia schemat wielozłożowej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej z ruchomymi złożami, która jest przedmiotem zgłoszenia patentowego pt. "Sposób adsorpcyjnego osuszania gazu" o numerze 415525 [?]. W przedstawionej koncepcji ruchome złoża są przemieszczane między kolumną osuszającą i regeneracyjną. Co określony czas złoża znajdujące się na spodzie obu kolumn są przesuwane na górę sąsiednich kolumn. Ilość złożeń w kolumnach może być różna, co pozwala dodatkowo różnicować czas adsorpcji i desorpcji złoża. Zaprezentowana koncepcja fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej została zamodelowana w celu oceny jej potencjału. W tym celu posłużono się modelem przedstawionym w Rozdziale 3. niniejszej pracy. Zamodelowano pracę wielozłożowej fluidalnej

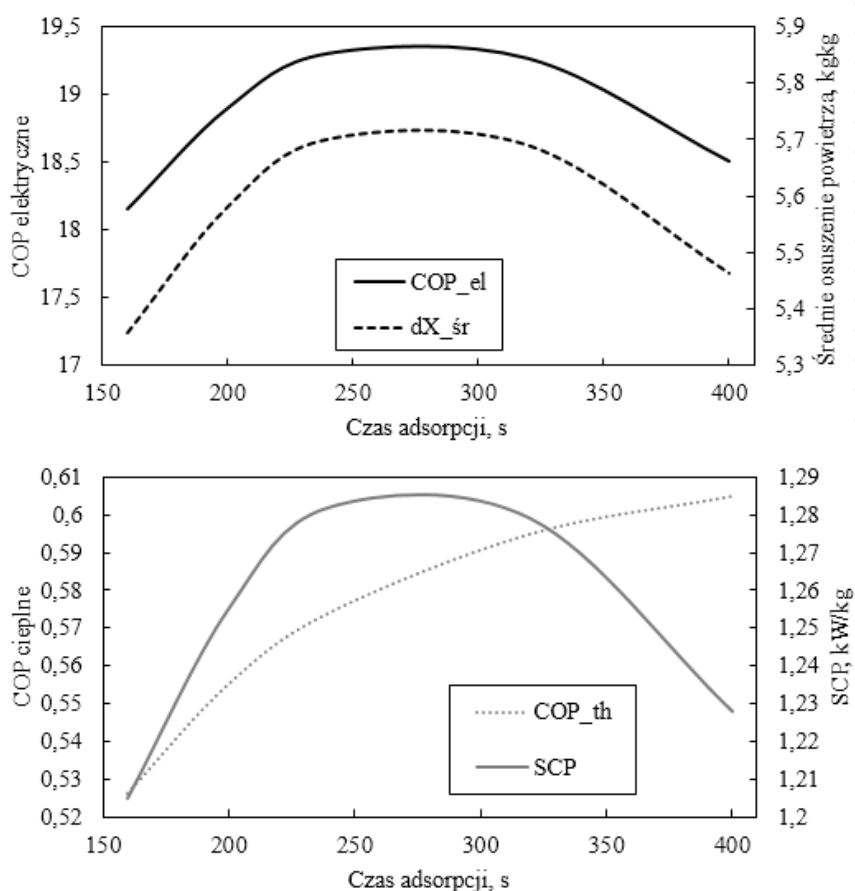
chłodziarki adsorpcyjnej w konfiguracji: cztery złoża w kolumnie osuszającej i dwa złoża w kolumnie regeneracyjnej. W każdym złożu znajduje się 0,5kg silikażelu typu RD o eliptycznym kształcie (stosunek półosi $R_{a/b} = 2$). Prędkość powietrza w kolumnie osuszającej i regeneracyjnej wynosiły odpowiednio 3ms^{-1} i $4,5\text{ms}^{-1}$, a temperatury powietrza 25°C i 60°C . Parametry użyte do modelowania są zestawione w Tabeli 6.1. Zamodelowano pracę urządzenia dla czasu trwania adsorpcji w granicach 160 do 400 s. Przy czterech złożach znajdujących się naraz w kolumnie osuszającej oznacza to, że złoża były przesuwane o jedną pozycję co 40 - 100 s. Czas desorpcji był odpowiednio dwa razy krótszy (80 - 200 s). Efektywność chłodnicza wielozłożowej adsorpcyjnej chłodziarki fluidalnej

Tabela 6.1: Parametry wykorzystane do analizy energetycznej poszczególnych elementów systemu

Nazwa	Symbol	Jednostka	Wartość
Ilość złożów w kolumnie osuszającej	M_{ads}	-	4
Ilość złożów w kolumnie regeneracyjnej	M_{des}	-	2
Masa silikażelu w złożu	M_{sor}	kg	0,5
Srednica złoża adsorpcyjnego	D_{bed}	m	0,28
średnica ziarna odniesienia	d_{ref}	m	0,001
Stosunek półosi ziarna eliptycznego	$R_{a/b}$	-	2
Prędkość powietrza podczas adsorpcji	U_{ads}	ms^{-1}	3
Prędkość powietrza podczas desorpcji	U_{des}	ms^{-1}	4,5
Temperatura powietrza podczas adsorpcji	T_{ads}	$^{\circ}\text{C}$	25
Temperatura powietrza podczas desorpcji	T_{des}	$^{\circ}\text{C}$	60
Stopień zawilżenia powietrza na wlocie do złożów	$X_{p,in}$	gkg^{-1}	0,012
Czas trwania adsorpcji złożów	t_{ads}	s	160 - 400
Czas trwania desorpcji złożów	t_{des}	s	80 - 200

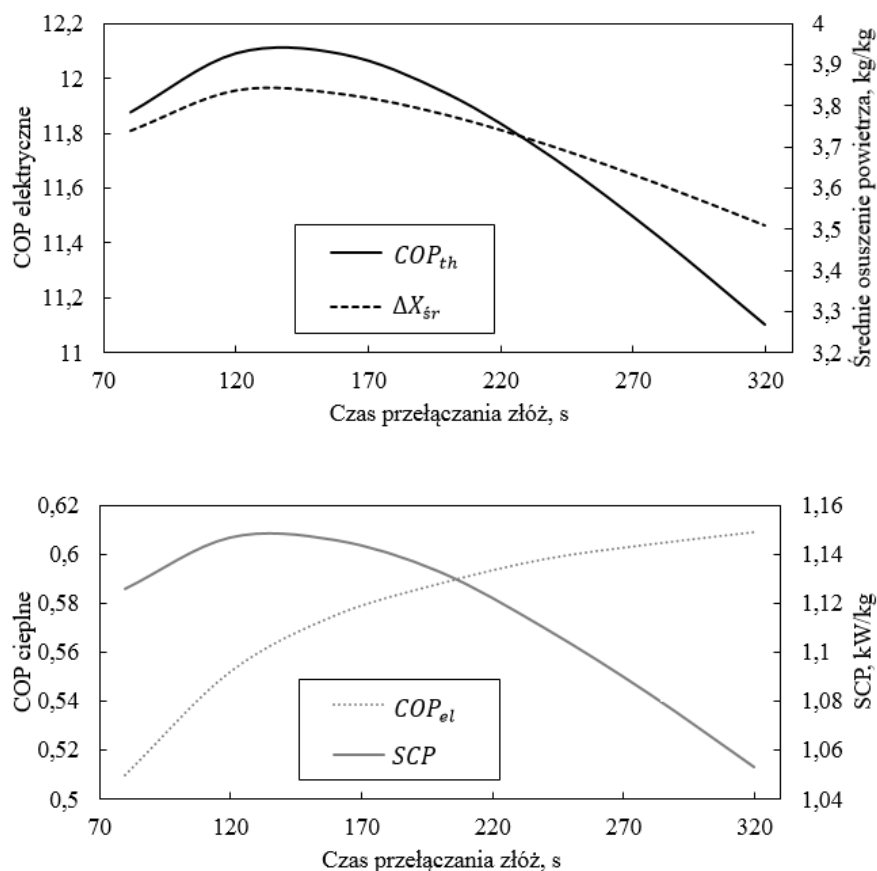
jest przedstawiona na Rysunku 6.5. Dla porównania na Rysunku 6.6 jest przedstawiona efektywność chłodnicza fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej omawianej w Rozdziałach 4 oraz 5. Chłodziarka jest pracującą przy tych samych parametrach zasilania, napełniona tą samą sumaryczną ilością sorbentu. Zakres modelowanych czasów przełączania złożów został dobrany w taki sposób aby optymalizować elektryczne COP, Właściwą Wydajność Chłodniczą SCP oraz średnie osuszenie powietrza ΔX_{sr} . Zastosowanie wielozłożowego rozwiązania nie przyczyniło się do poprawy cieplnego COP. Zasadnicza poprawa jest natomiast widoczna w odniesieniu do trzech pozostałych parametrów opisujących efektywność chłodniczą. Maksymalne osiągnięte wartości elektrycznego COP, Właściwej Wydajności Chłodniczej SCP oraz średniego osuszenia powietrza ΔX_{sr} są odpowiednio o 60%, 12% i 49% wyższe w przypadku wielozłożowej chłodziarki w porównaniu do rozwiązania dwuzłożowego. Na szczególną uwagę zasługują znaczący wzrost średniego stopnia osuszenia ΔX_{sr} , który ostatecznie ma wpływ na temperaturę uzyskanego chłodu.

Rysunki 6.7 i 6.8 przedstawiają parametry powietrza i silikażelu w pozycjach P1-P6 (oznaczenia zbite z Rysunkiem 6.4) w czasie pracy wielozłożowej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Rozwiązanie wielozłożowe skutkuje stabilizacją temperatury powietrza wylotowego zarówno z kolum-



Rysunek 6.5

ny adsorpcyjnej (Rysunek 6.7a) jak i kolumny regeneracyjnej (Rysunek 6.8a). Pomijając chwilową (trwającą około 3-5s, a więc od 3 do 7% czasu), gwałtowną zmianę temperatury powietrza występującą zaraz po wprowadzeniu nowego złoża do kolumn, temperatura powietrza waha się w granicach 2 do 5 °C. Taki stan rzeczy ma zasadniczy wpływ na możliwość regeneracji ciepła zarówno ze strumienia powietrza osuszonego i regeneracyjnego. Negatywną konsekwencją stosowania rozwiązań wielozłożowych może być, tak jak w prezentowanym przypadku, pojawienie się niechcianej desorpcji lub adsorpcji zaraz po wprowadzeniu nowego złoża do kolumny. Wynika to z nagłej zmiany ciśnienia parcjalego pary wodnej, która skutkuje chwilowym zmianą równowagowego stopnia zaadsorbowania. Przykładowo złoże w pozycji P6 jest regenerowane w temperaturze maksymalnie około 57°C (Rysunek 6.8a) i stopniu zawilżenia powietrza około 13 gkg⁻¹ (który jest ściśle związany z ciśnieniem parcjaleym) (Rysunek 6.8b). W momencie gdy to złoże zostanie przemieszczone na szczyt kolumny osuszającej do pozycji P1 ciśnienie parcjale powietrza spada do poziomu około 7 gkg⁻¹ (Rysunek 6.7b) i umożliwia wciąż nagrzanemu złożu kontynuować desorpcję. W efekcie chwilowo (na około 2-3 s) rośnie stopień zawilżenia powietrza na wylocie ze złoża. Przedstawiony niechciany efekt



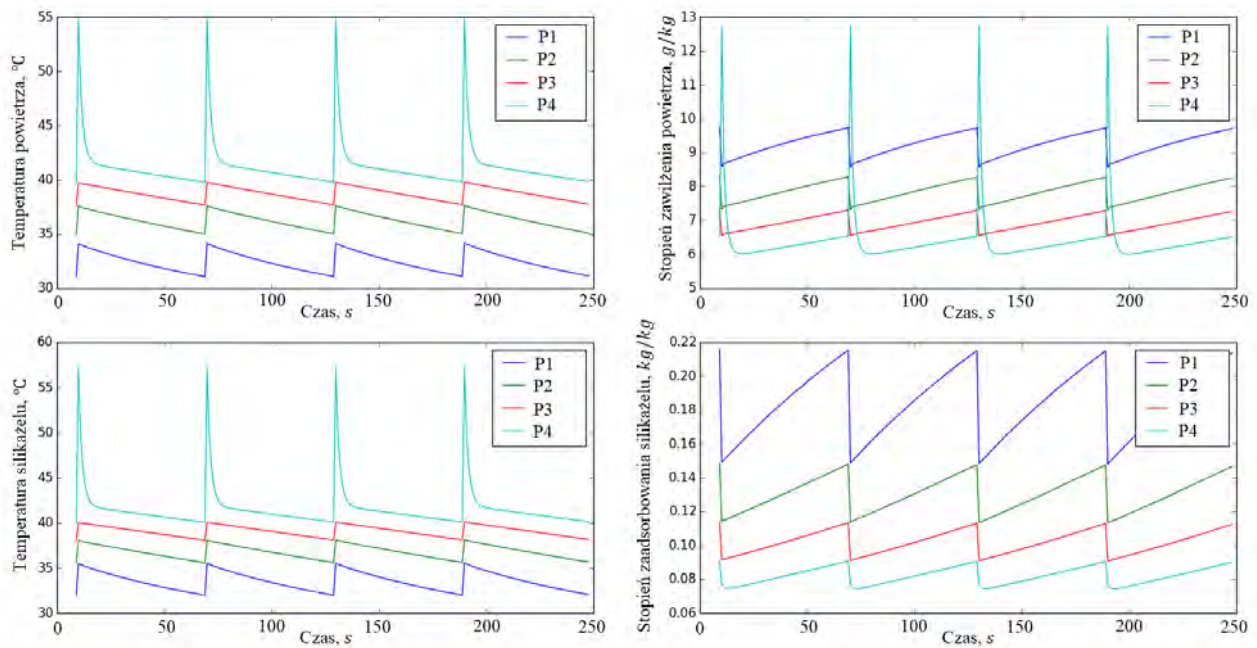
Rysunek 6.6

uboczny nie ma jednak wpływu na ogólnie znacząco poprawioną pracę wielozłożowych układów z ruchomymi złożami względem układów prostych.

Wnioski

Przedstawiono dwa kierunki dalszego rozwoju zagadnień związanych z adsorpcyjnym suszeniem powietrza w chłodnictwie, które, według wstępnych analiz mogą przyczynić do znaczącej poprawy efektywności chłodniczej fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych. Na podstawie przeprowadzonych wstępnych analiz zostały wyciągnięte następujące wnioski:

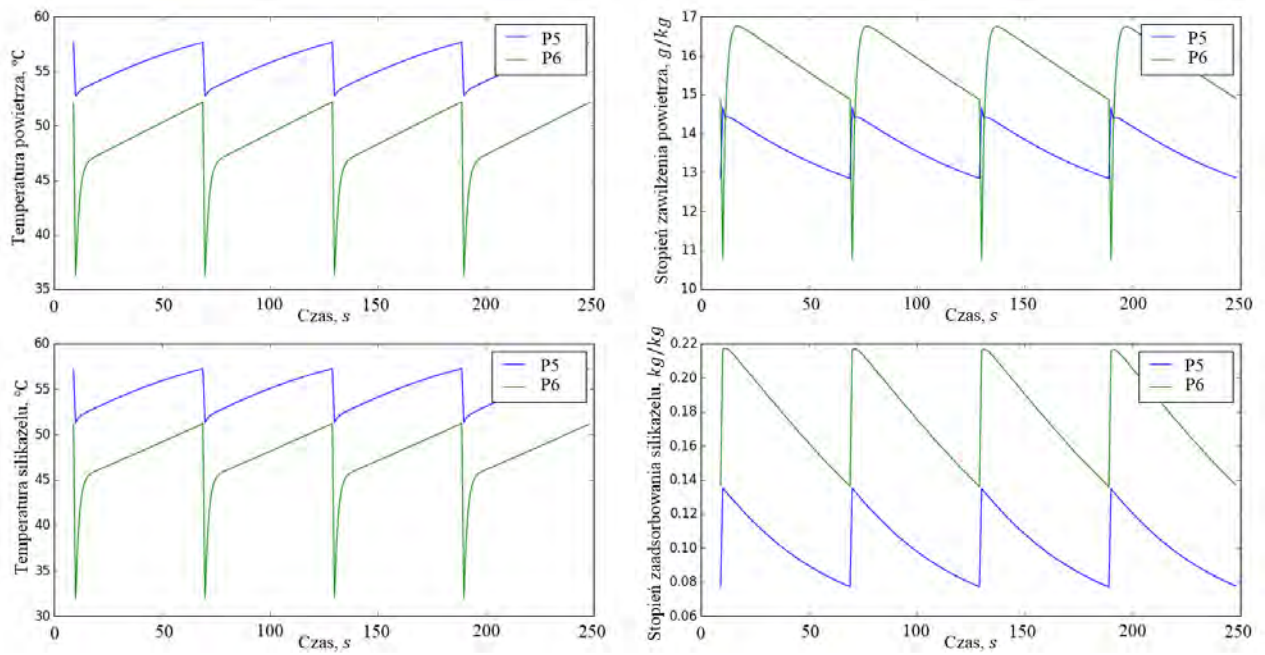
- Celowa modyfikacja kształtu ziaren fluidyzowanych ziaren może się przyczynić do znaczącej redukcji spadku ciśnienia na złożu. Ponadto, modyfikacja kształtu ziarna zwiększa właściwą powierzchnię złoża (kula ma najmniejszy stosunek powierzchni do objętości), skraca drogę dyfuzji w sorbencie, podnosi minimalną prędkość fluidyzacji. Dalsza analiza tego zagadnienia



Rysunek 6.7

wymaga po pierwsze potwierdzenia eksperymentalnego przedstawionych w niniejszym Rozdziale analiz teoretycznych oraz w drugiej kolejności inżynierencji w proces produkcji silikazelu w celu uzyskania żądanego kształtu.

- Analiza teoretyczna koncepcyjnej wielozłożowej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej z ruchomymi złożami wskazuje na możliwość znacznej poprawy efektywności chłodniczej szczególnie odniesieniu do elektrycznego COP i średniego stopnia osuszenia, które wzrastają o blisko 50% w stosunku do rozwiązania dwuzłożowego. Ponadto znaczącej stabilizacji ulegają temperatury powietrza na wylocie z obu kolumn co stwarza możliwość efektywniejszej regeneracji zawartego w nich ciepła. Dalsze prace w zakresie tego zagadnienia wymagają przede wszystkim prac nad prototypem pełniącym rolę *proof of concept*.



Rysunek 6.8

Rozdział 7

Podsumowanie

Zaprezentowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania i optymalizacji procesów adsorpcyjnego suszenia powietrza i efektywności fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych. W pierwszej kolejności zaprezentowano szerszy kontekst sytuacji w chłodnictwie, prezentując aktualne trendy w rozwoju chłodnictwa i uzasadniając podjęcie ww. tematyki. Zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono badania eksperymentalne. Ponadto opracowano założenia do modelu fizycznego zjawiska, który został następnie pozytywnie zwalidowany na podstawie własnych wyników badań eksperymentalnych. Opracowany model został wykorzystany do analizy wpływu parametrów procesowych na adsorpcyjne suszenie powietrza w złożu fluidalnym oraz efektywność fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej jako całości. Ponadto została przeprowadzona analiza egzergetyczna, która pozwoliła zidentyfikować elementy fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej w największym stopniu odpowiedzialne za powstające straty egzergetyczne. Dodatkowo zostały wskazane zagadnienia, których pełna analiza wykracza poza ramy prezentowanej rozprawy doktorskiej, ale które, według autora, mogą prowadzić do dalszej poprawy efektywności chłodniczej fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych. Poniżej zostały wypunktowane najważniejsze wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych prac:

1. Technologie chłodnicze wykorzystujące zjawisko adsorpcji fizycznej pary wodnej przez silikażel pozwalają na efektywną konwersję niskotemperaturowego ciepła na chłód. Wyzwaniem technologii adsorpcyjnych silikażel-woda, niezależnie od specyfiki urządzenia jest jednoczesna intensyfikacja procesów wymiany ciepła i masy, które mają zasadniczy wpływ na efektywność chłodniczą. Jednym z potencjalnych rozwiązań pozwalających na intensyfikację adsorpcji jest zastosowanie fluidyzacji, którą charakteryzuje nie tylko bardzo intensywna wymiana ciepła i masy między fluidyzowanymi ziarnami (silikażelem), a fluidyzującym gazem (powietrzem wilgotnym), ale również ograniczone spadki ciśnienia.
2. Przeprowadzone badania eksperymentalne wskazują, że wymiana masy podczas adsorpcji i desorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji jest kontrolowana przez różne mechanizmy: podczas adsorpcji jest to konwekcja pary wodnej do powierzchni ziarna, podczas desorpcji jest to dyfuzja pary wodnej wewnątrz ziarna. Przyjęcie takich założeń pozwoliło na

opracowanie modelu fizycznego zjawiska, który charakteryzuje jakościowa zgodność z wynikami eksperymentalnymi zarówno dla adsorpcji jak i desorpcji. Jest to, według wiedzy autora, pierwszy model zjawiska adsorpcji pary wodnej przez silikażel podczas fluidyzacji który umożliwia tak kompleksowy opis omawianych zjawisk.

- Przeprowadzone analizy teoretyczne wskazują na zasadniczy wpływ parametrów procesowych takich jak średnica ziaren silikażelu, prędkość powietrza w złożu fluidalnym, czas przełączania złóż oraz wysokość zasypania złoża zarówno na adsorpcyjne procesy suszenia jak i efektywność chłodniczą fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych jako całości.

Zmniejszenie średnicy ziaren sorbentu w złożu przyczynia się do znacznej poprawy efektywności chłodniczej oraz umożliwia lepsze osuszenie powietrza. Z drugiej strony, średnica ziaren sorbentu wpływa na minimalną i maksymalną prędkość powietrza w złożu fluidalnym. Wraz ze spadkiem średnicy zawęża się przedział, w którym jest możliwa fluidyzacja: dla sferycznych ziaren o średnicy 1 mm prędkość powietrza w złożu powinna wynosić w granicach 1 - 6 mm.

Czas przełączania złóż może być optymalizowany pod kątem Właściwej Wydajności Chłodniczej SCP oraz elektrycznego COP. Czas przełączania złóż dłuższy niż optymalny pozwala na podniesienie cieplnego COP kosztem spadku SCP i COP_{el} (Poprawa COP_{th} jest jednak ograniczana stratami przy regeneracji ciepła). Natomiast czas przełączania złóż krótszy niż optymalny prowadzi do nieefektywnego wykorzystania potencjału adsorpcji i dlatego kluczowym jest utrzymanie kontroli nad tym parametrem. Rozwiązania pozwalające na samocyrkulację sorbentu w złożach, kosztem utraty kontroli nad czasem przebywania sorbentu w poszczególnych złożach mogą paradoksalnie prowadzić do pogorszenia efektywności chłodniczej.

Możliwość kontroli ilości ciepła dostarczanego do złóż lub z nich odprowadzanego poprzez zmianę prędkości powietrza przepływającego przez złożę, stwarza nowe możliwości optymalizacyjne procesów adsorpcyjnego suszenia powietrza. Taka optymalizacja jest z reguły konieczna ze względu na znaczne różnice kinetyki procesów adsorpcji i desorpcji (szczególnie widoczne w przypadku fluidyzacji ze względu na różne dominujące mechanizmy wymiany masy). Zamiast różnicować czas przeznaczony na adsorpcję i desorpcję (co zazwyczaj wymusza również zastosowanie chłodziarek wielozłożowych) różnicowana może być prędkość powietrza. Pozwaliby nie tylko na efektywne wykorzystanie całego czasu przełączania złóż, ale również zmniejszenie kosztów przetłaczania powietrza przez ograniczenie strumienia objętości powietrza przy desorpcji.

Powietrze wilgotne pełni w przypadku adsorpcyjnych chłodziarek fluidalnych dwójaką rolę. Z jednej strony jest medium roboczym, którego ciśnienie parcjalne jest w pierw zmniejszane poprzez osuszenie a następnie podwyższane, co skutkuje uzyskaniem mocy chłodniczej. Z drugiej strony powietrze wilgotne jest nośnikiem ciepła umożliwiającym adsorpcję lub desorpcję. W konsekwencji stosunek ilości pary wodnej w sumieniu powietrza i ciepła przez nie transportowanego jest stały. Niezależnie można zmieniać jedynie wysokość zasypania złoża. Przy niewielkich wysokościach zasypania złoża adsorpcja przebiega bardzo dynamicznie - na stosunkowo niewielką masę sorbentu w złożu przypada ciepło proporcjonalne do prędkości powietrza przepływającego

przez złożę. Przy znacznych wysokościach zasypania złoża kinetyka adsorpcji jest ograniczona ilością dostarczanego ciepła - ma to zasadniczy wpływ na Właściwą Wydajność Chłodniczą oraz elektryczne COP i w praktyce ogranicza wysokość zasypania złoża do pojedynczych centymetrów. Jest to czynnik utrudniający skalowanie złożów fluidalnych - zwiększenie wydajności chłodniczej wymaga zwiększenia pola przekroju złożów przy zachowaniu wysokości zasypania złoża.

4. Za największą destrukcję egzergii w fluidalnej chłodziarce adsorpcyjnej odpowiada regeneracyjny wymiennik ciepła oraz złoża fluidalne.

Ze względu na to, że powietrze wilgotne jest jednocześnie medium roboczym i nośnikiem ciepła, nie może ono być ponownie wykorzystane w sposób bezpośredni i jest wymagana regeneracja ciepła. Niskie spodziewane współczynniki przenikania ciepła oraz niska gęstość powietrza wilgotnego stanowią przeszkodę w projektowaniu wysokosprawnych regeneracyjnych wymienników ciepła. Przeprowadzona analiza egzergetyczna wskazuje, że poprawa regeneracji ciepła ma sens tak długo jak zmniejszenie strat egzergii związanej z temperaturą przewyższa dodatkową destrukcję egzergii związaną ze stratami ciśnienia. Efektywna regeneracja ciepła jest kluczową kwestią decydującą o efektywności wykorzystania ciepła COP_{th} . Przykładowo, poprawa sprawności regeneracyjnego wymiennika ciepła z 80% do 90% skutkuje poprawą COP_{th} o 12,5% do wartości około 0,62.

Złoża fluidalne odpowiadają za około 35% całkowitej destrukcji egzergii. Większość destrukcji egzergii złożów fluidalnych, około 60%, jest związana z temperaturą - złoża fluidalne w pierw akumulują ciepło, a następnie oddają je na obniżonym poziomie temperatury. Sposobem na zmniejszenie destrukcji egzergii związanej z akumulacją ciepła w złożu jest redukcja masy martwej złoża - w przypadku złożów fluidalnych masa martwa jest zredukowana do minimum (czyli pojemności cieplnej samego silikazelu). Nieznaczny wpływ na destrukcję egzergii w złożach fluidalnych ma również czas przełączania złożów.

5. Ze względu na niską gęstość i pojemność cieplną powietrza wilgotnego około 40% całości destrukcji egzergii wynika ze spadków ciśnienia w elementach instalacji. Technologie zasilane niskotemperaturowym ciepłem, w tym szczególnie te wykorzystujące powietrze wilgotne jako czynnik roboczy, są bardzo wrażliwe na destrukcje egzergii. Przepływ mediów o stosunkowo niewielkiej egzergii (wynikającej z niskiej temperatury) generuje względnie duże straty egzergii związane ze spadkami ciśnień. Redukcja spadków ciśnień instalacji ma pierwszorzędne znaczenie w kwestii sprawności egzergetycznej fluidalnych chłodziarek adsorpcyjnych oraz generalnie w systemach konwersji niskotemperaturowego ciepła.
6. Spadek ciśnienia generowany na złożach fluidalnych może zostać znacząco zredukowany poprzez modyfikacje kształtu ziarna sorbentu na etapie produkcyjnym. Przeprowadzone wstępne analizy teoretyczne wskazują na możliwość redukcji spadku ciśnienia złoża ziaren eliptycznych o około 20% w stosunku do złoża fluidalnego ziaren sferycznych o tej samej masie. Modyfikacja kształtu ziarna z jednej strony zmniejsza względny spadek ciśnienia na złożu z drugiej

strony zmniejszając gęstość złoża co mimo wszystko skutkuje zmniejszeniem spadku ciśnienia na złożu przy zachowaniu takiej samej masy adsorbentu w złożu. Ponadto modyfikacja kształtu ziaren zwiększa właściwą powierzchnię złoża (kula ma najmniejszy stosunek powierzchni do objętości), skraca drogę dyfuzji w sorbencie, podnosi minimalną prędkość fluidyzacji. Nie ma to jednak wpływu widoczną na poprawę Właściwej Wydajności Chłodniczej lub cieplnego COP.

7. Przeprowadzona analiza koncepcyjnej wielozłożowej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej z ruchomymi złożami wskazuje na potencjał poprawy efektywności chłodniczej tego typu rozwiązań. Maksymalne osiągnięte wartości elektrycznego COP, Właściwej Wydajności Chłodniczej SCP oraz średniego osuszenia powietrza ΔX_{sr} są odpowiednio o 60%, 12% i 49% wyższe niż w przypadku rozwiązań klasycznych (dwuzłożowych, nieruchomych). Tego typu rozwiązania pozwalają również na stabilizację temperatury i stopnia zawilżenia powietrza na wylocie z obu złożów co z jednej strony ma pozytywny wpływ na stabilność uzyskiwanego chłodu, z drugiej umożliwia efektywniejszą regenerację ciepła zawrtego w strumieniu powietrza osuszonego i regeneracyjnego.

Załącznik 2.1

Opis skryptu

Zadaniem prezentowanego poniżej skryptu w języku PYTHON jest obróbka wyników uzyskanych w trakcie pomiarów. Wyniki końcowe są konwertowane do formatu .xlsx (excel) i rozdane na poszczególne serie pomiarowe. Funkcje poszczególnych elementów skryptu zostały skomentowane w formacie komentarza języka PYTHON: # komentarz. Kompilacja skryptu jest możliwa jedynie przy zachowaniu odpowiedniego układu wcięć nieuwzględnionego w niniejszej pracy. Ponadto, niektóre z linii kodu, ze względu na nadmierną długość, zostały sztucznie podzielone. Uruchomienie skryptu wymaga wprowadzenia odpowiednich wcięć oraz ponownego połączenia podzielonych wierszy.

Skrypt

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# importowanie bibliotek
import pandas as pd
import numpy as np

# zamiana czasu w godzinach na sekundy
def get_sec(time_str):
    h, m, s = time_str.split(':')
    return int(h) * 3600 + int(m) * 60 + int(s)

# ciśnienie nasycenia wody w funkcji temperatury w oC
def p_sat(t):
    return -0.00000000182379755742*t**6 + 0.00000330502126111298*t**5 +
    0.00021694816550699200*t**4 + 0.02975206187856830000*t**3 +
    1.36324553614494000000*t**2 + 45.12294588555360000000*t
    + 608.35569805018300000000

# Stopień zawilżenia powietrza w funkcji temperatury
```

```
T i wilgotności względnej powietrza RH
def X_abs(T, RH):
psat = p_sat(T)
x = 0.62198*psat*RH/(101325-psat*RH)
return x

# Zbiór wszystkich wykonanych serii pomiarowych identyfikowanych
# po dacie wykonania (list_of_experiments).

list_of_experiments = ['04.11.2016', '09.11.2016',
'09.11.2016', '14.11.2016', '15.11.2016', '16.11.2016',
'16.11.2016', '17.11.2016', '18.11.2016', '21.11.2016',
'22.11.2016', '23.11.2016', '24.11.2016', '25.11.2016',
'28.11.2016', '29.11.2016', '01.12.2016', '02.12.2016',
'06.12.2016', '07.12.2016', '09.12.2016', '12.12.2016',
'13.12.2016']

no = 22 # nr pomiaru

# Dodatkowo informacja o awariach czujników (no_of_sensors)
no_of_sensors = [[1,1,1,1],[1,1,0,1],[1,1,0,1],[1,1,1,1],
[1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1],
[1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1],
[1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,0,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1],
[1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1], [1,1,1,1]]

#ścieżka pliku wynikowego
df_source = pd.read_csv("C:/DOKUMENTY/Dropbox/DOKTORAT/
EKSPERYMENT/dane z rejestratora/"+str(list_of_experiments[no])
+".csv", ';')

# Usuwanie niepotrzebnych danych
del df_source['device id']
del df_source['sensor type']
del df_source['serial']
del df_source['runtime [ms]']
del df_source['absolute humidity [g/m3]']
del df_source['dew point [degC]']

# Nadawanie nazw kolumn
```

```
col_wyniki = ['godzina','czas', 'T 1', 'T 2','T_in', 'T 3',
             'T 4','T_out', 'X 1', 'X 2', 'X_in', 'X 3', 'X 4','X_out']
col_pomiary = ['godzina','czas', 'T 1', 'T 2', 'T 3', 'T 4',
              'RH 1', 'RH 2', 'RH 3', 'RH 4']
col_average = ['godzina','czas','T_in','T_out', 'X_in', 'X_out']
DF_pomiary = pd.DataFrame(columns=col_pomiary)
DF_wyniki_all = pd.DataFrame(columns=col_wyniki)
DF_wyniki_average = pd.DataFrame(columns=col_average)

# Właściwa obróbk danych
print 'OBRÓBKA DANYCH...'

# określenie ile czujników działało podczas konkretnej
# serii pomiarowej
s = sum(no_of_sensors[no])
for t in range(len(df_source.index)/sum(no_of_sensors[no])):

    list_pomiary = []
    list_wyniki_all = []
    list_wyniki_average = []

    # Czas podany w formacie hh:mm:ss
    time1 = df_source.iat[t*s,0]
    time1 = time1[11:19]
    list_pomiary.append(time1)
    list_wyniki_all.append(time1)
    list_wyniki_average.append(time1)

    # Czas podany w sekundach
    time2 = t
    list_pomiary.append(time2)
    list_wyniki_all.append(time2)
    list_wyniki_average.append(time2)

    # Określenie temperatur T1, T2, T3, T4 i wilgotności
    # względnych RH1, RH2, RH3, RH4 w zależności od
    # konfiguracji działających czujników
    if no_of_sensors[no] == [1,1,1,1]:

        T1 = round(df_source.iat[t * s, 2],2)
```

```
T2 = round(df_source.iat[t * s+1, 2], 2)
T3 = round(df_source.iat[t * s+2, 2], 2)
T4 = round(df_source.iat[t * s+3, 2], 2)

RH1 = round(df_source.iat[t * s, 1]/10, 2)
RH2 = round(df_source.iat[t * s + 1, 1]/10, 2)
RH3 = round(df_source.iat[t * s + 2, 1]/10, 2)
RH4 = round(df_source.iat[t * s + 3, 1]/10, 2)

if no_of_sensors[no] == [1,1,0,1]:

T1 = round(df_source.iat[t * s, 2],2)
T2 = round(df_source.iat[t * s+1, 2], 2)
T3 = round(df_source.iat[t * s+2, 2], 2)
T4 = round(df_source.iat[t * s+2, 2], 2)

RH1 = round(df_source.iat[t * s, 1]/10, 2)
RH2 = round(df_source.iat[t * s + 1, 1]/10, 2)
RH3 = round(df_source.iat[t * s + 2, 1]/10, 2)
RH4 = round(df_source.iat[t * s + 2, 1]/10, 2)

if no_of_sensors[no] == [1, 0, 1, 1]:

T1 = round(df_source.iat[t * s, 2], 2)
T2 = round(df_source.iat[t * s, 2], 2)
T3 = round(df_source.iat[t * s + 1, 2], 2)
T4 = round(df_source.iat[t * s + 2, 2], 2)

RH1 = round(df_source.iat[t * s, 1]/10, 2)
RH2 = round(df_source.iat[t * s, 1]/10, 2)
RH3 = round(df_source.iat[t * s + 1, 1]/10, 2)
RH4 = round(df_source.iat[t * s + 2, 1]/10, 2)

# Uśrednianie temepnatur
T_in = (T1 + T2) / 2
T_out = (T3 + T4) / 2

# Obliczenie stopnia zawilżenia powietrza
X1 = X_abs(T1, RH1)
X2 = X_abs(T2, RH2)
```



```
X3 = X_abs(T2, RH2)
X4 = X_abs(T2, RH2)

# Uśrednianie stopni zawilżenia powietrza
X_in = (X1 + X2) / 2
X_out = (X3 + X4) / 2

# Załączanie wyników do list tymczasowych

list_pomiary.append(T1)
list_pomiary.append(T2)
list_pomiary.append(T3)
list_pomiary.append(T4)

list_pomiary.append(RH1)
list_pomiary.append(RH2)
list_pomiary.append(RH3)
list_pomiary.append(RH4)

list_wyniki_all.append(T1)
list_wyniki_all.append(T2)
list_wyniki_all.append(T_in)
list_wyniki_all.append(T3)
list_wyniki_all.append(T4)
list_wyniki_all.append(T_out)
list_wyniki_all.append(X1)
list_wyniki_all.append(X2)
list_wyniki_all.append(X_in)
list_wyniki_all.append(X3)
list_wyniki_all.append(X4)
list_wyniki_all.append(X_out)

list_wyniki_average.append(T_in)
list_wyniki_average.append(T_out)
list_wyniki_average.append(X_in)
list_wyniki_average.append(X_out)

# Zapisywanie danych w plikach wynikowych

df_pomiary = pd.DataFrame([list_pomiary], columns=col_pomiary)
```

```
, index = [t])

df_wyniki_all = pd.DataFrame([list_wyniki_all], columns=col_wyniki,
    index = [t])

df_wyniki_average = pd.DataFrame([list_wyniki_average],
    columns=col_average, index = [t])

DF_pomiary = pd.concat([DF_pomiary, df_pomiary])
DF_wyniki_all = pd.concat([DF_wyniki_all, df_wyniki_all])
DF_wyniki_average = pd.concat([DF_wyniki_average, df_wyniki_average])

# Rozbicie plików wynikowych na adsorpcję i desorpcję

# Stworzenie pliku wynikowego w formacie .xlsx (excel)
df = pd.read_excel("Pomiary.xlsx", sheetname='Sheet1')
# start i stop pomiarów

M_start = str(df.iat[no, 2])
M_stop = str(df.iat[no, 3])

T_start = get_sec(M_start)
T_stop = get_sec(M_stop)

# start i stop adsorpcji
A_start = str(df.iat[no, 4])
A_stop = str(df.iat[no, 5])

T_a1 = get_sec(A_start)
T_a2 = get_sec(A_stop)
# start i stop desorpcji

D_start = str(df.iat[no, 6])
D_stop = str(df.iat[no, 7])

T_d1 = get_sec(D_start)
T_d2 = get_sec(D_stop)

# czasy
t_start = 0
```

```
t_ads_start = T_a1 - T_start
t_ads_stop = T_a2 - T_start
t_des_start = T_d1 - T_start
t_des_stop = T_d2 - T_start

# DFy w których jest adsorpcja i desorpcja tylko
df_A = DF_wyniki_average[t_ads_start:t_ads_stop]
df_D = DF_wyniki_average[t_des_start:t_des_stop]

# Import wyników do plików .csv
df_A.to_csv('C:/DOKUMENTY/Dropbox/DOKTORAT/EKSPERYMENT/
Wyniki adsorpcja/Adsorpcja '+str(list_of_experiments[no])+'.csv')

df_D.to_csv('C:/DOKUMENTY/Dropbox/DOKTORAT/EKSPERYMENT
/Wyniki desorpcja/Desorpcja '+str(list_of_experiments[no])+'.csv')

# Tworzenie Excela z wynikami
print 'TWORZENIE EXCELA...'

writer1 = pd.ExcelWriter('C:/DOKUMENTY/Dropbox/DOKTORAT/
EKSPERYMENT/Wyniki/Wyniki '+str(list_of_experiments[no])+'.xlsx',
    engine='xlsxwriter')

DF_wyniki_average.to_excel(writer1, sheet_name='Wyniki')

workbook = writer1.book

worksheet = writer1.sheets['Wyniki'] # Zakładka z wynikami zbiorczymi

# Wykres 1
chart1 = workbook.add_chart({'type': 'scatter', 'subtype': 'smooth'})
chart2 = workbook.add_chart({'type': 'scatter', 'subtype': 'smooth'})
# 1st series
chart1.add_series({'name': '=Wyniki!D1', 'categories': '=Wyniki!C:C',
'values': '=Wyniki!D:D'})

chart1.add_series({'name': '=Wyniki!E1', 'categories': '=Wyniki!C:C',
'values': '=Wyniki!E:E'})

chart2.add_series({'name': '=Wyniki!F1', 'categories': '=Wyniki!C:C',
```

```
'values': '=Wyniki!F:F'})

chart2.add_series({'name': '=Wyniki!G1', 'categories': '=Wyniki!C:C',
'values': '=Wyniki!G:G'})

worksheet.insert_chart('H1', chart1)
worksheet.insert_chart('H14', chart2)

DF_wyniki_all.to_excel(writer1, sheet_name='Wszystkie dane')
df_A.to_excel(writer1, sheet_name='adsorpcja')

# dodawanie wykresów
workbook = writer1.book
# Zakładka z wynikami dla adsorpcji
worksheet = writer1.sheets['adsorpcja']

# Wykres 1
chart1 = workbook.add_chart({'type': 'scatter', 'subtype': 'smooth'})
chart2 = workbook.add_chart({'type': 'scatter', 'subtype': 'smooth'})
# 1st series
chart1.add_series({'name': '=adsorpcja!D1', 'categories':
'=adsorpcja!C:C', 'values': '=adsorpcja!D:D'})

chart1.add_series({'name': '=adsorpcja!E1', 'categories':
'=adsorpcja!C:C', 'values': '=adsorpcja!E:E'})

chart2.add_series({'name': '=adsorpcja!F1', 'categories':
'=adsorpcja!C:C', 'values': '=adsorpcja!F:F'})

chart2.add_series({'name': '=adsorpcja!G1', 'categories':
'=adsorpcja!C:C', 'values': '=adsorpcja!G:G'})

worksheet.insert_chart('J1', chart1)
worksheet.insert_chart('J14', chart2)

df_D.to_excel(writer1, sheet_name='desorpcja')

workbook = writer1.book # dodawanie wykresów

# Zakładka z wynikami dla desorpcji
```

```
worksheet = writer1.sheets['desorpcja']

chart1 = workbook.add_chart({'type': 'scatter', 'subtype': 'smooth'})
chart2 = workbook.add_chart({'type': 'scatter', 'subtype': 'smooth'})

chart1.add_series({'name': '=desorpcja!D1', 'categories':
    '=desorpcja!C:C', 'values': '=desorpcja!D:D'})

chart1.add_series({'name': '=desorpcja!E1', 'categories':
    '=desorpcja!C:C', 'values': '=desorpcja!E:E'})

chart1.add_series({'name': '=desorpcja!H1', 'categories':
    '=desorpcja!C:C', 'values': '=desorpcja!H:H'})

chart2.add_series({'name': '=desorpcja!F1', 'categories':
    '=desorpcja!C:C', 'values': '=desorpcja!F:F'})

chart2.add_series({'name': '=desorpcja!G1', 'categories':
    '=desorpcja!C:C', 'values': '=desorpcja!G:G'})

chart2.add_series({'name': '=desorpcja!I1', 'categories':
    '=desorpcja!C:C', 'values': '=desorpcja!I:I'})

worksheet.insert_chart('J1', chart1)
worksheet.insert_chart('J14', chart2)
workbook.close()

# Tworzenie Excela z pomiarami

writer1 = pd.ExcelWriter('C:/DOKUMENTY/Dropbox/DOKTORAT/
EKSPERYMENT/Pomiary/Pomiary '+str(list_of_experiments[no])+'.xlsx',
    engine='xlsxwriter')

DF_pomiary.to_excel(writer1, sheet_name='Pomiary')

workbook = writer1.book
worksheet = writer1.sheets['Pomiary']

workbook.close()
```

```
print "GOTOWE!"
```

Załącznik 3.1

Opis skryptu

Zadaniem prezentowanego poniżej skryptu w języku PYTHON jest realizacja przedstawionego w Rozdziale 3 modelu fizycznego zjawiska adsorpcji pary wodnej przez zilikażel podczas fluidyzacji. Na podstawie danych wejściowych skrypt zwraca przebiegi parametrów powietrza na wylocie ze złoża w zadanym czasie w formie graficznej. Funkcje poszczególnych elementów skryptu zostały skomentowane w formacie komentarza języka PYTHON: # komentarz. Kompilacja skryptu jest możliwa jedynie przy zachowaniu odpowiedniego układu wcięć nieuwzględnionego w niniejszej pracy. Ponadto, niektóre z linii kodu, ze względu na nadmierną długość, zostały sztucznie podzielone. Uruchomienie skryptu wymaga wprowadzenia odpowiednich wcięć oraz ponownego połączenia podzielonych wierszy.

Skrypt

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import numpy as np

# Dane wejściowe

# Ustalenie co jest modelowane (do wyboru adsorpcja, desorpcja)
mode = 'adsorpcja'

T0 =60. # początkowa temperatura układu, oC

# początkowy stopień zaadsorbowana sorbentu (przy wartości 0
#początkowy stopień zaadsorbowania sorbentu będzie równy
#równowagowemu), kg/kg
x_w0 = 0.0
```

```

T_in = 27. # temperatura powietrza na wlocie do zloza, oC

# stopien zawilzenia powietrza na wlocie
# do zloza, kg h20/ kg powietrza suchego
x_in = 0.007

d_sor = 0.001 # srednica ziarna sorbentu, m
w_p = 3.3 # predkosci powietrza w wolnym przekroju kanału, m/s
ro_sor = 900 # nasypowa gęstość sorbentu, kg/m3
H_sor = 0.2 # wysokość do jakiej nasypany jest silikażel
SG_type = 'A' # typ silikażelu (do wyboru: A, RD)
x_p0 = x_in # początkowy stopień zawilzenia powietrza, -
H = 0.2 # wysokość zloza, m
D = 0.08 # srednica zloza, m
eps_0 = 0.49 # Porowatosc spoczynkowa zloza, -
eps_f = 0.8 # Porowatosc fluidyzujacego zloza, -
ro_pw = 1.2 # gęstość powietrza wilgotnego, kg/m3
ro_ps = 1.1 # gęstość powietrza suchego, kg/m3
c_ps = 1004 # ciepło właściwe suchego powietrza, J/kg*K
c_sor = 921. # ciepło właściwe sorbentu, J/kg*K
c_h2o = 4186. # ciepło właściwe wody, J/kg*K
Q_ads = 2710000. # ciepło adsorpcji sorbentu J/kg
R_h2o = 461.5 # indywidualna stała gazowa dla pary wodnej, J/kg*K
Pr_g = 0.716 # liczba Prandtla dla powietrza, -
A_sor = 4.71*H_sor*D**2*(1-eps_0)/d_sor # Powierzchnia zloza, m2
v = 0.000018 # lepkość dynamiczna powietrza, kg/ms
Re_p = w_p * d_sor*ro_pw / v # liczba Reynoldsa
# Stała dyfuzji (maksymalna dyfuzja
# w nieskończonej temperaturze) m2/s
D_0 = 0.003
e = 2.71828182 # liczba e
R = 8.315 # Uniwersalna stała gazowa, J/molK
E = 42000 # Energia aktywacji, J/K
m_zloze = H_sor*ro_sor*0.79*D**2 # masa sorbentu w zlozu, kg
m_ps = w_p*0.79*D**2*ro_ps # strumień masy suchego powietrza, kg/s

# Objętość powietrza zawartego w wypełnieniu, m3
V_p = 0.79*H_sor*(eps_0-1)-eps_f*D**2/(eps_f-1)

```



```
# Ciśnienie pary wodnej w powietrzu, Pa
def p_pw(x_p):
return 100000*x_p/(0.622+x_p)

# współczynnik dyfuzji pary wodnej w ziarnie sorbentu,
def D2(t):
T = t + 273.15
x = D_0*(1/e)**(E/R/T)
return x

# Ciepło właściwe sorbentu który jest częściowo zaadsorbowany
def c_w(w_sor):
return c_sor + c_h2o * w_sor

# ciepło właściwe wilgotnego powietrza
def c_pw(x_pw):
return 1884*x_pw+1004*(1-x_pw)

# Równania równowagi adsorpcji dla silikażelu typu 'A'
def Toth_A(T, p):
T = T + 273.15
P = p/1000.
K0 = 0.000000000465 # Stała adsorpcji
H_ads = 2710000. # Ciepło adsorpcji, J/kg
q_m = 0.4 # Maksymalny stopień zaadsorbowania, kg wody /kg silikażelu
t = 10. # Stała adsorpcji
w = K0*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T)*P/(1+
(K0/q_m*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T)*P)**t)**(1/t)
return w

# Równania równowagi adsorpcji dla silikażelu typu 'RD'
def Toth_RD(T, p):
T = T + 273.15
P = p/1000.
K0 = 0.00000000073 # Stała adsorpcji
H_ads = 2693000. # Ciepło adsorpcji, J/kg
q_m = 0.45 # Maksymalny stopień zaadsorbowania, kg wody /kg silikażelu
t = 12. # Stała adsorpcji
w = K0*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T)*P/(1
+(K0/q_m*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T)*P)**t)**(1/t)
```

```

return w
# Moduł, który w przypadku wartości x_w0 =0 ustawia
# początkowy stopień zaadsorbowania równy równowagowemu
if x_w0 == 0.:
if SG_type == 'A':
x_w0 = round(Toth_A(T0, p_pw(x_p0)), 5)
elif SG_type == 'RD':
x_w0 = round(Toth_RD(T0, p_pw(x_p0)), 5)

# Współczynnik przewodzenia powietrza w zależności od tempepratury, W/mK
def lambda_g(T_g):
l = 0.00007*T_g + 0.0241
return l

# Wyznaczenie współczynnika konwekcji ciepła do ziarna, W/m2*K
def h_c1(T_g):
if Re_p < 50. and Re_p > 0.1:
Nu_p = 0.0282*Re_p**1.4*Pr_g**0.33
elif Re_p < 10000. and Re_p > 50.:
Nu_p = 1.01 * Re_p ** 0.48 * Pr_g ** 0.33
lam = lambda_g(T_g)
h = Nu_p*lam/d_sor
return h
# Wyznaczenie współczynnika konwekcji masy do ziarna, kg/m2*s
def h_d1(T_g, x_g):
Le = 0.913
h = h_c1(T_g)/c_pw(x_g)/Le
return h

# Wyznaczanie stopnia zawilżenia powietrza w warstwie
# przyściennej ziarnia, kg pary wodnej /kg suchego
# powietrza dla silikażelu typu A
def X_pA(T_sor, X_sor):
T = T_sor + 273.15
K0 = 0.000000000465
H_ads = 2710000.
q_m = 0.4
t = 10.
p = 1/(K0*2.7182818** (H_ads/R_h2o/T) * ((1/X_sor)**t - (1/q_m)**t) ** (1/t))
p = p*1000

```

```

X_p = 0.622 * p / (100000 - p)
return X_p
# Wyznaczanie stopnia zawilżenia powietrza w warstwie
# przyściennej ziarnia, kg pary wodnej /kg suchego
# powietrza dla silikażelu typu RD
def X_pRD(T_sor, X_sor):
T = T_sor + 273.15
K0 = 0.000000000073
H_ads = 2693000.
q_m = 0.45
t = 12.
p = 1/(K0*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T)*((1/X_sor)**t-(1/q_m)**t)**(1/t))
p = p * 1000
X_p = 0.622 * p / (100000 - p)
return X_p
# Funkcja sprawdzająca który typ silikażelu został wybrany
def X_p(T_sor, X_sor):
x = 0
if SG_type == 'A':
x = X_pA(T_sor, X_sor)
elif SG_type == 'RD':
x = X_pRD(T_sor, X_sor)
return x

# Wymiana masy podczas adsorpcji, kg/kg*s
def dw1(T_sor, X_sor, T_g, X_g):
x_p = X_p(T_sor, X_sor)
Diff = h_d1(T_g, X_g) * (X_g - x_p)
dw = Diff*6*(1-eps_0)/ro_sor/d_sor
return dw

# Wymiana masy podczas desorpcji, kg/kg*s
def dw2(T_sor, X_sor, X_g):
p_h20 = p_pw(X_g)
D_s = D2(T_sor)
w_eq = 0
if SG_type == 'A':
w_eq = Toth_A(T_sor, p_h20)
elif SG_type == 'RD':
w_eq = Toth_RD(T_sor, p_h20)
else:

```

```

print 'Błędny typ silikażelu'
dw = 60*D_s/(d_sor**2)*(w_eq-X_sor)
return dw

print ' OBLICZENIA... '
# listy tymczasowe
time = [0]
T_w = [T0]
x_w = [x_w0]
T_p = [T0]
T_out = [T0]
x_p = [x_p0]

delay = 0

#Parametry symulacji
t_sim = 2000. # Czas trwania symulacji, s
dt = 0.005 # krok czasowy symulacji, s

for k in range(int(t_sim / dt)): # Krok czasowy

# Zmiana temperatury powietrza w złożu podczas kroku
# czasowego, K
dTp = (m_ps * c_pw(x_p[-1]) * ((1 + x_in) * T_in -
(1 + x_p[-1]) * T_p[-1]) - h_cl(T_p[-1])*A_sor *
(T_p[-1] - T_w[-1])) / (V_p * ro_pw * c_pw(x_p[-1])) * dt

# Zmiana stopnia zaadsorbowania silikażelu w złożu
# podczas kroku czasowego dla adsorpcji/desorpcji, K
if mode == 'adsorpcja':
dxw = dw1(T_w[-1], x_w[-1], T_p[-1], x_p[-1]) * dt
elif mode == 'desorpcja':
dxw = dw2(T_w[-1], x_w[-1], x_p[-1]) * dt
else:
print' Błędny mode'

# Zmiana stopnia zawilżenia powietrza w złożu podczas
# kroku czasowego, K
dxp = ((m_ps * (x_in - x_p[-1]) - m_zloze * dxw / dt) / (V_p * ro_ps)) * dt

```

```
# Zmiana temperatury silikażelu w złożu podczas kroku czasowego, K
dT_w = (h_c1(T_p[-1])*A_sor * (T_p[-1] - T_w[-1]) + Q_ads * dx_w *
m_zloze / dt) / (c_w(x_w[-1]) * m_zloze) * dt

# zapisywanie parametrów powietrza i silikażelu na listach tymczasowych
time.append((k + 1) * dt)
T_w.append(T_w[-1] + dT_w)
T_p.append(T_p[-1] + dT_p)
x_w.append(x_w[-1] + dx_w)
x_p.append(x_p[-1] + dx_p)

delay += 1

# Tworzenie list wynikowych
T_P_mod = []
X_P_mod = []
T_OUT_mod = []
TIME = []

# Kompresja wyników do odczytów 1sekundowych
for i in range(int(t_sim)):
    TIME.append(i)
    T_P_mod.append(T_p[i*int(1/dt)])
    X_P_mod.append(x_p[i * int(1 / dt)])

# Tworzenie wykresów
plt.figure(1)

plt.subplot(211)
plt.ylabel('Temperatura powietrza na wylocie zloza, oC');
plt.xlabel('Czas, s')
plt.plot(TIME, T_P_mod, label='model', lw=1.5, ls='solid', color='k' )

plt.subplot(212)
plt.ylabel('Stopien zawilzenia powietrza na wylocie zloza, kg/kg');
plt.xlabel('Czas, s')
plt.plot(TIME, X_P_mod, label='model', lw=1.5, ls='solid', color='k')

plt.show()
```


Załącznik 4.1

Opis skryptu

Zadaniem prezentowanego poniżej skryptu w języku PYTHON jest modelowanie pracy fluidalnego chłodziarki adsorpcyjnej. Skrypt działa w oparciu o model zaprezentowany w Załączniku 3.1. Skrypt zwraca informację nt. efektywności chłodniczej (SCP, cieplne i elektryczne COP) oraz zmiany parametrów powietrza i silikażelu w czasie. Funkcje poszczególnych elementów skryptu zostały skomentowane w formacie komentarza języka PYTHON: # komentarz. Kompilacja skryptu jest możliwa jedynie przy zachowaniu odpowiedniego układu wcięć nieuwzględnionego w niniejszej pracy. Ponadto, niektóre z linii kodu, ze względu na nadmierną długość, zostały sztucznie podzielone. Uruchomienie skryptu wymaga wprowadzenia odpowiednich wcięć oraz ponownego połączenia podzielonych wierszy.

Skrypt

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# importowanie bibliotek
import matplotlib.pyplot as plt

T_ads =25.# temperatura adsorpcji, oC
T_des = 60. # temperatura desorpcji, oC
T0 = (T_ads + T_des)/2 # początkowa temperatura układu, oC

# wlotowy stopień zawilżenia, kg h20/ kg powietrza suchego
x_in = 0.012

d_sor = 0.001 # średnica ziarna sorbentu, m

# prędkość powietrza w wolnym przekroju
# kanału podczas adsorpcji, m/s
U_ads = 3.
```

```

# prędkość powietrza w wolnym przekroju
# kanału podczas desorpcji, m/s
U_des = 3.

ro_sor = 850 # nasypowa gęstość sorbentu, kg/m3
H_sor = 0.020 # wysokość do jakiej nasypany jest silikażel
SG_type = 'RD' # opcje A, RD, 1
N = 7 # Ilość cykli do wykonania, -
t_sw = 500 # Czas przełączania złożeń, s
t_sim = N*t_sw # Czas trwania symulacji, s
x_p0 = x_in # początkowy stopień zawilżenia powietrza, -
D = 0.28 # średnica złoża, m
# wysokość do jakiej nasypany jest silikażel
m_zloze = H_sor*ro_sor*0.79*D**2
dt = 0.01 # krok czasowy, s
eps_0 = 0.49 # Porowatość spoczynkowa złoża, -
eps_f = 0.8 # Porowatość fluidyzującego złoża, -
ro_pw = 1.2 # gęstość powietrza wilgotnego, kg/m3
ro_ps = 1.1 # gęstość powietrza suchego, kg/m3
c_ps = 1004 # ciepło właściwe suchego powietrza, J/kg*K
c_sor = 921. # ciepło właściwe wypełnienia, J/kg*K
c_h2o = 4186. # ciepło właściwe wody, J/kg*K
Q_ads = 2710000. # ciepło adsorpcji wypełnienia J/kg
R_h2o = 461.5 # indywidualna stała gazowa dla pary wodnej, J/kg*K
Pr_g = 0.716 # liczba Prandtla dla powietrza, -
mc_p = 4000 # pojemność cieplna obudowy z plexi, J/K
kA_1 = 80. # współczynnik wymiany ciepła, W/K
kA_2 = 1. # współczynnik strat ciepła, W/K
A_sor = 4.71*H_sor*D**2*(1-eps_0)/d_sor
v = 0.000018 # lepkość dynamiczna powietrza, kg/ms
H_ev = 2200000 # Ciepło parowania wody, J/kg
g = 9.81 # przyspieszenie ziemskie, m/s2
n_el = 0.8 # sprawność elektryczna wentylatora, -
n_hx = 0.8 # sprawność temperaturowa regeneratora, -

# Objętość powietrza zawartego w wypełnieniu, m3
V_p = 0.79*H_sor*(eps_0-1)-eps_f*D**2/(eps_f-1)

def p_pw(x_p): # Ciśnienie pary wodnej w powietrzu, Pa

```



```
return 100000*x_p/(0.622+x_p)
# współczynnik dyfuzji pary wodnej w ziarnie sorbentu,
def D2(t):
T = t + 273.15
D_s0 = 0.003
e = 2.71828182
R = 8.315
E = 42000
x = D_s0*(1/e)**(E/R/T)
return x

# Ciepło właściwe wypełnienie które jest częściowo zaadsorbowane
def c_w(w_sor):
return c_sor + c_h2o * w_sor

# ciepło właściwe wilgotnego powietrza
def c_pw(x_pw):
return 1884*x_pw+1004*(1-x_pw)

# Równania równowagi adsorpcji dla silikażelu typu 'A'
def Toth_A(T, p):
T = T + 273.15
P = p/1000.
K0 = 0.000000000465
H_ads = 2710000.
q_m = 0.4
t = 10.
R = 461.5
w = K0*2.7182818**(H_ads/R/T)*P/(1+(K0/q_m*2.7182818**
(H_ads/R/T)*P)**t)**(1/t)
return w

# Równania równowagi adsorpcji dla silikażelu typu 'RD'
def Toth_RD(T, p):
T = T + 273.15
P = p/1000.
K0 = 0.00000000073
H_ads = 2693000.
q_m = 0.45
t = 12.
```

```

R = 461.5
w = K0*2.7182818**(H_ads/R/T)*P/(1+(K0/q_m*2.7182818**
(H_ads/R/T)*P)**t)**(1/t)
return w
# Moduł, który ustawia początkowy stopień zaadsorbowania
x_w0 = 0.00
if SG_type == 'A':
x_w0 = round(Toth_A(T0, p_pw(x_p0)), 5)
elif SG_type == 'RD':
x_w0 = round(Toth_RD(T0, p_pw(x_p0)), 5)

# Współczynnik przewodzenia powietrza w zależności
# od temperatury, W/mK
def lambda_g(T_g):
l = 0.00007*T_g + 0.0241
return l

# Wyznaczenie współczynnika konwekcji ciepła do ziarna, W/m2*K
def h_c1(T_g):
Nu_p = 0
if Re_p < 50. and Re_p > 0.1:
Nu_p = 0.0282*Re_p**1.4*Pr_g**0.33
elif Re_p < 10000. and Re_p > 50.:
Nu_p = 1.01 * Re_p ** 0.48 * Pr_g ** 0.33
lam = lambda_g(T_g)
h = Nu_p*lam/d_sor
return h

# Wyznaczenie współczynnika konwekcji masy do ziarna, kg/m2*s
def h_d1(T_g, x_g):
Le = 0.913
h = h_c1(T_g)/c_pw(x_g)/Le
return h

# Wyznaczanie stopnia zawilżenia powietrza w warstwie
# przyściennej ziarnia, kg pary wodnej /kg suchego
# powietrza dla silikażelu typu A
def X_pA(T_sor, X_sor):
T = T_sor + 273.15
K0 = 0.000000000465

```

```
H_ads = 2710000.
q_m = 0.4
t = 10.
p = 1/(K0*2.7182818**(H_ads/R_h20/T)*((1/X_sor)**t-(1/q_m)**t)**(1/t))
p = p*1000
X_p = 0.622 * p / (100000 - p)
return X_p

# Wyznaczanie stopnia zawilżenia powietrza w warstwie
# przyściennej ziarnia, kg pary wodnej /kg suchego
# powietrza dla silikażelu typu RD
def X_pRD(T_sor, X_sor):
T = T_sor + 273.15
K0 = 0.00000000073
H_ads = 2693000.
q_m = 0.45
t = 12.
p = 1/(K0*2.7182818**(H_ads/R_h20/T)*((1/X_sor)**t-(1/q_m)**t)**(1/t))
p = p * 1000
X_p = 0.622 * p / (100000 - p)
return X_p

# Funkcja sprawdzająca który typ silikażelu został wybrany
def X_p(T_sor, X_sor):
x = 0
if SG_type == 'A':
x = X_pA(T_sor, X_sor)
elif SG_type == 'RD':
x = X_pRD(T_sor, X_sor)
return x

# Wymiana masy podczas adsorpcji, kg/kg*s

def dw1(T_sor, X_sor, T_g, X_g):
x_p = X_p(T_sor, X_sor)
Diff = h_d1(T_g, X_g) * (X_g - x_p)
dw = Diff*6/ro_sor/d_sor
return dw

# Wymiana masy podczas desorpcji, kg/kg*s
```

```

def dw2(T_sor, X_sor, X_g):
    p_h20 = p_pw(X_g)
    D_s = D2(T_sor)
    w_eq = 0
    if SG_type == 'A':
        w_eq = Toth_A(T_sor, p_h20)
    elif SG_type == 'RD':
        w_eq = Toth_RD(T_sor, p_h20)
    else:
        print 'Błędny typ silikażelu'
        dw = 60*D_s/(d_sor**2)*(w_eq-X_sor)
    return dw

# SYMULACJA #

print ' OBLICZENIA...'
# listy tymczasowe parametrów powietrza i silikażelu
T_w = [T0]
x_w = [x_w0]
T_p = [T0]
x_p = [x_p0]
dXW = [0]
time = [0]

# Wskaźniki symulacji
delay = 0
delay_sw = 0
status = 'desorpcja'
# Kroki czasowe #
for k in range(int(t_sim / dt)):
    # Moduł zmieniający tryb pracy złoża dla odpowiedniego t_sw
    if delay_sw == t_sw/dt:
        if status == 'desorpcja':
            status = 'adsorpcja'
        elif status == 'adsorpcja':
            status = 'desorpcja'
        delay_sw = 0

# Ustawianie parametrów wlotowych powietrza
# i mechnizmu wymiany masy w zależności od trybu pracy złoża

```

```

if status == 'adsorpcja':
U = U_ads
T_in = T_ads
dxw = dw1(T_w[-1], x_w[-1], T_p[-1], x_p[-1]) * dt
elif status == 'desorpcja':
U = U_des
T_in = T_des
dxw = dw2(T_w[-1], x_w[-1], x_p[-1]) * dt

Re_p = U * d_sor * ro_pw / v # liczba Reynoldsa

# strumień masy suchego powietrza, kg/s
m_ps = U * 0.79 * D ** 2 * ro_ps

# Zmiana temperatury powietrza w złożu podczas kroku czasowego, K
dTp = (m_ps * c_pw(x_p[-1]) * ((1 + x_in) * T_in -
(1 + x_p[-1]) * T_p[-1]) - h_cl(T_p[-1])*A_sor *
(T_p[-1] - T_w[-1])) / (V_p * ro_pw * c_pw(x_p[-1])) * dt

# Zmiana stopnia zawilżenia powietrza w złożu
# podczas kroku czasowego, K
dxp = ((m_ps * (x_in - x_p[-1]) - m_zloze * dxw / dt)
/ (V_p * ro_ps)) * dt

# Zmiana temperatury silikażelu w złożu podczas
# kroku czasowego, K
dT_w = (h_cl(T_p[-1])*A_sor * (T_p[-1] - T_w[-1]) +
Q_ads * dxw * m_zloze / dt) / (c_w(x_w[-1]) * m_zloze) * dt

# zapisywanie parametrów powietrza i silikażelu na
# listach tymczasowych
time.append((k + 1) * dt)
T_w.append(T_w[-1] + dT_w)
T_p.append(T_p[-1] + dT_p)
x_w.append(x_w[-1] + dxw)
x_p.append(x_p[-1] + dxp)
dXW.append(abs(dxw / dt*1000))

# Zmiana wskaźników
delay += 1

```

```

delay_sw += 1

# Tworzenie list wynikowych
T_P_mod = []
X_P_mod = []
X_W_mod = []
TIME = []

# Kompresja wyników do odczytów 1sekundowych
for i in range(int(t_sim)):
    TIME.append(i)
    T_P_mod.append(T_p[i*int(1/dt)])
    X_P_mod.append(x_p[i * int(1 / dt)])
    X_W_mod.append(x_w[i * int(1 / dt)])

# Obliczanie efektywności chłodniczej: SCP oraz elektrycznego
# i ciepłego COP
W_min = min(X_W_mod[(N-1)*t_sw:-1])
W_max = max(X_W_mod[(N-1)*t_sw:-1])

T_av = (T_des - sum(T_P_mod[(N-1)*t_sw:-1])/t_sw)/n_hx
COP_el = round((W_max-W_min)*H_ev*n_el/(t_sw*g*(U_des+U_ads)), 3)

COP_th = round(ro_sor*(W_max-W_min)*H_sor*H_ev/
(ro_pw*T_av*t_sw*U_des*c_ps), 3)

SCP = round((W_max-W_min)*H_ev/t_sw, 1)
print 'COP_el = ' + str(COP_el)
print 'COP_th = '+str(COP_th)
print 'SCP = '+str(SCP) + ' W/kg'

# Tworzenie wykresów
plt.figure(1)

plt.subplot(311)
plt.ylabel('Outlet temperature, oC');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(TIME, T_P_mod, label='model', lw=1.5,
ls='solid', color='k' )

```

```
plt.subplot(312)
plt.ylabel('Outlet humidity, kg/kg');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(TIME, X_P_mod, label='model', lw=1.5,
         ls='solid', color='k')

plt.subplot(313)
plt.ylabel('Water uptake, kg/kg');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(TIME, X_W_mod, label='model', lw=1.5,
         ls='solid', color='k')

plt.show()
```

Załącznik 5.1

Opis skryptu

Zadaniem prezentowanego poniżej skryptu w języku PYTHON jest przeprowadzenie analizy egzergetycznej fluidalnej chłodzairki adsorpcyjnej. Na podstawie danych wejściowych skrypt w pierwszej kolejności zwraca przebiegi parametrów powietrza na wylocie ze złoża w zadanym czasie, następnie na ich podstawie przeprowadza analizę egzergetyczną oraz ostatecznie przygotowuje wyniki w formie graficznej. Funkcje poszczególnych elementów skryptu zostały skomentowane w formacie komentarza języka PYTHON: # komentarz. Kompilacja skryptu jest możliwa jedynie przy zachowaniu odpowiedniego układu wcięć nieuwzględnionego w niniejszej pracy. Ponadto, niektóre z linii kodu, ze względu na nadmierną długość, zostały sztucznie podzielone. Uruchomienie skryptu wymaga wprowadzenia odpowiednich wcięć oraz ponownego połączenia podzielonych wierszy.

Skrypt

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import matplotlib.pyplot as plt
from CoolProp.HumidAirProp import HAPropsSI
from numpy import log

T_0 = 30 # Temperatura w stanie martwym, oC

# Stopień zawilżenia powietrza w stanie martwym, kg/kg
X_0 = 0.012

p_0 = 101300 # Ciśnienie w stanie martwym, Pa

T_WC = 25. # Temperatura wody chłodzącej, oC
T_HW = 70. # Temperatura wody grzewczej, oC

# Temperatura powietrza opuszczającego
```



```
# pomieszczenie, oC
T_CS = 24.

# Wilgotność powietrza opuszczającego
# pomieszczenie, kg/kg
X_CS = 0.012

X_CSin = 0.011

# prędkość powietrza w wolnym przekroju
# kanału podczas adsorpcji, m/s
U_ads = 3.

# prędkość powietrza w wolnym przekroju
# kanału podczas desorpcji, m/s
U_des = 3.

D = 0.28 # średnica złoża, m
ro_ps = 1.2 # gęstość powietrza suchego, kg/m3

# strumień masy suchego powietrza, kg/s
m_pads = U_ads * 0.79 * D ** 2 * ro_ps

# strumień masy suchego powietrza, kg/s
m_pdes = U_des * 0.79 * D ** 2 * ro_ps

# Stosunek pojemności cieplnych powietrza
# do wody dla AC1, -
R_AC1 = 0.2
NTU_AC1 = 6. # NTU dla AC1, -

# Stosunek pojemności cieplnych powietrza
# do wody dla AC2, -
R_AC2 = 0.2

NTU_AC2 = 6. # NTU dla AC2, -

NTU_RHX = 15. # NTU dla RHX, -

NTU_AH = 6. # NTU dla AH, -
```

```
# Stosunek pojemności cieplnych
# powietrza do wody dla AH, -
R_AH = 0.2

# temperatura początkowa układu, oC
T0 = (T_WC + T_HW)/2

# początkowy stopień zawilżenia powietrza, -
x_p0 = X_CS

d_sor = 0.001 # średnica ziarna, m

SG_type = 'A' # rodzaj silikażelu (do wyboru typ A, RD)
N = 5. # Ilość cykli do wykonania, -
t_sw = 450. # Czas przełączania złożeń, s
t_sim = N*t_sw # Czas trwania symulacji, s
dt = 0.1 # krok czasowy, s

ro_sor = 850 # gęstość nasypowa złoża, kg/m3

# wysokość do jakiej nasypany jest silikażel
H_sor = 0.03

# masa silikażelu w złożu, kg
m_zloze = H_sor*ro_sor*0.79*D**2
eps_0 = 0.41 # Porowatość spoczynkowa złoża, -
eps_f = 0.8 # Porowatość fluidyzującego złoża, -

#Powierzchnia złoża, m2
A_sor = 4.71*H_sor*D**2*(1-eps_0)/d_sor

# Objętość powietrza zawartego w wypełnieniu, m3
V_p = 0.79*H_sor*(eps_0-1)-eps_f*D**2/(eps_f-1)

v = 0.000018 # lepkość dynamiczna powietrza, Pas
c_v = 1884 # ciepło właściwe pary wodnej, J/kgK
c_ps = 1030 # ciepło właściwe powietrza suchego, J/kgK
c_w = 4180. # ciepło właściwe wody, J/kgK
ro_a = 1.2 # gęstość powietrza, kg/m3
```

```
H_ev = 2200000. # ciepło parowania wody, J/kg

def p_pw(x_p): # Ciśnienie pary wodnej w powietrzu, Pa
    return 100000*x_p/(0.622+x_p)

# Ciepło właściwe wypełnienie które
# jest częściowo zaadsorbowane
def c_sorw(w_sor):
    c_sor = 921. # ciepło właściwe wypełnienia, J/kg*K
    return c_sor + c_w * w_sor

# współczynnik dyfuzji pary wodnej
# w ziarnie sorbentu, m2/s
def D2(t):
    T = t + 273.15
    # Dyfuzja w nieskończonej temperaturze, m2/s
    D_s0 = 0.003
    e = 2.71828182 # liczba e
    R = 8.315 # Uniwersalna stała gazowa, J/mol K
    E = 42000 # Energia aktywacji, J/mol
    x = D_s0*(1/e)**(E/R/T)
    return x

# ciepło właściwe wilgotnego powietrza, J/kgK
def c_pw(x_pw):
    return (c_v*x_pw+c_ps)/(1+x_pw)

# Równania równowagi adsorpcji dla silikażelu typu 'A'
def Toth_A(T, p):
    T = T + 273.15
    P = p/1000.
    K0 = 0.000000000465 # Stała adsorpcji
    H_ads = 2710000. # ciepło adsorpcji J/kg

# Maksymalny stopień zaadsorbowania,
# kg wody /kg silikażelu
q_m = 0.4

t = 10. # Stała równowagi adsorpcji
```

```

# indywidualna stała gazowa dla pary wodnej, J/kg*K
R = 461.5

w = K0*2.7182818**(H_ads/R/T)*P/(1+
(K0/q_m*2.7182818**(H_ads/R/T)*P)**t)**(1/t)
return w

# Równania równowagi adsorpcji dla silikażelu typu 'RD'
def Toth_RD(T, p):
T = T + 273.15
P = p/1000.
K0 = 0.00000000073 # Stała adsorpcji
H_ads = 2693000. # ciepło adsorpcji J/kg

# Maksymalny stopień zaadsorbowania,
# kg wody /kg silikażelu
q_m = 0.45

t = 12.# Stała równowagi adsorpcji
R = 461.5 # indywidualna stała gazowa dla pary wodnej, J/kg*K
w = K0*2.7182818**(H_ads/R/T)*P/(1+
(K0/q_m*2.7182818**(H_ads/R/T)*P)**t)**(1/t)
return w
# Moduł, który ustawia początkowy stopień zaadsorbowania
x_w0 = 0.00
if SG_type == 'A':
x_w0 = round(Toth_A(T0, p_pw(x_p0)), 5)
elif SG_type == 'RD':
x_w0 = round(Toth_RD(T0, p_pw(x_p0)), 5)

# Współczynnik przewidzenia powietrza w zależności
# od temperatury, W/mK
def lambda_g(T_g):
l = 0.00007*T_g + 0.0241
return l

# Wyznaczenie współczynnika konwekcji
# ciepła do ziarna, W/m2*K
def h_c1(T_g):
Pr_g = 0.716 # liczba Prandtla dla powietrza, -

```

```

Nu_p = 0
if Re_p < 50. and Re_p > 0.1:
Nu_p = 0.0282*Re_p**1.4*Pr_g**0.33
elif Re_p < 10000. and Re_p > 50.:
Nu_p = 1.01 * Re_p ** 0.48 * Pr_g ** 0.33
lam = lambda_g(T_g)
h = Nu_p*lam/d_sor
return h

# Wyznaczenie współczynnika konwekcji
# masy do ziarna, kg/m2*s
def h_d1(T_g, x_g):

# Liczba Lewisa dla układu powietrze-para wodna, -
Le = 0.913

h = h_c1(T_g)/c_pw(x_g)/Le
return h

# Wyznaczanie stopnia zawilżenia powietrza w warstwie
# przyściennej ziarna, kg pary wodnej /kg suchego
# powietrza dla silikażelu typu A
def X_pA(T_sor, X_sor):
T = T_sor + 273.15
K0 = 0.000000000465# Stała adsorpcji
H_ads = 2710000.# Ciepło adsorpcji, J/kg
# Maksymalny stopień zaadsorbowania, kg wody
# /kg silikażelu
q_m = 0.4
t = 10. # Stała równowagi adsorpcji
# indywidualna stała gazowa dla pary wodnej, J/kg*K
R_h2o = 461.5

# ciśnienie równowagowe, kPa
p = 1/(K0*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T))*((1/X_sor)
**t-(1/q_m)**t)**(1/t))

p = p*1000# ciśnienie równowagowe, Pa
X_p = 0.622 * p / (100000 - p)

```

```

return X_p

# Wyznaczanie stopnia zawilżenia powietrza w warstwie
# przyściennej ziarnia, kg pary wodnej /kg suchego
# powietrza dla silikażelu typu RD
def X_pRD(T_sor, X_sor):
T = T_sor + 273.15
K0 = 0.00000000073# Stała adsorpcji
H_ads = 2693000.# Ciepło adsorpcji, J/kg

# Maksymalny stopień zaadsorbowania, kg wody /kg silikażelu
q_m = 0.45

t = 12.# Stała równowagi adsorpcji
# indywidualna stała gazowa dla pary wodnej, J/kg*K
R_h2o = 461.5

p = 1/(K0*2.7182818**(H_ads/R_h2o/T)*((1/X_sor)**t-
(1/q_m)**t)**(1/t)) # ciśnienie równowagowe, kPa

p = p * 1000 # ciśnienie równowagowe, Pa
X_p = 0.622 * p / (100000 - p)
return X_p

# Funkcja sprawdzająca który typ silikażelu został wybrany
def X_p(T_sor, X_sor):
x = 0
if SG_type == 'A':
x = X_pA(T_sor, X_sor)
elif SG_type == 'RD':
x = X_pRD(T_sor, X_sor)
return x

# Wymiana masy podczas adsorpcji, kg/kg*s
def dwl(T_sor, X_sor, T_g, X_g):
x_p = X_p(T_sor, X_sor)
Diff = h_d1(T_g, X_g) * (X_g - x_p)
dw = Diff*6/ro_sor/d_sor
return dw

```

```

# Wymiana masy podczas desorpcji, kg/kg*s
def dw2(T_sor, X_sor, X_g):
    p_h20 = p_pw(X_g)
    D_s = D2(T_sor)
    w_eq = 0
    if SG_type == 'A':
        w_eq = Toth_A(T_sor, p_h20)
    elif SG_type == 'RD':
        w_eq = Toth_RD(T_sor, p_h20)
    else:
        print 'Błędny typ silikażelu'
    dw = 60*D_s/(d_sor**2)*(w_eq-X_sor)
    return dw
# Bilans energetyczny chłodnic powietrza
def AC(T_pin, X_pin, R_c, NTU_a):

# ciepło właściwe powietrza wilgotnego, J/kgK
c_a = c_pw(X_pin)

mc_a = m_p * c_a # pojemność cieplna strumienia , W/K
kA = NTU_a * mc_a # intensywność wymiany ciepła, W/K
mc_w = mc_a / R_c # pojemność cieplna strumienia wody, W/K
NTU_w = kA / mc_w # NTU po stronie wody, -
F_0 = 0.5 # Początkowa wartość współczynnika korekcyjnego
dF = 0.5 # Początkowa wartość wskaźnika zbieżności
t_out = T_pin
e = 2.718281828459
# iteracyjne określenie wartości współczynnika korekcyjnego
while dF>0.01:
    E = e ** (kA * F_0 / mc_a * (1 - R_c))
    t_out = (T_WC * (E - 1) - T_pin * (R_c - 1)) / (E - R_c)
    P = abs(t_out - T_pin) / abs(T_WC - T_pin)
    F = log((1 - R_c * P) / (1 - P)) / (NTU_w * (1 / R_c - 1))
    dF = abs(F-F_0)
    F_0+=0.01
return t_out

# Bilans energetyczny ziół fluidalnych
def FB(T_in, X_in, T_sor, X_sor, T_p, X_p):
Q_ads = 2710000. # ciepło adsorpcji wypełnienia J/kg

```

```

dxsor = 0
# ustalenie mechanizmu wymiany masy w zależności
# od trybu pracy złoża (adsorpcja/desorpcja)
if status == 'adsorpcja':
dxsor = dw1(T_sor, X_sor, T_p, X_p) * dt
elif status == 'desorpcja':
dxsor = dw2(T_sor, X_sor, X_p) * dt

# Zmiana temperatury powietrza w złożu podczas kroku czasowego, K
dTp = (m_p * c_pw(X_p) * ((1 + X_in) * T_in
- (1 + X_p) * T_p) - h_cl(T_p)*A_sor * (T_p - T_sor))
/ (V_p * ro_ps * c_pw(X_p)) * dt

# Zmiana stopnia zawilżenia powietrza w złożu
# podczas kroku czasowego, K
dxp = ((m_p * (X_in - X_p) - m_zloze * dxsor / dt)
/ (V_p * ro_ps)) * dt

# Zmiana temperatury silikażelu w złożu podczas
# kroku czasowego, K
dT_sor = (h_cl(T_p)*A_sor * (T_p - T_sor)
+ Q_ads * dxsor * m_zloze / dt) /
(c_sorw(X_sor) * m_zloze) * dt

return [T_sor+dT_sor, X_sor+dxsor, T_p+dTp, X_p + dxp]

# Bilans energetyczny regeneracyjnego wymiennika ciepła
def RHX(T_p1, T_p2):
# pojemność cieplna strumienia powietrza, W/K
mc_a = m_p * c_ps

# iloczyn współczynnika przenikania ciepła i
# powierzchni wymiany ciepła, W/K
kA = mc_a * NTU_RHX

F_0 =0.8 # Początkowa wartość współczynnika korekcyjnego
dF = 0.1 # Początkowa wartość wskaźnika zbieżności
t1_out = T_p1
# iteracyjne określenie wartości współczynnika korekcyjnego
while dF>0.05 and F_0 > 0.01:

```



```

t1_out = (mc_a * T_p1 + kA * F_0 * T_p2 ) / (mc_a + kA * F_0)
P = (t1_out-T_p1)/(T_p2-T_p1)
F = -2.6224*P**4 + 2.2429*P**3 - 0.9911*P**2
+ 0.073*P + 1.0003
dF = abs(F-F_0)
F_0-=0.001
t2_out = T_p2 - (t1_out - T_p1)
return [t1_out, t2_out]

# Bilans energetyczny nagrzewcy powietrza
def AH(T_pin, X_pin):

# ciepło właściwe powietrza wilgotnego, J/kgK
c_a = c_pw(X_pin)

#Pojemność cieplna strumienia powietrza, W/K
mc_a = m_p * c_a

#Pojemność cieplna strumienia wody , W/K
mc_w = mc_a / R_AH

# iloczyn współczynnika przenikania ciepła i
# powierzchni wymiany ciepła, W/K
kA = NTU_AH * mc_a

NTU_w = kA / mc_w # NTU po stronie wody, -
F_0 = 0.5 # Początkowa wartość współczynnika korekcyjnego
dF = 0.5 # Początkowa wartość wskaźnika
t_out = T_pin
e = 2.718281828459 # liczba e
# iteracyjne określenie wartości współczynnika korekcyjnego
while dF>0.01:
E = e ** (kA * F_0 / mc_a * (1 - R_AH))
t_out = (T_HW * (E - 1) - T_pin * (R_AH - 1)) / (E - R_AH)
P = abs(t_out - T_pin) / abs(T_HW - T_pin)
F = log((1 - R_AH * P) / (1 - P)) / (NTU_w * (1 / R_AH - 1))
dF = abs(F-F_0)
F_0+=0.01
return t_out

```

```

# Egzergia właściwa powietrza, J/kg
def ex(p, t, X):
# Przeliczanie temperatur z oC do K
T = t + 273.15
T0 = T_0 + 273.15
R_a = 287 # indywidualna stała gazowa powietrza, J/kgK
# Przeliczanie stopni zawilżenia z masowych na molowe
X_mol = 1.608*X
X_mol_0 = 1.608*X_0

ex = (c_ps + X*c_v)*T0*(T/T0-1-log(T/T0))+(1+X_mol)*R_a
*T0*log(p/p_0)+R_a*T0*((1+X_mol)*log((1+X_mol_0)/
(1+X_mol))+X_mol*log(X_mol/X_mol_0))

return ex

# Egzergia właściwa wody, J/kg
def ex_w(t):
# Przeliczanie temperatur z oC do K
T = t + 273.15
T0 = T_0 + 273.15
ex = c_w*T0*(T/T0-1-log(T/T0))
return ex

# Spadek ciśnienia nagrzenicy/ chłodnicy powietrza, Pa
def dp_AC_AH(NTU_a, m_a ):
k = 50 # Współczynnik przenikania ciepła, W/m2K
A = NTU_a*m_a*c_ps/k # powierzchnia wymiany ciepła, m2
d = 0.003 # wymiar kanału, m
p = 32 * (A * (U_ads * ro_a) ** 2 * v) / (d * m_a)
return p
# Spadek ciśnienia regeneracyjnego wzmiennika ciepła, Pa
def RHX_dp(NTU_a, m_a):
k = 25 # Współczynnik przenikania ciepła, W/m2K
A = NTU_a*m_a*c_ps/k # powierzchnia wymiany ciepła, m2
w = 0.003 # wymiar kanału, m
l = 0.01 # wymiar kanału, m
p = 12.48*(U_des**2*ro_a**2*A*v)/((w+l)*m_a)
return p
# Spadek ciśnienia złoża fluidalnego, Pa

```

```

def FB_dp(d_p, H_sor):
W = 0.05 # przyjęte zaadsorbowanie ziarna, kg/kg
g = 9.81 # przyspieszenie ziemskie, m/s2
fi = 0.8 # sferyczność ziarna, -
E = -0.4332 * fi ** 3 + 1.2583 * fi ** 2 - 1.589
  * fi + 1.1756

# Porowatość złoża, -
eps = (0.4 + 0.05 * (d_p / D) + 0.412 * (d_p / D) ** 2)
  / 0.41 * E

# gęstość ziaren (bez porowatości złoża), kg/m3
ro_p = (1 + W) * (31.371 * d_p ** 2 - 249.19 * d_p
  + 1238.1) / eps

# Liczba Archimedesesa, -
ar = d_p ** 3 * ro_a * (ro_p - ro_a) * g / v ** 2

# Minimalna prędkość fluidyzacji, m/s
u_mf = v / ro_a / d_p * ((1136 + 0.0494 * ar) ** 0.5 - 33.7)

# Spadek ciśnienia na złożu, Pa
p = (150*(1-eps)**2/eps**3*v*u_mf/(d_p*fi)**2+1.75*
  (1-eps)/eps**3*ro_a*(u_mf)**2/(d_p*fi))*H_sor

return p

# Bilans egzergetyczny chłodnicy powietrza AC1
def AC1_e_dest(p_in, T_in, p_out, T_out, X):
T_win = T_WC # Temperatura wody na wlocie, oC

# egzergia właściwa powietrza na wlocie, J/kg
ex_in = ex(p_in, T_in, X)

# egzergia właściwa powietrza na wylocie, J/kg
ex_out = ex(p_out, T_out, X)

# egzergia właściwa wody na wlocie, J/kg
ex_win = ex_w(T_win)

```

```
# egzergia właściwa wody na wylocie, J/kg
ex_wout = 0

# strumień masy wody, kg/s
m_w = m_pads*c_ps/R_AC1/c_w

# Destrucja egzergii, J/kg
e = (m_w*(ex_win-ex_wout) + m_pads*(ex_in - ex_out))/m_pads

return e

# Bilans egzergetyczny chłodnicy powietrza AC2
def AC2_e_dest(p_in, T_in, p_out, T_out, X):
T_win = T_WC # Tempepratura wody na wlocie, oC

# egzergia właściwa powietrza na wlocie, J/kg
ex_in = ex(p_in, T_in, X)

# egzergia właściwa powietrza na wylocie, J/kg
ex_out = ex(p_out, T_out, X)

# egzergia właściwa wody na wlocie, J/kg
ex_win = ex_w(T_win)
ex_wout = 0 # egzergia właściwa wody na wylocie, J/kg

# strumień masy wody, kg/s
m_w = m_pads * c_ps / R_AC2 / c_w

# Destrucja egzergii, J/kg
e = (m_w*(ex_win-ex_wout) + m_pads*(ex_in - ex_out))/m_pads
return e

# Bilans egzergetyczny chłodnicy powietrza AH
def AH_e_dest(p_in, T_in, p_out, T_out, X):
T_win = T_HW # tempepratura powietrza na wlocie, oC

# tempepratura powietrza na wylocie, oC
T_wout = T_win - R_AH*(T_out -T_in)

# egzergia właściwa powietrza na wlocie, J/kg
ex_in = ex(p_in, T_in, X)
```

```
# egzergia właściwa powietrza na wylocie, J/kg
ex_out = ex(p_out, T_out, X)

# egzergia właściwa wody na wlocie, J/kg
ex_win = ex_w(T_win)

# egzergia właściwa wody na wylocie, J/kg
ex_wout = ex_w(T_wout)

# strumień masy wody, kg/s
m_w = m_pdes * c_ps / R_AH / c_w

# Destrucja egzergii, J/kg
e = (m_w*(ex_win-ex_wout) + m_pdes*(ex_in - ex_out))/m_pdes

return e

# Bilans egzergyiczny regeneracyjnego wymiennika ciepła RHX
def RHX_e_dest(p1_in, T1_in, p1_out, T1_out, p2_in, T2_in,
p2_out, T2_out, X1, X2):

# egzergia powietrza grzanego na wlocie, J/kg
ex_1in = ex(p1_in, T1_in, X1)

# egzergia powietrza grzanego na wylocie, J/kg
ex_1out = ex(p1_out, T1_out, X1)

# egzergia powietrza grzejącego na wlocie, J/kg
ex_2in = ex(p2_in, T2_in, X2)

# egzergia powietrza grzejącego na wylocie, J/kg
ex_2out = ex(p2_out, T2_out, X2)

# Destrucja egzergii, J/kg
e = ex_1in + ex_2in - ex_1out - ex_2out
return e

# Bilans egzergyiczny złoża fluidalnego FB
def FB_e_dest(p_in, T_in, X_in, p_out, T_out, X_out):
```

```
# egzergia powietrza grzanego
ex_in = ex(p_in, T_in, X_in)

# egzergia powietrza grzanego
ex_out = ex(p_out, T_out, X_out)

e = ex_in - ex_out # Destrucja egzergii, J/kg
return e

# Bilans egzergetyczny chłodnicy wyparnej DEC
def DEC_e_dest(p_in, T_in, X_in, p_out, T_out, X_out):

# egzergia właściwa powietrzana wlocie, J/kg
ex_in = ex(p_in, T_in, X_in)

# egzergia właściwa powietrza na wylocie, J/kg
ex_out = ex(p_out, T_out, X_out)

# strumień masy wody, kg/s
m_w = m_pads*(X_out - X_in)

# egzergia właściwa wody wlotowej, J/kg
ex_win = ex_w(T_WC)

# egzergia właściwa związana z parowaniem wody, J/kg
Ex_Q = m_w*H_ev*(1 - T_out/T_0)

# Destrucja egzergii, J/kg
e = m_pads*(ex_in - ex_out) +Ex_Q + m_w*ex_win

return e

# Spadek ciśnienia AC1, Pa
dp_AC1 = dp_AC_AH(NTU_AC1, m_pads )

# Spadek ciśnienia FB, Pa
dp_FB = FB_dp(d_sor, H_sor)

# Spadek ciśnienia AC2, Pa
```

```
dp_AC2 = dp_AC_AH(NTU_AC2, m_pads )

dp_DEC = 50. # Spadek ciśnienia DEC, Pa

# lista spadków ciśnień ma poszczególnych
# elementach podczas adsorpcji, Pa
dp_ads = [p_0 + dp_DEC + dp_AC2 + dp_FB + dp_AC1 ,
  p_0 + dp_DEC + dp_AC2 + dp_FB ,
  p_0 + dp_DEC + dp_AC2 , p_0 + dp_DEC , p_0]

# Spadek ciśnienia RHX, Pa
dp_RHX = RHX_dp(NTU_RHX, m_pdes)

# Spadek ciśnienia AH, Pa
dp_AH = dp_AC_AH(NTU_AH, m_pdes)

# lista spadków ciśnień ma poszczególnych
# elementach podczas desorpcji, Pa
dp_des = [p_0 + dp_RHX + dp_FB + dp_AH + dp_RHX,
  p_0 + dp_RHX + dp_FB + dp_AH , p_0 + dp_RHX + dp_FB ,
  p_0 + dp_RHX , p_0]

# Start symulacji
#
print ' OBLICZENIA... '
# tworzenie tymczasowych list wynikowych
STAT = ['d']
T1 = [T0]
X1 = [x_p0]
T2 = [T0]
X2 = [x_p0]
T3 = [T0]
X3 = [x_p0]
T4 = [T0]
X4 = [x_p0]
T5 = [T0]
X5 = [x_p0]
T_SOR = [T0]
X_SOR = [x_w0]
```

```

T_P = [T0]
X_P = [x_p0]
dXW = [0]
time = [0]

# OBLICZENIA T i X POWIETRZA W PUNKTACH UKŁADU
# Wskaźniki
delay = 0
delay_sw = 0
status = 'desorpcja'
# Wykonywanie kolejnych kroków czasowych
for k in range(int(t_sim / dt)):
#print str(k*dt) + ' / ' +str(t_sim)
# Moduł zmieniający tryb pracy złoża
# dla odpowiedniego t_sw
if delay_sw ==t_sw/dt:
if status == 'desorpcja':
status = 'adsorpcja'
elif status == 'adsorpcja':
status = 'desorpcja'
delay_sw = 0

# Ustawianie parametrów wlotowych powietrza i uruchamianie
# obliczeń odpowiednich elementów systemu w zależności od
# trybu pracy złoża
if status == 'adsorpcja':
U = U_ads
Re_p = U * d_sor * ro_ps / v # liczba Reynoldsa
m_p = m_pads # Strumień masowy powietrza, kg/s

t_1 = T_0
x_1 = X_0

t_2 = AC(t_1, x_1, R_AC1, NTU_AC1)
x_2 = x_1

FB_results = FB(t_2, x_2, T_SOR[-1], X_SOR[-1], T_P[-1], X_P[-1])
t_3 = FB_results[2]
x_3 = FB_results[3]

```



```
t_4 = AC(t_3, x_3, R_AC2, NTU_AC2)
x_4 = x_3

if x_4 >= X_CSin:
x_5 = x_4
t_5 = t_4
elif x_4 < X_CSin:
x_5 = X_CSin
h_4 = HAPropsSI('H', 'W', x_4, 'T', t_4 + 273, 'P', 101300)
t_5 = HAPropsSI('T', 'W', X_CSin, 'H', h_4, 'P', 101300) - 273
stat = 'a'

elif status == 'desorpcja':
U = U_des
Re_p = U * d_sor * ro_ps / v # liczba Reynoldsa
m_p = m_pdes # Strumień masowy powietrza, kg/s
t_1 = T_CS
x_1 = X_CS

RHX_results = RHX(t_1, T4[-1])
t_2 = RHX_results[0]
x_2 = x_1

t_3 = AH(t_2, x_2)
x_3 = x_2

FB_results = FB(t_3, x_3, T_SOR[-1], X_SOR[-1], T_P[-1], X_P[-1])
t_4 = FB_results[2]
x_4 = FB_results[3]

t_5 = RHX_results[1]
x_5 = x_4
stat = 'd'

# zapisywanie parametrów powietrza w punktach charakterystycznych
# na listach tymczasowych
time.append((k + 1) * dt)
STAT.append(stat)

T1.append(t_1)
```

```
X1.append(x_1)

T2.append(t_2)
X2.append(x_2)

T3.append(t_3)
X3.append(x_3)

T4.append(t_4)
X4.append(x_4)

T5.append(t_5)
X5.append(x_5)
# zapisywanie parametrów złoża na listach tymczasowych
T_SOR.append(FB_results[0])
T_P.append(FB_results[2])
X_SOR.append(FB_results[1])
X_P.append(FB_results[3])

delay += 1
delay_sw += 1

# OBLICZENIA EGZERGII
TIME = []

# strata egzergii na AC1 lub RHX (podczas adsorpcji
# lub desorpcji), J/kg
dEX1_2 = []

# strata egzergii na FB, J/kg
dEX2_3 = []

# strata egzergii na AC2 lub AH (podczas adsorpcji
# lub desorpcji), J/kg
dEX3_4 = []

# strata egzergii na DEC lub RHX (podczas adsorpcji
# lub desorpcji) elemencie, J/kg
dEX4_5 = []
```

```
# Całkowita strata egzergii podczas adsorpcji
# lub desorpcji, J/kg
dEX = []

# Temperatura powietrza w punkcie A, oC
T_1 = []

# Temperatura powietrza w punkcie B lub F (podczas
# adsorpcji lub desorpcji), oC
T_2 = []

# Temperatura powietrza w punkcie C lub G (podczas
# adsorpcji lub desorpcji), oC
T_3 = []

# Temperatura powietrza w punkcie D lub H (podczas
# adsorpcji lub desorpcji), oC
T_4 = []

# Temperatura powietrza w punkcie E lub I (podczas
# adsorpcji lub desorpcji), oC
T_5= []

# Stopień zawilżenia powietrza w punkcie A, kg/kg
X_1 = []

# Stopień zawilżenia powietrza w punkcie B lub F
# (podczas adsorpcji lub desorpcji), kg/kg
X_2 = []

# Stopień zawilżenia powietrza w punkcie C lub G
# (podczas adsorpcji lub desorpcji), kg/kg
X_3 = []

# Stopień zawilżenia powietrza w punkcie D lub H
# (podczas adsorpcji lub desorpcji), kg/kg
X_4 = []
```

```
# Stopień zawilżenia powietrza w punkcie E lub I
# (podczas adsorpcji lub desorpcji), kg/kg
X_5= []

# KOMPRESJA WYNIKÓW
for i in range(int(t_sim+1)):
    TIME.append(i)
    stat = STAT[i * int(1. / dt)]
    t1 = T1[i * int(1. / dt)]
    t2 = T2[i * int(1. / dt)]
    t3 = T3[i * int(1. / dt)]
    t4 = T4[i * int(1. / dt)]
    t5 = T5[i * int(1. / dt)]
    x1 = X1[i * int(1. / dt)]
    x2 = X2[i * int(1. / dt)]
    x3 = X3[i * int(1. / dt)]
    x4 = X4[i * int(1. / dt)]
    x5 = X5[i * int(1. / dt)]

# Wyznaczanie destrukcji egzergii
if stat == 'd':

    dp = dp_des
    dex_1 = RHX_e_dest(dp[0], T1[i * int(1. / dt)], dp[1],
    T2[i * int(1. / dt)], dp[3], T4[i * int(1. / dt)], dp[4],
    T5[i * int(1. / dt)], X1[i * int(1. / dt)], X4[i * int(1. / dt)])

    dex_2 = AH_e_dest(dp[1], T2[i * int(1. / dt)], dp[2],
    T3[i * int(1. / dt)], X2[i * int(1. / dt)])

    dex_3 = FB_e_dest(dp[2], T3[i * int(1. / dt)],
    X3[i * int(1. / dt)], dp[3], T4[i * int(1. / dt)],
    X4[i * int(1. / dt)])

    dex_4 = RHX_e_dest(dp[0], T1[i * int(1. / dt)], dp[1],
    T2[i * int(1. / dt)], dp[3], T4[i * int(1. / dt)],
    dp[4], T5[i * int(1. / dt)], X1[i * int(1. / dt)],
    X4[i * int(1. / dt)])

elif stat == 'a':
```

```
dp = dp_ads
dex_1 = AC1_e_dest(dp[0], T1[i * int(1. / dt)], dp[1],
    T2[i * int(1. / dt)], X1[i * int(1. / dt)])

dex_2 = FB_e_dest(dp[1], T2[i * int(1. / dt)],
    X2[i * int(1. / dt)], dp[2], T3[i * int(1. / dt)],
    X3[i * int(1. / dt)])

dex_3 = AC2_e_dest(dp[2], T3[i * int(1. / dt)],
    dp[3], T4[i * int(1. / dt)], X4[i * int(1. / dt)])

dex_4 = DEC_e_dest(dp[3], T4[i * int(1. / dt)],
    X4[i * int(1. / dt)], dp[4], T5[i * int(1. / dt)],
    X5[i * int(1. / dt)])

dex = dex_1 + dex_2 + dex_3 + dex_4
# Zapisywanie skompresowanych danych i wyników
T_1.append(t1)
T_2.append(t2)
T_3.append(t3)
T_4.append(t4)
T_5.append(t5)
X_1.append(x1)
X_2.append(x2)
X_3.append(x3)
X_4.append(x4)
X_5.append(x5)
dEX1_2.append(dex_1)
dEX2_3.append(dex_2)
dEX3_4.append(dex_3)
dEX4_5.append(dex_4)
dEX.append(dex)

# generowanie listy czasu
T_SW = []
for i in range(int(t_sw)):
    T_SW.append(i)

# Rozbicie wyników na adsorpcję i desorpcję
```

```

T1_ADS = T_1[int((N-1)*t_sw):-1]
T2_ADS = T_2[int((N-1)*t_sw):-1]
T3_ADS = T_3[int((N-1)*t_sw):-1]
T4_ADS = T_4[int((N-1)*t_sw):-1]
T5_ADS = T_5[int((N-1)*t_sw):-1]

T1_DES = T_1[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
T2_DES = T_2[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
T3_DES = T_3[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
T4_DES = T_4[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
T5_DES = T_5[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]

X1_ADS = X_1[int((N-1)*t_sw):-1]
X2_ADS = X_2[int((N-1)*t_sw):-1]
X3_ADS = X_3[int((N-1)*t_sw):-1]
X4_ADS = X_4[int((N-1)*t_sw):-1]
X5_ADS = X_5[int((N-1)*t_sw):-1]

X1_DES = X_1[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
X2_DES = X_2[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
X3_DES = X_3[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
X4_DES = X_4[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
X5_DES = X_5[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]

dEX_FB_ADS = dEX2_3[int((N-1)*t_sw):-1]
dEX_RHX = dEX1_2[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
dEX_FB_DES = dEX3_4[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
dEX_AC1 = dEX1_2[int((N-1)*t_sw):-1]
dEX_AH = dEX2_3[int((N-2)*t_sw):int((N-1)*t_sw)]
dEX_AC2 = dEX3_4[int((N-1)*t_sw):-1]
dEX_DEC = dEX4_5[int((N-1)*t_sw):-1]

# Generowanie wykresów
time = T_SW
#ADSOPRCJA
plt.figure(1)

plt.subplot(311)

```

```
plt.ylabel('Temperature, oC');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(time, T1_ADS, label='T1', lw=1.5, ls='solid', c='k')
plt.plot(time, T2_ADS, label='T2', lw=1.5, ls='dashed', c='k')
plt.plot(time, T3_ADS, label='T3', lw=1.5, ls='dashdot', c='k')
plt.plot(time, T4_ADS, label='T4', lw=1.5, ls='dotted', c='k')
plt.plot(time, T5_ADS, label='T5', lw=1.5, ls='solid', c='0.8')
plt.legend(loc=0)
```

```
plt.subplot(312)
plt.ylabel('Humidity, kg/kg');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(time, X1_ADS, label='X1', lw=1.5, ls='solid', c='k')
plt.plot(time, X2_ADS, label='X2', lw=1.5, ls='dashed', c='k')
plt.plot(time, X3_ADS, label='X3', lw=1.5, ls='dashdot', c='k')
plt.plot(time, X4_ADS, label='X4', lw=1.5, ls='dotted', c='k')
plt.plot(time, X5_ADS, label='X5', lw=1.5, ls='solid', c='0.8')
plt.legend(loc=0)
```

```
plt.subplot(313)
plt.ylabel('Exergy efficiency, J/kg');
plt.xlabel('Time, s')
```

```
plt.plot(time, dEX_FB_ADS, label='FB adsorption', lw=1.5,
         ls='solid', c='k')
```

```
plt.plot(time, dEX_AC1, label='AC1', lw=1.5, ls='dashed', c='k')
plt.plot(time, dEX_AC2, label='AC2', lw=1.5, ls='dashdot', c='k')
plt.plot(time, dEX_DEC, label='DEC', lw=1.5, ls='dotted', c='k')
plt.legend(loc=0)
```

```
# DESORPCJA
plt.figure(2)
```

```
plt.subplot(311)
plt.ylabel('Temperature, oC');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(time, T1_DES, label='T1', lw=1.5, ls='solid', c='k')
plt.plot(time, T2_DES, label='T2', lw=1.5, ls='dashed', c='k')
plt.plot(time, T3_DES, label='T3', lw=1.5, ls='dashdot', c='k')
```

```
plt.plot(time, T4_DES, label='T4', lw=1.5, ls='dotted', c='k')
plt.plot(time, T5_DES, label='T5', lw=1.5, ls='solid', c='0.8')
plt.legend(loc=0)
```

```
plt.subplot(312)
plt.ylabel('Humidity, kg/kg');
plt.xlabel('Time, s')
plt.plot(time, X1_DES, label='X1', lw=1.5, ls='solid', c='k')
plt.plot(time, X2_DES, label='X2', lw=1.5, ls='dashed', c='k')
plt.plot(time, X3_DES, label='X3', lw=1.5, ls='dashdot', c='k')
plt.plot(time, X4_DES, label='X4', lw=1.5, ls='dotted', c='k')
plt.plot(time, X5_DES, label='X5', lw=1.5, ls='solid', c='0.8')
plt.legend(loc=0)
```

```
plt.subplot(313)
plt.ylabel('Exergy efficiency, -');
plt.xlabel('Time, s')
```

```
plt.plot(time, dEX_FB_DES, label='FB desorption', lw=1.5,
         ls='solid', c='k')
```

```
plt.plot(time, dEX_AH, label='AH', lw=1.5, ls='dashed', c='k')
plt.plot(time, dEX_RHX, label='RHX', lw=1.5, ls='dashdot', c='k')
plt.legend()
```

```
plt.show()
```


Bibliografia

- [1] Environmental Investigation Agency. EU F-Gas Regulation Handbook: Keeping Ahead of the Curve as Europe Phases Down HFCs. Raport instytutowy, Environmental Investigation Agency, 2015.
- [2] K M Ariful, K C Amanul Alam, M M A Sarker, Rifat A Rouf, Bidyut B Saha. *Effect of Mass Recovery on the Performance of Solar Adsorption Cooling System*, wolumen 79. Elsevier B.V., 2015.
- [3] Yu I Aristov, A Sapienza, D S Ovoshchnikov, A Freni, G Restuccia. Reallocation of adsorption and desorption times for optimisation of cooling cycles. *International Journal of Refrigeration*, 5, 2010.
- [4] Yuriy I Aristov, Ivan S Glaznev, Ilya S Girnik. Optimization of adsorption dynamics in adsorptive chillers : Loose grains con fi guration. *Energy*, 46(1):484–492, 2012.
- [5] D A Asimakopoulos, M Santamouris, I Farrou, M Laskari, M Saliari, G Zanis, G Giannakidis. Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century. *Energy & Buildings*, 49:488–498, 2012.
- [6] Tania Berger, Christoph Amann, Herbert Formayer, Azra Korjenic, Bernhard Pospischal, Christoph Neururer, Roman Smutny. Impacts of climate change upon cooling and heating energy demand of office buildings in Vienna , Austria. *Energy & Buildings*, 80:517–530, 2014.
- [7] Giorgio Besagni, Riccardo Mereu, Fabio Inzoli. Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:373–407, 2016.
- [8] Poliana Bezerra, Juliana Damasceno, Gouveia De Carvalho, Jornandes Dias. Hydrogen adsorption on Ni / epsilon -Al₂O₃ in a fixed-bed adsorber : Experimental validation and numerical modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*, strony 1–14, 2018.
- [9] Hitesh Bhargav, Bharat Ramani, V Siva Reddy. Experimental study on adsorption capacity of an activated carbon-based adsorption water chiller. *International Journal of Ambient Energy*, 2018.

- [10] Vincenza Brancato, Larisa Gordeeva, Alessio Sapienza, Angelo Freni, Andrea Frazzica. Dynamics study of ethanol adsorption on microporous activated carbon for adsorptive cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 105:28–38, 2016.
- [11] GG Brown. *Unit Operations*. New York: John Wiley, 1966.
- [12] J Steven Brown, Piotr A Domanski. Review of alternative cooling technologies. *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2):252–262, 2014.
- [13] B. Buczek, D. Geldart. Determination of the density of porous particles using very fine dense powders. *Powder Technology*, 45(2):173–176, 1986.
- [14] Bruna Gomes Casagrande, Cristina Engel De Alvarez. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. *Ambiente Construído*, 13(4):173–187, 2013.
- [15] Giacomo Catenazzi, Energy Policy, Economics Cepe, E T H Zurich. Impact of climate change on energy demand in the Swiss service sector - and application to Europe. *International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings*, 2006.
- [16] Y. a. Cengel, S. Klein, W. Beckman. Heat Transfer: A Practical Approach. strona 896, 2002.
- [17] Anutosh Chakraborty, Saha Bidyut Baran, Aristov Yuri. Dynamic behaviors of adsorption chiller: Effects of the silica grain size and layers. *Energy*, 78:304 – 312, 2014.
- [18] W Chang, C Wang, C Shieh. Experimental study of a solid adsorption cooling system using flat-tube heat exchangers as adsorption bed. *Applied Thermal Engineering*, 27:2195–2199, 2007.
- [19] Chih-hao Chen, Chien-yeh Hsu, Chih-chieh Chen, Yuan-ching Chiang, Sih-li Chen. Silica gel / polymer composite desiccant wheel combined with heat pump for air-conditioning systems. *Energy*, 94:87–99, 2016.
- [20] Chih-hao Chen, Shu-sheng Ma, Po-hsun Wu, Yuan-ching Chiang, Sih-li Chen. Adsorption and desorption of silica gel circulating fluidized beds for air conditioning systems. *Applied Energy*, 155:708–718, 2015.
- [21] Chih-Hao Chen, Gerd Schmid, Chi-Tong Chan, Yuan-Ching Chiang, Sih-Li Chen. Application of silica gel fluidised bed for air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 89:229–238, 2015.
- [22] Qi Chen, Jianlin Yu, Gang Yan. Performance analysis of a modified zeotropic mixture (R290 / R600) refrigeration cycle with internal subcooler for freezer applications. *Applied Thermal Engineering*, 108:172–180, 2016.

- [23] Yuan-Ching Chiang, Chih-Hao Chen, Yi-Chin Chiang, Sih-Li Chen. Circulating inclined fluidized beds with application for desiccant dehumidification systems. *Applied Energy*, 175:199–211, 2016.
- [24] Kim Choon, Xiaolin Wang, Yee Sern, Bidyut Baran, Anutosh Chakraborty, Shigeru Koyama, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi. Experimental study on performance improvement of a four-bed adsorption chiller by using heat and mass recovery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49:3343–3348, 2006.
- [25] M Chorowski, Z Rogala, P Pyrka. System options for cooling of buildings making use of district heating heat. *International Journal of Refrigeration*, 70:183–195, 2016.
- [26] M Chorowski, Z Rogala, P Pyrka. System options for cooling of buildings making use of district heating heat. *International Journal of Refrigeration*, 70:183–195, 2016.
- [27] Maciej Chorowski, Piotr Pyrka. Modelling and experimental investigation of an adsorption chiller using low-temperature heat from cogeneration. *Energy*, 92:221–229, 2015.
- [28] Hui Tong Chua, Kim Choon Ng, Anutosh Chakraborty, Nay M. Oo, Mohamed A. Othman. Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water Systems. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 47(5):1177–1181, 2002.
- [29] National Chung-hsing. Modeling and testing of a silica gel packed-bed system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(8):1173–1179, 1994.
- [30] K Daou, R Z Wang, Z Z Xia. Desiccant cooling air conditioning : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10:55–77, 2006.
- [31] Ibrahim Dincer, A. Marc Rosen. *Exergy: Energy , Environment and Sustainable Development*. Elsevier Ltd, 2007.
- [32] Ambrose Doodoo, Leif Gustavsson, Farshid Bonakdar. Effects of future climate change scenarios on overheating risk and primary energy use for Swedish residential buildings. *Energy Procedia*, 61:1179–1182, 2014.
- [33] M Dupont, B Celestine, P H Nguyen, J Mericoux, B Brandon. DESICCANT SOLAR AIR CONDITIONING IN TROPICAL. 52(6):509–517, 1994.
- [34] Yasser A F El-samadony, Ahmed M Hamed, Abd Elnaby Kabeel. Performance Evaluation of Single Bed Desiccant Desorption Process. *Natural Resources*, 4:69–75, 2013.
- [35] ELMER. Anemometr CHY361 - specyfikacja techniczna.
- [36] Ahmed Elsayed, Raya K Al-dadah, Saad Mahmoud, Waseem Kaialy. Investigation of activated carbon / ethanol for low temperature adsorption cooling. *International Journal of Green Energy*, 15(5):277–285, 2018.

- [37] Moien Farmahini-farahani, Shahram Delfani, Jafar Esmaeelian. Exergy analysis of evaporative cooling to select the optimum system in diverse climates. *Energy*, 40(1):250–257, 2012.
- [38] G A Florides, S A Kalogirou, S A Tassou, L C Wrobel. Design and construction of a LiBr – water absorption machine. *Energy Conversion and Management*, 44:2483–2508, 2003.
- [39] The European Association for Promotion of Cogeneration. COGEN Europe National Snapshot Survey. Raport instytutowy.
- [40] Th Frank. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy & Buildings*, 37:1175–1185, 2005.
- [41] T S Ge, Y J Dai, R Z Wang. Performance study of silica gel coated fin-tube heat exchanger cooling system based on a developed mathematical model. *Energy Conversion and Management*, 52:2329–2338, 2011.
- [42] Lisa Guan. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment*, 44(4):793–800, 2009.
- [43] Lisa Guan, Lisa Guan. Implication of global warming on air-conditioned office buildings in Australia. *Building Research & Information*, 37(1):43–54, 2017.
- [44] Ahmed M. Hamed. Experimental investigation on the adsorption/desorption processes using solid desiccant in an inclined-fluidized bed. *Renewable Energy*, 30:1913–1921, 2005.
- [45] Ahmed M. Hamed. Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed. *Energy*, 35(6):2468–2483, 2010.
- [46] D.P. Haughey, G.S.G. Beveridge. Local voidage variation in a randomly packed bed of equal-sized spheres. *Chemical Engineering Science*, 21(10):905–915, 1966.
- [47] Akihiko Horibe, Sukmawaty, Naoto Haruki, Daiki Hiraishi. Continuous Sorption and Desorption of Organic Sorbent Powder in Two Connected Fluidized Beds. *Journal of Thermal Science and Technology*, 7(4):563–576, 2012.
- [48] L.J Hua, T.S Ge, R.Z Wang. PERFORMANCE STUDY OF DESICCANT COATED HEAT EXCHANGER BASED ON A DEVELOPED MATHEMATICAL MODEL. *ACTS 2017*, strony 11–15, 2017.
- [49] Kuo-tsang Huang, Ruey-lung Hwang. Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change : The case of Taiwan. *Applied Energy*, 184:1230–1240, 2016.
- [50] Nasiru I Ibrahim, Abdulghani A Al-farayedhi, P Gandhidasan. Experimental investigation of a vapor compression system with condenser air pre-cooling by condensate. *Applied Thermal Engineering*, 110:1255–1263, 2017.

- [51] Andrea Invidiata, Enedir Ghisi. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. *Energy & Buildings*, 130:20–32, 2016.
- [52] Er Vibhor Jain, Er Gagan Bajaj, Er Danda Avinash. Numerical Analysis of Silica Gel Bed Used In Desiccant Air Cooler and Dehumidifier. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 3(6):640–644, 2013.
- [53] Sheldon M Jeter. Effectiveness and LMTD Correction Factor of the Cross Flow Exchanger : a Simplified and Unified Treatment. *2006 ASEE Southeast Section Conference*, 2006.
- [54] C X Jia, Y J Dai, J Y Wu, R Z Wang. Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material. *Energy Conversion and Management*, 47:2523–2534, 2006.
- [55] L I Jianfang, Mitsuhiro K Ubota, Fujio W Atanabe. Optimal Design of a Fin-type Silica Gel Tube Module in the Silica Gel / Water Adsorption Heat Pump. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 37(4):551–557, 2004.
- [56] Kirsti Jylhä, Juha Jokisalo, Kimmo Ruosteenoja, Karoliina Pilli-sihvola, Targo Kalamees, Teija Seitola, Hanna M Mäkelä, Reijo Hyvönen, Mikko Laapas. Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate. *Energy & Buildings*, 99:104–116, 2015.
- [57] A E Kabeel. Adsorption – desorption operations of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications. *Renewable Energy*, 34:255–265, 2009.
- [58] Naile Karakehya, Emmanuella Sukmasari, Choiril Azmiyawati. Studies of the water adsorption on Lampung’s natural zeolite of Indonesia for cooling application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [59] Jacek Kasperski. *Wybrane zagadnienia pracy strumieniowych urządzeń chłodniczych z uwzględnieniem sił grawitacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2010.
- [60] Maryse Labriet, Santosh R Joshi, Neil R Edwards, Philip B Holden, Amit Kanudia, Richard Loulou, Marc Vielle. Worldwide impacts of climate change on energy for heating and cooling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20:1111–1136, 2015.
- [61] Yan Ching Lee, Ling Chia Weng, Pen Chang Tseng, Chi Chuan Wang. Effect of pressure on the moisture adsorption of silica gel and zeolite 13X adsorbents. *Heat and Mass Transfer*, 51(3):441–447, 2014.
- [62] E. W. Lemmon, I.H. Bell, M. L. Huber, M. O. McLinden. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, 2018.

- [63] K C Leong, Y Liu. Numerical study of a combined heat and mass recovery adsorption cooling cycle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:4761–4770, 2004.
- [64] Richard Levine. Why absorption chillers fail, 2001.
- [65] Jyun-de Liang, Chien-yeh Hsu, Tai-chih Hung, Yuan-ching Chiang, Sih-li Chen. Geometrical parameters analysis of improved circulating inclined fluidized beds for general HVAC duct systems. *Applied Energy*, 230(September):784–793, 2018.
- [66] J Lin, R Z Wang, M Kumja, T D Bui, K J Chua. Modelling and experimental investigation of the cross-flow dew point evaporative cooler with and without dehumidification. *Applied Thermal Engineering*, 121:1–13, 2017.
- [67] National Refrigerants Ltd. Refrigerant R1234yf SAFETY DATA SHEET. 2013.
- [68] Muhammad H Mahmood, Muhammad Sultan, Takahiko Miyazaki, Shigeru Koyama, Valeriy S Maisotsenko. Overview of the Maisotsenko cycle – A way towards dew point evaporative cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66:537–555, 2016.
- [69] Vytautas Martinaitis, Darius Biekša, Juozas Bielskus. The exergy efficiency assessment of heat recovery exchanger for air handling units, using a state property – Coenthalpy. *Applied Thermal Engineering*, 108:388–397, 2016.
- [70] Jerry M Melillo, Terese Richmond, Gary W. Yohe. Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment. Raport instytutowy, The Third National Climate Assessment, Washington, 2014.
- [71] Anthony F. Mills, Ahmad A. Pesaran. Moisture transport in silica gel packed beds-II. Experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(6):1051–1060, 1987.
- [72] Takahiko Miyazaki, Atsushi Akisawa. The influence of heat exchanger parameters on the optimum cycle time of adsorption chillers. *Applied Thermal Engineering*, 29(13):2708–2717, 2009.
- [73] Takahiko Miyazaki, Atsushi Akisawa, Bidyut Baran. The performance analysis of a novel dual evaporator type three-bed adsorption chiller. *International Journal of Refrigeration*, 33:276–285, 2010.
- [74] Ramadas Narayanan. Investigation of geometry effects of channels of a silica-gel desiccant wheel. *Energy Procedia*, 110:20–25, 2017.
- [75] Józef Nastaj, Bogdan Ambrożek. Modeling of Drying of Gases Using Solid Desiccants Modeling of Drying of Gases Using Solid Desiccants. *Drying Technology*, 27(12):1344–1352, 2009.

- [76] Cheng Chin Ni, Jung Yang San. Measurement of apparent solid-side mass diffusivity of a water vapor-silica gel system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(9):1839–1847, 2002.
- [77] T K Nunes, J V C Vargas, J C Ordonez, D Shah, L C S Martinho. Modeling , simulation and optimization of a vapor compression refrigeration system dynamic and steady state response. *Applied Energy*, 158:540–555, 2015.
- [78] Q W Pan, R Z Wang. Experimental study on operating features of heat and mass recovery processes in adsorption refrigeration. *Energy*, 135:361–369, 2017.
- [79] Donggen Peng, Junming Zhou, Danting Luo. Exergy analysis of a liquid desiccant evaporative cooling system. *International Journal of Refrigeration*, 82:495–508, 2017.
- [80] A A Pesaran, AF Mills. Moisture Transport in Silica Gel Packed Beds. Raport instytutowy, 1986.
- [81] Richard L Powell. CFC phase-out : have we met the challenge ? *Journal of Fluorine Chemistry*, 114(September 2001):237–250, 2002.
- [82] Hassan Radhi. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – A contribution to reduce the CO 2 emissions. *Building and Environment*, 44(12):2451–2462, 2009.
- [83] A K Ramzy, A M Hamed, M M Awad, M M Bekheit. Theoretical investigation on the cyclic operation of radial flow desiccant bed dehumidifier. *Journal of Engineering and Technology Research*, 2(6):96–110, 2010.
- [84] Ahmed Ramzy, Hossam Abdelmeguid, Waleed M Elawady. A novel approach for enhancing the utilization of solid desiccants in packed bed via intercooling. *Applied Thermal Engineering*, 78:82–89, 2015.
- [85] Ahmed Ramzy, Ravikiran Kadoli. Modified PGC model and its validation by experiments for heat and moisture transfer analysis in a vertical fluidized desiccant bed. *Applied Thermal Engineering*, 81:83–91, 2015.
- [86] Alexander Reichhold, Hermann Hofbauer. Internally circulating fluidized bed for continuous adsorption and desorption. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 34(6):521–527, 1995.
- [87] Zbigniew Rogala. Adsorption chiller using flat-tube adsorbers – Performance assessment and optimization. *Applied Thermal Engineering*, 121:431–442, 2017.
- [88] Zbigniew Rogala, Zbigniew Gnutek, Piotr Kolasiński. Modelling and experimental analyzes on air-fluidised silica gel-water adsorption and desorption. *Applied Thermal Engineering*, 127:950–962, 2017.

- [89] Zbigniew Rogala, Piotr Kolasiński, Przemysław Błasiak. Adsorption / Desorption Characteristics and Performance of the Fluidised Desiccant Cooler. *Energies*, 2018.
- [90] Zbigniew Rogala, Piotr Kolasiński, Zbigniew Gnutek. Effect of operating conditions on performance of silica gel-water air-fluidised desiccant cooler. *E3S Web of Conferences ASEE17*, wolumen 22, 2017.
- [91] Zbigniew Rogala, Piotr Kolasiński, Zbigniew Gnutek. Effect of operating conditions on performance of silica gel-water air-fluidised desiccant cooler. *E3S Web of Conferences ASEE17*, wolumen 22, 2017.
- [92] Asadullah Saeed, Ali Al-alili, Asadullah Saeed, A L I Al-alili. A review on desiccant coated heat exchangers. *Science and Technology for the Built Environment*, 23(1):136–150, 2017.
- [93] Bidyut B. Saha, Elisa C. Boelman, Takao Kashiwagi. Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle - the influence of operating conditions on cooling output and COP. *ASHRAE Transactions*, 101(Pt 2):348–357, 1995.
- [94] Salvatore Santamaria, Alessio Sapienza, Andrea Frazzica, Angelo Freni, Ilya S. Girnik, Yuri I. Aristov. Water adsorption dynamics on representative pieces of real adsorbers for adsorptive chillers. *Applied Energy*, 134:11–19, 2014.
- [95] Giulio Santori, Chiara Di Santis. Optimal fluids for adsorptive cooling and heating. *Sustainable Materials and Technologies*, 12(December 2016):52–61, 2017.
- [96] Alessio Sapienza, Giuseppe Gullì, Luigi Calabrese, Valeria Palomba, Andrea Frazzica, Vincenza Brancato, Davide La, Salvatore Vasta, Angelo Freni, Lucio Bonaccorsi, Gaetano Cacciola. An innovative adsorptive chiller prototype based on 3 hybrid coated / granular adsorbers. *Applied Energy*, 179:929–938, 2016.
- [97] Alessio Sapienza, Salvatore Santamaria, Andrea Frazzica, Angelo Freni. Influence of the management strategy and operating conditions on the performance of an adsorption chiller. *Energy*, 36(9):5532–5538, 2011.
- [98] Sensirion. Datasheet Evaluation Kit EK-H4. Raport instytutowy July, Sensirion The Sensor Company, 2015.
- [99] Sensirion. Datasheet SHT3x-DIS Humidity and Temperature Sensor. Raport instytutowy August, Sensirion The Sensor Company, 2016.
- [100] M Kashif Shahzad, Ghulam Qadar, Muzaffar Ali, Nadeem Ahmed, M Shahid Khalil, Tanzeel Ur. Experimental evaluation of a solid desiccant system integrated with cross flow Maisotsenko cycle evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*, 128:1476–1487, 2018.
- [101] Safety Data Sheet. Refrigerant R1234ze SAFETY DATA SHEET. 2013.

- [102] Ying Shi, Xuejie Gao, Ying Xu, Filippo Giorgi, Deliang Chen. Effects of climate change on heating and cooling degree days and potential energy demand in the household sector of China. *Climate Research*, 67:135–149, 2016.
- [103] S J Slayzak, J P Ryan. Desiccant Dehumidification Wheel Test Guide. Raport instytutowy, National Renewable Energy Laboratory, 2000.
- [104] Kamil Śmierciew, Jerzy Gagan, Dariusz Butrymowicz, Michał Łukaszuk, Henryk Kubiczek. Experimental investigation of the first prototype ejector refrigeration system with HFO-1234ze(E). *Applied Thermal Engineering*, 110:115–125, 2017.
- [105] Maarten Sourbron, Igor Kovacevic. The numerical model for direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*, 113:8–19, 2017.
- [106] Haiou Sun, Shi Bu, Yigang Luan. A high-precision method for calculating the pressure drop across wire mesh filters. *Chemical Engineering Science*, 127:143–150, 2015.
- [107] Kyaw Thu, Hideharu Yanagi, Bidyut Baran, Kim Choon. Performance investigation on a 4-bed adsorption desalination cycle with internal heat recovery scheme. *Desalination*, 402:88–96, 2017.
- [108] Rang Tu, Xiao-hua Liu, Yi Jiang. Irreversible processes and performance improvement of desiccant wheel dehumidification and cooling systems using exergy. *Applied Energy*, 145:331–344, 2015.
- [109] Y D Tu, R Z Wang, T S Ge, X Zheng. Comfortable , high-efficiency heat pump with desiccant-coated , water-sorbing heat exchangers. *Nature SCIENTIFIC REPORTS*, 7, 2017.
- [110] A. S. Uyun, A. Akisawa, T. Miyazaki, Y. Ueda, T. Kashiwagi. Numerical analysis of an advanced three-bed mass recovery adsorption refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15):2876–2884, 2009.
- [111] Evangelos Voyiatzis, J A Palyvos, Nikolaos-christos Markatos. Heat-exchanger design and switching-frequency effects on the performance of a continuous type solar adsorption chiller. *Applied Energy*, 85:1237–1250, 2008.
- [112] Kevin K W Wan, Danny H W Li, Wenyan Pan, Joseph C Lam. Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications. *Applied Energy*, 97:274–282, 2012.
- [113] Dechang Wang, Jipeng Zhang, Xiaoliang Tian, Dawei Liu, K Sumathy. Progress in silica gel – water adsorption refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:85–104, 2014.

- [114] H Wang, Z G Qu, J Q Bai, Y S Qiu. International Journal of Heat and Mass Transfer Combined grand canonical Monte Carlo and finite volume method simulation method for investigation of direct air capture of low concentration CO₂ by 5A zeolite adsorbent bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126:1219–1235, 2018.
- [115] How Wei, Benjamin Teo, Anutosh Chakraborty, Bo Han. Water adsorption on CHA and AFI types zeolites : Modelling and investigation of adsorption chiller under static and dynamic conditions. *Applied Thermal Engineering*, 127:35–45, 2017.
- [116] Yang Wen-Ching. *Handbook of Fluidization and Fluid-particle systems*. Taylor & Francis Group LLC, 2003.
- [117] Wikipedia. Wikipedia.
- [118] J Y Wu, R Z Wang, Y X Xu. Dynamic analysis of heat recovery process for a continuous heat recovery adsorption heat pump. *Energy Conversion and Management*, 43:2201–2211, 2002.
- [119] Wwww.mathesontrigas.com. Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL / UEL).
- [120] Z Q Xiong, Y J Dai, R Z Wang. Development of a novel two-stage liquid desiccant dehumidification system assisted by CaCl₂ solution using exergy analysis method. *Applied Energy*, 87:1495–1504, 2010.
- [121] Yuehan Yang, Peikun Zhang, Li Wang. Parametric analysis of thermal-pulse regeneration of activated alumina in temperature swing adsorption process used for gas dehydration. *Applied Thermal Engineering*, 141:762–774, 2018.
- [122] Piotr Zabierowski. Mass Transfer in the Adsorption Process of Water Vapour in a Confined Fluidized Bed. *Chemical, Process Engineering*, 30,:389–402, 2009.
- [123] Bartosz Zajackowski. Optimizing performance of a three-bed adsorption chiller using new cycle time allocation and mass recovery. *Applied Thermal Engineering*, 100:744–752, 2016.
- [124] Y Zhao, T S Ge, Y J Dai, R Z Wang. Experimental investigation on a desiccant dehumidification unit using fin-tube heat exchanger with silica gel coating. *Applied Thermal Engineering*, 63:52–58, 2014.
- [125] Ahlem Zouaoui, Leila Zili-Ghedira, Sassi Ben Nasrallah. Open solid desiccant cooling air systems: A review and comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54:889–917, 2016.