

Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska



Wysokotemperaturowe pompy ciepła - możliwe zastosowania i dostępne czynniki robocze

II Międzynarodowa Konferencja Naukowa
INNOWACJE W ODNAWIALNYCH ŹRÓDŁACH ENERGII



mgr inż. Jakub Szymiczek
Kraków, 31.03.2023

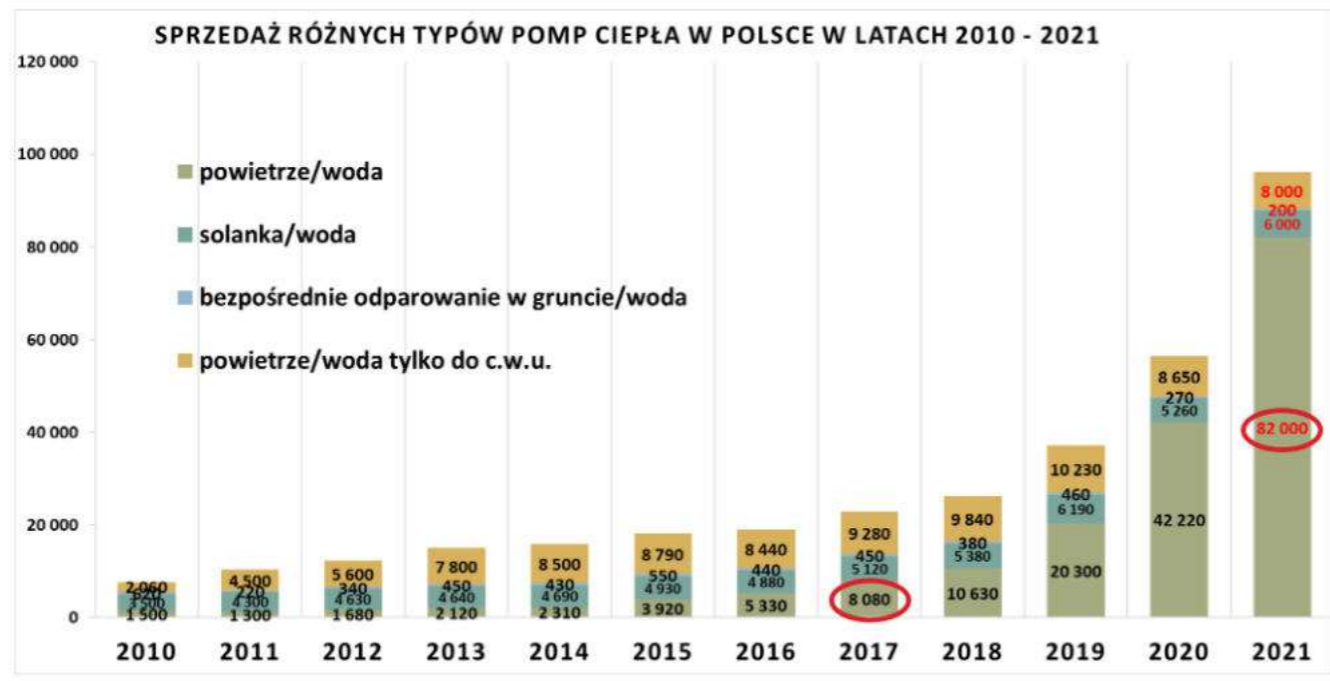
ROZPRAWA DOKTORSKA

*Badania charakterystyk energetycznych sprężarkowych pomp ciepła
dużej mocy w aspekcie efektywności energetycznej i ochrony
środowiska*

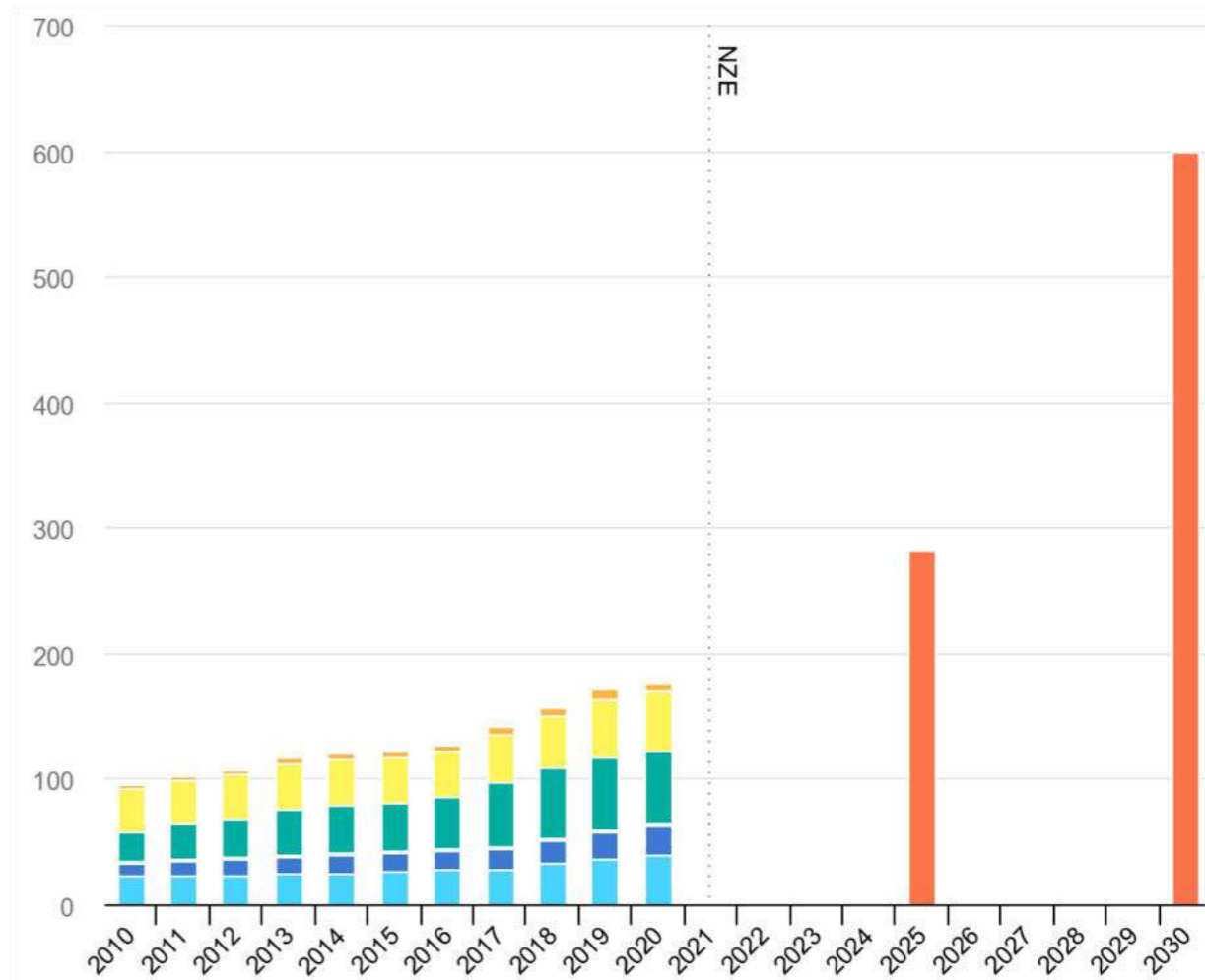
mgr inż. Jakub Szymiczek

Celem pracy jest opracowanie modelu obliczeniowego pozwalającego na ocenę i dobór systemu sprężarkowych pomp ciepła dużej mocy dla konkretnych danych wejściowych. Model ma pozwolić na dokonanie wyboru najlepszego rozwiązania ze względu na: czynnik roboczy, układ pompy ciepła oraz parametrów pracy.

Rynek pomp ciepła

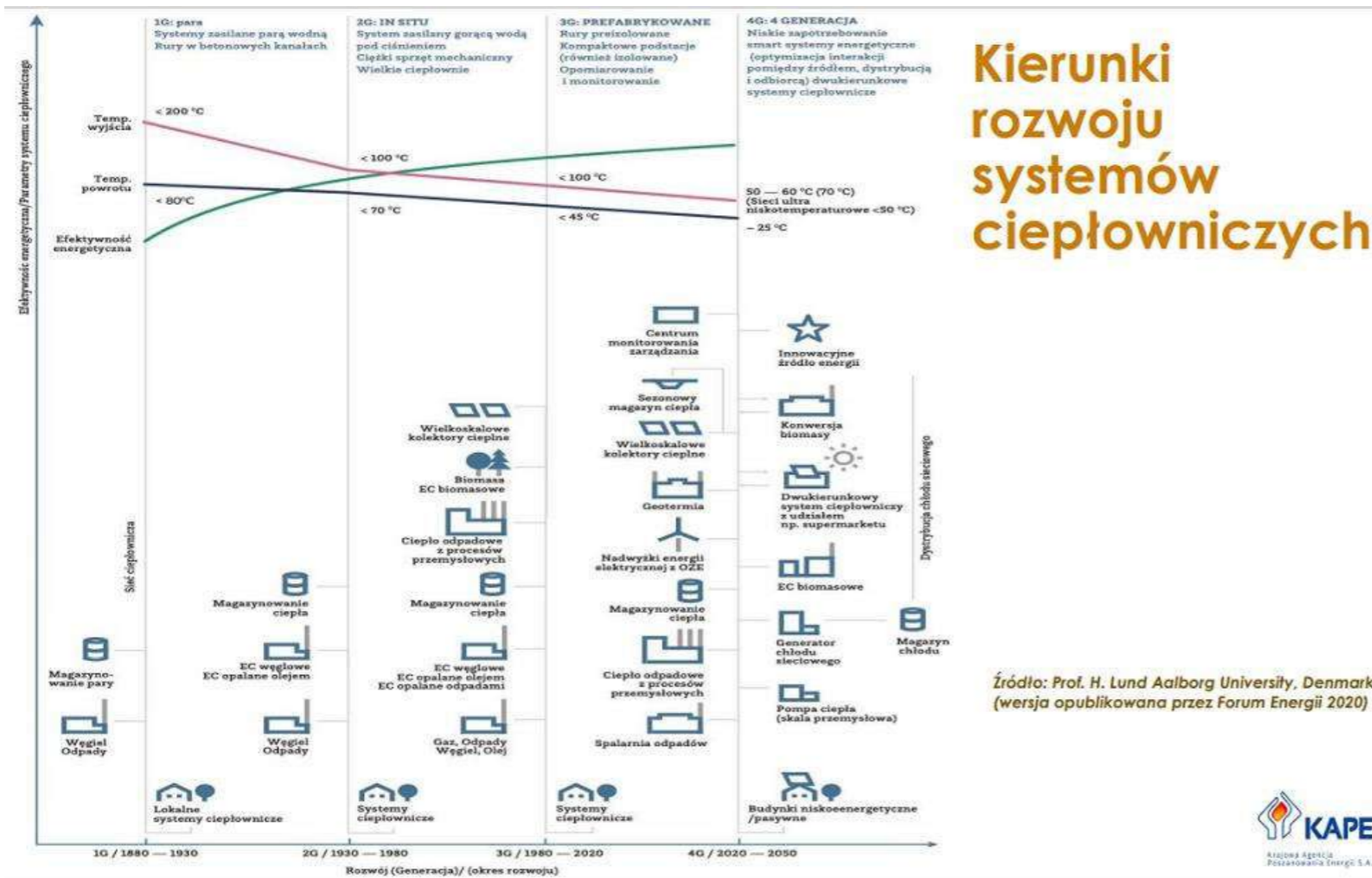


Rys. 1 Sprzedaż pomp ciepła w Polsce (PORT PC)



Rys. 2 liczba (mln) zainstalowanych pomp ciepła na świecie (IEA 2021)

Pompy ciepła w ciepłownictwie



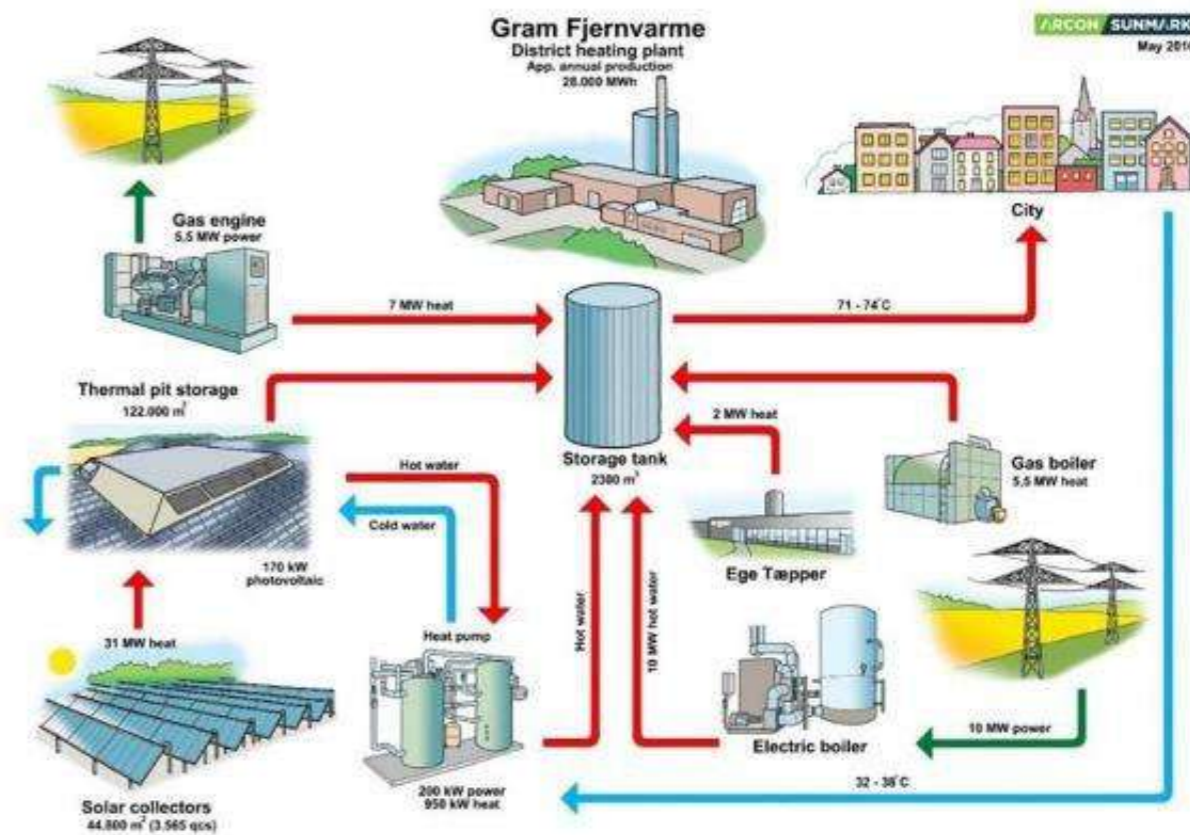
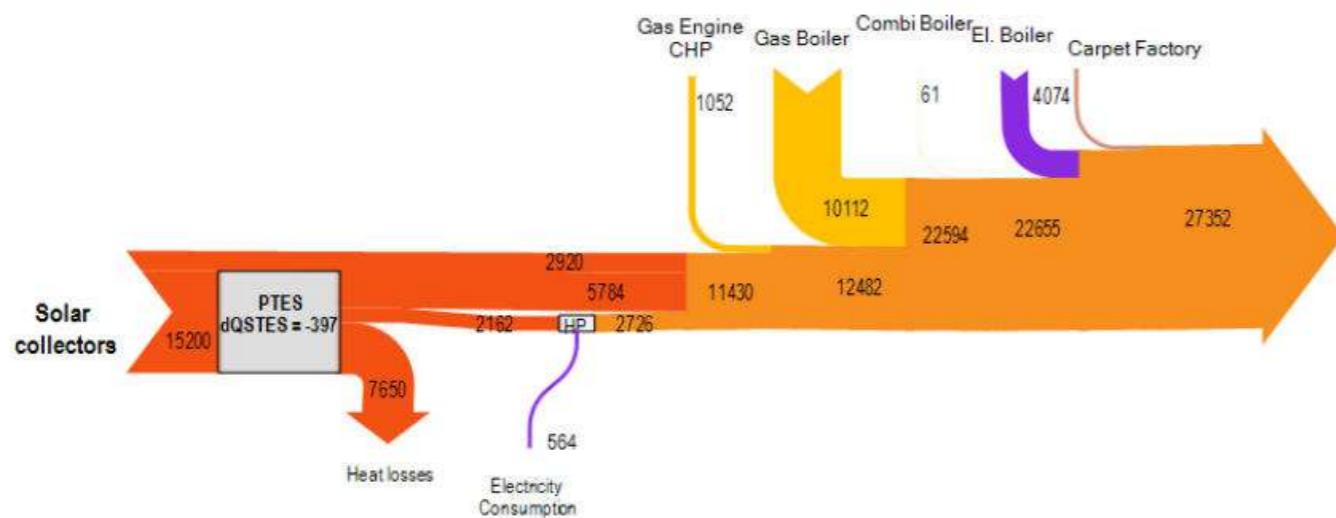
Ciepłownictwo w Polsce:
 438 zakładów ciepłowniczych
 54 GW mocy cieplnej
 218 podmiotów – poniżej 50 MW
 10 podmiotów – powyżej 1000 MW
 35,1 % podmiotów – kogeneracja

Źródło: Prof. H. Lund Aalborg University, Denmark (wersja opublikowana przez Forum Energii 2020)



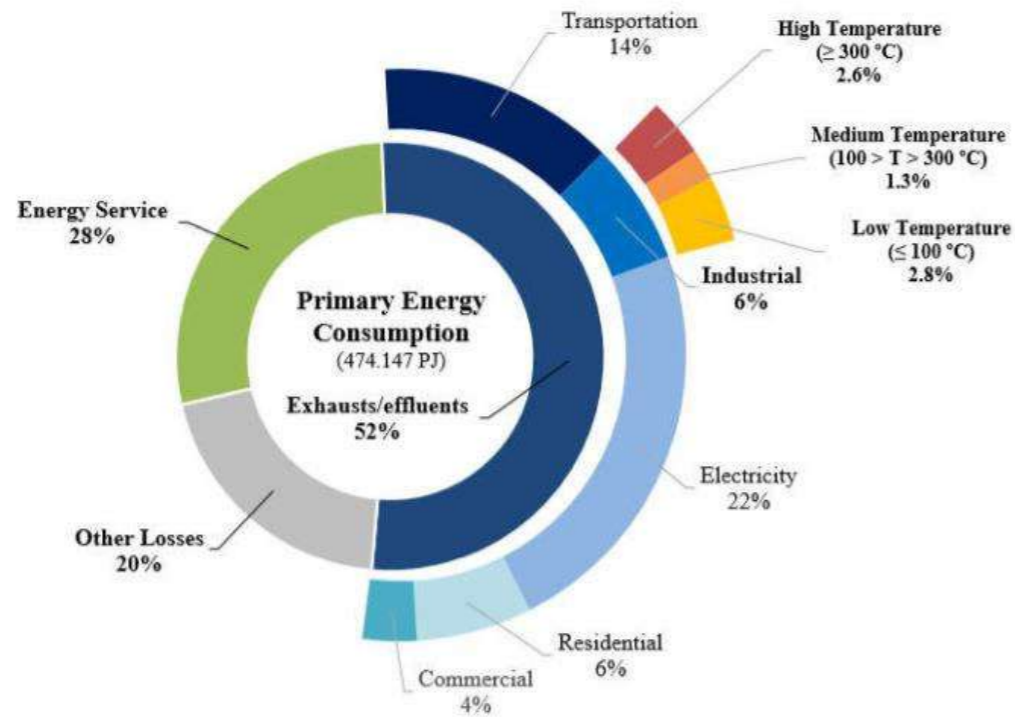
Rysunek 3 Rozwój i „generacje” ciepłownictwa sieciowego

Pompy ciepła w ciepłownictwie

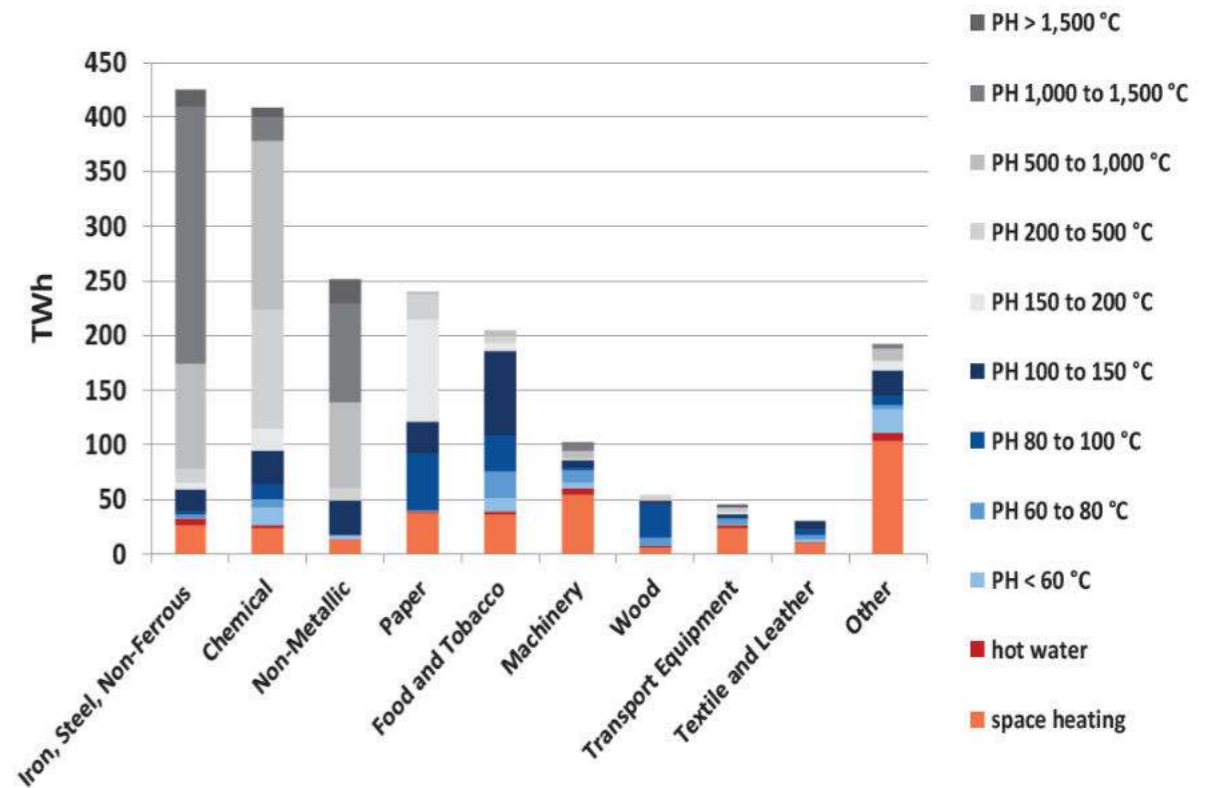


Rysunek 4 Schemat poglądowy współpracy modułów sieci ciepłowniczej w Gram Fjernvarme

Potencjał zastosowania pomp ciepła w przemyśle



Rysunek 5 Podział zapotrzebowania na ciepło w różnych sektorach przemysłu i zakresie temperatur



Rysunek 6 Podział zapotrzebowania na ciepło w różnych sektorach przemysłu i zakresie temperatur

Potencjał zastosowania pomp ciepła w przemyśle

Procesy przemysłowe i wymagane w nich temperatury

Tabela 1 temperatury wymagane w procesach przemysłowych

Sector	Process	Temperature (°C)									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Several sectors	Make-up water	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~110]									
	Preheating	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~100]									
	Washing	[Bar chart showing temperature range from ~30 to ~90]									
Chemicals	Biochemical react.	[Bar chart showing temperature range from ~30 to ~60]									
	Distillation	[Bar chart showing temperature range from ~100 to ~200]									
	Compression	[Bar chart showing temperature range from ~120 to ~170]									
	Cooking	[Bar chart showing temperature range from ~80 to ~110]									
	Thickening	[Bar chart showing temperature range from ~130 to ~150]									
Food & Beverages	Blanching	[Bar chart showing temperature range from ~60 to ~90]									
	Scalding	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~80]									
	Evaporating	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~120]									
	Cooking	[Bar chart showing temperature range from ~60 to ~120]									
	Pasteurisation	[Bar chart showing temperature range from ~60 to ~140]									
	Smoking	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~80]									
	Cleaning	[Bar chart showing temperature range from ~60 to ~80]									
	Sterilisation	[Bar chart showing temperature range from ~100 to ~140]									
	Tempering	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~80]									
	Drying	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~200]									
Paper	Washing	[Bar chart showing temperature range from ~30 to ~80]									
	Bleaching	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~140]									
	De-Inking	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~70]									
	Cooking	[Bar chart showing temperature range from ~100 to ~180]									
Fabricated metal	Drying	[Bar chart showing temperature range from ~100 to ~200]									
	Pickling	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~100]									
	Chromating	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~80]									
	Degreasing	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~100]									
	Electroplating	[Bar chart showing temperature range from ~30 to ~90]									
	Phosphating	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~90]									
Rubber & Plastic	Purging	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~70]									
	Drying	[Bar chart showing temperature range from ~60 to ~180]									
Machinery & Equipment	Drying	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~140]									
	Preheating	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~70]									
Textiles	Surface treatment	[Bar chart showing temperature range from ~20 to ~120]									
	Cleaning	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~80]									
	Bleaching	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~100]									
	Coloring	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~120]									
Textiles	Drying	[Bar chart showing temperature range from ~60 to ~110]									
	Washing	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~90]									
	Preheating	[Bar chart showing temperature range from ~40 to ~70]									

Pompy ciepła w przemyśle

Zakład przetwarzania odpadów na energię Sysav Malmö

Moc cieplna 45 – 65 MW

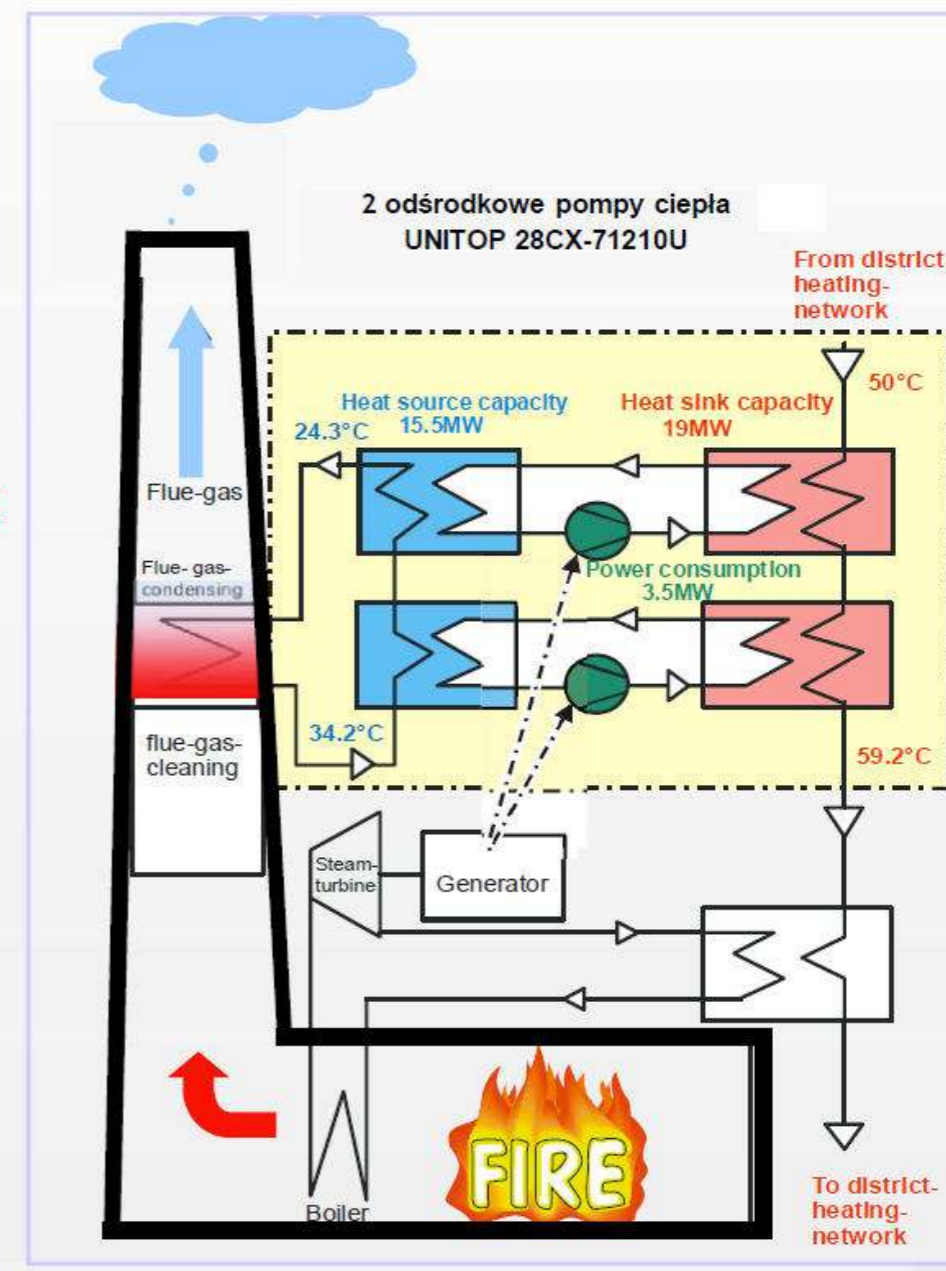
Moc pomp ciepła 19 MW

Temperatura dolnego źródła: 34,2 °C

Temperatura górnego źródła: 59,2 °C

Uzyskane COP: 5,43

Rys. 7 Schemat działania systemu odzysku ciepła z oczyszczania spalin w spalarni odpadów w Malmö



Pompy ciepła w przemyśle

Proces suszenia cegieł w Wienerberger

Suszenie cegieł w procesie ciągłym, spadek wilgotności z 30 % do 3%

Pompa ciepła 400 kW, sprężarka tłokowa

Maksymalna temperatura górnego źródła 160°C

Źródło ciepła 90 °C

Projekt demonstracyjny – w użyciu od jesieni 2019



Pompy ciepła w przemyśle

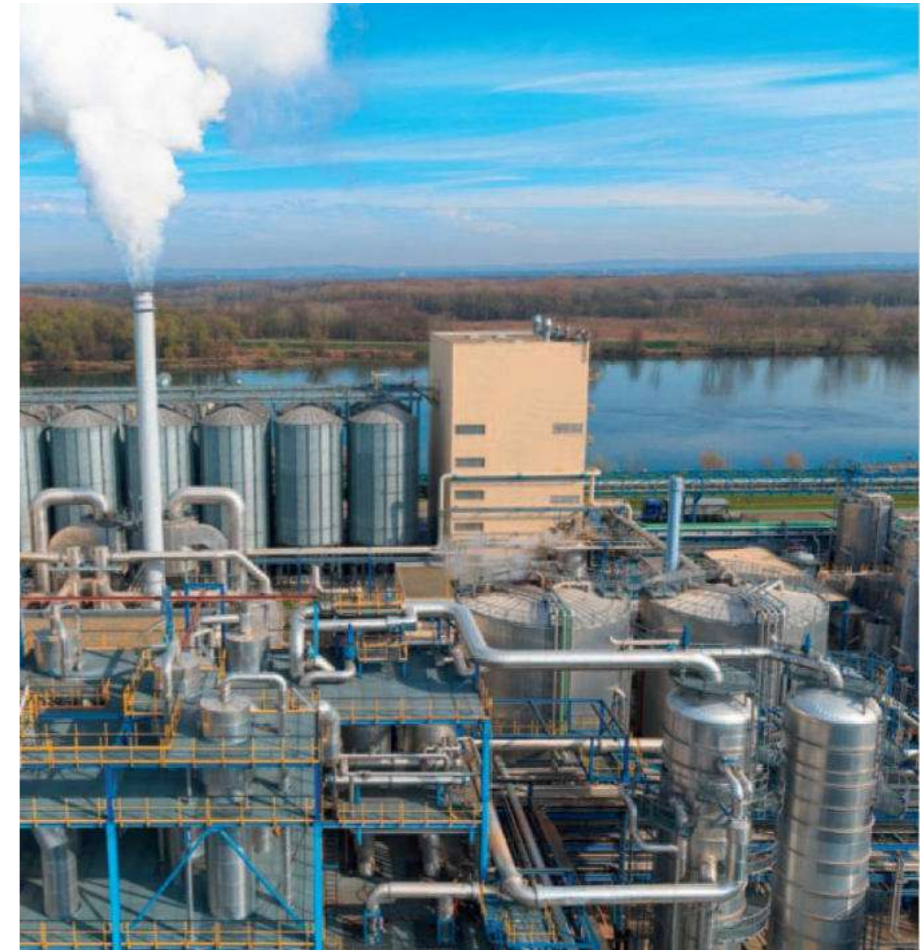
Proces suszenia skrobi w fabryce Agrana

Suszenie w procesie ciągłym, powietrze wykorzystywane do suszenia jest wstępnie ogrzewane w wymiennikach woda-powietrze do temperatury 70°C

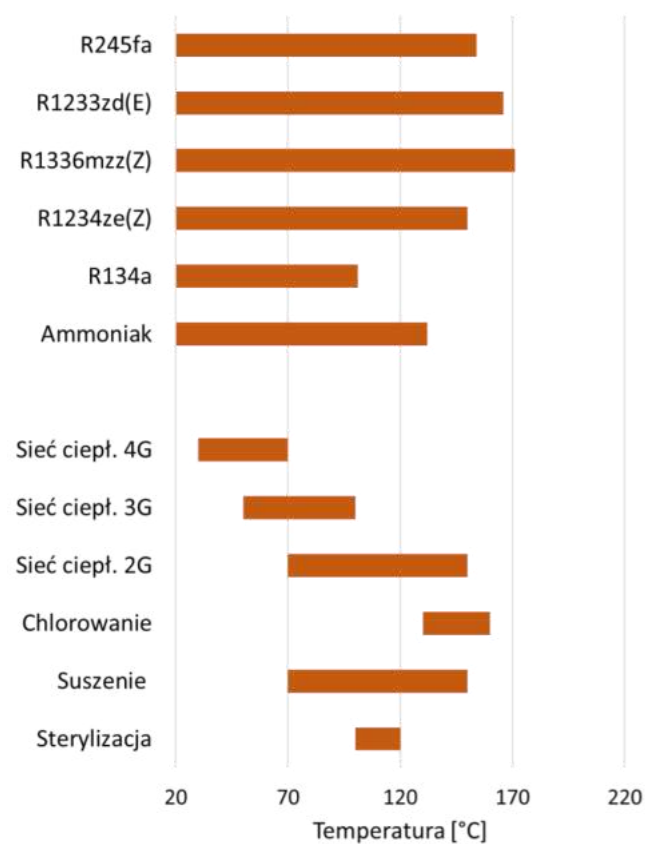
W górnym źródle wymiana ciepła przez pośredni obieg wody do suszonego powietrza. Maksymalna temperatura górnego źródła 160°C

Pompa ciepła 375 kW, sprężarka pół hermetyczna śrubowa, konfiguracja dwóch obiegów

Projekt demonstracyjny – w użyciu od 2020 roku



Przegląd czynników termodynamicznych

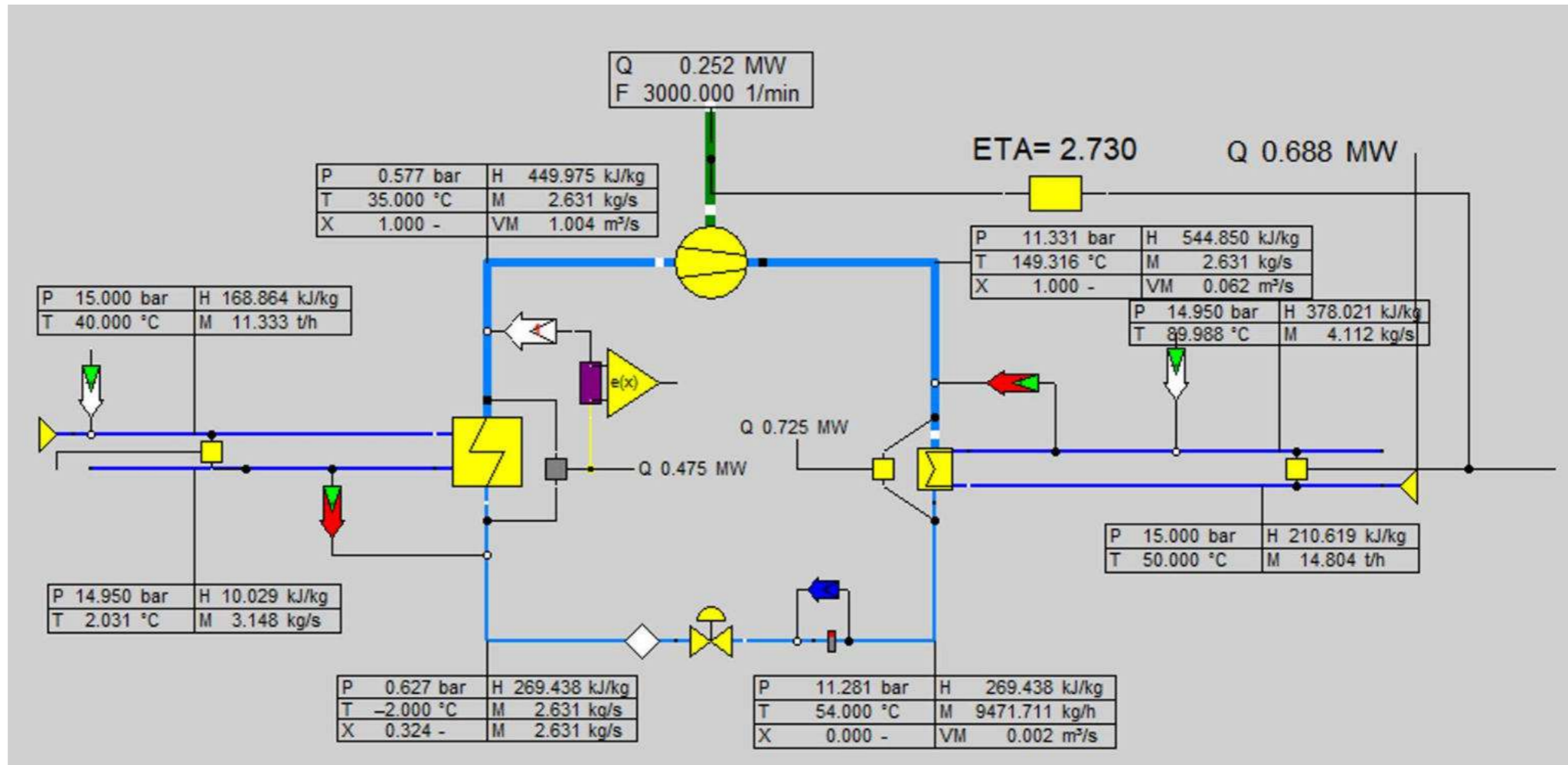


Rys. 8 Porównanie zakresu pracy czynników roboczych z wymaganymi temperaturami dla różnych odbiorców ciepła

Tab. 2 Podsumowanie czynników roboczych występujących w literaturze

Nazwa	R – numer	Publikacje	Ilość badań	GWP 100	Temperatura krytyczna
Woda H ₂ O	R718	[94–97]	4	0	374
n-butan	R600	[69,94,98,99,104,106]	6	5	152
n-pentan	R601	[69,94,102,104]	4	11	197
Opteon XL10. Solstice YF	R1234ze(Z)	[69,94,106,107]	4	10	150
Opteon MZ	R1336mzz(Z)	[69,70,94,95,100,102,105,108]	8	2	171
Genetron 245fa	R245fa	[69–71,94,95,100,101,107]	8	1030	154
Solstice zd	R1233zd(E)	[69–71,95,100–103,105,106]	10	1	166
-	R1224yz(Z)	[69,70,100,101]	4	1	156
-	R365mfc	[69,95]	2	890	187
Propan	R290	[99,104]	2	4	97
tetrafluoroeta n	R134a	[107,108]	2	1430	101
Solstice HFO	R1234ze(E)	[108]	1	6	109

Symulacja w środowisku Epsilon



Rys. 8 Model symulacyjny pompy ciepła

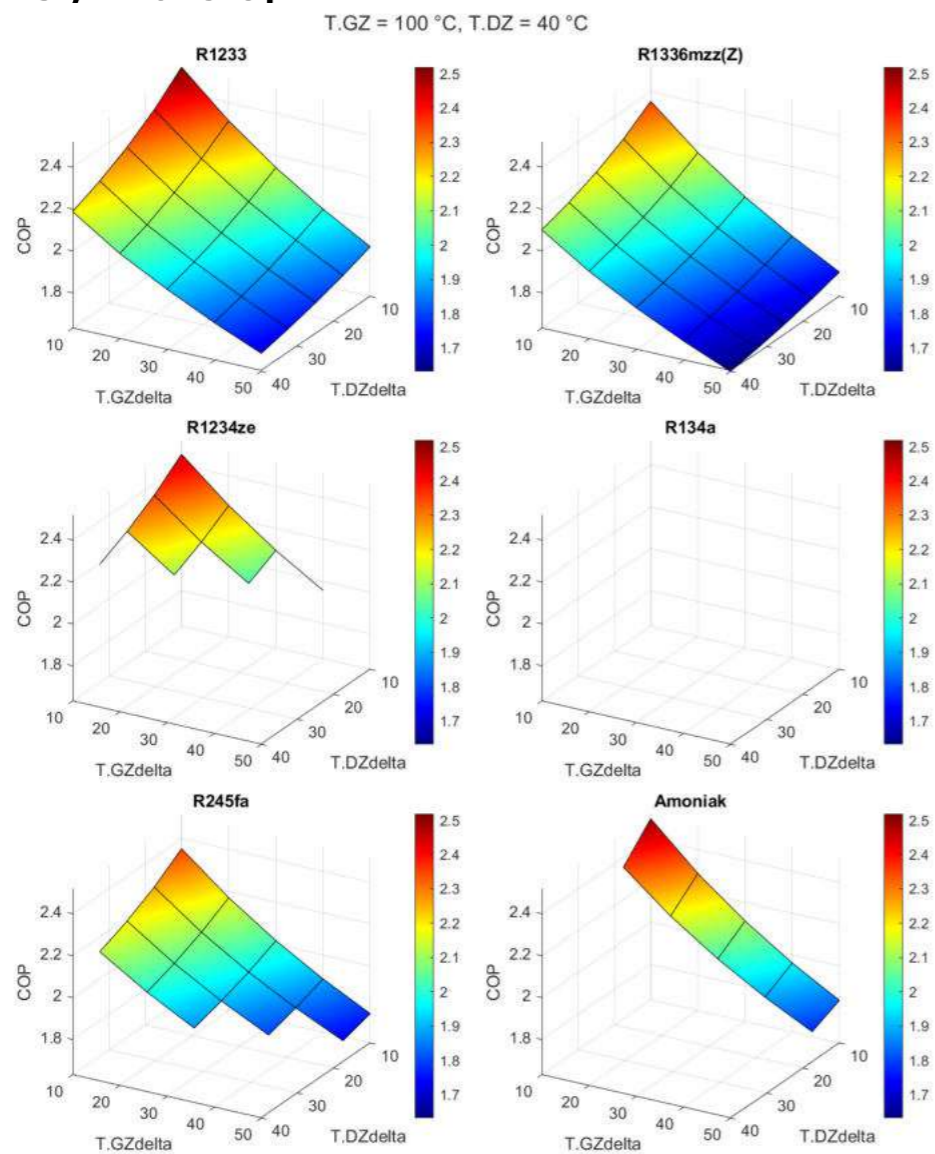
Parametry w symulacji:

- Temperatury wejściowej dolnego źródła (T.DZT) 40 °C (20 – 60)
- Temperatury schłodzenia dolnego źródła (DZTout) 10 - 40 °C
- Temperatury wejściowej górnego źródła (T.GZT) 100 °C
- Temperatury schłodzenia górnego źródła (GZTout) 10 – 50 °C

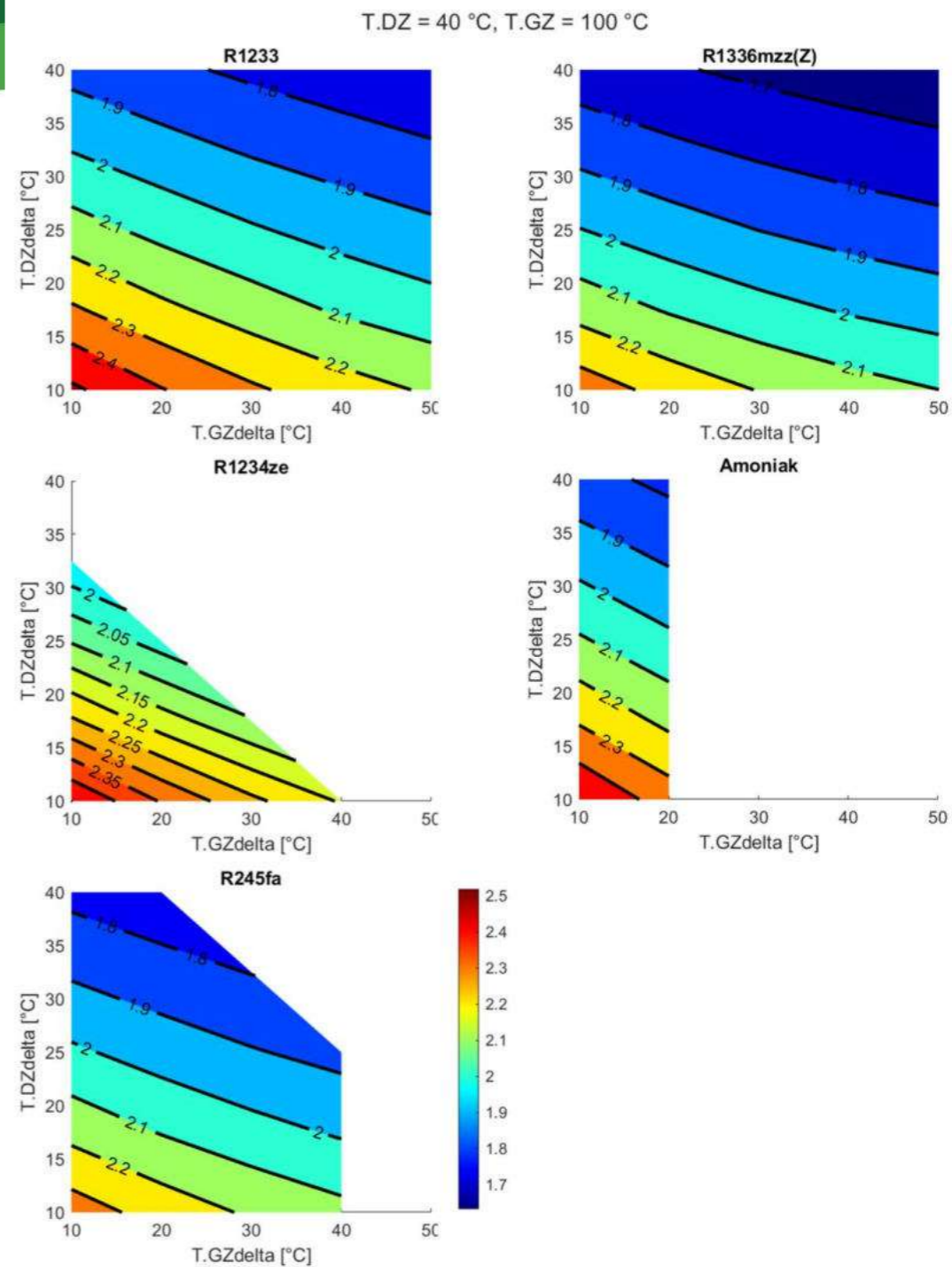
Ciśnienia czynnika roboczego uzależnione od temperatur źródeł ciepła

Przepływ masowy czynnika zależny od mocy

Wyniki symulacji:

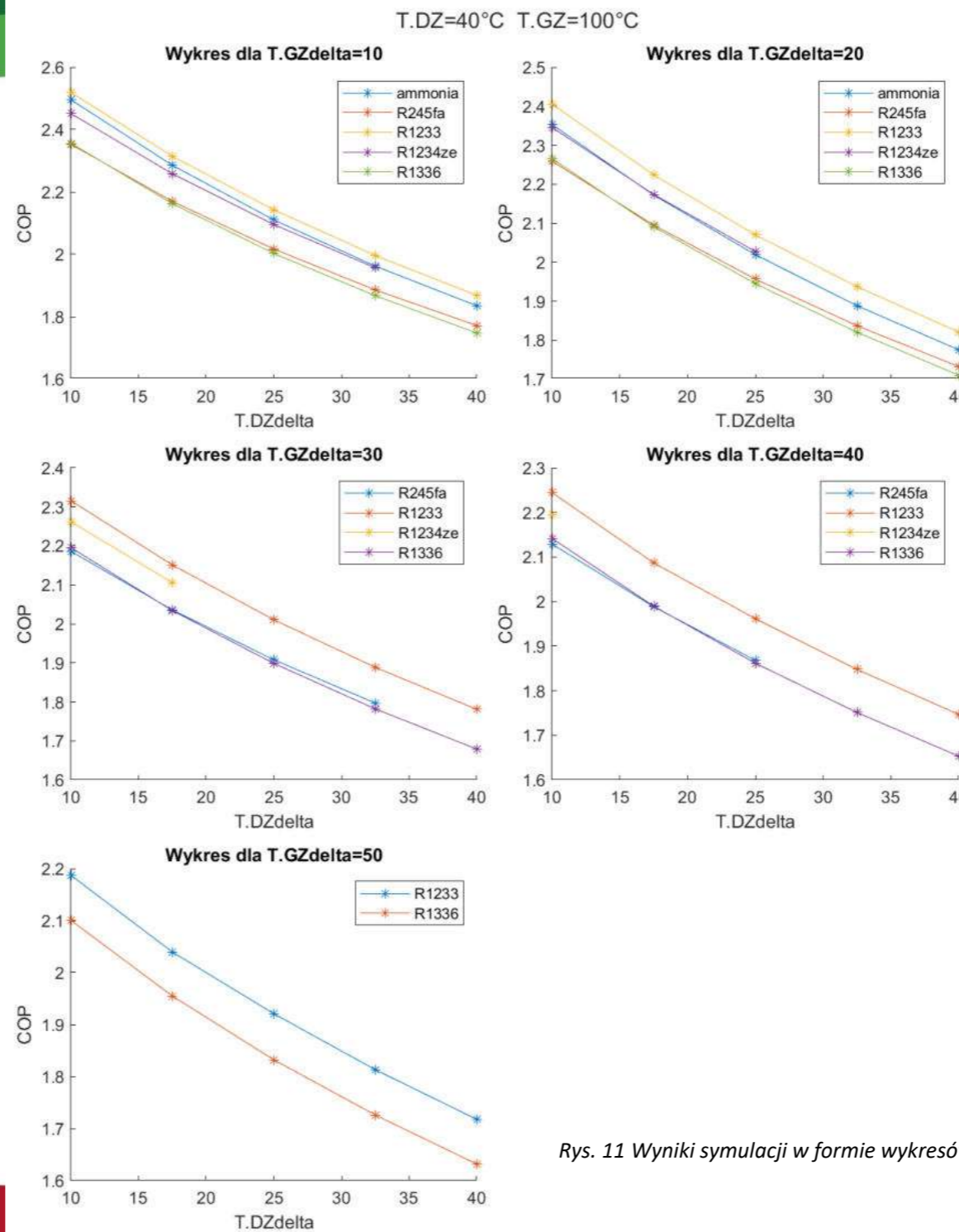


Rys. 9 Wyniki symulacji w formie wykresów 3D



Rys. 10 Wyniki symulacji w formie wykresów mapy kolorów

Wyniki symulacji:



Rys. 11 Wyniki symulacji w formie wykresów – porównanie czynników roboczych

Wyniki - podsumowanie

Tabela 3 Wyniki symulacji – porównanie uzyskanych współczynników COP ; TDZ = 40°C ; TGZ = 100°C

Temperatura schłodzenia dolnego źródła	Temperatura podgrzania górnego źródła	COP dla wybranych czynników [-]				
		Amoniak	R245fa	R1233ze	R1234ze(Z)	R1336mzz(Z)
[°C]	[°C]					
30	110	2,528	2,353	2,472	2,451	2,310
22,5	110	2,311	2,170	2,275	2,258	2,125
15	110	2,130	2,017	2,109	2,096	1,971
7,5	110	1,978	1,886	1,967	1,957	1,839
0	110	1,848	1,772	1,842		1,721
30	120	2,379	2,259	2,363	2,346	2,223
22,5	120	2,193	2,095	2,188	2,174	2,055
15	120	2,036	1,956	2,039	2,027	1,915
7,5	120		1,837	1,910		1,794
0	120	1,786	1,732	1,796	1,840	1,685
30	130		2,186	2,277	2,262	2,155
22,5	130		2,036	2,118	2,106	2,000
15	130		1,908	1,982	2,079	1,870
7,5	130		1,797	1,863	1,938	1,757
0	130			1,757	1,817	1,655
30	140		2,129	2,207	2,195	2,103
22,5	140		1,988	2,061		1,957
15	140		1,868	1,934		1,834
7,5	140		1,764	1,823	1,913	1,727
0	140			1,725	1,841	1,630
30	150			2,152		2,063
22,5	150			2,014		1,923
15	150			1,894		1,805
7,5	150			1,790		1,702
0	150			1,697		1,610

Tabela 4 Wyniki symulacji –COP (ujęcie procentowe)

Temperatura schłodzenia dolnego źródła	Temperatura podgrzania górnego źródła	COP dla wybranych czynników [-]				
		Amoniak	R245fa	R1233ze	R1234ze(Z)	R1336mzz(Z)
[°C]	[°C]					
30	110	100%	93%	98%	97%	91%
22,5	110	100%	94%	98%	98%	92%
15	110	100%	95%	99%	98%	93%
7,5	110	100%	95%	99%	99%	93%
0	110	100%	96%	100%		93%
30	120	100%	95%	99%	99%	93%
22,5	120	100%	96%	100%	99%	94%
15	120	100%	96%	100%	99%	94%
7,5	120		96%	100%		94%
0	120	97%	94%	98%	100%	92%
30	130		96%	100%	99%	95%
22,5	130		96%	100%	99%	94%
15	130		92%	95%	100%	90%
7,5	130		93%	96%	100%	91%
0	130			97%	100%	91%
30	140		96%	100%	99%	95%
22,5	140		96%	100%		95%
15	140		97%	100%		95%
7,5	140		92%	95%	100%	90%
0	140			94%	100%	89%
30	150			100%		96%
22,5	150			100%		96%
15	150			100%		95%
7,5	150			100%		95%
0	150			100%		95%

Parametry obiegu dla danych wejściowych:
 $GZT = 100^{\circ}\text{C}$; $GZT_{\text{delta}} = 20$; $DZT = 40$; $Dz_{\text{delta}} = 25$

Punkt pomiarowy	Cały obieg			R3 (zawór rozprężny – parownik)			R4 (parownik – sprężarka)			R1 (sprężarka – skraplacz)			R2 (skraplacz – zawór rozprężny)		
	COP	Przepływ masowy	Spręż	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy
Jednostka		kg/s	-	bar	°C	m ³ /s	bar	°C	m ³ /s	bar	°C	m ³ /s	bar	°C	m ³ /s
R1336mzz(Z)	1,915	6,345	31,7	0,411	11,000	1,490	0,361	35,000	2,694	11,471	130,811	0,085	11,421	104,000	0,006
R1234ze(Z)	2,027	4,484	20,8	1,064	11,000	0,500	1,014	35,000	0,958	21,080	158,183	0,051	21,030	104,000	0,005
R1233zd(E)	2,039	4,838	22,9	0,764	11,000	0,669	0,714	35,000	1,298	16,377	150,732	0,063	16,327	104,000	0,005
R245fa	1,956	5,360	24,8	0,859	11,000	0,701	0,809	35,000	1,234	20,091	143,329	0,052	20,041	104,000	0,005
Amoniak	2,036	0,593	14,9	6,363	11,000	0,047	6,313	35,000	0,133	94,429	342,180	0,018	94,379	104,000	0,001

Parametry obiegu dla danych wejściowych:
 $GZT = 100^{\circ}\text{C}$; $GZT_{\text{delta}} = 20$; $DZT = 40$; $Dz_{\text{delta}} = 25$

Punkt pomiarowy	Cały obieg			R3 (zawór rozprężny – parownik)			R4 (parownik – sprężarka)			R1 (sprężarka – skraplacz)			R2 (skraplacz – zawór rozprężny)		
Parametr	COP	Przepływ masowy	Spręż	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy	Ciśnienie	Temperatura	Przepływ objętościowy
Jednostka		kg/s	-	bar	$^{\circ}\text{C}$	m^3/s	bar	$^{\circ}\text{C}$	m^3/s	bar	$^{\circ}\text{C}$	m^3/s	bar	$^{\circ}\text{C}$	m^3/s
R1336mzz(Z)	1,915	6,345	31,7	0,411	11,000	1,490	0,361	35,000	2,694	11,471	130,811	0,085	11,421	104,000	0,006
R1234ze(Z)	2,027	4,484	20,8	1,064	11,000	0,500	1,014	35,000	0,958	21,080	158,183	0,051	21,030	104,000	0,005
R1233zd(E)	2,039	4,838	22,9	0,764	11,000	0,669	0,714	35,000	1,298	16,377	150,732	0,063	16,327	104,000	0,005
R245fa	1,956	5,360	24,8	0,859	11,000	0,701	0,809	35,000	1,234	20,091	143,329	0,052	20,041	104,000	0,005
Amoniak	2,036	0,593	14,9	6,363	11,000	0,047	6,313	35,000	0,133	94,429	342,180	0,018	94,379	104,000	0,001

Podsumowanie

- Istnieją czynniki pozwalające na osiągnięcie przez pompy ciepła temperatur do 150 °C
- Najwyższe temperatury oraz współczynnik COP zostaje osiągnięty dla R1233zd, oraz czynnik R1336mzz(Z) (niższe COP)