

Trigeneracja rozproszona w warunkach wrocławskich

Decentralized trigeneration in Wrocław conditions

STEFAN RESZEWSKI

DOI10.36119/15.2025.4.2

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania absorpcyjnych agregatów chłodniczych zasilanych z sieci ciepłowniczej do celów chłodzenia obiektów w miejsce sprężarkowych urządzeń chłodzących. Przedstawiono analizę wpływu takiego rozwiązania na sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu na przykładzie elektrociepłowni Kogeneracja S.A. grupy PGE oraz otrzymanych danych. Określono oszczędności w zużyciu paliwa wynikające ze wzrostu sprawności kogeneracji wynikających z realizacji trigeneracji rozproszonej oraz określono redukcję szkodliwych emisji wynikających ze zmiany sposobu realizacji sposobu chłodzenia z wykorzystaniem agregatów absorpcyjnych napędzanych ciepłem sieciowym zamiast agregatów chłodniczych napędzanych energią elektryczną. Słowa kluczowe: chłodnicze agregaty absorpcyjne, trigeneracja, system ciepłowniczy

The article presents the possibilities of using absorption chillers powered by the district heating network for air conditioning of facilities instead of compressor refrigeration chillers. An analysis of the impact of such a solution on the efficiency of cogeneration is presented, using the example of the Kogeneracja S.A. power plant and the data obtained. The savings in fuel consumption resulting from the increase in cogeneration efficiency due to the implementation of distributed trigeneration were determined. In addition, the reduction of harmful emissions resulting from the change in the method of implementing the cooling effect using absorption units supplied by the district heating network instead of cooling units driven by electricity was determined.

Keywords: absorption chillers, trigeneration, district heating system

Wprowadzenie

Kilkanaście lat temu zbudowana została instalacja pilotażowa z agregatem absorpcyjnym zasilanym parą w obiekcie firmy Kogeneracja S.A. we Wrocławiu. Pilotażowy projekt został zrealizowany w celu sprawdzenia, czy takie rozwiązanie jest przydatne do realizacji efektu chłodniczego przy zaopatrzeniu instalacji klimatyzacji budynków biurowych wyposażonych w klimakonwektory. Realizacja instalacji odbyła się bez większych przeszkód, a instalacja jest eksploatowana do tej pory.

Kolejnym etapem było przedstawienie perspektywy realizacji instalacji klimatyzacyjnych we Wrocławiu przy udziale agregatów absorpcyjnych, których generatory pary (desorbery) miałyby być zasilane ciepłem pochodzącym z miejskiej sieci ciepłowniczej. Częściowo ten pomysł został zrealizowany we Wrocławskim Parku Technologicznym, co zostało opisane w artykule Trigeneracja – zalety i ograniczenia [1] w 2014 roku.

Pomimo zalet, które zostały opisane w artykule [1] oraz w artykule Kogeneracja i trigeneracja w budynkach [2], głównym

ograniczeniem w zastosowaniu technologii absorpcyjnych urządzeń chłodniczych była wymagana wysoka temperatura konieczna do zasilania generatora pary.

Termodynamiczne podstawy trigeneracji zostały szczegółowo opisane w artykule [1], a model matematyczny oraz wnioski nie pozostawiają wątpliwości, że realizacja instalacji trigeneracyjnych ma sens, gdy można zapewnić stały odbiór mocy chłodniczej i wykorzystane jest ciepło.

W artykule [2] przedstawiono najważniejsze korzyści wynikające z zastosowania układów trigeneracyjnych, w stosunku do rozdzielnego wytwarzania ciepła, energii elektrycznej i chłodu.

Do najważniejszych z nich, patrząc zarówno od strony dostawców i producentów energii elektrycznej i ciepła, użytkowników środowiska, jak również użytkowników instalacji, można zaliczyć:

- wzrost efektywności wytwarzania energii elektrycznej, co w konsekwencji prowadzi do oszczędności paliw pierwotnych,
- poprawa bezpieczeństwa energetycznego,

- ograniczenie emisji do atmosfery – poprawa jakości powietrza oraz przeciwdziałanie zmianom klimatu,
- ograniczenie strat przesyłowych energii elektrycznej, koniecznej do napędu elektrycznych urządzeń chłodniczych do celów klimatyzacji,
- zwiększenie niezawodności zasilania,
- możliwość łatwego i taniego zbilansowania sieci w okresie największych obciążeń.

W poniższym artykule przedstawiono możliwości chłodzenia w oparciu o agregaty absorpcyjne zasilane z sieci ciepłowniczej oraz przedstawiono argumenty, które powinny przekonać do technologii agregatów absorpcyjnych zarówno użytkowników, jak również dostawców ciepła i energii elektrycznej.

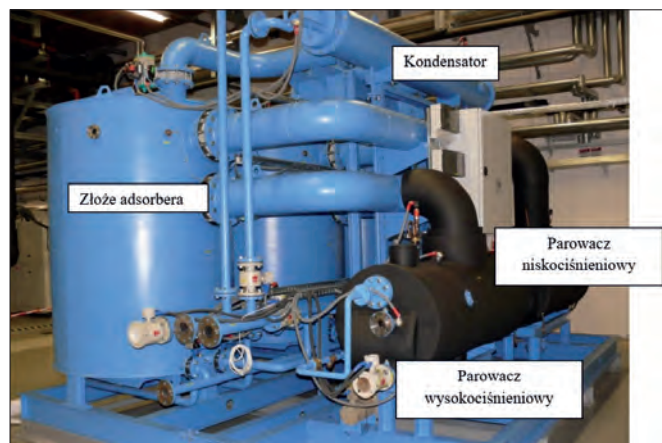
Chłodnictwo sorpcyjne oraz możliwości zasilania ciepłem sieciowym

W artykule [1] opisany został stan wiedzy na rok 2014. Do realizacji efektu chłodzenia z wykorzystaniem urządzeń chłodniczych napędzanych ciepłem dostępne są

następujące technologie urządzeń adsorpcyjnych i absorpcyjnych.

W przypadku technologii adsorpcyjnej niekwestionowaną zaletą jest niska temperatura zasilania, która wynosi 60°C. W artykule [1] opisano realizację prototypowej chłodziarki adsorpcyjnej o mocy 90kW, której COP zbadano dla różnych temperatur zasilania. Z artykułu wynika, że optymalna temperatura zasilania, przy której COP osiągnął swoje maksimum równe 0,42, to 65°C. Osiągniętą podczas badań wartość współczynnika efektywności można uznać za wysoką i jeśli tego typu urządzenia byłyby zasilane ciepłem sieciowym w okresie letnim, gdy zapotrzebowanie na ciepło nie jest koherentne z produkcją energii elektrycznej, można byłoby mówić o bardzo udanej trigeneracji.

Niestety do tej pory ta technologia nie rozwija się w zadowalającym tempie, a na przeszkodzie w jej wdrożeniu komercyjnym stają koszty inwestycyjne. Są one związane nie tylko z wielkością wymienników i objętością złóż, ale również z jednostkową produkcją urządzeń wynikającą z prototypowej technologii (rys. 1).



Rys. 1
Trójzłozowa chłodziarka adsorpcyjna o mocy chłodniczej 90 kW, Wrocławski Park Technologiczny
Fig.1 Three-bed adsorption chiller 90 kW cooling capacity, Wrocław Technology Park

Możliwe, że ta technologia rozwinie się w przyszłości na tyle, aby stać się konkurencyjną w porównaniu do innych technologii chłodzenia, ponieważ posiada istotne zalety. Niemniej jednak konieczny jest postęp w technologii materiałów stanowiących złoża. Gęstość akumulacji mocy chłodniczej musiałaby się zdecydowanie zwiększyć, aby można było liczyć na znaczący spadek kosztów produkcji urządzeń. Obecnie dostępna technologia oparta na złożu silikażelu nie gwarantuje satysfakcjonujących osiągnięć urządzeń przy akceptowalnych ich rozmiarach i cenach.

Drugi kierunek rozwoju maszyn chłodniczych napędzanych ciepłem to technologia absorpcyjna z wykorzystaniem LiBr jako nośnika czynnika chłodniczego (wody), która stale się rozwija od lat 60. XX wieku. W artykule [1] przedstawiono dwa przykłady realizacji tego typu instalacji.

Do niedawna temperatura zasilania wymagana do realizacji efektu chłodniczego w agregatach absorpcyjnych zasilanych gorącą wodą wynosiła minimum 90°C. Tak wysoka temperatura zasilania ograniczała zastosowanie technologii agregatów absorpcyjnych do lokalnych indywidualnych realizacji, gdzie ciepło pochodzi z agregatów kogeneracyjnych wytwarzających energię elektryczną i ciepło lub innych specjalnych instalacji. Tak wysokie temperatury zasilania desorberów agregatów absorpcyjnych praktycznie eliminują możliwości zasilania tego typu urządzeń ciepłem pochodzącym z sieci ciepłowniczej. Wynika to z faktu, że wszystkie sieci ciepłownicze dostarczają ciepło w funkcji krzywej regulacyjnej, według której temperatura zasilania jest uzależniona od temperatury powietrza atmosferycznego. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza atmosferycznego maleje temperatura zasilania w sieci ciepłowniczej. Temperatura zasilania sieci ciepłowniczej jest ograniczona w okresie letnim do temperatury 65°C – 70°C w celu przygotowania ciepłej wody (c.w.) w budynkach przyłączonych do sieci ciepłowniczej. W związku

z tym praktycznie od temperatury powietrza zewnętrznego około 12°C i wyższej, temperatura zasilania większości sieci ciepłowniczych jest niezmienna (tabela 1). Wraz z dalszym wzrostem temperatury powietrza zewnętrznego zmienia się natomiast zapotrzebowanie na moc grzewczą i powyżej temperatury 22°C sieć ciepłownicza jest jedynie obciążona zapotrzebowaniem wynikającym z produkcji c.w. w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej.

Wobec powyższego w okresie letnim poza potrzebą przygotowania c.w. trudno jest wskazać znaczące odbiorniki ciepła w systemie ciepłowniczym, a ciepło powstające w wyniku produkcji energii elektrycznej w okresie letnim w przeważającej części jest rozpraszane w otaczającym środowisku. Spada sprawność kogeneracji, co przyczynia się do mniejszego wykorzystania energii chemicznej zawartej w paliwie. Ten efekt

Tabela 1. Tabela regulacyjna miejskiego systemu ciepłowniczego firmy Fortum we Wrocławiu [17]

Table 1. Table of the Fortum district heating system parameters in Wrocław

Średniodobowa temperatura zewnętrzna	Temperatura zasilania		Temperatura powrotu
tzew, °C	Tzd, °C	Tzg, °C	Tp, °C
12	65	70	46
11	68	71	46
10	70	72	46
9	70	73	46
8	70	75	46
7	70	76	47
6	70	78	48
5	70	79	49
4	70	84	50
3	71	87	51
2	74	89	52
1	76	91	52
0	78	93	53
-1	80	96	54
-2	82	98	55
-3	85	100	55
-4	87	102	56
-5	89	104	57
-6	91	107	58
-7	93	109	58
-8	96	111	59
-9	98	113	60
-10	100	115	61
-11	102	118	61
-12	104	120	62
-13	107	122	63
-14	109	124	64
-15	111	127	64
-16	113	129	65
-17	116	130	65
-18	118	132	66

został przedstawiony w tabeli 2 na przykładzie EC Wrocław.

Z powyższej tabeli wyraźnie widać, że od maja do września ilość ciepła wytwarzanego w skojarzeniu jest znacznie mniejsza niż w miesiącach zimowych. Wpływa to na sprawność ogólną elektrociepłowni co zostało przedstawione w tabeli 3. Przy określeniu sprawności posłużono się metodyką obliczeń zawartą w [14].

Gdzie sprawność ogólna netto została określona zgodnie z [14] jako:

$$\eta = \frac{(EEsk + EEkon) \cdot 3,6 + Q}{EEEsk + EEEkon + EQ} \cdot 100\%$$

Energia dostarczona w paliwie na cele produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu:

$$EEEsk = BEesk \cdot Wu$$

Energia dostarczona w paliwie na cele produkcji energii elektrycznej w kondensacji:

$$EEEkon = BEEkon \cdot Wu$$

Energia dostarczona w paliwie na cele produkcji ciepła:

$$EQ = BQ \cdot Wu$$

Wartość opałową węgla używanego w Kogeneracja S.A przyjęto zgodnie z [16] Wu.

Tabela 2. Dane dotyczące produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu, w kondensacji i produkcji ciepła Kogeneracja S.A. rok 2022 [16]

Table 2. Data on electricity production in cogeneration, condensation and heat production Kogeneracja S.A. year 2022 [16]

2022	Zużycie miesięczne węgla			Miesięczna produkcja energii elektrycznej			Jednostkowe zużycie węgla – miesięcznie		
	BEEsk	BEEkon	BQ	EESk	EEkon	Q	BEEsk/Eesk	BEEkon/EEkon	BQ/Q
	Mg	Mg	Mg	MWh	MWh	GJ	Mg/MWh	Mg/MWh	Mg/GJ
1	24 836	-	60 412	125 206	-	1 121 534	0,20	-	0,05
2	22 563	669	46 957	116 740	1 069	900 616	0,19	0,63	0,05
3	21 405	1 579	47 214	112 726	2 569	916 715	0,19	0,61	0,05
4	17 730	3 079	35 244	96 019	5 536	714 516	0,18	0,56	0,05
5	7 810	3 767	15 703	42 277	6 870	319 198	0,18	0,55	0,05
6	5 704	7 953	12 046	29 675	16 169	231 653	0,19	0,49	0,05
7	5 359	9 398	11 311	27 391	16 939	218 577	0,20	0,55	0,05
8	5 419	9 885	11 331	26 862	16 626	212 575	0,20	0,59	0,05
9	8 466	5 000	19 655	42 871	8 246	366 704	0,20	0,61	0,05
10	11 109	3 677	25 288	56 306	6 157	470 181	0,20	0,60	0,05
11	20 050	911	43 573	104 197	1 642	834 184	0,19	0,55	0,05
12	27 667	300	58 656	136 707	517	1 085 591	0,20	0,58	0,05

gdzie:

BEEsk – zużycie węgla do produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu

BEEkon – zużycie węgla do produkcji energii elektrycznej w kondensacji

BQ – zużycie węgla do produkcji ciepła

EESk – produkcja energii elektrycznej w skojarzeniu

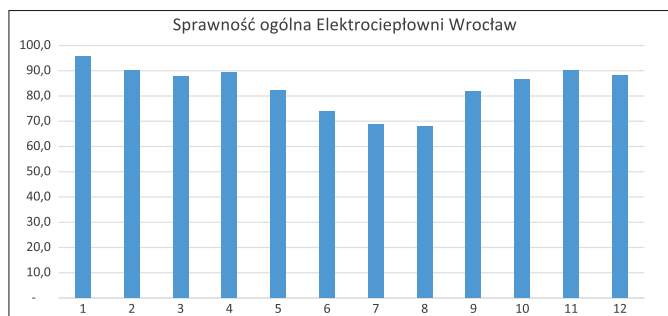
EEkon – produkcja energii elektrycznej w kondensacji

Q – produkcja ciepła

Tabela 3. Sprawność ogólna elektrociepłowni Kogeneracja S.A. rok 2022 na podstawie danych z tabeli 2 [16]

Table 3. Overall efficiency of the Kogeneracja S.A. heat and power plant. 2022 based on data from table 2 [16]

2022	Energia dostarczona w paliwie na potrzeby produkcji energii elektrycznej			Sprawność ogólna elektrociepłowni netto	współczynnik nakładu energii pierwotnej dla elektrociepłowni we Wrocławiu
	EEEsk	EEEkon	EQ		
	GJ	GJ	GJ		
1	519 519	-	1 121 534	95,8	1,0
2	471 883	13 991	982 059	90,2	1,1
3	463 226	34 171	1 021 758	87,7	1,1
4	382 259	66 383	759 861	89,4	1,1
5	172 515	83 209	346 864	82,3	1,2
6	119 248	166 265	251 834	73,8	1,4
7	113 209	198 533	238 945	68,7	1,5
8	110 629	201 802	231 322	67,9	1,5
9	172 317	101 770	400 058	81,7	1,2
10	222 180	73 540	505 760	86,7	1,2
11	419 185	19 046	910 981	90,1	1,1
12	571 794	6 200	1 212 244	88,2	1,1



Rys. 2
Zmienność sprawności ogólnej elektrociepłowni Kogeneracja S.A. w roku 2022
Fig 2. Changes of the overall efficiency of the Kogeneracja S.A. heat and power plant. in 2022

W roku 2008 podczas seminarium Ciepło – Zimno w Zieleru [3] przedstawiono koncepcję zaopatrzenia agregatów absorpcyjnych w ciepło z sieci ciepłowniczej o temperaturze zasilania 90°C i przedstawiono analizę, z której wynikają następujące wnioski:

- koszt eksploatacji wynikający z napędu agregatów chłodniczych energią elektryczną oraz ciepłem jest korzystny dla urządzeń absorpcyjnych przy założeniu, że producent ciepła będzie korzystał z własnej sieci ciepłowniczej. W tym

przypadku można spodziewać się kosztów eksploatacji niższych o około 16 %, w przypadku napędu urządzenia absorpcyjnego ciepłem z sieci ciepłowniczej należącej do dostawcy ciepła, koszt eksploatacji jest podobny jak urządzeń z napędem elektrycznym.

Niestety realizacja takiej instalacji miała zasadniczą wadę polegającą na tym, że krzywa grzewcza zostałaby ograniczona do 90°C na zasilaniu, co przekłada się na znaczące straty ciepła na przesyśle. Aby pomysł

miął szansę powodzenia konieczne byłoby zrealizowanie w krótkim czasie wymiany wielu instalacji chłodzenia o napędzie elektrycznym na absorpcyjne, aby operator sieci ciepłowniczej nie ponosił nieuzasadnionych kosztów strat ciepła na przesyśle. Przy takich warunkach brzegowych w warunkach miasta Wrocławia, gdzie operatorem sieci ciepłowniczej jest inna firma niż producent ciepła pomysłu nie miał możliwości powodzenia.

Obserwując rozwój technologii chłodzenia absorpcyjnego zauważalny jest jednak rozwój konstrukcji urządzeń chłodniczych napędzanych ciepłem, które umożliwiają realizację efektu chłodniczego przy znacznie niższych temperaturach zasilania desorberów. Obecnie znane są na rynku rozwiązania firm japońskich i koreańskich, które wymagają znacznie niższych temperatur zasilania desorberów, tj. wynoszących około 70°C.

Ten fakt zasadniczo zmienia sytuację, ponieważ wartość temperatury zasilania sieci ciepłowniczej niewiele odbiega od wymaganej temperatury zasilania agregatów absorpcyjnych. Poniższy artykuł ma na celu przedstawienie rezultatów analizy, która zakłada zastosowanie agregatów absorpcyjnych w miejsce istniejących agregatów o napędzie elektrycznym przy założeniu, że temperatura zasilania desorberów będzie wynosiła 70°C. W przypadku jednego z japońskich producentów dla jednego modelu temperatura zasilania desorbera wynosi nawet 65°C, co tym bardziej uzasadnia pracę nad możliwościami aplikacyjnymi tego urządzenia w realizacji trigeneracji rozproszonej zasilanej ciepłem sieciowym. Specyfikacja doborowa dla absorpcyjnego agregatu chłodniczego została zamieszczona na rys. 3.

Pomysł pozostaje w zgodzie z prawodawstwem zarówno UE [3,4,5,6,7], jak również z krajowym, co ma odzwierciedlenie w aktach prawnych [8,9,10,11].

Niżej zaprezentowana analiza możliwości aplikacyjnych tego typu rozwiązań ma na celu przedstawienie możliwości osiągnięcia znacznej zmiany w produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu w warunkach miasta Wrocławia.

Realizacja systemu trigeneracji rozproszonej

Pomysł na realizację takiego systemu nie jest nowy, ale na przeszkodzie stały warunki techniczne, jakie musiały spełniać urządzenia absorpcyjne.

W roku 2015 system trigeneracji rozproszonej został zaimplementowany w mieście Brescia we Włoszech. Schemat blokowy (rys.4) przedstawia w jaki sposób został ten system zrealizowany.

W okresie zimowym sieć ciepłownicza spełnia swoją tradycyjną rolę, natomiast w okresie letnim ciepło sieciowe zostało użyte do napędu urządzeń absorpcyjnych.

agregatów absorpcyjnych, wynosi $Q_0 = 50$ MW,

- rzeczywisty współczynnik efektywności urządzeń chłodniczych sprężarkowych $EER = 3$,
- przyjęto, że urządzenia chłodnicze do realizacji efektu klimatyzacji pracują dziennie przez 10 godzin i pięć miesięcy w roku od maja do września włącznie,
- współczynnik nakładu energii pierwotnej dla elektrociepłowni we Wrocławiu określono uwzględniając jej sprawność ogólną określoną w tabeli 3,
- straty energii elektrycznej na przesyłce od źródła produkcji energii elektrycznej do urządzeń chłodniczych wynoszą 8%.

Jeśli przyjmie się wyżej przedstawione założenia to rzeczywisty współczynnik PER dla urządzenia chłodniczego wyniesie 1,26.

$$EER = \frac{Q_0}{W} \rightarrow W = \frac{Q_0}{EER} = \frac{50 \text{ MW}}{3} = 16,66 \text{ MW}$$

Rzeczywisty nakład energii pierwotnej W' dla energii elektrycznej wyprodukowanej w elektrociepłowni Wrocław i wykorzystywanej przez urządzenia chłodnicze sprężarkowe z uwzględnieniem strat na przesyłce przedstawiono w tabeli 4 dla poszczególnych miesięcy. Uwzględniono miesiące, w których instalacje klimatyzacyjne pracują.

$$W' = (W \cdot k_{el}) \cdot 1,08 = 39,6 \text{ MW}$$

$$PER = \frac{Q_0}{W'} = \frac{50 \text{ MW}}{39,6 \text{ MW}} = 1,26$$

Jeśli urządzenia chłodnicze napędzane energią elektryczną zostaną zastąpione przez urządzenia chłodnicze napędzane ciepłem sieciowym to zdecydowanie zmieni się sprawność ogólna elektrociepłowni. Skale tej zmiany obrazuje tabela 5.

Wzrost sprawności kogeneracji przekłada się wprost na spadek zużycia paliwa. Porównując dane z tabel 3 oraz 5 zauważalna jest bardzo znacząca różnica dla

Tabela 4. Sprawność ogólna elektrociepłowni Kogeneracja S.A. rok 2022
Table 4. Overall efficiency of the Kogeneracja S.A. power plant. year 2022

2022	Sprawność ogólna elektrociepłowni netto	współczynnik nakładu energii pierwotnej dla elektrociepłowni we Wrocławiu	Rzeczywisty nakład energii pierwotnej dla energii elektrycznej na napęd sprężarkowych urządzeń chłodniczych
miesiąc	η	k_{el}	W'
	%	-	MW
5	82,3	1,2	21,9
6	73,8	1,4	24,4
7	68,7	1,5	26,2
8	67,9	1,5	26,5
9	81,7	1,2	22,0

miesiący od maja do września, w których ciepło sieciowe byłoby wykorzystywane do napędu agregatów absorpcyjnych tabela 6.

Po wykonaniu bilansu, różnica w zużyciu paliwa po zastosowaniu zmiany w sposobie realizacji efektu chłodzenia na potrzeby klimatyzacji z urządzeń napędzanych energią elektryczną na agregaty napędzane ciepłem sieciowym wynosi ponad 26 000 Mg. Wprowadzenie proponowanej zmiany będzie skutkowało spadkiem zużycia paliwa o około 3,3 % z 611,7 tys. Mg do 591,1 tys. Mg.

Rys. 6
Sprawność ogólna Elektrociepłowni Wrocław po wprowadzeniu trigeneracji rozproszonej
Fig. 6 Overall efficiency of the Wrocław Heat and Power Plant after implementation of distributed trigeneration system

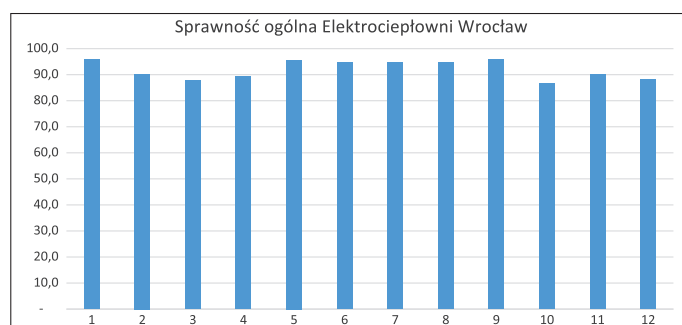


Tabela 6. Różnica w zużyciu paliwa wynikająca z zastosowania trigeneracji rozproszonej
Table 6. Difference in fuel consumption resulting from the use of distributed trigeneration.

Różnica w zużyciu paliwa		
BEEsk zm – BEEsk	BEEkon zm – BEEkon	BQ zm – BQ
Mg	Mg	Mg
1 510	- 3 749	- 62
1 370	- 6 316	- 303
1 389	- 7 723	19
1 246	- 8 287	- 202
977	- 4 731	- 1 553
Wzrost zużycia paliwa na produkcję energii elektrycznej w skojarzeniu 6 491 Mg	Spadek zużycia paliwa zużytego na produkcję energii elektrycznej w kondensacji - 30 806 Mg	Spadek zużycia paliwa na produkcję ciepła - 2101

Tabela 5. Symulacja zmian sprawności ogólnej elektrociepłowni Kogeneracja S.A. dla danych za rok 2022
Table 5. Simulation of changes in general efficiency of the Kogeneracja S.A. heat and power plant. for data for 2022

2022	Zużycie miesięczne węgla po realizacji trigeneracji rozproszonej			Miesięczna produkcja energii elektrycznej po realizacji trigeneracji rozproszonej			Energia dostarczana w paliwie po realizacji trigeneracji rozproszonej			Sprawność ogólna elektrociepłowni netto	Współczynnik nakładu energii pierwotnej
	BEEskzm	BEEkonzm	BQ zm	Eesk zm	Eekon zm	Q	EEEskzm	EEEkonzm	EQzm	η zm	Kel zm
	Mg	Mg	Mg	MWh	MWh	GJ	GJ	GJ	GJ	%	
1	21 741	12 332	45 986	125 206	-	1 121 534	519 519	-	1 121 534	95,8	1,0
2	22 318	4 765	47 094	116 740	1 069	900 616	471 883	13 991,5	982 059	90,2	1,1
3	20 579	8 227	41 127	112 726	2 569	916 715	463 226	34 171,1	1 021 758	87,7	1,1
4	11 888	14 201	24 629	96 019	5 536	714 516	382 259	66 383,2	759 861	89,4	1,1
5	9 320	18	15 641	49 051,7	95,3	237 977	195 716	380,4	328 462	95,6	1,0
6	7 074	1 637	11 743	37 230,5	8 613,5	160 025	148 550	34 367,9	246 612	94,8	1,1
7	6 748	1 675	11 330	35 513,4	8 816,6	151 748	141 698	35 178,3	237 922	94,7	1,1
8	6 665	1 598	11 129	35 078,4	8 409,6	147 740	139 963	33 554,3	233 713	94,7	1,1
9	9 443	269	18 102	49 698,8	1 418,2	287 195	198 298	5 658,7	380 141	95,9	1,0
10	14 122	11 936	30 586	56 306	6 157	470 181	222 180	73 540,0	505 760	86,7	1,2
11	21 024	5 602	44 501	104 197	1 642	834 184	419 185	19 046,3	910 981	90,1	1,1
12	22 455	6 202	48 233	136 707	517	1 085 591	571 794	6 200,1	1 212 244	88,2	1,1

Tabela 7. Różnice w ilościach substancji emitowanych do atmosfery przed i po ewentualnej realizacji trigeneracji rozproszonej

Table 7. Differences of quantity substances emitted into the atmosphere before and after the possible implementation of distributed trigeneration

Emisja		Wielkość emisji za rok 2022	Projekcja zmian emisji po realizacji trigeneracji na podstawie danych z 2022
SO ₂	kg	471181	455 632
NO _x	kg	692 666	669 808
CO	kg	122 155	118 123
Pył	kg	38 579	37 305
CO ₂	Mg	1 100 199	1 063 892

Tabela 8. Dane dotyczące strat ciepła generowanych w miesiącach objętych analizą oraz wyniki symulacji [18]

Table 8. Data on heat losses generated in the months covered by the analysis and simulation results [18]

2024	Tzw. °C	Straty dla temperatury zasilania sieci ciepłowniczej zgodnie z tabelą 2. (65°C do + 70°C)	Przeznaczenie ciepła	Wynik symulacji strat sieci ciepłowniczej wyższej dla temperatury zasilania (68°C do + 73°C) Z przeznaczeniem dla CO, CWU i AC
maj	16,8	22,38%	CO i CW	23,41%
czerwiec	19,6	26,44%	tylko CW	27,66%
lipiec	20,8	28,74%	tylko CW	30,06%
sierpień	20,7	27,68%	tylko CW	28,95%
wrzesień	16,5	21,57%	CO i CW	22,56%

w przeliczeniu na energię pierwotną będzie mniejsza niż przedstawiona oszczędność w zużyciu paliwa to inwestycja w tego typu system będzie uzasadniona zarówno ekonomicznie jak również od strony ekologicznej.

Dane strat sieci ciepłowniczej otrzymane od firmy dystrybuującej ciepło we Wrocławiu zamieszczono w tabeli 8.

Jak widać straty sieci ciepłowniczej z tytułu przesyłu ciepła do poszczególnych odbiorców wynoszą od 22 do prawie 29%. Są one nieuniknione ze względu na konieczność zapewnienia przygotowania c.w. w okresie letnim. Zakładając wzrost temperatury zasilania o 3K, wzrost strat z tytułu dostaw ciepła do odbiorców wzrosną o około 1,2% przy założeniu, że w sieci zostaną zainstalowane agregaty absorpcyjne o mocy chłodniczej poniżej 400 MW. Symulację przygotowano dla zainstalowania 50 MW mocy chłodniczej w agregatach absorpcyjnych, które łącznie wymagałyby dostarczenia 103 MW ciepła do ich napędu. Współczynnik efektywności COP zgodnie z kartą doborową [15] agregatu absorpcyjnego, nawet przy tak niskich temperaturach zasilania generatora pary, to 0,484 co jest rezultatem satysfakcjonującym w porównaniu do technologii adsorpcyjnej.

Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy wynika, że realizacja trigeneracji rozproszonej w oparciu o agregaty absorpcyjne o temperaturze zasilania nie wyższej niż 73°C wpłynie korzystnie na system ciepłowniczy. Wzrost strat, z tytułu przesyłu ciepła do węzłów ciepłowniczych, z których byłyby zaopatrywane chłodnicze agregaty absorpcyjne, wyniesie 1,2% (tabela 8). Wzrost ten jest do zaakceptowania w świetle wyższego wzrostu sprawności konwersji energii pierwotnej (tabela 4

oraz 5). Zdecydowanie efektywniejsze wykorzystanie ciepła odpadowego towarzyszącego produkcji energii elektrycznej przekłada się nie tylko na spadek zużycia paliwa o 3,3% rocznie i niższe koszty z tym związane, ale również uwidacznia się w redukcji emisji szkodliwych substancji do środowiska. Koncepcja realizacji takich systemów jest uzasadniona nie tylko w przypadku elektrociepłowni węglowych, ale również gazowych, ponieważ koncepcja uzależniona jest jedynie od temperatury zasilania sieci ciepłowniczej. Rozpatrując realizację tego typu rozwiązań warto rekomendować je dla wszystkich systemów ciepłowniczych w kraju, których tabele regulacyjne mają podobne parametry co wskazane w tabeli 1.

W artykule rozpatrywano jedynie 5 miesięcy eksploatacji absorpcyjnych urządzeń chłodniczych po 10 godzin dziennie, stąd oszczędności w paliwie mogą wydawać się niskie. Jednak wiele obiektów we Wrocławiu posiadających przyłącza ciepłownicze wymaga chłodzenia w znacznie większym zakresie czasowym. Wobec powyższego można się spodziewać, że zastosowanie agregatów absorpcyjnych w miejsce urządzeń sprężarkowych może zaowocować znacznie większymi oszczędnościami niż przedstawiono w artykule. Rozpatrując również możliwości magazynowania ciepła, opisane w pracy [22], w realizacji trigeneracji rozproszonej można spodziewać się jeszcze lepszych efektów. Realizacja trigeneracji rozproszonej mogłaby również wpłynąć na sposób kształtowania cen ciepła systemowego [21].

Tego typu systemy, zgodnie z Dyrektywą 2004/08/EC [3], mogłyby być dofinansowane ze środków KPO, ponieważ jednym z głównych celów transformacji jest działanie na rzecz poprawy klimatu i zwiększenie efektywności energetycznej.

LITERATURA:

- [1] Chorowski M. – TRIGENERACJA – zalety i ograniczenia, "Nowa Energia" – nr 4/2014
- [2] Wiszniewski A. – Kogeneracja i trigeneracja w budynkach, www.ogrzewnictwo.pl, Materiały z Forum Termomodernizacja 2010 zorganizowanego przez Zrzeszenie Auditorów Energetycznych
- [3] Dyrektywa 2004/08/EC w sprawie wspierania kogeneracji w oparciu o zapotrzebowanie na ciepło użytkowe na rynku wewnętrznym energii
- [4] Dyrektywa 2002/91/EC w sprawie charakterystyki energetycznej budynków
- [5] Dyrektywa 2006/32/EC w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych – Artykuł 14
- [6] Zielona Księga „Ku Europejskiej strategii bezpieczeństwa energetycznego” COM 2000 (769) final
- [7] Strategia promocji skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (CHP) i zlikwidowania barier jego rozwoju – COM (97) 514 final
- [8] Prawo Energetyczne – ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 (Dz. U. 97.54.348),
- [9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26 września 2007 r. w sprawie sposobu obliczania danych podanych we wniosku o wydanie świadectwa pochodzenia z kogeneracji oraz szczegółowego zakresu obowiązku uzyskania i przedstawienia do umorzenia tych świadectw, uiszczania opłaty zastępczej i obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w wyskokoprawnej kogeneracji (Dz. U. 07.175.1314);
- [10] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych (Dz. U. 07.16.92);
- [11] Ustawa z dnia 18 grudnia 1998 r. o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych (Dz. U. 98.162.1121) z późniejszymi zmianami
- [12] P. Østergaard, S. Werner, A. Dyrrelund, H. Lund, A. Arabkoohsar, P. Sorknaes, O.Gudmundsson, J. Thorsen, B.Mathiesen – The four generations of district cooling – A categorization of the development in district cooling from origin to future prospect – Energy 253 (2022) 124098
- [13] G. Eggen, D. Bell, J.Hagen, A. Utne – District Heat Driven Absorption Cooling Of District Cooling Plants In Trondheim, Norway 10th Heat Pump Conference 2011, 16 – 19 May 20
- [14] Metodyka obliczeń wartości parametrów techniczno-ekonomicznych wersja 1.3, Polskie sieci energetyczne Konstancin-Jeziorna, wrzesień 2020 r.
- [15] Karta doborowa agregatu absorpcyjnego MB100 – Yazaki, www.maya-airconditioning.com
- [16] Dane eksploatacyjne uzyskane od Kogeneracja S.A Elektrociepłownie Wrocławskie
- [17] Plan wprowadzania ograniczeń w dostarczaniu ciepła w mieście Wrocław przez Fortum Power and Heat Polska Sp. z o.o. Dokument z dnia 28.06.2022r.
- [18] Dane eksploatacyjne sieci ciepłowniczej we Wrocławiu otrzymane od Fortum
- [19] P. Colaiemma – Trigeneration using Absorption Chiller Technology, Maya S.p.A, Milan 08/2017
- [20] Maya S.p.a. Agregaty absorpcyjne zasilane gorącą wodą, materiały techniczne
- [21] Niestępska M. – Model kształtowania cen ciepła systemowego w Polsce w ocenie branży i regulatora, Instal 4/2024, DOI 10.36119/15.2024.4.1
- [22] Turski M. – Magazynowanie ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych, Instal 10/2023, DOI 10.36119/15.2023.10.1