



LowTEMP2.0

Alokacja emisji gazów cieplarnianych w układach kogeneracyjnych i rekomendacje

Grażyna Rabczuk, Jarosław Łosiński, Adam Ceniań

IMP PAN, Gdańsk



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Motywacje



LowTEMP2.0

Metody obliczania alokacji emisji gazów cieplarnianych (GHG) to niezwykle ważne narzędzie polityki energetycznej. Ich celem jest wsparcie systemów **planowania energetycznego, podejmowania decyzji i rozwoju strategii** na poziomie regionalnym oraz krajowym.

Układy kogeneracji wytwarzają energię elektryczną oraz ciepło jednak efektywność produkcji ciepła sięga

95%

i więcej, zaś sprawność układów generacji energii elektrycznej rzadko przekraczają poziom

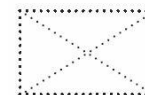
60%

Stąd pytanie:

Jaką część emisji GHG należy przyporządkować generacji energii elektrycznej i ciepła ?



Rys. 1: Emisje największej elektrowni na węgiel brunatny w Polsce w Belchatowie. Źródło: M. Dzierzgowski, IMP PAN



(optional)
Partner
Logo

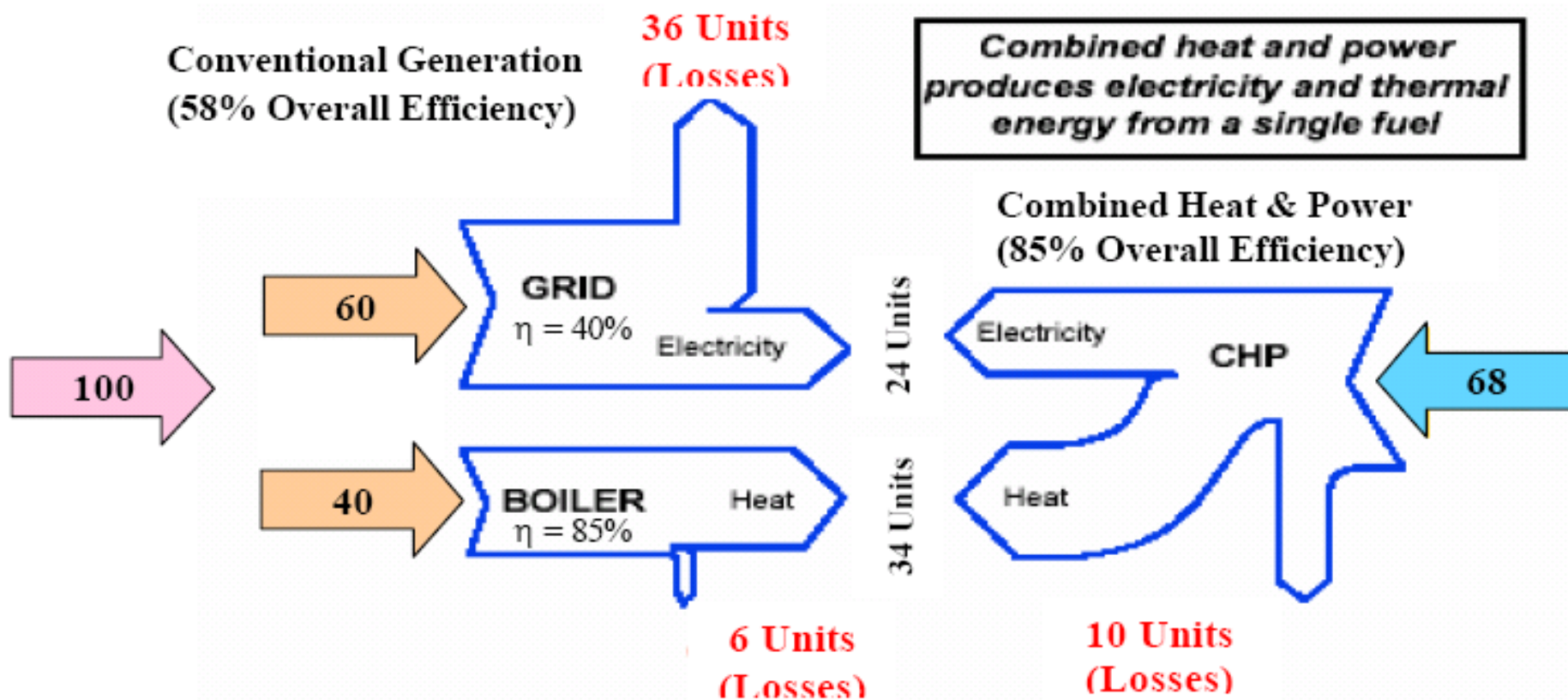


EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Kogeneracja – zalety

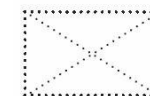


LowTEMP2.0



Energy efficiency advantage of a cogeneration system (UNESCAP, 2000)

Source: UNESCAP, 2000



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Źródła emisji i ich WOG (GWP)



LowTEMP2.0

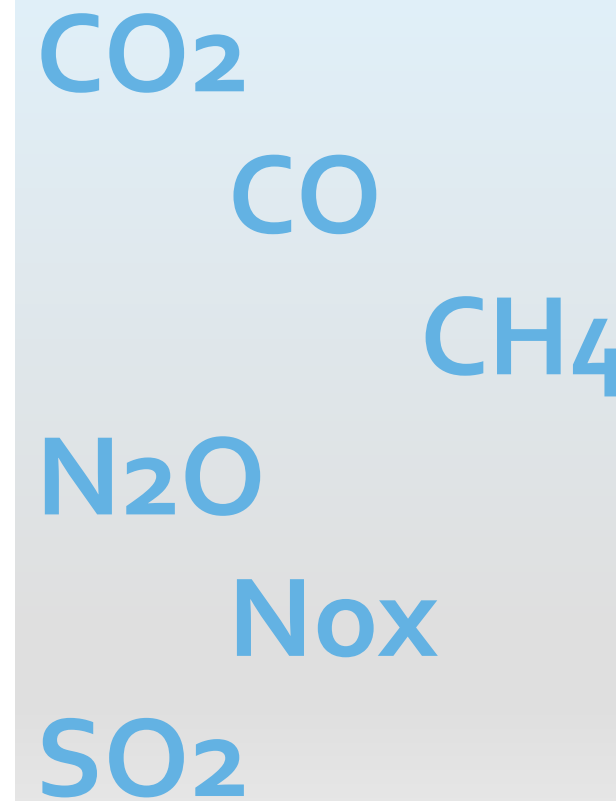
Współczynnik ocieplenia globalnego (WOG, ang. GWP)

Spalanie paliw kopalnych skutkuje emisjami gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla (CO₂), metanu (CH₄), tlenków azotu (Nox) i in. Powyższym emisjom można przyporządkować wielkość emisji GHG poprzez wymnożenie ich ilości (w kg) przez przypisany im tzw. współczynnik ocieplenia globalnego.

WOG (GWP) pokazuje jak **długo gaz pozostaje średnio w atmosferze i jak silnie absorbuje energię** tj. pokazuje jak dany gaz wpływa na poziom globalnego ocieplenia w relacji do CO₂

Przykłady:

GWP CO ₂ z definicji	1
Metan (CH ₄):	28–36
Tlenek azotu (N ₂ O):	265–298.



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metody określenia emisji i wskaźnik emisji GHG



LowTEMP2.0

Istnieją dwie zasadnicze metody określenia emisji gazów cieplarnianych (GHG) dla stacjonarnych urządzeń spalania:

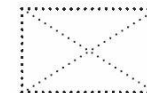
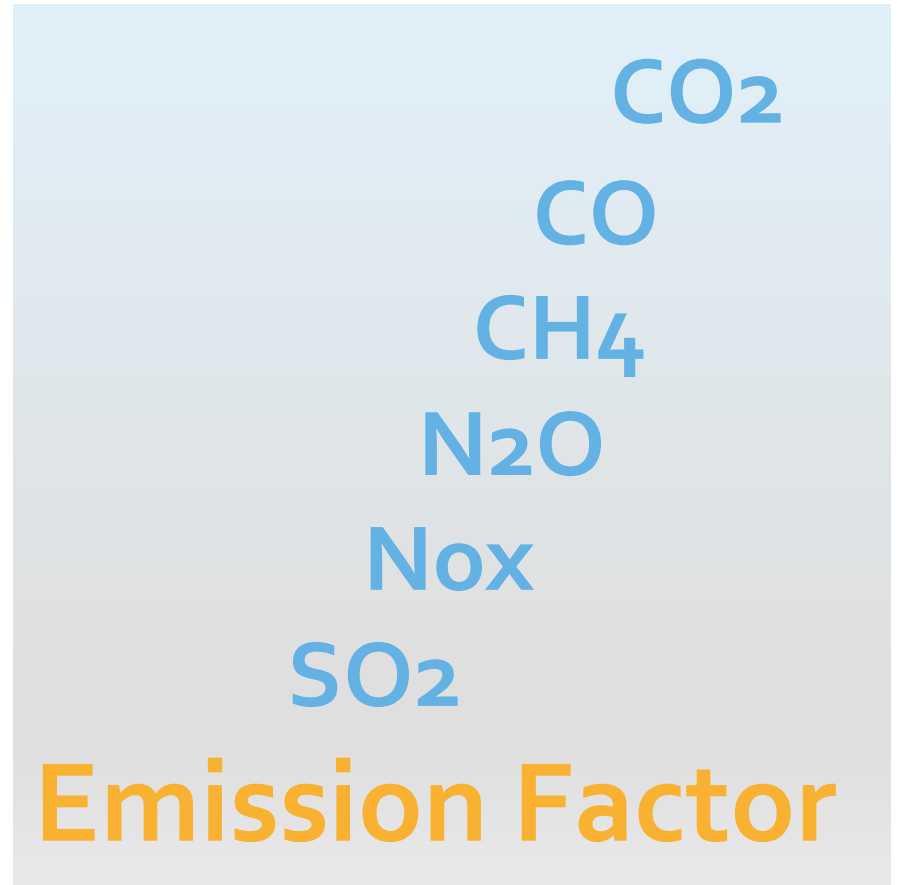
- Pomiar bezpośredni

Bezpośredniego pomiaru emisji GHG można dokonać korzystając z układu ciągłego monitoringu emisji.

- Analiza spalonych paliw.

Obliczenie polega na określeniu zawartości węgla w spalonym paliwie.

Wskaźnik emisji jest zdefiniowany jako średnia emisja danego gazu cieplarnianego (GHG) dla różnych paliw, w odniesieniu na jednostkę paliwa lub kWh.



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Emisje GHG dla różnych paliw



LowTEMP2.0

Istnieją 3 standardowe metody obliczania emisji GHG dla różnych paliw:

$$\text{Emisja GHG} = \text{Paliwo} * EF_1 \quad (1)$$

Emisja GHG = Ilość emisji CO₂, CH₄ lub N₂O; **Paliwo** = masa lub objętość spalonego paliwa;
EF₁ = wskaźnik emisji CO₂, CH₄ or N₂O na jednostkę masy lub objętości,

$$\text{Emisja GHG} = \text{Paliwo} * HHV * EF_2 \quad (2)$$

HHV = Ciepło spalania, jednostka ciepła na masę lub objętość paliwa;
EF₂ = wskaźnik emisji CO₂, CH₄, lub N₂O na jednostkę energii (ciepła);

$$\text{Emisja GHG} = \text{Paliwo} * CC * 44/12 \quad (3)$$

CC = zawartość węgla w paliwie w jednostce masy na masę lub objętość paliwa,
44/12 = stosunek masy molekularnej CO₂ do C.

EPA Greenhouse Gas Inventory Guidance, *Direct Emissions from Stationary Combustion Sources*, 2016;



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Energia Pierwotna – Wskaźnik Energii Pierwotnej



LowTEMP2.0

Energia pierwotna (PE)

oznacza energię odnawialnych lub kopalnych paliw, które nie zostały poddane żadnym procesom konwersji lub transformacji.

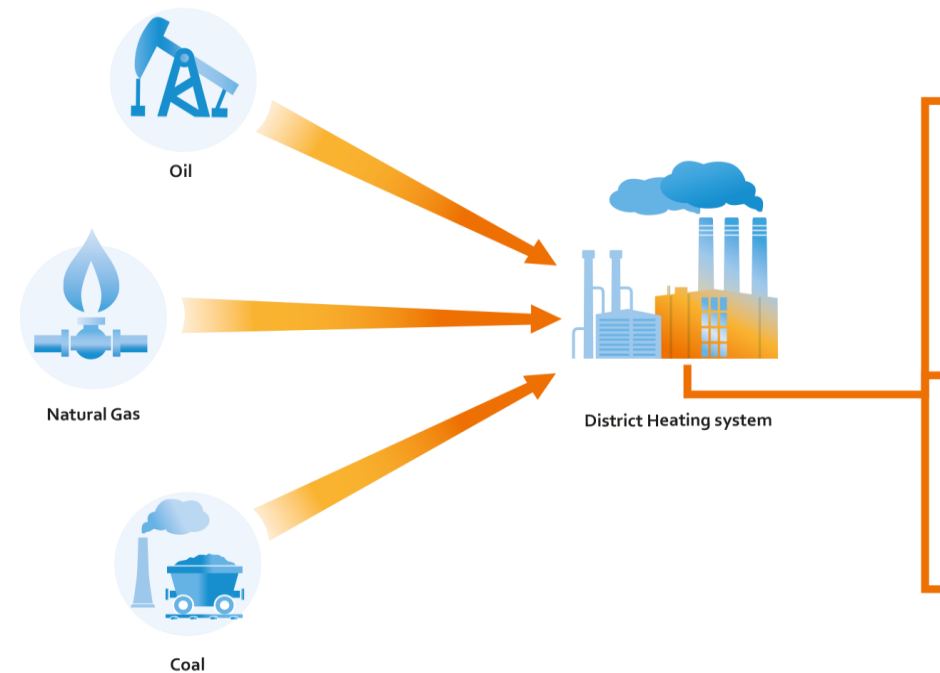
Energia ta może zostać poddana procesom konwersji i przekazana do użytkowników jako **Energia Końcowa** w postaci elektryczności lub ciepła. PE zazwyczaj uwzględnia energię zużytą w procesie pozyskiwania, transportu oraz transformacji do energii końcowej.

Wskaźnik Energii Pierwotnej (PEF)

określa ilość PE koniecznej dla generacji jednostki energii elektrycznej lub ciepła

Energia Pierwotna * Efektywność Systemu = Energia końcowa

Wskaźnik Energii Pierwotnej = Energia Pierwotna/Energia Końcowa



Rys. 3: Sieć ciepłownicza. Źródło: Ilustracja projektu LowTEMP, autor Peter Abrahamsson, AliasDesign, dla Sustainable Business Hub

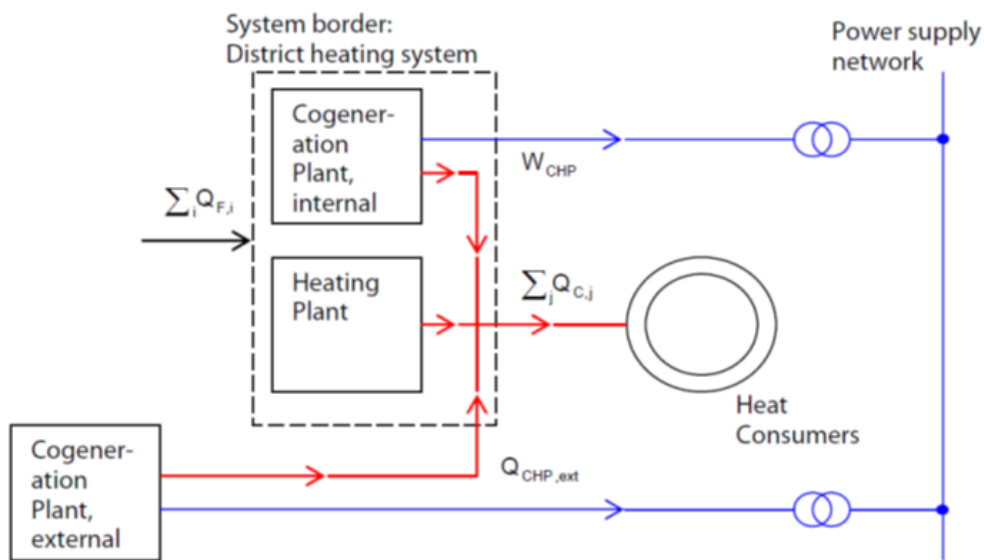


(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Wskaźnik Energii Pierwotnej ($f_{P,DH}$) dla systemu ciepłowniczego



Rys. 4. Schemat systemu ciepłowniczego. Źródło: A. Wallisch, [1]

$Q_{F,i}$ – paliwo (energia końcowa) wykorzystane w ciepłowni oraz w jednostce kogeneracyjnej w rozważanym okresie (zazwyczaj w jednym roku) i systemie ciepłowniczym) – w punkcie zaopatrzenia;

W_{CHP} – produkcja energii elektrycznej układu kogeneracji w rozważanym systemie ciepłowniczym;

$Q_{C,j}$ – konsumpcja ciepła mierzona na wejściu do węzła klienta w rozważanym okresie (zazwyczaj w jednym roku);

$Q_{CHP,ext}$ – ciepło dostarczane przez system ciepłowniczy z zewnętrznej jednostki kogeneracyjnej

$f_{P,F,i}$ – Energia Pierwotna/Wskaźnik paliwa (Energia Kończowa);

$f_{P,elt}$ – Energia Pierwotna/Energia elektryczna CHP.

$$f_{P,DH} = \frac{\sum_i Q_{F,i} \cdot f_{P,F,i} - W_{CHP} \cdot f_{P,elt}}{\sum_j Q_{C,j}}$$

Alokacja emisji GHG dla elektryczności i ciepła wyprodukowanych w instalacji kogeneracyjnej (CHP)

Alokacja emisji GHG dla energii elektrycznej i ciepła układu CHP jest szczególnie istotna w przypadku gdy wygenerowane ciepło i elektryczność są konsumowane przez różnych odbiorców i gdy musimy dokonać porównania różnych sposobów produkcji ciepła.

W jednostkach CHP gdzie elektryczność i ciepło produkowane są jednocześnie **trudno jest dokładnie określić** jak dużo energii pierwotnej, emisji lub kosztów operacyjnych należy alokować dla generacji obydwu produktów.



Rys 5. Jednostka CHP z układem zgazowania. Źródło: A.Cenian, IMP PAN



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metody alokacji emisji GHG



LowTEMP2.0

W projekcie BSR LowTEMP rozważono 7 metod alokacji emisji GHG (najbardziej popularnych w UE), w tym

- Energii (Energy method),
- Generacji Alternatywnych (Alternative generation method),
- Bonusu mocy (Power bonus method),
- Egzergii (Exergy method),
- 200% (200% method),
- Pas 2050 (Pas 2050 method),
- Drezdeńska (Dresden method).

Inne znane metody to:

- Pracy (Work method),
- Fińska (Finnish method)
- Alokacji oszczędności dla elektryczności (All savings allocated to electricity),
- Alokacji oszczędności dla ciepła (All savings allocated to heat),
- i inne

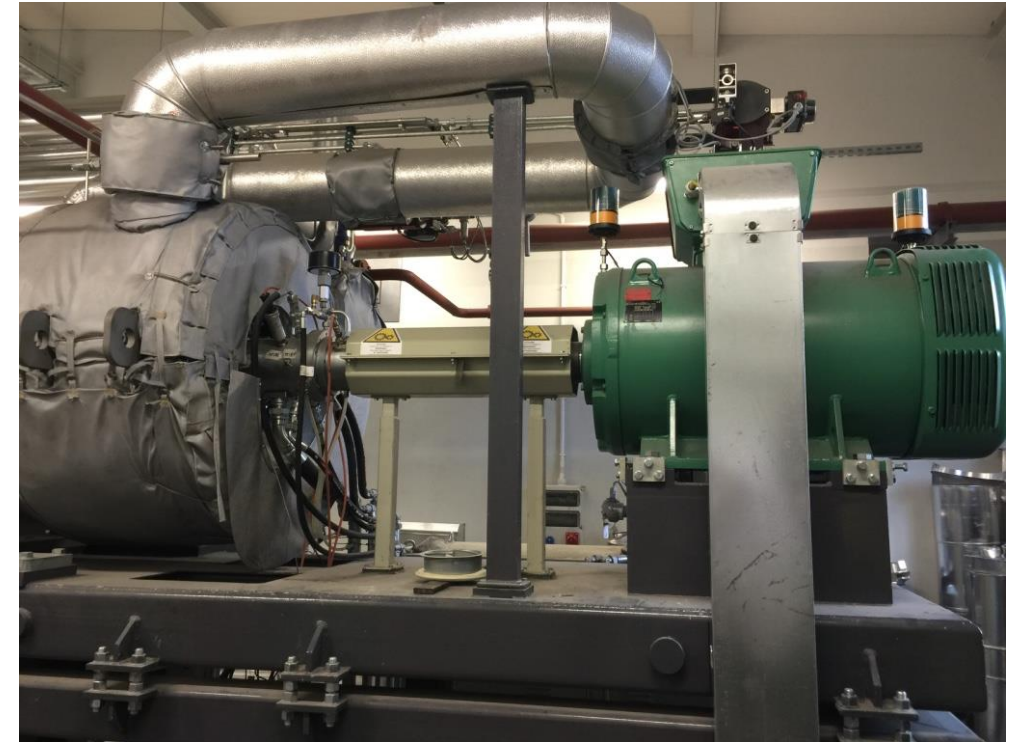


Figure 6. Turbina ORC CHP - 120 kWe. Źródło: A. Cenian, IMP PAN

Metoda Energii



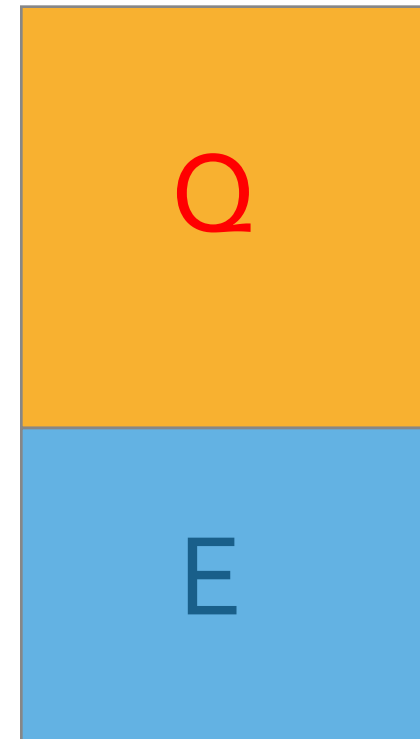
LowTEMP2.0

Metoda Energii – użyte paliwo oraz emisje GHG alokowane są dla ciepła oraz elektryczności w oparciu o energię zawartą w obu produktach:

Wskaźnik alokacji emisji GHG dla ciepła:

$$f_Q = Q / (Q + E)$$

Zaletą tej metody jest jej prostota i jednoznaczność. Wadą jest to, że nie uwzględnia ona jakości produktów, tj. nie bierze pod uwagę, że elektryczność może być łatwiej i z większą efektywnością przekształcona w ciepło niż odwrotnie.



Emisja GHG alokowana dla ciepła

Emisja GHG alokowana dla elektryczności

Generowane ciepło i energia



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

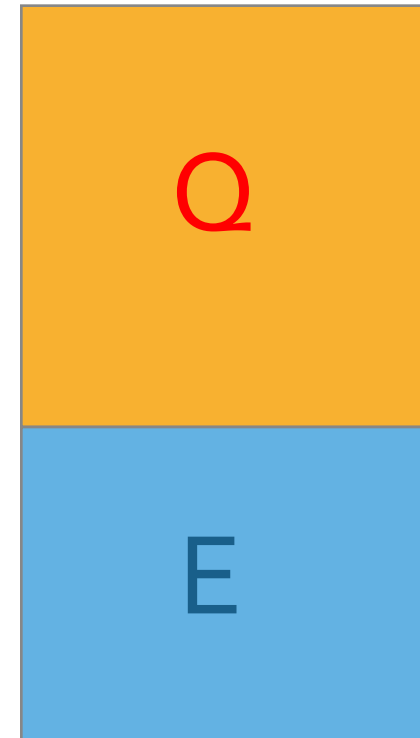
Metoda Generacji Alternatywnych



LowTEMP2.0

Metoda Generacji Alternatywnych znana również jako Efficiency Method lub Benefit Sharing Method (BSM) była zaproponowana przez fińską The Finnish District Heating Association. Metoda alokuje emisje GHG oraz paliwa dla generacji ciepła i elektryczności biorąc pod uwagę ilości paliwa, które są konieczne dla wygenerowania tej samej ilości ciepła i energii elektrycznej w przypadku ich oddzielnej produkcji. Alternatywna produkcja w oddzielnych jednostkach zależy od sprawności procesów $\eta_{alt_ciepło}$ i η_{alt_elektr} , stąd

$$f_Q = (Q/\eta_{alt_ciepło}) / (Q/\eta_{alt_ciepło} + E/\eta_{alt_elektr})$$



Emisja GHG
alokowana dla
ciepła

$$f_Q = (Q/\eta_{alt_heat}) / (Q/\eta_{alt_heat} + E/\eta_{alt_elec})$$

Emisja GHG
alokowana dla
elektryczności

$$f_E = 1 - f_Q$$

Wyprodukowane ciepło i energia



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metoda Bonusu Mocy



LowTEMP2.0

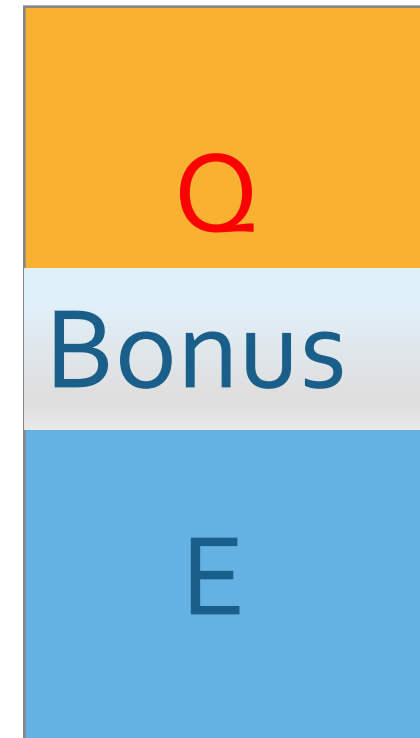
Metoda Bonusu Mocy to metoda często używana w UE dla alokacji emisji GHG dla ciepła i elektryczności. W metodzie tej ciepło jest głównym produktem, natomiast wyprodukowana energia elektryczna jest traktowana jako bonus.

Stąd Energia Pierwotna alokowana jest początkowo dla produkowanej w CHP elektryczności, i następnie odejmowana od całkowitej Energii Pierwotnej

$$f_Q = (E_{P,in} - W_{CHP} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$$

Q_{del} – ciepło dostarczone do odbiorców

E_{del} – wyprodukowana energia w CHP



Emisja GHG
alokowana dla
ciepła

$$\text{Bonus} = W_{CHP} f_{P,elt}$$

Emisja GHG
alokowana dla
energii

Wyprodukowane ciepło i energia



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metoda Egzergii (metoda najbardziej fizykalna) – paliwo jak i emisje GHG są alokowane dla ciepła i elektryczności w oparciu o egzergie obu produktów. Egzergia produktów jest miarą maksymalnej pracy użytecznej, która może być wykonana przez obydwa produkty. Stosunek energii oraz egzergii jest określana jako wskaźnik jakości.

Z punktu widzenia termodynamiki, wygenerowanej w CHP energii elektrycznej przyporządkowujemy współczynnik egzergii równy 1, stąd egzergia elektryczności jest definiowana jako $Ex_E = E$. Oznacza to, że 100% elektryczności może być przekształcone w jakikolwiek rodzaj energii (pracy).

Ciepło można zamienić na pracę/energię jedynie w pewnym stopniu, stąd egzergię ciepłą obliczamy jako:

$$Ex_Q = (1 - T_o/T) Q,$$

gdzie T_o – jest średnią temperaturą otoczenia w sezonie grzewczym a T – jest średnią termodynamiczną systemu ciepłowniczego

$$T = (T_s - T_r) / \ln (T_s/T_r)$$

$$f_Q = Ex_Q / (Ex_Q + Ex_E)$$



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metoda 200%

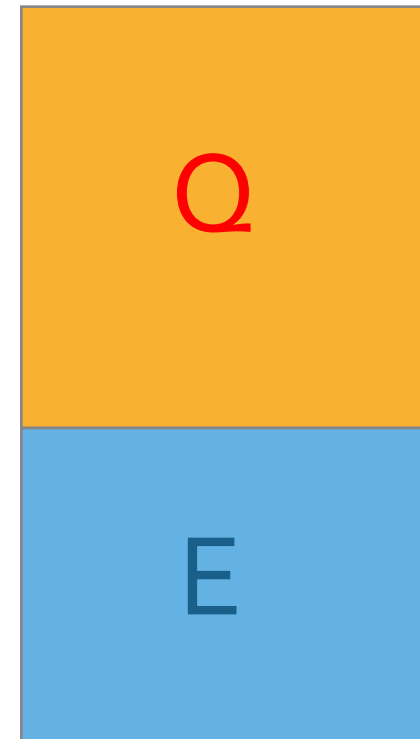


LowTEMP2.0

Metoda 200% – zakłada 200% efektywność dla produkcji ciepła. Oznacza to, że aby wyprodukować jednostkę ciepła trzeba użyć jedynie 0.5 jednostki paliwa, pozostała 0.5 jednostki będzie odzyskane w skraplaczu turbiny. Stąd połowę emisji związanej z produkcją jednostki ciepła można przyporządkować generacji elektryczności,

$$f_Q = Q / 2 \text{ Fuel}_{in}$$

Metoda, zaproponowana przez Danish Energy Agency, może być używana dla alokacji kosztów paliwa i emisji dla produkcji ciepła i energii w jednostce CHP.



Wyprodukowane ciepło i energia

Emisja GHG
alokowana dla
ciepła $Q/2$

Emisja GHG
alokowana dla
elektryczności



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metoda PAS 2050



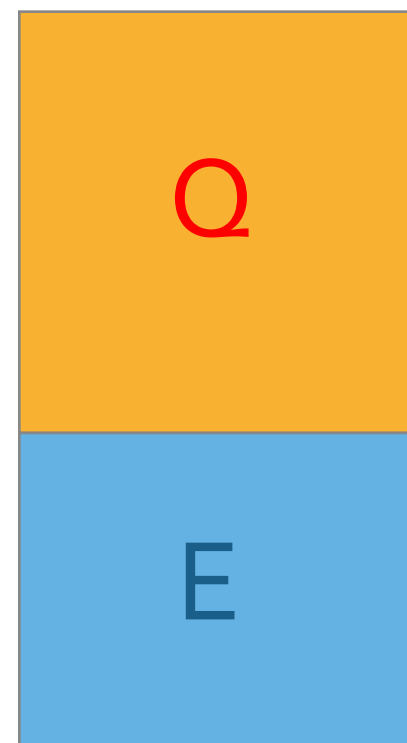
LowTEMP2.0

Metoda PAS 2050 jest standardem Brytyjskim, wykorzystywanym w obliczeniach emisji GHG dla produkcji dóbr i usług. Alokując emisje w systemach CHP dla wyprodukowanego ciepła i energii, wprowadza się współczynnik 'intensywności' - 'n'

$$f_Q = Q / (Q + n E)$$

Współczynnik ,n' różni się w różnych systemach:

- w przypadku CHP z kotłami wykorzystującymi węgiel, biomasę i inne paliwa stałe, $n = 2,5$;
- w układach z turbinami spalinowymi (na gaz naturalny, wysypiskowy) $n = 2.0$



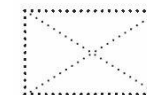
Emisja GHG
alokowana dla
ciepła

$$f_Q = Q / (Q + n E)$$

Emisja GHG
alokowana dla
energii

$$f_E = 1 - f_Q$$

Wyprodukowane ciepło i energia



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Metoda Drezdeńska



LowTEMP2.0

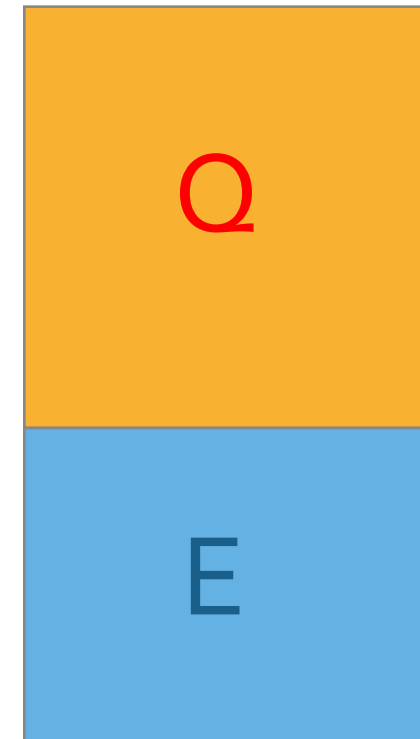
Metoda Drezdeńska opiera się również na pojęciu egzergii. W elektrowniach cała Energia Pierwotna jest poświęcona produkcji energii elektrycznej. W układzie CHP, część jest poświęcona produkcji ciepła.

Metoda Drezdeńska opisuje jak określić stratę energii elektrycznej spowodowaną produkcją ciepła (kondensacja pary) w jednostce CHP

$$\Delta E = Q \eta_c \nu_p,$$

gdzie η_c jest efektywnością Carnot'a a ν_p jest jakością procesu.

$$f_Q = \Delta E / E$$



Emisja GHG
alokowana dla
ciepła

$$f_Q = \Delta E / E$$

Emisja GHG
alokowana dla
energii

$$f_E = 1 - f_Q$$

Wyprodukowane ciepło i energia



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Współczynnik alokacji GHG dla produkcji ciepła

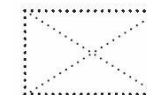


LowTEMP2.0

Wskaźnik alokacji emisji dla układu CHP produkujący energię 27 GWh rocznie i maksymalnym zapotrzebowaniu na ciepło 14 MW (Tereshenko i in. [2])

Metoda	Wskaźnik alokacji dla ciepła, f_Q	Wskaźnik alokacji, f_Q
Energii	$Q / (Q + E)$	0,2162
Generacji Alternatywnych	$(Q/\eta_{alt_ciepło}) / (Q/\eta_{alt_ciepło} + E/\eta_{alt_ele})$	0,3830
Bonusu mocy	$(E_{P,in} - W_{CHP} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$	0,2226
Egzergii	$EX_Q / (EX_Q + EX_E)$	0,1507
200%	$Q / 2 Fuel_{in}$	0,0608
PAS 2050	$Q / (Q + n E)$	0,1212
Drezdeńska	$\Delta E / E$	0,0834

Źródło: T. Tereshenko, [2]



(optional)
Partner
Logo

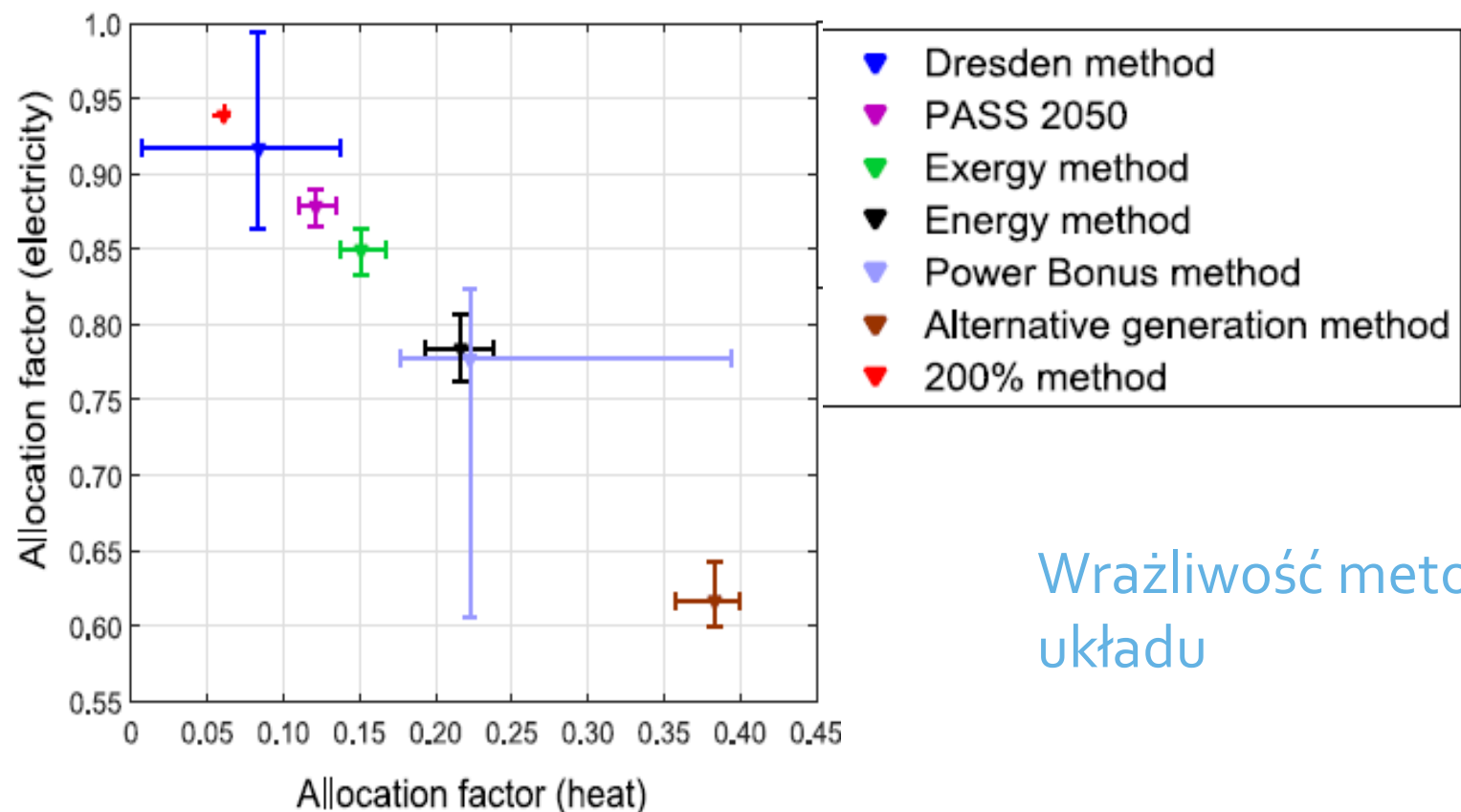


EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Analiza wrażliwości metod alokacji emisji GHG



LowTEMP2.0



Wrażliwość metody zależy od badanego układu

Rys. 7. Analiza wrażliwości metod alokacji emisji GHG . Źródło: T.Tereshenko I in..[2]



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Partnerzy projektu LowTEMP ocenili metody alokacji emisji GHG wykorzystując **analizę multykryterialną (AN)** w oparciu o 9 kryteriów z 4 grup:

- popularność (prostota, obszar zastosowań, poprawność i akceptacja)
- fizykarność (poprawność procedury alokacji emisji GHG, zgodność z termodynamiką, uwzględniająca sprawność systemów CHP, egzergetyczność),
- dostępność danych wejściowych,
- wrażliwość.

Waga kryteriów a następnie same metody poły poddane ewaluacji przez 7 Partnerów projektu BSR LowTEMP: AGFW, ZEBAU, BTU, RTU, IMP PAN, Thermopolis and HEM z 5 krajów BSR (Finlandii, Łotwy, Niemiec, Polski i Szwecji).

Kryteria AN

- **prostota,**
- **obszar zastosowań,**
- **poprawność i akceptacja)**
- **poprawność procedury alokacji emisji GHG,**
- **zgodność z termodynamiką,**
- **uwzględniająca sprawność systemów CHP,**
- **egzergetyczność,**
- **dostępność danych wejściowych,**
- **wrażliwość.**



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Rekomendacje Partnerów projektu LowTemp

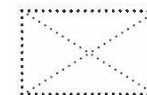


LowTEMP2.0

Partnerzy spośród badanych metod alokacji emisji GHG najwyżej ocenili metodę Exergii (Carnota). Dwie inne metody: **PAS 2050** and **200%** powinny być brane pod uwagę jako metody alternatywne – oceniono je podobnie.

Metoda Egzergii jest najbliższa wymaganiom termodynamiki bierze pod uwagę jakość energii i określa górną granicę dla alokacji emisji produkowanemu ciepłu. Wariantem tej metody jest Metoda Drezdeńska – jednak wymaga ona większej ilości trudno dostępnych danych oraz bardziej złożonych obliczeń.

Metody Generacji Alternatywnych oraz Bonusu Mocy uznano za najmniej adekwatne dla określenia alokacji emisji.

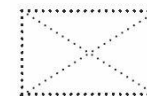


(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

- [1] Wallisch A; van Stralen C; Hellmers C; Piel E; Ernst H; Spadoni L; Blechingberg M; Wirgentius N, ECOHEATCOOL, Work package 3, Guidelines for assessing, the efficiency of district heating and district cooling systems, 2006 <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20758197>
- [2] Tereshenko T, Nord N, Uncertainty of the allocation factors of heat and electricity production of combined cycle power plant, Applied Thermal Engineering 2015; 76:410-422. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.019>
- [3] IPCC, Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. (2007). See also https://www.leg.mn.gov/docs/2015/other/150681/PFEISref_2/Solomon%20et%20al.%202007.pdf
- [4] EPA, Greenhouse Gas Emissions, <https://www.epa.gov/ghgemissions/>
- [5] WRI/WBCSD, Allocation of GHG Emissions from a Combined Heat and Power (CHP) Plant Guide to calculation worksheets (September 2006) v1.0 A WRI/WBCSD GHG Protocol Initiative calculation tool; https://indiaghgp.org/sites/default/files/CHP_guidance_v1.0_4.pdf
- [6] Harmelink M, Bosselaar L, Assessment of CO₂ emissions of electricity and heat used at industrial plants, ECEEE, Industrial Summer Study, June 4, 2014 https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2014/3-matching-policies-and-drivers-policies-and-directives-to-drive-industrial-efficiency/assessment-of-co2-emissions-of-electricity-and-heat-used-at-industrial-plants/
- [7] Olsson L, Wetterlund E, Söderström M, Assessing the climate impact of district heating systems with combined heat and power production and industrial excess heat; Resources, Conservation and Recycling, 2015; 86:31-39. DOI:[10.1016/j.resconrec.2015.01.006](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.01.006)
- [8] Esser A, Sensfuss F, Evaluation of primary energy factor calculation options for electricity, Final Report, Multiple Framework Service Contract ENER/C3/2013-484. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_pef_eed.pdf
- [9] Rosen MA, Allocating carbon dioxide emissions from cogeneration systems: descriptions of selected output-based methods, Journal of Cleaner Production 2008; 16:171-177. DOI : [10.1016/j.jclepro.2006.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.025)
- [10] Dittmann A, Sander T, Robbi S, Allocation of CO₂-Emissions to Power and Heat from CHP-Plants, Technische Universität Dresden, Dresden. https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/ressourcen/dateien/veroefftlg/alloc_co2?lang=en



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND



LowTEMP2.0

Contact

Instytut Maszyn Przepływowych PAN

Adam Ceniań
Profesor



ul. Fiszera 14
80-231 Gdańsk
Poland

E-mail: cenian@imp.gda.pl

Tel: +48 58 699 52 76

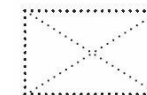
www.imp.gda.pl

www.lowtemp.eu



Grażyna Rabczuk
rabczuk@imp.gda.pl

Jarosław Losiński
jlosinski@imp.gda.pl



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND

Dziękuję za uwagę



LowTEMP2.0



Figure 3: XXXXXXXXX, © Photographer, Organisation (depending on type of copyright)



(optional)
Partner
Logo



EUROPEAN
REGIONAL
DEVELOPMENT
FUND