Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego | Rzeczpospolita Polska | Dofinansowane przez Unię Europejską

Politechnika Świętokrzyska
Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej

Kierunek studiów:
Odnawialne Źródła Energii

Hanna Koshlak

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Układy kogeneracyjne zasilane z OZE

opracowane w ramach realizacji Projektu
„**Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki**”
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025

Spis treści

1. Wstęp 2
2. Układy kogeneracyjne zasilane odnawialnymi źródłami energii 2
3. Klasyfikacja układów kogeneracyjnych zasilanych z OZE 6
3.1. Klasyfikacja według jednostek kogeneracyjnych 6
3.2. Klasyfikacja według źródła energii odnawialnej 14
3.3. Klasyfikacja w zależności od mocy 20
4. Kogeneracja w układzie kombinowanym: podstawy teoretyczne i obliczenia termodynamiczne 21
5. Przykładowe indywidualne zadanie obliczeniowe. Analiza teoretycznego obiegu termodynamicznego 29
6. Spis literatury 30

Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Wstęp

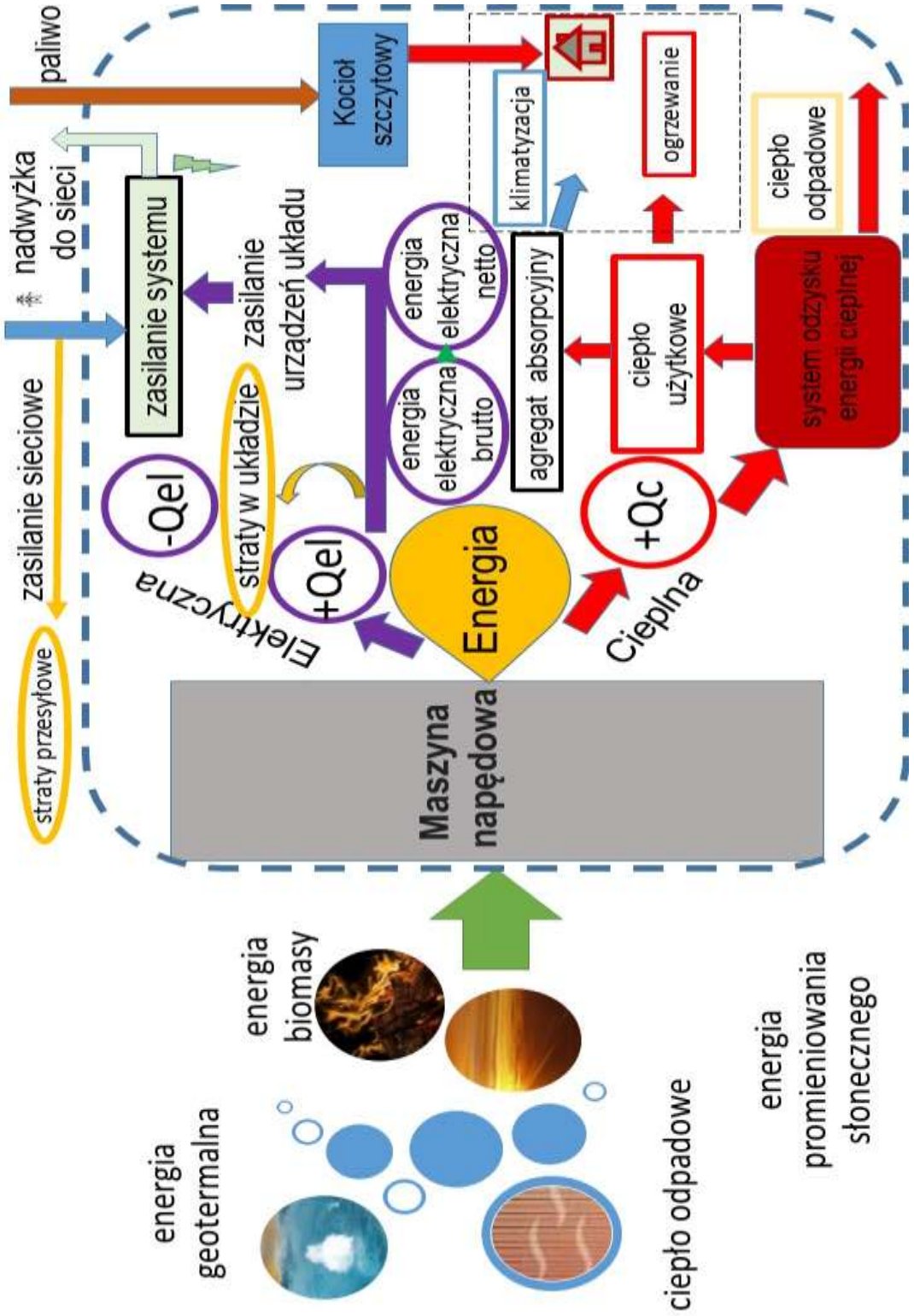
Współczesna energetyka stoi przed złożonymi wyzwaniami, takimi jak rosnące zapotrzebowanie na energię, konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz dążenie do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego. W odpowiedzi na te wyzwania, poszukiwane są innowacyjne i efektywne rozwiązania. Jednym z nich jest kogeneracja, czyli skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i cieplnej (ang. Combined Heat and Power, CHP), które znacząco podnosi sprawność energetyczną w porównaniu do oddzielnej produkcji energii.
Tradycyjne systemy kogeneracyjne, bazujące na paliwach kopalnych, budzą jednak kontrowersje ekologiczne. Z tego względu na znaczeniu zyskują instalacje zasilane odnawialnymi źródłami energii (OZE). Z tego względu instalacje zasilane odnawialnymi źródłami energii stają się obiecującym kierunkiem rozwoju w energetyce. Integracja OZE z układami kogeneracyjnymi to złożony proces, który wymaga starannego doboru technologii i konfiguracji systemu. Do głównych odnawialnych źródeł energii wykorzystywanych w technologii kogeneracji należą biomasa (w tym odpady rolnicze i leśne), biogaz (powstający w procesie fermentacji metanowej), energia słoneczna (poprzez kolektory słoneczne lub koncentratory) oraz energia geotermalna. Każde z tych źródeł charakteryzuje się odmiennymi właściwościami i wymaga zastosowania specyficznych technologii konwersji, takich jak silniki spalinowe, mikroturbiny, układy ORC (Organic Rankine Cycle) albo turbiny parowe.

2. Układy kogeneracyjne zasilane odnawialnymi źródłami energii

Kogeneracja, określana również jako (ang. Combined Heat and Power) - skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w jednym procesie technologicznym. W odróżnieniu od konwencjonalnych elektrowni, których celem jest wyłącznie wytwarzanie energii elektrycznej, układy kogeneracyjne dążą do maksymalnego odzysku i użycia energii cieplnej, która w tradycyjnych systemach jest bezpowrotnie tracona. Na przykład, elektrownia węglowa przekształca zaledwie około 40% mocy paliwa w użyteczną energię elektryczną, co oznacza, że pozostałe 60% energii jest rozpraszane do otoczenia jako ciepło odpadowe (Ronelly De Souza, 2021). Idea kogeneracji opiera się na odzyskaniu tej niewykorzystanej energii cieplnej i jej przekierowaniu do praktycznych zastosowań, takich jak ogrzewanie wody użytkowej, miejskich systemów ciepłowniczych, czy zasilanie procesów przemysłowych.

Wdrożenie systemów kogeneracyjnych zasilanych odnawialnymi źródłami energii wnosi szereg strategicznych korzyści, które wykraczają poza proste zwiększenie efektywności. Podstawową i najbardziej wymierną zaletą kogeneracji jest znaczne podniesienie sprawności ogólnej systemu. Podczas gdy konwencjonalne metody, w których ciepło i prąd są wytwarzane oddzielnie, osiągają łączną sprawność na poziomie około 56%, układy kogeneracyjne mogą pochwalić się sprawnością całkowitą sięgającą nawet 85-90%. Taka przewaga wynika z faktu, że systemy CHP zużywają znacznie mniej paliwa do wytworzenia tej samej ilości energii, co przekłada się bezpośrednio na oszczędności finansowe oraz redukcję kosztów operacyjnych. Rzeczywista wydajność poszczególnych systemów CHP może być obliczona na podstawie bilansu energii wejściowej i wyjściowej w układzie kogeneracyjnym. W kontekście transformacji energetycznej, wykorzystanie OZE w kogeneracji przynosi znaczące korzyści środowiskowe. Wyższa sprawność energetyczna prowadzi do mniejszego zużycia paliwa, co bezpośrednio przekłada się na redukcję emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń powietrza. Układy kogeneracyjne zasilane OZE są uznawane za strategiczną technologię w procesie dekarbonizacji i optymalizacji całego systemu energetycznego. Takie rozwiązanie pozwala na znaczne ograniczenie strat energii, które są nieodłącznym elementem tradycyjnego scentralizowanego modelu energetyki, zwłaszcza w obszarach wytwarzania, przesyłu i dystrybucji energii.
Schemat blokowy przykładowego układu kogeneracyjnego wspomaganego tradycyjnym systemem energetycznym został zamieszczony na rys.1.
[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydowy system energetyczny, który wykorzystuje różne źródła energii do produkcji energii elektrycznej i cieplnej. Rysunek jest otoczony niebieską, przerywaną linią, która wyznacza granice systemu i składa się z kilku module połączonych strzałkami, które symbolizują przepływ energii. W lewej części schematu, widoczne są różne źródła energii pierwotnej. Należą do nich: energia geotermalna (jasnoniebieskie koło), ciepło odpadowe (brązowe koło), energia biomasy (pomarańczowe koło), energia promieniowania słonecznego (żółte koło). Zielona strzałka prowadzi od tych źródeł do dużego, szarego prostokąta z napisem "Maszyna napędowa" w której odbywa się przekształcenie energii pierwotnej. Od szarego prostokąta odchodzą dwie grube strzałki, prowadzące do dużego, centralnego, żółtego koła oznaczonego jako "Energia". Z żółtego koła odchodzą dwa główne obiegi energetyczne. Pierwszy z nich, obieg elektryczny, jest oznaczony fioletowymi strzałkami. Wewnątrz obiegu elektrycznego, strzałka "straty w układzie" (żółta) pokazuje straty, a fioletowe strzałki "energia elektryczna brutto" i "energia elektryczna netto" prowadzą do czarnego prostokąta w kolorze zielonym z napisem "zasilanie systemu". Dodatkowo, system może być zasilany z zewnętrznej sieci energetycznej, co symbolizuje gruba,

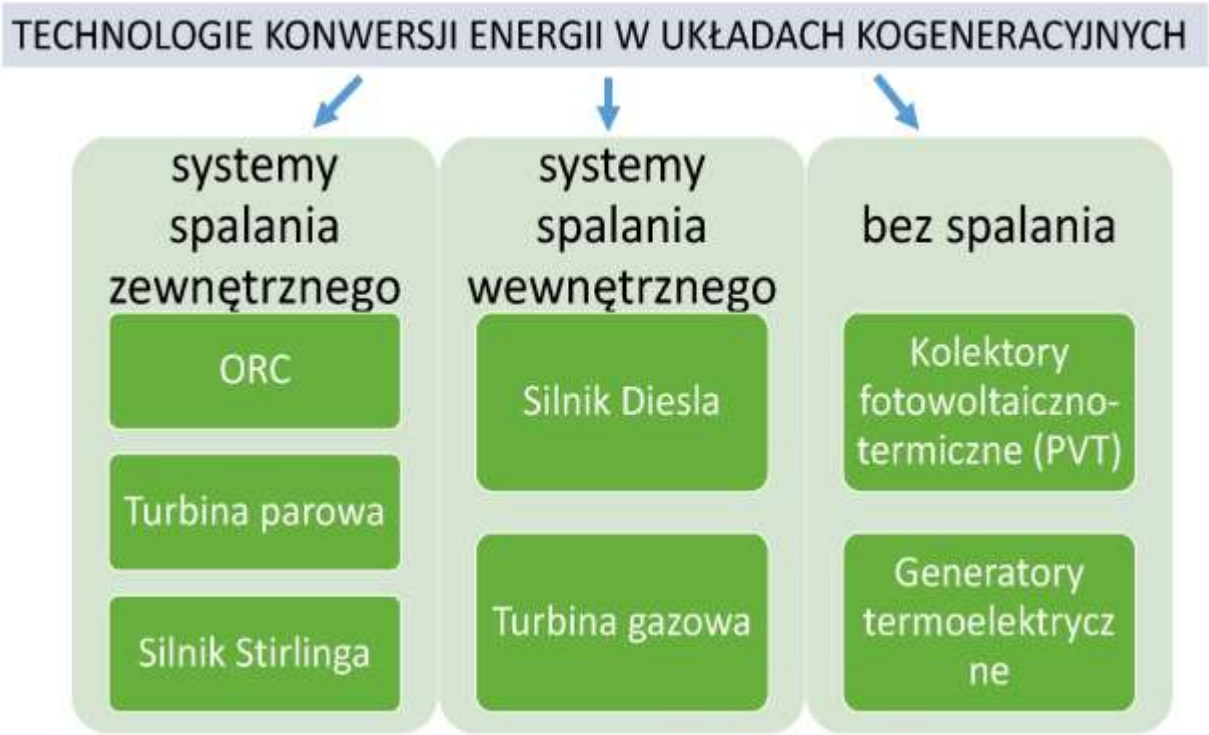
niebieska strzałka z napisem "zasilanie sieciowe" skierowana do systemu oznaczonego niebieską, przerywaną linią. Nadmiar energii może być przekazywany do sieci zewnętrznej za pomocą zielonej strzałki od modułu "zasilanie systemu" do modułu z napisem "nadwyżka do sieci". U góry od niebieskiej strzałki "zasilanie sieciowe" została zamieszczona strzałka "straty przesyłowe" w żółtym kolorze. Obieg cieplny symbolizują czerwone strzałki, prowadzące od koła żółtego oznaczonego jako "Energia" do koła czerwonego "+Qc" i dalej do czerwonego prostokąta "ciepło użytkowe". Ciepło użytkowe (czerwone strzałki) zasila ogrzewanie (czerwony prostokąt z symbolem domu) oraz klimatyzację (niebieski prostokąt). Na samym dole znajduje się "system odzysku energii cieplnej" (czerwony prostokąt), który zbiera "ciepło odpadowe" (czerwone strzałki) z obiegu i przetwarza je na ciepło użytkowe. W systemie występuje również "Kocioł szczytowy" (czerwony prostokąt), który jest zasilany paliwem (brązowa strzałka) i wspomaga system ogrzewania].



Rys. 1. Przepływ energii w układzie CHP wspomaganego tradycyjnym systemem energetycznym.

3. Klasyfikacja układów kogeneracyjnych zasilanych z OZE

Urządzenia do konwersji energii w instalacjach kogeneracyjnych można podzielić na trzy główne kategorie, przedstawione na rys. 2.
[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia trzy główne kategorie technologii konwersji energii w układach kogeneracyjnych. Pierwsza kategoria, systemy spalania zewnętrznego, zawiera technologie takie jak Organiczny obieg Rankine'a (ORC), turbinę parową i silnik Stirlinga. Druga kategoria to systemy spalania wewnętrznego, które obejmują silnik Diesla i turbinę gazową. Trzecia kategoria, bez spalania, czyli kolektory fotowoltaiczno-termiczne (PVT) oraz generatory termoelektryczne. Wszystkie te kategorie tworzą podział technologii stosowanych w kogeneracji].



Rys. 2. Technologie konwersji w układach kogeneracyjnych.

3.1. Klasyfikacja według jednostek kogeneracyjnych

Systemy kogeneracyjne zasilane OZE można klasyfikować na podstawie maszyny napędowej. Maszyna napędowa (ang. prime mover) to jednostka w której odbywa się przekształcenie energii w pracę mechaniczną. W zależności od technologii wyróżnia się kilka typów takich jednostek.
1. Silniki spalinowe.

W małej energetyce rozproszonej, silniki spalinowe stanowią kluczowy element układów kogeneracyjnych. Agregaty prądotwórcze, oparte na tych silnikach i wyposażone w moduł odzysku ciepła, stanowią rdzeń nowoczesnych instalacji, ściśle powiązanych z systemami produkcji paliw z biomasy, takimi jak biogazownie i biorafinerie. Dzięki odpowiednim układom zasilania i automatyce zapłonu, silniki spalinowe mogą spalać różnorodne paliwa, zarówno gazowe, jak i ciekłe, w tym również o niższej wartości opałowej, pochodzące z odnawialnych źródeł energii. Do tego typu paliw należą między innymi: biogaz z fermentacji beztlenowej, gaz syntezowy otrzymywany w procesie zgazowania pirolitycznego, produkty fermentacji alkoholowej i pirolizy, produkty palne z procesu estryfikacji tłuszczów zwierzęcych.
W układach kogeneracyjnych w małej skali najczęściej stosuje się dwa główne typy silników spalinowych: silniki gazowe i Diesla. Jest to jedno z najpopularniejszych rozwiązań w mniejszych instalacjach, szczególnie w instalacjach o mocy do 1 MW.
Silniki gazowe mogą być zasilane gazem ziemnym, biogazem, gazem wysypiskowym lub gazem kopalnym. Charakteryzują się wysoką sprawnością elektryczną i cieplną oraz niską emisją zanieczyszczeń. Układy kogeneracyjne oparte na silnikach Diesla są zasilane głównie olejem napędowym, ale nowoczesne jednostki mogą pracować także na biopaliwach.

2. Silnik Stirlinga.

Silnik Stirlinga jest maszyną cieplną, która działa na zasadzie cyklicznego sprężania i rozprężania stałej ilości gazu roboczego (np. helu, wodoru, azotu lub powietrza) w zamkniętym obiegu. Proces ten jest napędzany różnicą temperatur między dwoma źródłami ciepła – gorącym i zimnym. Podstawowa konstrukcja składa się z dwóch cylindrów (ciepłego i zimnego) oraz dwóch tłoków: tłoka roboczego, który wykonuje pracę, i tłoka rozprężającego, który służy do przemieszczania gazu między zimną i gorącą częścią silnika.
Silniki Stirlinga można klasyfikować w zależności od układu cylindrów i tłoków oraz od tego w jaki sposób ruch tłoka jest zamieniany na energię użyteczną.
Zależnie od fizycznego układu cylindrów i tłoków, silniki Stirlinga dzielą się na trzy główne typy konstrukcyjne: alfa, beta i gamma. Typ Alfa jest rozwiązaniem konstrukcyjnym z dwoma niezależnymi cylindrami: gorącym i zimnym. W każdym cylindrze znajduje się oddzielny tłok roboczy. Cylindry są połączone przewodem, przez który gaz roboczy przepływa między przestrzenią gorącą a zimną. Aby zapewnić prawidłowe działanie, tłok w przestrzeni gorącej musi wyprzedzać fazowo tłok w przestrzeni zimnej o kąt od 85° do 120°, optymalnie około 90°. Konfiguracja ta charakteryzuje się najwyższą efektywnością, co wynika z najmniejszej liczby procesów nieodwracalnych i minimalizacji tzw. przestrzeni szkodliwej. Jej główną wadą jest jednak konieczność precyzyjnego uszczelnienia obu tłoków, co jest technicznie i materiałowo trudne. Typ Beta to oryginalna konstrukcja Stirlinga, w

której oba tłoki – roboczy i wyporowy – poruszają się współosiowo w jednym cylindrze. Tłok roboczy jest szczelny, podczas gdy tłok wyporowy odpowiada za przemieszczanie czynnika roboczego pomiędzy gorącą a zimną częścią cylindra. Prostsze uszczelnienie w porównaniu do typu Alfa jest jedną z zalet tej konfiguracji, co sprawia, że jest ona często stosowana w urządzeniach chłodniczych. Typ Gamma jest najprostszą i często spotykaną w modelach konstrukcją. Posiada dwa oddzielne cylindry: jeden z tłokiem roboczym i drugi z tłokiem wyporowym, ale nie są one ustawione osiowo. Cylindry są połączone, co umożliwia cykliczny przepływ gazu. Poniższa tabela przedstawia ich kluczowe cechy konstrukcyjne, porównując liczbę cylindrów i tłoków, układ osi oraz wynikające z tego zalety i wady (tab.1).

Tabela 1. Rodzaje silników Stirlinga

Typ silnika	**Liczba cylindrów**	**Liczba tłoków**	**Układ osi**	**Zalety**	**Wady**
alfa	2 (gorący i zimny)	2 (robocze)	równoległy, niezależny	najwyższa sprawność, minimalna przestrzeń szkodliwa	trudne uszczelnienie obu tłoków
beta	1	2 (roboczy i wyporowy)	współosiowy	prostsze uszczelnienie	złożoność mechanizmu, większa przestrzeń szkodliwa
gamma	2	2 (roboczy i wyporowy)	oddzielne, nieosiowe	najprostsza konstrukcja, łatwe w budowie	mniejsza sprawność niż u alfa

Systemy mikro-kogeneracji oparte na silnikach Stirlinga występują głównie w dwóch typach: kinematycznym lub z wolnym tłokiem (ang. free-piston). Silnik z wolnym tłokiem jest pozbawiony wału korbowego oraz mechanicznych połączeń między tłokami a generatorem. Ruch posuwisto-zwrotny tłoka jest w pełni swobodny, a wytwarzana w ten sposób energia kinetyczna jest bezpośrednio konwertowana na energię elektryczną. Tłok jest zazwyczaj zintegrowany z liniowym generatorem prądu, co wiąże się z wysoką niezawodność i niskimi koszty eksploatacji. Dzięki swojej unikalnej konstrukcji, silnik Stirlinga może być zasilany praktycznie dowolnym źródłem ciepła. To jest kluczowa zaleta, która odróżnia go od tradycyjnych silników cieplnych i umożliwia jego integrację z systemami wykorzystującymi odnawialne źródła energii (OZE): energię słoneczną, biomasę czy biogaz.
Jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju silników Stirlinga jest ich integracja z systemami skoncentrowanej energii słonecznej (np. systemy typu Dish-Stirling) (Klepp, 2025). System Dish-Stirling składa się ze zwierciadeł parabolicznych,

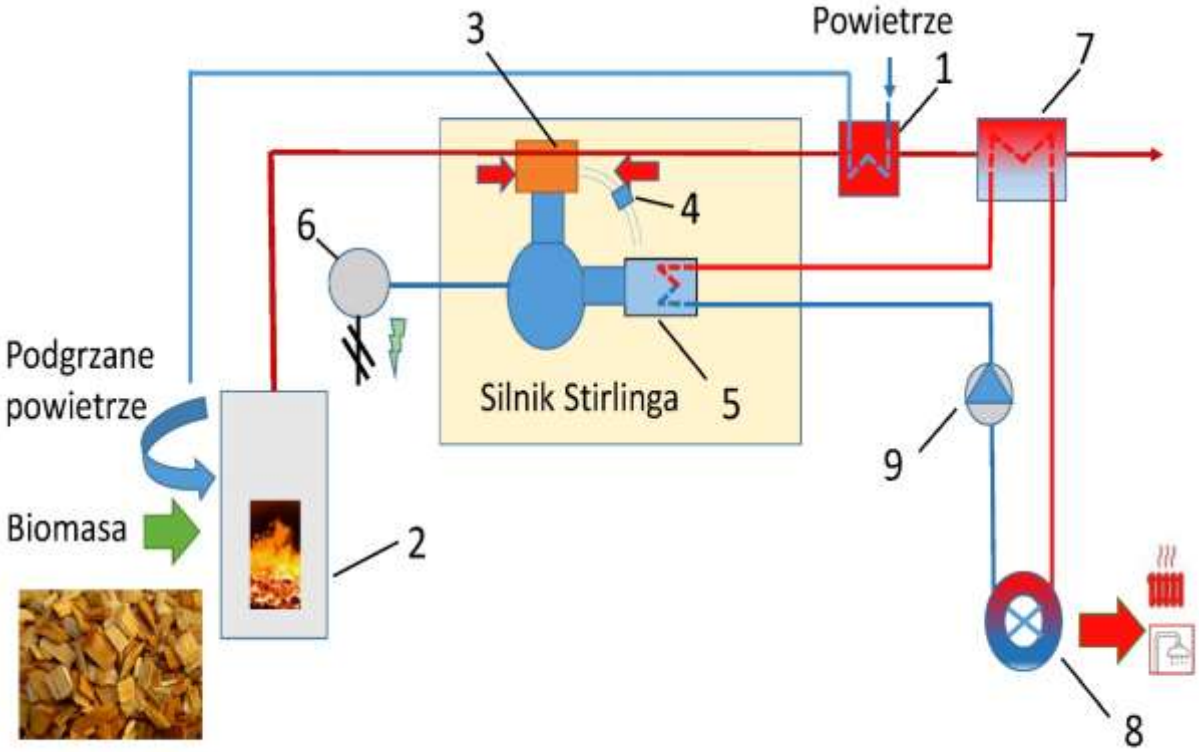
zazwyczaj wyposażonych w dwuosiowy tracker słoneczny (system nadążny), wymiennika ciepła i silnika Stirlinga. W tym systemie, za pomocą zwierciadeł parabolicznych energia promieniowania słonecznego jest kierowana na głowicę silnika Stirlinga. Wysoka temperatura na głowicy powoduje rozprężanie się czynnika roboczego, co wprawia w ruch tłoki i generuje pracę mechaniczną. Ze względu na fakt, że silnik Stirlinga cechuje się wysoką sprawnością przy dużych różnicach temperatur, a także może działać w obiegu zamkniętym bez strat czynnika roboczego, stanowi on doskonałe rozwiązanie dla systemów solarnych, szczególnie dla rejonów z wysokim stężeniem promieniowania słonecznego. Przykładem komercyjnego wdrożenia takiego rozwiązania jest nieistniejąca już elektrownia słoneczna Maricopa, która wykorzystywała systemy SunCatcher™ (Wilson, 2010). Silniki Stirlinga charakteryzują się szerokim zakresem mocy, od kilku watów do ponad 1 MW. W układach kogeneracyjnych, przeznaczonych dla budownictwa mieszkalnego, dominują jednostki w segmencie mikro-CHP (o mocy elektrycznej poniżej 3 kW). Komercyjne przykłady obejmują jednostki o mocy elektrycznej 1 kW (firmy Viessmann, Ecogen), 3 kW (Disenco) lub w zakresie od 2 do 9 kW (Cleanergy). W tabeli 2 zamieszczone wybrane komercyjnie systemy kogeneracyjne oparte na silnikach Stirlinga, w których paliwem jest biomasa.

Tabela 2. Charakterystyka wybranych technologii kogeneracji (Zhu, 2021)

Producent / Model	**Rodzaj silnika**	**Paliwo**	**Gaz roboczy**	**Silnik elektryczny (kWh)**	**Moc cieplna (kWth)**	**Sprawność elektr. (%)**	**Sprawność całkowita (%)**
Stirling Biopower/Qalovis FleXgen G38	4-cylindrowy kinematyczny	zrębki drzewne, pellety drzewne	H_2	38	65	29	78
Stirling Dania	kinematyczny typu beta	biomasa	He	75	475	12	86
Stirling Dania	kinematyczny typu beta	biomasa	He	31	272	9.2	90
Maszyna słoneczna	kinematyczny typu alfa	pellety drzewne	N_2	3.0	10.5	20.0	90.0
Genoastirling Srl/Cardozo	kinematyczny typu gamma	pellety drzewne	N_2	0.489	15	2.3	72

Rysunek 3 przedstawia schemat układu kogeneracyjnego małej mocy z silnikiem Stirlinga typu alfa zasilanego ciepłem uzyskanym ze spalania biomasy (np. (pellety, zrębki lub trociny).

[Tekst alternatywny. W lewej dolnej części rysunku znajduje się kocioł na biomasę 2 do którego skierowane dwie strzałki: zielona strzałka symbolizuję „Biomasa", niebieska zaokrągla strzałka symbolizuję „Podgrzane powietrze". Centralnym elementem układu jest silnik Stirlinga, umieszczony w jasnożółtym polu. Posiada on dwie kluczowe części: głowicę gorącą 3 w kolorze pomarańczowym, która jest ogrzewana produktami spalania biomasy oraz głowicę zimną 5 w kolorze jasnoniebieskim. Zamieszczony obok silnika, generator 6, reprezentowany przez szare koło z piorunami, przekształca ruch silnika w energię elektryczną. W prawym górnym rogu rysunku znajdują się wymienniki ciepła 1 i 7 w kolorze czerwonym, pełnią one funkcję odzyskiwania ciepła. Ciepło odzyskane z wymienników jest oznaczone czerwoną linią i skierowane do wymiennika ciepła 8 (odbiór ciepła na cele grzewcze). Układ jest wspomagany przez pompę obiegową 9, która jest oznaczona jasnoniebieskim trójkątem i znajduje się w prawej części schematu].



Rys. 3. Schemat działania silnika Stirlinga zasilanego biomasą w układzie kogeneracyjnym: 1 – wymiennik ciepła powietrze-spaliny; 2 – kocioł na biomasę; 3 – głowica cylindra gorącego (część gorąca); 4 – regenerator; 5 – głowica cylindra zimnego; 6 – generator energii elektrycznej; 7 – ekonomizer (wymiennik ciepła); 8 – wymiennik ciepła; 9 – pompa obiegowa.

W celu zwiększenia sprawności elektrycznej układu, powietrze niezbędne do spalania jest wstępnie podgrzewane do temperatury ok. 550°C przez podgrzewacz powietrza 1. Wytwarzanie energii cieplnej odbywa się w automatycznym kotle 2 , gdzie panuje wysoka temperatura, sięgająca 1300°C. Uzyskane spaliny o bardzo wysokiej temperaturze są kierowane do zewnętrznego wymiennika ciepła – podgrzewacza 3. W podgrzewaczu, który stanowi „gorącą część" silnika Stirlinga, energia cieplna ze spalin jest przekazywana do gazu roboczego (helu), który ulega rozprężaniu pod ciśnieniem średnim do 4,5 MPa i napędza tłok silnika. Ruch tłoka jest sprzężony z generatorem 6, w którym odbywa się przekształcenie energii mechaniczna na energię elektryczną. W celu zwiększenia ogólnej sprawności instalacji, system jest wyposażony w układy odzysku ciepła. Ciepło odpadowe ze spalin jest odzyskiwane w ekonomizerze 7 oraz w wymienniku 1. Dodatkowo, ciepło z chłodzenia zimnej części silnika jest odzyskiwane i przekazywane do wymiennika ciepła 8, a stąd na zasilanie sieci ciepłowniczej. Regenerator 4 znajduje się w silniku Stirlinga pomiędzy jego gorącą 3 a zimną częścią 5. Sprawność elektryczna takiego układu może wynosić około 12% – 15% przy nominalnej mocy elektrycznej rzędu 35 kW.

3. Turbina parowa przeciwprężna i silnik parowy.

W układach wykorzystujących turbinę parową przeciwprężną lub silnik parowy, energia pierwotna z biomasy lub innych odnawialnych źródeł energii przekształca się na ciepło w formie pary o wysokim ciśnieniu i temperaturze. Zaletą tego rozwiązania jest „przeciwprężne działanie". W przeciwieństwie do konwencjonalnych elektrowni, para opuszczająca maszynę nie jest całkowicie rozprężana do ciśnienia skraplania. Zamiast tego, jej parametry są wciąż wystarczająco wysokie, by mogła zostać wykorzystana do celów grzewczych. Dzięki temu, ciepło, które nie zostało zamienione na energię elektryczną, jest efektywnie odzyskiwane i używane w postaci gorącej wody lub pary technologicznej. Sprawność całkowitą układu może przekraczając 90%.

4. Turbina gazowa i mikro turbina.

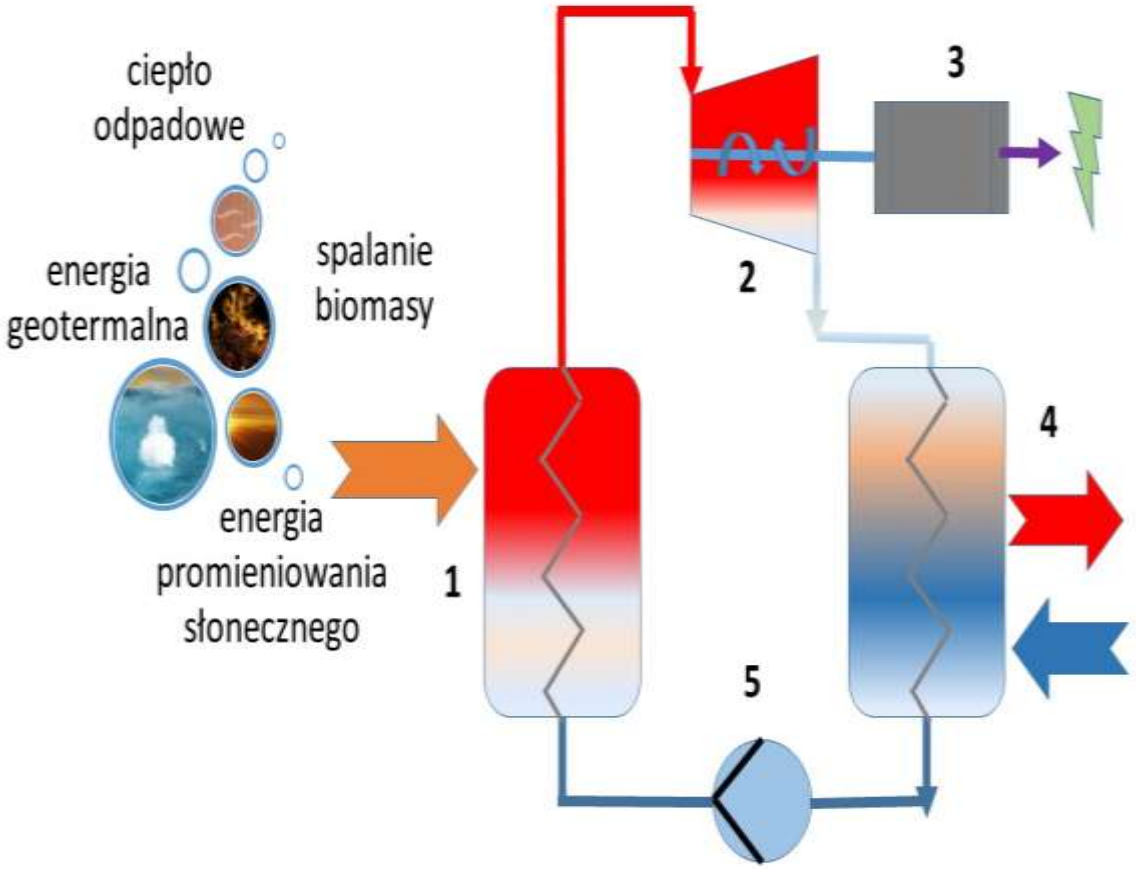
Turbiny gazowe są często stosowane w instalacjach kogeneracyjnych o mocy powyżej 1 MW. Wykorzystują proces spalania gazu (w tym biogazu), a powstałe spaliny napędzają turbinę. Ich zastosowanie, podobnie jak w przypadku turbin parowych, jest zdeterminowane przez skalę projektu.

5. Turbina w układzie ORC (ang. Organic Rankine cycle).

Organiczny obieg Rankine'a (ORC) jest modyfikacją tradycyjnego obiegu Rankine'a, w którym zamiast wody jako czynnika roboczego używa się organicznego płynu o wysokiej masie cząsteczkowej i niższej temperaturze parowania. Takie rozwiązanie umożliwia efektywne wykorzystanie niskotemperaturowych źródeł ciepła, takich jak ciepło odpadowe, energia geotermalna czy energia słoneczna. Podstawowy obieg

ORC składa się z następujących głównych komponentów parowacza, turbiny parowej lub silnika tłokowego, generatora, skraplacza i pompy. Ciepło wytwarzane w procesie spalania albo pozyskiwane z zewnętrznego źródła ciepła (np. ciepło odpadowe, geotermia) jest przekazywane do parownika poprzez obieg nośnika ciepła (olej termiczny lub woda). W parowniku płyn roboczy absorbuje energię z zewnętrznego źródła ciepła. W wyniku tego procesu płyn odparowuje i przechodzi w stan gazowy o wysokim ciśnieniu i temperaturze. Następnie gaz roboczy pod wysokim ciśnieniem jest skierowany do turbiny lub silnika tłokowego, gdzie ulega rozprężeniu. Rozprężenie czynnika roboczego powoduje obrót wału turbiny parowej i generację energii mechanicznej, która jest następnie przekazywana do generatora. Po opuszczeniu turbiny parowej, czynnik roboczy o niższym ciśnieniu i temperaturze przepływa przez skraplacz i przechodzi do stanu skupienia ciekłego. Skroplony płyn roboczy jest następnie przetłaczany przez pompę, która podnosi jego ciśnienie do wartości wymaganej w parowniku. Dzięki temu proces może być kontynuowany w obiegu zamkniętym. Schemat podstawowego obiegu ORC przedstawiono na rys. 4.
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia schemat działania Organicznego obiegu Rankine'a. W lewej części schematu znajdują się cztery piktogramy symbolizujące różne źródła zasilania: "ciepło odpadowe"; "energia geotermalna"; "spalanie biomasy"; "energia promieniowania słonecznego". Strzałka w kolorze pomarańczowym prowadzi od tych źródeł do parownika, oznaczonego cyfrą 1, co symbolizuje przekazywanie ciepła. W parowniku ciepło z zewnętrznego źródła jest przekazywane do płynu roboczego, który odparowuje. Następnie, płyn roboczy, oznaczony czerwonym kolorem, przepływa do turbiny parowej 2. W turbinie parowej energia wewnętrzna czynnika roboczego zamieniana jest na energię kinetyczną, następnie za pomocą łopatek turbiny energia kinetyczna zamieniana jest na energię mechaniczną. Turbina parowa jest połączona wałem z generatorem 3. Generator pobiera energię mechaniczną z wału i przetwarza ją na energię elektryczną. W skraplacze, oznaczonym cyfrą 4, czynnik roboczy oddaje ciepło i zmienia stan skupienia z gazowego na ciekły. Skroplony czynnik roboczy, symbolizowany przez niebieską linię, przepływa do pompy obiegowej, która została umieszczona na dole schematu i oznaczona cyfrą 5. Pompa obiegowa przetłacza płyn roboczy z powrotem do parownika 1. Od skraplacza odchodzą dwie strzałki. Niebieska strzałka symbolizuję przepływ czynnika chłodzącego; pomarańczowa, symbolizuję podgrzany

czynnik opuszczający skraplacz].



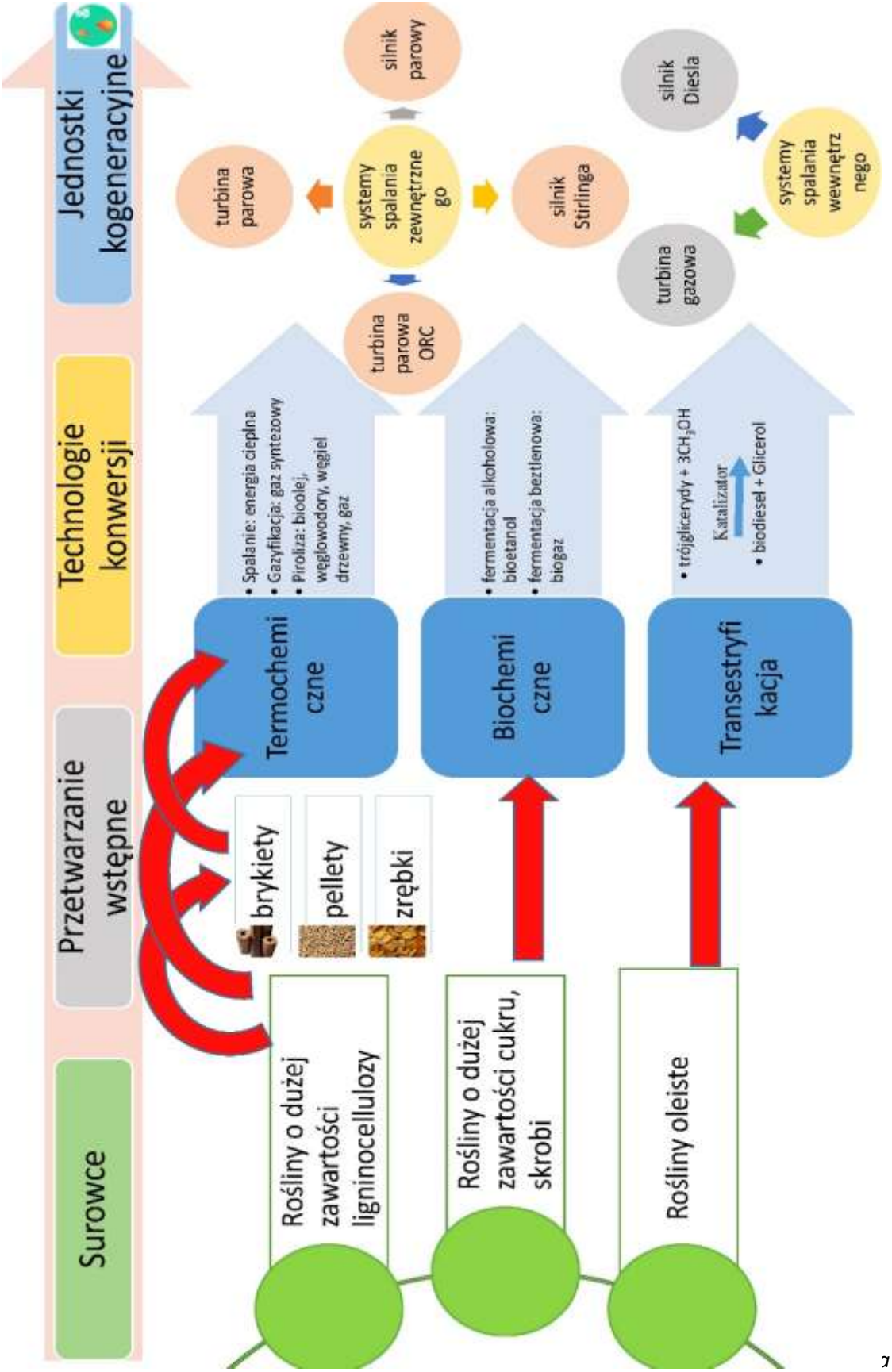
Rys. 4. Schemat podstawowego obiegu Rankine'a z organicznym czynnikiem roboczym (ORC): 1 – parownik; 2 – turbina; 3 – generator; 4 – skraplacz; 5 – pompa obiegowa.

Sprawność elektryczna systemów ORC jest zazwyczaj niższa w porównaniu do tradycyjnych systemów wysokotemperaturowych. Typowa sprawność cieplna waha się w zakresie 10-14% dla źródeł geotermalnych o temperaturach od 100°C do 220°C. Dla przykładu, źródło geotermalne o temperaturze 150°C może zapewnić optymalną sprawność cieplną na poziomie 14.1% przy mocy 0.433 MW. W przypadku zastosowania izopentanu jako płynu roboczego, system ORC może osiągnąć sprawność cieplną rzędu 17.7%. Układy ORC są również bardzo elastyczne i potrafią utrzymać wysoką sprawność elektryczną nawet przy częściowym obciążeniu.

3.2. Klasyfikacja według źródła energii odnawialnej

1. Układy kogeneracyjne zasilane biomasą. W instalacjach opartych na spalaniu biomasy, paliwo organiczne jest wprowadzane do kotła, gdzie ulega procesowi spalania. Głównymi paliwami dla tego typu systemów są różnorodne odnawialne surowce organiczne. Należą do nich odpady rolnicze, produkty uboczne leśnictwa, odpady zwierzęce, a także specjalnie przygotowane formy biomasy, takie jak zrębki drzewne, pellety drzewne, brykiety drzewne, oraz odpady z przetwarzania drewna. Proces gazyfikacji biomasy polega na podgrzewaniu biomasy stałej w środowisku o ograniczonej zawartości tlenu. W wyniku termicznego rozkładu biomasy wytwarza się gaz palny - syngaz (lub gaz drzewny, jeśli paliwem jest drewno). Syngaz, który przeważnie zawiera wodór i tlenek węgla, jest poddawany oczyszczaniu i chłodzeniu. Oczyszczony gaz spala się w silnikach spalinowych lub mikroturbinach. Zadaniem takich jednostek jest konwersja energii chemicznej paliwa w energię mechaniczną. Następnie energia mechaniczna jest wykorzystywana do napędzania generatora w którem odbywa się wytwarzanie energii elektrycznej. Ciepło odpadowe, powstające na każdym etapie technologicznym jest odzyskiwane i wykorzystywane do produkcji gorącej wody lub pary.
W porównaniu do technologii spalania biomasy, która często jest kojarzona z dużymi, scentralizowanymi instalacjami, zgazowanie biomasy w połączeniu z silnikami spalinowymi lub mikroturbinami umożliwia tworzenie mniejszych, rozproszonych systemów. Biomasa i biogaz znajdują zastosowanie w zasilaniu różnorodnych jednostek technologicznych, takich jak silniki spalinowe, turbiny parowe czy gazowe. Kluczową zaletą układów kogeneracyjnych zasilanych biomasą jest możliwość wykorzystania lokalnie dostępnych surowców. Na rys. 5 zamieszczono główne sposoby przetwarzania biomasy na potrzeby kogeneracji.

[Tekst alternatywny. Rysunek prezentuje łańcuch procesów, które łączą surowce organiczne (zielone pola) z jednostkami kogeneracyjnymi (pola żółte i niebieskie), ukazując etapy ich konwersji i wykorzystania. W kategorii "Surowce", biomasa została skategoryzowana według jej składu, wyróżniając trzy typy: rośliny o dużej zawartości lignocelulozy (np. drewno), rośliny o dużej zawartości cukru lub skrobi oraz rośliny oleiste. W kategorii "Przetwarzanie wstępne" (oznaczonej kolorem jasnoszarym), surowce lignocelulozowe są przekształcane w bardziej efektywne pod kątem energetycznym formy paliwa stałego, takie jak brykiety, pellety i zrębki. Kolejna kategoria zawiera "Technologie konwersji" (w jasnoniebieskich kolorach), które dzielą się na: procesy termochemiczne (obejmujące spalanie, zgazowanie i pirolizę), procesy biochemiczne (fermentacja alkoholowa i beztlenowa) oraz transestryfikację (służącą do produkcji biodiesla). Ostatnia kategoria grupuje technologie na systemy spalania zewnętrznego (pola w kolorze pomarańczowym, np. turbina parowa, ORC, silnik Stirlinga, silnik parowy) oraz systemy spalania wewnętrznego (pola w kolorze szarym, np. turbina gazowa, silnik Diesla). Strzałki na schemacie wskazują na powiązania między poszczególnymi kategoriami].



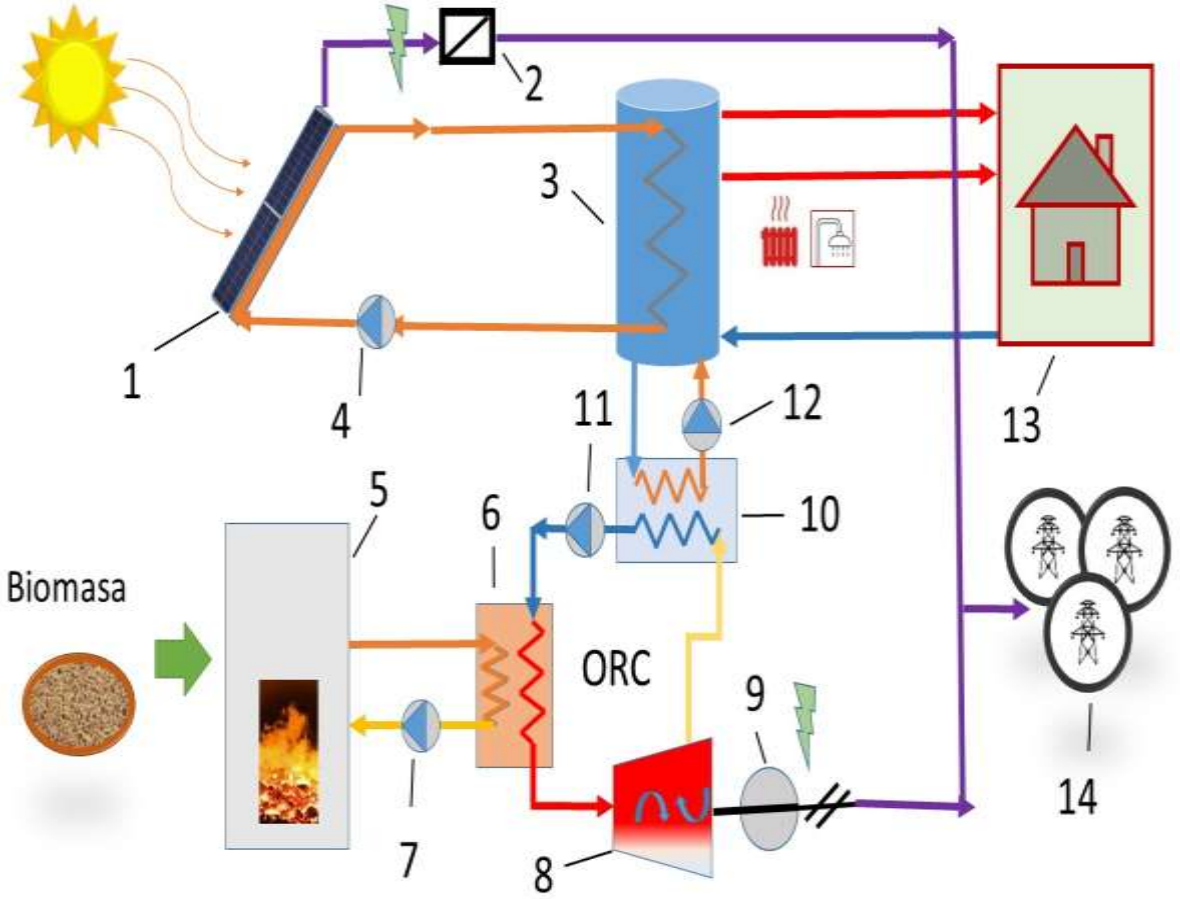
Rys. 5. Ścieżki konwersji biomasy na biopaliwa i energię.

Zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 5), systemy ze spalaniem zewnętrznym, w tym szczególnie silniki Stirlinga i turbiny parowe, wykazują dużą elastyczność w zastosowaniu paliw stałych. Co więcej, silniki spalinowe i turbiny gazowe, pomimo tradycyjnego sposobu zasilania paliwami kopalnymi, z powodzeniem mogą być adaptowane do zasilania biopaliwami.

2. Układy zasilane energią geotermalną. Wytwarzanie energii odbywa się w różnych typach elektrowni geotermalnych: na suchą parę, system podwójnej ekspansji (flash) oraz systemy binarne. Szczególnie istotne dla kogeneracji są systemy binarne, które do produkcji energii elektrycznej wykorzystują technologię ORC. Technologia ta umożliwia efektywną konwersję ciepła ze źródeł geotermalnych o niskich i średnich temperaturach, które są zbyt niskie, aby bezpośrednio wytworzyć parę wodną. W takim układzie, płyn geotermalny ogrzewa specjalny płyn roboczy o niskiej temperaturze wrzenia, który następnie odparowuje i napędza turbinę. ORC umożliwia zatem wykorzystanie szerszego zakresu zasobów geotermalnych w układach kogeneracyjnych.

3. Układy kogeneracyjne zasilane energią słonecznej. Energia słoneczna może być efektywnie wykorzystywana w układach fotowoltaiczno-termicznych (PVT) oraz technologia skoncentrowanej energii słonecznej (ang. concentrated solar power). Systemy fotowoltaiczno-termiczne (PVT) stanowią innowacyjne rozwiązanie technologiczne, które umożliwia jednoczesną konwersję energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną i cieplną w ramach jednego zintegrowanego modułu. W przeciwieństwie do tradycyjnych paneli PV, w których nadmiar ciepła jest rozpraszany, w układzie PVT ciepło jest aktywnie odzyskiwane z tylnej powierzchni ogniw przez zintegrowany z panelem wymiennik ciepła. Przedstawiony na rysunku 6 schemat blokowy ilustruje zasadę działania hybrydowego systemu kogeneracyjnego, który integruje odnawialne źródła energii w postaci promieniowania słonecznego oraz biomasy. System składa się z dwóch niezależnych, lecz zintegrowanych, ścieżek pozyskiwania energii, które zasilają centralny podsystem mikro-CHP, działający w oparciu o obieg Rankine'a z czynnikiem organicznym. Proces konwersji energii słonecznej rozpoczyna się w kolektorach fotowoltaiczno-termicznych (PVT) 1. Urządzenia te jednocześnie generują energię elektryczną (prąd stały DC) i pozyskują energię cieplną (ciepło niskotemperaturowe, T < 100°C). Wytworzona energia elektryczna jest przekazywana do akumulatora 2 lub do zewnętrznej sieci elektroenergetycznej 14 za pośrednictwem falownika. Energia cieplna, transportowana przez czynnik przenoszący ciepło (np. glikol), jest magazynowana w zbiorniku na wodę 3. Zgromadzona woda, o temperaturze około 70°C, jest następnie wykorzystywana do zaspokojenia potrzeb grzewczych obiektu 13, w tym do ogrzewania pomieszczeń (70°C), basenu (55°C) oraz wody użytkowej (55°C).

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydowy system energetyczny, który integruje energię słoneczną i biomasę w celu jednoczesnej produkcji energii elektrycznej i ciepła. Cały układ składa się z połączonych elementów, a kolorowe linie oznaczają przepływ energii lub substancji. Zielone strzałki symbolizują dopływ biomasy (np. pelletu), pomarańczowe — przepływ ciepła z kolektora słonecznego do zbiornika na wodę (którego temperatura może sięgać 70°C), a żółte — powrót czynnika roboczego (oleju termicznego i medium na wylocie z turbiny ORC). Czerwone linie to dostawa gorącej wody i ciepła do budynku, niebieskie — powrót zimnej wody z obiegu systemu ogrzewania zakładu rehabilitacyjnego, natomiast fioletowe — przepływ energii elektrycznej].



Rys. 6. Schemat mikro-CHP oparty na biomasie i energii słonecznej: 1 – kolektory fotowoltaiczno-termiczne (PVT); 2 –akumulator; 3 – magazyn ciepła (zbiornik na wodę); 4, 7, 11, 12 – pompa obiegowa; 5 – kocioł na biomasę; 6 – wymiennik ciepła; 8 – turbina ORC; 9 – generator energii elektrycznej; 10 – skraplacz; 13 – zakład rehabilitacji; 14 – sieć elektroenergetyczna.

Alternatywnym źródłem energii cieplnej jest biomasa (np. pellet), która jest spalana w kotle 5. W procesie spalania gorące spaliny przekazują energię cieplną do oleju termicznego, którego temperatura osiąga około 310°C. Wysokotemperaturowy olej termiczny, np. Therminol VP-1, jest następnie pompowany do wymiennika ciepła 6, gdzie oddaje energię czynnikowi roboczemu układu ORC. Wymiennik 6 pełni funkcję parownika, w którym czynnik roboczy ulega odparowaniu, tworząc parę pod wysokim ciśnieniem. Podgrzany i odparowany czynnik roboczy zasila turbinę ORC 8, w której ulega rozprężaniu, powodując obrót wału. Wał turbiny jest sprzężony z generatorem elektrycznym 9, w którym energia kinetyczna jest konwertowana na energię elektryczną. Po opuszczeniu turbiny parowej, czynnik roboczy o niższej temperaturze trafi do skraplacza 10, gdzie oddaje ciepło, które może zostać przekierowane do zbiornika na wodę 3. Proces ten jest wspomagany przez pompę 11. Wytworzona energia elektryczna jest dystrybuowana na potrzeby obiektu 13 lub eksportowana do sieci elektroenergetycznej 14.
Układy oparte na technologii skoncentrowanej energii słonecznej wykorzystują systemy optyczne, takie jak zwierciadła paraboliczne lub lustra heliostatyczne, do odbijania i skupienia promieniowania słonecznego na odbiorniku ciepła. W takich układach energia promieniowania słonecznego jest wykorzystana do ogrzewania czynnika roboczego (np. woda, olej lub stopiona sól) w odbiorniku do bardzo wysokich temperatur, które mogą sięgać nawet 400°C. Uzyskana w taki sposób energia cieplna służy do podgrzewania płynu roboczego i wytworzenia pary. Następnie para o wysokim ciśnieniu i temperaturze napędza turbinę parową, która jest połączona z generatorem elektrycznym. Ciepło odpadowe z turbiny parowej może być odzyskiwane i wykorzystywane na cele użytkowe. Systemy skoncentrowanej energii słonecznej są często wdrażane w projektach na skalę użyteczności publicznej ze względu na wymagania dotyczące powierzchni i infrastruktury.
Istnieją również mniejsze systemy, typu "Dish/Engine", które mogą produkować od 5 do 25 kW mocy na jednostkę kogeneracyjną i są stosowane w energetyce rozproszonej. Przykładem takiego rozwiązania jest układ kogeneracyjny z silnikiem Stirlinga, który może być zasilany ciepłem z dowolnego źródła, w tym ze skoncentrowanej energii słonecznej.
W tabeli 3 zostały zamieszczone podstawowe parametry techniczne układów kogeneracyjnych zasilanych OZE.

Tabela 3. Charakterystyka wybranych technologii kogeneracji

Typ urządzenia	Paliwo/ Źródło	Zakres mocy elektrycznej [kW_e]	Sprawność elektryczna [%]	Sprawność całkowita [%]	Wskaźnik skojarzenia (λ)	Źródło ciepła
silnik Stirlinga	biomasa, biogaz, energia słoneczna, ciepło odpadowe	1 - 100	15 - 30	80 - 90	0,5 - 1,5	woda gorąca, rzadziej para o niskich parametrach
silnik tłokowy (gazowy)	biogaz, gaz syntezowy (z biomasy)	5 - 6500	25 - 40	70 - 90	0,5 - 1,0	gorąca woda, rzadziej para o niskich parametrach
turbina parowa	biomasa, ciepło odpadowe, kolektory słoneczne	> 250	7 - 20	75 - 84	0,1 - 0,33	para lub woda gorąca
organiczny obieg Rankine'a (ORC)	biomasa, energia geotermalna, kolektory słoneczne, ciepło odpadowe	10 - 5000	10 - 25	80 - 90	0,6 - 1,5	woda, gorąca olej termalny

3.3. Klasyfikacja w zależności od mocy

1. Mikro- i mini-instalacji (do 50 kW mocy elektrycznej). Stosowana w małych obiektach, takich jak domy jednorodzinne, małe gospodarstwa rolne, czy niewielkie przedsiębiorstwa (przykład: silnik Stirlinga zasilany biomasą)
2. Małe i średnie instalacji (od 50 kW do 50 MW). Znalazły zastosowanie w gminach, dużych zakładach przemysłowych, czy osiedlach mieszkaniowych. Technologii wytwarzania energii w takich instalacjach często opierają się na silnikach tłokowych lub turbinach gazowych.

3. Duże jednostki kogeneracyjne (powyżej 50 MW). Znalazły zastosowanie w energetyce zawodowej, dużych elektrociepłowniach, które zasilają całe miasta lub regiony. W takich jednostkach są stosowane zaawansowane układy z turbinami parowymi lub układy gazowo-parowe. W tabeli 4 zamieszczono dane zakresu mocy dla wybranych jednostek kogeneracyjnych.

Tabela 4. Przykładowe wartości mocy wybranych jednostek kogeneracyjnych

Jednostka główna	**Opis**	**Typowy zakres mocy**
silniki spalinowe (tłokowe)	charakteryzują się elastycznością i są ekonomicznie opłacalne w mniejszych i średnich zakresach mocy. Do tej kategorii należą silniki o zapłonie iskrowym oraz samoczynnym (Diesla)	poniżej 5 MW
turbiny gazowe	przeznaczone dla średnich i dużych instalacji, są wydajne i niezawodne, często używane w przemyśle	od 500 kW do 40 MW
mikroturbiny	idealne dla mniejszych systemów, są one ciche i mają niską emisję spalin, co sprawia, że nadają się do budynków mieszkalnych i komercyjnych	od 30 kW do 250 kW
turbiny parowe	stosowane w największych układach kogeneracyjnych, wykorzystują parę z kotła lub ciepło odpadowe z innych procesów, co czyni je kluczowymi w energetyce zawodowej	od 50 kW do 250 MW

4. Kogeneracja w układzie kombinowanym: podstawy teoretyczne i obliczenia termodynamiczne

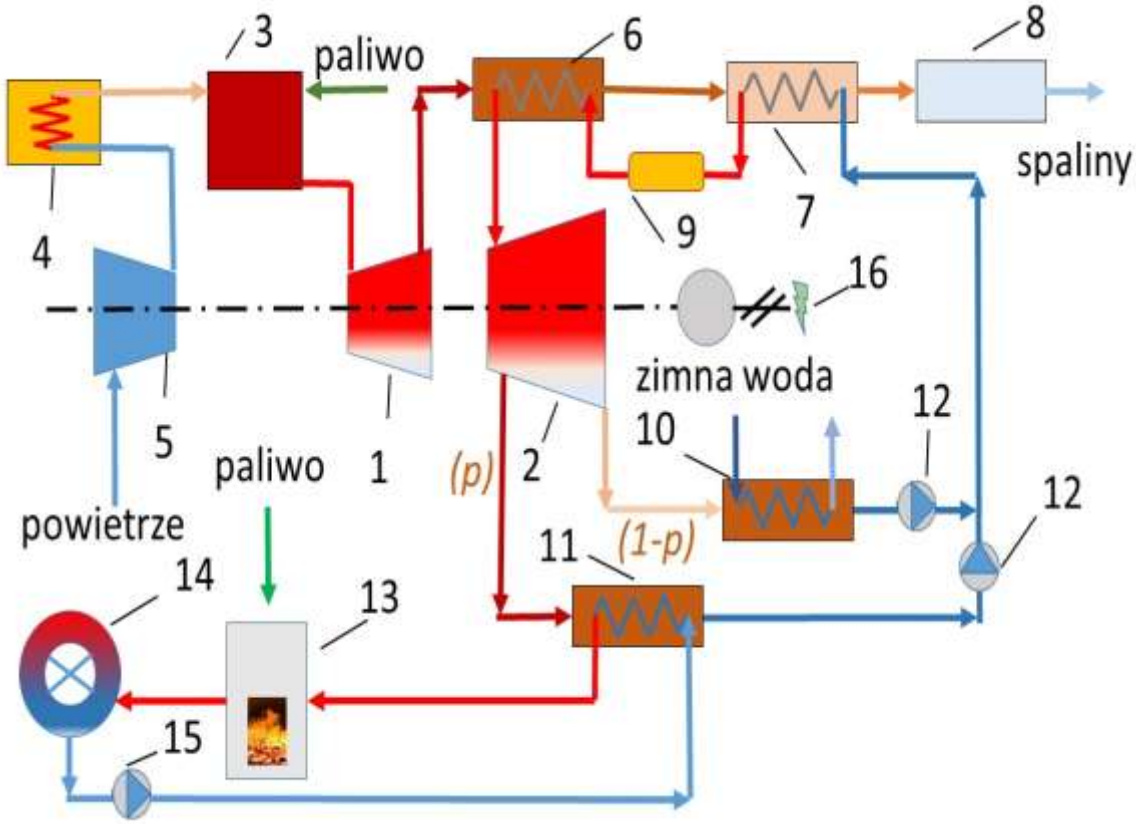
Układ kombinowany stanowi zaawansowane rozwiązanie technologiczne, integrujące obieg silnika cieplnego (np. turbiny gazowej) z obiegiem parowym w jeden spójny system. Głównym atutem takiego układu jest wysoka efektywność, którą można uzyskać dzięki maksymalnemu wykorzystaniu energii zawartej w dwóch czynnikach roboczych: gorących spalinach, które stanowią górne źródło ciepła, oraz parze wodnej, która odbiera ciepło ze spalin. Układ kombinowany składa się z dwóch głównych obiegów. Obieg gazowy (górny), czyli obieg Braytona, stanowi pierwszy stopień konwersji energii, w którym gaz (np. spaliny z turbiny gazowej) wykonuje pracę mechaniczną. Obieg parowy (dolny), znany jako obieg Rankine'a, stanowi drugi etap konwersji. Jest on zasilany ciepłem odpadowym z obiegu gazowego, które służy do wytworzenia pary, napędzającej turbinę parową.
Obie turbiny, gazowa i parowa, są połączone wspólnym wałem z generatorem, gdzie energia mechaniczna z obrotu turbin jest zamieniana na energię elektryczną. Alternatywnym rozwiązaniem dla tradycyjnego obiegu parowego jest zastosowanie organicznego obiegu Rankine'a (ORC). W obiegu tym wykorzystuje się czynnik

roboczy o niskiej temperaturze wrzenia, co umożliwia odzysk ciepła ze źródeł o niższych parametrach, które w przypadku klasycznego obiegu Rankine'a byłyby niewykorzystane. Powszechnie stosowanymi czynnikami w układach ORC są izobutan lub izopentan.

Poniższy schemat przedstawia ideę układu kogeneracyjnego opartego na współpracy turbiny gazowej i turbiny parowej. W obiegu gazowym (dolnym), powietrze jest sprężane za pomocą sprężarki 5, a następnie dostarczane do komory spalania 3, w której odbywa się spalanie paliwa (np. biogazu). Wytworzone w procesie spalania gorące spaliny napędzają turbinę gazową 1. Następnie, spaliny są kierowane do kotła odzyskowego 6, gdzie przekazują ciepło czynnikowi roboczemu obiegu parowego. W kotle odzyskowym czynnik roboczy, np. izopentan w układzie ORC (Organiczny Obieg Rankine'a), ulega odparowaniu. Wytworzona w ten sposób para lub gaz napędza turbinę parową 2. Praca rozprężania pary w turbinie parowej upustowo-kondensacyjnej jest wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej. Część pary z turbiny parowej jest odprowadzana z międzystopniowego upustu turbiny do wymiennika 11 w celu uzyskania wody gorącej. Pozostała, zużyta para, o niższym ciśnieniu, jest kierowana do wymiennika 10, w którym ulega kondensacji. Należy podkreślić, że praca zużywana na sprężanie powietrza w sprężarce 5 oraz na przetłaczanie kondensatu w pompach 12 zmniejsza efektywną pracę rozprężania w obu turbinach.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia schemat kogeneracji w układzie kombinowanym, który łączy dwa główne obiegi: obieg gazowy i obieg parowy, w celu jednoczesnej produkcji energii elektrycznej i ciepła. W lewej części schematu widoczny jest obieg gazowy, którego głównym elementem jest turbina gazowa 1, napędzana przez gorące spaliny. Proces rozpoczyna się od pobrania powietrza (oznaczonego niebieską strzałką) do sprężarki 5, a następnie do komory spalania 3, gdzie dodawane jest paliwo (zielona strzałka). Powstałe w procesie spalania gorące spaliny napędzają turbinę gazową 1, która jest połączona wałem z generatorem 16. Wał generatora, oznaczony czarną linią przerywaną i łączy turbinę parową 2 i gazową 1. Praca wytworzona na wale turbin jest przekazywana do generatora 16, który produkuje energię elektryczną. Ciepło uzyskane ze spalin wylotowych z turbiny gazowej (czerwona strzałka) jest przekazywane do kotłów odzyskowych 6, 7, umiejscowionych w górnej części rysunku. Czynnik roboczy (izopentan), po podgrzaniu w kotle odzyskowym 6, ulega odparowaniu i napędza turbinę parową 2 (prostopadła czerwona strzałka od kotła odzyskowego 6, która skierowana do turbiny parowej). Zużyty w turbinie parowej czynnik roboczy *(1-p)* (oznaczony linią pomarańczową) przechodzi przez wymiennik ciepła 10 w którem odbywa się schłodzenie go zimną wodą. Dodatkowe ciepło do celów grzewczych może być

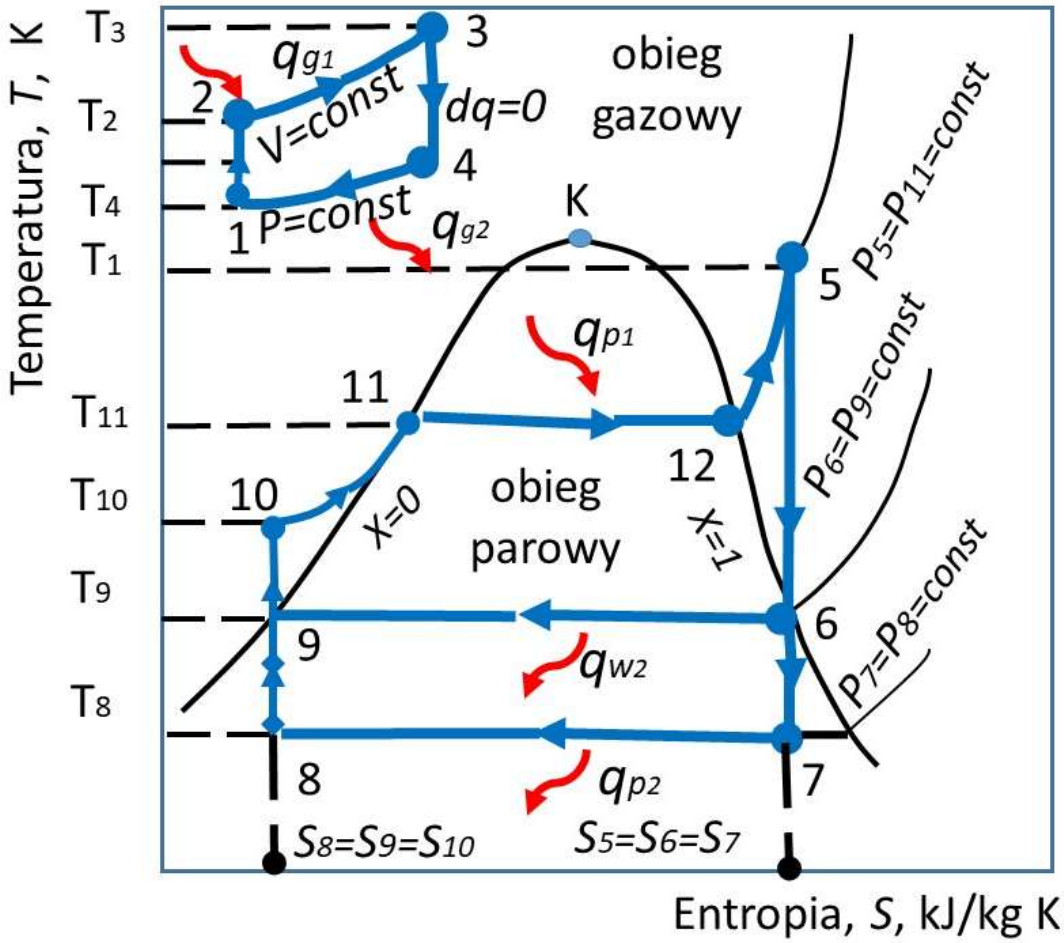
odzyskiwane z systemu upustowego turbiny parowej *(p)* w wymienniku 11 układu ORC. W centralnej części schematu, po lewej stronie na dole, znajduje się kocioł szczytowy 13, który jest zasilany paliwem (oznaczone zieloną strzałką). Kocioł pełni funkcję elastycznego, dodatkowego źródła ciepła, które uruchamia się w celu zaspokojenia zwiększonego zapotrzebowania na energię cieplną, np. w chłodniejsze dni. Ciepło wytworzone w kotle może być bezpośrednio skierowane do odbiorców 14].



Rys. 7. Schemat siłowni kogeneracyjnej w układzie kombinowanym: 1 – silnik spalinowy albo turbina gazowa; 2 – turbina upustowo kondensacyjna; 3 – komora spalania; 4 – podgrzewać powietrza; 5 – sprężarka powietrza; 6; 7 – kotły odzyskowe wymiennik ciepłowniczy; 8 – filtr do oczyszczania gazów spalinowych; 9 – zbiornik pary; 10 – chłodnica czynnika roboczego (np. izopentanu, izooktanu, oleju silikonowego) w układzie ORC; 11 –wymiennik para-woda; 12 – pompa kondensatu; 13 – kocioł szczytowy; 14 – odbiór ciepła (system ogrzewania); 15 –pompa (woda powrotna); 16 – generator energii elektrycznej.

Na rysunku 8 przedstawiono układ kogeneracyjny z turbiną gazową i parową we współrzędnych *T-S* (temperatura-entropia).

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia wykresy we współrzędnych *T-S* obiegu gazowego (górna część diagramu) i parowego (dolna część diagramu). Niebieski czworokąt w górnej części diagramu reprezentuje obieg gazowy. Składa się on z następujących obiegów: 1-2 – adiabatyczne sprężanie powietrza w sprężarce, gdzie temperatura rośnie od T_1 do T_2; 2-3 –temperatura rośnie od T_2 do T_3, co symbolizuje doprowadzanie ciepła q_{g1} (czerwona strzałka) przy stałej objętości (*V=const*); 3-4 – niebieska strzałka wskazuje na adiabatyczne rozprężanie produktów spalania przy $dq = 0$ i spadkiem temperatury od T_3 do T_4; 4-1 – izobaryczne (*P=const*) odprowadzanie ciepła q_{g2} , ze spadkiem temperatury od T_4 do T_1. Dolna część diagramu przedstawia obieg parowy (tzw. obieg ORC), który pobiera ciepło z obiegu gazowego. Obieg parowy składa się z następnych przemian: przemiany 10-11-12-5 wskazują na izobaryczne doprowadzenie ciepła, q_{p1} do obiegu parowego przy P_5=*const*; przemiana 5-6 – adiabatyczne rozprężanie pary w turbinie parowej przy S_5=*const;* przemiana 6-7 – adiabatyczne rozprężanie pary w turbinie parowej przy S_6=*const;* przemiana 7-8 – izobaryczne odprowadzenie ciepła w skraplaczu q_{p2} przy P_7=*const;* przemiany 8-9 i 9-10 wskazują na adiabatyczne sprężanie skroplin w pompach przy S_8=*const;* 6-9 –izobaryczne skraplanie pary w wymienniku ciepła 11 przy P_6=*const.* Linie przerywane poziome w kolorze czarnym oznaczają stałe temperatury (T_1, T_2, T_3, T_4, T_{11}, T_{10}, T_9, T_8). Linie pionowe symbolizują stałą entropię (S_8=S_9=S_{10} oraz S_5=S_6=S_7). Diagram zawiera również oznaczenia stałego ciśnienia (*P=const*), w tym P_5=P_{11}=*const*, P_6=P_9=*const* i P_7=P_8=*const*, oraz oznaczenia stałej objętości (*V=const*). Punkt *K* symbolizuje punkt krytyczny w którem gęstość cieci i gazu jest niezmienna].



Rys. 8. Schemat siłowni kogeneracyjnej w układzie kombinowanym: q_{g1} – ilość ciepła właściwego doprowadzonego do silnika cieplnego; q_{g2} – ciepło odpadowe z silnika cieplnego (turbina gazowa), używane do podgrzewania czynnika roboczego w obiegu ORC, a następnie przekazywane do obiegu z turbiną parową, $q_{g2} = q_{p1}$; q_{w2} – ilość ciepła odbieranego z obiegu układu parowego, wykorzystywanego do podgrzewania wody w wymienniku ciepła 11; q_{p2} – ilość ciepła, które jest oddawane w wymienniku (skraplaczu) 10 turbiny parowej wodzie chłodzącej.

Zgodnie z rysunkami 7 i 8, powietrze niezbędne do spalania paliwa jest pobierane z atmosfery, a następnie sprężane w sprężarce 5 do ciśnienia P_2, odpowiadającego ciśnieniu w komorze spalania turbiny gazowej 1 (rys. 7). W przemianie izochorycznej 2-3 do produktów spalania, powstających w wyniku spalania paliwa, doprowadzane jest ciepło q_{g1}. Adiabatyczne rozprężanie produktów spalania na łopatkach turbiny gazowej 1 (rys.7) w przemianie 3-4 ($dq = 0$) umożliwia uzyskanie pracy rozprężania -

Politechnika Świętokrzyska Kielce University of Technology
Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" nr FERS.01.05-IP.08-0234/23

l_{3-4}, która jest wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej w generatorze 16. Zużyte produkty spalania z turbiny gazowej trafiają do kotłów odzyskowych 6 oraz 7, gdzie w przemianie izobarycznej 4-1 oddają ciepło do czynnika roboczego ORC, $q_{g2} = q_{p1}$. Czynnik roboczy (np. izopentan) jest izobarycznie podgrzewany w kotle odzyskowym 7 w przemianie 10-11 aż do stanu wrzenia, a następnie w przemianie izobaryczno-izotermicznej 11-12 przechodzi w stan parę suchą, która gromadzi się w zbiorniku pary 9 . Kolejne podgrzewanie pary suchej produktami spalania prowadzi do powstania pary przegrzanej w przemianie izobarycznej 12-5 z końcowymi parametrami P_5, T_5, S_5 w punkcie 5. Następnie para rozpręża się adiabatycznie na łopatkach turbiny parowej 2, generując użyteczną pracę l_{5-6} i l_{6-7} w przemianach 5-6 oraz 6-7. Praca rozprężania pary w turbinie jest wykorzystywana do wytwarzania energii elektrycznej. Część zużytej pary w ilości *"p"* jest pobierana w pośrednim upuście turbiny pod ciśnieniem P_6 = 0.2-0.4 MPa, co pozwala na uzyskanie gorącej wody o temperaturze 130-150°C. Para z upustu turbiny parowej jest kierowana do wymiennika ciepła (skraplacza) 11, gdzie ulega izobarycznej kondensacji (przemiana 6-9) i podgrzewa wodę dla odbiorców ciepła 14. Pozostała część zużytej pary o ciśnieniu P_7 = 3-5 kPa trafi do wymiennika 10, gdzie ulega skraplaniu w przemianie izobarycznej i oddaje ciepło do otoczenia q_{p2}. Kondensat uzyskany w wymiennikach ciepła 10 oraz 11 jest sprężany adiabatycznie w przemianach 8-9 i 9-10 przez pompy 12, a następnie jest dostarczany do kotłów odzyskowych 6 i 7 w celu wytworzenia pary.
Całkowita praca użyteczna obiegu jest definiowana jako bilans pracy rozprężania i sprężania czynnika roboczego. Można ją wyrazić jako sumę prac użytecznych obiegów składowych układu:

$$l_0 = l_{op} + l_{og} = (l_{3-4} + l_{5-6} + l_{6-7}) - (l_{8-9} + l_{9-10} + l_{1-2}), \quad (1)$$

gdzie l_{op} i l_{og} –praca użyteczna obiegu parowego i gazowego, kJ/kg.
W przedstawionym układzie kogeneracyjnym realizowana jest wieloetapowa konwersja energii w celu maksymalnego wykorzystania potencjału ciepła właściwego doprowadzonego do maszyny cieplnej q_{g1}. Początkowo, np. w turbinie gazowej, energia termiczna jest przekształcana w użyteczną pracę rozprężania produktów spalania l_{og} oraz pracę niezbędną do napędu sprężarki l_{sp}. Następnie, ciepło zawarte w spalinach jest efektywnie odzyskiwane w kotłach odzyskowych i wykorzystywane do podgrzewania czynnika roboczego ORC i wytworzenia pary, która z kolei rozpręża się w turbinie parowej, wykonując pracę użyteczną l_{op}. Część energii cieplnej (q_{w2}), pochodzącej z upustu turbiny parowej *(p)* jest wykorzystywana

do ogrzewania wody w wymienniku 11, natomiast pozostałą część *(1-p)* jest oddawana do otoczenia q_{p2} w skraplaczu 10.
Poniżej przedstawiono podstawowe równania bilansu cieplnego układu kombinowanego.
Ciepło właściwe doprowadzone do silnika cieplnego (turbina gazowa), kJ/kg:

$$q_{g1} = l_{og} + q_{g2}, \tag{2}$$

gdzie q_{g1} jest ciepło dostarczone do silnika cieplnego, które zużywane na pracę rozprężania produktów spalania l_{og} oraz wytwarzanie ciepła do zasilania obiegu parowego q_{g2}.
Ciepło właściwe doprowadzone do obiegu z turbiną parową, kJ/kg:

$$q_{g2} = q_{p1}, \tag{3}$$

Ciepło właściwe doprowadzone do obiegu parowego i zużywane do rozprężania pary w turbinie parowej l_{op}, do wytwarzania ciepła użytecznego dla odbiorców z uwzględnieniem zużycia paliwa w kotle szczytowym ($q_{w2} - q_{\text{kocioł szczytowy}}$) oraz na straty ciepła do otoczenia q_{p2}, kJ/kg:

$$q_{p1} = q_{g2} = l_{op} + \left(q_{w2} - q_{\text{kocioł szczytowy}} \right) + q_{p2}. \tag{4}$$

Całkowita energia cieplna, doprowadzona do instalacji. Energia ze spalania paliwa w silniku cieplnym q_{g1} oraz w kotle szczytowym $q_{\text{kocioł szczytowy}}$ jest przekształcana w użyteczną pracę w turbinie gazowej i parowej ($l_{og} + l_{op}$), zużywana do produkcji ciepła użytkowego dla odbiorców ciepła ($q_{w2} - q_{\text{kocioł szczytowy}}$) oraz odprowadzana do otoczenia q_{p2}, kJ/kg:

$$q_{p1} = (l_{og} + l_{op}) + \left(q_{w2} - q_{\text{kocioł szczytowy}} \right) + q_{p2}. \tag{5}$$

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, współczynnik wykorzystania ciepła w układzie kombinowanym oblicza się na podstawie zależności (6):

$$K = \frac{l_o + \left(q_{w2} - q_{\text{kocioł szczytowy}} \right)}{q_{g1}} \tag{6}$$

Wzory do obliczania bilansów cieplnych układu kombinowanego zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Bilans energetyczny procesów termodynamicznych w teoretycznych obiegach układu kogeneracyjnego

Nr przemiany	**Nazwa przemiany**	**Charakterystyka przemiany**	**Praca bezwzględna jednostkowa (l) kJ/kg**	**Ciepło właściwe (q) kJ/kg**
1-2	adiabatyczne sprężanie powietrza w sprężarce,	$dS = 0$ $S_1 = const$	$(i_2 - i_1) \cdot m_{spalin}$	$q = 0$
2-3	izochoryczne doprowadzenie ciepła do silnika gazowego	$V_2 = const$	$l = 0$	$(i_2 - i_1) \cdot m_{spalin}$
3-4	adiabatyczne rozprężenie produktów spalania w turbinie gazowej	$dS = 0$ $S_1 = const$	$(i_3 - i_4) \cdot m_{spalin}$	$q = 0$
4-1	izobaryczne odprowadzenie ciepła ze spalin do obiegu parowego, $q_{g2} = q_{p1}$	$P_4 = const$	$P_4 \cdot (v_4 - v_1) \cdot m_{spalin}$, gdzie P_4 w kPa	$(i_4 - i_1) \cdot m_{spalin}$
10-11-12-5	izobaryczne doprowadzenie ciepła w obiegu parowym, q_{p1}	$P_5 = const$	–	$i_5 - i_{10}$
5-6	adiabatyczne rozprężenie pary w I stopniu turbiny parowej	$dS = 0$ $S_5 = const$	$i_5 - i_6$	$q = 0$
6-7	adiabatyczne rozprężenie pary w II stopniu turbiny parowej	$dS = 0$ $S_6 = const$	$(i_6 - i_7) \cdot (1 - p)$	$q = 0$
7-8	izobaryczne odprowadzenie ciepła w skraplaczu, q_{p2}	$P_7 = const$	–	$(i_7 - i_8) \cdot (1 - p)$

8-9, 9-10	adiabatyczne sprężanie kondensatu w pompach	$dS = 0$ $S_8 = const$	$v_8 \cdot (P_9 - P_8) \cdot (1 - p)$ $v_9 \cdot (P_{10} - P_9) \cdot p$	$q = 0$
6-9	izobaryczne skraplanie pary w wymienniku ciepła	$P_6 = const$	–	$(i_6 - i_9) \cdot p$

5. Przykładowe indywidualne zadanie obliczeniowe. Analiza teoretycznego obiegu termodynamicznego

Niniejsze zadanie dotyczy analizy termodynamicznej instalacji kogeneracyjnej opartej na silniku Diesla. Celem jest obliczenie parametrów pracy układu, w tym sprawności cieplnej i współczynnika wykorzystania ciepła. Analiza obejmuje zarówno obieg silnika, jak i proces odzysku ciepła ze spalin.
Opis układu i danych wejściowych.
Instalacja kogeneracyjna składa się z urządzenia napędowego - silnika Diesla o mocy N [kW], generatora elektrycznego oraz wymiennika ciepła. W silniku Diesla energia chemiczna z paliwa (np. biogazu) jest przekształcana w energię mechaniczną. Silnik, działając jako jednostka napędowa, wprawia w ruch generator elektryczny, który produkuje prąd. Ciepło odpadowe (w postaci spalin z silnika lub pochodzące z jego układu chłodzenia) jest wychwytywane i ponownie wykorzystywane do podgrzewania wody w wymienniku ciepła na potrzeby grzewcze (na przykład do ogrzewania budynków mieszkalnych).
Zadane są następujące parametry:
moc znamionowa silnika: N, [kW];
temperatury wody w obiegu grzewczym:

- t_g, °C – temperatura wody na wyjściu z wymiennika (zasilanie);
- t_0, °C – temperatura wody zwrotnej z systemu ogrzewania (na wejściu do wymiennika);

wartość opałowa paliwa: 37000 kJ/kg;
parametry termodynamiczne obiegu Diesla:

- ciśnienie absolutne P_1 i P_2, MPa;
- temperatury: t_1 i t_3, °C.

Na podstawie podanych informacji, należy obliczyć:
parametry stanu w charakterystycznych punktach obiegu Diesla: ciśnienia (P_3 i P_4), temperatury t_2 i t_4 oraz objętości właściwe – v_1, v_2, v_3, v_4 .
sprawność termiczną (η_t) obiegu bez uwzględniania odzysku ciepła w wymienniku.
ilość ciepła doprowadzonego q_1 i odprowadzonego q_2.

Politechnika Świętokrzyska Kielce University of Technology
Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki"
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23

ilość paliwa niezbędnego do uzyskania zadanej mocy silnika.
współczynnik wykorzystania ciepła dla zaproponowanego układu kogeneracyjnego.
Założenia i stałe.
Do obliczeń należy przyjąć następujące parametry:
ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu c_p = 1.35 kJ/(kg·K).
masa molowa spalin $\mu = 32$ kg/kmol.
wykładnik adiabaty: k=1.4.
Dane wejściowe do obliczeń zamieszczone w tabele 6.

Tabela 6. Dane do obliczeń

Przedostatnia cyfra indeksu	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**0**
moc silnika, N, [kW]	100	120	140	150	160	170	180	190	200	210
temperatura wody gorącej, t_g, °C	80	82	84	86	88	81	83	85	87	89
temperatura wody powrotnej, t_0, °C	60	62	64	66	68	61	63	65	67	69
Ostatnia cyfra indeksu	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**0**
ciśnienie, P_1, MPa	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11
ciśnienie, P_2, MPa	1.4	1.45	1.5	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85
temperatura, t_1, °C	60	62	64	66	68	70	71	72	63	65
temperatura, t_3, °C	800	820	840	810	830	850	860	870	825	845

6. Spis literatury

- ✓ artykuły naukowe:
  - Klepp G., (2025). Solar Stirling for Renewable Energy Multigeneration Systems. *Sustainability*, 17, no. 3: 1257.
  - Ronelly De Souza, Casisi M., Micheli D., & Reini M. (2021). A Review of Small–Medium Combined Heat and Power (CHP) Technologies and Their Role within the 100% Renewable Energy Systems Scenario, *Energies* ,14, no. 17: 5338.
  - Zhu, S., Yu, G., Liang, K., Dai, W., & Luo, E. (2021). A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology, *Applied Energy*, Elsevier, vol. 294(C).
- ✓ źródła internetowe:
  - Wilson, A., (2010). Building Green's Product of the Week. Stirling SunCatcher with "Heat Engine" Technology. *Building Green.com*. (https://www.buildinggreen.com, dostępny 15.08.2025).

Na etapie opracowywania niniejszych materiałów dydaktycznych wykorzystana zostało wiedza i doświadczenie nabyte w ramach wizyt studyjnych ***w Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas*** *oraz* ***w KEZO Jabłonna – Centrum Badawcze Polskiej Akademii Nauk****, zrealizowanych w ramach projektu „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" FERS.01.05-IP.08-0234/23. W szczególności dotyczy to zagadnień odnoszących się do najnowszych technologii, trendów badawczych oraz rozwiązań praktycznych stosowanych w obszarze integracji odnawialnych źródeł energii w hybrydowych systemach grzewczych i chłodniczych, z uwzględnieniem magazynowania energii, inteligentnego zarządzania oraz aspektów ekonomicznych i środowiskowych. ważnych dla studentów kierunków inżynierii środowiska oraz odnawialne źródła energii, pozwalających na lepsze zrozumienie zagadnień z jakimi spotkają się w pracy zawodowej jako inżynierowie, a także na świadome stosowanie innowacyjnych i prośrodowiskowych rozwiązań na każdym etapie procesu inwestycyjnego, zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju i zielonej transformacji.*

Hanna Koshlak