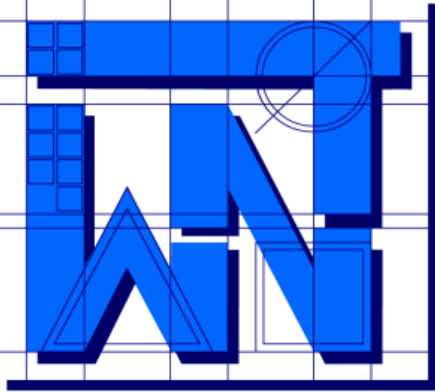


Wydział Nauk Technicznych



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



TERMODYNAMIKA

Obiegi Termodynamiczne

wersja: 24 marca 2024

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2024

Obieg termodynamiczny

Obieg termodynamiczny – szereg przemian termodynamicznych, po zajściu których czynnik wraca do stanu pierwotnego, co oznacza że wszystkie jego parametry osiągają ponownie te same wartości.

Rozróżnia się:

- obiegi porównawcze – teoretyczne (wyidealizowane) – założenia:
 - brak strat
 - wymiana ciepła odbywa się w procesie izochorycznym lub izobarycznym
 - sprężanie i rozprężanie jest adiabatyczne
 - ciepło właściwe czynnika jest stałe
- obiegi indykatorowe – rzeczywiste

znamy tylko c_p o c_v !



Obieg termodynamiczny

Przykłady obiegów porównawczych:

- obieg Carnota (obieg porównawczy idealnego silnika cieplnego),
- obieg Sabathé (ogólny obieg teoretyczny tłokowych silników spalinowych; obieg porównawczy szybkoobrotowego tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym – silnika Diesla)
- obieg Otto (obieg porównawczy tłokowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym),
- obieg Diesla (obieg teoretyczny wolnoobrotowego tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym)
- obieg Braytona-Joule'a (obieg porównawczy siłowni gazowej),
- obieg Rankine'a (obieg porównawczy siłowni parowej),
- obieg Joule'a (obieg porównawczy chłodziarki gazowej),
- obieg Lindego (obieg porównawczy chłodziarki parowej),
- inne.

Obieg termodynamiczny



Przykłady urządzeń,
w których wykorzystuje się
obiegi termodynamiczne.

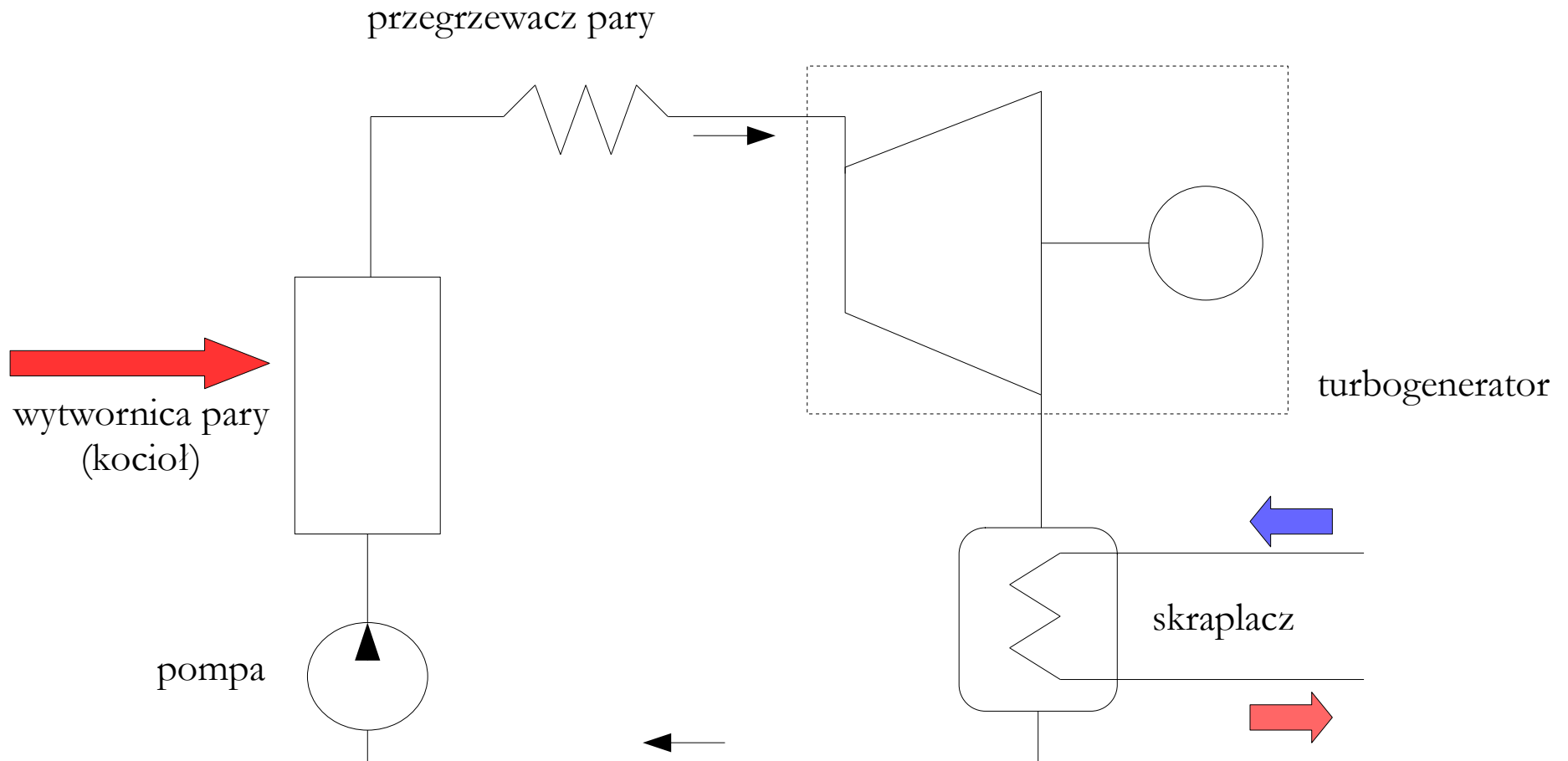
Siłownia parowa

Siłownia parowa – zespół maszyn i urządzeń mających na celu wytwarzanie mocy mechanicznej z wykorzystaniem turbiny parowej lub tłokowej maszyny parowej. Proces konwersji energii odbywa się z wykorzystaniem wody i pary wodnej. Para wodna wytwarzana jest pod odpowiednio wysokim ciśnieniem w kotle parowym, a rozprężana w turbinie bądź maszynie tłokowej. Po rozprężeniu podlega ona skropleniu w skraplaczu (układ zamknięty) lub jest wyrzucana do otoczenia (układ otwarty). W układzie zamkniętym skropliny są przetłaczane z powrotem do kotła przy pomocy pompy. Woda jest zachowana w układzie.

Zastosowania:

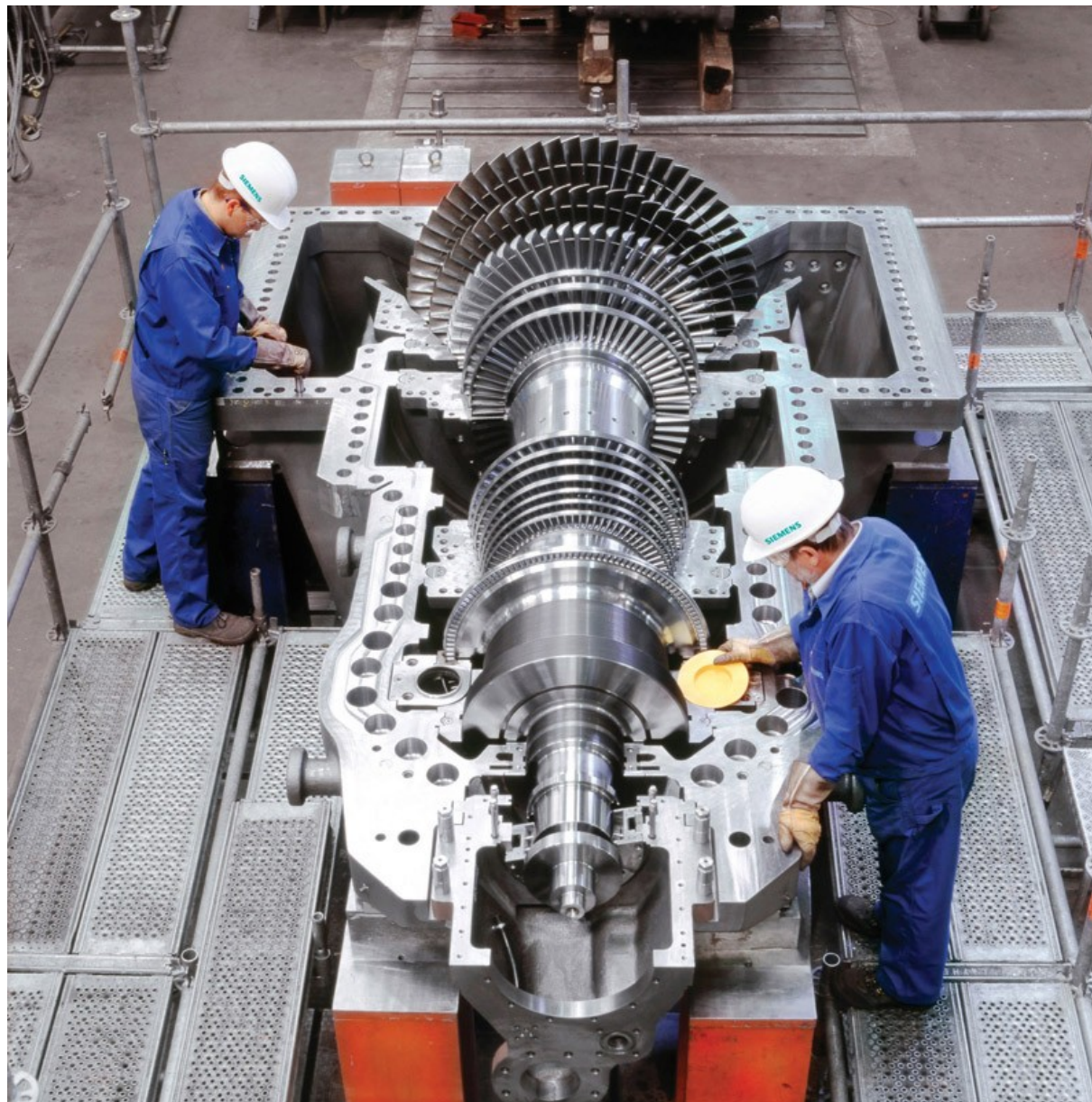
- Napęd generatora elektrycznego – w elektrowniach i elektrociepłowniach parowych;
- Napęd śruby okrętowej okrętów i statków, dawniej kół wodnych;
- Napęd pomp wodnych i innych maszyn wirnikowych.

Siłownia parowa



Schemat siłowni parowej (działa wg obiegu Rankine'a)

Siłownia parowa



Turbina parowa SST-300

Siłownia parowa



Elektrownia Bełchatów – największa na świecie elektrownia parowa na węgiel brunatny.
Sumaryczna moc 13 bloków elektrowni 5354 [MW].

Siłownia parowa



Maszyny parowe wykonane przez studentów.

Siłownia parowa



Pokazy działania maszyn parowych
podczas Nocy Muzeów 2016.

Siłownia gazowa

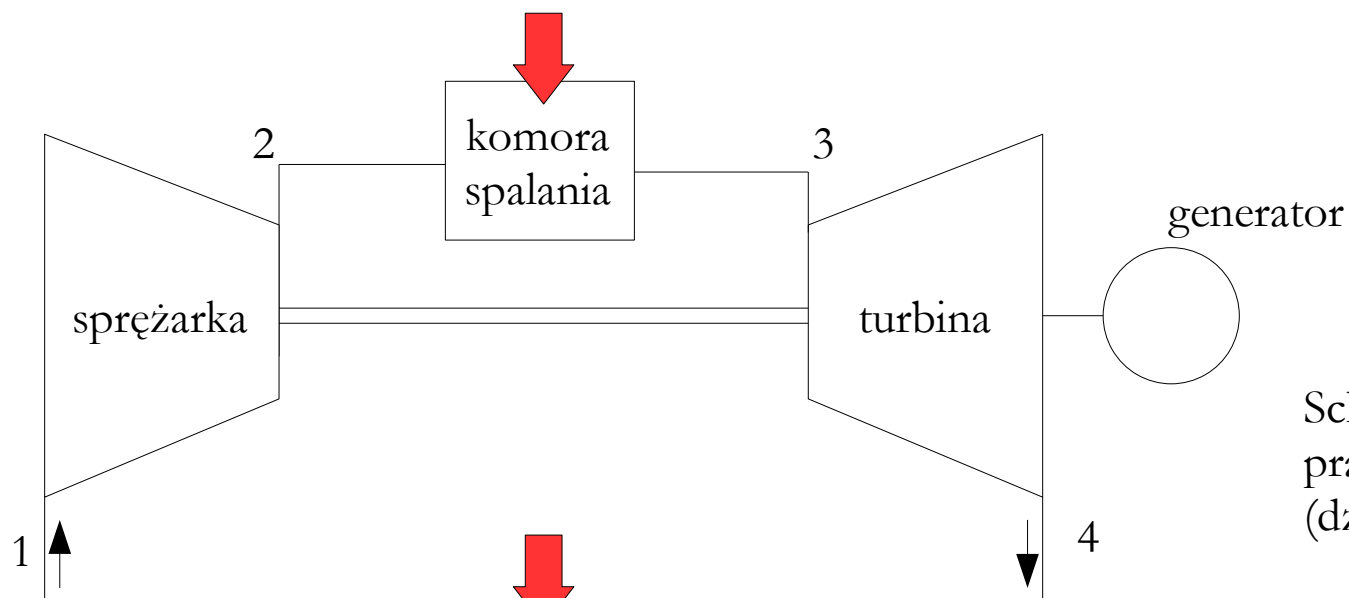
Siłownia gazowa – zespół maszyn i urządzeń mających na celu wytwarzanie mocy mechanicznej z wykorzystaniem turbiny gazowej.

Turbina gazowa – silnik cieplny, który energię napędową pobiera z przepływających spalin lub innego gazu roboczego, zwanego czynnikiem termodynamicznym lub roboczym. Określenie „turbina gazowa” odnosi się do maszyny składającej się ze sprężarki i turbiny (połączonych zwykle wspólnym wałem) oraz komory spalania umieszczonej pomiędzy nimi.

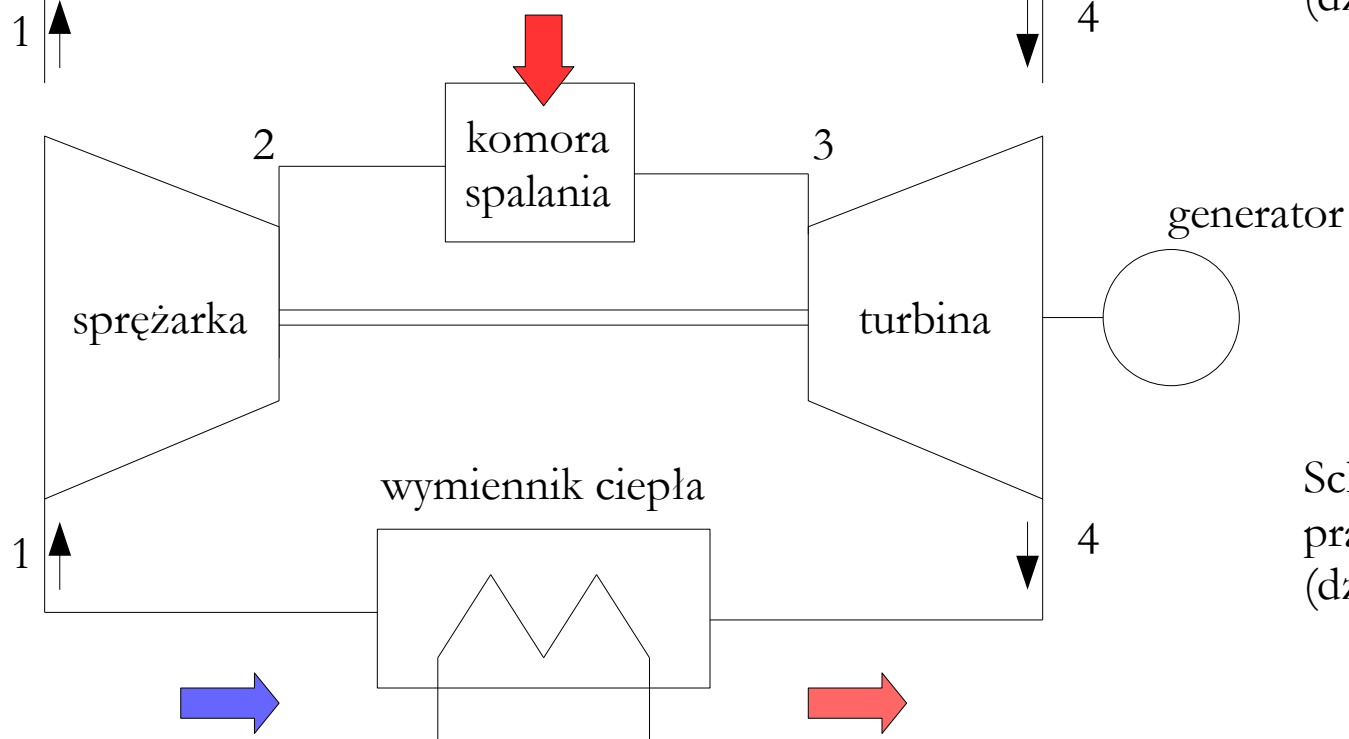
Zastosowania:

- Napęd generatora elektrycznego – w elektrowniach i elektrociepłowniach gazowych i gazowo-parowych;
- Napęd śruby okrętowej okrętów i statków;
- Napęd sprężarek do przetłaczania gazu ziemnego na znacznie odległości (gazociągi).

Siłownia gazowa



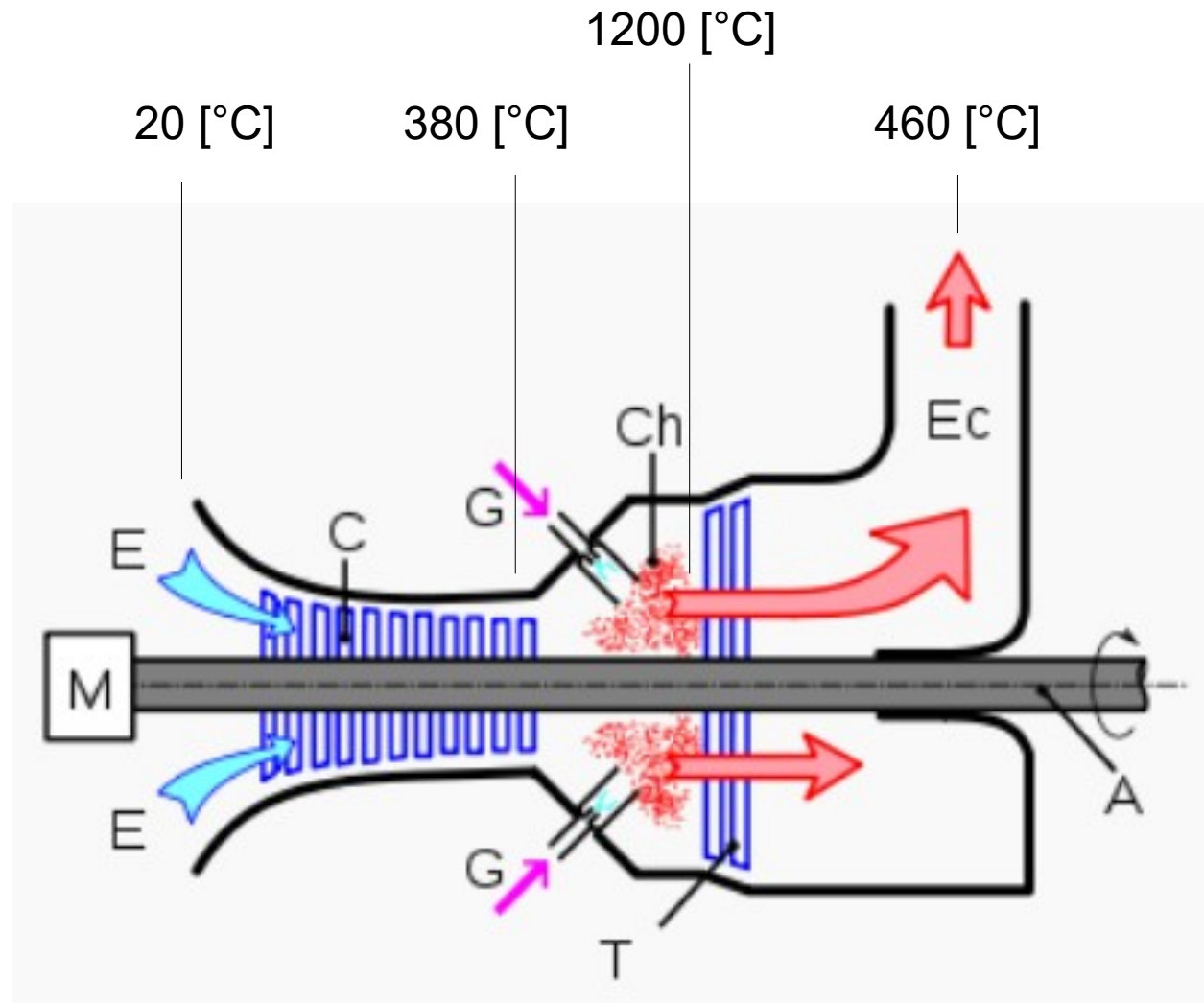
Schemat siłowni gazowej pracującej w układzie otwartym (działa wg obiegu Braytona-Joule'a)



Schemat siłowni gazowej pracującej w układzie zamkniętym (działa wg obiegu Braytona-Joule'a)

Siłownia gazowa

Przykładowe temperatury:



Schemat turbiny gazowej:

E – zasysane z otoczenia powietrze

C – sprężarka

G – palniki

Ch – komora spalania

T – turbina

Ec – spaliny

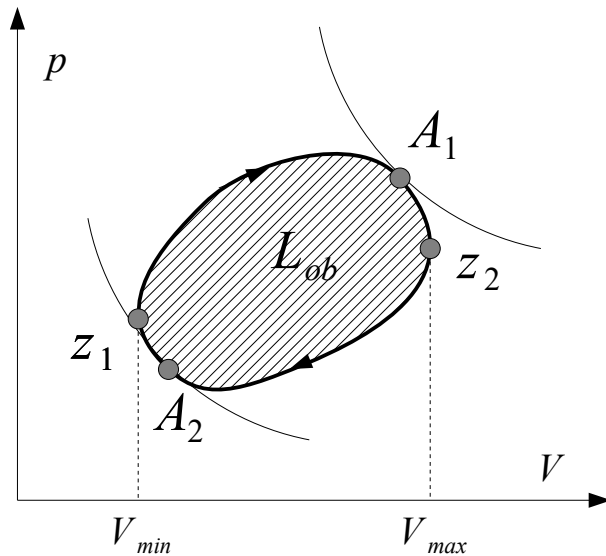
A – wał odprowadzający moc mechaniczną na zewnątrz.

Siłownia gazowa



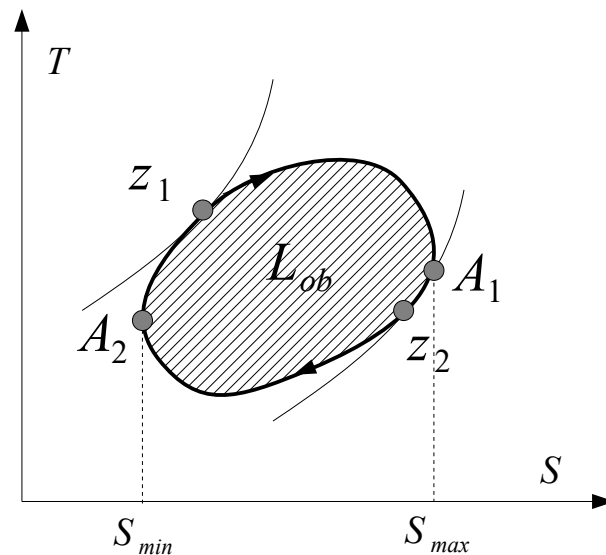
Elektrociepłownia „Lublin-Wrotków” – największa w Polsce elektrownia gazowa.

Punkty charakterystyczne obiegu

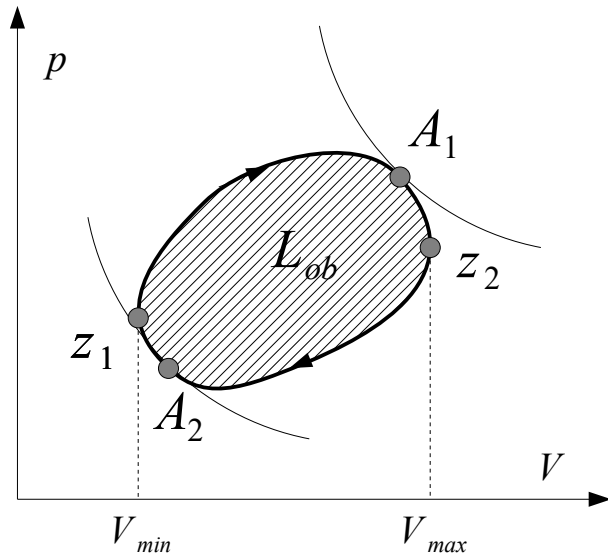


Punkty zwrotne (z_1 i z_2) dzielą obieg na linię ekspansji i linię kompresji.

Punkty adiatermiczne (A_1 i A_2) dzielą obieg na przemianę w której ciepło jest doprowadzane do czynnika termodynamicznego z zewnątrz i przemianę w której ciepło wypływa od czynnika obiegowego.

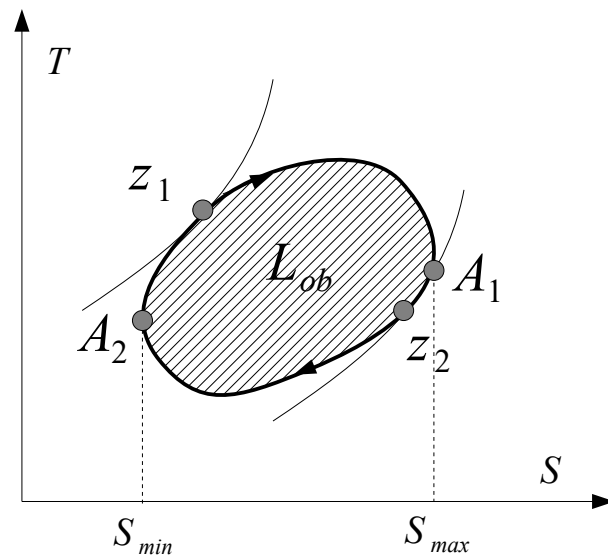


Praca obiegu



Praca obiegu – suma pracy ekspansji i pracy kompresji.

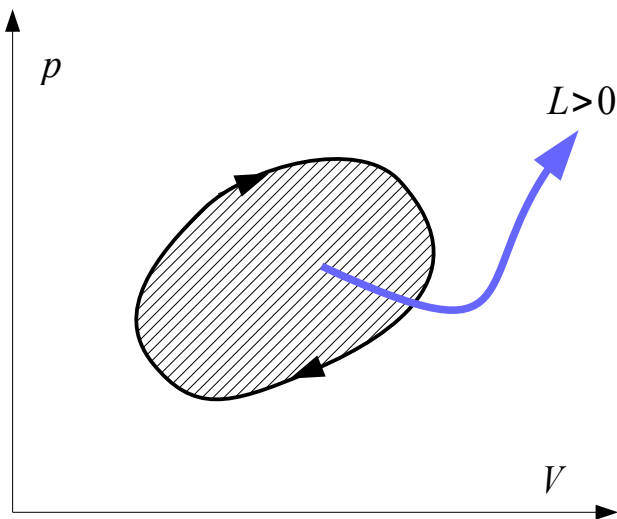
$$L_{ob} = L_e + L_k \quad [J]$$



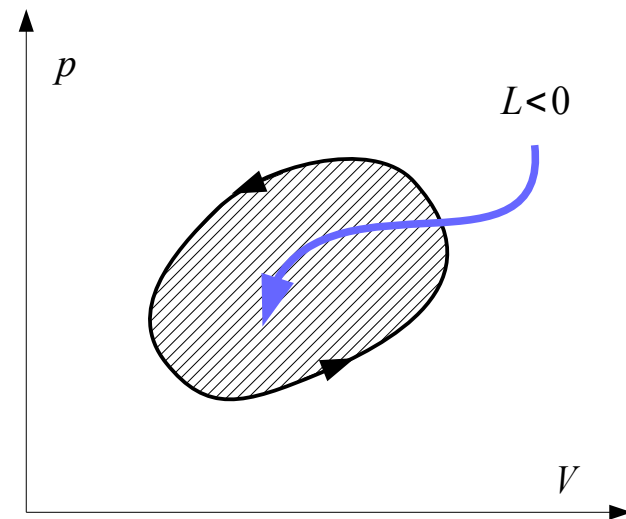
Podczas ekspansji objętość czynnika wzrasta a praca bezwzględna ma wartość dodatnią (pole ograniczone punktami V_{min} - z_1 - A_1 - z_2 - V_{max} - V_{min}). Podczas kompresji natomiast praca bezwzględna ma wartość ujemną (pole ograniczone punktami V_{min} - z_1 - A_2 - z_2 - V_{max} - V_{min}).

Obieg prawobieżny i lewobieżny

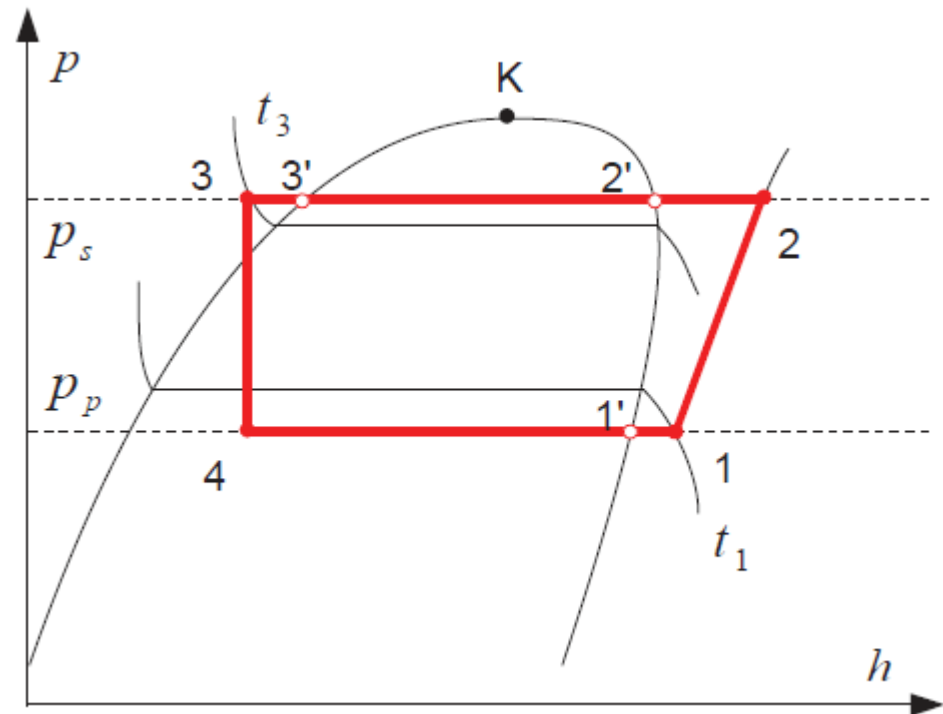
Obieg prawobieżny – obieg, w którym praca jest uzyskiwana (są to obiegi silnikowe).



Obieg lewobieżny – obieg, w którym praca jest wkładana (są to obiegi sprężarkowe lub chłodnicze).

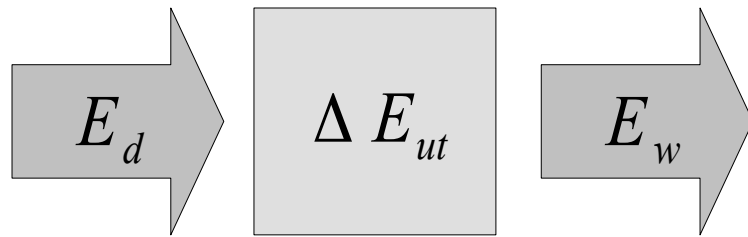


Obieg prawobieżny i lewobieżny



Stanowisko do badania obiegu Lindego, wykonane w ramach pracy inżynierskiej.

Bilans energii obiegu termodynamicznego



w obiegu, w stanie ustalonym, po wykonaniu pełnego cyklu, parametry czynnika termodynamicznego wracają do stanu początkowego

$$E_d = \Delta E_{ut} + E_w$$

$$\leftarrow \Delta E_{ut} = 0$$

$$E_d = E_w$$

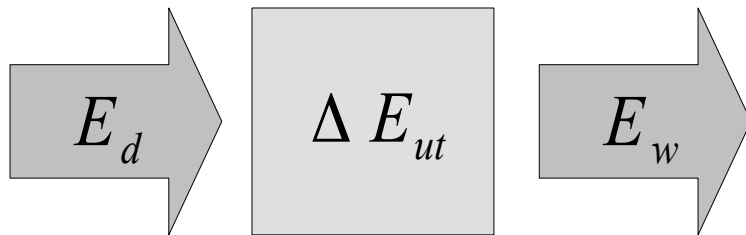
$$E_d = Q_d + L_k$$

$$E_w = Q_w + L_e$$

- | | | | |
|---|-------|---------------------------------|-------|
| { | Q_d | - ciepło doprowadzone do układu | $[J]$ |
| | Q_w | - ciepło wyprowadzone z układu | $[J]$ |
| | L_k | - praca kompresji | $[J]$ |
| | L_e | - praca ekspansji | $[J]$ |

$$Q_d + L_k = Q_w + L_e$$

Bilans energii obiegu termodynamicznego



Dla obiegów prawobieżnych:

$$Q_d > Q_w$$

$$L_{ob} > 0$$

- więcej ciepła się doprowadza niż odbiera, ale za to otrzymuje się pracę (np. silnik cieplny)

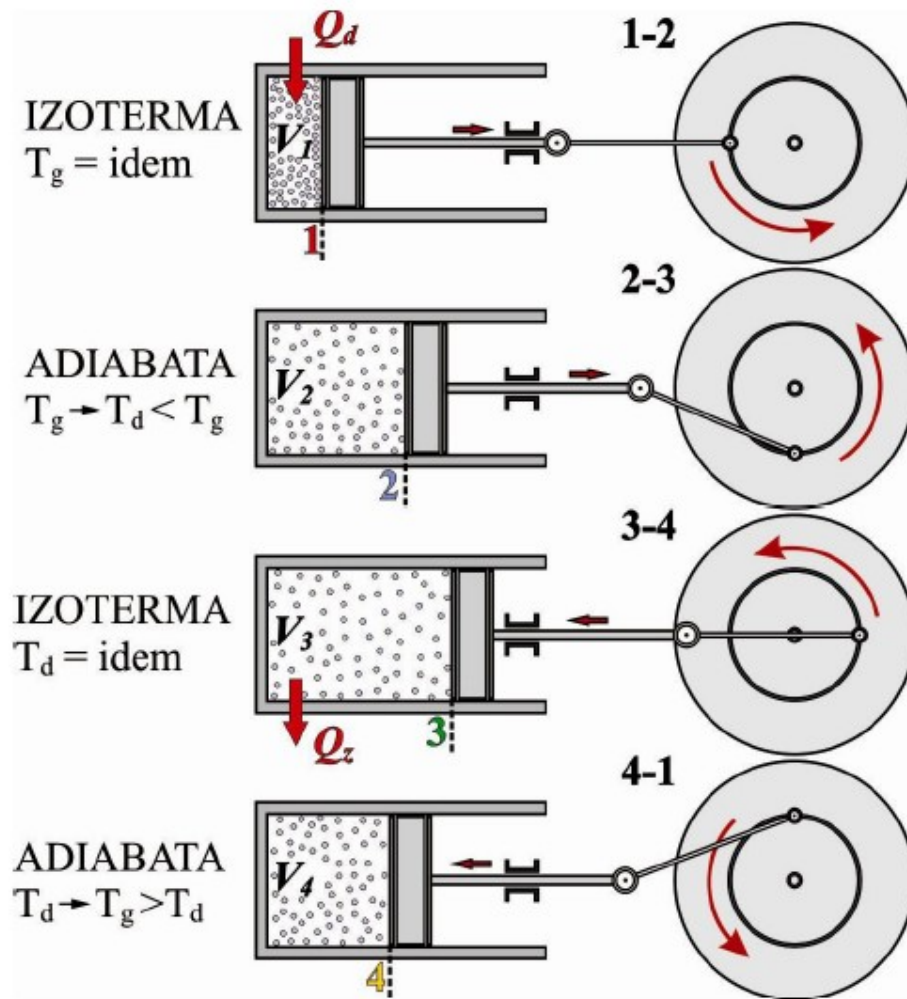
Dla obiegów lewobieżnych:

$$Q_d < Q_w$$

$$L_{ob} < 0$$

- więcej pracy się wkłada niż uzyskuje, ale za to uzyskuje się wzrost pracy wtłoczenia (np. sprężarka) lub pożądany przepływ ciepła (chłodziarka, pompa ciepła)

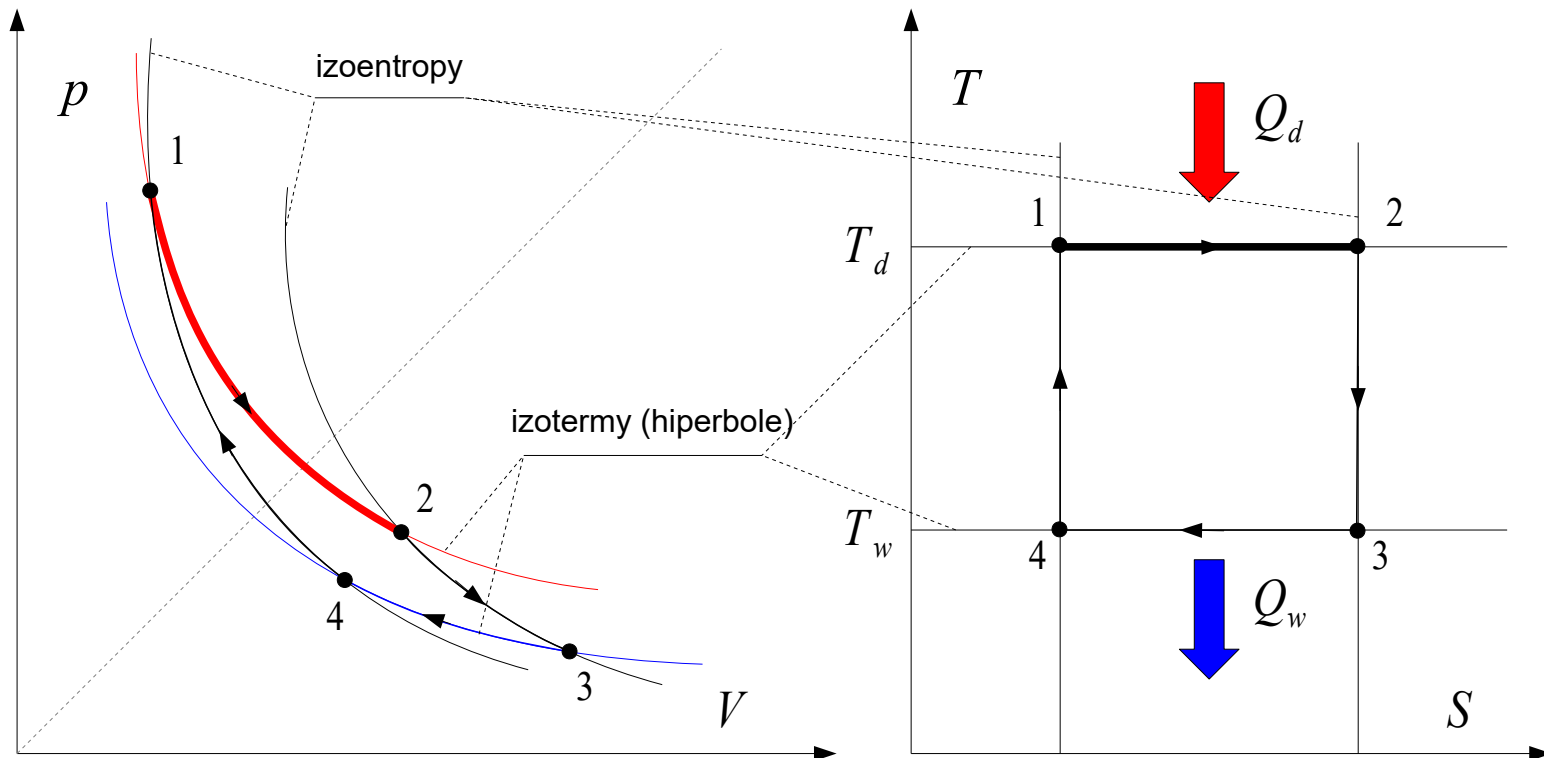
Obieg Carnota



Obieg (cykl) Carnota – obieg cieplny o teoretycznie największej możliwej sprawności. Obieg Carnota może być prawobieżny (gdy dostarcza się ciepło a uzyskuje pracę) lub lewobieżny (gdy wykonuje się pracę a uzyskuje się przepływ ciepła).

[Agnieszka Sadłowska-Sałęga:
Materiały pomocnicze do przedmiotu
Termodynamika techniczna.]

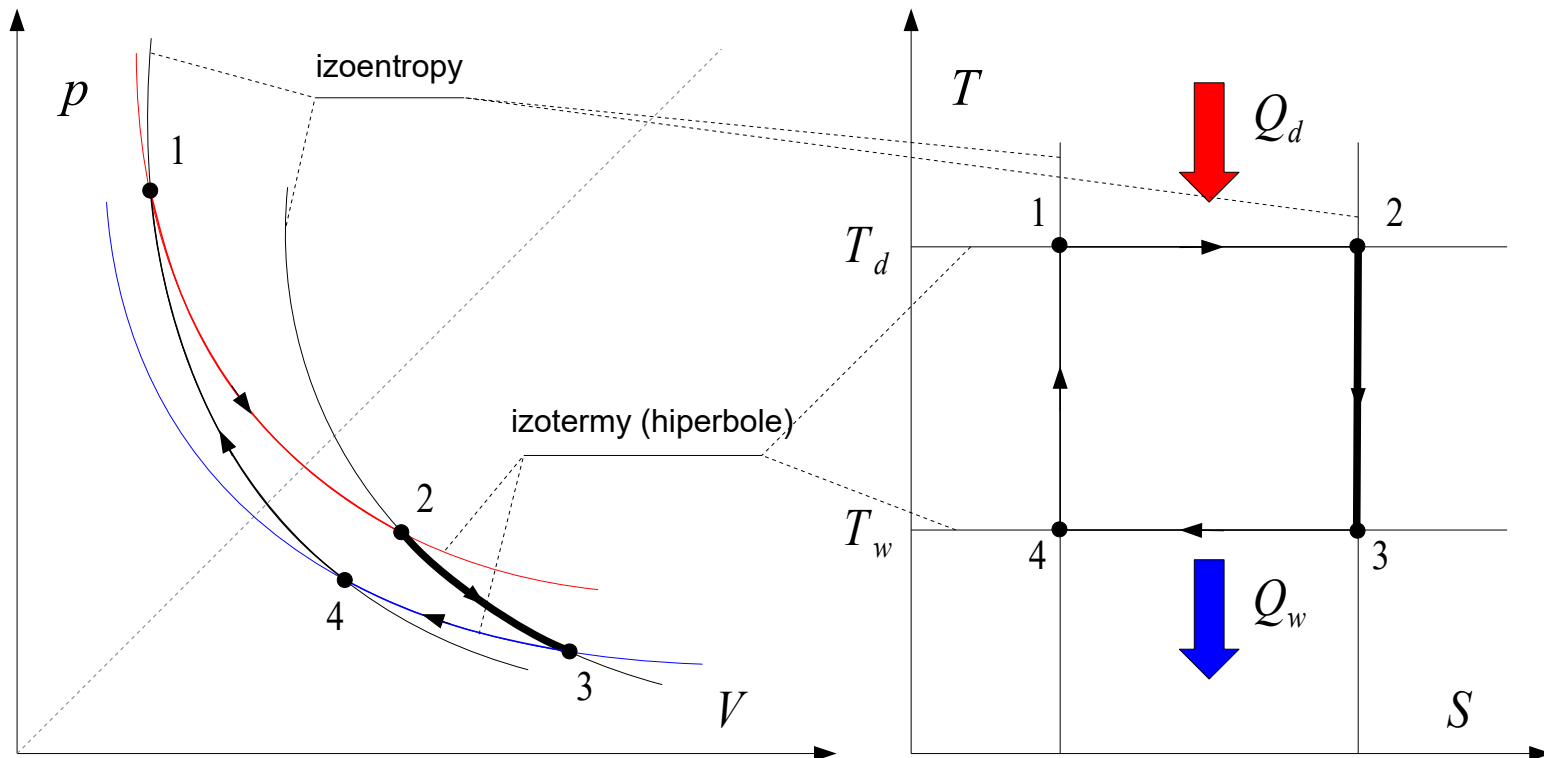
Obieg Carnota



Przemiany w prawobieżnym cyklu Carnota:

1-2: Rozprężanie izotermiczne – czynnik roboczy styka się ze źródłem ciepła, ma jego temperaturę i poddawany jest rozprężaniu izotermicznemu w temperaturze T_d , podczas tego cyklu ciepło Q_d jest pobierane ze źródła ciepła.

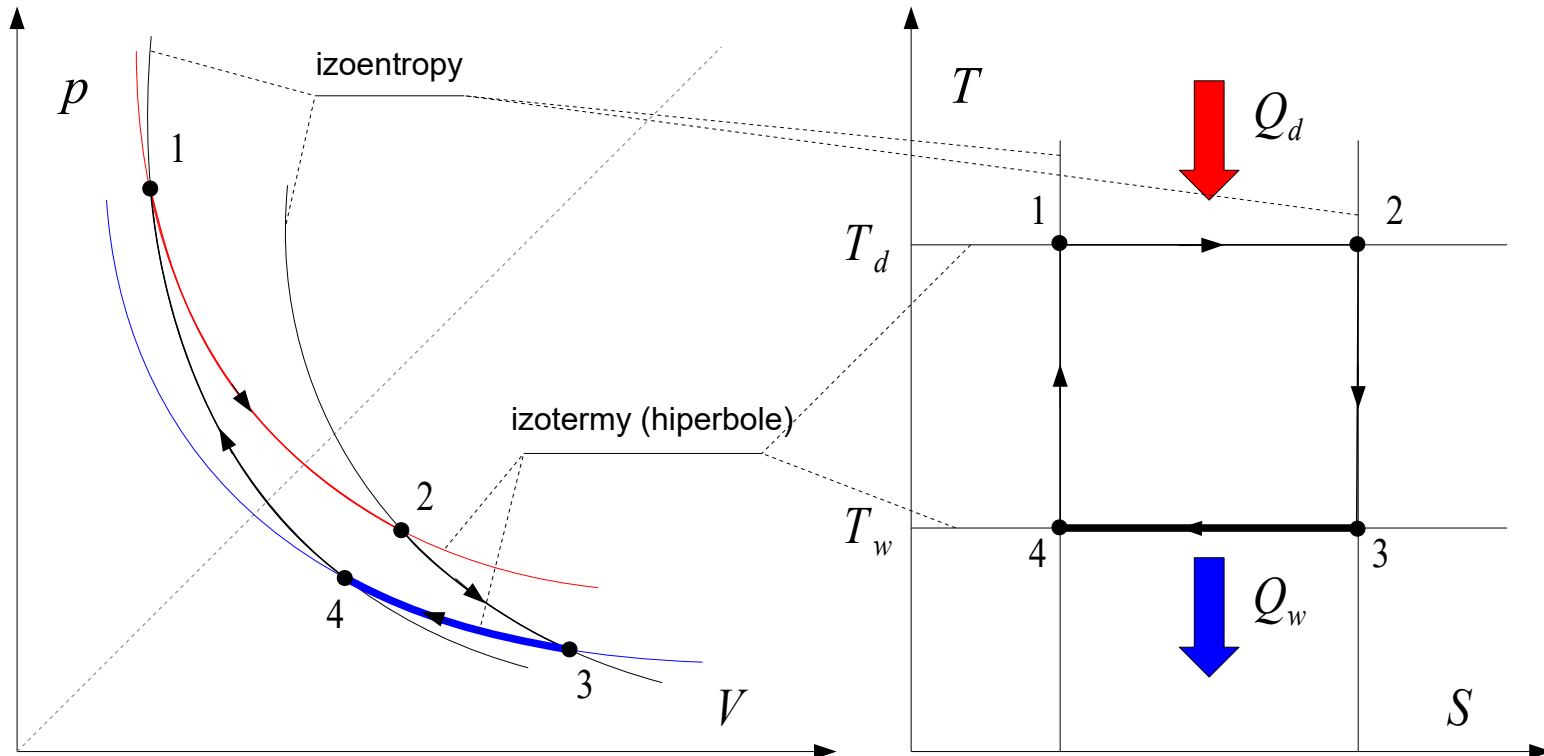
Obieg Carnota



Przemiany w prawobieżnym cyklu Carnota:

2-3: Rozprężanie izoentropowe – czynnik roboczy nie wymienia ciepła z otoczeniem i jest rozprężany, aż czynnik roboczy uzyska temperaturę chłodnicy T_3 .

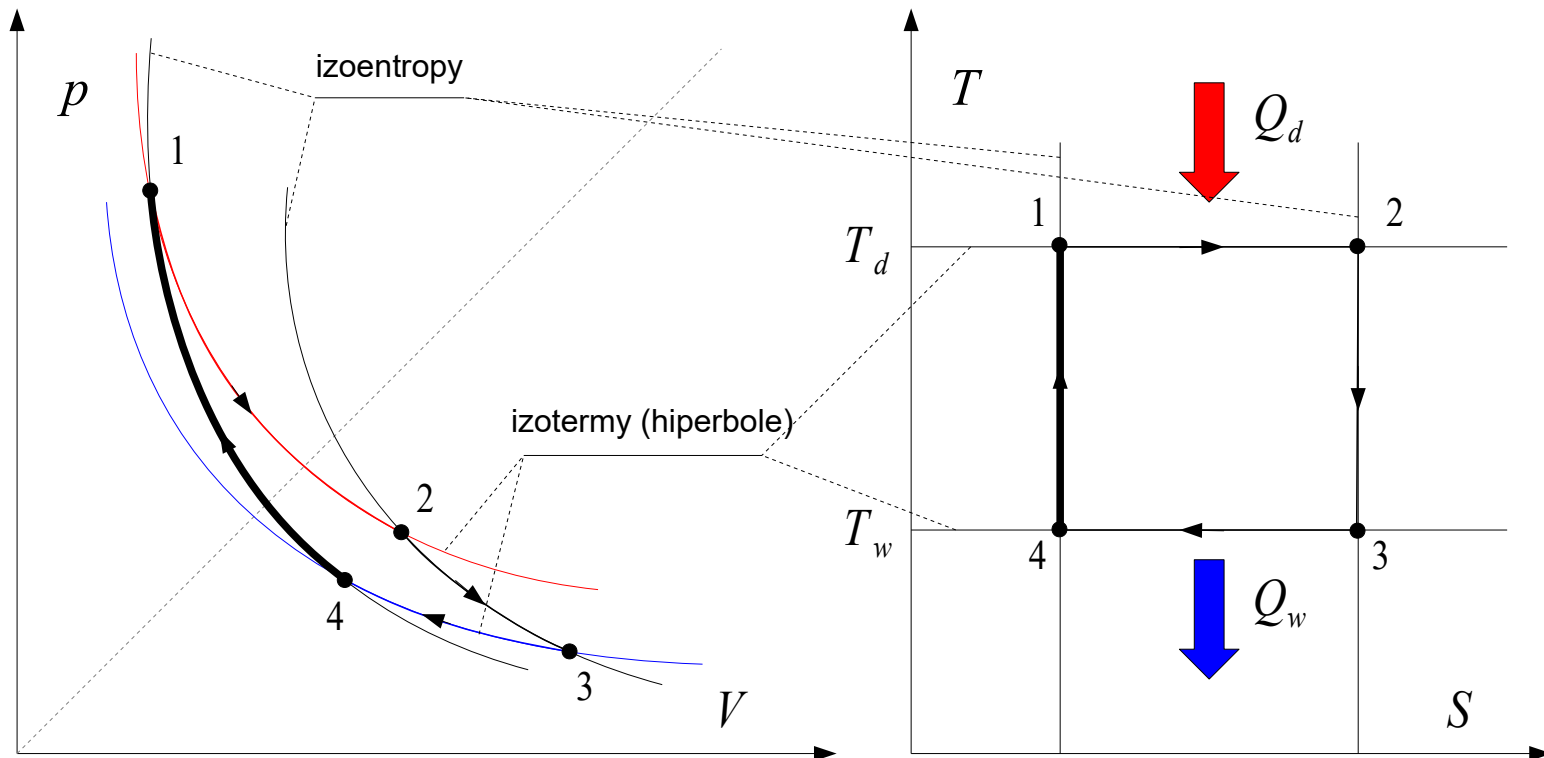
Obieg Carnota



Przemiany w prawobieżnym cyklu Carnota:

3-4: Sprężanie izotermiczne – czynnik roboczy styka się z chłodnicą, ma temperaturę chłodnicy i zostaje poddany procesowi sprężania w tej temperaturze (T_w). Czynnik roboczy oddaje ciepło Q_w do chłodnicy.

Obieg Carnota



Przemiany w prawobieżnym cyklu Carnota:

4-1: Sprężanie izoentropowe – czynnik roboczy nie wymienia ciepła z otoczeniem, jest poddawany sprężaniu, aż uzyska temperaturę źródła ciepła T_d .

I i II Twierdzenie Carnota

Sprawność – stosunek energetycznego efektu użytecznego do kosztu uzyskania tego efektu.

temperatury bezwzględne

$$\eta_{ob} = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q_d - Q_w}{Q_d} = \frac{Q_d}{Q_d} - \frac{Q_w}{Q_d} = 1 - \frac{Q_w}{Q_d} = 1 - \frac{T_w}{T_d} \quad \eta_{ob} < 1$$

$$\left. \begin{aligned} Q_d &= T_d \cdot (S_2 - S_1) \\ Q_w &= T_w \cdot (S_2 - S_1) \end{aligned} \right\} \text{- pole pod krzywą na wykresie T-S}$$

I Tw. Carnota: „Wszystkie silniki pracujące w cyklu odwracalnym pomiędzy tymi samymi temperaturami mają tę samą sprawność”

II Tw. Carnota: „Sprawność cyklu nieodwracalnego jest zawsze mniejsza od sprawności cyklu odwracalnego”

Sprawność obiegu cieplnego

Efektywność (Coefficient Of Performance; COP) – to samo co sprawność, ale używana w kontekście obiegów chłodziarek i pomp ciepła. Słowo to wprowadzono po to, aby uniknąć nieporozumień (zawsze się mówi, że sprawność musi być mniejsza od 1, a w przypadku obiegów lewobieżnych nie zawsze jest to prawdą).

Dla chłodziarek:

$$\epsilon_{ob} = \frac{Q_d}{L_{ob}} = \frac{Q_d}{Q_w - Q_d} \quad \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{ob} < 1 \\ \epsilon_{ob} > 1 \end{array} \right.$$

Chłodziarka służy do obniżenia temperatury w komorze chłodniczej, więc efektem oczekiwanym jest doprowadzenie z komory chłodniczej do układu jak największej ilości ciepła – dlatego też w liczniku występuje Q_d . Mianownik nie może być ujemny, więc zawsze od temperatury wyższej należy odjąć niższą. Efektywność chłodziarek może być mniejsza lub większa od jednośc.

Sprawność obiegu cieplnego

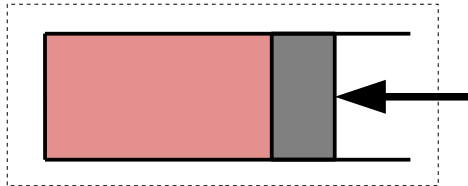
Efektywność (Coefficient Of Performance; COP) – to samo co sprawność, ale używana w kontekście obiegów chłodziarek i pomp ciepła. Słowo to wprowadzono po to, aby uniknąć nieporozumień (zawsze się mówi, że sprawność musi być mniejsza od 1, a w przypadku obiegów lewobieżnych nie zawsze jest to prawdą).

Dla pomp ciepła:

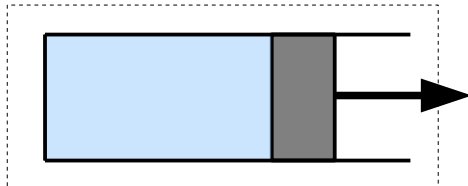
$$\epsilon_{ob} = \frac{Q_w}{L_{ob}} = \frac{Q_w}{Q_w - Q_d} \quad \epsilon_{ob} > 1$$

Pompa ciepła służy do ogrzewania pomieszczeń, więc efektem oczekiwanym jest doprowadzenie z układu do pomieszczenia jak największej ilości ciepła – dlatego też w liczniku występuje Q_w . Mianownik nie może być ujemny, więc zawsze od temperatury wyższej należy odjąć niższą. Efektywność pomp ciepła jest zawsze większa od jedności.

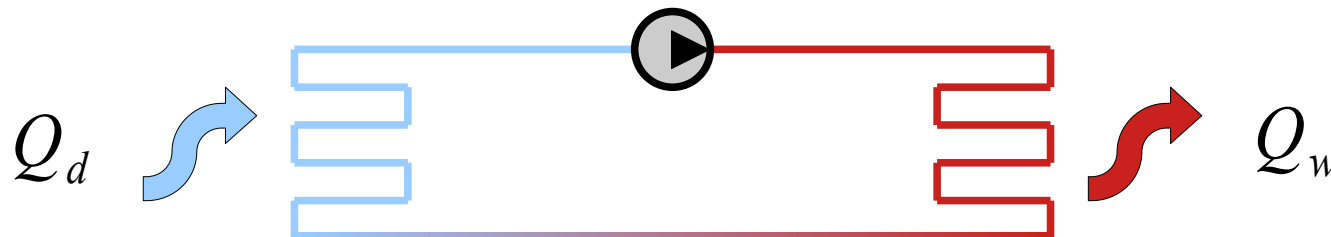
Idea pompy ciepła



gdy spręża się gaz, to jego temperatura rośnie



gdy rozpręża się gaz, to jego temperatura maleje

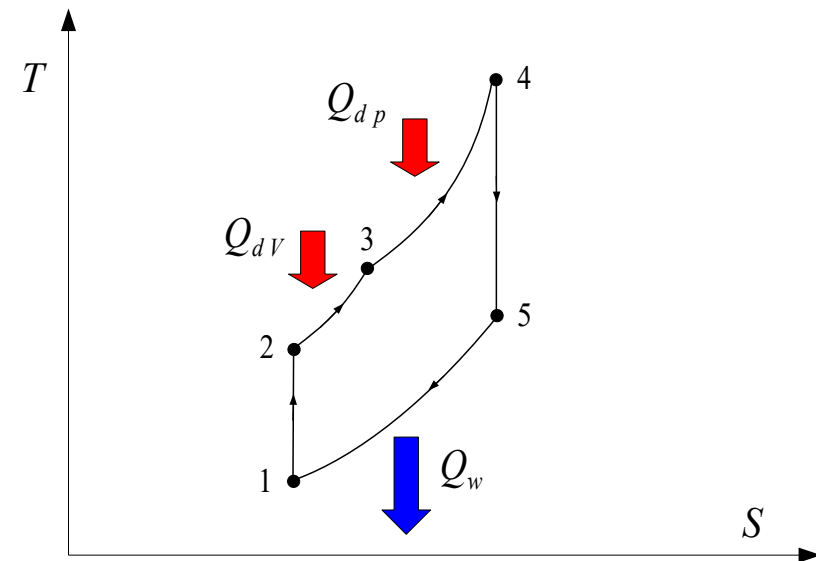
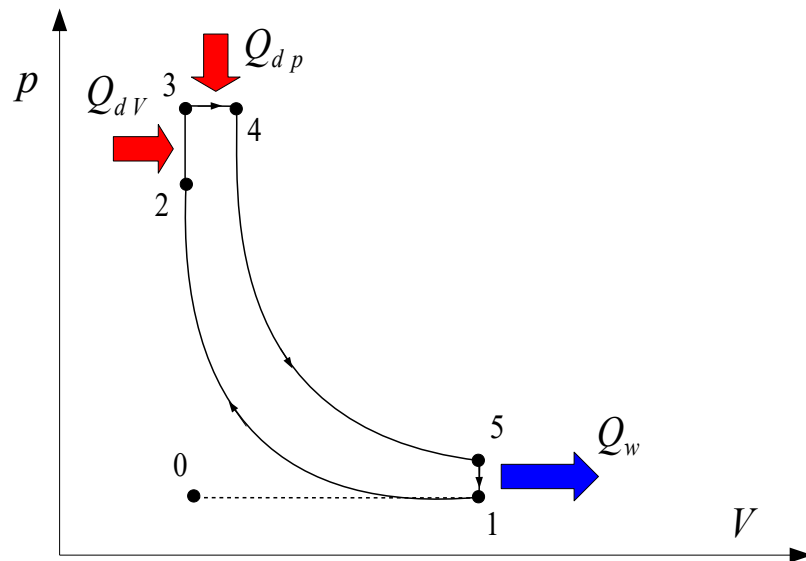


Gdyby poprzez rozprężanie ochłodzić gaz poniżej temperatury otoczenia (np. gruntu), to pobierał by z niego ciepło.

Gdyby poprzez sprężanie podgrzać gaz powyżej temperatury otoczenia (np. domu), to oddawał by do niego ciepło.

Obieg Sabathè (Seiligera)

Obieg Sabathè – ogólny obieg teoretyczny tłokowych silników spalinowych. W obiegu tym ciepło dostarczane jest zarówno poprzez izobaryczne jak i izochoryczne podgrzewanie. Obieg Sabathè najczęściej stosowany jest w odniesieniu do szybkoobrotowych silników z zapłonem samoczynnym (ale może być również używany przy opisie szybkoobrotowych silników z zapłonem iskrowym).



Obieg Sabathè (Seiligera)



Uwaga na nazewnictwo – silniki:

- o zapłonie iskrowym (niskoprężne)
(2000-5000 [obr./min.])
- o zapłonie samoczynnym (wysokoprężne):
 - silniki wolnoobrotowe do 500 obr./min
 - silniki średnioobrotowe 500 - 1500 (1200) obr./min
 - silniki szybkoobrotowe powyżej 1500 obr./min

Kontenerowiec Emma Maersk ma największy niskoobrotowy silnik na świecie: 27 [m], 2300 [ton], 109 000 [km], 102 [obr./min.]

Obieg Sabathè (Seiligera)

$$\eta_{ob} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\phi \cdot \rho^{\kappa} - 1}{(\phi - 1) + \kappa \cdot \phi \cdot (\rho - 1)} \quad - \text{ sprawność obiegu}$$

$$\eta_{ob} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_5}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1 + \kappa \cdot \frac{T_3}{T_2} \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} - 1 \right)} \quad - \text{ sprawność obiegu po podstawieniu współczynników i uwzględnieniu równania stanu}$$

$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad - \text{ stopień sprężania}$$

$$\rho = \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_4}{V_2} \quad - \text{ stopień przyrostu objętości}$$

$$\phi = \frac{p_3}{p_2} \quad - \text{ stopień przyrostu ciśnienia}$$

$$\kappa \quad - \text{ wykładnik adiabaty}$$

Obieg Sabathè (Seiligera)

Obieg Sabathè posiada dwa przypadki graniczne, są to:

obieg Otto – w którym ciepło dostarczane jest tylko przy stałej objętości:

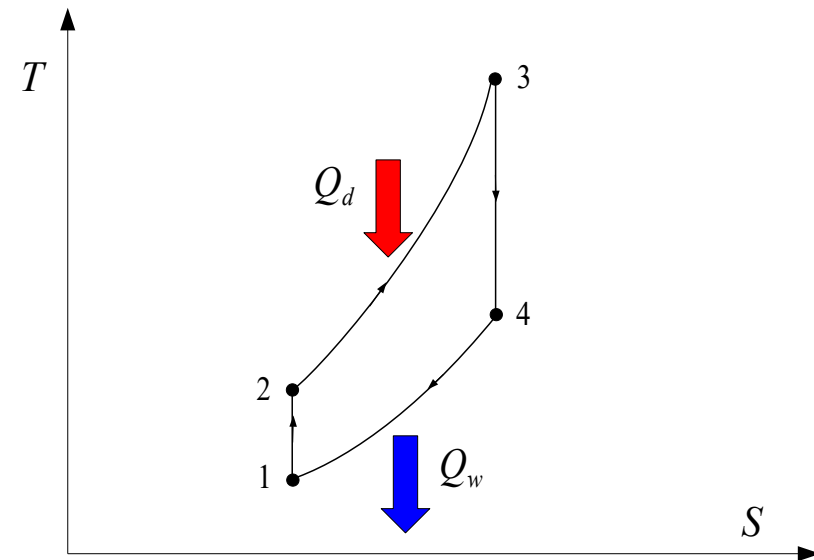
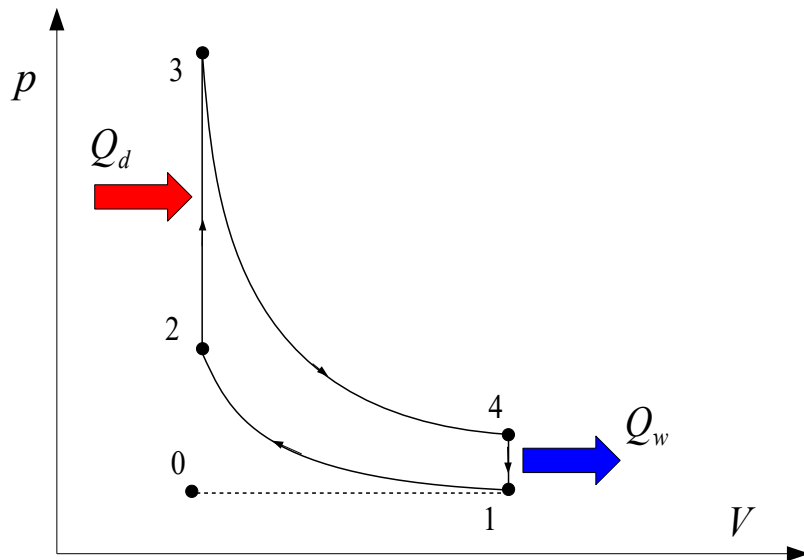
$$\rho = 1 \quad \rightarrow \quad \eta_{ob} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

obieg Diesla – w którym ciepło dostarczane jest tylko przy stałym ciśnieniu (obieg Diesla nie jest obiegiem porównawczym silnika Diesla!):

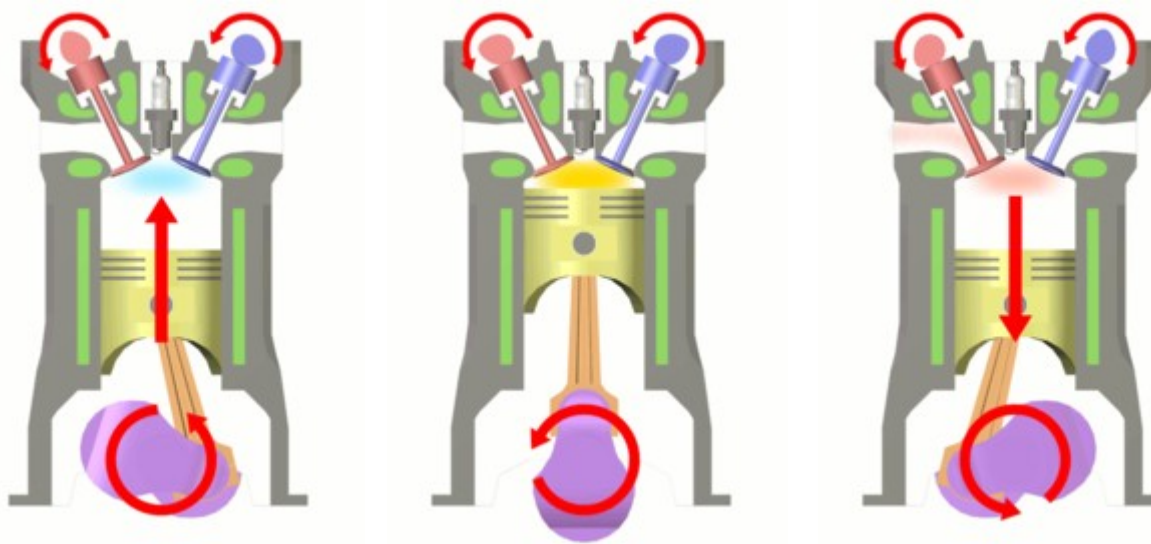
$$\phi = 1 \quad \rightarrow \quad \eta_{ob} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\rho^{\kappa} - 1}{\kappa \cdot (\rho - 1)}$$

Obieg Otto (Beau de Rochas)

Obieg Otto (Beau de Rochas) – prawobieżny, odwracalny obieg termodynamiczny obejmujący cztery następujące procesy składowe: adiabatyczne sprężanie (1-2), izochoryczne ogrzewanie (2-3), adiabatyczne rozprężanie (3-4), izochoryczne rozprężanie (4-1). Cykl Otto jest obiegiem porównawczym tłokowych silników spalinowych z zapłonem iskrowym.



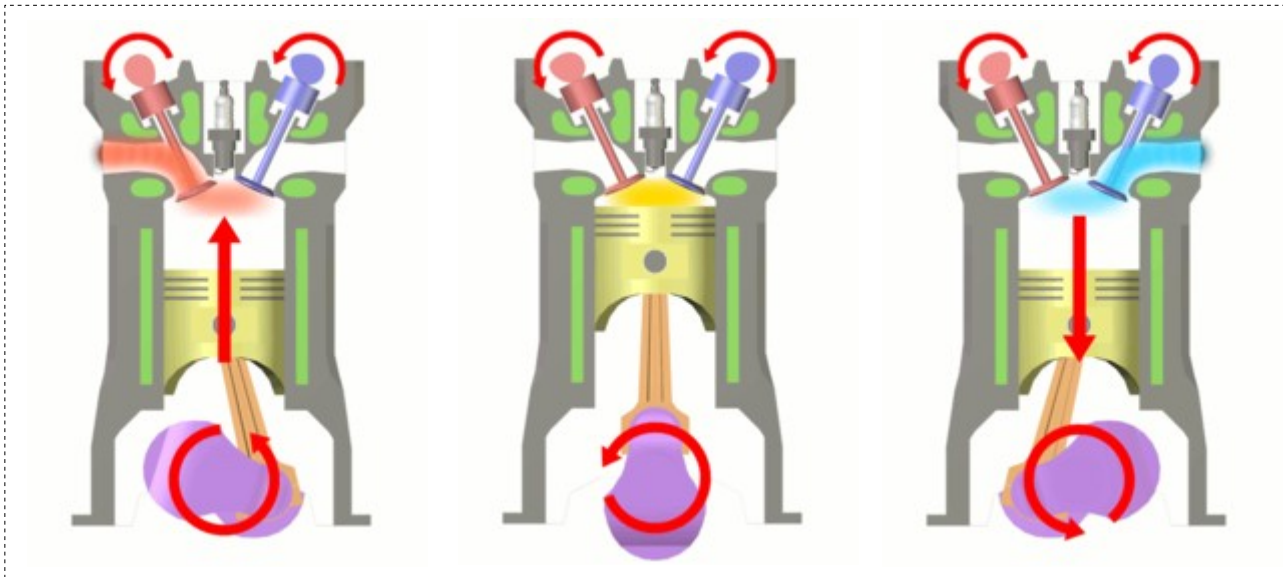
Obieg Otto (Beau de Rochas)



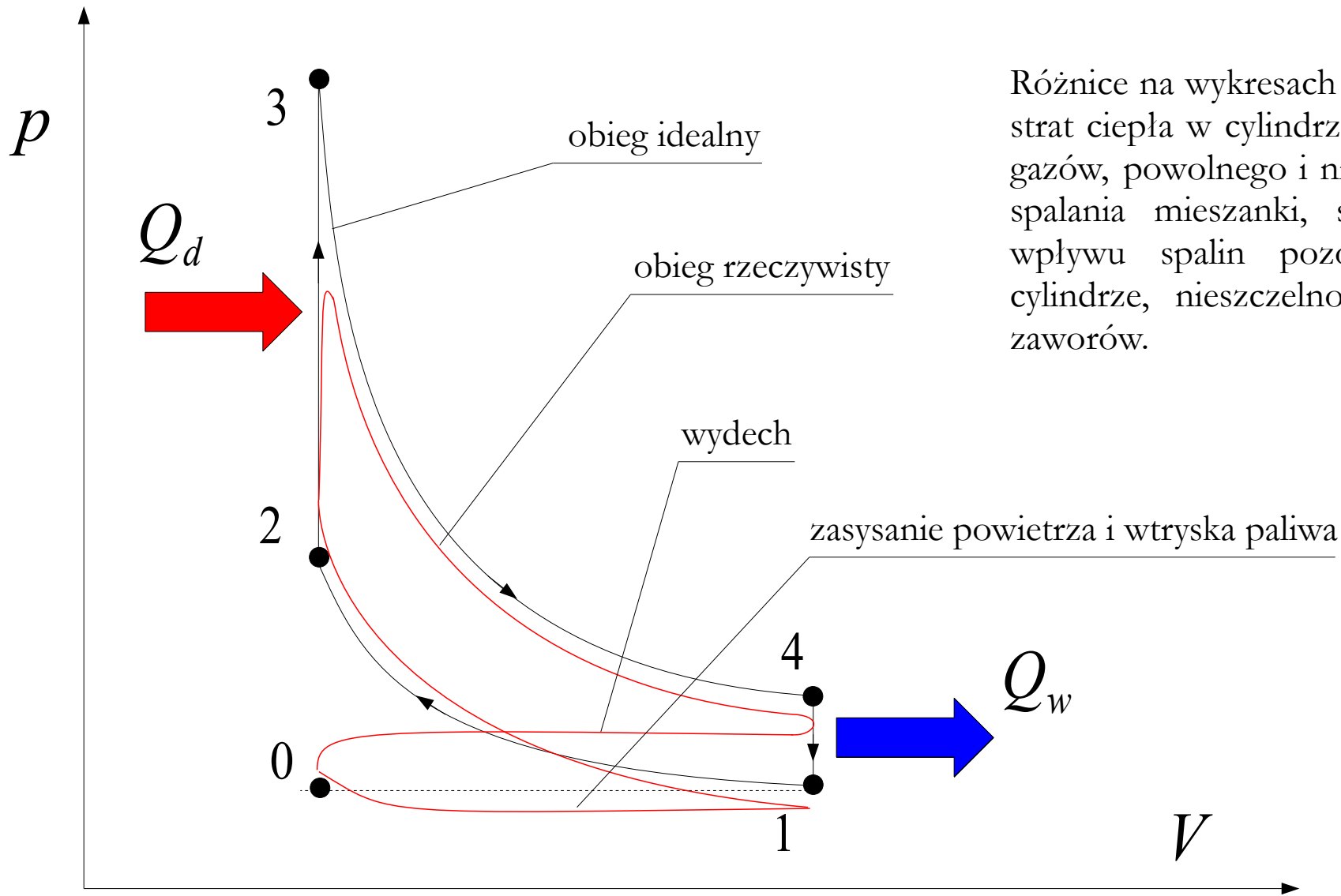
Cykle pracy silnika
o zapłonie iskrowym:

- sprężanie (1-2)
- zapłon paliwa (2-3)
- rozprężanie - praca (3-4)
- chłodzenie (4-1)

w rzeczywistości
czynnik nie jest
chłodzony, ale
wymieniany na
inny, o niższej
temperaturze



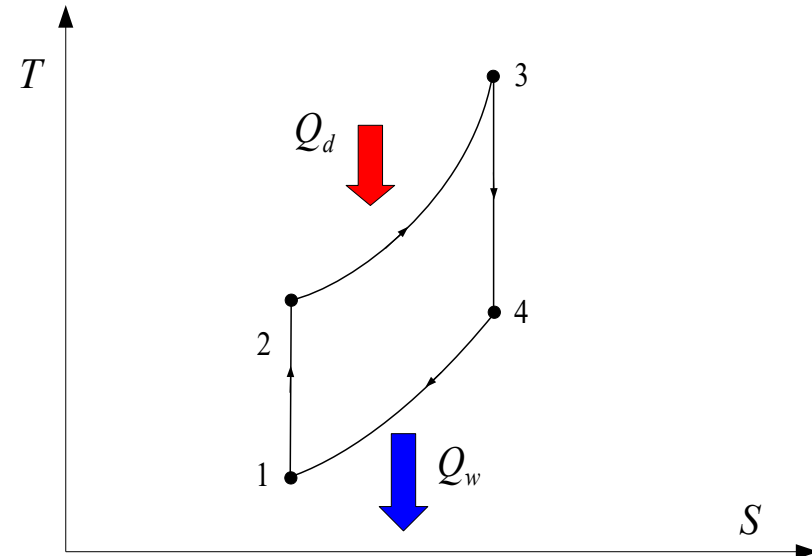
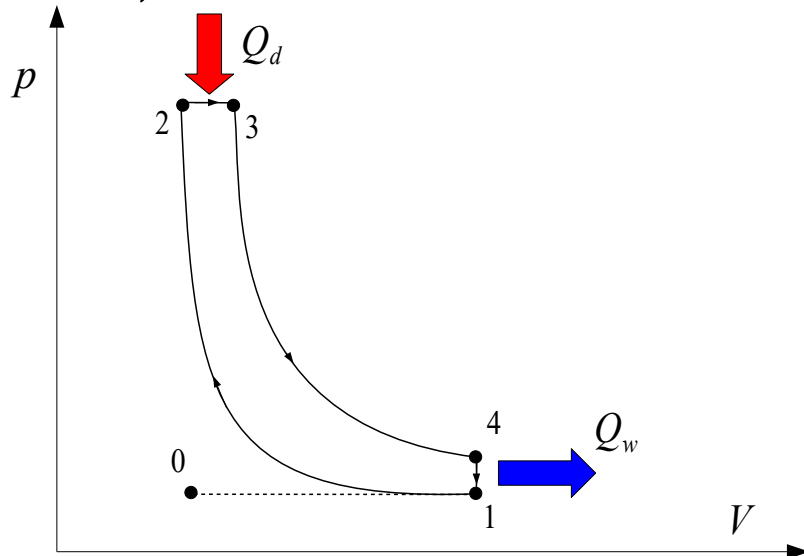
Obieg Otto (Beau de Rochas)



Różnice na wykresach wynikają ze strat ciepła w cylindrze, dławienia gazów, powolnego i niezupełnego spalania mieszanki, szkodliwego wpływu spalin pozostałych w cylindrze, nieszczelności tłoka i zaworów.

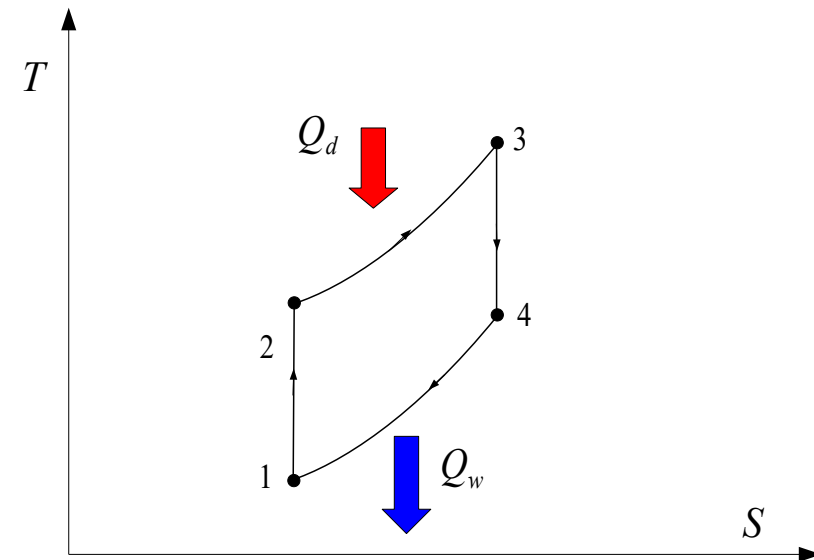
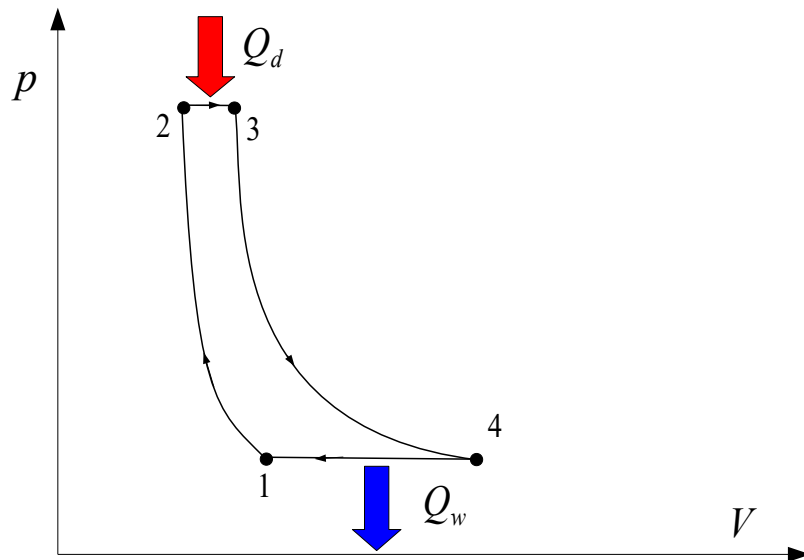
Obieg Diesla

Obieg Diesla – prawobieżny, odwracalny obieg termodynamiczny obejmujący cztery następujące procesy składowe: adiabatyczne sprężanie (1-2), izobaryczne ogrzewanie (2-3), adiabatyczne rozprężanie (3-4), izochoryczne chłodzenie (4-1). Obieg Diesla jest obiegiem porównawczym wolnoobrotowego silnika z zapłonem samoczynnym (gdzie następuje powolne spalanie mieszanki, przy niemalże stałym ciśnieniu).



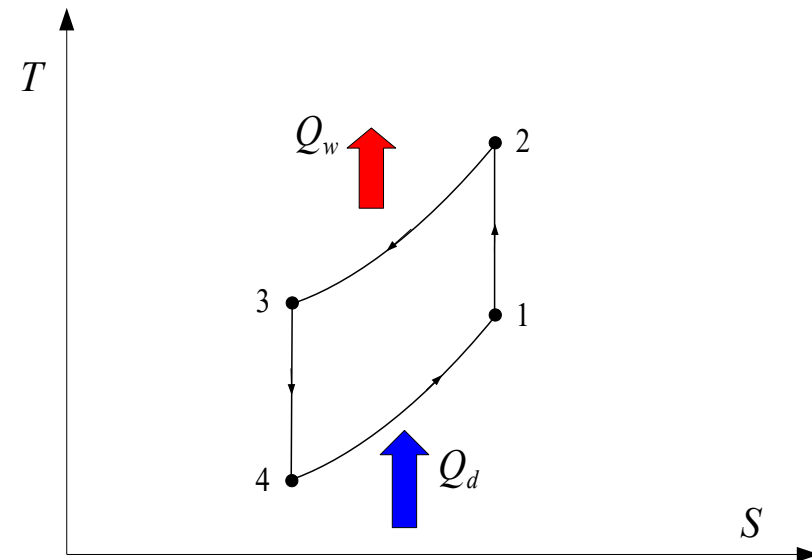
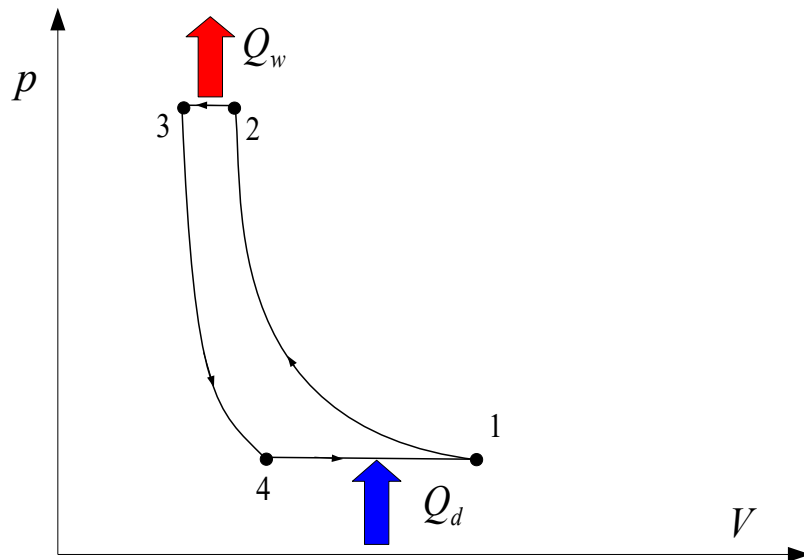
Obieg Braytona-Joule'a

Obieg Braytona-Joule'a – prawobieżny obieg termodynamiczny obejmujący cztery następujące procesy składowe: adiabatyczne sprężanie (1-2), izobaryczne ogrzewanie (2-3), adiabatyczne rozprężanie (3-4), izobaryczne rozprężanie (4-1). Obieg Braytona-Joule'a jest obiegiem porównawczym turbinowych silników spalinowych lub turbin gazowych.



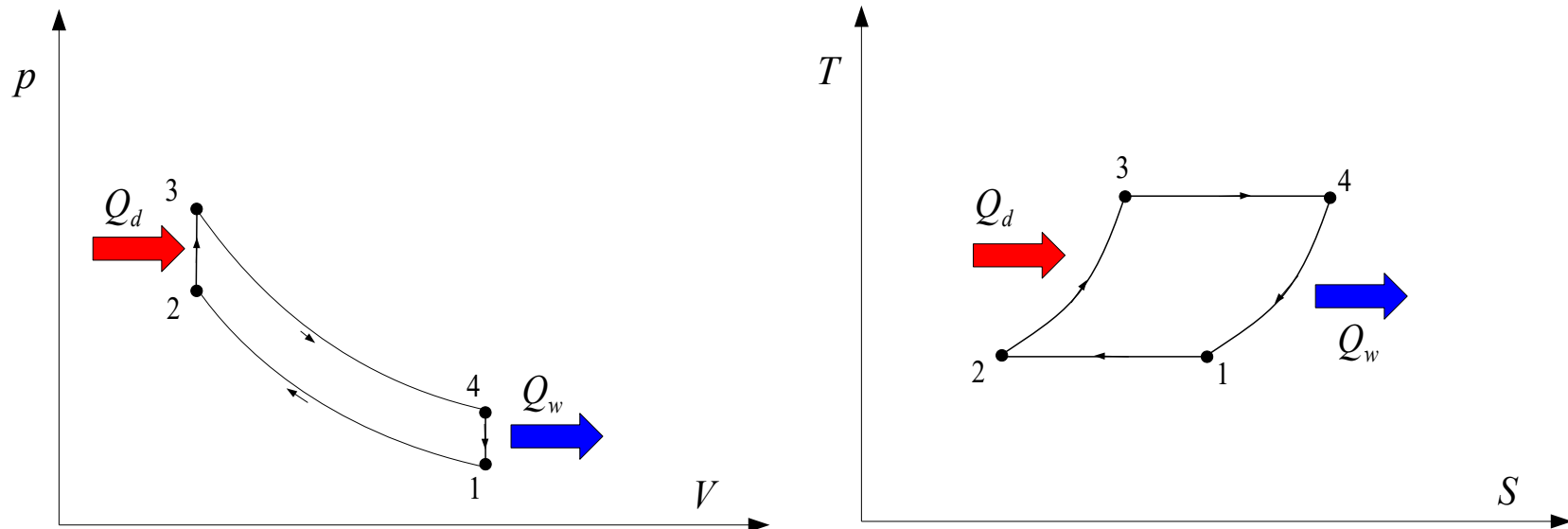
Obieg Joule'a

Obieg Joule'a – lewobieżny obieg termodynamiczny obejmujący cztery następujące procesy składowe: adiabatyczne sprężanie (1-2), izobaryczne ogrzewanie (2-3), adiabatyczne rozprężanie (3-4), izobaryczne rozprężanie (4-1). Obieg Joule'a jest obiegiem porównawczym chłodziarki gazowej.

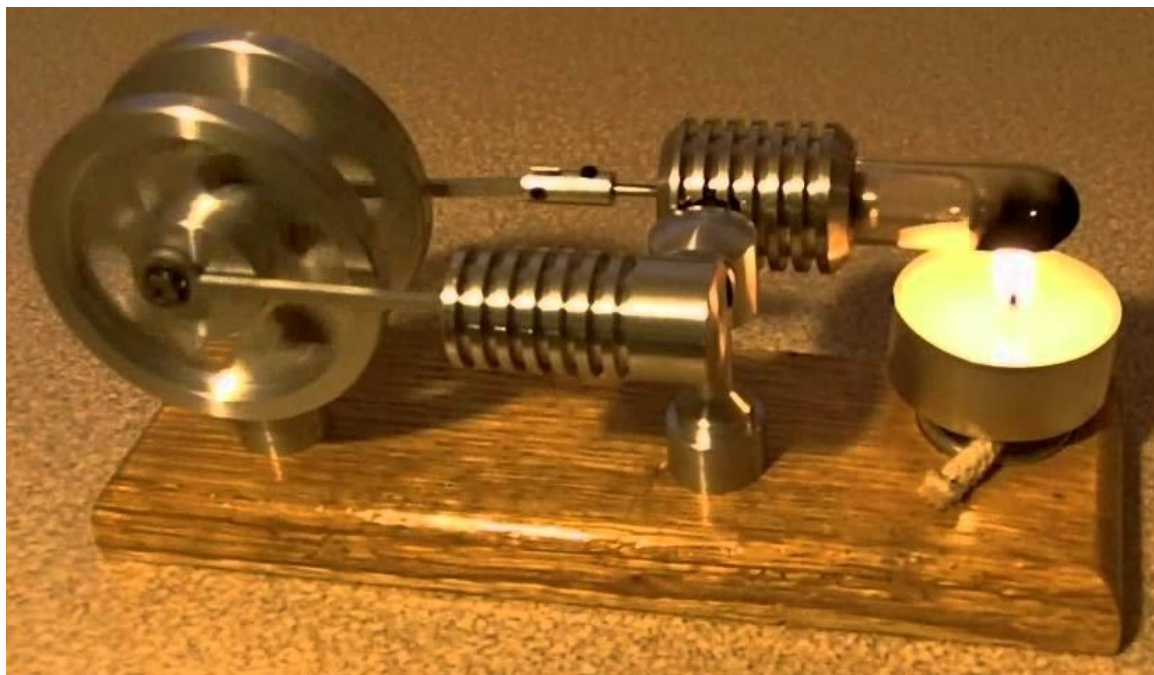


Obieg Stirlinga

Obieg Stirlinga – prawobieżny obieg termodynamiczny obejmujący cztery następujące procesy składowe: izotermiczne sprężanie (1-2), izochoryczne ogrzewanie (2-3), izotermiczne rozprężanie (3-4), izochoryczne rozprężanie (4-1). Obieg Stirlinga jest obiegiem porównawczym silnika Stirlinga.



Obieg Stirlinga

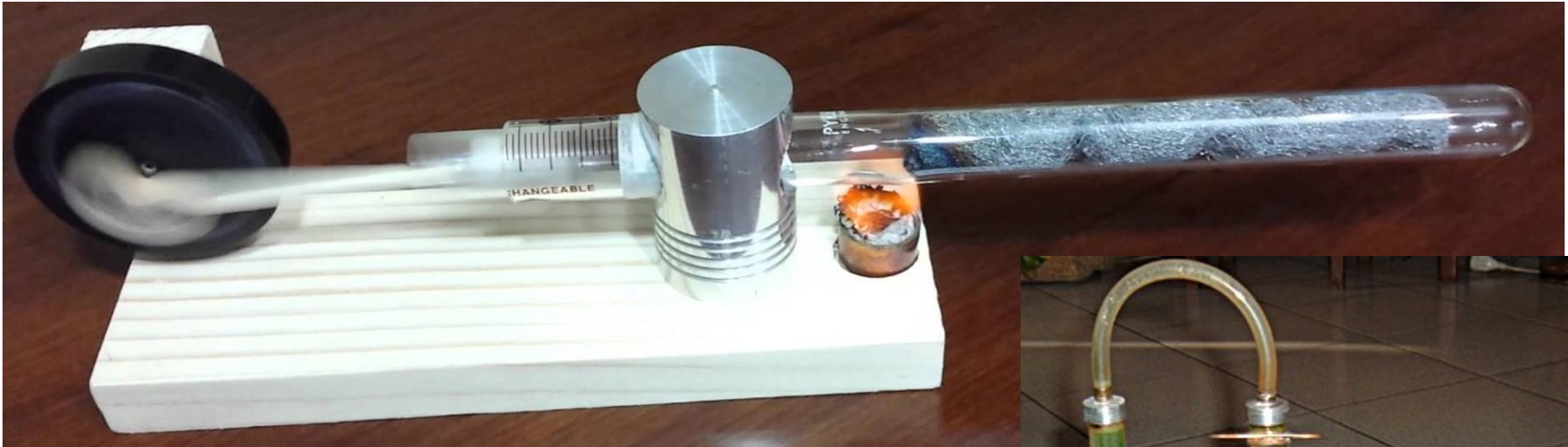


Przykład wysokotemperaturowego silnika Stirlinga.



Przykład niskotemperaturowego silnika Stirlinga.

Obieg Stirlinga



Przykład termoakustycznego silnika Stirlinga.

Fluidyna
(silnik Stirlinga z tłokiem cieczowym)



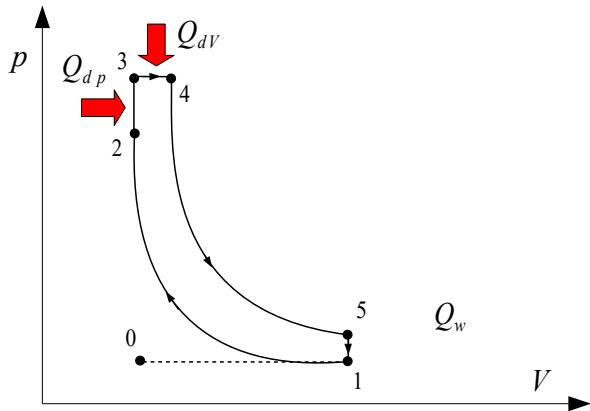
Obieg Stirlinga

Przykład elektrowni słonecznej wykorzystującej silnik Stirlinga.

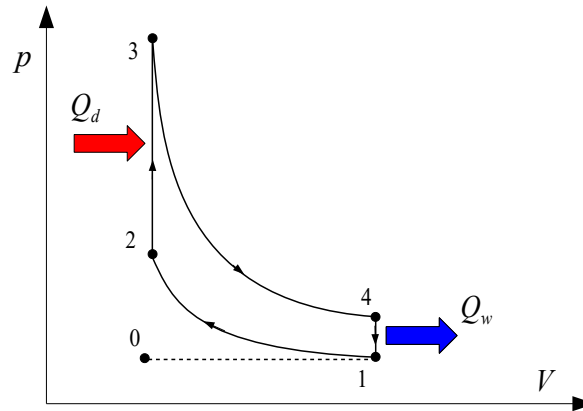


Przykład zastosowania silnika Stirlinga jako „cichego” napędu okrętów podwodnych (Szwecja).

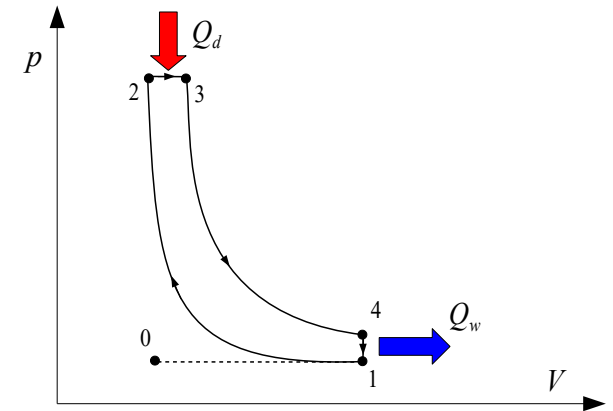
Porównanie wybranych obiegów



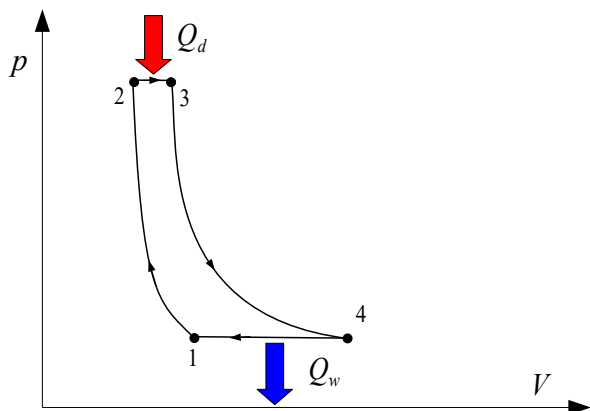
Obieg Sabathè



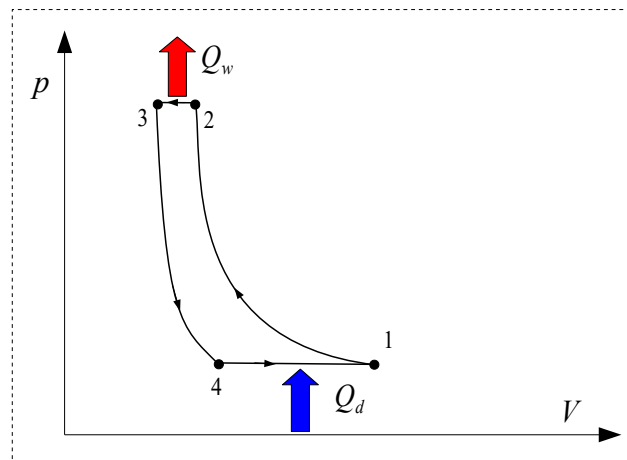
Obieg Otto



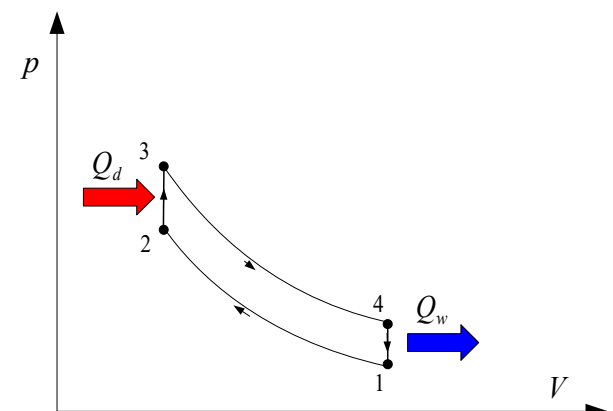
Obieg Diesla



Obieg Braytona-Joule'a



Obieg Joule'a

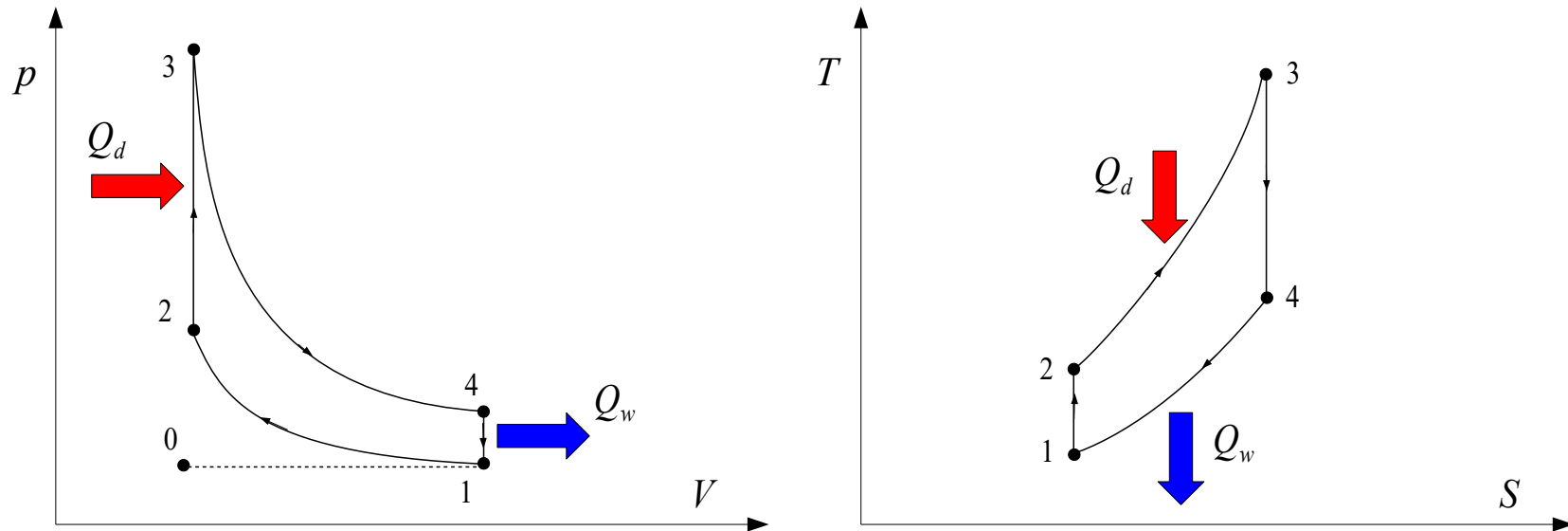


Obieg Stirlinga

Obliczanie obiegów gazowych

Algorytm działania (na przykładzie Zadania 9.2a skryptu W. Pudlika):

- wykonać rysunek obiegu w układzie p-V oraz T-S



Obliczanie obiegów gazowych

Algorytm działania (na przykładzie Zadania 9.2a skryptu W. Pudlika):

- wykonać tabelę wartości w charakterystycznych punktach obiegu (na podstawie treści zadania)

	1	2	3	4
ciśnienie [Pa]	100000		5000000	
objętość [m ³]	0.0005			0.0005
temperatura [K]	300		2000	

Obliczanie obiegów gazowych

Algorytm działania (na przykładzie Zadania 9.2a skryptu W. Pudlika):

- obliczyć brakujące wartości parametrów na podstawie równania stanu gazu doskonałego oraz równań odpowiednich przemian termodynamicznych

	1	2	3	4
ciśnienie [Pa]	100000	1678655	5000000	297703
objętość [m ³]	0.0005	0.00006667	0.00006667	0.0005
temperatura [K]	300	671.64	2000	893.3

Obliczanie obiegów gazowych

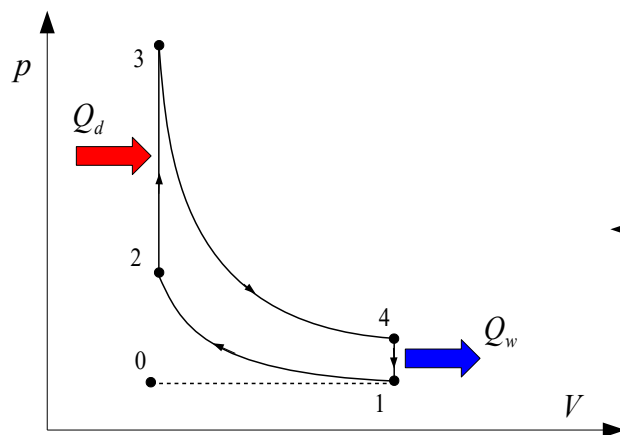
Algorytm działania (na przykładzie Zadania 9.2a skryptu W. Pudlika):

- obliczyć ciepło doprowadzone do układu

$$Q_d = Q_{2-3} = m \cdot c_V \cdot (T_3 - T_2)$$

- obliczyć ciepło wyprowadzone z układu

$$Q_w = Q_{4-1} = m \cdot c_V \cdot (T_1 - T_4)$$



w tym przypadku
oba ciepła są
przekazywane przy
stałej objętości

Obliczanie obiegów gazowych

Algorytm działania (na przykładzie Zadania 9.2a skryptu W. Pudlika):

- obliczyć pracę obiegu jako różnicę ciepła doprowadzonego i odprowadzonego

$$L_{ob} = Q_d - |Q_w|$$

- obliczyć moc teoretyczną

$$N_{teor} = L_{ob} \cdot n_{\text{cykli na sekundę}} \cdot n_{\text{cylindrów}}$$

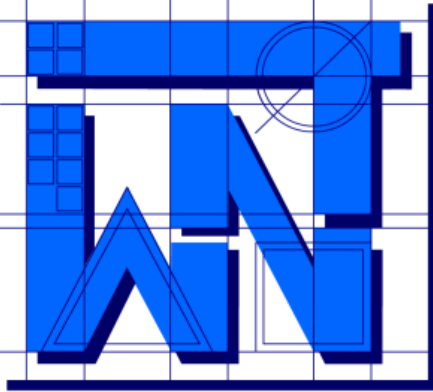
- obliczyć sprawność

$$\eta_{ob} = \frac{L_{ob}}{Q_d}$$

Podsumowanie

Zagadnienia:

Obieg termodynamiczny, obieg porównawczy i rzeczywisty, siłownia parowa, siłownia gazowa, punkty charakterystyczne obiegu, praca obiegu, obieg prawobieżny i lewobieżny, bilans energii obiegu termodynamicznego, obieg Carnota, I i II twierdzenie Carnota, sprawność obiegu cieplnego, efektywność obiegu cieplnego, obieg Sabathè, obieg Otto, obieg Diesla, obieg Braytona-Joule'a, obieg Joule'a, obieg Stirlinga, obliczanie obiegów gazowych.



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



Dziękuję za uwagę

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2024