

WPLYW ZMIENNYCH WLASNOŚCI CZYNNIKA ROBOCZEGO NA PARAMETRY KLASYCZNYCH OBIEGÓW OTTO, DIESLA I SABATHEGO

Grzegorz PUŁAWSKI*

*Zakład Techniki Ciepłej i Chłodnictwa, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,
ul. Wiejska 45C 15-351 Białystok

gpulawski@gmail.com

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ zmiennych właściwości czynnika roboczego na parametry w charakterystycznych punktach klasycznych obiegów silników tłokowych wewnętrznego spalania takich jak Otto, Diesel i Sabathe oraz na sprawność konwersji energii wyznaczaną z zastosowaniem tych obiegów. Wyniki analiz przedstawiono w postaci tabel i wykresów obrazujących zmiany parametrów obiegu wskutek zmienności ciepła właściwego czynnika roboczego.

1. WPROWADZENIE

Rzeczywiste obiegi przedstawiane są na wykresach indykatorowych w układzie współrzędnych p-V. W celu analitycznego badania procesów konwersji w obiegach, wykresy indykatorowe zostają przybliżone obiegami porównawczymi, złożonymi jedynie z termodynamicznych przemian odwracalnych. Obiegi takie zachowują sekwencję przemian cyklu oraz przybliżają ich drogę relatywnie prostymi formułami.

Szereg opracowań dotyczących analizy obiegów porównawczych (Rychter i Teodorczyk, 2006; Szargut, 1998, 2000) zawiera założenie, iż czynnik roboczy obiegu posiada stałe właściwości, co przy znacznych różnicach temperatur w trakcie cyklu powoduje, że pozyskiwane wyniki znacznie odbiegają od rzeczywistych wartości. Jest to spowodowane tym, iż w warunkach rzeczywistych czynnik roboczy zmienia swe właściwości wraz ze zmianą temperatury. Zatem różnicę między obiegami porównawczymi a rzeczywistymi można zmniejszyć poprzez wprowadzenie zmienności wartości ciepła właściwego od temperatury. Analiza obiegów porównawczych z uwzględnieniem wpływu zmienności ciepła właściwego podejmowane były kilkakrotnie przez badaczy (Ge i inni, 2005; Al-Sarkhi i inni, 2006; Chen i inni, 2006). Autorzy prezentowali wyniki uwzględniające wpływ zmiennych właściwości na parametry badanych obiegów, natomiast nie skonfrontowali otrzymanych wyników z wykresami dla obiegów ze stałymi właściwościami. Dlatego też w niniejszym artykule analizie poddane zostaną zarówno parametry obiegów ze stałymi właściwościami, jak również ze zmiennymi właściwościami czynnika roboczego w celu określenia wpływu tego założenia na wyniki analiz. W tym celu stworzono modele matematyczne obiegów ze stałymi i zmiennymi właściwościami czynnika oraz przeprowadzono analizę każdego z nich, a wyniki zestawiono na wspólnych wykresach obrazujących różnice między obydwoimi obiegami.

2. ANALIZA OBIEGÓW ZE STAŁYMI WŁAŚCIWOŚCIAMI CZYNNIKA ROBOCZEGO

Jako bazę odniesienia do oceny wpływu zmiennych właściwości czynnika roboczego w artykule najpierw przedstawiono obiegi o stałych właściwościach. W obiegach tych powietrze bezustannie porusza się w układzie zamkniętym i zachowuje się jak gaz doskonały. Wszystkie procesy tworzące cykl są wewnątrznie odwracalne. Proces spalania zastąpiony jest przez dostarczenie ciepła z zewnętrznego źródła. Proces wymiany ładunku zastąpiony jest procesem odprowadzenia ciepła, po którym czynnik powraca do stanu początkowego.

Czynnik roboczy posiada stałe ciepło właściwe, zatem wartości przyjmowane są dla powietrza suchego w temperaturze $T=300K$ oraz ciśnieniu $P=95kPa$, zgodnie z 0.

Tab. 1. Parametry obiegów ze stałymi właściwościami

c_v [kJ/kg·K]	c_p [kJ/kg·K]	R [kJ/kg·K]	k [-]
0,718	1,005	0,287	1,4

2.1. Obieg Otto

Obieg Otto to obieg z doprowadzeniem ciepła przy stałej objętości. Składa się z czterech wewnątrznie odwracalnych procesów: izentropowego sprężania 1-2, izochorycznego doprowadzenia ciepła 2-3, izentropowego rozprężania 3-4, izochorycznego odprowadzenia ciepła 4-1.

Do stworzenia modelu matematycznego obiegu posłużyły zależności (1-6), natomiast parametry obiegu zaprezentowano w 0. W modelu obliczeniowym przyjęto stopień sprężania $\varepsilon=8$ oraz stopień przyrostu ciśnienia $\alpha=2,8$.

W przypadku obiegu Otto ciepło doprowadzone opisuje poniższe równanie:

$$Q_{dop} = c_v(T_3 - T_2) \quad (1)$$

Przyrost entropii na skutek doprowadzonego ciepła:

$$s_3 - s_2 = c_v \ln \frac{T_3}{T_2} + R \ln \frac{V_3}{V_2} \quad (2)$$

Ciepło odprowadzone:

$$Q_{odp} = c_v(T_4 - T_1) \quad (3)$$

Posługując się równaniem izentropy, dla sprężania 1-2 i rozprężania 3-4 można zapisać zależności:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon_s^{k-1} \quad (4)$$

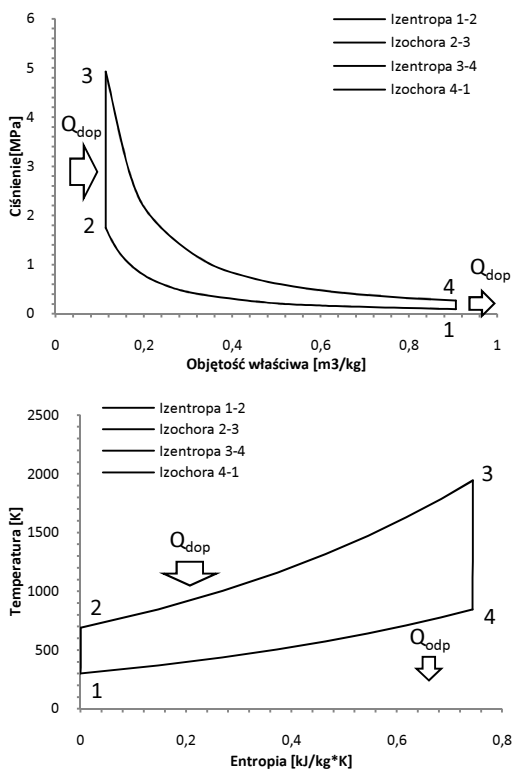
$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \varepsilon_s^{k-1} \quad (5)$$

Natomiast sprawność opisuje równanie:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon_s^{k-1}} \quad (6)$$

Tab. 2. Parametry obiegu Otto ze stałymi właściwościami

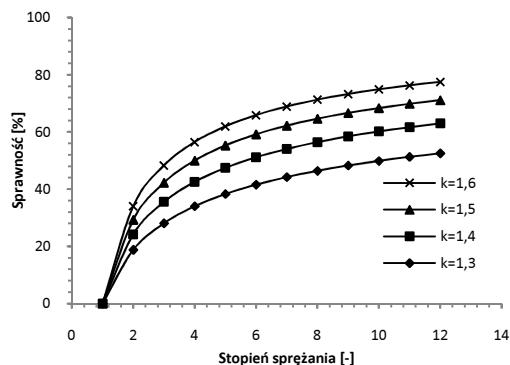
Q_{dop} [kJ/kg]	Q_{odp} [kJ/kg]	L_{otto} [kJ/kg]	η [%]
900,00	391,75	508,25	56,47



Rys. 1. Wykresy p-V i T-s teoretycznego obiegu Otto

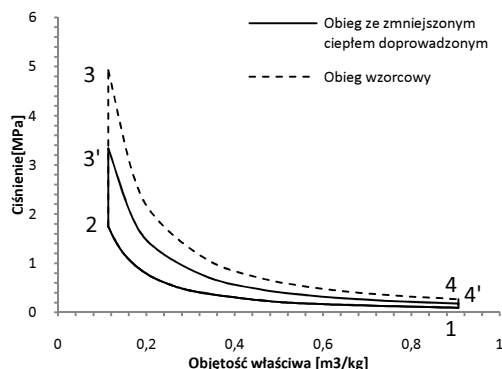
Z powyższego równania wynika, że sprawność teoretyczna obiegu ze stałymi właściwościami czynnika roboczego zależy od stopnia sprężania silnika ε oraz od wartości wykładnika adiabaty k czynnika roboczego, a wzrost sprawności uzyskuje się przez zwiększanie zarówno stopnia sprężania jak i wykładnika adiabaty. O przedstawia wpływ zwiększania stopnia sprężania na sprawność obiegu przy różnych wartościach wykładnika adiabaty. Wartość wykładnika adiabaty $1,4$ jest typowa dla powietrza w temperaturze pokojowej. Dla danej wartości stopnia sprężania uży-

cie gazu o wykładniku adiabaty wyższym od $1,4$ będzie skutkować wyższą sprawnością.

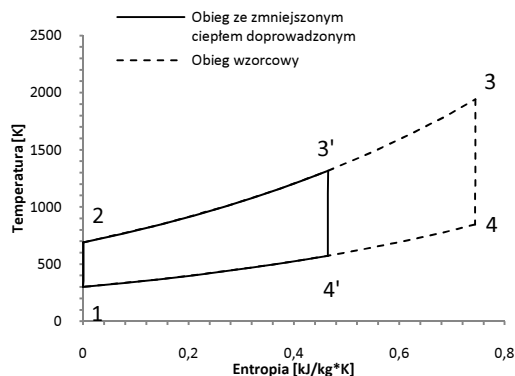


Rys. 2. Wykres sprawności obiegu Otto w funkcji stopnia sprężania i wykładnika adiabaty

Na wykresie możemy również zaobserwować, iż dla niskich wartości stopnia sprężania wykres sprawności ma stromy przebieg, po czym wygładza się i dla wysokich wartości stopnia sprężania wzrost sprawności jest nieznaczny. Dodatkowo w odniesieniu do obiegów rzeczywistych dążenie do zwiększenia stopnia sprężania powoduje zwiększenie podatności paliwa do samozapłonu. Dlatego też maksymalny stopień sprężania, jaki może być wykorzystywany jest ograniczony przez konieczność uniknięcia szkodliwego dla silnika spalania stukowego.



Rys. 3. Wykres p-V obiegu Otto dla obniżonego ciepła doprowadzonego

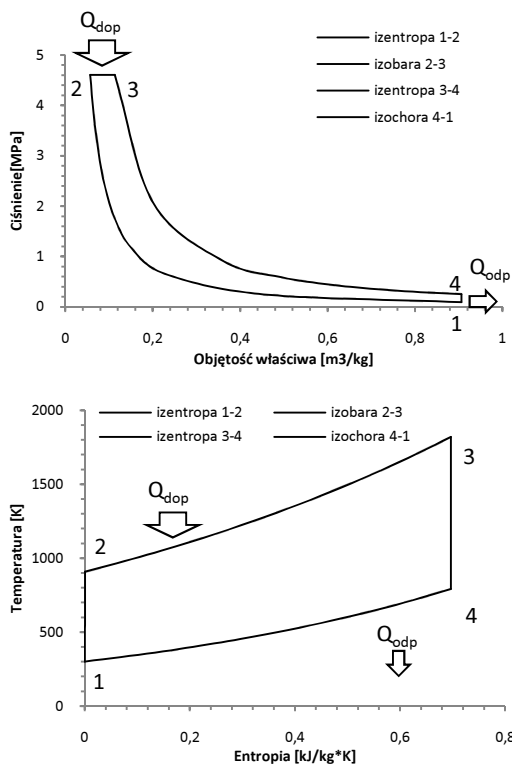


Rys. 4. Wykres T-s obiegu Otto dla obniżonego ciepła doprowadzonego

Ze wzoru (6) wynika również, iż sprawność teoretyczna takiego obiegu nie zależy od ilości doprowadzonego ciepła, czyli od obciążenia silnika odwzorowywanego tym obiegiem. Na 0 i 4 obniżenie doprowadzenia ciepła przedstawia się w postaci obniżonej izentropy rozprężania.

2.2. Obieg Diesla

W odróżnieniu od obiegu Otto stopień sprężania nie jest taki sam jak stopień rozprężania, ponieważ jak widać na 0 sprężanie odbywa się od V_1 , natomiast rozprężanie przy mniejszej objętości V_1-V_3 . Wartości w 0 otrzymano przy założeniu stopnia sprężania $\epsilon_s=16$ oraz stopnia obciążenia $\phi=2$.



Rys. 5. Wykresy p-V i T-s teoretycznego obiegu Diesla

Tab. 3. Parametry obiegu Diesla

Q_{dop} [kJ/kg]	Q_{odp} [kJ/kg]	L_{diesel} [kJ/kg]	η [%]
900,00	346,96	553,03	61,45

W przypadku obiegu Diesla ciepło doprowadzone opisuje równanie:

$$Q_{dop} = c_p(T_3 - T_2) \quad (7)$$

Przyrost entropii na skutek doprowadzonego ciepła:

$$s_3 - s_2 = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{P_3}{P_2} \quad (8)$$

Ciepło odprowadzone:

$$Q_{odp} = c_v(T_4 - T_1) \quad (9)$$

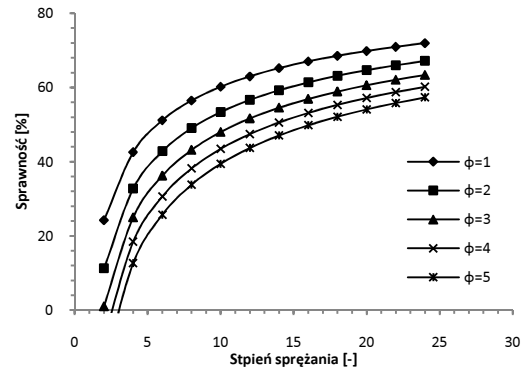
Dla sprężania 1-2 i rozprężania 3-4 można zapisać zależności:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \epsilon_s^{k-1} \quad (10)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \epsilon_r^{k-1} \quad (11)$$

Zatem sprawność:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon_s^{k-1}} \left[\frac{\phi^k - 1}{k(\phi - 1)} \right] \quad (12)$$



Rys. 6. Wykres sprawności obiegu Diesla w funkcji stopnia sprężania i stopnia obciążenia

Porównując ze sobą wzory na sprawność obiegu Otto i Diesla przy stałych właściwościach czynnika roboczego można dostrzec, iż różnią się jedynie członem w nawiasach w równaniu (12), która zawsze przyjmuje wartości większe od jedności. Wówczas przy założeniu tego samego stopnia sprężania obu obiegu okazuje się, iż sprawność teoretycznego obiegu Otto jest większa niż obiegu Diesla. Aczkolwiek porównanie to jest poprawne jedynie dla obiegu teoretycznych, gdyż dla rzeczywistego obiegu Diesla stosuje się znacznie wyższe stopnie sprężania, dzięki czemu uzyskuje on wyższą sprawność. Dla szczególnego przypadku, kiedy stopień obciążenia ϕ obiegu jest bliski jedności sprawności obiegu są sobie równe. Wraz ze wzrostem stopnia obciążenia sprawność obiegu Diesla zmniejsza się (0).

2.3. Obieg Sabathego

W obiegu Sabathego ciepło doprowadzane jest częściowo przy stałej objętości 2-3, a częściowo przy stałym ciśnieniu 3-4 co obrazuje 0.

Zatem całkowite ciepło doprowadzone jest sumą ciepła doprowadzonego izochorycznie i izobarycznie:

$$Q_{dop} = Q_{v dop} + Q_{p dop} = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) \quad (13)$$

Przyrost entropii w procesach 2-3 i 3-4:

$$s_3 - s_2 = c_v \ln \frac{T_3}{T_2} + R \ln \frac{V_3}{V_2} \quad (14)$$

$$s_4 - s_3 = c_p \ln \frac{T_4}{T_3} - R \ln \frac{P_4}{P_3} \quad (15)$$

Ciepło odprowadzone izochorycznie:

$$Q_{odp} = c_v(T_5 - T_1) \quad (16)$$

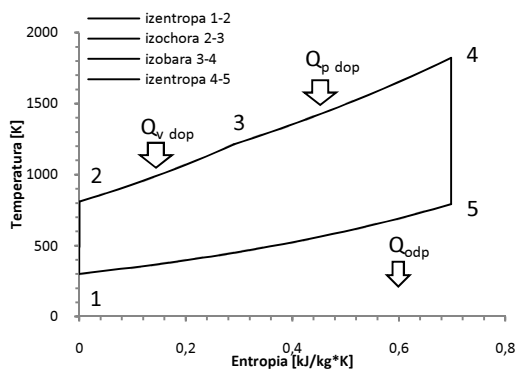
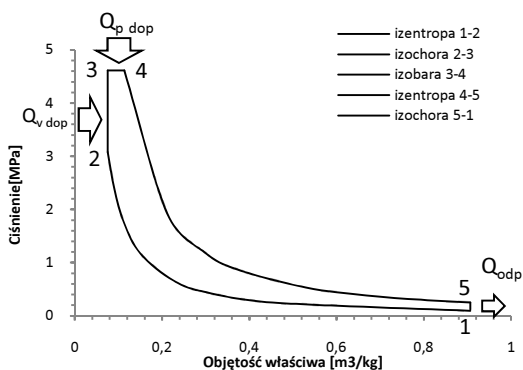
Dla sprężania 1-2 i rozprężania 4-5 można zapisać zależności:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon_s^{k-1} \quad (17)$$

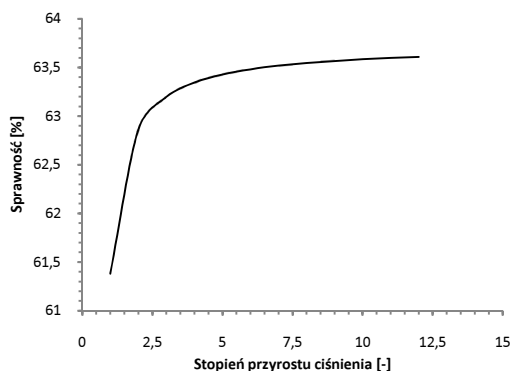
$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{V_5}{V_4}\right)^{k-1} = \varepsilon_r^{k-1} \quad (18)$$

Zatem sprawność:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon_s^{k-1}} \left[\frac{\alpha_v \varphi^k - 1}{(\alpha_v - 1) + k \alpha_v (\varphi - 1)} \right] \quad (19)$$



Rys. 7. Wykresy p-v i T-s teoretycznego obiegu Sabathego



Rys. 8. Wykres sprawności obiegu Sabathego w funkcji stopnia przyrostu ciśnienia

Charakter zmian sprawności teoretycznej obiegu w zależności od stopnia przyrostu ciśnienia przedstawia wykres na 0. Przy pomocy parametrów φ i α , odpowiednio zmieniając ich wartości można zmieniać proporcje między ilościami ciepła doprowadzonego izochorycznie i izobarycznie.

Tab. 4. Parametry obiegu Sabathego

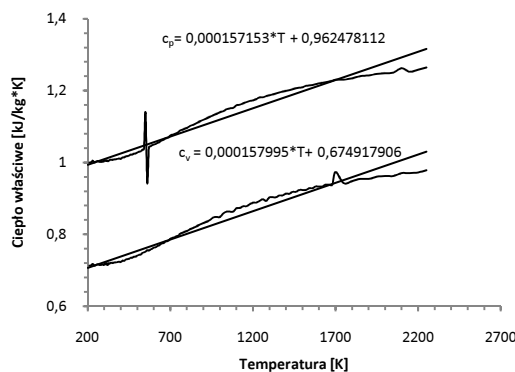
Q_{dop} [kJ/kg]	Q_{odp} [kJ/kg]	$L_{sabathe}$ [kJ/kg]	η [%]
900,00	353,82	546,18	60,69

Zatem przyjmując wartość $\varphi=1$ otrzymuje się wartość sprawności odpowiadającą sprawności obiegu Otto, natomiast dla $\alpha=1$ otrzymuje się wartość sprawności odpowiadającą obiegowi Diesla.

W modelu obliczeniowym obiegu Sabathego przyjęto stopień sprężania $\varepsilon_s=12$ stopień przyrostu ciśnienia $\alpha=1,5$ oraz stopnia obciążenia $\varphi=1,5$

3. ANALIZA OBIEGÓW ZE ZMIENNYMI WŁAŚCIWOŚCIAMI CZYNNIKA ROBOCZEGO

W przypadku obiegów ze zmiennymi właściwościami czynnika roboczego stosuje się te same założenia, co w cyklach ze stałymi właściwościami za wyjątkiem zastosowania zmiennego ciepła właściwego w funkcji temperatury. Charakter zmian ciepła właściwego od zmiany temperatury przedstawia 0.



Rys. 9. Ciepło właściwe c_p i c_v w funkcji temperatury dla powietrza

Zależność ciepła właściwego od temperatury jest prawie liniowa, dlatego też można przyjąć, że zmienność ciepła właściwego w bardzo bliskim przybliżeniu opisują następujące równania liniowe:

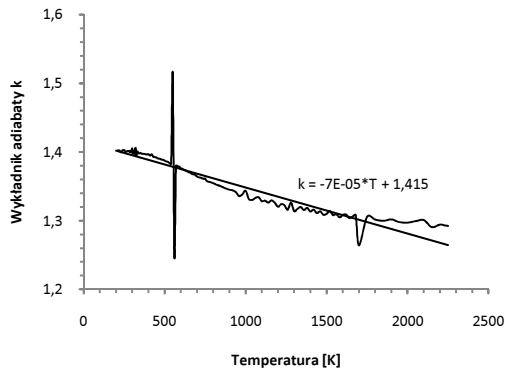
$$c_p = k_1 T + a_p \quad (20)$$

$$c_v = k_1 T + b_v \quad (21)$$

gdzie a_p , b_v , k_1 są stałymi, których wartości widoczne są na 0 w równaniach poszczególnych linii trendu.

Wraz ze zmiennością ciepła właściwego czynnika roboczego od temperatury uzależniony jest również wykładnik

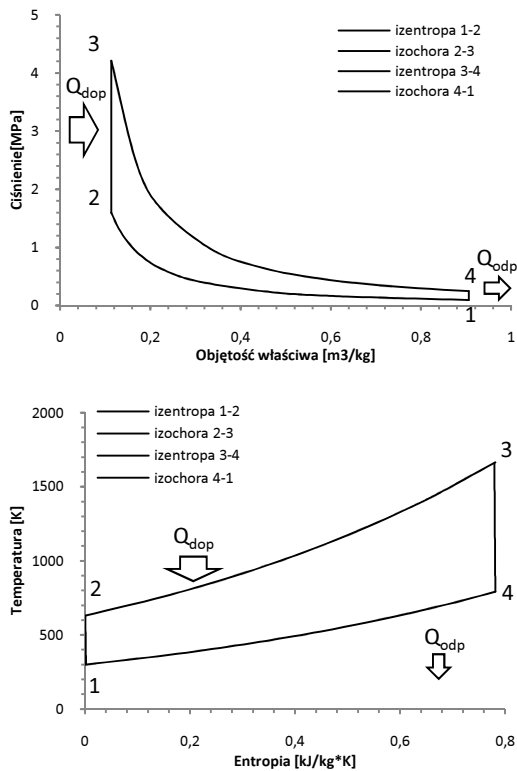
adiabaty k . W przypadku stałych właściwości jego wartość przyjmowana jest, jako $1,4$, natomiast przy zmiennych właściwościach czynnika wykładnik adiabaty w zależności od temperatury przyjmuje wartości zgodnie z poniższym wykresem (0).



Rys. 10. Wykładnik adiabaty k w funkcji temperatury dla powietrza suchego

3.1. Obieg Otto

Przebieg poszczególnych procesów w obiegu Otto ze zmiennymi właściwościami prezentuje 0. Obieg posiada ten sam charakter, co jego odpowiednik za stałymi właściwościami, aczkolwiek zależności, które posłużyły do stworzenia modelu w tym przypadku posiadają inną postać (22-25).



Rys. 11. Wykresy p-V i T-s teoretycznego obiegu Otto

Wartości parametrów analogicznie jak w poprzedniej części zaprezentowane są w 0 przy założeniu stopnia sprężania $\epsilon_s=12$ oraz stopnia przyrostu ciśnienia $\alpha=1,5$.

Tab. 5. Parametry obiegu Otto

Q_{dop} [kJ/kg]	Q_{odp} [kJ/kg]	L_{otto} [kJ/kg]	η [%]
900,00	371,94	528,06	58,67

W przypadku obiegu Otto ze zmiennymi właściwościami czynnika roboczego równanie opisujące ciepło doprowadzone przyjmuje następującą postać całkową:

$$Q_{dop} = \int_{T_2}^{T_3} c_v dT \quad (22)$$

Podobnie przyrost entropii:

$$s_3 - s_2 = \int_{T_2}^{T_3} c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{V_3}{V_2} \quad (23)$$

Ciepło odprowadzone:

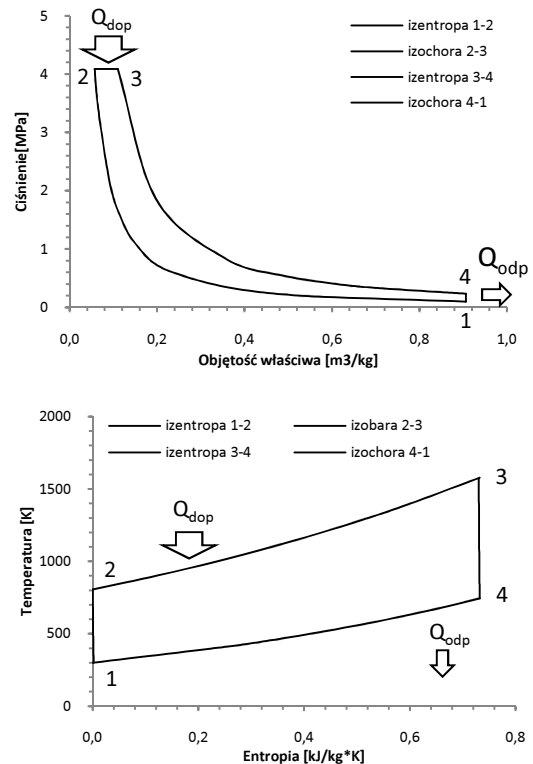
$$Q_{odp} = \int_{T_4}^{T_1} c_v dT \quad (24)$$

Sprawność obiegu:

$$\eta_t = \frac{L_{otto}}{Q_{dop}} = \frac{\int_{T_2}^{T_3} c_v dT - \int_{T_4}^{T_1} c_v dT}{\int_{T_2}^{T_3} c_v dT} \quad (25)$$

3.2. Obieg Diesla

Poniżej przedstawiono przebieg poszczególnych procesów w obiegu Diesla ze zmiennymi właściwościami (0) oraz zależności opisujące model obiegu (26-29).



Rys. 12. Wykresy p-V i T-s teoretycznego obiegu Diesla

W przypadku obiegu Diesla ze zmiennymi właściwościami równanie opisujące ciepło doprowadzone ma postać:

$$Q_{dop} = \int_{T_2}^{T_3} c_p dT \quad (26)$$

Natomiast przyrost entropii przedstawia równanie:

$$s_3 - s_2 = \int_{T_2}^{T_3} c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_3}{P_2} \quad (27)$$

Ciepło odprowadzone:

$$Q_{odp} = \int_{T_4}^{T_1} c_v dT \quad (28)$$

Sprawność obiegu:

$$\eta_t = \frac{L_{diesel}}{Q_{dop}} = \frac{\int_{T_2}^{T_3} c_p dT - \int_{T_4}^{T_1} c_v dT}{\int_{T_2}^{T_3} c_p dT} \quad (29)$$

Tab. 6. Parametry obiegu Diesla

Q_{dop} [kJ/kg]	Q_{odp} [kJ/kg]	L_{diesel} [kJ/kg]	η [%]
900,00	333,81	566,19	62,91

Wartości w 0 otrzymano przy założeniu stopnia sprężania $\varepsilon_s=16$ oraz stopnia obciążenia $\varphi=1,49$. Natomiast w (0) odpowiednio $\varepsilon_s=16$, $\alpha=1,5$, $\varphi=1,49$.

3.3. Obieg Sabathego

Poniżej przedstawiono przebieg poszczególnych procesów w obiegu Sabathego ze zmiennymi właściwościami (0) oraz zależności opisujące model obiegu (30-34).

Tab. 7. Parametry obiegu Sabathego

Q_{dop} [kJ/kg]	Q_{odp} [kJ/kg]	$L_{sabathe}$ [kJ/kg]	η [%]
900,00	339,74	560,21	62,25

W przypadku obiegu Sabathego ze zmiennymi właściwościami równanie opisujące ciepło doprowadzone ma postać:

$$Q_{dop} = Q_{v dop} + Q_{p dop} = \int_{T_2}^{T_3} c_v dT + \int_{T_3}^{T_4} c_p dT \quad (30)$$

Przyrost entropii:

$$s_3 - s_2 = \int_{T_2}^{T_3} c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{V_3}{V_2} \quad (31)$$

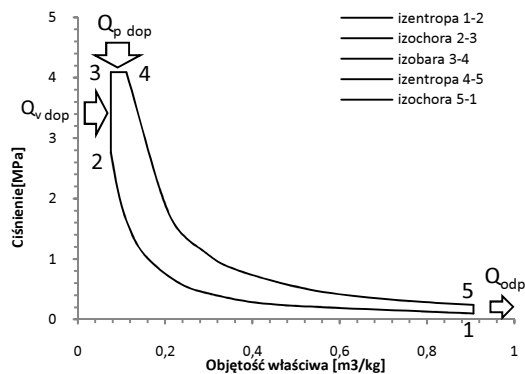
$$s_4 - s_3 = \int_{T_3}^{T_4} c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_4}{P_3} \quad (32)$$

Ciepło odprowadzone:

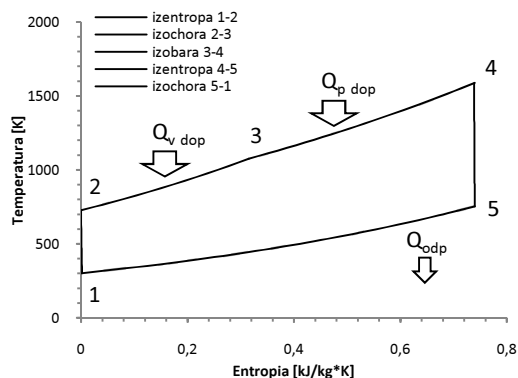
$$Q_{odp} = \int_{T_5}^{T_1} c_v dT \quad (33)$$

Sprawność obiegu:

$$\eta_t = \frac{L_{sabathe}}{Q_{dop}} = \frac{\int_{T_2}^{T_3} c_v dT + \int_{T_3}^{T_4} c_p dT - \int_{T_5}^{T_1} c_v dT}{\int_{T_2}^{T_3} c_v dT + \int_{T_3}^{T_4} c_p dT} \quad (34)$$



Rys. 13. Wykres p-V teoretycznego obiegu Sabathego



Rys. 14. Wykres T-s teoretycznego obiegu Sabathego

4. ZESTAWIENIE

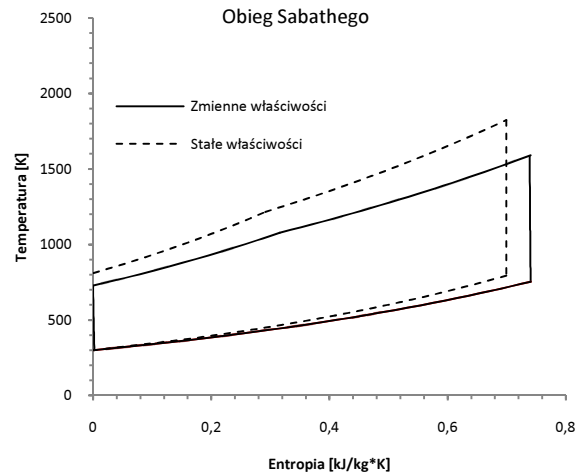
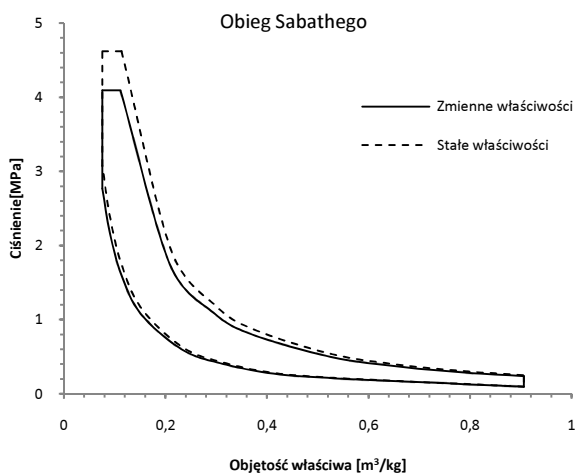
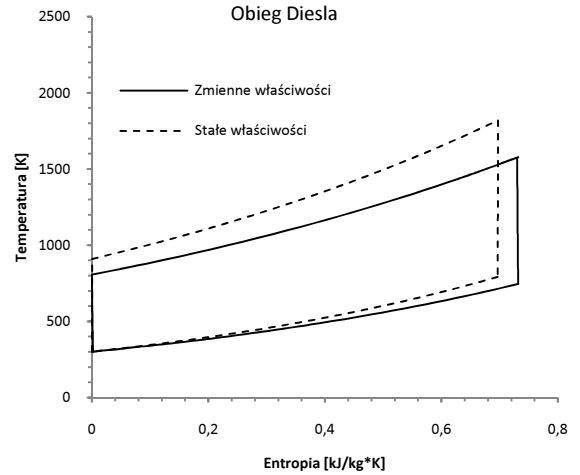
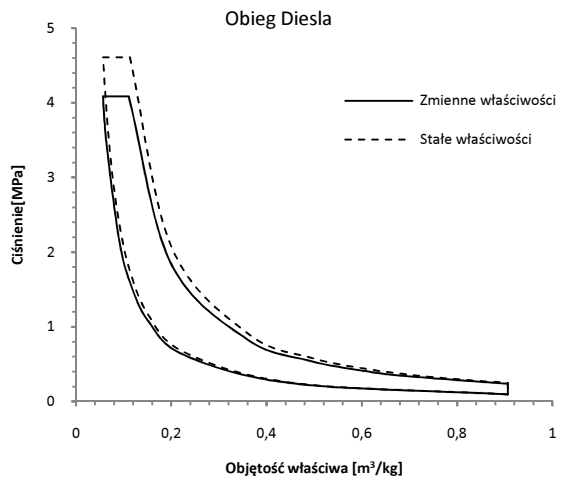
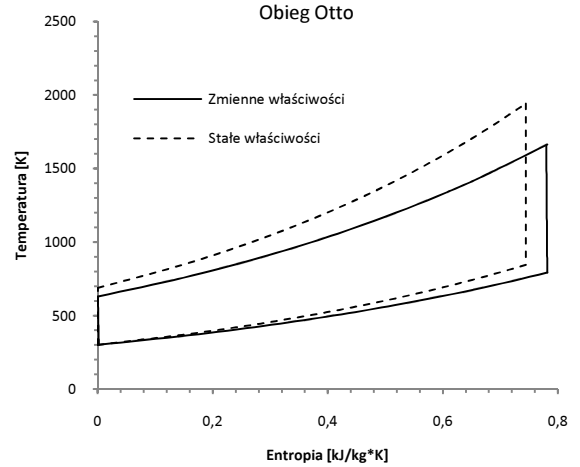
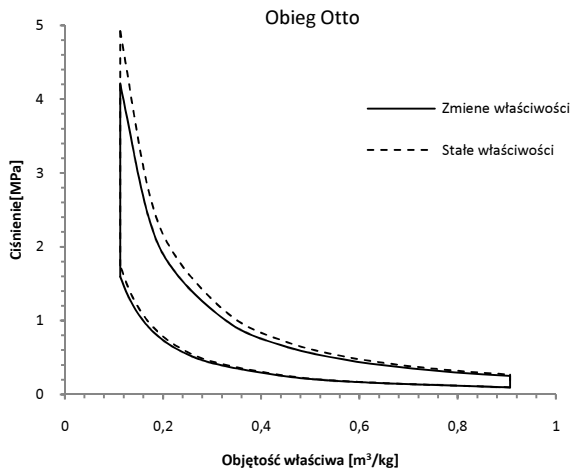
W celu zobrazowania znaczenia zmienności ciepła właściwego na właściwości obiegu posłużą wykresy na 0 oraz 0.

Wykresy przedstawiają przebiegi ciśnienia w funkcji objętości właściwej oraz temperatury w funkcji entropii z wykorzystaniem stałego oraz zmiennego ciepła właściwego czynnika roboczego. Przy czym należy podkreślić, iż w celu porównywania wyników należy przyjąć założenie, że całkowite ciepło doprowadzone do każdego obiegu jest takie samo i wynosi $Q_{dop} = 900$ [kJ/kg] oraz zbliżona jest wartość pracy obiegu $L = 508 \div 566$ [kJ/kg].

Na każdym z poniższych rysunków zauważalne są znaczące różnice między przebiegami ze stałymi i zmiennymi właściwościami czynnika roboczego. Podczas, gdy charakter przebiegu pozostaje ten sam. Widoczne jest, iż wartości zarówno ciśnienia jak i temperatury są znacznie wyższe w przypadku stałego ciepła właściwego. Tendencja ta obecna jest w każdym z obiegów i nasila się wraz ze wzrostem temperatury.

Tab. 8. Wartości odchyłek temperatury w charakterystycznych punktach obiegu Otto, Diesla, Sabathego

Nr. p- ktu	Otto			Diesel			Sabathe		
	Temperatura [K]		Odchyłka [%]	Temperatura [K]		Odchyłka [%]	Temperatura [K]		Odchyłka [%]
	Stałe	Zmienne		Stałe	Zmienne		Stałe	Zmienne	
1	300,00	300,00	0,00	300,00	300,00	0,00	300,00	300,00	0,00
2	689,22	630,13	9,38	909,43	806,32	12,79	810,58	727,89	11,36
3	1942,70	1663,65	16,77	1804,95	1576,47	14,49	1214,48	1076,26	12,84
4	845,61	792,26	6,73	783,24	744,81	5,16	1821,44	1588,51	14,66
5	-	-	-	-	-	-	792,78	752,23	5,39



Rys. 15. Zestawienie wykresów p-v i T-s obiegu Otto, Diesla oraz Sabathego ze stałymi i zmiennymi właściwościami czynnika roboczego

Na podstawie danych zamieszczonych w 0 można za-uważyć, iż w niskim zakresie temperatur obliczone wartości różnią się znacznie, a obliczona odchyłka wyników oscyluje w granicy 10%. Natomiast dla temperatur odpowiadających punktowi trzeciemu w obiegu Otto, czyli na końcu izochorycznego doprowadzenia ciepła, gdzie temperatura osiąga wartość maksymalną, różnica między obiegami ze stałymi, a zmiennymi właściwościami czynnika roboczego jest już bardzo znaczna, a odchyłka wyniku ma wartość blisko 17%. Odchyłka wyniku może jeszcze wzrosnąć wraz ze wzrostem przyrostu temperatury względem poziomu odniesienia.

5. WNIOSKI

Obiegi ze stałymi właściwościami czynnika roboczego są poprawne w zakresie niskich przyrostów temperatur. W przypadku dużych różnic obiegi takie wprowadzają znaczący błąd fałszujący otrzymane wartości. Zakres odchylek przedstawiono w 0.

Tab. 9. Wartości odchylek w odniesieniu do sprawności obiegów Otto, Diesla, Sabathego

Typ obiegu	Sprawność [%]		Odchyłka [%]
	Stale	Zmienne	
Otto	56,47	58,67	-3,75
Diesel	61,45	62,91	-2,32
Sabathe	60,69	62,25	-2,51

W przypadku sprawności obiegów otrzymujemy odchyłki od wartości wahające się w granicy $2 \div 4$ %. Jest to różnica na tyle duża, iż ma znaczący wpływ na wyniki analizy, zatem jest na tyle istotna, iż nie powinna być pomijana. Jeżeli więc celem jest uzyskanie wyników najbardziej zbliżonych do wartości rzeczywistych niezbędnym jest uwzględnienie zmiennych wraz z temperaturą wartości ciepła właściwego czynnika roboczego.

Oznaczenia: c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$]; c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości [$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$]; k – wykładnik adiabaty [-]; L – praca obiegu [kJ/kg]; P – ciśnienie [kPa]; R – stała gazowa czynnika [$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$]; s – entropia [kJ/kgK]; T – temperatura [K]; Q_{dop} – ciepło doprowadzone [kJ/kg]; Q_{odp} – ciepło odprowadzone [kJ/kg]; V – objętość właściwa [m^3/kg]

Znaki greckie: α – stopień przyrostu ciśnienia; φ – stopień obciążenia; ε_s – stopień sprężania; ε_r – stopień rozprężania; η – sprawność

LITERATURA

1. Abu-Nada E. i inni (2006), Thermodynamic modeling of spark-ignition engine: Effect of temperature dependent specific heats, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 1264-1272.
2. Al-Sarkhi A. i inni (2006), Effects of friction and temperature-dependent specific-heat of the working fluid on the performance of a Diesel-engine, *Applied Energy* 83, 153-165.
3. Cengel Y. A., Boles M. A. (2008), *Thermodynamics. An engineering approach*, MHHE, USA.
4. Chen L. i inni (2006), Effects of heat transfer, friction and variable specific heats of working fluid on the performance of an irreversible dual cycle, *Energy Conversion and Management* 47, 3224-3234.
5. Ge Y. i inni (2005), Thermodynamic simulation of performance of an Otto cycle with heat transfer and variable specific heats of working fluid, *International Journal of Thermal Sciences* 44, 506-511.
6. Moran M. J., Shapiro H. N. (2007), *Fundamentals of engineering thermodynamics*, Wiley, USA
7. Rychter T., Teodorczyk A. (2006), Teoria silników tłokowych, WKŁ, Warszawa.
8. Szargut J. (1998), *Termodynamika*, PWN, Warszawa
9. Szargut J. (2000), *Termodynamika techniczna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

INFLUENCE OF VARIABLE SPECIFIC HEATS OF WORKING FLUID ON PERFORMANCE OF AIR STANDARD OTTO, DIESEL AND SABATHE CYCLES

Abstract: This paper presents influence of variable specific heats of working fluid on the performance of air standard Otto, Diesel and Sabathe cycles. The mathematic models of air standard cycles with temperature dependent specific heats were made and compared to those which use constant specific heats. The results obtained in this study, presented in tables and charts, show significant variations between the performance of cycles with constant and variable specific heats of working fluid.