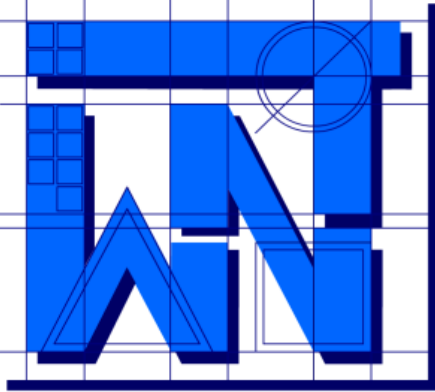


Wydział Nauk Technicznych



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

Paliwa i spalanie

wersja: 24 stycznia 2023

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2022

Spalanie

Utlenianie – synteza (łączenie) tlenu z innym pierwiastkiem.

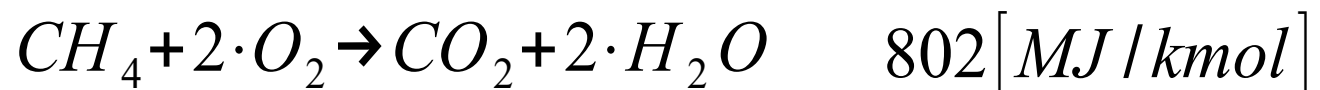
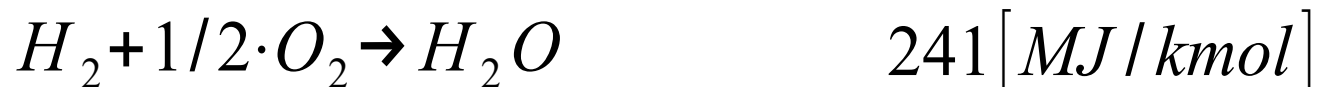
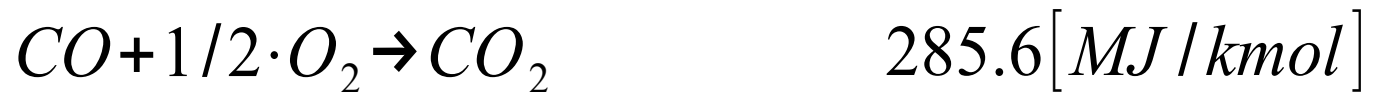
Rodzaje utleniania:

- powolne (korodowanie metali, gnicie materiałów biologicznych),
- szybkie (spalanie normalne lub spalanie wybuchowe).



Spalanie

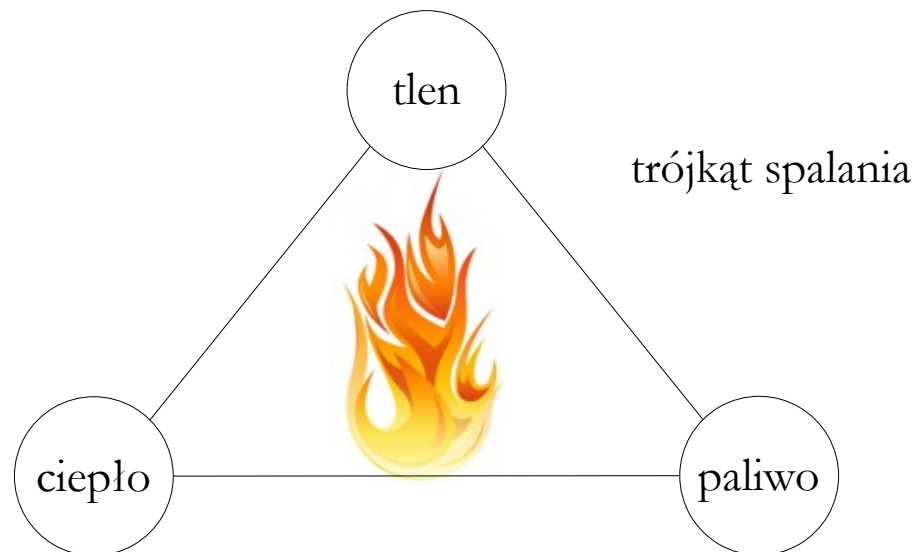
Spalanie – zjawisko polegające na gwałtownym utlenianiu (chemicznym łączeniu się składników paliwa z tlenem), czemu towarzyszy wydzielanie się ciepła i światła. Największą ilość energii uzyskuje się przy tzw. spalaniu całkowitym i zupełnym.



Spalanie

Spalanie organicznego ciała stałego poprzedzone jest zawsze jego rozkładem termicznym (**piroliza**), prowadzącym do wytworzenia palnej mieszaniny lotnych produktów tego rozkładu z powietrzem.

Spalanie cieczy poprzedzone jest zawsze wytworzeniem nad jej powierzchnią palnej mieszaniny par cieczy z powietrzem.



Spalanie

Zapłon – proces zainicjowania reakcji spalania mieszaniny palnej w obecności zewnętrznego punktowego bodźca energetycznego, np. w postaci płomienia, iskry elektrycznej, rozgrzanego ciała stałego.

Temperatura zapłonu odnosi się jedynie do cieczy.

Samozapłon – samoistny zapłon mieszaniny palnej w całej jej objętości po osiągnięciu granicznej temperatury zwanej temperaturą samozapłonu, bez udziału zewnętrznego bodźca energetycznego.

Temperatura samozapłonu odnosi się zarówno do cieczy, jak i ciał stałych oraz gazów.

Spalanie

Temperatura zapłonu ciecchy palnej jest to najniższa temperatura, w której nad powierzchnią ciecchy tworzy się mieszanina jej par z powietrzem, zdolna do zapalenia się od punktowego bodźca energetycznego w określonych warunkach badania.

Nie charakteryzuje się gazów palnych przez podanie temperatury zapłonu, ponieważ ulegają one zapłonowi od bodźca energetycznego w każdej temperaturze wyższej od temperatury ich skroplenia.



temperatura
zapłonu

Spalanie

Temperatura zapalenia ciała stałego jest to najniższa temperatura, w której dochodzi do wytworzenia mieszaniny produktów rozkładu termicznego tego ciała z powietrzem, zdolnej do zapalenia się od punktowego bodźca energetycznego w określonych warunkach badania.

Temperatura zapalenia odnosi się jedynie do ciał stałych.

temperatura
zapalenia



Spalanie

Spalanie powierzchniowe – proces zachodzący przy spalaniu paliw posiadających powierzchnię swobodną (poza kroplami i cząstkami o rozmiarach mniejszych niż 0.05 [mm]).

Spalanie objętościowe – proces zachodzący przy spalaniu mieszanki paliwowo-powietrznej.

Mieszanki paliwowo-powietrzne tworzą:

- gazy,
- ciecze po odparowaniu lub rozpyleniu (krople o rozmiarach rzędu 0.05 [mm] i mniejsze),
- pyły po rozpyleniu (ziarna o rozmiarach rzędu 0.05 [mm] i mniejsze).

Spalanie

Spalanie bezpłomieniowe – proces spalania materiału przebiegający bez wytworzenia płomienia, nazywany:

- żarzeniem, gdy procesowi temu towarzyszy emisja światła,
- tleniem, gdy nie obserwuje się efektu świetlnego.

W porównaniu ze spalaniem płomieniowym, spalanie bezpłomieniowe przebiega na ogół w niższych temperaturach, z mniejszą prędkością oraz z przewagą ilościową produktów częściowego utleniania węgla.



Spalanie

Spalanie płomieniowe (kinetyczne lub dyfuzyjne) – proces spalania w fazie gazowej z emisją światła.

| Paliwo | Temperatura płomienia [°C] | |
|---------------|-----------------------------------|-------------------|
| | spalanie w powietrzu | spalanie w tlenie |
| wodór | 2100 | 2750 |
| acetylen | 2150 | 3100 |
| metan | 1950 | 2730 |
| propan | 1930 | 2780 |

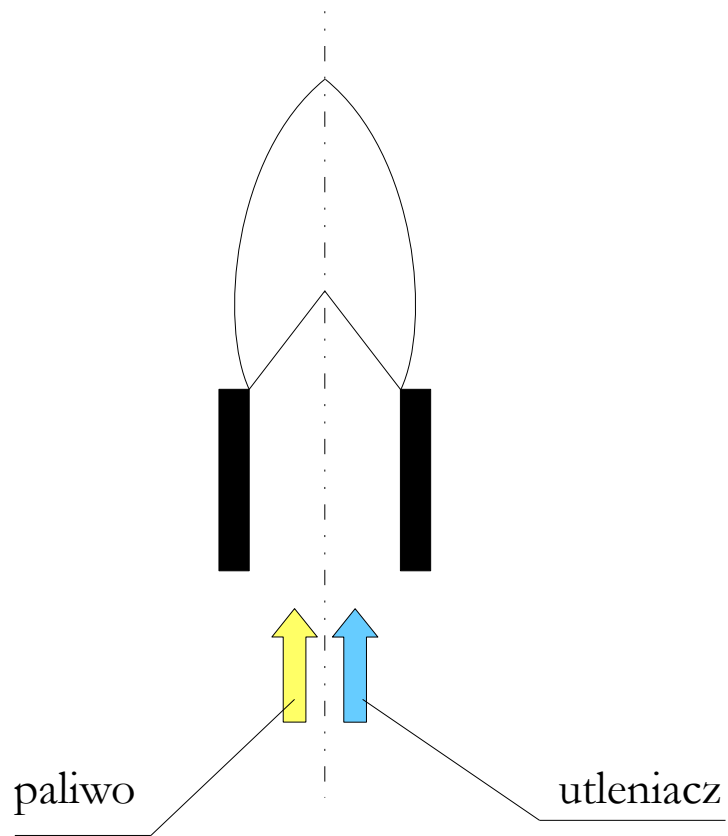
Spalanie

Płomień – strefa spalania w fazie gazowej, z której emitowane jest światło.

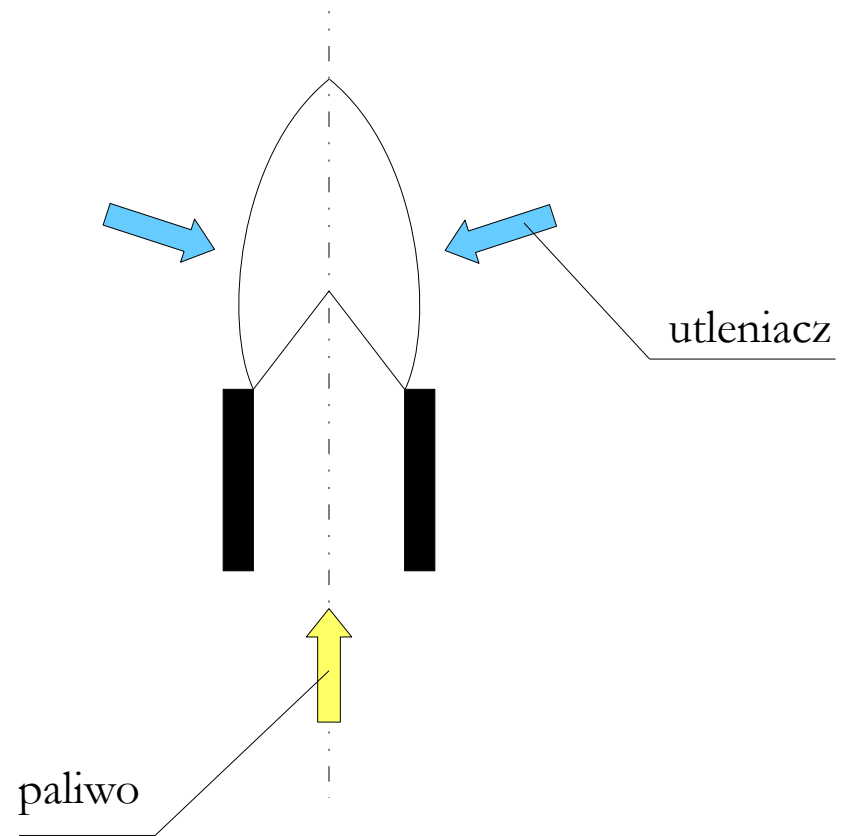
Płomień kinetyczny – płomień powstały w warunkach, gdy substancja palna była już wstępnie, przed zapaleniem zmieszana z powietrzem, oznacza to, że szybkość spalania określana jest przede wszystkim szybkością przebiegu reakcji spalania.

Płomień dyfuzyjny – płomień powstały w wyniku zapalenia tej części objętości, w której następuje mieszanie się paliwa z powietrzem (utleniaczem); szybkość spalania w płomieniu dyfuzyjnym jest określona szybkością dyfuzji (przenikania) powietrza do strefy spalania płomienia.

Spalanie

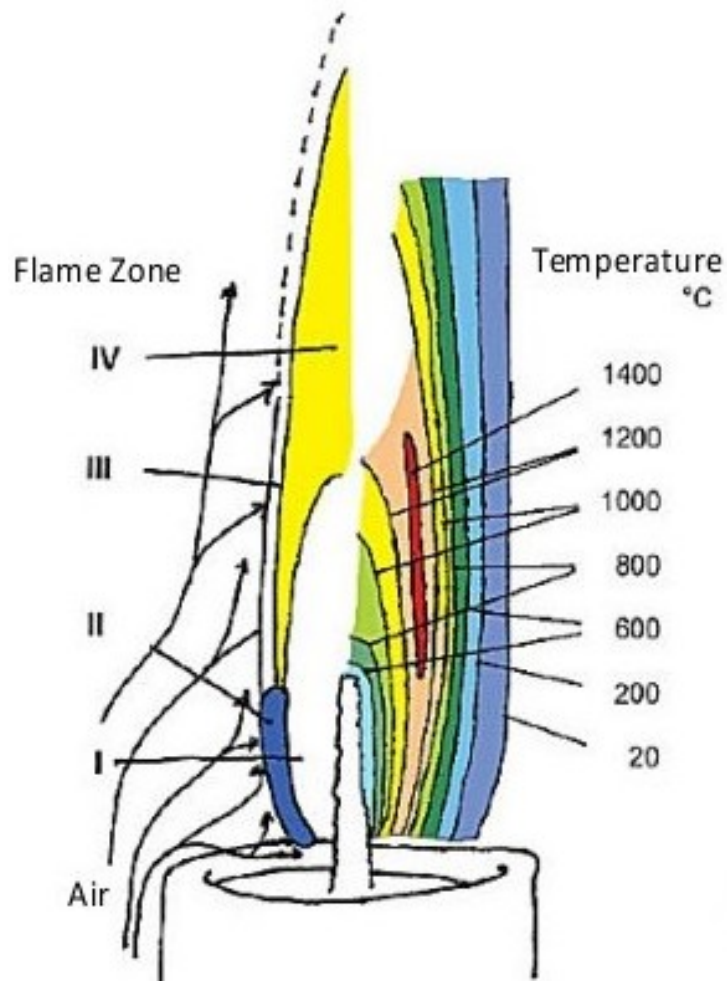


płomień kinetyczny

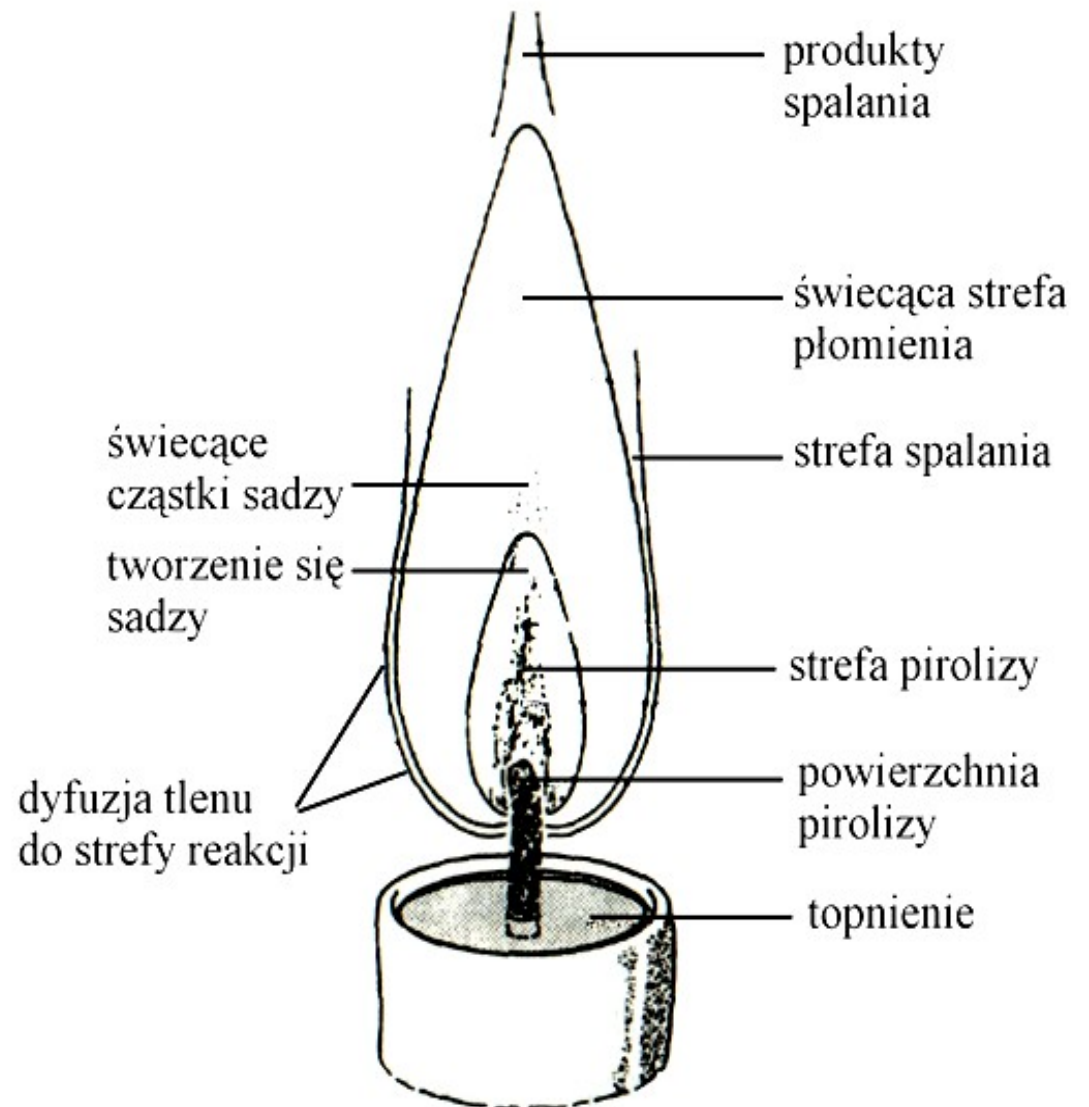


płomień dyfuzyjny

Spalanie



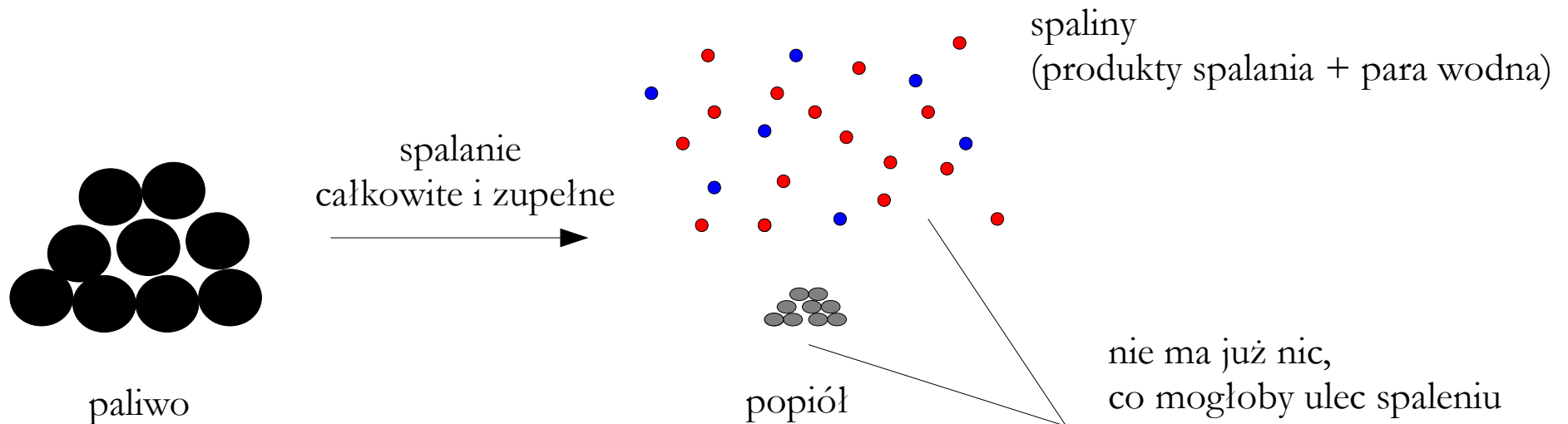
plomień dyfuzyjny świeczki



Spalanie

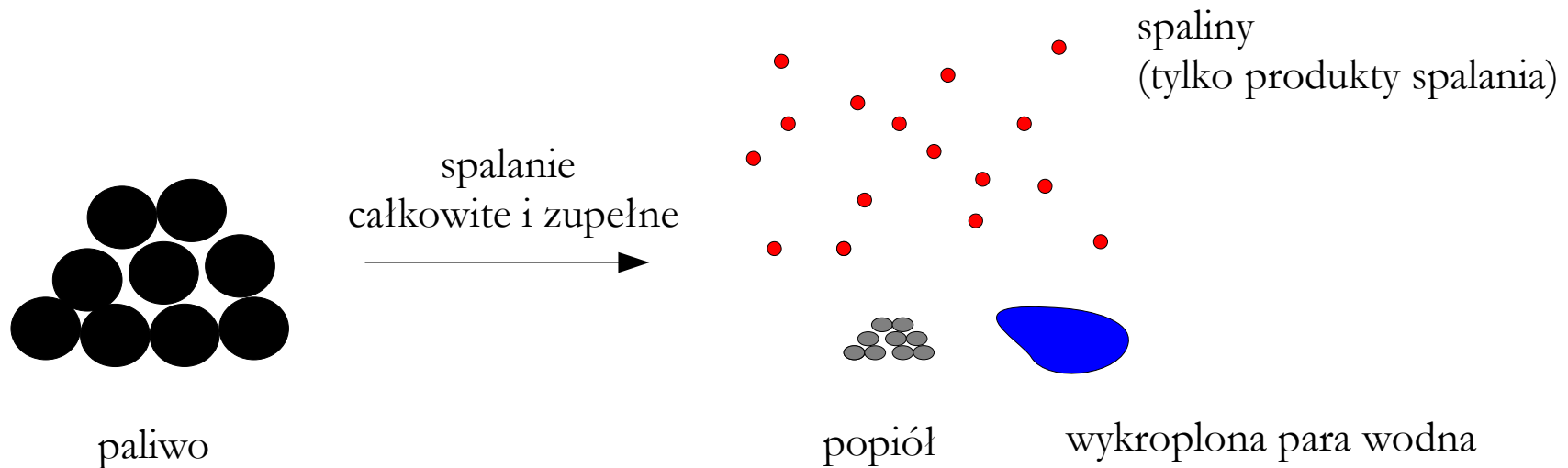
Spalanie zupełne – proces, w wyniku którego produkty spalania nie zawierają związków, które mogłyby podlegać dalszemu utlenianiu.

Spalanie całkowite – proces, w którym utlenieniu uległa cała dostarczona porcja paliwa.



Ciepło spalania

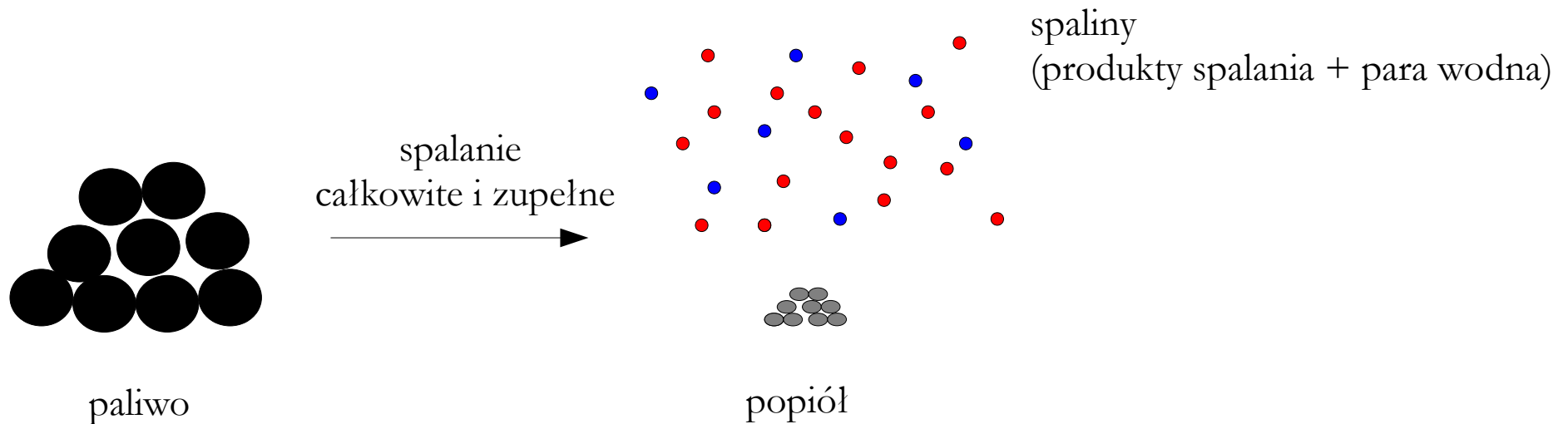
Ciepło spalania – ilość ciepła jaka wydziela się po całkowitym i zupełnym spaleniu jednostki masy (paliwa stałe) lub objętości (paliwa ciekłe i gazowe) paliwa i ochłodzeniu produktów spalania (spalin) do temperatury początkowej substratów, przy czym para wodna zawarta w spalinach ulega całkowitemu wykropleniu.



Ciepło spalania – teoretycznie maksymalna ilość ciepła możliwa do uzyskania z paliwa.

Wartość opałowa

Wartość opałowa – ilość ciepła jaka wydziela się po całkowitym i zupełnym spalaniu jednostki masy (paliwa stałe) lub objętości (paliwa ciekłe i gazowe) paliwa i ochłodzeniu produktów spalania (spalin) do temperatury początkowej substratów przy założeniu, że zawarta w spalinach para wodna nie ulega wykropleniu.



Wartość opałowa – maksymalna ilość ciepła jaką rzeczywiście udaje się uzyskać z paliwa.

Udział objętościowy składnika mieszaniny

Udział objętościowy – stosunek objętości k-tego składnika mieszaniny do jednostki objętości tej mieszaniny

$$Y_k = \frac{V_k}{\sum_{i=1}^{n_s} V_i}$$

Y_k - udział objętościowy k-tego składnika mieszaniny [-]

V_k - objętość k-tego składnika [m³]

V_i - objętość i-tego składnika [m³]

n_s - liczba składników mieszaniny [-]

Udział masowy składnika mieszaniny

Udział masowy – stosunek masy k-tego składnika mieszaniny do jednostki masy tej mieszaniny

$$X_k = \frac{m_k}{\sum_{i=1}^{n_s} m_i}$$

X_k - udział masowy k-tego składnika mieszaniny [-]

m_k - masa k-tego składnika [kg]

m_i - masa i-tego składnika [m³]

n_s - liczba składników mieszaniny [-]

Wartość opałowa a ciepło spalania

$$W = Q_s - r_{H_2O} \cdot \frac{m_{H_2O}}{V} \quad \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

- związek między wartością opałową a ciepłem spalania dla paliw płynnych (odniesienie do objętości paliwa)

$$W = Q_s - r_{H_2O} \cdot \frac{m_{H_2O}}{m} \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- związek między wartością opałową a ciepłem spalania dla paliw stałych (odniesienie do masy paliwa)

W - wartość opałowa

Q_s - ciepło spalania (jednostka taka sama jak jednostka wartości opałowej)

r_{H_2O} - ciepło parowania wody $\left[\frac{J}{kg} \right]$

m_{H_2O} - masa skroplin powstała po spaleniu jednostki (masy lub objętości) paliwa $[kg]$

Wartość opałowa a ciepło spalania

W przypadku paliw stałych wartość opałowa może być również wyznaczona ze wzoru:

$$W = Q_s - r_{H_2O} \cdot (8.9 \cdot X_{H_2} + X_{H_2O}) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

W - wartość opałowa

Q_s - ciepło spalania (jednostka taka sama jak jednostka wartości opałowej)

r_{H_2O} - ciepło parowania wody $\left[\frac{J}{kg} \right]$

X_{H_2O} - udział masowy wilgoci w paliwie [-]

X_{H_2} - udział masowy wodoru w paliwie [-]

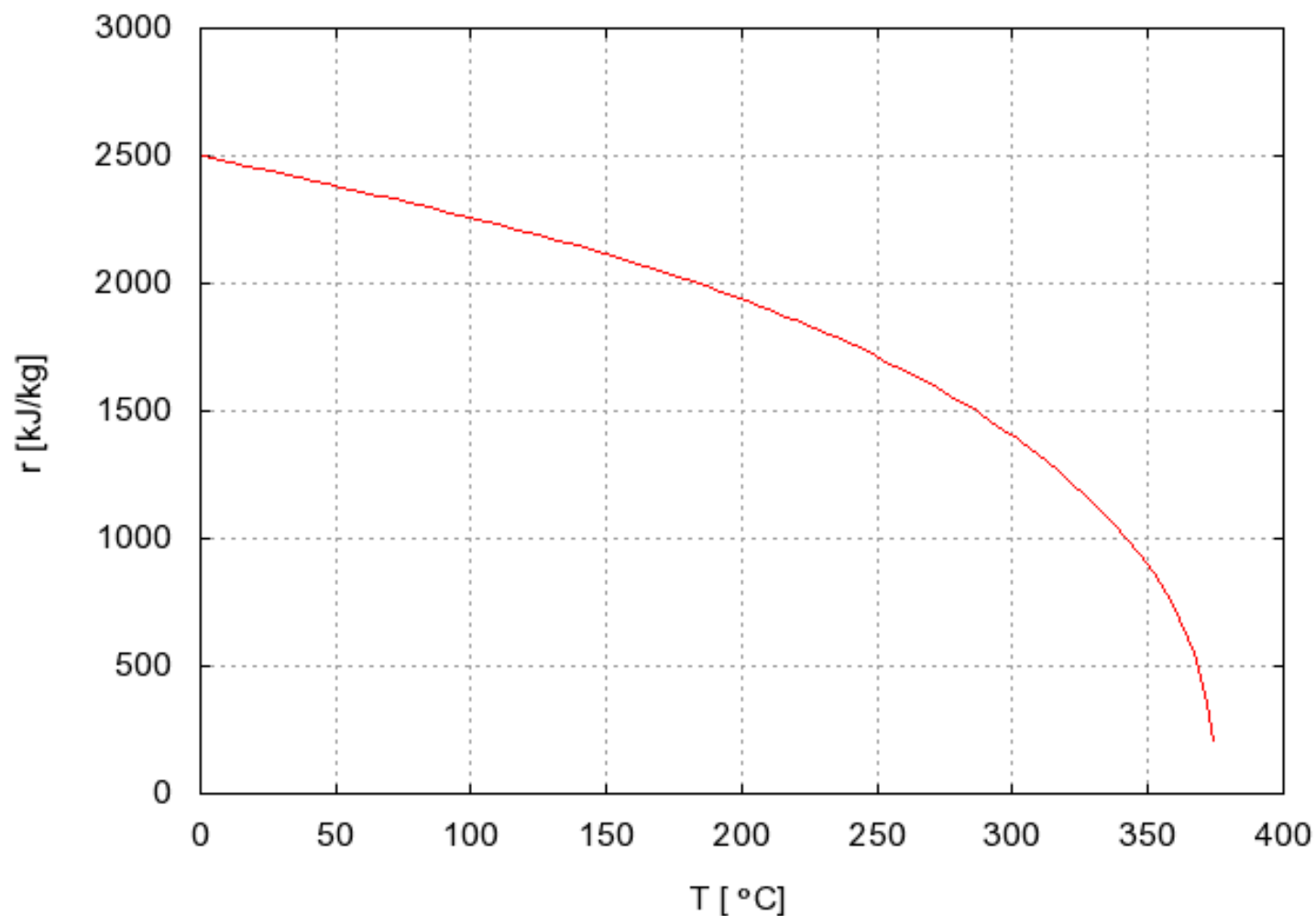
Wartość opałowa a ciepło spalania

W praktyce użyteczna energia spalania jest mniejsza niż wartość opałowa ze względu na fakt, że w normalnie stosowanych paleniskach spaliny uchodzące do atmosfery mają wyższą temperaturę niż doprowadzony utleniacz. Różnica ta staje się szczególnie znacząca, jeśli temperatura spalin jest wyższa od temperatury wrzenia wody przy danym ciśnieniu i spaliny unoszą ze sobą nieskroploną parę wodną. W efekcie, ciepło które zostało zużyte na odparowanie wody tracone jest bezpowrotnie.



Wykres ciepła parowania wody

Ciepło parowania wody



Zależność między ciepłem parowania wody a temperaturą.

Badania kalorymetryczne paliw płynnych

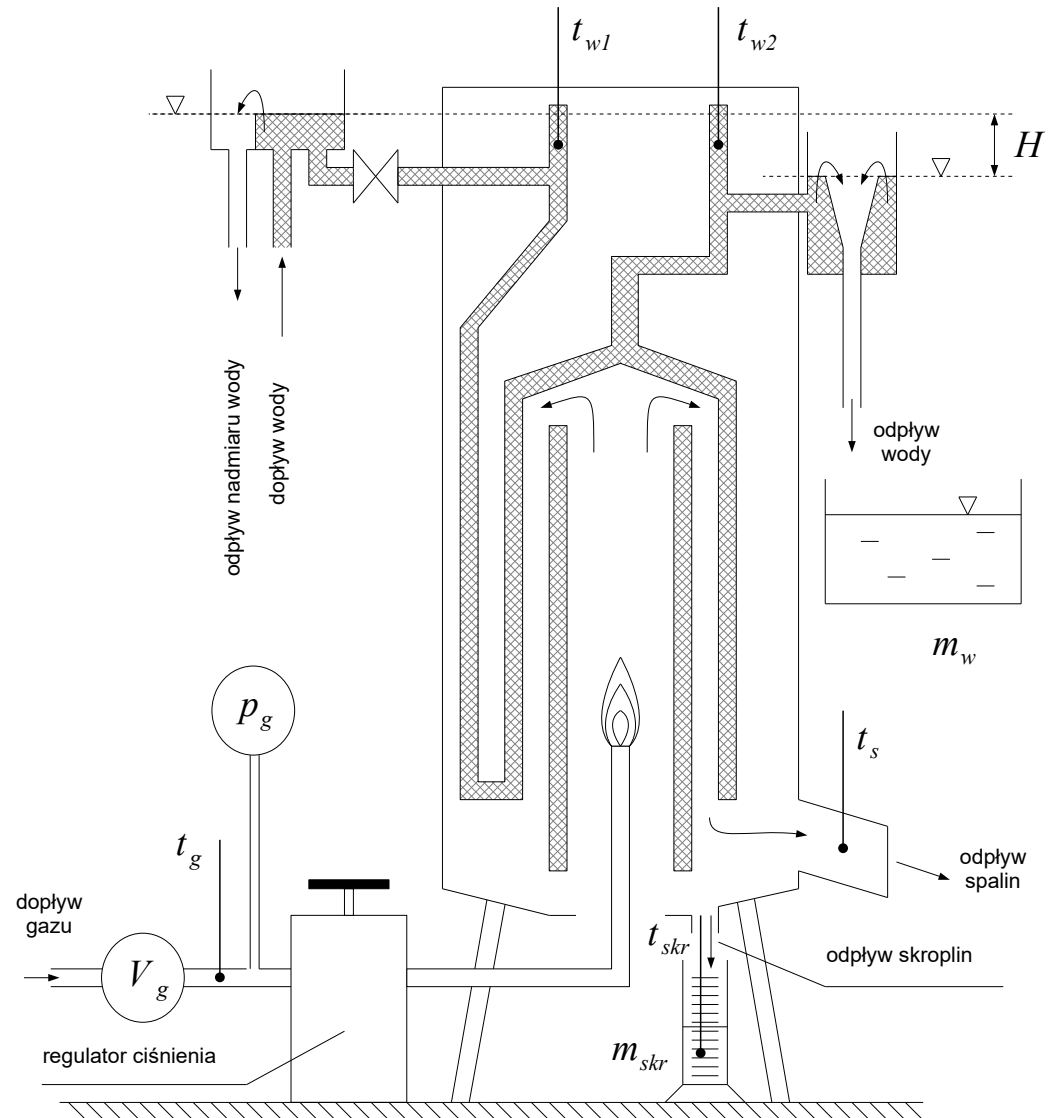
Z I ZT dla układów otwartych:

$$\Delta H = Q + L_t$$

W układzie nie ma pracy:

$$Q = \Delta H$$

$$Q = \sum H_{dop} - \sum H_{odp}$$



Przeływowy kalorymetr Junkersa

Badania kalorymetryczne paliw płynnych

Bilans kalorymetru Junkersa:
$$Q + (H_{w1} - H_{w2}) + H_g - H_s - H_{skr} = 0$$

Q - ciepło dostarczone do układu [J]

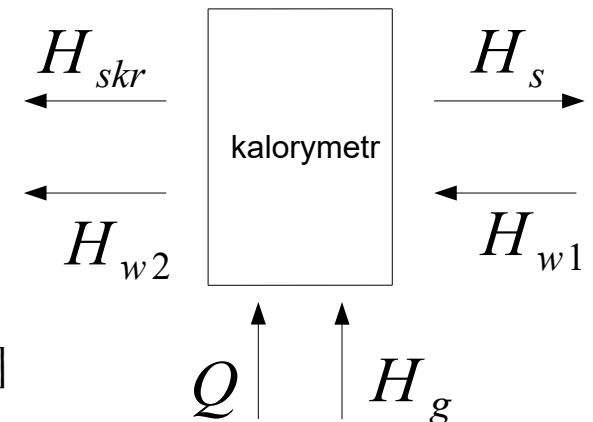
H_{w1} - entalpia wody chłodzącej na wlocie [J]

H_{w2} - entalpia wody chłodzącej na wylocie [J]

H_g - entalpia gazów dopływających (paliwa i utleniacza) [J]

H_s - entalpia gazów odpływających (spalin) [J]

H_{skr} - entalpia skroplin [J]



$$H_g \approx H_s$$

Ponieważ przy stałym ciśnieniu (atmosferycznym) ciepła właściwe powietrza i spalin mają zbliżone wartości, można przyjąć że spełnienie warunku ochłodzenia spalin do temperatury otoczenia oznacza równość entalpii gazów dopływających (paliwo i utleniacz) i odpływających (spaliny).

Badania kalorymetryczne paliw płynnych

$$Q + (H_{w1} - H_{w2}) - H_{skr} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} Q = Q_s \cdot V_N \\ H_{w1} - H_{w2} = m_w \cdot c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1}) \\ H_{skr} = m_{skr} \cdot c_{skr} \cdot t_{skr} \end{array} \right.$$

Q_s - ciepło spalania [J/m³]

V_N - objętość normalna (w warunkach normalnych) [m³]

m_w - masa wody, jaka przepłynęła przez płaszcz chłodzący w czasie spalania próbki paliwa [kg]

c_w - ciepło właściwe wody, równe 4186 [J/(kg·K)]

t_{w1} - temperatura wody chłodzącej na wlocie [°C]

t_{w2} - temperatura wody chłodzącej na wylocie [°C]

m_{skr} - masa skroplin [kg]

c_{skr} - ciepło właściwe skroplin [J/(kg·K)]

t_{skr} - temperatura skroplin [°C]

Badania kalorymetryczne paliw płynnych

Po podstawieniu i przekształceniach:

$$Q_s = \frac{Q}{V_N} = \frac{H_{skr} - (H_{w1} - H_{w2})}{V_N}$$

$$H_{skr} \approx 0$$

$$Q_s = \frac{Q}{V_N} = \frac{m_w \cdot c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{V_N}$$

Objętość w warunkach normalnych:

$$V_N = \frac{p}{p_N} \cdot V \cdot \frac{T_N}{T}$$

$$p_N = 101325 \quad [Pa]$$

$$T_N = 273.15 \quad [K]$$

Paliwo

Paliwo – substancja, której spalanie powoduje wydzielenie się ciepła w takiej ilości, że jej pozyskiwanie staje się opłacalne ekonomicznie. W skład paliw wchodzi składniki palne oraz niepalne, zwane balastem. Podstawowymi składnikami palnymi są związki chemiczne węgla elementarnego, wodoru oraz siarki. Balast to wilgoć zawarta w paliwie oraz substancje niepalne powstałe po spaleniu paliwa (popiół).



Główne rodzaje paliw

| | Paliwa naturalne | Paliwa sztuczne | Paliwa odpadowe |
|---------------|--|---|---|
| Paliwa stałe | węgiel kamienny, węgiel brunatny, torf, drewno | koks, półkoks, brykiety, pył węglowy | trociny, obrzynki drewna, przerosty kopalniane, muł z płuczek węgla |
| Paliwa ciekłe | ropa naftowa | produkty destylacji ropy naftowej: benzyna, nafta, olej napędowy i opałowy; produkty destylacji smoły pogazowej: benzen, olej opałowy pogazowy | - |
| Paliwa gazowe | gaz ziemny | gaz węglowy (w tym koksowniczy), gaz generatorowy, gaz wodny, gaz świetlny (miejski), gazy skroplone (LPG) | gaz wielkopieczowy |

Paliwa stałe

Paliwo stałe – paliwo składające się z masy palnej (substancji palnej) zawierającej, oprócz czystego pierwiastka węgla, szereg związków chemicznych węgla z wodorem, tlenem, azotem i siarką oraz z balastu. W skład balastu wchodzi popiół i woda. Najważniejszymi paliwami stałymi są węgiel kamienny i węgiel brunatny oraz drewno opałowe, torf i biomasa. W skład paliw stałych wchodzi:

- węgiel (pierwiastek chemiczny) – od 50 do 97 % masy palnej
- tlen – do 40 % masy palnej
- wodór – do kilku % masy palnej
- siarka – do 2 % masy palnej
- azot – do 2 % masy palnej
- popiół
- wilgoć

Paliwa stałe

Węgiel kamienny – skała osadowa pochodzenia roślinnego, zawierająca 75÷97% pierwiastka węgla, powstała głównie w karbonie (era paleozoiczna) ze szczątków roślinnych, które bez dostępu tlenu uległy uwęgleniu.

W Polsce rozróżnia się 11 typów węgla (podzielonych wg 4 wskaźników: zawartości części lotnych, zdolności spiekania, dylatacji i ciepła spalania) oraz 11 sortymentów zasadniczych i 13 połączonych (podzielonych według wielkości bryłek węgla).



Paliwa stałe

Węgiel brunatny – skała osadowa pochodzenia roślinnego, zawierająca 62÷75% pierwiastka węgla, powstała w neogenie ze szczątków roślinnych, które bez dostępu tlenu uległy uwęgleniu. Ze względu na tendencję do „zbijania” się w jednolitą masę, węgiel brunatny używany jest głównie na rynkach lokalnych. Skutkiem tego elektrownie opalane węglem brunatnym najczęściej stawia się w pobliżu złóż, a surowiec z kopalni węgla brunatnego dostarczany jest do nich przenośnikami taśmowymi lub koleją. Węgiel brunatny wykorzystywany jest również w formie przerobionej, w postaci brykietów.



Paliwa stałe

Pył węglowy – drobnoziarniste paliwo powstałe w procesie obróbki technologicznej mielenia węgla kamiennego, brunatnego lub drzewnego. Ma dobrą zapalność, reaktywność i charakteryzuje się wysoką łatwością spalania. Pył węglowy odznacza się zdolnością do przepływu i fluidyzacji, co umożliwia jego użytkowanie podobne do paliw ciekłych lub gazowych.



Paliwa stałe

Torf – najmłodszy węgiel kopalny, zawierający mniej niż 60% pierwiastka węgla, będący efektem niepełnego rozkładu szczątków roślinnych, zachodzącego w warunkach długotrwałego lub stałego zabagnienia wierzchniej warstwy gleby. Torf składa się ze szczątków organicznych znajdujących się w różnych stadiach mikrobiologicznego i fizykochemicznego procesu rozkładu. Torf jest w różnym stopniu nasycony substancjami mineralnymi. Najczęściej jest to piasek, czasami wytrącone związki żelaza, rzadko związki fosforu. Torf wykorzystuje się najczęściej w postaci brykietów.



Paliwa stałe

Koks – paliwo uzyskiwane poprzez przemysłowe wygrzewanie węgla kamiennego w temperaturze $600\div 1200$ [°C] za pomocą gazów spalinowych przy ograniczonym dostępie tlenu. W procesie koksowania z surowego węgla usuwane są gazy, ciecze, substancje łatwopalne (np. siarka) oraz inne substancje (głównie organiczne) ulegające rozkładowi w tych temperaturach. Koks stosuje się głównie jako opał dla wielkich pieców w hutach oraz kotłów grzewczych. Zaletą koksu w porównaniu z węglem kamiennym jest jego wyższa kaloryczność (ze względu na wyższą zawartość węgla, nawet do 98%), a jednocześnie spokojniejsze spalanie, co umożliwia rzadsze uzupełnianie opału w piecu.



Paliwa stałe

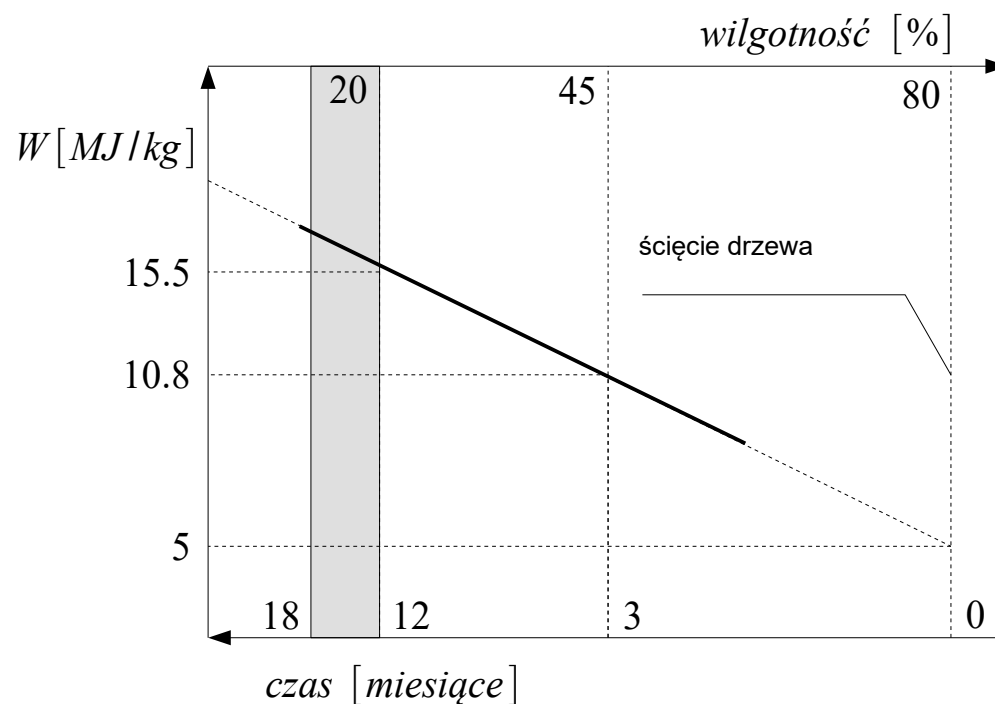
Półkoks (koks niskotemperaturowy) – paliwo bezdymne uzyskiwane w procesie wylewania paliwa stałego (węgla kamiennego, węgla brunatnego lub torfów) w temperaturze $450\div 600$ [°C]. Półkoks charakteryzuje się łatwą zapalnością, dużą porowatością i mniejszą gęstością w stanie sypkim niż paliwo wyjściowe. Półkoks stosuje się do produkcji koksu formowanego (brykietów), karbidu, gazu generatorowego, do celów opałowych oraz w procesach redukcyjnych w metalurgii metali nieżelaznych.



Paliwa stałe

Drewno opałowe – drewno gromadzone i przetwarzane do wykorzystania na opał. Wartość opałowa drewna w dużym stopniu zależy od gatunku i wilgotności. Największą wartość opałową mają: grab, dąb, jesion, klon, brzoza i buk.

Rozróżnia się drewno opałowe grube (pozyskiwane z lasów lub wycinek) oraz drobne (z plantacji drzew szybkorosnących). Innym źródłem drewna opałowego są odpady przemysłowe (np. wióry, trociny, zrębki) lub komunalne (np. zużyte meble).



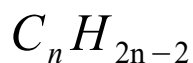
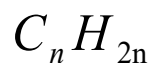
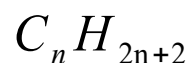
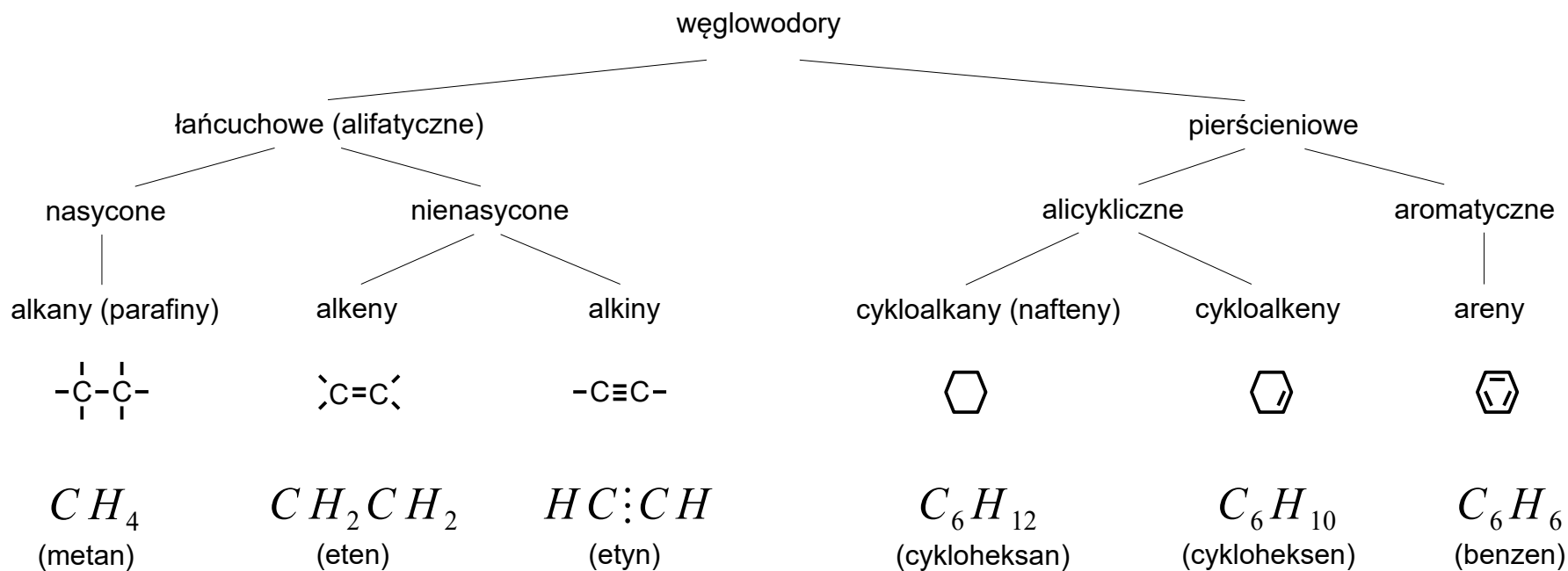
Paliwa stałe

Biomasa – masa materii zawarta w organizmach. Biomasę stanowić mogą różne produkty odpadowe takie jak np. drewno odpadowe, odchody zwierząt, osady ściekowe, słoma, makuchy, łodygi kukurydzy, wysłodki buraczane i inne odpady produkcji rolniczej lub zwierzęcej. Innym źródłem biomasy mogą być specjalne uprawy roślin szybko rosnących, takich jak np. wierzba wiciowa, ślazier pensylwański, topinambur, róża wielokwiatowa, rdest sachaliński, różne trawy wieloletnie lub wodorosty morskie.



Węglowodory

Węglowodory – organiczne związki chemiczne zawierające w swojej strukturze wyłącznie atomy węgla i wodoru. Wszystkie one składają się z podstawowego szkieletu węglowego (powiązanych z sobą atomów węgla) i przyłączonych do tego szkieletu atomów wodoru.



Węglowodory

W przypadku spalania węglowodorów reakcje występujące podczas spalania można podzielić następująco:

- reakcje rozerwania łańcucha węglowodoru
(dotyczy wszystkich węglowodorów z wyjątkiem metanu;
rozerwanie łańcuchów otwartych zachodzi w niższej temperaturze niż
łańcuchów zamkniętych, tj. węglowodorów pierścieniowych)
- reakcje odwodornienia łańcucha i utleniania wodoru
- reakcje utleniania węgla do tlenku węgla
- reakcje utleniania tlenku węgla do dwutlenku węgla

Rodzaje reakcji:

- 1 rzędu: $A \rightarrow B + C$
- 2 rzędu: $A + B \rightarrow C + D + E$

Paliwa ciekłe

Paliwo ciekłe – paliwo składające się głównie z węglowodorów, pochodzące z przeróbki ropy naftowej, węgla kamiennego i brunatnego lub biomasy. Paliwa ciekłe stosuje się do napędu silników spalinowych, do rozruchu kotłów parowych oraz do celów grzewczych i technologicznych. Do najważniejszych paliw ciekłych należą: benzyna, olej napędowy, olej opałowy, mazut, nafta, olej rzepakowy, eter oraz paliwa syntetyczne, otrzymywane z przeróbki gazu ziemnego, węgla lub biomasy.



Paliwa ciekłe

Ropa naftowa – ciekła kopalina, złożona z mieszaniny naturalnych węglowodorów gazowych, ciekłych i stałych (bituminów), z niewielkimi domieszkami azotu, tlenu, siarki i zanieczyszczeń.

Podstawowy skład chemiczny ropy naftowej to: 80÷88% węgla, 11÷14.5% wodoru, 0.01÷6% siarki (rzadko do 8%), 0.005÷0.7% tlenu (rzadko do 1.2%), 0.001÷1.8% azotu. Oprócz wymienionych, w ropie naftowej można znaleźć około innych 50 pierwiastków chemicznych.



Najstarszy na świecie istniejący do dziś szyb naftowy we wsi Siary. Szyb został wykopany ręcznie w 1852 r.

Paliwa ciekłe



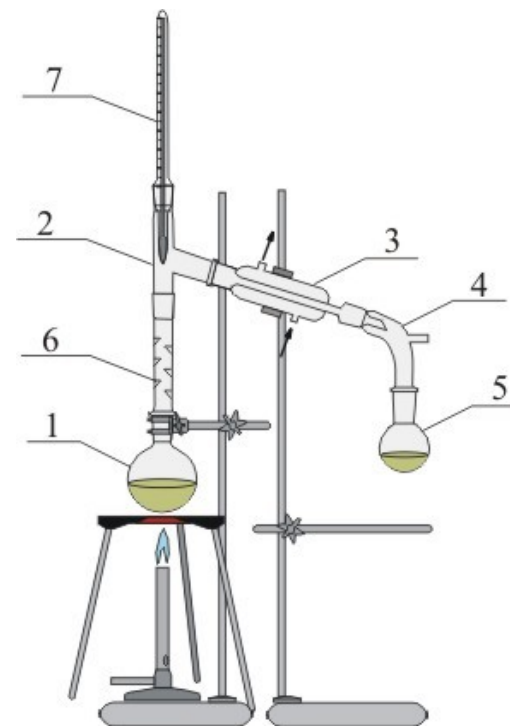
Jan Józef Ignacy Łukasiewicz (ur. 8 lub 23 marca 1822 w Zadusznikach, zm. 7 stycznia 1882 w Chorkówce) – polski farmaceuta i przedsiębiorca, wynalazca lampy naftowej, pionier przemysłu naftowego w Europie, z zainteresowania chemik i fizyk; rewolucjonista i działacz niepodległościowy.



Paliwa ciekłe

Destylacja frakcyjna (rektyfikacja) – proces rozdzielania składników mieszaniny na podstawie temperatury wrzenia poszczególnych składników.

W trakcie rektyfikacji ropy naftowej zbierane są kolejne frakcje, wrzące zazwyczaj w tych samych temperaturach: benzyna lekka ($40\div 160$ [°C]), benzyna ciężka ($160\div 200$ [°C]), nafta ($260\div 300$ [°C]) i olej napędowy ($260\div 350$ [°C]). Pozostałość tworzy tzw. mazut, który po przedestylowaniu próżniowym i odpowiednich przeróbkach daje oleje smarowe i odsiarczone oleje opałowe.



Aparat do destylacji:

- 1 - kolba destylacyjna
- 2 - nasadka destylacyjna
- 3 - chłodnica
- 4 - przedłużacz
- 5 - odbieralnik
- 6 - kolumna destylacyjna
- 7 - termometr

Paliwa ciekłe

Benzyna – jeden z głównych rodzajów paliwa stosowanego do napędu samochodów, samolotów i niektórych innych urządzeń posiadających silnik spalinowy. Stosowana także jako rozpuszczalnik (benzyna ekstrakcyjna oraz benzyna lakowa). Głównymi składnikami benzyn są węglowodory alifatyczne (łańcuchowe) o liczbie atomów węgla od 5 do 12. Występują również śladowe ilości węglowodorów nienasyconych oraz aromatycznych.

Własności benzyn (zakresy):

- temperatura wrzenia: 35-230 [°C]
- ciepło parowania: 315-350 [kJ/kg]
- ciepło spalania: ok. 42 [MJ/kg]
- gęstość: 0.67-0.8 [g/cm³]
- wartość opałowa: 42-44 [MJ/kg] (w stanie ciekłym)

Paliwa ciekłe

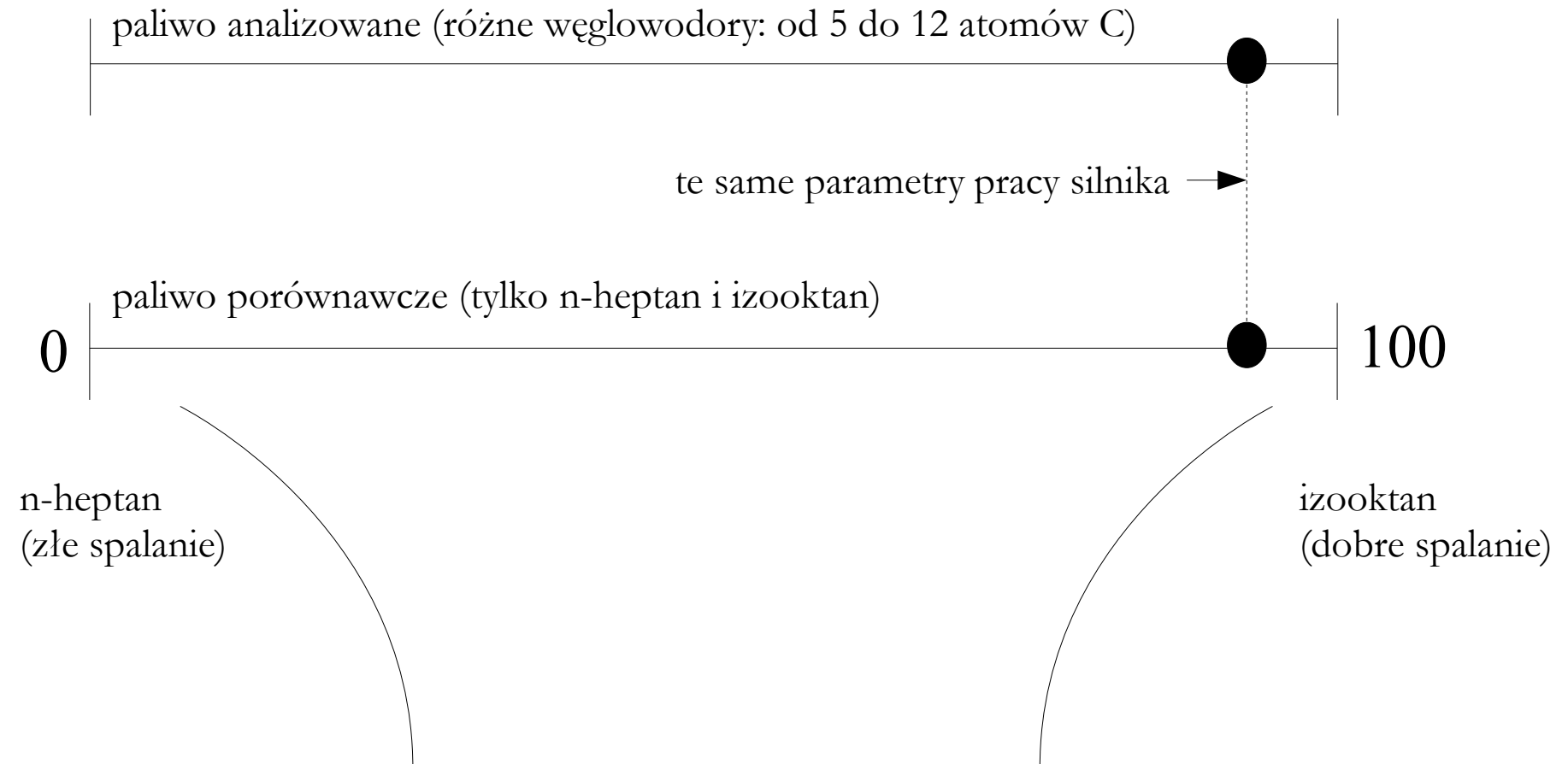
Liczba oktanowa – liczba określająca odporność na niekontrolowany samozapłon paliwa silnikowego do silników z zapłonem iskrowym, który może powodować jego spalanie stukowe (detonacyjne).

Niekontrolowany samozapłon paliwa jest bardzo szkodliwy, wręcz destrukcyjny dla silnika, a przede wszystkim jego zaworów, tłoków i korbowodu.

Im wyższy zastosowany stopień sprężania, tym większa jest potrzebna ochrona przed spalaniem detonacyjnym.

Aby uodpornić paliwo na samozapłon wprowadza się specjalne dodatki (czteroetylenk ołowiu w etylinie lub kilka procent węglowodorów aromatycznych oraz eterów z grupami aromatycznymi w benzynie bezołowiowej).

Paliwa ciekłe



Mogą występować lokalne samozapłony paliwa (spowodowane wzrostem ciśnienia) przed właściwym momentem zapłonu.

Zapłon następuje wyłącznie od iskry ze świecy zapłonowej.

Paliwa ciekłe

Olej napędowy – paliwo przeznaczone do silników wysokopiętnych z zapłonem samoczynnym. Jest mieszaniną węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych, wydzielonych z ropy naftowej w procesach destylacyjnych. Z uwagi na dużą zawartość siarki w tych destylatach, konieczne jest jej usuwanie poprzez obróbkę wodorową w procesach katalitycznych.

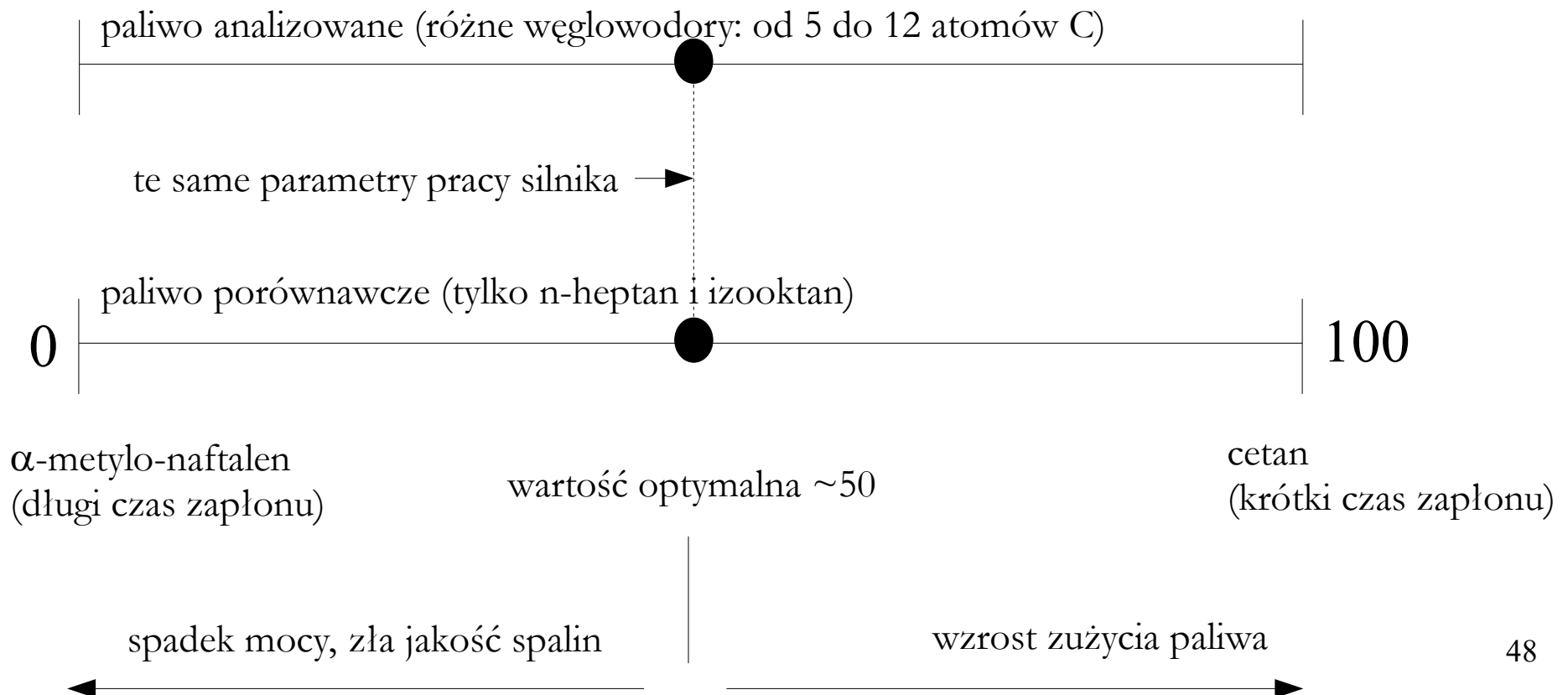
Własności olejów napędowych (zakresy):

- temperatura wrzenia: 180-350 [°C]
- temperatura zapłonu: powyżej 55 [°C]
- gęstość: 0.82-0.85 [g/cm³]
- wartość opałowa: 42-44 [MJ/kg] (w stanie ciekłym)



Paliwa ciekłe

Liczba cetanowa – liczba określająca skłonność paliwa do samozapłonu. Im większa jest liczba cetanowa, tym krótszy jest czas między początkiem wtrysku a chwilą samozapłonu (tzw. zwłoka zapłonu).



Paliwa ciekłe

Olej opałowy – produkty destylacji ropy naftowej stosowane jako paliwo w instalacjach grzewczych oraz do pieców przemysłowych w celach produkcyjnych i technologicznych. Ze względu na właściwości rozróżnia się oleje lekkie, średnie oraz ciężkie.



Paliwa ciekłe

Mazut (ciężki olej opałowy) – oleista ciecz będąca pozostałością po destylacji niskogatunkowej ropy naftowej w warunkach atmosferycznych (ciśnienie normalne), w temperaturze 250 do 350 [°C]. Składa się z węglowodorów wysokocząsteczkowych. Mazut stosuje się jako paliwo (z uwagi na niską cenę) do okrętowych wolnoobrotowych silników tłokowych, parowych kotłów okrętowych (oraz do rozruchu energetycznych kotłów parowych), kotłów parowych w niektórych modelach parowozów, pieców przemysłowych (np. przy produkcji gipsu) oraz jako surowiec do wyrobu smarów ciekłych i stałych oraz surowiec do krakingu, w celu uzyskania olejów pędnych i benzyn.



Paliwa ciekłe

Nafta – ciekła frakcja ropy naftowej, będąca mieszaniną węglowodorów, których cząsteczki zawierają 12÷15 atomów węgla. Stosowana jako paliwo lotnicze (pod nazwą „kerozyna” lub „nafta lotnicza”), jako rozpuszczalnik oraz do celów kosmetycznych. Zaletą nafty jako paliwa jest niska cena (naftę otrzymuje się bezpośrednio z procesu destylacji i nie trzeba stosować dalszych zabiegów uszlachetniających), duża ilość energii ze spalania w stosunku do masy i objętości paliwa, wytrzymałość na niskie temperatury oraz stabilność właściwości w dużym przedziale temperatur.



Paliwa ciekłe

Alkohol – związek organiczny zawierający co najmniej jedną grupę hydroksylową ($-OH$) połączoną z atomem węgla. Najprostszymi alkoholami jest metanol (CH_3OH), trujący dla człowieka oraz etanol (C_2H_5OH), czyli alkohol spożywczy. Obecnie zastosowanie alkoholu jako paliwa lub dodatku do paliwa jest marginalne, głównie ze względu na wysoki koszt produkcji oraz znacznie niższą od benzyny wartość opałową. Mieszaninę metanolu (70%) z nitrometanem (20%) i innymi dodatkami stosuje się jako paliwo do silników modelarskich.



Paliwa ciekłe

Biodiesel – paliwo do silników wysokopięnych produkowane z odnawialnych surowców takich jak oleje roślinne czy tłuszcze zwierzęce. W odróżnieniu od normalnego oleju napędowego, biodiesel jest paliwem biodegradowalnym i nietoksycznym, jego wykorzystanie powoduje znaczne obniżenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Biodiesel może być mieszany z olejem napędowym lub też używany samodzielnie. Wadą biodiesla jest jego niekorzystne oddziaływanie na gumowe węże i przewody paliwowe w silnikach.



Paliwa gazowe

Paliwo gazowe – mieszanina wieloskładnikowa gazów palnych i niepalnych, pochodzenia naturalnego lub sztucznego. Najważniejszymi paliwami ciekłymi są: gaz ziemny, gaz węglowy, gaz koksowniczy, gaz generatorowy, gaz wodny, gaz świetlny, gaz wielkopieczowy, gazy skroplone oraz biogaz.

Paliwa gazowe klasyfikuje się według składu, ciepła spalania i wartości opałowej oraz według liczby Wobbego.

Liczba Wobbego

Liczba Wobbego – stosunek wartości energetycznej jednostkowej porcji gazu (m^3 , kg lub mola) oraz pierwiastka kwadratowego jego gęstości względnej d , w tych samych warunkach odniesienia.

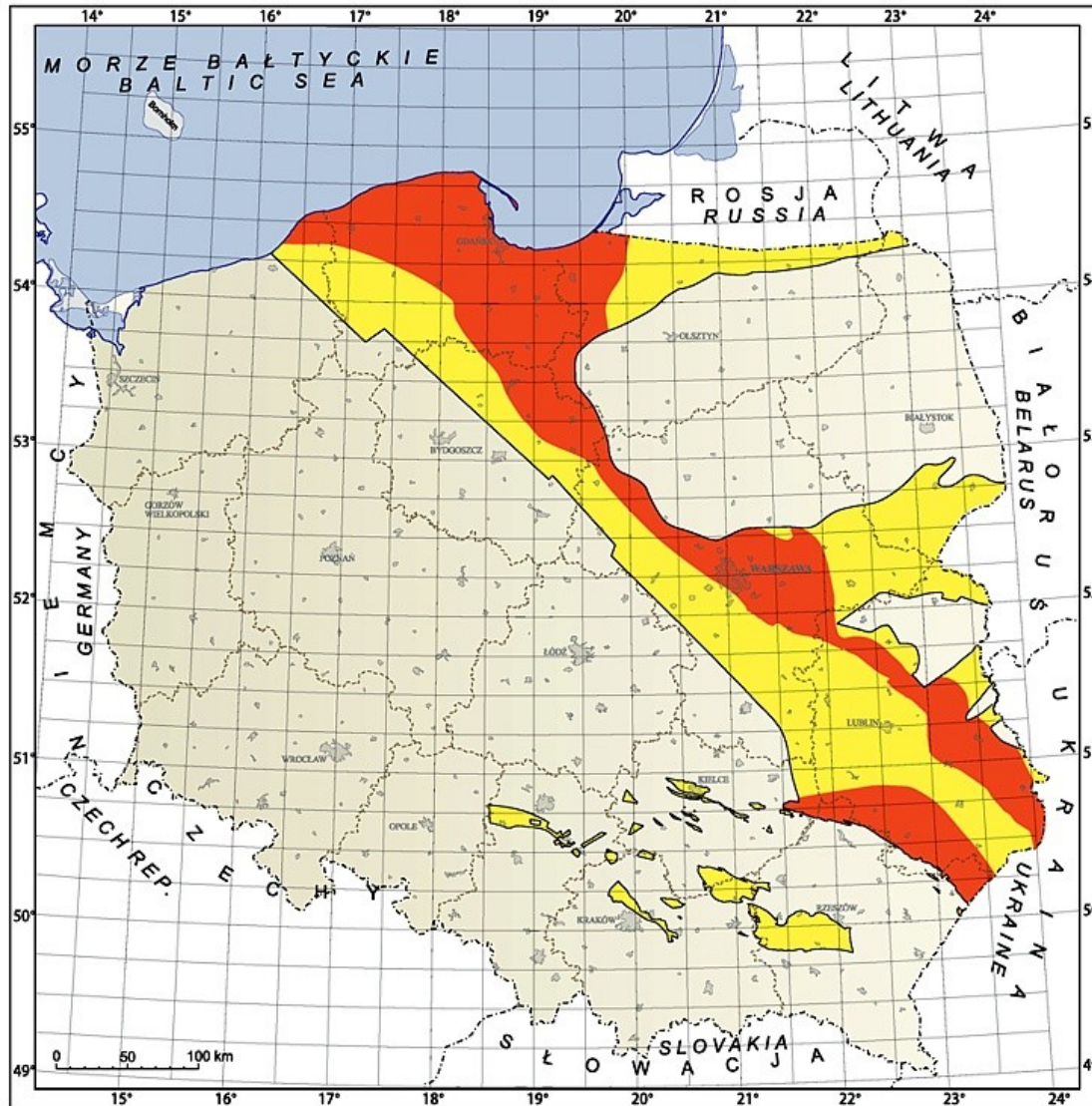
Wyróżnia się dolną liczbę Wobbego, gdy za wartość kaloryczną przyjmuje się wartość opałową paliwa oraz górną liczbę Wobbego, gdy za wartość kaloryczną przyjmuje się ciepło spalania paliwa. Wartość liczby Wobbego jest podstawą do podziału na grupy paliw gazowych.

$$Wob = \frac{Q}{\sqrt{d}} \quad \left[\frac{MJ}{m^3} \right] \left[\frac{MJ}{kg} \right] \left[\frac{MJ}{mol} \right]$$

Paliwa gazowe

Gaz ziemny – rodzaj paliwa kopalnego pochodzenia organicznego. Pokłady gazu ziemnego występują samodzielnie (w postaci wypełnionych gazem pustych przestrzeni, gazu łupkowego lub hydratów) lub towarzyszą złożom ropy naftowej albo węgla kamiennego (jako tzw. gaz kopalniany). Zawartość składników gazu ziemnego jest zmienna i zależy od miejsca wydobycia, jednak głównym składnikiem stanowiącym ponad 90% udziału jest zawsze **metan**. Oprócz niego mogą występować niewielkie ilości etanu, propanu, butanu i innych związków organicznych i mineralnych. Gaz ziemny jest bezwonny i jest specjalnie nawaniany przed wprowadzeniem do sieci gazowej w celu ułatwienia wykrycia jego obecności w powietrzu. Gaz ziemny jest mniej szkodliwy dla środowiska niż inne źródła energii: emisja CO₂ ze spalania gazu jest do 30% mniejsza niż w przypadku ropy oraz do 60% mniejsza niż w przypadku węgla. Znacznie zredukowana jest także emisja innych substancji, takich jak rtęć, siarka czy dwutlenek azotu.

Paliwa gazowe



Obszar występowania łupków dolnego paleozoiku potencjalnie zawierających niekonwencjonalny gaz ziemny

obszary o nieokreślonym lub niższym potencjale występowania gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku

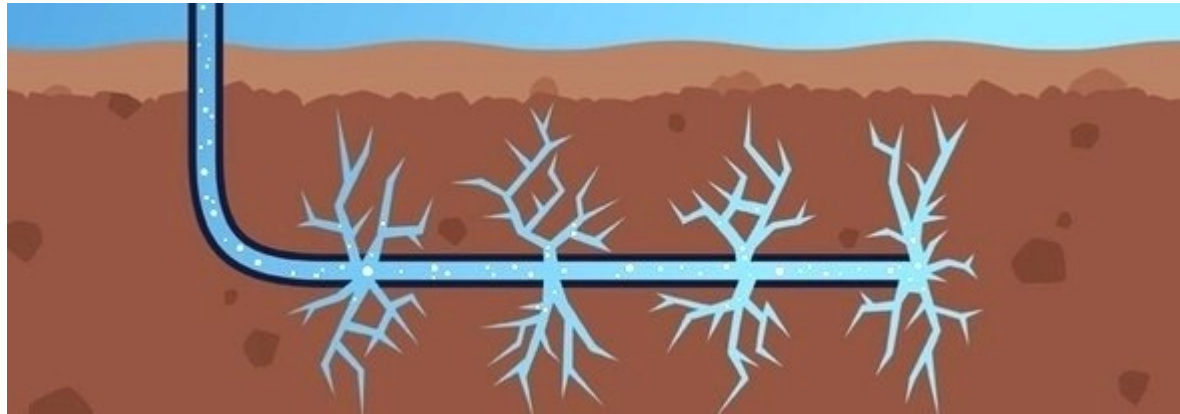
obszary o wstępnie udokumentowanym potencjale występowania gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku

© FIG-PIB / Opracowanie: P. Poprawa

Potencjalne złoża gazu łupkowego w Polsce

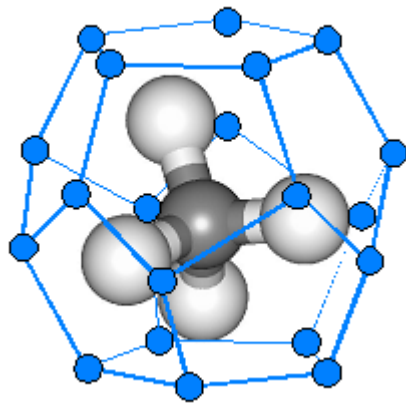
Paliwa gazowe

Szczelinowanie hydrauliczne – proces technologiczny mający na celu zwiększenie wydajności odwiertu. Proces ten przeprowadza się poprzez wpompowywanie do odwiertu płynu szczelinującego (mieszanki wody z dodatkami chemicznymi i piaskiem) pod wysokim ciśnieniem w celu wytworzenia, utrzymania lub powiększenia szczelin w skałach.



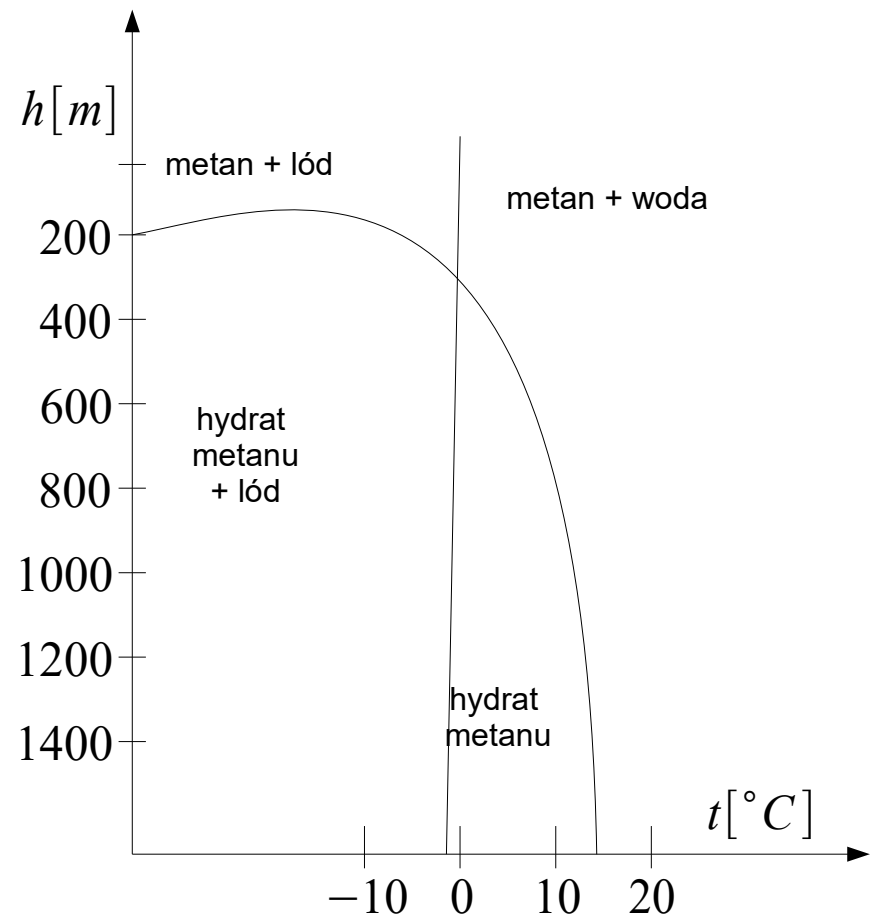
Paliwa gazowe

Hydraty (wodziany) – krystaliczne złożone kompleksy molekuł powstałe w wyniku fizycznej kombinacji wody i gazów. W przyrodzie najbardziej rozpowszechnione są hydraty metanowe. Mają one postać lodu, z którego po ogrzaniu wydzielą się gaz. Udział metanu w hydracie jest wysoki: 164 [m³] metanu na 1 [m³] hydratu.



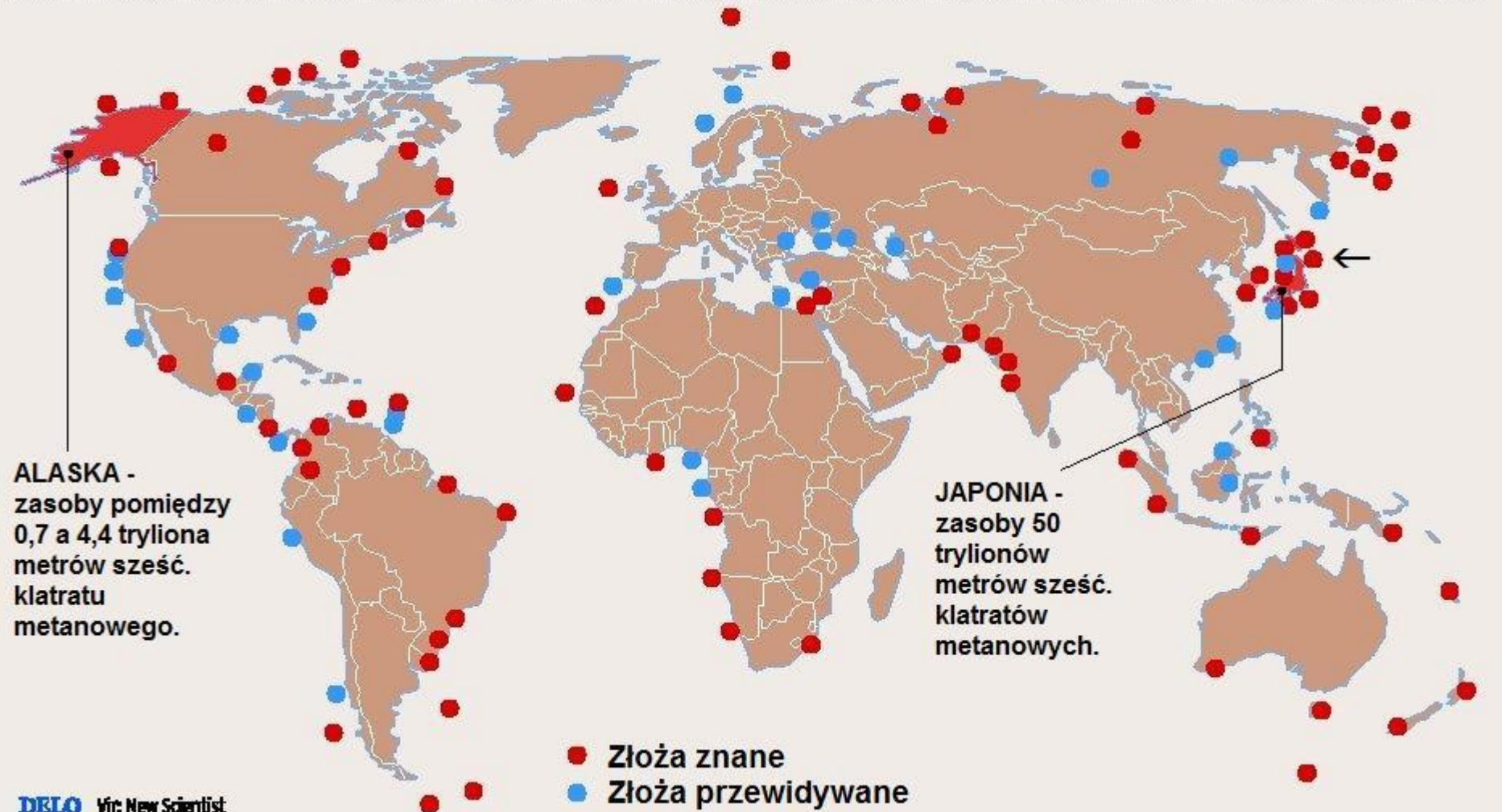
Paliwa gazowe

Złóża hydratów znajdują się na stokach oceanicznych i w lądowych regionach wiecznej zmarzliny. Ich światowe zasoby szacuje na 10^{16} [m³] metanu (dla porównania zasoby gazu ziemnego w świecie ocenia się na ponad 10^{14} [m³]).



Paliwa gazowe

KLATRATY METANOWE - ŚWIATOWE ZŁOŻA



Spaliny

Spaliny – mieszanina gazów powstających w procesie spalania paliwa stałego, ciekłego lub gazowego.

W skład spalin wchodzi, w ilościach zależnych od rodzaju paliwa i warunków spalania:

- produkty reakcji chemicznej utleniania,
- produkty reakcji chemicznej syntezy pomiędzy substancjami chemicznymi znajdującymi się w obszarze działania reakcji utleniania,
- niewykorzystana część substancji aktywnych paliwa w postaci gazowej lub pary,
- substancje nieaktywne paliwa w postaci gazowej lub pary,
- gazy obojętne, np. niepalne składniki powietrza,
- tlen.

Współczynnik nadmiaru powietrza

Współczynnik nadmiaru powietrza – stosunek ilości powietrza (tlenu O_2) rzeczywiście doprowadzonego do spalania, do teoretycznej ilości powietrza (tlenu O_2), wynikającej z zależności stechiometrycznych (równań reakcji chemicznych).

$$\lambda = \frac{L_r}{L_t} = \frac{O_r}{O_t} \quad [-]$$

L_r - rzeczywista ilość powietrza doprowadzona do układu [m^3 powietrza / m^3 paliwa]

L_t - teoretyczna ilość powietrza doprowadzona do układu [m^3 powietrza / m^3 paliwa]

O_r - rzeczywista ilość tlenu doprowadzona do układu [m^3 tlenu / m^3 paliwa]

O_t - teoretyczna ilość tlenu doprowadzona do układu [m^3 tlenu / m^3 paliwa]

Współczynnik nadmiaru powietrza

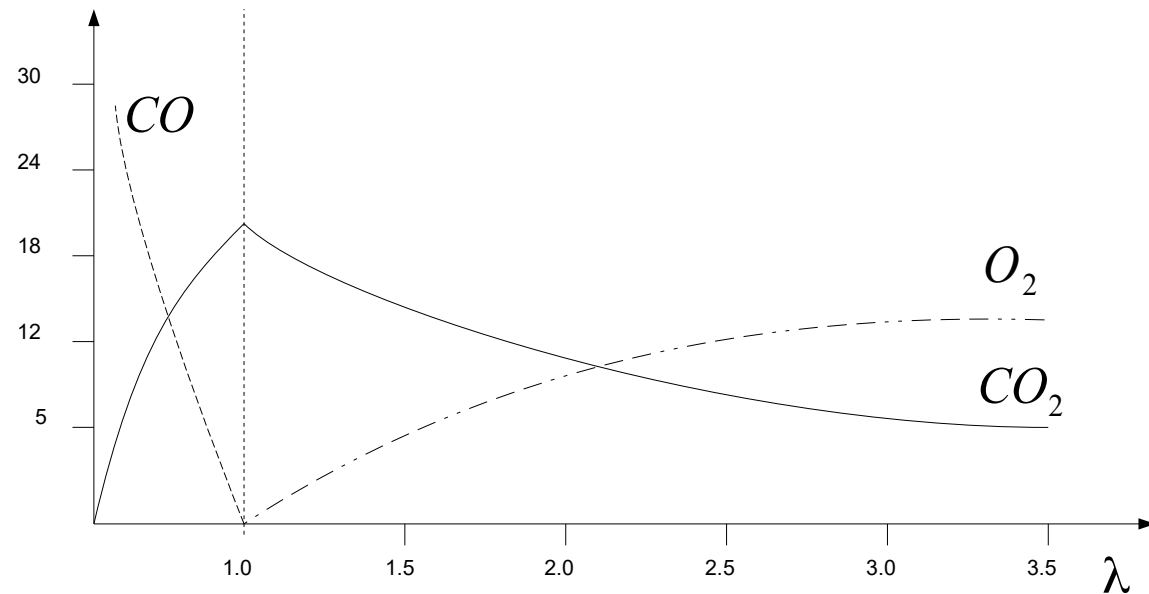
Optymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza:

- silniki z zapłonem iskrowym: ~ 1.3
- silniki z zapłonem samoczynnym: 1.15-1.17
- silniki z doładowaniem: > 2.0

Doładowanie silnika spalinowego – proces doprowadzania do silnika większej ilości czynnika roboczego (powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej) niż silnik zassałby swobodnie z otoczenia. Proces ten jest realizowany poprzez zwiększenie ciśnienia (a tym samym jego gęstości i temperatury) czynnika na wlocie do silnika poprzez sprężarkę.

Udział objętościowy dwutlenku węgla

$$Y_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{ss}} \cdot 100$$

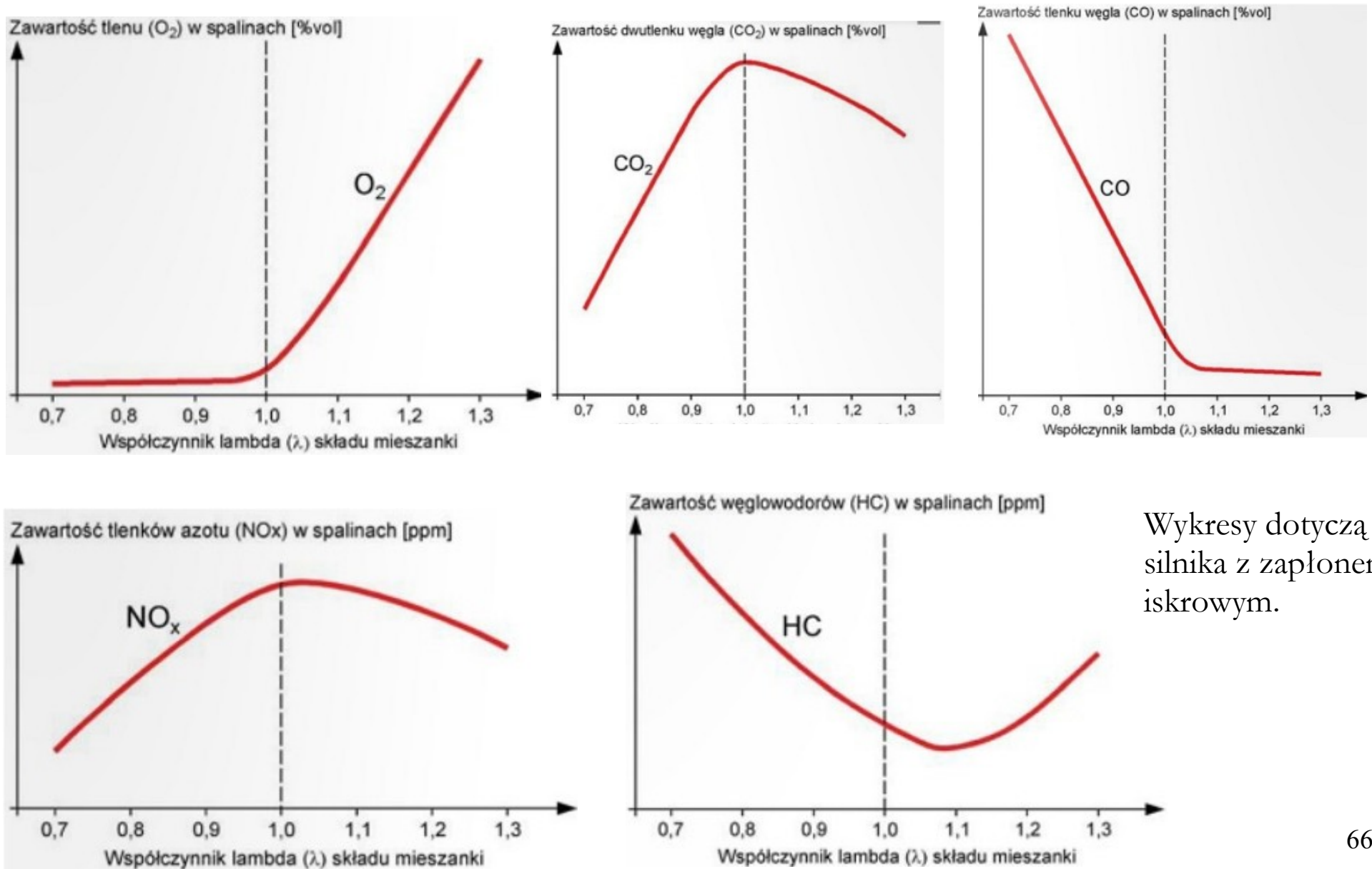


Y_{CO_2} - objętościowy udział dwutlenku węgla w spalinach [$m^3 CO_2 / m^3$ paliwa]

V_{CO_2} - objętość dwutlenku węgla w próbce spalin [m^3]

V_{ss} - objętość próbki suchych spalin [m^3]

Wpływ λ na skład spalin



Wykresy dotyczą silnika z zapłonem iskrowym.

Nadmiar powietrza

Nadmiar powietrza – stosunek różnicy całkowitej ilości powietrza dostarczonego do spalania i ilości teoretycznie potrzebnej ($L_r - L_t$), do tej ostatniej wielkości (L_t), wyrażony w procentach.

$$n = \left(\frac{L_r - L_t}{L_t} \right) \cdot 100\%$$

$$n = \left(\frac{L_r}{L_t} - \frac{l_t}{L_t} \right) \cdot 100\%$$

$$n = \left(\frac{L_r}{L_t} - 1 \right) \cdot 100\%$$



Teoretyczne zapotrzebowanie tlenu

Teoretyczne zapotrzebowanie tlenu – ilość tlenu przypadająca na jednostkę paliwa w stechiometrycznej mieszance palnej.

- dla paliw stałych (zawierających węgiel, wodór, siarkę i tlen)

$$O_t = \frac{8}{3} \cdot Y_c + 8 \cdot Y_{H_2} + 1 \cdot Y_S - Y_{O_2}$$

- dla paliw gazowych

$$O_t = \frac{1}{2} \cdot (Y_{H_2} + Y_{CO}) + 2 \cdot Y_{CH_4} + 3.5 \cdot Y_{C_2H_4} + 2.5 \cdot Y_{C_2H_5} - Y_{O_2}$$

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza – ilość powietrza przypadająca na jednostkę paliwa w stechiometrycznej mieszance palnej.

$$L_t = \frac{O_t}{0.21}$$

| | $L_{min} [m^3 / m^3]$ |
|------------|-----------------------|
| CO | 2.38 |
| H_2 | 2.38 |
| CH_4 | 9.52 |
| C_2H_2 | 11.09 |
| C_2H_6 | 16.7 |
| C_3H_8 | 31.0 |
| gaz ziemny | 7.8 |

Strata niezupełnego spalania

Strata niezupełnego spalania – strata energii spowodowana istnieniem w spalinach składników palnych, wyrażona w procentach

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} W_i \cdot Y_i}{W_p} \cdot 100\%$$

W_i - wartość opałowa i-tego palnego składnika spalin [J/m³]

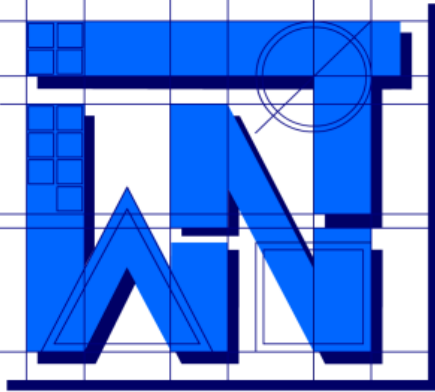
Y_i - udział objętościowy i-tego palnego składnika spalin [J/m³]

W_p - wartość opałowa paliwa [J/m³]

Podsumowanie

Zagadnienia:

Utlenianie, rodzaje utleniania, spalanie, piroliza, zapłon, temperatura zapłonu, temperatura zapalenia, temperatura samozapłonu, spalanie powierzchniowe i objętościowe, spalanie bezpłomieniowe i płomieniowe, płomień, płomień kinetyczny i dyfuzyjny, spalanie zupełne i całkowite, ciepło spalania, wartość opałowa, udział objętościowy i masowy, wartość opałowa a ciepło spalania, wykres ciepła parowania wody, badania kalorymetryczne paliw płynnych (kalorymetr Junkersa), paliwo, główne rodzaje paliw, paliwa stałe, węglowodory, paliwa ciekłe, destylacja frakcyjna, liczba oktanowa, liczba cetanowa, paliwa gazowe, liczba Wobbego, spaliny, współczynnik nadmiaru powietrza, udział objętościowy dwutlenku węgla, nadmiar powietrza, teoretyczne zapotrzebowanie tlenu, teoretyczne zapotrzebowanie powietrza, strata niezupełnego spalania.



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, 2013-2022