

PARAMETRY PROCESU SPALANIA

Broszura informacyjna

madur
E L E C T R O N I C S

Spis treści

Podstawowe zasady przeliczania wyników.....	3
1.1. Jednostki, w których wyrażane są mierzone wielkości.....	3
1.1.1. ppm (parts per milion).....	3
1.1.2. Bezwzględne stężenie masowe [mg/m^3].....	4
1.1.3. Stężenie masowe odniesione do zawartości tlenu w spalinach.....	5
1.2. Wielkości mierzone w sposób bezpośredni.....	5
1.3. Obliczanie stężenia dwutlenku węgla.....	6
1.4. Obliczanie stężenia tlenków azotu NO_x	7
1.5. Stężenie „nierozrzedzonego” tlenku węgla CO_u	7
1.6. Obliczenia parametrów spalania.....	8
1.6.1. Strata kominowa.....	8
1.6.2. Sprawność energetyczna.....	9
1.6.3. Współczynnik nadmiaru powietrza.....	10
1.7. Obliczanie sprawności dla kotłów kondensacyjnych.....	11
1.7.1. Zawartość wody w powietrzu.....	13
1.7.2. Obliczanie zysku energetycznego z kondensacji.....	15
1.8. Parametry paliw.....	17

PODSTAWOWE ZASADY PRZELICZANIA WYNIKÓW

Analizatory firmy **madur** są najczęściej wykorzystywane do analizy gazów powstających w procesie spalania, czyli spalin. Uzyskane wyniki pomiarów służą do regulacji parametrów kotłów koksowniczych i innych, w których zachodzi proces spalania. Dzięki wykorzystaniu najnowszych technologii dokonywane pomiary są bardzo dokładne i pozwalają na taką regulację procesu spalania, aby przebiegał on w sposób najbardziej ekonomiczny (zmniejszone zużycie paliwa, ograniczona emisja szkodliwych dla środowiska związków).

Broszura ta ma na celu przedstawienie Państwu możliwości naszych analizatorów oraz bliższe poznanie parametrów istotnych do prawidłowej regulacji procesu spalania.

1.1. Jednostki, w których wyrażane są mierzone wielkości

1.1.1. ppm (parts per milion)

Jednostka *ppm* służy do wyrażania stężenia roztworów chemicznych i określa ile cząstek danej substancji przypada na milion cząstek roztworu. Wartości podane w *ppm* można łatwo przeliczyć na wartości wyrażone w procentach %.

$$1\text{ppm} = 10^{-4}\%$$

Na przykład jeżeli w spalinach znajduje się 100*ppm* tlenku węgla (CO) to oznacza to, że zajmują one 0,01% spalin.

Ja widać z powyższego przykładu jednostka *ppm* jest bardzo wygodna do wyrażania bardzo małych stężeń.

[ppm]	[%]
10 000 <i>ppm</i>	1%
1 000 <i>ppm</i>	0,1%
100 <i>ppm</i>	0,01%
10 <i>ppm</i>	0,001%
1 <i>ppm</i>	0,0001%

Tabela 1. Przykładowe wartości podane w *ppm* i przeliczone na procenty.

1.1.2. Bezwzględne stężenie masowe [mg/m^3]

Za pomocą tej jednostki określa się ile miligramów [mg] danej substancji znajduje się w jednym metrze sześciennym [m^3] objętości. Jednostka ta sama w sobie nie jest miarodajna, gdyż zależy bezpośrednio od ciśnienia i temperatury. Ponieważ analizatory mierzą wielkości stężeń w ppm lub procentach, to jeżeli zostaną ustawione na prezentowanie wartości w mg/m^3 dokonują konwersji według poniższego wzoru (wzór podany przykładowo dla stężenia CO):

$$CO \left[\frac{mg}{m^3} \right] = CO[ppm] \cdot A_{CO}$$

Przy konwersji stosuje się współczynniki A , które oznaczają ile mg/m^3 gazu przypada na $1ppm$ w warunkach normalnych, czyli przy ciśnieniu $1013hPa$ i temperaturze $0^\circ C$. Współczynniki te są inne dla każdego gazu.

Gaz	$A \left[\frac{mg}{m^3 \cdot ppm} \right]$
O_2	1,428
CO_2	1,964
CO	1,250
CH_4	0,716
NO	1,340
NO_2	2,056
NO_x	2,056
SO_2	2,860
H_2S	1,521
H_2	0,090
NH_3	0,760
Cl_2	3,164
HCl	1,627

Tabela 2. Współczynniki do przeliczania stężeń w [ppm] na stężenia masowe w [mg/m^3] (dla warunków normalnych $1013hPa$, $0^\circ C$)

Uwaga!

Stężenie masowe tlenków azotu NO_x obliczane jest przez analizator (zgodnie z normami) przy użyciu współczynnika dla dwutlenku azotu NO₂.

Większość analizatorów pozwala na zmianę tego współczynnika dla dowolnego gazu, w przypadku gdy pomiary odbywają się w innych warunkach ciśnienia i temperatury.

1.1.3. Stężenie masowe odniesione do zawartości tlenu w spalinach

Obok stężeń masowych bezwzględnych, obliczane są stężenia masowe odniesione do (ważone względem) ilości tlenu w spalinach. Stężenie danego składnika w odniesieniu do zawartości tlenu wyraża się wzorem (przykładowo dla wartości CO):

$$CO_{wzg} \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \frac{20,95\% - O_{2odn}}{20,95\% - O_{2mierz}} \cdot CO \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

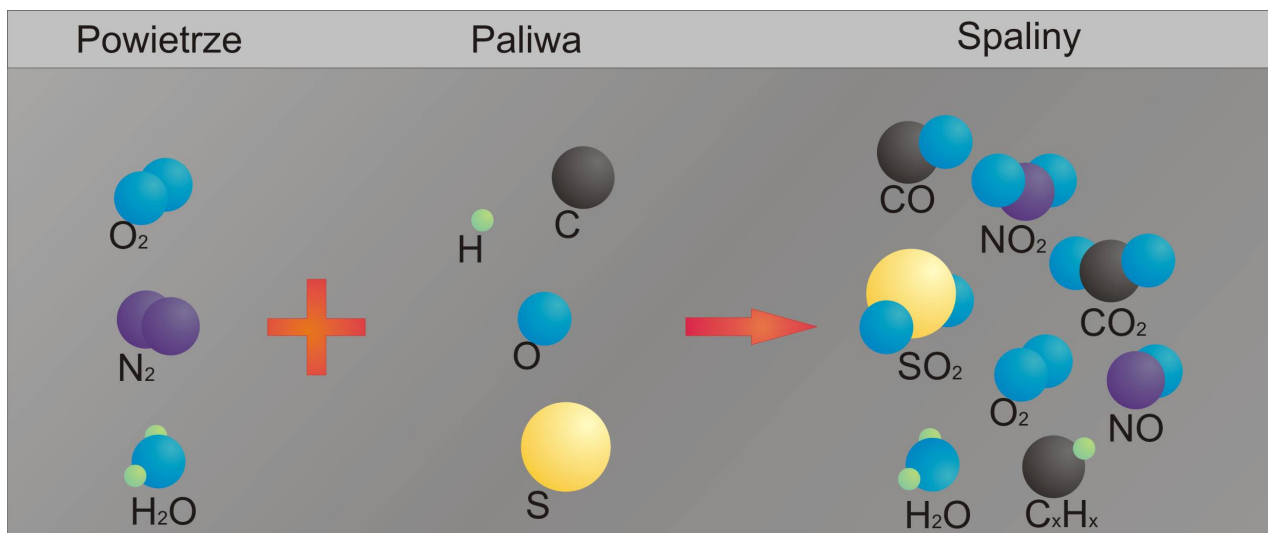
gdzie:

- CO_{wzg} – zawartość CO w odniesieniu do tlenu, wyrażana w [mg/m³]
- O_{2odn} – tlen odniesienia, parametr umowny, wybierany przez wskazanie paliwa lub podawany niezależnie z klawiatury, wyrażony w [% vol.]
- O_{2mierz} – zmierzona zawartość O₂ w spalinach, wyrażona w [%vol.]
- 20,95% – zawartość tlenu w czystym powietrzu
- CO – zmierzona zawartość CO w spalinach wyrażona w [mg/m³] (bezwzględne stężenie masowe)

Wartość ta wykorzystywana jest do oceny ilości szkodliwych związków w spalinach, nie zależnie od parametrów spalania.

1.2. Wielkości mierzone w sposób bezpośredni.

W analizatorach firmy **madur** wielkości mierzone w sposób bezpośredni to gazy, które wchodzą w skład spalin. W zależności od rodzaju spalanego paliwa oraz ilości powietrza dostarczonego podczas procesu spalania skład chemiczny spalin jest różny.



Rysunek 1. Udział poszczególnych pierwiastków w procesie spalania.

Pomiary dokonywane są za pomocą niezależnych sensorów. Analizatory mogą być wyposażone w sensory elektrochemiczne bądź w sensory NDIR (pomiar na zasadzie dyspersji światła podczerwonego). Wskazania tych sensorów są proporcjonalne do stężeń gazów i wyrażone w *ppm* (części na milion) lub w procentach.

1.3. Obliczanie stężenia dwutlenku węgla

W przypadku gdy analizator nie jest wyposażony w sensor CO₂ istnieje możliwość wyliczenia objętościowej zawartości dwutlenku węgla (wyrażonej w [% vol.]) w spalinach. Wartość ta wyznaczana jest na podstawie parametru CO_{2max} paliwa. Parametr ten, inny dla każdego paliwa, oznacza maksymalną ilość dwutlenku węgla jaka może powstać podczas jego spalania przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. W idealnym przypadku w spalinach nie będzie tlenu i wartość CO₂ będzie równa wartości CO_{2max}. Jeżeli $\lambda > 1$ to w spalinach pojawi się więcej tlenu, a ilość dwutlenku węgla spadnie. Dlatego mierząc ilość tlenu w spalinach można określić jakie jest w nich stężenie CO₂:

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_{2\text{max}} \cdot \left(1 - \frac{O_{2\text{mierz}} [\%]}{20,95 [\%]} \right)$$

gdzie:

- CO₂ – obliczana procentowa zawartość CO₂ w spalinach.
- CO_{2max} – parametr charakterystyczny dla konkretnego paliwa (patrz punkt 1.8).
- O_{2mierz} – procentowa zawartość tlenu w spalinach.

Ponieważ wynik obliczeń uzależniony jest od parametru CO_{2max} należy pamiętać o prawidłowym ustawieniu w analizatorze paliwa, które jest spalane. W przeciwnym wypadku obliczana wartość będzie błędna.

1.4. Obliczanie stężenia tlenków azotu NO_x

W spalinach, obok tlenku azotu NO, występują również wyższe tlenki, w tym głównie NO_2 . Stężenie tlenków azotu wyrażone w [ppm] można z dużą dokładnością wyrazić jako sumę stężeń NO i NO_2 . Najczęściej przyjmuje się, że tlenek azotu NO występujący w spalinach stanowi ok. 95% ogólnej sumy tlenków azotu NO_x . Analizatory **madur** dokonują oszacowania łącznego stężenia tlenków azotu NO_x według następującego wzoru:

$$NO_x [ppm] = \frac{NO [ppm]}{0.95}$$

W przypadku, gdy analizator jest wyposażony w sensor NO_2 stężenie NO_x jest sumą stężeń NO i NO_2 z pomiarów bezpośrednich.

Jeżeli analizator używany jest w warunkach, gdzie zawartość NO w spalinach jest inna niż standardowa, to wartość tą można zmienić z poziomu menu lub programu komputerowego do obsługi urządzenia.

1.5. Stężenie "nierozrzedzonego" tlenku węgla CO_u

W celu uniezależnienia oceny zawartości tlenku węgla w spalinach od nadmiaru powietrza, z jakim prowadzony jest proces spalania, wprowadza się pojęcie stężenia „nierozrzedzonego” tlenku węgla obliczanego według poniższego wzoru:

$$CO_u = CO \cdot \lambda$$

gdzie:

- CO – stężenie objętościowe CO w [ppm]
- λ – współczynnik nadmiaru powietrza

1.6. Obliczenia parametrów spalania

Obok pomiaru parametrów dotyczących składu spalin, analizator prowadzi obliczenia niektórych parametrów spalania. Wzory według których prowadzone są obliczenia parametrów spalania są wzorami empirycznymi. Parametry spalania obliczane są zgodnie z zasadami przewidywanymi przez normę *DIN*.

1.6.1. Strata kominowa.

Strata kominowa qA to jeden z najważniejszych parametrów spalania. Określa ona jaką ilość ciepła jest unoszona przez spaliny do otoczenia.

Podczas procesu spalania energia zawarta w paliwie zamieniana jest na energię cieplną, która następnie jest wykorzystywana do ogrzewania. W rzeczywistości nigdy nie udaje się wykorzystać całej energii cieplnej, gdyż część jej zostaje uniesiona razem ze spalinami do otoczenia. Strata kominowa mówi o tym ile energii zostało utraconej wraz ze spalinami. Jest ona obliczana według wzoru empirycznego zwanego wzorem *Siegerta* jako różnicę temperatury spalin i powietrza dostarczanego do kotła w odniesieniu do ilości ciepła jaką można uzyskać z danego paliwa:

$$qA[\%] = (T_{\text{gas}} [^{\circ}\text{C}] - T_{\text{amb}} [^{\circ}\text{C}]) \cdot \left(\frac{A_1}{\text{CO}_2[\%]} + B \right)$$

gdzie:

- qA – strata kominowa - procentowa ilość ciepła wydzielonego w procesie spalania, jaka zostaje uniesiona ze spalinami
- T_{gas} – temperatura spalin
- T_{amb} – temperatura powietrza wlotowego kotła (przez analizator przyjmowana jako temperatura otoczenia)
- CO_2 – obliczona (na podstawie zawartości tlenu i $\text{CO}_{2\text{max}}$) ilość CO_2 w spalinach, wyrażona w [%vol.]
- A_1, B – współczynnik Siegerta charakterystyczny dla danego paliwa (patrz punkt 1.8)

1.6.2. Sprawność energetyczna

Na podstawie obliczonej straty kominowej analizator szacuje sprawność energetyczną procesu spalania (nie należy mylić ze sprawnością kotła).

$$\eta [\%] = 100[\%] - q_A[\%]$$

gdzie:

- η – sprawność spalania

Powyższy wzór zakłada, że jedyną wielkością powodującą zmniejszenie sprawności spalania jest strata kominowa. Pomija, zatem straty niecałkowitego spalania, straty na promieniowanie itp. Ze względu na daleko idące uproszczenie w powyższym wzorze, należy pamiętać, że obliczonej w ten sposób sprawności nie można traktować jako wartości dokładnej. Tak wyliczona sprawność jest jednak bardzo wygodna jako parametr porównawczy podczas regulacji paleniska. Wzór, pomimo uproszczenia, wiernie oddaje tendencje zmian sprawności tzn. pozwala zaobserwować czy sprawność rośnie czy maleje. Jest to zupełnie wystarczająca informacja podczas regulacji.

Istnieje natomiast możliwość uwzględnienia obniżenia sprawności poprzez niezupełne spalanie (niedopalenie). Stratę tę opisuje wielkość zwana stratą przez niedopalenie IL . Określa ona procentową stratę ciepła spowodowaną obecnością gazów palnych (konkretnie CO) w spalinach.

Strata przez niedopalenie obliczana jest w oparciu o zmierzoną zawartość CO w spalinach według wzoru:

$$IL = \frac{\alpha \cdot CO[\%]}{CO[\%] + CO_2[\%]}$$

gdzie:

- CO, CO₂ – zawartość objętościowa odpowiednio CO i CO₂ w spalinach
- α współczynnik charakterystyczny dla danego paliwa

Obliczenie IL pozwala na wprowadzenie korekty do obliczonej wcześniej sprawności spalania. Oblicza się zatem różnicę sprawności η i straty przez niedopalenie IL :

$$\eta^*[\%] = \eta[\%] - IL[\%]$$

1.6.3. Współczynnik nadmiaru powietrza

Kolejnym parametrem spalania jest współczynnik nadmiaru powietrza λ (lambda). Współczynnik ten określa ile razy ilość powietrza dostarczana do kotła jest większa od minimalnej ilości potrzebnej do całkowitego spalania paliwa. Urządzenie oblicza współczynnik λ na podstawie znanej dla danego paliwa wartości CO_{2max} oraz zmierzonej zawartości CO_2 w spalinach wg wzoru:

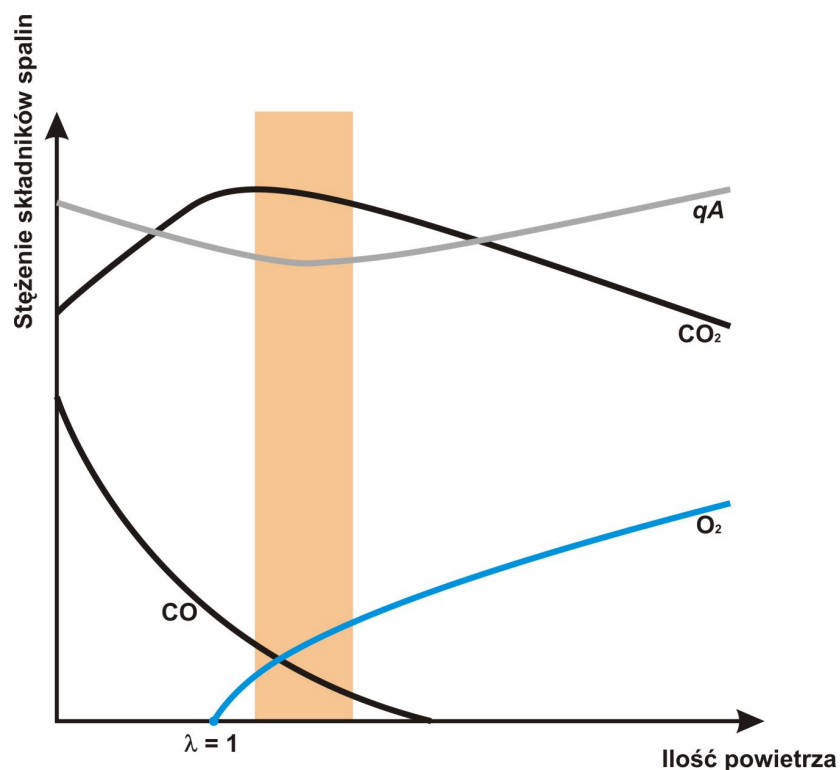
$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_{2mierz}}$$

Wzór powyższy można przekształcić do postaci:

$$\lambda = \frac{20,95 \%}{20,95 \% - O_{2mierz} [\%]}$$

W idealnym przypadku współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. Jest to tzw. ilość stechiometryczna, która została określona na podstawie wzorów chemicznych reakcji spalania danego paliwa. Oznacza ona, że do spalania wykorzystano dokładnie taką ilość powietrza (tlenu) jaka jest potrzebna do spalania całego paliwa. W rzeczywistości natomiast paliwo, jak i powietrze zawierają dodatkowe związki (zanieczyszczenia), które podczas spalania również wiążą się z tlenem. Jeżeli do spalania zostanie dostarczona zbyt mała ilość tlenu ($\lambda < 1$ – mieszanka bogata), to w spalinach pojawią się toksyczne gazy, takie jak: tlenek węgla (CO), tlenek azotu (NO), czy tlenek siarki (SO). Aby spalaniu uległo całe paliwo i spaliny zawierały mniejszą ilość szkodliwych związków należy dostarczyć więcej tlenu ($\lambda > 1$ – mieszanka uboga).

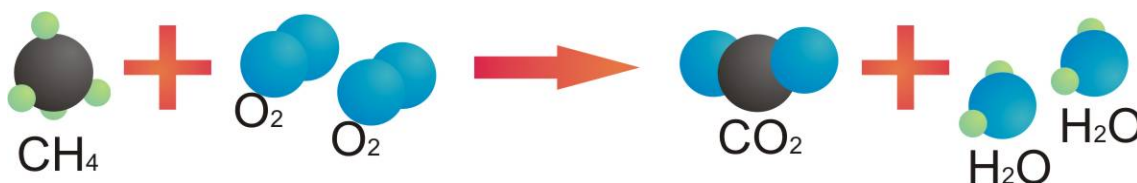
Znajomość parametru λ umożliwia regulację procesu spalania, tak aby uzyskać odpowiednią czystość spalin oraz wydajność kotła (patrz rysunek 2). Współczynnik nadmiaru powietrza zależy bezpośrednio od rodzaju użytego paliwa.



Rysunek 2. Przykładowe stężenie CO_2 , CO i O_2 w spalinach w zależności od dostarczonego powietrza. Na pomarańczowo zaznaczono optymalny zakres λ (q_A najniższe).

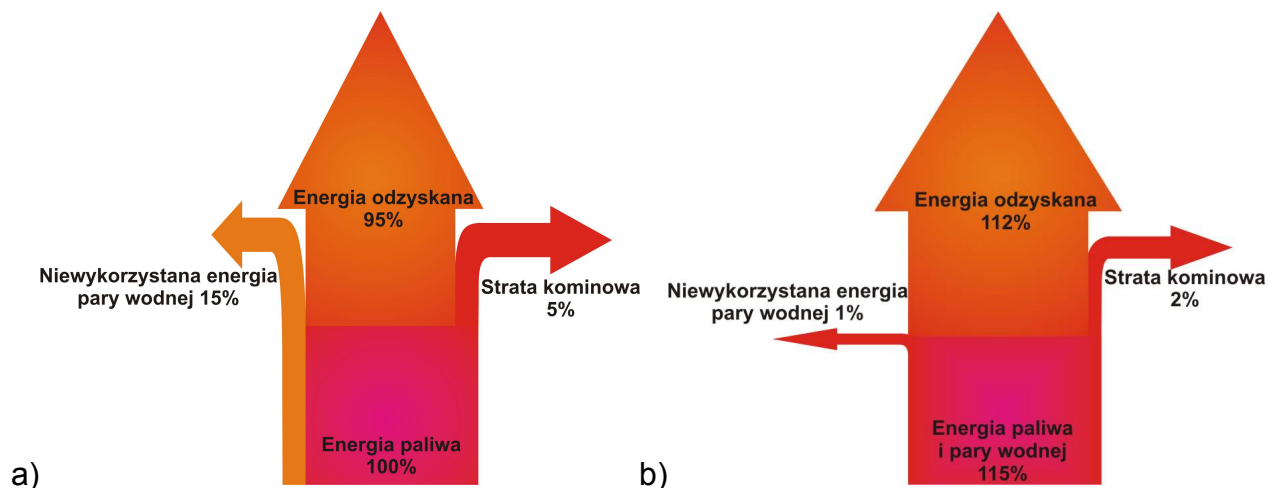
1.7. Obliczanie sprawności dla kotłów kondensacyjnych

Powstające w procesie spalania węglowodorów spaliny zawsze zawierają pewną ilość wody, która występuje w postaci pary wodnej. Można to zobrazować rozpisując proces spalania jako reakcję chemiczną np. spalania metanu:



Jak widać w powyższym równaniu produktami spalania stechiometrycznego (czyli takiego, w którym proporcje substratów i produktów są zgodne z wzorem reakcji chemicznej) występuje pewna ilość wody. Para wodna niesie ze sobą pewną ilość energii, która została zużyta do jej wytworzenia. W tradycyjnych kotłach przy obliczaniu sprawności pomija się tę energię, gdyż nie są one w stanie jej odzyskać. Ulatuje ona w postaci ciepła przez komin. Wówczas przy obliczaniu sprawności uwzględnienia się tylko stratę kominową. Aby zwiększyć sprawność kotłów w nowoczesnych urządzeniach zaczęto odzyskiwać energię pary wodnej poprzez jej kondensację. Kotły kondensacyjne potrafią dzięki temu

osiągać sprawność ponad 100%. Jest to jednak określenie umowne. Definicja sprawności mówi, że jest to stosunek energii zużytej E_U do energii dostarczonej E_D . Jak więc widać, tak na prawdę nie można osiągnąć sprawności ponad stu procentowej. Przy obliczaniu sprawności tradycyjnych kotłów nie brano pod uwagę energii pary wodnej dostarczanej wraz z paliwem. Aby nie zmieniać sposobu liczenia sprawności, dla kotłów kondensacyjnych oblicza się tradycyjną sprawność powiększoną o energię uzyskaną z procesu kondensacji pary wodnej. Daje to więc wartość ponad 100%.



Rysunek 3. Przemiana energii w procesie spalania w kotłach: a) tradycyjnych; b) kondensacyjnych

Aby możliwy był proces kondensacji pary wodnej zawartej w spalinach, muszą one osiągnąć temperaturę poniżej tzw. punktu rosy T_d , czyli temperaturę w której zaczyna się kondensacja wody. Parametr ten jest zależny od rodzaju paliwa, które zostało użyte w procesie spalania oraz od wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ . Analizator kontroluje więc temperaturę spalin aby prawidłowo obliczać sprawność. Jeżeli jest ona równa lub większa od punktu rosy wybranego paliwa to sprawność obliczana jest w sposób tradycyjny. Jeżeli natomiast temperatura spalin spadnie poniżej punktu rosy, to następuje kondensacja pary wodnej. Konieczne więc staje się uwzględnienie odzyskanej energii pary wodnej przy obliczaniu sprawności. Do tego celu konieczne jest obliczenie masy wykroplonej wody co pozwoli wyznaczyć zysk energetyczny z procesu kondensacji.

Dla dociekliwych w kolejnych punktach zamieszczono podstawy fizyczne związane z obliczaniem zysku energetycznego z kondensacji.

1.7.1. Zawartość wody w powietrzu

Ilość pary wodnej w powietrzu jest ściśle określona, i nie może przekroczyć pewnej maksymalnej wartości. Zależy ona od temperatury powietrza w danej chwili. Im wyższa temperatura powietrza tym więcej pary wodnej może się w nim znaleźć. Zawartość pary wodnej w powietrzu jest określana mianem wilgotności i można ją wyrazić przy pomocy kilku różnych miar.

Z parą wodną związane jest pojęcie *prężności pary wodnej* (ciśnienie cząstkowe). Jest to ciśnienie jakie wywołałyby same cząsteczki pary wodnej, „wyjęte” z powietrza i umieszczone w tej samej temperaturze i objętości, w której występowały w powietrzu. Prężność jest wyrażana w *hPa*. Maksymalną ilość pary wodnej w powietrzu o danej temperaturze określa się mianem *prężności maksymalnej* oznaczanej przez literę *E*.

<i>T</i> [°C]	<i>E</i> [hPa]	<i>T</i> [°C]	<i>E</i> [hPa]
50	123,3	0	6,11
45	95,77	-5	4,21
40	73,72	-10	2,68
35	56,20	-15	1,90
30	42,41	-20	1,25
25	31,66	-25	0,80
20	23,27	-30	0,50
15	17,05	-35	0,309
10	12,28	-40	0,185
5	8,72	-45	0,108

Tabela 3. Prężność maksymalna pary wodnej w zależności od temperatury

Jeżeli aktualną prężność pary wodnej $e(T)$ odniesiemy do prężności maksymalnej $E(T)$ to otrzymamy wilgotność względną powietrza:

$$f = \frac{e(T)}{E(T)} 100\%$$

Aby wyznaczyć prężność pary wodnej w danej temperaturze należy skorzystać z równania wyznaczonego empirycznie przez D.Ambrose i J.Waltona, które pozwala wyznaczyć ciśnienie cząstkowe różnych gazów:

$$\ln \frac{p_s}{p_c} = \frac{1}{T_r} \cdot (a \cdot \tau + b \cdot \tau^{3/2} + c \cdot \tau^{5/2} + d \cdot \tau^5) \quad \text{mit} \quad T_r = \frac{T}{T_c} \quad \text{und} \quad \tau = 1 - T_r$$

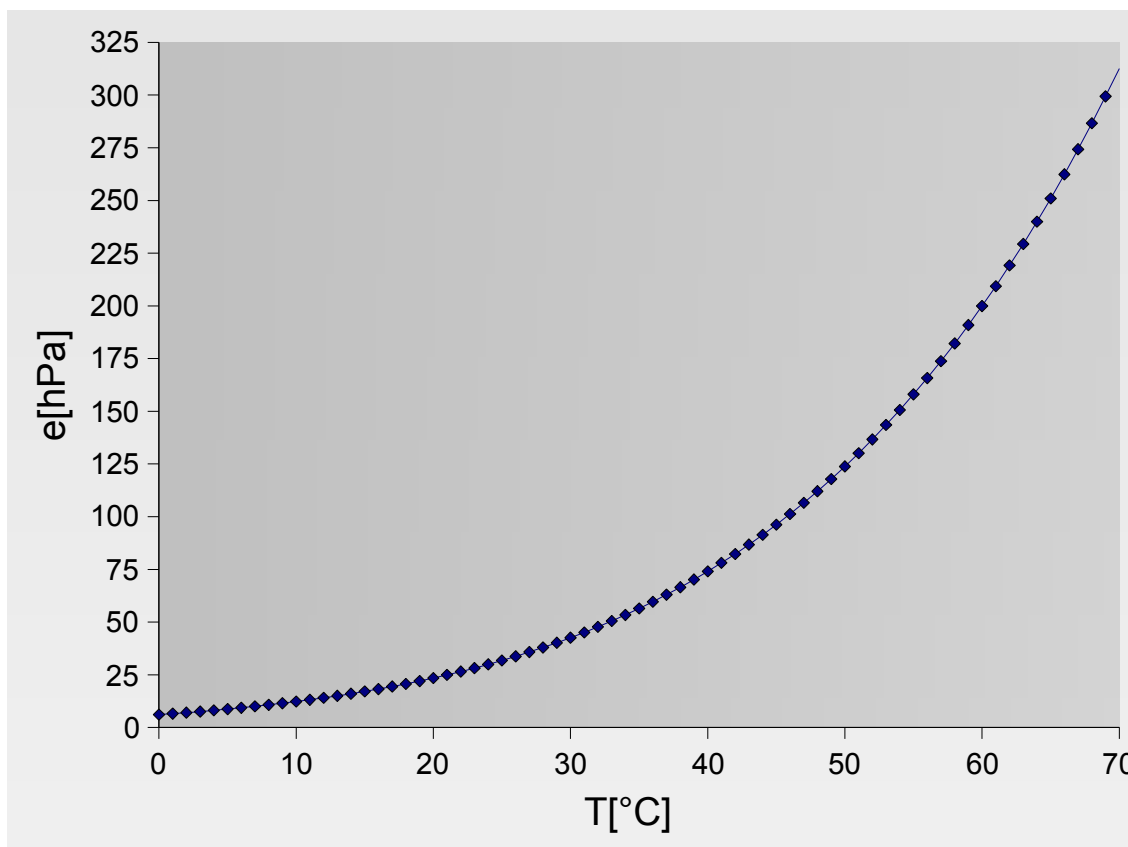
gdzie:

- T - aktualna temperatura powietrza
- T_c - pewna temperatura krytyczna
- p_s - ciśnienie cząstkowe
- p_c - pewne ciśnienie krytyczne
- a, b, c, d - współczynniki charakterystyczne dla danej substancji

W przypadku pary wodnej poszczególne współczynniki powyższego równania przyjmują następujące wartości (wyznaczone empirycznie):

- $T_c = 647,096$ K
- $p_c = 220,64$ bar
- $a = -7,8687$
- $b = 1,9014$
- $c = -2,3004$
- $d = -2,0845$

Ich znajomość pozwala na wyznaczenie ciśnienia cząstkowego (prężności) pary wodnej w danej temperaturze, przedstawionego na poniższym wykresie.



Rysunek 4. Wykres prężności pary wodnej w funkcji temperatury.

W przypadku gdy względna wilgotność powietrza osiągnie wartość 100% w temperaturze np. 20°C to prężność pary wodnej w tym powietrzu jest równa prężności maksymalnej i wynosi 23,27hPa (zgodnie z tabelą 3). Oznacza to również, że przy tej temperaturze w powietrzu nie „zmieści” się już więcej pary wodnej, powietrze jest całkowicie nasycone. Jeżeli temperatura spadnie np. o 5°C to powietrze zrobi się przesycone i musi z niego „zniknąć” część pary, ponieważ jak wynika z tabeli 3, przy temperaturze 15°C prężność maksymalna wynosi 17,50hPa. To „znikanie” pary wodnej nazywane jest kondensacją. Proces ten rozpoczyna się gdy powietrze zostanie całkowicie nasycone parą wodną w temperaturze zwanej punktem rosy i oznaczaną T_d . Podczas kondensacji zostaje wydzielona pewna ilość energii (w postaci ciepła), która jest równa energii jaka została dostarczona wodzie gdy przechodziła w stan gazowy. Energia ta jest odzyskiwana w kotłach kondensacyjnych z pary wodnej zawartej w spalinach. Wykorzystanie energii kondensacji w takich kotłach pozwala na zmniejszenie zużycia paliwa.

1.7.2. Obliczanie zysku energetycznego z kondensacji

Zysk energetyczny otrzymany podczas kondensacji pary wodnej zawartej w spalinach jest proporcjonalny do ilości (masy) wody, która zostanie wytrącona ze spalin. Aby uzyskać tą wartość analizator w pierwszej kolejności oblicza objętość pary wodnej w spalinach. Objętość ta jest równa różnicy objętości spalin mokrych V_{sm} i spalin suchych V_{ss} . Objętość spalin suchych V_{ss} to parametr charakterystyczny dla danego paliwa (zależy od temperatury), a V_{sm} to objętość spalin powstających w procesie spalania składających się ze spalin suchych i pary wodnej. Jeżeli znana jest już objętość pary wodnej to można obliczyć jej gęstość, a następnie masę. Na podstawie znanej ilości ciepła wydzielanego podczas skraplania jednego grama pary wodnej można określić ile energii powstało podczas kondensacji.

Analizator podczas obliczeń zysku energetycznego sprawdza temperaturę spalin i jeżeli jest ona równa bądź niższa od temperatury punktu rosy paliwa T_d , to wyznacza ilość pary wodnej w spalinach, na podstawie poniższych wzorów (dla $\lambda = 1$):

1. analizator wyznacza objętość spalin suchych V_{ss} , korzystając przy tym z parametru V_{ss} paliwa (wyznaczonym w zerze stopni).

$$V_{ss}(T_d) = V_{ss} * \frac{T_d}{273,15 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- wyznacza ciśnienia cząstkowego pary wodnej w temperaturze T_d : $E(T_d)$ (patrz tabela 3).
- oblicza objętość spalin mokrych V_{sm} dla temperatury T_d (przy założeniu, że suma ciśnień spalin suchych $V_{ss}(T_d)$ i pary wodnej $E(T_d)$ wynosi $1013hPa$)

$$V_{sm}(T_d) = V_{ss}(T_d) * \frac{1013hPa}{1013hPa - E(T_d)}$$

- oblicza objętość pary wodnej w temperaturze T_d :

$$V_w(T_d) = V_{sm}(T_d) - V_{ss}(T_d).$$

- oblicza gęstość pary wodnej w temperaturze T_d :

$$d(T_d) = 0,7932 \left[\frac{g/m^3}{hPa} \right] * 1013hPa * \frac{273,15 K}{T_d}$$

- oblicza masę pary wodnej m_w w temperaturze T_d :

$$m_w(T_d) = V_w(T_d) * d(T_d)$$

- następnie obliczenia są powtarzane w celu wyznaczenia masy pary wodnej dla aktualnej temperatury spalin: $m_w(T_{gas})$.
- analizator wyznacza masę wykroplonej wody:

$$\Delta_m = m_w(T_d) - m_w(T_{gas})$$

- korzystając z ciepła skraplania ($c_p = 2257 J/g$) wyznaczany jest zysk energetyczny uzyskany z kondensacji pary wodnej ze spalin:

$$\Delta_w = \Delta_m * c_p$$

- następnie wyznaczany jest procentowy zysk energetyczny względem energii uzyskanej ze spalania:

$$\eta_{Bonus} = \frac{\Delta_w}{H_v} * 100\%$$

Na poniższym przykładzie można zobaczyć jaki zostanie osiągnięty zysk energetyczny z kondensacji wody przy spalaniu gazu ziemnego (potrzebne parametry paliwa można sprawdzić w tabeli 4):

- obliczenie objętości spalin suchych w temperaturze $T_d = 54^\circ C = 327,15^\circ K$ - parametr paliwa:

$$V_{ss}(T_d) = V_{ss} * \frac{T_d}{273,15^\circ K} = 8,53 * 1,197 = 10,25 m^3$$

2. wyznaczenie prężności maksymalnej pary wodnej w temperaturze T_d :

$$E(T_d) = 150,63 \text{ hPa}$$

3. obliczenie objętości spalin mokrych w temperaturze T_d :

$$V_{sm}(T_d) = V_{ss}(T_d) * \frac{1013 \text{ hPa}}{1013 \text{ hPa} - E(T_d)} = 10,25 \text{ m}^3 * 1,174 = 12,04 \text{ m}^3$$

4. obliczenie objętości pary wodnej:

$$V_w(T_d) = V_{sm}(T_d) - V_{ss}(T_d) = 12,04 \text{ m}^3 - 10,25 \text{ m}^3 = 1,79 \text{ m}^3$$

5. obliczenie gęstość pary wodnej w temperaturze T_d :

$$d(T_d) = 0,7932 \left[\frac{\text{g/m}^3}{\text{hPa}} \right] * 1013 \text{ hPa} * \frac{273,15 \text{ K}}{T_d} = 803,5116 * 0,83495 = 670,88 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

6. obliczenie masy wykroplonej wody w temperaturze T_d :

$$m_w(T_d) = V_w(T_d) * d(T_d) = 1,79 \text{ m}^3 * 670,88 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 1200,88 \text{ g}$$

7. obliczenia powtarzamy dla temperatury spalin $T_{\text{gas}} = 30^\circ\text{C}$, otrzymując:

$$V_{ss}(T_{\text{gas}}) = 9,50 \text{ m}^3; E(T_{\text{gas}}) = 42,61 \text{ hPa}; V_{sm}(T_{\text{gas}}) = 9,92 \text{ m}^3; V_w(T_{\text{gas}}) = 0,42 \text{ m}^3; \\ d(T_{\text{gas}}) = 724,00 \text{ g/m}^3; m_w = 304,08 \text{ g}.$$

8. obliczenie masy wody wykroplonej:

$$\Delta_m = m_w(T_d) - m_w(T_{\text{gas}}) = 1200,88 \text{ g} - 304,08 \text{ g} = 896,8 \text{ g}$$

9. obliczenie zysku energetycznego z wykroplonej wody:

$$\Delta_w = \Delta_m * c_p = 896,8 \text{ g} * 2257 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 2024,07 \text{ kJ}$$

10. obliczenie procentowego zysku z kondensacji:

$$\eta_{\text{Bonus}} = \frac{\Delta_w}{H_v} * 100\% = 5,63\%$$

1.8. Parametry paliw

Podstawą do prawidłowego wyznaczenia wielkości opisujących proces spalania jest znajomość parametrów paliwa. Analizatory mogą mieć na trwałe zapisane parametry różnych paliw. Paliwa te określane są mianem paliw standardowych. Parametry opisujące paliwa standardowe przechowywane w pamięci analizatora przedstawiono w tabeli 4.

l.p.	Paliwo	CO _{2max} [%]	Hv [MJ/jedn]	A1	B	α	O _{2odn} [%]	V _{ss} [m ³]	V _{air} [m ³]	T _d [°C]	jedn.
1.	Olej opałowy lekki	15,4	42,70	0,5000	0,007	52	3	10,53	11,2	48,05	kg
2.	Gaz ziemny	11,7	35,90	0,3700	0,009	32	3	8,56	9,54	56,05	m ³
3.	Gaz miejski	13,1	16,10	0,3500	0,011	32	3	36,1	3,90	60,05	m ³
4.	Gaz koksowniczy	10,2	17,40	0,2900	0,011	32	3	22,30	24,36	64,35	m ³
5.	Gaz płynny	14,0	93,20	0,4200	0,008	32	3	22,30	24,36	55,05	m ³
6.	Gaz ziemny z dmuchawą	12,1	35,9	0,4600	0,000	32	3	8,56	9,54	0,0	m ³
7.	Gaz miejski z dmuchawą	10,0	16,1	0,3800	0,000	32	3	3,61	3,90	0,0	m ³
8.	Propan z dmuchawą	13,7	93,2	0,5000	0,000	32	3	22,30	24,36	0,0	m ³
9.	Propan	13,7	93,2	0,4750	0,000	32	3	22,30	24,36	0,0	m ³
10.	Butan z dmuchawą	14,1	123,8	0,5000	0,000	32	3	29,69	32,31	0,0	m ³
11.	Butan	14,1	123,8	0,4750	0,000	32	3	29,69	32,31	0,0	m ³
12.	Biogaz z dmuchawą	11,7	35,9	0,7800	0,000	32	3	8,54	9,56	0,0	m ³
13.	Biogaz	11,7	35,9	0,7100	0,000	32	3	8,54	9,56	0,0	m ³
14.	Bio-Diesel	15,7	41,8	0,4567	0,005	52	3	10,44	11,15	0,0	kg
15.	Olej opałowy b. lekki	15,3	41,80	0,5900	0,000	52	3	10,53	11,20	47,05	kg
16.	Olej opałowy ciężki	15,9	41,0	0,6100	0,000	52	3	10,08	10,73	0,0	kg
17.	Mieszanka węgiel-olej	18,0	37,7	0,6500	0,000	52	3	9,32	9,66	0,0	kg
18.	Węgiel kamienny 31,5	18,8	31,50	0,6830	0,000	69	11	7,92	8,11	0,0	kg

19.	Węgiel kamienny 30,3	18,5	30,03	0,6720	0,000	69	11	7,70	7,91	44,35	kg
20.	Węgiel brunatny Hu 8,16	19,1	8,200	1,1130	0,000	69	11	4,01	4,09	44,35	kg
21.	Węgiel brunatny Hu 9,34	19,1	9,300	0,9880	0,000	69	11	4,01	4,09	0,0	kg
22.	Drewno suszone	19,4	15,6	0,6500	0,000	69	11	3,87	3,90	57,55	kg

Tabela 4. Parametry paliw przechowywane w pamięci analizatora.

Znaczenie poszczególnych parametrów paliwa zawartych w tabeli 4:

- CO_{2max} – maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach Jest to parametr określający, jaka ilość dwutlenku węgla wystąpi w spalinach, jeżeli proces spalania będzie prowadzony ze współczynnikiem nadmiaru powietrza równym 1.
- A_1, B – współczynniki występujące we wzorze empirycznym *Siegerta*.
- α – współczynnik służący do obliczania straty przez niedopalenie, który dla poszczególnych paliw jest równy:
 - $\alpha = 69$ dla paliw stałych
 - $\alpha = 52$ dla paliw ciekłych
 - $\alpha = 32$ dla paliw gazowych
- O_{2odn} – tlen odniesienia - parametr służący do obliczania względnej zawartości składników
- Hv – wartość opałowa paliwa - ilość energii wydzielana przy całkowitym spalaniu jednego kilograma (lub $1m^3$ w przypadku gazów) paliwa.
- V_{ss} – objętość spalin suchych, jest to ilość spalin powstałych przy spalaniu danego paliwa ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1$ i wykropleniu z nich pary wodnej.
- V_{air} – jest to ilość powietrza, która jest potrzebna aby proces spalania przebiegał ze współczynnikiem $\lambda = 1$.
- T_d – temperatura punktu rosy, jest to temperatura spalin przy której zacznie się kondensacja zawartej w nich wody.