

Spalanie

Spalanie jest szybko przebiegającym procesem utleniania połączonym z wydzielaniem się ciepła. Spalaniu z reguły towarzyszy emisja światła.

Podstawowymi pierwiastkami palnymi w paliwach są węgiel i wodór.

W paliwie można wyróżnić część palną i niepalny balast. Balastem są: popiół i wilgoć w paliwach stałych i ciekłych oraz azot, dwutlenek węgla i para wodna w paliwach gazowych.

Substancje doprowadzane do komory paleniskowej (paliwo i powietrze) nazywane są *substratami* procesu spalania, natomiast substancje wyprowadzane z komory paleniskowej (spaliny gazowe, substancje stałe i ciekłe) nazywane są *produktami* procesu spalania.

Za produkty ostatecznego utlenienia w procesie spalania uważa się: dwutlenek węgla CO_2 , dwutlenek siarki SO_2 i parę wodną H_2O . W spalinach występuje też niewielka ilość trójtlenku siarki SO_3 .

Jeżeli podczas spalania ilość dostarczanego tlenu jest niewystarczająca lub tlen nie dociera do wszystkich atomów i cząsteczek substancji palnych, to produkty zawierają również substancje palne.

Spalanie jest *niezupełne*, jeżeli w produktach występują gazy palne (np. CO , H_2 , CH_4). Spalanie jest *niecałkowite*, jeżeli w produktach występują stałe składniki palne zawierające węgiel.

1. Skład paliw

1.1. Paliwa gazowe

$$H_2 + CO + CH_4 + C_m H_n + O_2 + N_2 + CO_2 + \dots = 1 \quad (1)$$

gdzie: $H_2 \left[\frac{\text{kmol } H_2}{\text{kmol g.s.}} \right]$, $CO \left[\frac{\text{kmol } CO}{\text{kmol g.s.}} \right]$, itd. – udziały molowe składników paliwa w gazie suchym.

$$n'_C = CO + CH_4 + mC_m H_n + CO_2 \left[\frac{\text{kmol } C}{\text{kmol g.s.}} \right] \quad (2a)$$

Kilomol dowolnej substancji zawiera taką samą liczbę cząsteczek (równą $10^3 \cdot N_A$, gdzie $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23}$ jest stałą Avogadra). Jeżeli rozdzielimy cząsteczkę CO na atom C oraz atom O , to z jednego kilomola CO dostaniemy dwa kilomole substancji: jeden kilomol C oraz jeden kilomol O . Stąd, CO kilomola tlenku węgla CO zawiera CO kilomola węgla C oraz CO kilomola tlenu O . CO kilomola tlenu O zawiera $0,5 \cdot CO$ kilomola tlenu O_2 , gdyż liczba cząstek O_2 jest dwa razy mniejsza od liczby cząstek (atomów) C .

$$n'_{H_2} = H_2 + 2CH_4 + \frac{1}{2}nC_mH_n \left[\frac{kmol H_2}{kmol g.s.} \right] \quad (2b)$$

$$n'_{O_2} = \frac{1}{2}CO + CO_2 + O_2 \left[\frac{kmol O_2}{kmol g.s.} \right] \quad (2c)$$

$$n'_{N_2} = N_2 \left[\frac{kmol N_2}{kmol g.s.} \right] \quad (2d)$$

1.2. Paliwa stałe i ciekłe

$$c \left[\frac{kg \text{ węgla}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3a)$$

$$h \left[\frac{kg \text{ wodoru}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3b)$$

$$s \left[\frac{kg \text{ siarki}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3c)$$

$$o \left[\frac{kg \text{ tlenu}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3d)$$

$$n \left[\frac{kg \text{ azotu}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3e)$$

$$w \left[\frac{kg \text{ wilgoci}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3f)$$

$$p \left[\frac{kg \text{ popiołu}}{kg \text{ p.w.}} \right] \quad (3g)$$

$$c + h + s + o + n + w + p = 1 \quad (4)$$

$$n'_C = \frac{c}{12} \frac{kmol C}{kg \text{ p.w.}} \quad (5a)$$

$n = m/M$, gdzie dla węgla masa molowa $M = 12 \text{ kg/kmol}$. Stąd, 1 kg węgla C to $1/12 \text{ kmola}$ węgla, a $c \text{ kg}$ węgla C to $c/12 \text{ kmola}$ węgla.

$$n'_S = \frac{s}{32} \frac{\text{kmol } S}{\text{kg p.w.}} \quad (5b)$$

$$n'_{H_2} = \frac{h}{2} \frac{\text{kmol } H_2}{\text{kg p.w.}} \quad (5c)$$

$$n'_{O_2} = \frac{o}{32} \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kg p.w.}} \quad (5d)$$

$$n'_{N_2} = \frac{n}{28} \frac{\text{kmol } N_2}{\text{kg p.w.}} \quad (5e)$$

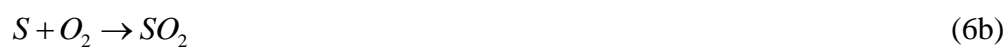
$$n'_{H_2O} = \frac{w}{18} \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kg p.w.}} \quad (5f)$$

2. Obliczenia stechiometryczne przy spalaniu zupełnym i całkowitym

2.1. Zapotrzebowanie tlenu i powietrza



Do spalania jednego atomu węgla C potrzeba jednej cząsteczki tlenu O_2 . W wyniku reakcji spalania tworzy się jedna cząsteczka dwutlenku węgla CO_2 . Ponieważ 1 kmol dowolnej substancji zawiera taką samą liczbę cząsteczek, równanie (6a) jest także ważne dla 1 kmol węgla i 1 kmol tlenu. W wyniku reakcji powstaje 1 kmol dwutlenku węgla.



$$n_{S_{\min}} = n'_C + \frac{1}{2} n'_{H_2} - n'_{O_2} \left[\frac{\text{kmol } O_2}{j.p.} \right] \quad (7)$$

gdzie $j.p. = \text{kg p.w.}$ w przypadku paliw stałych i ciekłych oraz $j.p. = \text{kmol g.s.}$ dla paliw gazowych.

$$n_{L\min} = \frac{n_{S\min}}{0,21} \left[\frac{\text{kmol pow.}}{j.p.} \right] \quad (8)$$

Współczynnik nadmiaru powietrza

$$\lambda = \frac{n'_L}{n_{L\min}} \quad (9)$$

$$n'_L = \lambda n_{L\min} \quad (10)$$

Optymalne wartości λ

Spalanie węgla na ruszcie obsługiwany ręcznie

$$\lambda_{opt} = 1,6 \div 2 \quad (11a)$$

Spalanie węgla na ruszcie mechanicznym

$$\lambda_{opt} = 1,3 \div 1,6 \quad (11b)$$

Spalanie pyłu węglowego i paliw ciekłych

$$\lambda_{opt} = 1,2 \div 1,4 \quad (11c)$$

Spalanie gazu

$$\lambda_{opt} = 1,05 \div 1,2 \quad (11d)$$

2.2. Ilość i skład spalin

Ilość dwutlenku węgla CO_2 powstała ze spalania jednostki paliwa (j.p.)

$$n''_{CO_2} = n'_C \left[\frac{\text{kmol } CO_2}{j.p.} \right] \quad (12a)$$

Zgodnie z równaniem (6a) z 1 kmol C powstaje 1 kmol CO_2 . Stąd z n'_C kmol C powstaje n'_C kmol CO_2 .

$$n''_{SO_2} = n'_S \left[\frac{\text{kmol } SO_2}{j.p.} \right] \quad (12b)$$

$$n''_{N_2} = n'_{N_2} + 0,79n'_L \left[\frac{\text{kmol } N_2}{j.p.} \right] \quad (12c)$$

$$n''_{O_2} = 0,21n'_L - n_{S\min} = 0,21\lambda n_{L\min} - n_{S\min} = (\lambda - 1)n_{S\min} \left[\frac{\text{kmol } O_2}{j \cdot p} \right] \quad (12d)$$

$$n''_{H_2O} = n'_{H_2} + n'_{H_2O} \left[\frac{\text{kmol } H_2O}{j \cdot p} \right] \quad (12e)$$

$$n''_{ss} = n''_{CO_2} + n''_{SO_2} + n''_{N_2} + n''_{O_2} \left[\frac{\text{kmol } s.s.}{j \cdot p} \right] \quad (13)$$

$$n''_{sw} = n''_{ss} + n''_{H_2O} \left[\frac{\text{kmol } s.w.}{j \cdot p} \right] \quad (14)$$

Udziały molowe składników spalin suchych

$$[CO_2] = \frac{n''_{CO_2}}{n''_{ss}} \left[\frac{\text{kmol } CO_2}{\text{kmol } s.s.} \right] \quad (15a)$$

$$[SO_2] = \frac{n''_{SO_2}}{n''_{ss}} \left[\frac{\text{kmol } SO_2}{\text{kmol } s.s.} \right] \quad (15b)$$

$$[O_2] = \frac{n''_{O_2}}{n''_{ss}} \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol } s.s.} \right] \quad (15c)$$

$$[N_2] = \frac{n''_{N_2}}{n''_{ss}} \left[\frac{\text{kmol } N_2}{\text{kmol } s.s.} \right] \quad (15d)$$

Udziały molowe składników spalin wilgotnych

$$(CO_2) = \frac{n''_{CO_2}}{n''_{sw}} \left[\frac{\text{kmol } CO_2}{\text{kmol } s.w.} \right] \quad (16a)$$

$$(SO_2) = \frac{n''_{SO_2}}{n''_{sw}} \left[\frac{\text{kmol } SO_2}{\text{kmol } s.w.} \right] \quad (16b)$$

$$(O_2) = \frac{n''_{O_2}}{n''_{sw}} \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol } s.w.} \right] \quad (16c)$$

$$(N_2) = \frac{n''_{N_2}}{n''_{sw}} \left[\frac{\text{kmol } N_2}{\text{kmol s.w.}} \right] \quad (16d)$$

$$(H_2O) = \frac{n''_{H_2O}}{n''_{sw}} \left[\frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kmol s.w.}} \right] \quad (16e)$$

3. Wartość opałowa i ciepło spalania

Ciepło spalania jest to ilość ciepła uzyskana ze spalania całkowitego i zupełnego jednostki paliwa w warunkach stałego ciśnienia, gdy spaliny zostaną ochłodzone do temperatury substratów, a cała para wodna zawarta w spalinach ulegnie skropleniu.

Wartość opałowa jest to ilość ciepła uzyskana ze spalania całkowitego i zupełnego jednostki paliwa w warunkach stałego ciśnienia, gdy spaliny zostaną ochłodzone do temperatury substratów, a para wodna zawarta w spalinach nie ulegnie skropleniu.

$$W_g = W_d + m''_{H_2O} \cdot r \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg pal}} \right] \quad (17)$$

$$W_g \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - \text{ciepło spalania}$$

$$W_d \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - \text{wartość opałowa}$$

$$m''_{H_2O} \left[\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg pal}} \right] - \text{ilość pary wodnej w spalinach, która powstała ze spalania 1 kg paliwa}$$

$$r \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg } H_2O} \right] - \text{ciepło skraplania pary wodnej}$$

Obliczanie wartości opalowej

gazy palne

$$(MW_d) = 282984CO + 241818H_2 + 802300CH_4 + 1255600C_2H_2 + 1323100C_2H_4 + 1427800C_2H_6 \left[\text{kJ/kmol} \right] \quad (17a)$$

ciała stałe - wzór *Dulonga*

$$W_d = 32800c + 120040 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 9260s - 2500w \text{ [kJ/kg]} \quad (17b)$$

We wzorze (17b) założono, że tlen wchodzący w skład paliwa jest całkowicie związany z wodorem.

Wartość opałowa niektórych paliw stałych¹⁾
Paliwo suszone na powietrzu

TABLICA 26—1

Paliwo	Skład, % (na 1 kg)							Wartość opałowa H_i	
	węgiel	wodór	siarka	tlen	azot	popiół	wilgość	kcal/kg	kJ/kg
	C	H	S	O	N	p	v		
Drewno	39,3	4,7	—	34,1	0,4	1,5	20	3410	14277
Torf	40,3	3,8	—	22,1	0,8	8	25	3470	14528
Węgiel brunatny	49,6...58,4	3,7...4,0	0,4...2,4	18,7...14,4	0,6...0,8	7...12	20...8	4700... ...5550	19678... ...23237
Węgiel kamienny									
— suchy	75,2	4,6	0,9	8,8	0,5	8	2	6920	28973
— gazowy	74,8	4,8	0,7	6,6	1,1	10	2	7030	29433
— tłusty kowalski	77,4	4,7	0,7	5,3	0,9	8	3	7470	31275
— tłusty koksowy	82,0	4,1	0,7	4,2	1,0	6	2	7720	32322
— chudy	83,8	2,7	0,7	2,9	0,9	7	2	7720	32322
Antracyt	85,6	1,8	0,7	2,0	0,9	8	1	7450	31192
Węgiel drzewny	79,0	3,1	—	11,9	—	1	5	6830	28596
Koks z węgla brunatnego	68,9	1,7	0,8	3,0	0,6	20	5	5820	24367
Koks gazowy	86,0	0,5	0,9	0,9	0,6	9	2	7110	29768
Koks metalurgiczny	87,3	0,5	0,9	0,8	0,5	8	2	7190	30103

¹⁾ Średnie wartości składu chemicznego niektórych paliw stałych. 1 kcal=4,1863 kJ

Tabl. 6. Wartości opałowe gazów

Gaz	Wzór chemiczny	Wartość opałowa W_d kJ/um ³	Gaz	Wzór chemiczny	Wartość opałowa W_d kJ/um ³
Acetylen	C ₂ H ₂	55721	Metan	CH ₄	35266
Amoniak	NH ₃	13856	Metylu chlorek	CH ₃ CL	28367
Benzen	C ₆ H ₆	138404	Propan	C ₃ H ₈	89890
i - Butan	C ₄ H ₁₀	116611	Propylen	C ₃ H ₆	85309
n - Butan	C ₄ H ₁₀	116906	Siarkowodór	H ₂ S → SO ₂	23089
Butylen	C ₄ H ₈	112271	Siarkowodór	H ₂ S → SO ₃	27422
Etan	C ₂ H ₆	62780	Węgla tlenek	CO	12481
Etylen	C ₂ H ₄	58717	Wodór	H ₂	10617

4. Straty powstające podczas spalania

4.1. Strata wylotowa

Strata wylotowa jest równa strumieniowi ciepła, jaki można by było uzyskać schładzając spaliny do temperatury otoczenia.

$$\dot{S}_w = \dot{n}_s (Mc_p)_{t_0}^{t_s} (t_s - t_0) [kW] \quad (18a)$$

$$\dot{S}_w = \dot{m}_s c_p \Big|_{t_0}^{t_s} (t_s - t_0) [kW] \quad (18b)$$

\dot{n}_s - strumień spalin, kmol/s

\dot{m}_s - strumień spalin, kg/s

$(Mc_p)_{t_0}^{t_s} \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]$ - średnie molowe ciepło właściwe w zakresie temperatur t_0, t_s

$c_p \Big|_{t_0}^{t_s} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ - średnie (kilogramowe) ciepło właściwe w zakresie temperatur t_0, t_s

t_0 – temperatura otoczenia

t_s – temperatura spalin

4.2. Strata niecałkowitego spalania

$$\dot{S}_{nc} = \sum_{i=1}^k \dot{n}_i z_i (MW_{di}) \quad (19a)$$

$$\dot{S}_{nc} = \sum_{i=1}^k \dot{m}_i g_i W_{di} \quad (19b)$$

$\dot{n}_i \left[\frac{kmol}{s} \right]$ - strumień i -tej substancji zawierającej części palne, odprowadzanej z paleniska

$\dot{m}_i \left[\frac{kg}{s} \right]$ - strumień i -tej substancji zawierającej części palne, odprowadzanej z paleniska

z_i - udział molowy części palnych w i -tej substancji

$(MW_{di}) \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$ - wartość opałowa części palnych w i -tej substancji

4.3. Strata niezupelnego spalania

W spalinach są gazy palne, głównie CO , CH_4 oraz H_2 .

$$\dot{S}_{nz} = \dot{n}_s \sum_{i=1}^k z_i (MW_{di}) [kW] \quad (20)$$

$(MW_{di}) [kJ/kmol]$ - wartość opałowa i -tego gazu palnego odprowadzanego ze spalinami

5. Temperatura spalania przy stałym ciśnieniu

Bilans energetyczny komory spalania w stanie stacjonarnym (przyrost energii komory jest równy zero)

$$\dot{m}_{pal}W_d + \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \quad (5-1)$$

Strumień entalpii paliwa i powietrza dopływających do komory spalania

$$\dot{I}_1 = \dot{m}_{pal}c'_p t_0 + \dot{m}_{pow}c_{ppow}t_0 \quad (5-2)$$

Strumień substancji powietrza

$$\dot{m}_{pow} = \lambda m_{Lmin} \dot{m}_{pal} \quad (5-3)$$

m_{Lmin} [kg pow/kg pal] - minimalne (teoretyczne) zapotrzebowanie powietrza

(5-3) do (5-2)

$$\dot{I}_1 = \dot{m}_{pal}c'_p t_0 + \lambda m_{Lmin} \dot{m}_{pal}c_{ppow}t_0 \quad (5-4)$$

Strumień entalpii spalin

$$\dot{I}_2 = \dot{m}_{sp}c''_p t_{spal} [kW] \quad (5-5)$$

Strumień substancji spalin

$$\dot{m}_{sp} = \dot{m}_{pal} + \dot{m}_{pow} = \dot{m}_{pal} \left(1 + \frac{\dot{m}_{pow}}{\dot{m}_{pal}} \right) [kg/s] \quad (5-6)$$

(5-3) i (5-6) do (5-5)

$$\dot{I}_2 = \dot{m}_{pal}(1 + \lambda m_{Lmin})c''_p t_{spal} \quad (5-7)$$

(5-4) i (5-7) do (5-1)

$$\dot{m}_{pal}W_d + \dot{m}_{pal}c'_p t_0 + \lambda m_{Lmin} \dot{m}_{pal}c_{ppow}t_0 = \dot{m}_{pal}(1 + \lambda m_{Lmin})c''_p t_{spal} \quad (5-8)$$

Po podzieleniu równania (5-8) stronami przez \dot{m}_{pal} i przekształceniach dostajemy

$$t_{spal} = \frac{W_d + (c'_p + \lambda m_{Lmin} c_{ppow})t_0}{(1 + \lambda m_{Lmin})c''_p}$$

