

Het adiabatisch verbrandingsproces

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: ir. R.A.P. van Herpen

1 Het verbrandingsproces

Verbranding is oxidatie van een stof, bij hoge temperatuur, waarbij warmte vrijkomt. Het is dus een exotherme reactie. Voor verbranding zijn brandstof en zuurstof nodig. Onder invloed van een ontstekings temperatuur wordt de verbranding in gang gezet. Vervolgens onderhoudt dit proces zichzelf; de energie die bij verbranding vrijkomt is groter dan de ontstekingsenergie. Daarbij worden verbrandingsproducten (geoxideerde producten) gevormd.

Wanneer de verbranding volledig plaatsvindt in een (denkbeeldig) volume dat wordt begrensd door een controlevlak, waarbij ter plaatse van het controlevlak de omgevingscondities gelden, spreekt men van een adiabatische verbranding.

2 Eerste hoofdwet voor een adiabatische stochiometrische verbranding

Beschouwen we eerst een adiabatische verbrandingskamer waarin een brandstof verbrand wordt zonder overmaat van lucht zoals aangeduid op onderstaande figuur



Voor het uitschrijven van de eerste hoofdwet maken we gebruik van de enthalpie van elke stofsoort (H), deze is samengesteld uit twee componenten: de vormingsenthalpie h_f (die de relatie legt tussen de verschillende stofsoorten) en de enthalpie h die gerefereerd wordt naar de gekozen referentietoestand voor de vormingsenthalpie. Omdat de meeste dat voor verbrandingsprocessen zich baseren op een referentietoestand met $t=25^\circ\text{C}$ en $p=1\text{ atm}$ zullen we in wat volgt ook deze waarden gebruiken.

De eerste hoofdwet luidt nu

$$m_R H_R - m_B H_B - m_L H_L = 0$$

of

$$(1 + L_{ml}) m_B (h_{fR} + h_R) - m_B (h_{fB} + h_B) - L_{ml} m_B (h_{fL} + h_L) = 0$$

of rekening houdend met het feit dat het verschil in vormingsenthalpieën gelijk is aan de verbrandingswaarde, met name:

$$Q_p = -\Delta H^0 = h_{fB} + L_{mt} h_{fL} - (1 + L_{mt}) h_{fR} \quad (1)$$

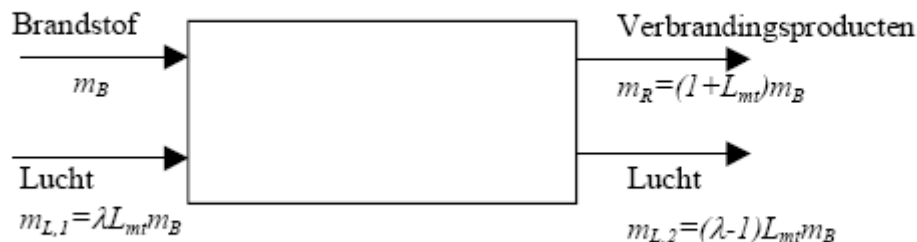
wordt de eerste hoofdwet voor de verbranding:

$$(1 + L_{mt}) m_B h_R - m_B h_B - L_{mt} m_B h_L = m_B Q_p$$

Dit wil zeggen dat we de verbranding in eerste instantie kunnen beschouwen als een proces waarbij een zekere hoeveelheid warmte wordt toegevoegd aan het systeem per kg toegevoerde brandstof.

3 Eerste hoofdwet-analyse voor een adiatische verbranding met grote luchtvermaat

We kunnen een analoge redenering opbouwen voor een verbrandingsproces met ruime overmaat aan lucht. De overmaat aan lucht wordt hierbij aangegeven door de luchtfactor λ die de verhouding weergeeft tussen de effectieve hoeveelheid lucht die toegevoegd wordt t.o.v. de minimaal theoretisch vereiste luchthoeveelheid. De situatie wordt weergegeven in onderstaande figuur.



De eerste hoofdwet wordt nu

$$(1 + L_{mT}) m_B (h_{fR} + h_R) + (\lambda - 1) L_{mT} m_B (h_{fL} + h_{L2}) - m_B (h_{fB} + h_B) - \lambda L_{mT} m_B (h_{fL} + h_{L2}) = 0$$

of rekening houdend met (1)

$$(1 + L_{mt}) m_B h_R + (\lambda - 1) L_{mt} m_B (h_{fL} + h_{L2}) - m_B h_B - (\lambda - 1) L_{mt} m_B h_{fL} - \lambda L_{mt} m_B h_{L1} = m_B Q_p$$

De resterende termen die vormingsenthalpieën bevatten, vallen nu precies tegen elkaar weg. Indien λ nu zeer groot is, kan de vorige vergelijking benaderd worden met

$$\lambda L_{mi} m_B h_{L2} - \lambda L_{mi} m_B h_{L1} = m_B Q_p$$

of

$$m_L h_{L2} - m_L h_{L1} = m_B Q_p$$

Deze benadering, die geldig is indien we met een grote overmaat aan lucht werken, kan geïnterpreteerd worden alsof de brandstof een zeker hoeveelheid warmte (gekoppeld aan zijn enthalpie) in het systeem brengt ter waarde van de verbrandingswaarde.

4 Tweede hoofdwet voor een stoichiometrische, adiabatiscche verbranding

Voor een tweede hoofdwet-analyse van een adiabatiscche verbranding, baseert men zich op een exergiebalans. Vermits er geen warmte- en arbeidswisselingen plaatsvinden, wordt deze exergiebalans geschreven als:

$$m_R B_R - m_B B_B - m_L B_L = -I$$

met $B = H - T_{omg} S$. Hierbij dient opnieuw rekening gehouden te worden met het feit dat het hier over verschillende stofsoorten gaat. Net zoals voor de enthalpie H , zal ook de entropie S uit 2 componenten bestaan een referentieentropie s_0 en de entropie s t.o.v. deze referentie. Deze referentieentropie s_0 kan in principe bepaald worden uit de wet van Nernst (de derde hoofdwet van de thermodynamica die zegt dat alle kristallijne stoffen gelijk zijn aan 0 bij 0K). Deze referentie-entropiewaarden zijn in tabelvorm beschikbaar bij een referentie druk en temperatuur (meestal 1 atm en 25°C).

Voor de stoichiometrische verbranding betekent dit dat

$$(1 + L_{mi}) m_B (h_{fR} + h_R - T_{omg} S_R) - m_B (h_{fB} + h_B - T_{omg} S_B) - L_{mi} m_B (h_{fL} + h_L - T_{omg} S_L) = -I$$

of rekening houdend met (1)

$$(1 + L_{mi}) m_B (h_R - T_{omg} S_R) - m_B (h_B - T_{omg} S_B) - L_{mi} m_B (h_L - T_{omg} S_L) = -I + m_B Q_p$$

Door de entropiewaarden verder op te splitsen in de twee termen en mits gebruik te maken van

$$\Delta S^0 = (1 + L_{mi}) s_{0R} - s_{0B} - L_{mi} s_{0L}$$

vindt men dat

$$(1 + L_{mi}) m_B (h_R - T_{omg} s_R) - m_B (h_B - T_{omg} s_B) - L_{mi} m_B (h_L - T_{omg} s_L) = -I + m_B Q_p + m_B T_{omg} \Delta S^0$$

Om de notatie te vereenvoudigen wordt de volgende notatie ingevoerd $b = h - T_{omg} s$ die genomen wordt ten opzichte van de referentietoestand.

$$(1 + L_{mi})m_B b_R - m_B b_B - L_{mi} m_B b_L = -I + m_B Q_p + m_B T_{omg} \Delta S^0$$

Dit wil zeggen dat de verbranding kan geïnterpreteerd worden alsof er per kg brandstof een hoeveelheid warmte op oneindig hoge temperatuur wordt toegevoegd. Daarbovenop wordt een zekere hoeveelheid beschikbare arbeid toegevoegd aan het systeem omwille van de hogere entropie die vervat zit in de eindproducten van de chemische reactie.

5 Tweede hoofdwet-analyse voor een adiabatische verbranding met grote luchtovermaat

Ook voor de tweede hoofdwet-analyse voor een verbrandingsproces met ruime overmaat aan lucht kunnen we een analoge redenering opbouwen. De tweede hoofdwet wordt nu

$$(1 + L_{mi})m_B (h_{fR} + h_R - T_{omg} S_R) + (\lambda - 1)L_{mi} m_B (h_{fL} + h_{L2} - T_{omg} S_{L2}) - m_B (h_{fB} + h_B - T_{omg} S_B) - \lambda L_{mi} m_B (h_{fL} + h_L - T_{omg} S_L) = -I$$

Rekening houdend met (1) en (2) om de verbanden te leggen tussen de verschillende stofsoorten, kan deze vergelijking verder uitgewerkt worden.

$$(1 + L_{mi})m_B b_R + (\lambda - 1)L_{mi} m_B b_{L2} - m_B b_B - \lambda L_{mi} m_B b_{L1} = -I + m_B (Q_p + T_{omg} \Delta S^0)$$

of voor een zeer grote overmaat aan lucht

$$m_L (b_{L2} - b_{L1}) = -I + m_B (Q_p + T_{omg} \Delta S^0)$$

De term met de standaard reactie-entropie kan verwaarloosd worden ten opzichte van de term met de verbrandingswaarde. Hierdoor wordt bovenstaande vergelijking vereenvoudigd tot

$$m_L (b_{L2} - b_{L1}) = -I + m_B Q_p$$

Dit kan dan voor de eenvoud geïnterpreteerd worden alsof de stromingsexergie die de brandstof invoert in het systeem gelijk is aan de verbrandingswarmte vermenigvuldigd met de omgevingstemperatuur. De chemische energie die in de moleculen beschikbaar was, wordt dan verondersteld om zonder enige irreversibiliteit overgedragen te worden naar het fluïdum, Alsof de verbranding chemische arbeid beschikbaar stelt (of Q op oneindig hoge temperatuur aanlevert).

Bij wijze van voorbeeld vind je hieronder de verbrandingswaarde en de term die gepaard met de standaard-reactieentropie (zie hiervoor de getabelleerde waarden):

Voor $C + O_2 \rightarrow CO_2$ is $Q_p = 393,520$ kJ/kmol C, terwijl $T_{omg} \Delta S_0 = 900$ kJ/kmol C

Voor $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ is $Q_p = 890,330$ kJ/kmol C, terwijl $T_{omg} \Delta S_0 = -7035$ kJ/kmol CH_4