

## Van afvalgas naar brandstof

Afvalgassen uit de staal- en petrochemische industrie bevatten behalve koolstofdioxide vaak ook veel koolstofmono-oxide.

Het bedrijf Lanzatech heeft een proces ontwikkeld waarbij deze afvalgassen worden gemengd met waterstof en andere gassen afkomstig van vergaste biomassa en vergaste kolen. Het verkregen mengsel wordt vervolgens door speciale micro-organismen omgezet tot ethanol ( $C_2H_6O$ ) en andere alcoholen.

De totaalvergelijking van één van de biochemische routes waarmee deze micro-organismen ethanol produceren, is weergegeven met reactie 1.



- 3p 20 Bereken de reactiewarmte van reactie 1 per mol ethanol.

Een andere biochemische route kan met reactie 2 worden beschreven.



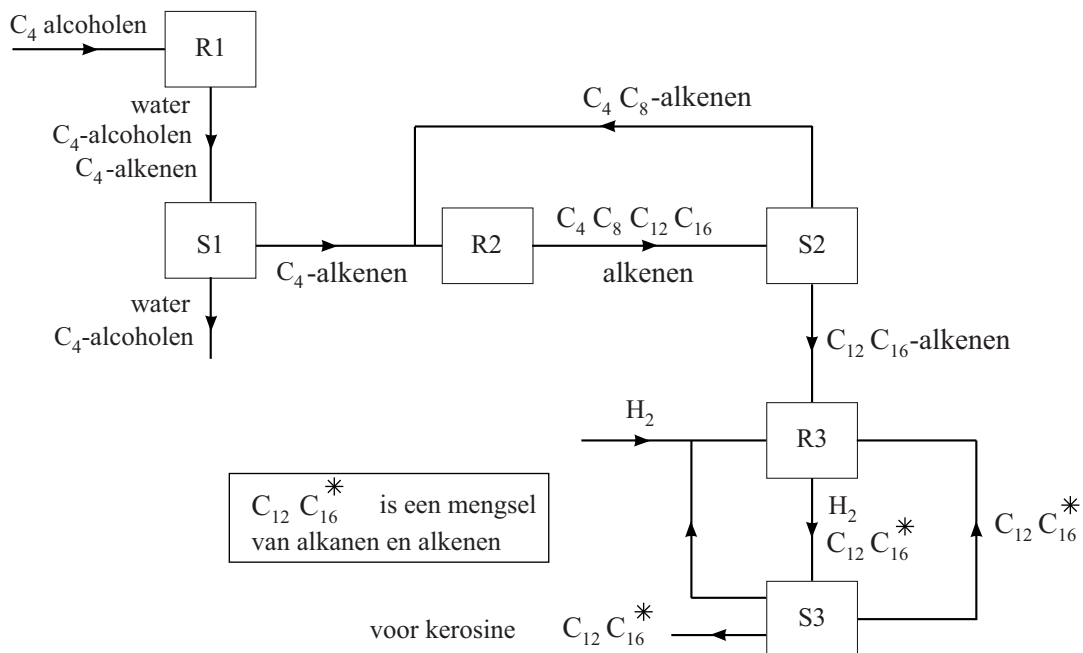
In de bioreactor wordt uiteindelijk alle CO en  $\text{CO}_2$  omgezet tot ethanol en andere alcoholen. De opbrengst aan ethanol in het Lanzatech-proces wordt uitgedrukt in MJ. Dit is de hoeveelheid energie die vrijkomt als het geproduceerde ethanol zou worden verbrand.

De  $\text{CO}_2$ -opname door de micro-organismen in het Lanzatech-proces is 81,5 g  $\text{CO}_2$  per MJ. De  $\text{CO}_2$ -uitstoot van de overige processen is 51 g  $\text{CO}_2$  per MJ.

- 4p 21 Bereken de netto  $\text{CO}_2$ -uitstoot uitgedrukt in g  $\text{CO}_2$  per MJ geproduceerde energie wanneer het geproduceerde ethanol uiteindelijk wordt verbrand ( $T = 293 \text{ K}$ ). De energie die vrijkomt bij de verbranding van ethanol is  $2,15 \cdot 10^{10} \text{ J m}^{-3}$ .

Het ethanol en de overige alcoholen worden door destillatie gescheiden van het mengsel in de bioreactor. Behalve ethanol worden in de Lanzatech-bioreactor ook butaan-1-ol, butaan-2-ol, 2-methylpropan-1-ol en 2-methylpropan-2-ol gevormd door de micro-organismen. Deze  $C_4$ -alcoholen kunnen in een aansluitend proces worden gebruikt om door additie-reacties koolwaterstoffen te produceren met 12 en 16 koolstofatomen in de moleculen. Deze koolwaterstoffen kunnen worden toegevoegd aan kerosine. Dit proces is in onderstaand blokschema weergegeven. Met  $C_4$  tot en met  $C_{16}$  is het aantal koolstofatomen in de koolwaterstoffen aangegeven.

### blokschema



In reactor 1 (R1) worden de  $C_4$ -alcoholen onvolledig omgezet tot de  $C_4$ -alkenen methylpropeen, but-1-een en but-2-een. Hierbij ontstaat ook water.

- 2p **22** Geef de reactievergelijking voor de omzetting van 2-methylpropan-1-ol tot methylpropeen. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen.

Het mengsel afkomstig uit R1 wordt in scheidingsruimte 1 (S1) afgekoeld. Hierdoor worden de  $C_4$ -alkenen afgescheiden van het water en van de  $C_4$ -alcoholen die niet hebben gereageerd.

- 2p **23** Leg uit binnen welk temperatuurgebied deze scheiding kan plaatsvinden ( $p = p_0$ ). Gebruik Binas-tabel 42B of ScienceData-tabel 8.3.b. Het kookpunt van methylpropeen is 267 K.

In R2 vinden additiereacties plaats tussen de  $C_4$ -alkenen, waarbij alkenen met 8, 12 of 16 C atomen worden gevormd.

In S2 wordt het verkregen mengsel van alkenen gescheiden in twee fracties. De fractie met de  $C_4$ - en de  $C_8$ -alkenen wordt teruggevoerd naar R2. De fractie met de  $C_{12}$ - en de  $C_{16}$ -alkenen wordt doorgevoerd naar R3. De scheiding in S2 kan eenvoudig plaatsvinden omdat bij de gebruikte omstandigheden in de scheidingsruimte steeds één fractie in de vloeibare fase is en de andere fractie in de gasfase.

- 2p **24** Leg uit welke fractie in S2 vloeibaar is en welke fractie gasvormig is.

In R3 reageren de gevormde alkenen onvolledig met een overmaat waterstof tot alkanen. In S3 wordt de overmaat waterstof gescheiden van de rest van het mengsel en teruggevoerd naar R3.

Een deel van het mengsel afkomstig uit R3 wordt opgeslagen als een product dat kan worden gebruikt als toevoeging aan kerosine. Het overgebleven deel wordt weer naar R3 teruggevoerd. Deze recirculatie zorgt voor een hoger rendement in R3.

- 1p **25** Geef aan waarom door de recirculatie het rendement in R3 hoger wordt.

In R2 wordt per minuut  $1,4 \cdot 10^3$  mol  $C_4H_8$  omgezet tot evenveel mol  $C_{12}$ - als  $C_{16}$ -alkenen. In het product dat uiteindelijk wordt opgeslagen is 98% van de  $C_{12}$ - en de  $C_{16}$ -alkenen omgezet tot alkanen.

- 2p **26** Bereken hoeveel mol  $H_2$  per minuut dan moet worden ingevoerd in R3.