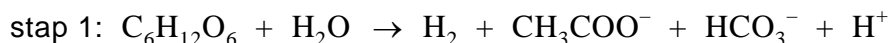


Waterstof uit afvalwater

Er wordt al enige tijd onderzoek gedaan naar de duurzame productie van waterstofgas uit afvalwater. Zo zijn er experimenten uitgevoerd met de zogenoemde 'donkere fermentatie' van afvalwater. Bij deze experimenten zijn bacteriën gebruikt die in het donker koolhydraten kunnen omzetten. Donkere fermentatie van een glucose-oplossing kan in twee stappen verlopen. Stap 1 wordt hieronder in een onvolledige reactievergelijking weergegeven. De correcte formules van alle bij de reactie betrokken deeltjes staan in de vergelijking vermeld. Alleen de coëfficiënten in de reactievergelijking ontbreken.



- 4p 1 Stel de volledige reactievergelijking voor stap 1 op. Gebruik hierbij het gegeven dat CH_3COO^- en HCO_3^- in de molverhouding 1 : 1 ontstaan.

Als de juiste mix van bacteriën aanwezig is, wordt het ethanoaat (CH_3COO^-) als volgt omgezet:



Theoretisch kan in deze twee-staps donkere fermentatie uit 1 mol glucose 12 mol waterstof ontstaan. In de praktijk is het rendement van deze omzetting laag.

In een experiment is de donkere fermentatie uitgevoerd met speciaal geselecteerde bacteriën. Daarbij werd 5,0 L glucose-oplossing met een concentratie van 250 g per L gebruikt. Het rendement van de waterstofproductie bleek daarbij 15 procent te zijn.

- 4p 2 Bereken hoeveel dm^3 waterstofgas in dit experiment is geproduceerd. Ga ervan uit dat glucose de enige stof is die door de bacteriën wordt omgezet tot H_2 en dat het experiment is uitgevoerd bij een temperatuur van 298 K en $p = p_0$.

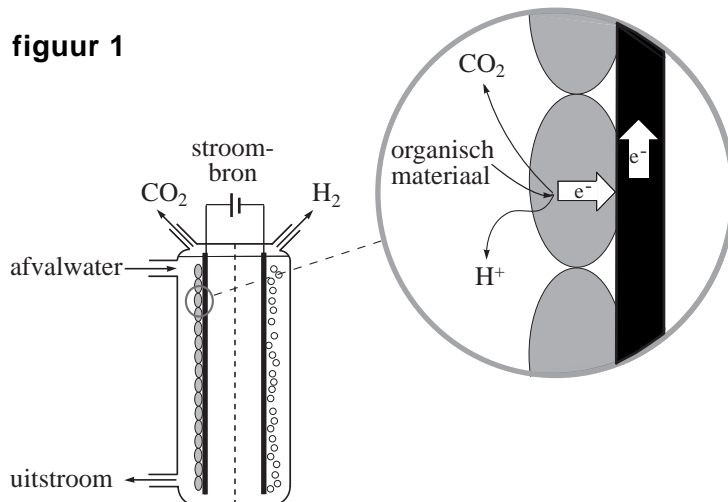
Aan de Universiteit van Wageningen wordt onderzoek gedaan naar een andere methode waarmee met een hoger rendement waterstofgas uit afvalwater wordt verkregen. De gebruikte methode wordt biogekatalyseerde elektrolyse genoemd. Daarbij maakt men gebruik van een speciale soort bacteriën, *Geobacter sulfurreducens* genaamd.

Drie eigenschappen van deze bacteriën zijn essentieel in dit experiment:

- ze hechten goed aan elektrodemateriaal in een elektrolysecel;
- ze leven in waterig milieu onder anaërobe (zuurstofloze) omstandigheden;
- ze zijn in staat elektronen door te geven aan een elektrode.

Met behulp van *Geobacter sulfurreducens* is een elektrolysecel geconstrueerd, die schematisch is getekend in figuur 1.

figuur 1



De elektrolysecel bestaat uit twee compartimenten, gescheiden door een membraan. Door het linkercompartiment stroomt afvalwater met daarin organisch materiaal. In het rechtercompartiment bevindt zich een andere geleidende oplossing. De elektroden zijn van koolstof. De elektrode in het linkercompartiment is bedekt met de bacteriën (de grijze ovalen in de detailtekening).

Tijdens de experimenteerfase is gebruik gemaakt van een oplossing van natriumethanoaat (natriumacetaat) als organisch materiaal.

In het linkercompartiment met daarin de elektrode waaraan de bacteriën zijn gehecht, wordt ethanoaat omgezet tot onder andere CO_2 .

In het rechtercompartiment wordt waterstofgas gevormd uit H^+ ionen.

- 4p **3** Geef de vergelijking van de halfreactie die optreedt aan de elektrode waaraan de bacteriën zijn gehecht. In deze vergelijking komen onder andere ook H_2O en H^+ voor.

In de elektrolysecel zijn beide oplossingen gebufferd op een pH van 7,00. In een oplossing van koolstofdioxide komen ook HCO_3^- ionen voor.

- 3p **4** Bereken de verhouding $[\text{HCO}_3^-] : [\text{CO}_2]$ in een oplossing met een pH van 7,00.

Energetisch is deze methode om waterstof te produceren veel gunstiger dan de elektrolyse van water. Om $1,0 \text{ m}^3$ waterstof te bereiden door elektrolyse van water is minimaal 4,4 kWh nodig bij $p = p_0$ en $T = 298 \text{ K}$. Dit is 17 keer zoveel als nodig is voor het bereiden van $1,0 \text{ m}^3$ waterstof met behulp van biogekatalyseerde elektrolyse.

- 3p **5** Bereken hoeveel joule minimaal nodig is voor de bereiding van $1,0 \text{ mol H}_2$ met behulp van biogekatalyseerde elektrolyse. Gebruik onder andere een gegeven uit Binas-tabel 5.

- 1p **6** Noem nog een voordeel van waterstofproductie met behulp van biogekatalyseerde elektrolyse.