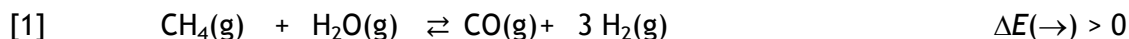


Oefenopgaven INDUSTRIËLE CHEMIE vwo

OPGAVE 1

Bij de productie van methanol wordt eerst synthesegas gemaakt in een reformer:



- 01 Bereken de energieverandering van bovenstaande reactie in joule per $\text{m}^3 \text{CH}_4$ (bij $T = 298 \text{ K}$ en $p = p_0$).

In de reformer (reactor 1) kiest men zodanige omstandigheden dat het ingeleide CH_4 *volledig* met H_2O wordt omgezet. Hiertoe kiest men onder andere een temperatuur van ca. 1100 K en een druk van 18 bar .

- 02 Welk ander hulpmiddel kan men toepassen om in de reformer evenwicht [1] volledig naar rechts te laten aflopen?

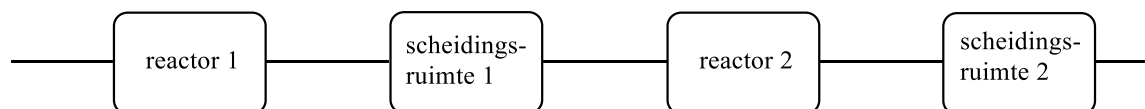
De gassen $\text{CO}(\text{g})$ en $\text{H}_2(\text{g})$ worden in de molverhouding $1 : 3$ in reactor 2 geleid. Hierin stelt zich het volgende evenwicht in:



De omstandigheden in reactor 2 zijn zodanig dat het ingeleide CO en H_2 slechts gedeeltelijk wordt omgezet in CH_3OH . Van het CO en H_2 dat niet in reactor 2 wordt omgezet, wordt een deel gerecirculeerd. Een ander deel wordt afgevoerd.

Hieronder is het blokschema onvolledig weergegeven:

In het blokschema ontbreken stofnamen, pijlen, recirculatie- en afvoerstromen.



- 03 Neem het blokschema over en vul de ontbrekende gegevens in.

Het afvoeren van een deel van de CO en H_2 die teruggeleid wordt is nodig, omdat anders in reactor 2 en in scheidingsruimte 2 de druk voortdurend zou stijgen.

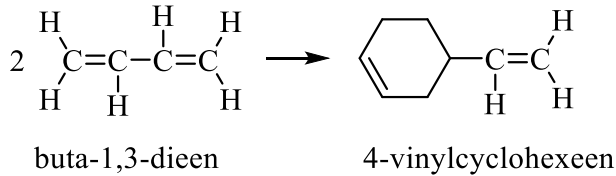
- 04 Leg uit hoe het komt dat in dat geval de druk zou stijgen.

In reactor 2 wordt 50% van het ingeleide CO en H_2 omgezet in CH_3OH . Van de hoeveelheid CO en H_2 die niet heeft gereageerd in reactor 2, wordt 20% afgevoerd. In deze situatie is de toestand stabiel (dat wil zeggen dat er een constante en regelmatige aan- en afvoer van stoffen is) wanneer er per seconde 100 mol CO en 300 mol H_2 uit de reformer komen.

- 05 Bereken hoeveel mol CO en hoeveel mol H_2 er per seconde gerecirculeerd moeten worden.

OPGAVE 2

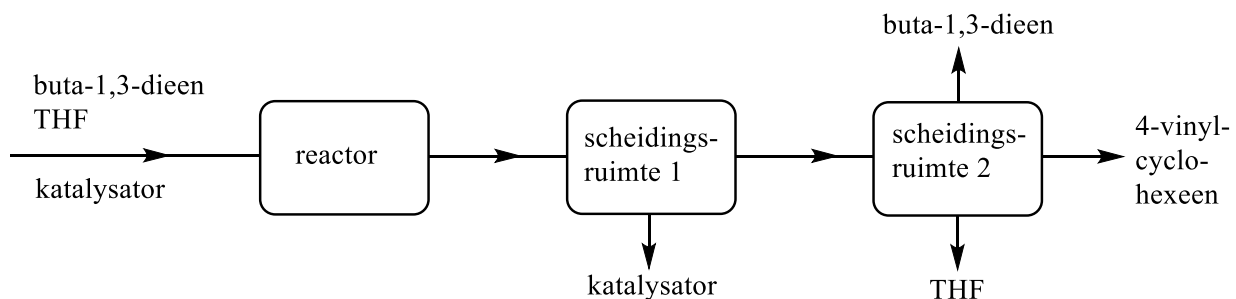
Bij het kraken van aardolie ontstaat onder andere buta-1,3-dieen. Deze verbinding wordt gebruikt bij de bereiding van 4-vinylcyclohexeen:



De bereiding van 4-vinylcyclohexeen verloopt via een continu proces. In een reactor wordt een oplossing geleid van buta-1,3-dieen in het oplosmiddel tetrahydrofuran (THF). Die oplossing is gemengd met een niet-oplosbare fijnverdeelde vaste stof als katalysator. Een groot deel van de ingeleide hoeveelheid buta-1,3-dieen wordt in de reactor omgezet in uitsluitend 4-vinylcyclohexeen; een klein gedeelte van de hoeveelheid buta-1,3-dieen wordt in de reactor niet omgezet.

Evenals buta-1,3-dieen is ook 4-vinylcyclohexeen goed oplosbaar in THF. De (slechte) oplosbaarheid van de katalysator wordt niet beïnvloed door de vorming van 4-vinylcyclohexeen.

Hoe het continue proces verder verloopt, is weergegeven in het onderstaande blokschema.



- 06 Geef de naam van de scheidingsmethode die men kan toepassen in scheidingsruimte 1.

In scheidingsruimte 2 wordt buta-1,3-dieen als gas afgescheiden. De stoffen 4-vinylcyclohexeen en THF verlaten scheidingsruimte 2 als vloeistoffen.

- 07 Geef de naam van de scheidingsmethode die men toepast in scheidingsruimte 2 om 4-vinylcyclohexeen en THF van elkaar te scheiden.

Een fabriek die zou werken volgens het bovenstaande blokschema, maakt geen efficiënt gebruik van stoffen.

- 08 Neem het blokschema over en geef hierin met lijnen aan welke verbeteringen in het blokschema van de fabriek aangebracht kunnen worden, zodat volgens het verbeterde blokschema efficiënter gebruik wordt gemaakt van stoffen.

OPGAVE 3

Een bereidingswijze van fosfor, P_4 , kan men als volgt weergeven:

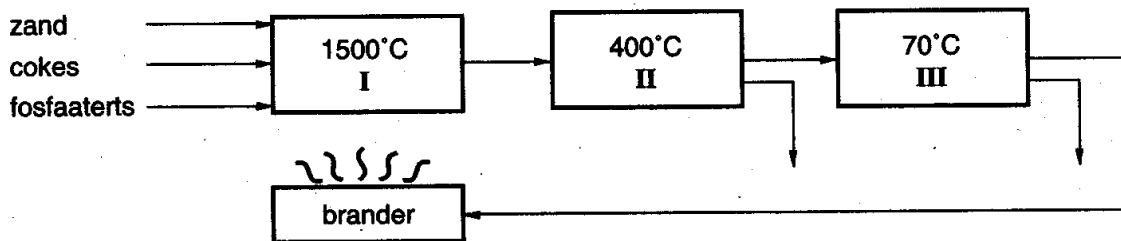


- 09 Neem bovenstaande reactievergelijking over en maak hem kloppend door de juiste coëfficiënten in te vullen.

Bij deze fosforbereiding gebruikt men als grondstoffen: zand, cokes en een fosfaaterts.

- 10 Geef voor achtereenvolgens $Ca_3(PO_4)_2$, SiO_2 en C aan in welke van de hierboven genoemde grondstof ze voorkomen.
- 11 Bereken de atomeconomie van deze reactie. Zie tabel 37H van BINAS.

De bereiding en zuivering van fosfor kan als volgt worden weergegeven:



Uit het reactiemengsel dat in ruimte I is ontstaan, wint men fosfor door gebruik te maken van verschillen in smeltpunten en kookpunten. In de volgende tabel staan enkele smelt- en kookpunten in Kelvin ($0\text{ }^\circ\text{C} = 273\text{ K}$) vermeld:

	<i>smeltpunt</i>	<i>kookpunt</i>
CaSi	1540 K	
O_3		
P_4	317 K	554 K
CO	68 K	82 K

In de ruimtes II en III koelt men het reactiemengsel stapsgewijs af: eerst in II tot $400\text{ }^\circ\text{C}$ en daarna in III tot $70\text{ }^\circ\text{C}$.

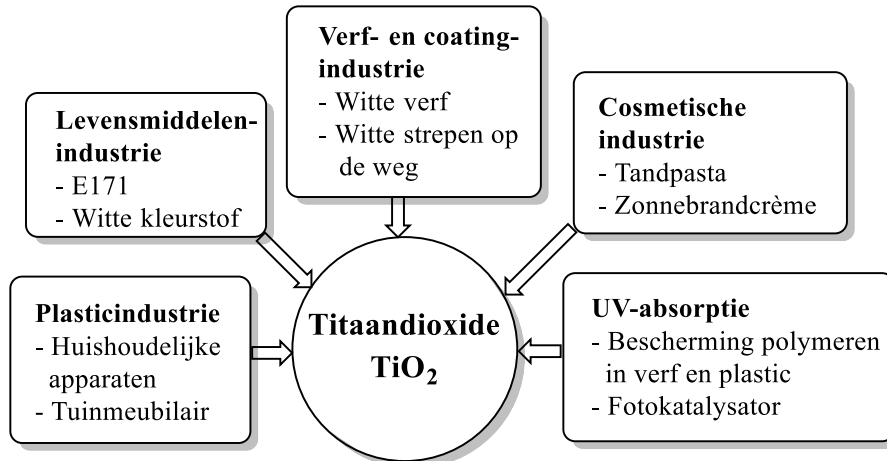
- 12 Leg uit dat op deze manier fosfor van de andere reactieproducten wordt gescheiden.

Het gas koolstofmonoxide heeft een eigenschap waardoor het niet in het milieu terecht mag komen. Dankzij een andere eigenschap van koolstofmonoxide kan het bij deze fosforbereiding weer nuttig gebruikt worden.

- 13 Geef deze beide eigenschappen.
- 14 Bereken de *E*-factor van dit proces. Zie tabel 37H van BINAS. Neem aan dat het rendement 100% is.

OPGAVE 4

Titaandioxide kent vele toepassingen zoals onderstaande figuur laat zien.

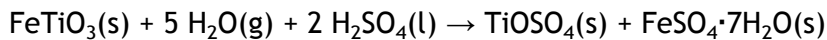


Het titaandioxide dat in de natuur wordt gevonden is niet geschikt om commercieel te gebruiken. Men gaat dan ook uit van het erts ilmeniet, FeTiO_3 , voor de synthese van titaandioxide.

Titaandioxide wordt op twee manieren uit ilmeniet gesynthetiseerd: via het sulfaatproces en via het chlorideproces.

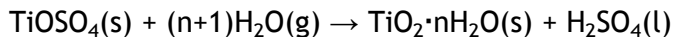
PRODUCTIEPROCES I: Het sulfaatproces (rendement: 80%)

1. Fijngemalen erts, ilmeniet, wordt met een overmaat geconcentreerd zwavel-zuur vrijwel volledig omgezet in TiOSO_4 volgens:



Bij het afkoelen tot 15°C ontstaat er $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ dat wordt afgefiltreerd.

2. TiOSO_4 wordt met stoom verhit tot ongeveer 110°C . Hierbij ontstaan een grote hoeveelheid geleiachtig, gekristalliseerd titaandioxide en zwavelzuur volgens:



Zwavelzuur wordt weggewassen en later door indampen weer omgezet in geconcentreerd zwavelzuur dat weer bij stap 1 gebruikt kan worden.

3. Het titanium bevattende product wordt gedroogd bij een temperatuur tussen de 200 en 300°C . Wanneer het water is verwijderd, wordt de temperatuur langzaam verhoogd. Bij 480°C beginnen de kristalletjes te groeien.

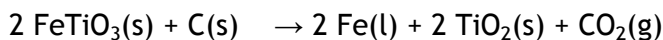


15 Bereken van het sulfaatproces de atomeconomie.

16 Bereken van het sulfaatproces de E -factor.

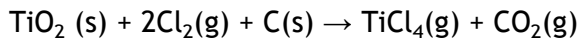
PRODUCTIEPROCES II: Het chlorideproces (rendement: 85%)

1. Ilmeniet wordt met cokes verhit tot boven de 1600°C . Hierdoor treedt een reactie op, waarbij titaandioxide, vloeibaar ijzer en koolstofdioxide ontstaan volgens:



Het vloeibare ijzer wordt afgetapt en het CO_2 wordt afgevoerd.

2. Om TiO_2 te zuiveren wordt het product verhit in aanwezigheid van chloorgas en cokes. De exotherme reactie die bij $950\text{ }^\circ\text{C}$ optreedt is:

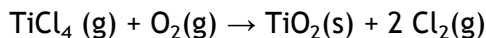


Het gasvormig mengsel bevat metaalchloriden, koolstofdioxide en andere verontreinigingen.

3. Het mengsel wordt afgekoeld om de onzuiverheden met een lager kookpunt af te scheiden en ook het CO_2 wordt afgevoerd.

4. Het zuivere TiCl_4 wordt met zuurstofgas verbrand rond de $1000\text{ }^\circ\text{C}$ om ervoor te zorgen dat zoveel mogelijk TiCl_4 verbrandt. Er wordt zuiver TiO_2 gevormd en er ontstaat chloorgas dat gerecirculeerd kan worden voor stap 2.

De reactievergelijking luidt:



17 Bereken van het chlorideproces de atomeconomie.

18 Bereken van het chlorideproces de *E*-factor.

19 Bepaal welk proces op grond van de atomeconomie en *E*-factor het meest groene proces is.

OPGAVE 5

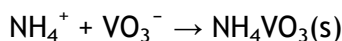
Vanadium wordt gewonnen uit het mineraal vanadinit. De formule van dit mineraal is $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$. Dit mineraal wordt soms ook gebruikt als grondstof voor de bereiding van lood.

20 Leg uit, zonder een berekening, wat hoger is: het massapercentage vanadium in vanadinit of het massapercentage lood in vanadinit.

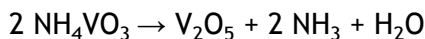
Bij de productie van vanadium uit vanadinit wordt het vanadinit eerst verhit met natriumcarbonaat. Er ontstaat dan natriumvanadaat: NaVO_3 . Dit is de enige Na- en V-bevattende stof die ontstaat. Behalve natriumvanadaat ontstaan nog drie stoffen. Deze omzetting is géén redoxreactie. Er reageren geen andere stoffen dan vanadinit en natriumcarbonaat.

21 Geef de reactievergelijking van deze omzetting.

In de tweede stap lost men het natriumvanadaat op en laat men het reageren met een oplossing van ammoniumchloride. Hierbij ontstaat een neerslag van ammoniumvanadaat volgens



Vervolgens wordt het ammoniumvanadaat afgescheiden en verhit, waarbij de stof vanadiumpentaoxide ontstaat:



22 Leg uit bovenstaande reactie een ontledingsreactie is.

23 Leg uit of bovenstaande reactie een redoxreactie is.

Tenslotte laat men het vanadiumpentaoxide reageren met een onedel metaal. Hierbij ontstaan vanadium en het oxide van het desbetreffende onedele metaal. Als te gebruiken onedel metaal komen aluminium en calcium in aanmerking. Beide onedele metalen reageren in een exotherme reactie met vanadiumpenta-oxide. Om te beoordelen welk metaal wordt gebruikt, kunnen principes uit de groene chemie worden toegepast. Eén van die principes is dat een proces energie-efficiënt wordt ontworpen. Daarvoor moet worden nagegaan in welke reactie de meeste warmte vrijkomt.

- 24 Geef de vergelijking van de reactie van vanadiumpentaoxide met aluminium.
 25 Geef de vergelijking van de reactie van vanadiumpentaoxide met calcium.
 26 Toon door middel van een berekening aan bij welk van de twee processen de meeste warmte vrijkomt.

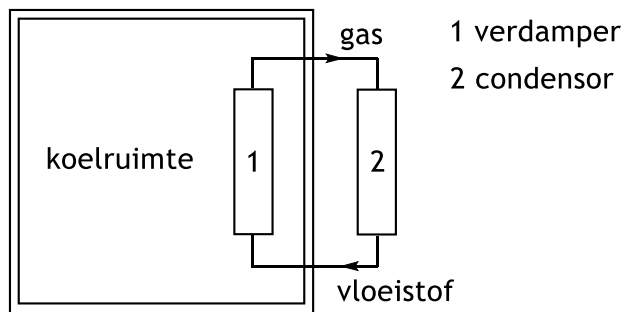
Ook andere principes uit de groene chemie kunnen worden gebruikt om een keuze te maken. Bijvoorbeeld de atomeconomie en de *E*-factor.

- 27 Bereken voor beide processen de atomeconomie en bepaal op grond daarvan welk proces de voorkeur heeft.
 28 Bereken voor beide processen de *E*-factor en bepaal op grond daarvan welk proces de voorkeur heeft.

OPGAVE 6

In een koelinstallatie circuleert een koelmiddel in een gesloten kringloop zoals schematisch is weergegeven in onderstaande figuur.

In de verdamper verdampt het koelmiddel. Hierdoor daalt de temperatuur in de koelruimte.



- 29 Leg uit dat door het verdampen van het koelmiddel de temperatuur in de koelruimte daalt.

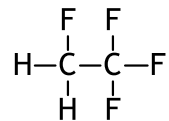
Als koelmiddel werden in het verleden CFK's gebruikt. CFK's zijn verbindingen van chloor, fluor en koolstof. Tegenwoordig mogen CFK's niet meer worden gebruikt, omdat ze de ozonlaag aantasten. Ozon wordt daarbij omgezet in zuurstof.

- 30 Geef de reactievergelijking van de omzetting van ozon in zuurstof.

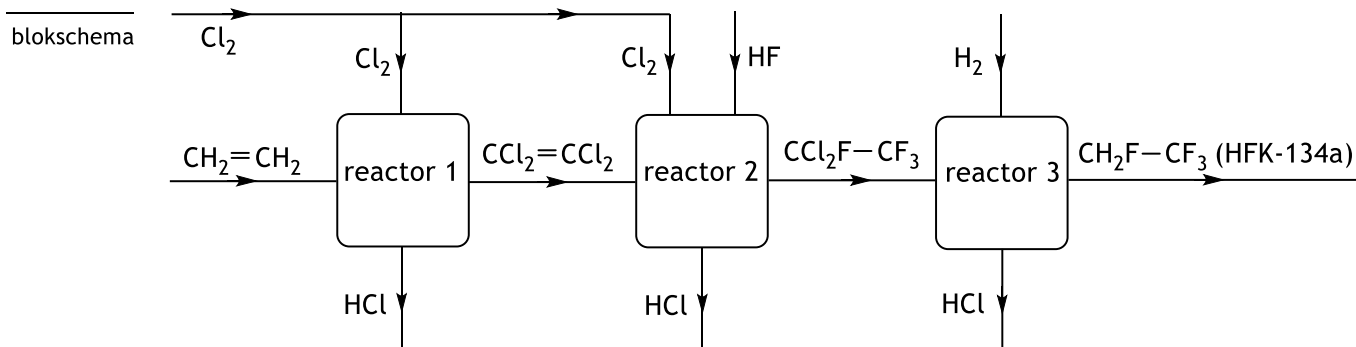
Tegenwoordig wordt in koelinstallaties vaak gebruik gemaakt van HFK's, die de ozonlaag niet aantasten. Dit zijn verbindingen van waterstof, fluor en koolstof. Een veel gebruikt koelmiddel is HFK-134a ($\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$).

Hiernaast staat de structuurformule:

- 31 Geef de systematische naam van HFK-134a.

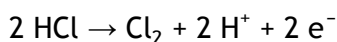


Bij de productie van HFK-134a is etheen een beginstof. De productie gebeurt in drie stappen die hieronder in een blokschema zijn weergegeven.



- 32 Is de reactie die plaatsvindt in reactor 1 een additiereactie? Geef een verklaring voor je antwoord.
- 33 Geef de vergelijking van de reactie die plaatsvindt in reactor 2. Gebruik hierbij de formules zoals ze in blokschema 2 zijn weergegeven.
- 34 Bereken aan de hand van het blokschema hoeveel mol HCl er in totaal ontstaat bij de productie van 1,0 mol HFK-134a uit etheen.

Er is een methode ontwikkeld voor de recycling van de grote hoeveelheid HCl die bij de productie van HFK-134a ontstaat. Bij deze methode wordt door middel van elektrolyse het gas HCl omgezet in H_2 en Cl_2 . Bij de elektrolyse wordt aan de ene elektrode het gas HCl omgezet in Cl_2 en H^+ . De vergelijking van deze halfreactie is:



Het H^+ dat ontstaat, gaat naar de andere elektrode en wordt omgezet in H_2 .

- 35 Vindt de omzetting van HCl in Cl_2 en H^+ plaats aan de positieve of aan de negatieve elektrode? Geef een verklaring voor je antwoord.

Bij de elektrolyse van HCl gas ontstaan dus Cl_2 gas en H_2 gas. Al het Cl_2 gas en een deel van het H_2 gas worden opnieuw gebruikt voor de productie van HFK-134a, de rest van het H_2 gas wordt afgevoerd.

Het blokschema van de productie van HFK-134a kan worden uitgebreid met de stofstromen die ontstaan doordat het proces wordt uitgebreid met de elektrolyse van het geproduceerde HCl gas.

- 36 Geef in het blokschema de ontbrekende stofstromen op de juiste wijze weer.

Om te bepalen of de productie van HFK-134a uit etheen een groen proces is, kan de atomeconomie en de E-factor berekend worden.

- 37 Geef in de productie van HFK-134a uit etheen in één reactievergelijking weer. Gebruik hierbij de formules zoals ze in blokschema 2 zijn weergegeven.
- 38 Bereken de atomeconomie van dit proces. Zie tabel 37H van BINAS.
- 39 Bereken de E-factor van dit proces. Ga uit van 100% rendement.
- 40 Noem twee uitgangspunten in de groene chemie die voor dit proces nog verbeterd zouden kunnen worden. Geef een toelichting bij je antwoord. Maak gebruik van tabel 97F van BINAS.

Overige oefenopgaven kunnen het beste uit examenopgaven gehaald worden.

Oefenopgaven INDUSTRIËLE CHEMIE vwo

UITWERKINGEN

OPGAVE 1

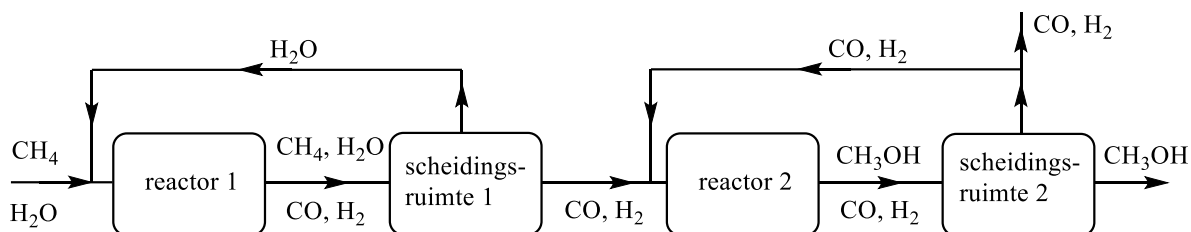
01 $\Delta E = (+0,76 + 2,42 - 1,105) \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1} = +2,08 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$.

$V_m = 24,5 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$, dus $1 \text{ m}^3 (1000 \text{ dm}^3) \equiv \frac{1000}{24,5} = 40,8 \text{ mol CH}_4$.

Dus $\Delta E = 40,8 \times 2,08 \cdot 10^5 = +8,47 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3}$.

02 Een overmaat $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ gebruiken.

03



04 Uit [1] wordt CO en H_2 in de verhouding 1 : 3 verkregen. In [2] reageren ze 1 : 2. Daardoor blijft een deel van de hoeveelheid H_2 ongebruikt. Als dit niet wordt afgevoerd, zal de hoeveelheid H_2 voortdurend stijgen en daardoor ook de druk.

05 Aanname: in reactor 2 is x mol CO en y mol H_2 aanwezig voordat de reactie plaatsvindt. Een deel hiervan komt uit reactor 1 (100 mol CO en 300 mol H_2) en de rest komt uit scheidingsruimte 2 (het deel dat gerecirculeerd wordt). Tevens geldt in reactor 2 een rendement van 50%.

In schema:

in R2 – reactie = uit R2 (= in S2)	80% recirc.	in R2 = uit R1 + recirc.	
CO	$x - \frac{1}{2}x = \frac{1}{2}x$	$x = 100 + \frac{2}{5}x$	<1>
H_2	$y - x = y - x$	$y = 300 + \frac{4}{5}y - \frac{4}{5}x$	<2>

Uit <1> volgt: $x = 166,7 \text{ mol} \rightarrow$ er wordt dus $166,7 - 100 = 66,7 \text{ mol CO}$ gerecirculeerd.

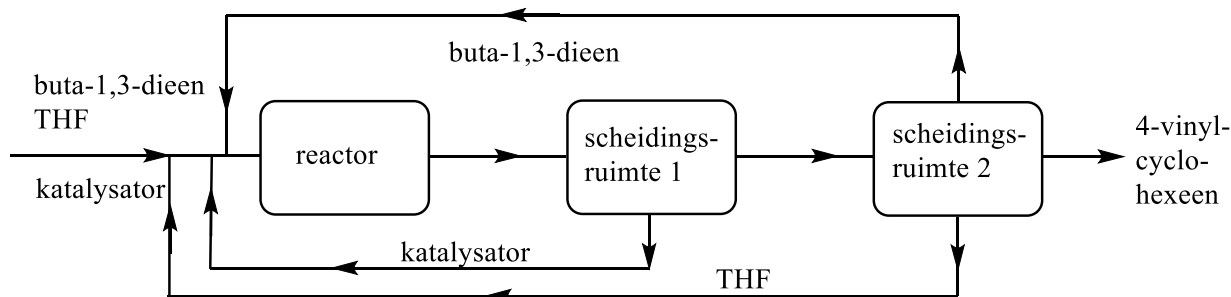
Uit <2> volgt: $y = 833,3 \text{ mol} \rightarrow$ er wordt dus $833,3 - 300 = 533 \text{ mol H}_2$ gerecirculeerd.

OPGAVE 2

06 Filtreren.

07 Destilleren.

08



OPGAVE 3



10 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ komt voor in fosfaaterts.

SiO_2 komt voor in zand.

C komt voor in cokes.

11 Atoomeconomie = $\frac{\text{massa gewenst product}}{\text{totale massa beginstoffen}} \times 100\%$. Het gewenste product is het P_4 .

$$\text{Atoomeconomie} = \frac{4 \times 30,97}{2 \times 310,18 + 6 \times 60,09 + 10 \times 12,01} \times 100\% = 11,25\%.$$

12 In ruimte II wordt afgekoeld tot 400°C . Dit is 673 K. Hierbij stolt CaSiO_3 . P_4 en CO blijven gasvormig en worden naar ruimte III getransporteerd.

In ruimte III wordt afgekoeld tot 70°C . Dit is 343 K. Hierbij wordt P_4 vloeibaar en blijft CO gasvormig.

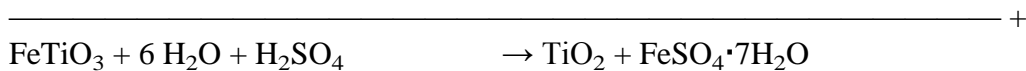
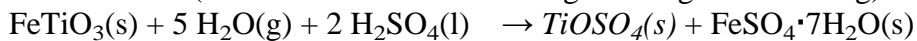
13 1. CO is giftig.

2. CO is brandbaar en kan daarom als brandstof gebruikt worden.

14 $E\text{-factor} = \frac{m_{\text{beginstoffen}} - m_{\text{werkelijke opbrengst product}}}{m_{\text{werkelijke opbrengst product}}} = \frac{1101 - 123,9}{123,9} = 7,9.$

OPGAVE 4

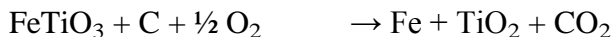
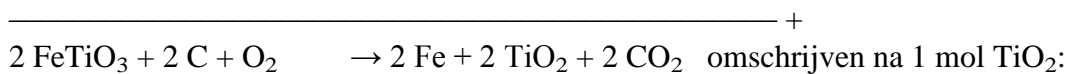
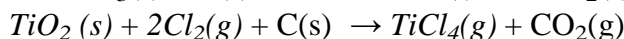
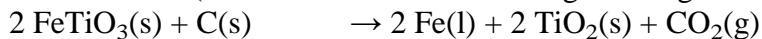
15 Totale reactie (de cursieve formules vallen geheel tegen elkaar weg):



$$\text{Atoomeconomie} = \frac{m_{\text{product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} = \frac{79,87}{(151,72 + 6 \times 18,015 + 98,097)} \times 100\% = 22,32\%$$

16 $E\text{-factor} = \frac{m_{\text{beginstoffen}} - m_{\text{werkelijk opbrengst product}}}{m_{\text{werkelijk opbrengst product}}} = \frac{357,907 - 0,80 \times 79,87}{0,80 \times 79,87} = 4,60$

17 Totale reactie (de cursieve formules vallen geheel tegen elkaar weg):



$$\text{Atoomeconomie} = \frac{m_{\text{product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} = \frac{79,87}{(151,72 + 12,01 + 16,00)} \times 100\% = 44,44\%$$

18 $E\text{-factor} = \frac{m_{\text{beginstoffen}} - m_{\text{werkelijk opbrengst product}}}{m_{\text{werkelijk opbrengst product}}} = \frac{179,73 - 0,85 \times 79,87}{0,85 \times 79,87} = 1,65$

19 De atoomeconomie moet zo hoog mogelijk zijn (bij 100% heb je geen afval). Op grond daarvan verdient het chlorideproces de voorkeur.

Bij de *E*-factor wordt gekeken naar de hoeveelheid afval per kg product. Deze moet dus zo laag mogelijk zijn. Op grond hiervan verdient het chlorideproces de voorkeur.

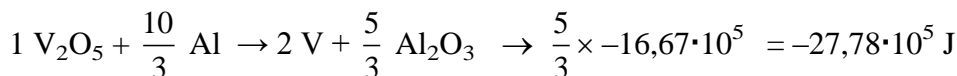
LET OP:

Als bij een proces H₂O ontstaat, gebruik je de volgende formule voor de *E*-factor:

$\frac{m_{\text{alle producten}} - m_{\text{werkelijk opbrengst product}}}{m_{\text{werkelijk opbrengst product}}}$ en laat je de massa van H₂O weg bij $m_{\text{alle producten}}$, want H₂O is niet een milieuvervuilend product.

OPGAVE 5

- 20 Massapercentage lood is hoger dan van vanadium.
 $M(\text{Pb}) > M(\text{V})$ en bovendien is de index van Pb groter dan van V in vanadinit.
 21 $2 \text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl} + 3 \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 6 \text{NaVO}_3 + 9 \text{PbO} + \text{PbCl}_2 + 3 \text{CO}_2$
 22 Er is één beginstof en meerdere producten, dus is het een ontleding.
 23 Er is geen verandering van oxidatiegetallen, dus geen redoxreactie.
 (V^{5+} in VO_3^- en in V_2O_5 ; N^{3-} in NH_4^+ en in NH_3)
 24 $3 \text{V}_2\text{O}_5 + 10 \text{Al} \rightarrow 6 \text{V} + 5 \text{Al}_2\text{O}_3$
 25 $\text{V}_2\text{O}_5 + 5 \text{Ca} \rightarrow 2 \text{V} + 5 \text{CaO}$
 26 De vormingswarmte van V_2O_5 is niet bekend. ΔE is dan niet te berekenen.
 Je kunt wel de reacties omschrijven met een coëfficiënt 1 voor V_2O_5 en dan de waarden voor de vormingswarmte van Al_2O_3 en CaO met elkaar vergelijken.



Bij de reactie met calcium komt dus de meeste warmte vrij.

N.B. De elementen kun je buiten beschouwing laten. Hiervoor geldt $\Delta E_{\text{vorming}} = 0$.

- 27 Atoomeconomie voor reactie met aluminium:

$$\frac{6 \times 50,94}{3 \times 181,9 + 10 \times 26,98} \times 100\% = 37,48\%$$

Atoomeconomie voor reactie met calcium:

$$\frac{2 \times 50,94}{181,9 + 5 \times 40,08} \times 100\% = 26,65\%$$

De atomeconomie moet zo hoog mogelijk zijn (dan komen de meeste atomen van de beginstoffen in het product terecht), dus verdient op grond van de atomeconomie de reactie met aluminium de voorkeur.

- 28 *E*-factor voor de reactie met aluminium:

$$\frac{3 \times 181,9 + 10 \times 26,98 - 6 \times 50,94}{6 \times 50,94} = 1,668.$$

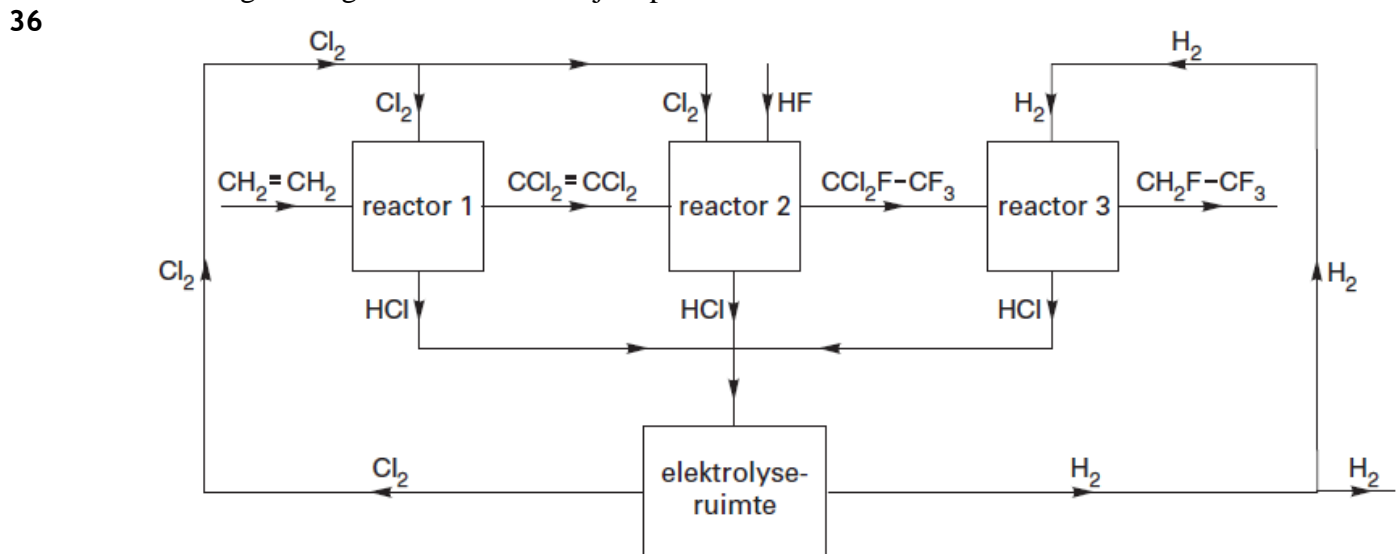
E-factor voor de reactie met calcium:

$$\frac{181,9 + 5 \times 40,08 - 2 \times 50,94}{2 \times 50,94} = 2,752.$$

De *E*-factor moet zo laag mogelijk zijn, dus verdient de reactie met aluminium de voorkeur.

OPGAVE 6

- 29 Om het koelmiddel te laten verdampen is energie / warmte nodig.
Deze energie wordt onttrokken aan de koelruimte (waardoor de temperatuur daalt)
- 30 $2 \text{ O}_3 \rightarrow 3 \text{ O}_2$.
- 31 1,1,1,2-tetrafluorethaan.
- 32 Er ontstaat niet één stof / de dubbele binding blijft behouden.
Dus geen additie.
- 33 $\text{CCl}_2=\text{CCl}_2 + \text{Cl}_2 + 4 \text{ HF} \rightarrow \text{CCl}_2\text{F}-\text{CF}_3 + 4 \text{ HCl}$
- 34 Bij stap 1 komt 4,0 mol HCl vrij en bij stap 2 komt 4,0 mol HCl vrij.
Bij stap 3 komt 2,0 mol HCl vrij. Totaal: 10 mol HCl.
- 35 Het gaat om elektrolyse, dus een gedwongen reactie.
In de halfreactie reageert een reductor.
Deze wordt gedwongen e^- af te staan bij de positieve elektrode.



38 $M(\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3) = 102,036 \text{ u}$

$$\text{Atoomeconomie} = \frac{102,036}{102,036 + 3 \times 2,016} \times 100\% = 94,40\%$$

- 39 Bij 100% rendement kun je de E -factor vaak simpeler als volgt berekenen:

$$E\text{-factor} = \frac{m_{\text{afval}}}{m_{\text{product}}}$$

Omdat waterstof het enige afvalproduct is, geldt: $E\text{-factor} = \frac{3 \times 2,016}{102,036} = 0,05927$.

- 40 Nummer 6: energie-efficiënt ontwerpen.

Er wordt elektrolyse gebruikt en dat kost veel elektrische energie.

Nummer 8: reacties in weinig stappen.

Er zijn nu vier stappen (inclusief elektrolyse). Het kan (misschien) in minder stappen.

Opmerking:

Soms zijn meer stappen te verkiezen. Bijvoorbeeld als bij een proces met minder stappen een reactie niet verloopt of een (veel) lager rendement oplevert.