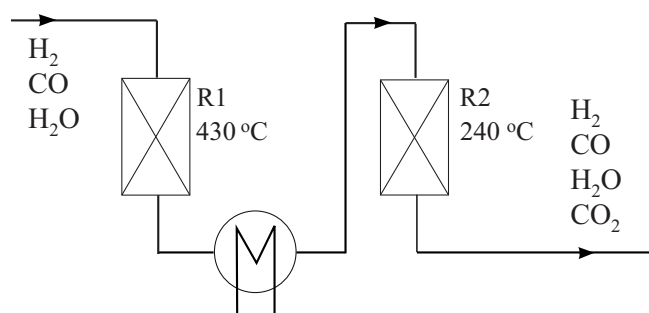


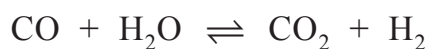
## Duurzame ammoniak

Ammoniak wordt in Europa vooral geproduceerd uit stikstof en methaan. Methaan treedt in het proces op als energiebron maar ook als bron van waterstofatomen. Om waterstof te produceren uit methaan wordt bij hoge temperatuur en druk methaan in reactie gebracht met water en zuurstof. Hierbij wordt een gasmengsel van CO, H<sub>2</sub>O en H<sub>2</sub> verkregen. Om een groot deel van het aanwezige CO te verwijderen, wordt vervolgens in twee reactoren de zogeheten gas-shift reactie uitgevoerd. In figuur 1 is weergegeven hoe dit deel van het proces wordt uitgevoerd. Zowel in R1 als in R2 is een katalysator aanwezig en heerst een hoge druk.

figuur 1



In beide reactoren treedt onderstaand evenwicht op.



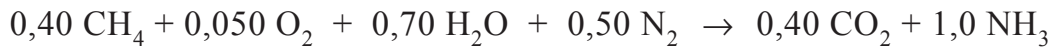
In de gasstroom na R1 bedraagt het volumepercentage CO nog 2-4% en na R2 is er nog 1% CO.

- 2p 22 Leg uit of de reactie naar rechts van dit evenwicht exotherm of endotherm is.
- 1p 23 Geef aan welk doel de hogere temperatuur in R1 heeft.

De waterstof afkomstig uit R2 wordt in een aantal stappen afgescheiden van de rest van het gasmengsel. Allereerst wordt water afgescheiden. Daarna wordt CO<sub>2</sub> gescheiden van de overige gassen.

- 2p 24 Leg uit op welke wijze CO<sub>2</sub> kan worden afgescheiden uit het gasmengsel dat is ontstaan na het verwijderen van water uit het gasmengsel afkomstig van R2.

De gezuiverde waterstof wordt in een volgende reactor in reactie gebracht met stikstof. Het totaalproces van de productie van ammoniak uit onder andere methaan kan worden weergegeven met onderstaande reactievergelijking (reactie 1):



Als in een proces deze molverhoudingen worden toegepast, is het proces ongeveer energieneutraal. Dat betekent dat vrijwel geen extra energie nodig is of overtollige warmte ontstaat.

- 3p **25** Bereken het energie-effect van het totaalproces volgens reactie 1 per mol gevormde ammoniak.  
Neem aan dat  $\text{H}_2\text{O}$  in gasvorm aanwezig is. Rond bij deze berekening niet tussentijds af en geef je antwoord in twee significante cijfers.

In de praktijk blijkt dat de meest efficiënte ammoniakfabrieken 25% meer energie nodig hebben dan wat op basis van reactie 1 kan worden berekend. In het proces wordt dan ook 25% meer methaan per mol ammoniak gebruikt. De extra hoeveelheid methaan levert dan de benodigde energie.

- 3p **26** Geef de vergelijking van reactie 1 voor de praktijksituatie.

De waterstof die nodig is voor de productie van ammoniak kan ook worden verkregen uit andere processen. In tabel 1 is het relatieve energieverbruik weergegeven voor de productie van waterstof uit een aantal grondstoffen.

In de reacties zijn de grondstoffen zware stookolie en nafta weergegeven met de gemiddelde verhouding tussen het aantal C atomen en het aantal H atomen in deze grondstoffen.

**tabel 1**

grondstof (proces)	reactie	relatief energieverbruik
kolen	$\text{C} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ H}_2 + \text{CO}_2$	170%
zware stookolie	$\text{CH} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2\frac{1}{2} \text{ H}_2 + \text{CO}_2$	135%
nafta	$\text{CH}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ H}_2 + \text{CO}_2$	104%
aardgas	$\text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2$	100%

Zware stookolie en nafta zijn producten afkomstig van de destillatie van aardolie. Als onvoldoende aardgas beschikbaar is, kan aan de hand van tabel 1 een afweging worden gemaakt tussen de grondstoffen zware stookolie en nafta.

- 2p **27** Leg uit welke van de twee grondstoffen, zware stookolie of nafta, de voorkeur verdient voor de productie van waterstof. Geef twee argumenten op basis van tabel 1.

Onderzocht is of het mogelijk is om gedroogd houtafval als duurzaam alternatief voor methaan te gebruiken voor de productie van ammoniak. In het onderzoek leverde 2,7 kg houtafval voldoende waterstof voor de productie van 1,0 kg ammoniak. De omzetting van alle koolstof uit het houtafval leidt uiteindelijk tot een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 3,3 kg CO<sub>2</sub> per kg ammoniak.

- 2p **28** Laat door berekening zien dat de omzetting van alle koolstof uit het houtafval leidt tot een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 3,3 kg CO<sub>2</sub> per kg ammoniak. Gebruik onder andere de volgende gegevens:
- het vochtgehalte van het houtafval bedroeg 35 massa%;
  - gedroogd houtafval bevat 51 massa% koolstof.

In het onderzoek is met behulp van modellen berekend dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij de productie van ammoniak uit aardgas 1,9 kg CO<sub>2</sub> per kg ammoniak bedraagt. De productie van ammoniak uit houtafval levert een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 4,1 kg CO<sub>2</sub> per kg ammoniak. In de modellen is ook de CO<sub>2</sub>-uitstoot die optreedt buiten de ammoniakfabriek opgenomen. Op basis van de gemodelleerde CO<sub>2</sub>-uitstoot van beide processen kan worden berekend dat houtafval een lagere bijdrage levert aan het versterkte broeikaseffect dan aardgas.

- 2p **29** Voer de volgende opdrachten uit:
- Bereken hoeveel kg CO<sub>2</sub> per kg ammoniak netto wordt bespaard door gebruik te maken van houtafval.
  - Licht je berekening toe.