



Education in Hydrogen Technologies Area

PRODUCTIE VAN WATERSTOF EN VEILIGHEID



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

Inhoud

1	Inleiding.....	5
1.1	Kleuren van waterstof.....	6
1.1.1	Bruine en grijze waterstof.....	6
1.1.2	Blauwe Waterstof.....	6
1.1.3	Roze Waterstof.....	6
1.1.4	Groene Waterstof.....	6
1.2	Waterstof.....	7
1.2.1	Doelstellingen:.....	7
1.2.2	Trefwoorden:.....	7
1.3	Kenmerk van waterstof.....	8
1.4	Fysieke eigenschappen.....	8
1.4.1	Registratiegevens.....	9
1.4.2	Isotopen van waterstof.....	9
1.4.3	Geschiedenis.....	9
1.5	Hoofdstuk samenvatting:.....	11
1.6	Vragen aan het einde van het hoofdstuk:.....	12
1.6.1	Antwoorden: (For Examining Quiz Responses).....	14
2	Waterstofproductie uit fossiele brandstoffen.....	15
2.1	Doelstellingen:.....	15
2.2	Trefwoorden:.....	15
2.3	stoom-methaan-reforming.....	15
2.3.1	Gedeeltelijke oxidatie.....	17
2.4	Waterstofproductie uit raffinaderijgas.....	20
2.5	Andere technologieën die fossiele brandstoffen gebruiken.....	20
2.5.1	Kolenvergassing.....	20
2.5.2	Katalytische reforming.....	20
2.6	Plasmahervorming.....	21
2.7	Hoofdstuk Samenvatting:.....	22
2.8	Vragen.....	23
2.8.1	Antwoorden (For Examining Quiz Responses).....	25
3	Waterstofproductie uit hernieuwbare bronnen.....	26
3.1	Doelstellingen:.....	26
3.1.1	Trefwoorden:.....	26

3.2	Elektrolyse van water	27
3.2.1	Elektrolyse van alkalisch water.....	28
3.2.2	Polymeer elektrolytisch membraan elektrolyse	28
3.2.3	Elektrolyse bij hoge temperatuur (HTE)	29
3.2.4	Thermochemische watersplitsing	30
3.2.5	Foto-elektrolyse van water.....	31
3.3	Andere technologieën	32
3.3.1	Westinghouse zwavelcyclus	32
3.3.2	Biologische productie van waterstof.....	33
3.3.3	Droge biomassa	33
3.3.4	Thermochemische processen.....	33
3.3.5	Biomassa met een hoog vochtgehalte	33
3.3.6	Directe fotolyse	34
3.3.7	Gisting.....	35
3.3.8	Donkere gisting.....	36
3.3.9	Fotofermentatie	37
3.4	Hoofdstuk Samenvatting:	38
3.5	Vragen aan het einde van het hoofdstuk:.....	39
3.5.1	Antwoorden: (For Examining Quiz Responses).....	41
4	Veiligheid.....	42
4.1	Doelstellingen:.....	42
4.2	Trefwoorden:.....	42
4.3	Veilig gebruik van waterstof.....	42
4.4	Biologische effecten van waterstof.....	43
4.5	Werkveiligheid bij de opslag en het vervoer van waterstof.....	44
4.6	Mogelijke risico's in verband met de opslag van gecompriemd waterstofgas.....	45
4.7	Algemene richtlijnen voor veilig werken met waterstofgas:	46
4.8	Veiligheid in de automobielandustrie	47
4.9	Samenvatting waterstof veiligheid.....	48
4.10	Vragen Waterstof Veiligheid	49
4.11	Antwoorden: (For Examining Quiz Responses).....	51

Ondersteund door de Europese Unie. De standpunten en meningen zijn echter uitsluitend die van de auteurs en komen niet noodzakelijkerwijs overeen met die van de Europese Unie of het Uitvoerend Agentschap voor onderwijs en cultuur (EACEA). Noch de Europese Unie, noch het EACEA kan verantwoordelijk worden gehouden.

1 INLEIDING

Het potentieel voor het gebruik van waterstof in de industrie en de energiesector is aanzienlijk. Ook al werd het lange tijd over het hoofd gezien. Een van de nadelen is echter dat het meestal alleen in chemische verbindingen in de natuur te vinden is, omdat het een zeer reactief gas is, en het moet worden afgeleid van water of methaan.

De voordelen van waterstof als energiedrager overtreffen de nadelen, wat bijdraagt aan de toenemende toepassing ervan. Waterstof is efficiënt in het langdurig opslaan van energie met minimale verliezen, in tegenstelling tot batterijen die elektrische energie voor slechts een beperkte periode kunnen vasthouden. Daarom wordt waterstof erkend als een veelbelovende oplossing voor het opvangen van de fluctuaties in energieproductie uit hernieuwbare bronnen

Waterstof biedt diverse voordelen als duurzame energiedrager. Als meest voorkomende element in het universum, is waterstof overvloedig aanwezig op aarde en speelt het een centrale rol in veel chemische verbindingen, waaronder water en organische stoffen. Het is ook een integraal bestanddeel van traditionele koolwaterstofbrandstoffen. Met zijn hoge energiedichtheid kan waterstof effectief getransporteerd en opgeslagen worden. Bij gebruik in brandstofcellen of motoren met inwendige verbranding, genereert het energie met als enige emissie waterdamp, wat bijdraagt aan een aanzienlijke vermindering van broeikasgassen vergeleken met fossiele brandstoffen. Het is wel van belang te vermelden dat bij de verbranding in motoren stikstofoxiden (NO_x) kunnen ontstaan, waarvan de uitstoot afhankelijk is van verschillende factoren zoals verbrandingstemperatuur en -tijd. Desondanks blijft waterstof een aantrekkelijke optie voor een koolstofarme toekomst, mits de productie en het gebruik ervan zorgvuldig worden gemanaged.¹

¹ Získávání vodíku z obnovitelných zdrojů <vertaling> [online]. Beschikbaar op: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2006/08%20-%20Brandejska.pdf>

1.1 KLEUREN VAN WATERSTOF

Waterstof wordt op verschillende manieren gebruikt; daarom is het verdeeld in groepen met verschillende kleuren.

1.1.1 BRUINE EN GRIJZE WATERSTOF

Waterstof kan geproduceerd worden door het te extraheren uit fossiele bronnen, zoals aardgas – een proces dat bekend staat als stoomreforming. Bij stoomreforming wordt de fossiele brandstof gemengd met stoom en vervolgens verhit tot hoge temperaturen, waardoor waterstof en koolstofdioxide (CO₂) worden geproduceerd. Hoewel deze methode, bekend als grijze waterstofproductie, op dit moment het meest gangbaar is, leidt het tot aanzienlijke CO₂-emissies. Dit maakt het een minder duurzame optie voor de lange termijn, aangezien het bijdraagt aan de klimaatverandering. Als gevolg worden alternatieve, schonere methoden voor de productie van waterstof onderzocht en ontwikkeld om de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen en de CO₂-voetafdruk van waterstofproductie te minimaliseren

1.1.2 BLAUWE WATERSTOF

Grijze en bruine waterstof kunnen worden verbeterd door het afvangen van geproduceerd CO₂ met behulp van Carbon Capture and Storage (CCS) technologie en Carbon Capture and Use (CCU) technologie. Op die manier wordt zogenaamde blauwe waterstof geproduceerd. De totale CO₂ productie in dit proces is lager, ook al is de bron aardgas of methaan, aangezien een aanzienlijk deel van de emissies wordt afgevangen.

1.1.3 ROZE WATERSTOF

Geproduceerd door elektrolyse, maar met elektriciteit afkomstig van kernenergie. De CO₂-uitstoot is indirect en hangt af van de methoden die gebruikt worden bij de bouw en het onderhoud van de kerncentrales, evenals bij de winning en verwerking van uranium.

1.1.4 GROENE WATERSTOF

Het primaire doel van de ontwikkeling van waterstoftechnologie is het reduceren van onze afhankelijkheid van fossiele brandstoffen door de productie van groene waterstof. Groene waterstof wordt verkregen via elektrolyse, een proces waarbij elektriciteit wordt gebruikt om water (H₂O) te splitsen in zuurstof (O₂) en waterstofgas (H₂). Wanneer deze elektriciteit afkomstig is uit hernieuwbare energiebronnen zoals zonne- of windenergie, wordt de geproduceerde waterstof 'groen' genoemd. Deze methode biedt een schone energiedrager die kan bijdragen aan het koolstofneutraal maken van energiegebruik in diverse sectoren.

Echter, om het volledige potentieel van waterstof als een duurzame energieoplossing te realiseren, moeten er uitdagingen op het gebied van opslag, transport en distributie worden aangepakt. Deze uitdagingen omvatten het ontwikkelen van efficiënte en veilige manieren om waterstof op te slaan onder hoge druk of in vloeibare vorm, het opzetten van een betrouwbaar distributienetwerk en het waarborgen van een veilig transport over lange afstanden. Door deze technologische en

infrastructurele hindernissen te overwinnen, kan waterstof een sleutelrol spelen in de overgang naar een duurzame energietoekomst.²

1.2 WATERSTOF

1.2.1 DOELSTELLINGEN:

- De primaire kenmerken van waterstof en zijn isotopen noemen;
- Waterstofkleuren herkennen en de wijze van verkrijging ervan vergelijken;
- De temperatuur bepalen waarbij waterstof vloeibaar wordt.

1.2.2 TREFWOORDEN:

Waterstof, waterstofkleuren, waterstofisotopen, kritische temperatuur

Waterstof is het eenvoudigste en lichtste bekende element. Het is 14,38 keer lichter dan lucht en geleidt warmte 7 keer beter dan lucht. Het is een van de belangrijkste biogene elementen. Samen met koolstof, stikstof, zuurstof, zwavel en fosfor vormt waterstof de bouwstenen voor het leven op aarde. Het protonnummer van waterstof is 1 en het symbool H.

Pure waterstof is zeldzaam op aarde, terwijl het gemakkelijk diffundeert in het heelal of zich verbindt met andere elementen waardoor zogenaamde hydriden ontstaan.

Het meest voorkomende hydride is water H_2O , dat bestaat uit twee waterstofatomen en één zuurstofatoom.³

² Plyn budoucnosti. Jak daleko je Česko na cestě k jeho využití? - Ekolist.cz. Ekolist.cz: životní prostředí, příroda, ekologie, klima, biodiverzita, energetika, krajina, doprava i cestování [online] Beschikbaar op: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/vodik-v-cesku.jak-daleko-jsme-na-cestě-k-vyuziti-plynu-budoucnosti>

³ KOTEK, Luboš. Specifika analýzy rizik vodíku. Automa: časopis pro automatizační techniku [online]. Beschikbaar op: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31466

1.3 KENMERK VAN WATERSTOF

Waterstof is een onzichtbaar, smaakloos en reukloos gas dat zowel veel voordelen als uitdagingen met zich meebrengt. Zijn lichte gewicht en hoge reactiviteit betekenen dat het snel stijgt en zich door materialen kan verspreiden die we normaal gesproken als dicht beschouwen. Dit kan veiligheidsrisico's met zich meebrengen, zoals de vorming van brandbare mengsels met lucht, die bij ontsteking kunnen leiden tot brand of een plotselinge en hevige verbranding (deflagratie).

Bij het opslaan van waterstof in vloeibare vorm zijn er aanzienlijke energie- en kostenuitdagingen, omdat het alleen bij extreem lage temperaturen vloeibaar kan worden gemaakt. Bovendien kan waterstof bepaalde materialen zwakker maken, een proces dat bekend staat als waterstofbrosheid, wat problematisch is omdat het van binnenuit begint en niet direct zichtbaar is.

Ondanks dat waterstof bij kamertemperatuur relatief inactief is, kan het bij verhoogde temperaturen met veel andere elementen reageren, waardoor het nuttig is in industriële processen. Het is echter belangrijk om te weten dat waterstof niet samengaat met oxidatiemiddelen zoals lucht, zuurstof en halogenen, omdat dit explosieve reacties kan veroorzaken.

Als uiterst brandbaar gas brandt waterstof met een bijna onzichtbare vlam, wat het detecteren van vlammen moeilijk maakt. Daarbij wordt waterstof vaak onder hoge druk verwerkt, waardoor een lek kan leiden tot directe ontbranding door het zogenaamde omgekeerde Joule-Thomson-effect.

Bij het werken met waterstof is het essentieel om strenge veiligheidsprotocollen te volgen en systemen te gebruiken die speciaal zijn ontworpen om het gas te bevatten en te controleren. Het testen van de dichtheid van deze systemen met helium is een praktijk die helpt om de veiligheid te garanderen, vanwege de vergelijkbare molecuulgrootte met waterstof.

In het algemeen is het grootste risico bij het gebruik van waterstof de mogelijkheid om brandbare mengsels met lucht te vormen, die ontbranden bij blootstelling aan een vonk of vlam. Dit betekent dat speciale aandacht moet worden besteed aan het voorkomen van lekken en het waarborgen van de veiligheid bij het gebruik van waterstof in gesloten ruimtes.⁴

1.4 FYSIEKE EIGENSCHAPPEN

- Moleculair gewicht: 2,02 g
- Kookpunt: -252,9 °C
- Drievoudig punt: -259,2 °C
- Kritische temperatuur: -239,9 °C
- Kritische druk: 12,8 atm
- Gasdichtheid bij 0 °C en 1 atm (lucht = 1): 0,089 g/l
- Gasdichtheid bij 25 °C en 1 atm (lucht = 1): 0,069 g/l
- Zelfontbrandingstemperatuur in lucht bij 1 atm: 570 °C
- Ontstekingsenergie van slechts 0,02 J.

⁴ DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Bezpečnost. Česká vodíková technologická platforma [online]. Beschikbaar op: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/bezpecnost/496-bezpecnost>

1.4.1 REGISTRATIEGEVENS

- Chemische formule: H₂
- CAS-nummer: 1333-74-0
- EG-nummer: 215-605-7
- VN-nummer: 1049

1.4.2 ISOTOPEN VAN WATERSTOF

Een waterstofatoom bestaat uit één proton. Het is de eenvoudigste isotoop in het heelal. De isotopen worden onderscheiden door het aantal neutronen dat ze bevatten. Waterstof heeft drie bekende isotopen die van nature op aarde voorkomen. De meest voorkomende isotoop is protium (^1H), dat bestaat uit één proton en geen neutron. De volgende isotoop is deuterium (^2H), bestaande uit één proton en één neutron. In chemische formules is het te vinden onder het symbool D. De derde isotoop is tritium (^3H), bestaande uit één proton en twee neutronen. Deuteriumoxide D₂O (zwaar water) is aanwezig in water. De concentratie ervan neemt toe bij elektrolyse van water. Zijn smeltpunt (3,79 °C) en kookpunt (101,4 °C) zijn hoger dan voor H₂O. Tritium is een radioactief gas met zwakke β -straling, en in tegenstelling tot deuterium is het onstabiel en heeft het een halveringstijd van 12,3 jaar. In chemische formules is het te vinden onder het symbool T. Het ontstaat in kernreactoren bij de productie van plutonium uit natuurlijk uranium. Het wordt gebruikt in waterstofbommen, fluorescerende kleuren of lichtgevende wijzers van klokken.⁵

1.4.3 GESCHIEDENIS

Het is Henry Cavendish, een Britse wetenschapper, die in 1766 waterstof identificeerde als een afzonderlijke substantie toen hij zuren mengde met metalen en een kleurloos, brandbaar gas waar nam. Hij toonde ook aan dat water geen element is, maar een verbinding. De benaming 'waterstof', afgeleid van het Grieks 'hydro' voor water en 'genes' voor vormend, werd geïntroduceerd door de Franse chemicus Antoine-Laurent de Lavoisier, die het 'hydrogène' noemde.

⁵ Waterstof: De isotopen en vormen. In: Infoplease [online]. Beschikbaar op: <http://www.infoplease.com/encyclopedia/science/hydrogen-theisotopes-forms.html>

De pionier in de studie van waterelektrolyse was een andere Britse wetenschapper, Sir William Robert Grove. Hij demonstreerde in de 19e eeuw dat water kon worden gesplitst in waterstof en zuurstof door middel van elektriciteit. Interessant is dat Grove ook het principe van de brandstofcel ontdekte, het proces waarbij waterstof en zuurstof gecombineerd kunnen worden om elektriciteit en water te genereren, het omgekeerde van elektrolyse. Hij voerde een experiment uit met twee platina-elektroden in afzonderlijke compartimenten gevuld met verdund zwavelzuur en toonde aan dat er een elektrische stroom ontstond tussen de elektroden. Zijn 'gasbatterij' verhoogde de spanning door meerdere eenheden in serie te schakelen. De term 'brandstofcel' werd later geadopteerd door de chemici Ludwig Mond en Charles Langer, die verder onderzoek deden naar deze technologie⁶.

⁶ Historie objevu kyslíku a vodíku, prvků tvořících vodu. In: BŘÍŽŤALA, Jan. EChem. Boek: Multimediální učebnice chemie [online]. Beschikbaar op: <http://www.e-chembook.eu/cz/historie-objevu-kysliku-a-vodikuprvku-tvoricich-vodu>

1.5 Hoofdstuk samenvatting:

Waterstof heeft een groot potentieel in de industrie en energiesector als energiedrager. Hoewel het in de natuur meestal gebonden is aan andere elementen, biedt het belangrijke voordelen voor energieopslag en kan het bijdragen aan vermindering van broeikasgassen, gezien het enkel waterdamp uitstoot bij gebruik in brandstofcellen. Er zijn echter ook nadelen, zoals de vorming van NOx bij verbranding in motoren.

Er zijn verschillende soorten waterstof, gecategoriseerd door kleur, afhankelijk van de productiemethode:

1. Bruine/grijze waterstof: via stoomreforming uit fossiele brandstoffen, wat CO₂-emissies veroorzaakt.
2. Blauwe waterstof: verbeterde versie van grijze waterstof door CO₂-afvang en -opslag.
3. Roze waterstof: geproduceerd met elektriciteit uit kernenergie.
4. Groene waterstof: geproduceerd via elektrolyse met hernieuwbare energie, zonder CO₂-emissies.

De doelstellingen van waterstofgebruik zijn onder meer het benoemen van de kenmerken van waterstof en zijn isotopen, het herkennen van de verschillende soorten waterstof en het bepalen van de kritische temperatuur voor waterstofopslag. Waterstof is het lichtste element en heeft een hoge reactiviteit, met drie isotopen: protium, deuterium en tritium. De geschiedenis van waterstof begint bij Henry Cavendish, die het identificeerde, en het woord 'waterstof' komt van de Franse chemicus Lavoisier. William Robert Grove toonde aan dat water gesplitst kon worden in waterstof en zuurstof door elektrolyse, wat leidde tot de ontdekking van de brandstofcel.

De uitdagingen voor de brede toepassing van waterstof omvatten de ontwikkeling van veilige en efficiënte opslag, transport en distributiemethoden. Door deze technologische en infrastructurele barrières te overwinnen, kan waterstof een sleutelrol spelen in de transitie naar een duurzamere energietoekomst.

1.6 VRAGEN AAN HET EINDE VAN HET HOOFDSTUK:

- 1) Wat is het primaire mechanisme waardoor waterstof de energietransitie kan ondersteunen?
 - A) Het biedt een alternatief voor op kolen gebaseerde brandstoffen.
 - B) Het maakt de lange-termijnopslag van hernieuwbare energie mogelijk.
 - C) Het kan worden gebruikt in bestaande infrastructuur zonder aanpassingen.
 - D) Het stimuleert de ontwikkeling van elektrische voertuigen.

- 2) Welke energiebron is verantwoordelijk voor de CO₂-emissies geassocieerd met grijze waterstofproductie?
 - A) Zonne-energie
 - B) Windenergie
 - C) Biomassa
 - D) Aardgas

- 3) Hoe draagt de toepassing van CCS-technologie bij aan de duurzaamheid van blauwe waterstof?
 - A) Door het verbeteren van de efficiëntie van waterstofproductie
 - B) Door het verminderen van het energieverbruik in het productieproces
 - C) Door de uitstoot van CO₂ tijdens de productie te vangen en op te slaan
 - D) Door de productiekosten te verlagen

- 4) Welk type energiecentrale is doorgaans betrokken bij de productie van roze waterstof?
 - A) Waterkrachtcentrales
 - B) Kerncentrales
 - C) Kolenenergiecentrales
 - D) Geothermische energiecentrales

- 5) Wat is het hoofddoel van het ontwikkelen van groene waterstof binnen de context van een duurzame energie-economie?
 - A) Het maximaliseren van de energiedichtheid van waterstof
 - B) Het minimaliseren van de operationele kosten van brandstofcellen
 - C) Het elimineren van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen in de waterstofproductie
 - D) Het verbeteren van de katalysatorefficiëntie in de elektrolyse

6) Wat is GEEN technische uitdaging bij de implementatie van waterstoftechnologie in energienetwerken?

- A) Ontwikkeling van geavanceerde elektrolysetechnieken
- B) Het ontwerp van geurtoevoeging voor lekdetectie
- C) Uitbouw van infrastructuur voor efficiënte distributie
- D) Het waarborgen van veiligheid bij transport en opslag

7) Bij welke kritieke temperatuur moet waterstof worden gehouden voor vloeibare opslag?

- A) Boven 0 °C
- B) Onder -100 °C
- C) Precies -239,96 °C
- D) Rond 20 K per uur

8) Welk element is geen onderdeel van de "CHON"-elementen, essentieel voor het leven zoals wij dat kennen?

- A) Zuurstof
- B) Waterstof
- C) Lood
- D) Stikstof

9) Wie was de eerste wetenschapper die aantoonde dat waterstof een apart chemisch element is?

- A) Dmitri Mendelejev
- B) John Dalton
- C) Henry Cavendish
- D) Joseph Priestley

10) Welke isotoop van waterstof is zowel een bijproduct van kernreacties als radioactief met een relatief korte halfwaardetijd?

- A) Protium
- B) Deuterium
- C) Tritium
- D) Radon

1.6.1 ANTWOORDEN: (FOR EXAMINING QUIZ RESPONSES)

1B) Het maakt de lange-termijnopslag van hernieuwbare energie mogelijk.

2D) Aardgas

3C) Door de uitstoot van CO₂ tijdens de productie te vangen en op te slaan

4B) Kerncentrales

5C) Het elimineren van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen in de waterstofproductie

6B) Het ontwerp van geurtoevoeging voor lekdetectie

7C) Precies -239,at is het primaire mechanisme waardoor waterstof de energietransitie kan ondersteunen?

8 C) Lood

9C) Henry Cavendish

10C) Tritium

2 WATERSTOFPRODUCTIE UIT FOSSIELE BRANDSTOFFEN

2.1 Doelstellingen:

- Waterstof definiëren als een energiedrager;
- De verschillen erkennen tussen stoom-methaan-reforming en gedeeltelijke oxidatietechnologieën voor het verkrijgen van waterstof
- Om het proces van waterstofwinning uit raffinaderijgas te beschrijven
- Om andere technologieën voor het verkrijgen van waterstof uit raffinaderijgas te noemen.

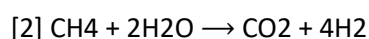
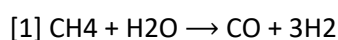
2.2 TREFWOORDEN:

Energiedrager, stoom-methaan-reforming gedeeltelijke oxidatie, cryogene scheiding, absorptie, diffusie, plasma-reforming.

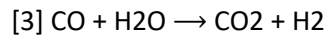
Waterstof is geen traditionele brandstof; het is een energiedrager. Praktisch gezien betekent dit dat waterstof niet vrij te winnen is en energetisch veeleisend is omdat het niet in zijn zuivere vorm op onze planeet voorkomt. Daarom moet het worden geproduceerd met behulp van een grote hoeveelheid energie, die daarentegen koolstofvrij kan worden gewonnen uit hernieuwbare bronnen. Maar helaas wordt het voornamelijk geproduceerd met behulp van fossiele brandstoffen die het broeikas-effect veroorzaken. De meest gebruikelijke manier om waterstof te produceren is stoomreformatie, gedeeltelijke oxidatie en vergassing van steenkool. Bij deze processen worden steenkool, olie, aardgas en methaan gebruikt. Secundaire producten zijn CO en CO₂.

2.3 STOOM-METHAAN-REFORMING

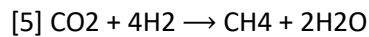
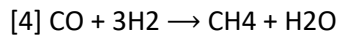
Tijdens de stoom-methaan-reforming reageert koolwaterstof (bijvoorbeeld methaan) met waterstof in de katalysator. Het product van dit proces is koolmonoxide, waterstof [1] en in de reststroom kooldioxide [2]. Als de gebruikte bron een zwavelverbinding bevat, is ontzwaveling noodzakelijk.



Er wordt een druk van 3-5 MPa en temperaturen tussen 750 en 800 °C toegepast. Als katalysator wordt nikkeloxide gebruikt. De verhouding van stoom is 3:1 om afzetting van koolstof in de katalysator te voorkomen. 9 Geproduceerde koolmonoxide ondergaat een water-gasverschuiving, en er ontstaat meer kooldioxide en waterstof. Deze reactie is exotherm en verloopt in twee fasen. In de eerste fase worden ijzeroxide en chroomoxide als katalysator gebruikt. Dit is een minder reactieve katalysator en is bestand tegen onzuiverheden. De ingangstemperatuur van de reactor is 380°C en de uitgangstemperatuur is 500°C. In de tweede fase van het proces worden veel lagere temperaturen gebruikt (180 - 230°C). Dit is mogelijk door het gebruik van een zeer reactieve koperkatalysator. Hierdoor wordt de concentratie koolmonoxide verlaagd tot 0,2 - 0,3%.



De voor hydrogenatie gebruikte waterstof kan geen zuurstofverbindingen (CO en CO₂) bevatten en moet weer worden omgezet in methaan [4,5]. Dit proces vindt plaats in een methaneringsreactor bij een temperatuur van ongeveer 400°C. Als de hoeveelheid CO en CO₂ in het ruwe gas groter is dan 3%, moet het gas worden afgekoeld, aangezien beide reacties exotherm zijn.



Figuur 1 toont een vereenvoudigd schema van stoom-methaan-reforming met behulp van aardgas. Verwarmd aardgas wordt na ontzwaveling gemengd met stoom in een reformer waar de reacties [1] en [2] plaatsvinden. Eerst gaan de producten door een tot 750°C verwitte reformer en vervolgens naar een shiftreactor waar ze worden afgekoeld tot 360°C. De volgende twee stadia zijn hoge-temperatuur- en lage-temperatuur-shiftreactoren, waar CO wordt omgezet in CO₂ [3]. De gassen worden vervolgens naar de absorber geleid, waar met behulp van ethanolamine of andere middelen CO₂ wordt geabsorbeerd. Ten slotte worden de resterende CO en CO₂ in een methaneringsreactor omgezet in methaan [4,5]. Op deze manier wordt waterstof met een zuiverheidsgraad van 98% geproduceerd, en de resterende 2% bestaat voornamelijk uit methaan.

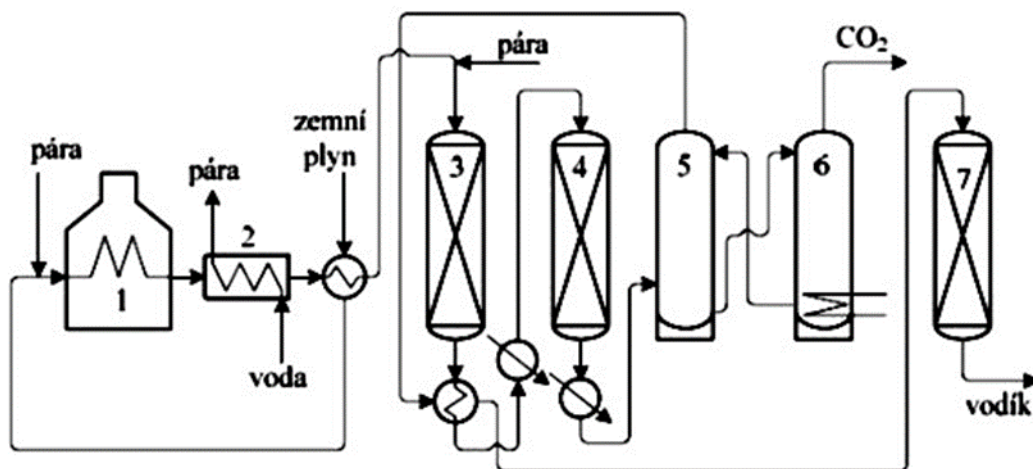
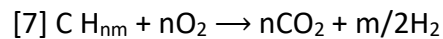
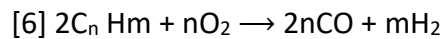


Fig. 1: Schema stoom-methaan-reforming met aardgas

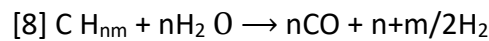
De efficiëntie van stoommethaanreforming varieert tussen de 70% en 85%, wat grotendeels afhangt van de zuiverheidsgraad van de geproduceerde waterstof en de stoom-tot-koolstof ratio. Bij dit proces vrijkomend koolstofdioxide kan ofwel direct in de atmosfeer worden uitgestoten, of het wordt gezuiverd en vervolgens in vloeibare vorm opgeslagen of omgezet in droogijs voor gebruik in koeltoepassingen binnen de voedingsindustrie.

2.3.1 GEDEELTELIJKE OXIDATIE

Gedeeltelijke oxidatie is heel gebruikelijk bij de productie van waterstof: er wordt gebruik gemaakt van gas en vloeibare materialen uit de primaire en secundaire olieverwerking. Vaak worden residufracties van zware olie vergast (vacuümresiduen, propaanafalt en andere). Het vergassingsproces maakt gebruik van zuurstof en stoom bij 1300-1500 C en 3-8 MPa. Een beperkte hoeveelheid zuurstof maakt gedeeltelijke oxidatie mogelijk. De gedeeltelijke oxidatie van koolwaterstofbronnen (C_nH_m) maakt deels gebruik van reacties [6] en deels van [7]. Het product van de reactie is kooldioxide, koolmonoxide en waterstof. Beide reacties zijn exotherm en verhitten het mengsel tot 1500 C.



Het deel van de bronnen dat niet door oxidatie wordt vergast, wordt vergast door een endotherme reactie met behulp van stoom [8]. Stoomvergasning leidt tot een hoge waterstofwinst en tot verlaging van de procestemperaturen tot 1350 C.



Het product van gedeeltelijke oxidatie van verschillende bronnen is altijd een mengsel van CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ en zwavelverbindingen H₂S en COS. Het schadelijke bijproduct is roet.

Figuur 2 toont een vereenvoudigd schema van de gedeeltelijke oxidatie van zware olieresidu. Het verwarmde zware olieresidu wordt in een stroom van een mengsel van stoom en zuurstof gebracht. In een generator wordt het gas van 1350 C geproduceerd en aangesloten op een stoomreactor. Het gas wordt snel door de reactor verplaatst om roetafzetting te voorkomen. Het gas wordt vervolgens in de ketel afgekoeld tot boven de temperatuur van verzadigde waterstoom (ongeveer 260 C), en tegelijkertijd wordt stoom onder hoge druk van 12 MPa geproduceerd. Een deel van de stoom wordt gebruikt in het gedeeltelijke oxidatieproces (20%), en de rest gaat naar andere toepassingen. In het volgende deel van het proces wordt het generatorgas gekoeld door waterdispersie in een radiator die een deel van het roet verwijdert. Tenslotte wordt het gas volledig gezuiverd in een gaszuiveringsinstallatie.

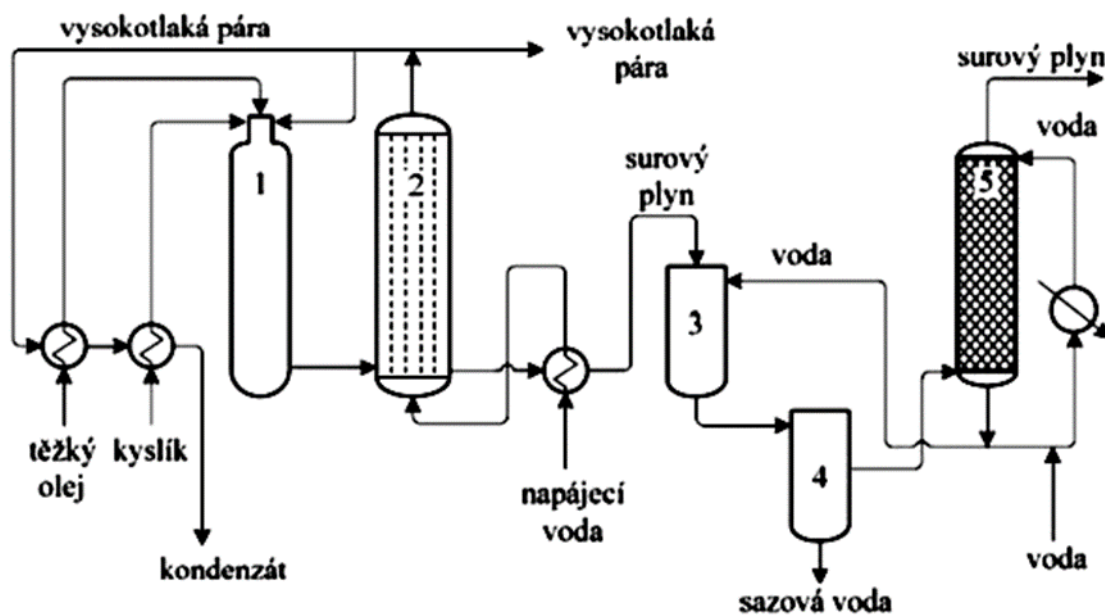


Fig. 2: Schema van de partiële oxidatie van ruwe aardolie (1 - generator, 2 - ketel, 3 - radiator, 4 - separator, 5 - zuiveraar)

Bij de productie van waterstof door gedeeltelijke oxidatie van oliefracties, een proces waarbij olie onder hoge druk en temperatuur reageert met zuurstof, worden ongewenste stoffen zoals sulfaan uit het resulterende generatorgas verwijderd. Het koolstofmonoxide (CO) in het gas wordt geoxideerd tot koolstofdioxide (CO₂), welke vervolgens ook uit het gas verwijderd wordt. Eventueel achtergebleven CO en CO₂ kunnen door het proces van methanatie omgezet worden in methaan (CH₄), een proces vergelijkbaar met de behandeling van aardgas.

De efficiëntie van waterstofproductie via gedeeltelijke oxidatie is doorgaans lager dan die van stoomreforming, met gemiddeld ongeveer 50%. Hoewel de initiële investeringskosten hoog zijn, worden deze niet meegerekend in de vergelijking van de energiebehoefte per kubieke meter geproduceerde waterstof. De operationele omstandigheden voor gedeeltelijke oxidatie vereisen hogere druk en temperatuur dan stoomreforming, wat leidt tot hogere energiebehoeften.

Vanuit milieuperspectief biedt gedeeltelijke oxidatie geen voordelen ten opzichte van stoomreforming. Het proces resulteert in de uitstoot van aanzienlijke hoeveelheden broeikasgassen.

Gezien de beperkte toepassingen voor residuen van zware olie, beperkte afzetmogelijkheden en de afnemende beschikbaarheid van fossiele brandstoffen, kan gedeeltelijke oxidatie toch potentieel bieden voor toepassingen waarin deze factoren een minder grote rol spelen.

2.4 WATERSTOFPRODUCTIE UIT RAFFINADERIJGAS

Waterstof wordt ook gewonnen uit gassen die vrijkomen bij de verwerking van olie. Tot deze processen behoren hydrokraken en hydrogeneren. Waterstof wordt gewoonlijk verdund door koolwaterstofgas, meestal methaan. De methoden die worden gebruikt om waterstof op te vangen zijn cryogene scheiding, absorptie of diffusie.

Cryogene scheiding. In de eerste stap worden zure gassen (CO₂, H₂O) en water verwijderd. De volgende stap is het afkoelen van het gas tot -150 C bij 1,4-3,5 MPa, waardoor koolwaterstofcondensatie optreedt. De zuiverheid van waterstof is ongeveer 90% van het volume. Sinds de koelfase is het een energetisch veeleisend proces dat de kosten verhoogt.

Absorptie. De ongewenste stoffen worden uit het gas verwijderd door ze op te vangen in actieve kool (CO₂, CH₄, N₂) en zeoliet moleculaire zeef (CO, CH₄, N₂). Zodra de ene absorberend vol is, wordt de gasstroom naar de tweede absorberend geleid, en de eerste regenereert door verplaatsing van koolwaterstoffen.

Diffusie. Het diffusieproces scheidt waterstof van methaan en andere gassen met behulp van semi-permeabele membranen. Het kleine molecuul waterstof diffundeert door het membraan terwijl andere gassen worden opgevangen. De membranen zijn gemaakt van palladium of een legering daarvan met zilver. Het proces vindt plaats bij 350 C en 2 MPa. ⁷

2.5 ANDERE TECHNOLOGIEËN DIE FOSSIELE BRANDSTOFFEN GEBRUIKEN

2.5.1 KOLENVERGASSING

Kolenvergassing is de oudste methode om waterstof te winnen. Steenkool wordt verhit tot 900°C; zo wordt het omgezet in cokesovengas. Het is een gas dat waterstof, methaan, oxide monoxide en een kleine hoeveelheid onverzadigde koolwaterstof bevat. Het percentage waterstof is bijna 60%. Het gas wordt gemengd met stoom en op nikkel gebaseerde katalysatoren

2.5.2 KATALYTISCHE REFORMING

Katalytische reforming is een chemisch proces waarbij katalysatoren zoals platina (Pt) en rhodium (Rh) worden ingezet om lichte, laagkokende fracties van ruwe olie om te zetten in aromatische koolwaterstoffen met een hoger kookpunt. Tijdens dit proces vinden cyclisatie en dehydrogenatie plaats, waarbij waterstof wordt geproduceerd als bijproduct.

Bij cyclisatie worden lineaire koolwaterstofketens getransformeerd in cyclische structuren, wat bijdraagt aan de verhoging van het octaangehalte van de benzine. Dehydrogenatie verwijdert waterstofatomen uit de moleculen om de vorming van aromatische verbindingen te bevorderen, welke waardevol zijn voor de petrochemische industrie en als hoogwaardige brandstofcomponenten.

⁷ BLAŽEK, Josef en Vratislav RÁBL. Základy zpracování a využití ropy. 2., přepr. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 254 s. ISBN 80-708-0619-2

Dit proces speelt een cruciale rol in de raffinage-industrie, aangezien het helpt om de kwaliteit van benzine te verbeteren en de economische waarde van olieproducten te verhogen. Het gegenereerde waterstofgas kan bovendien worden gebruikt in andere raffinageprocessen, zoals hydrocracking of als schone energiedrager.

2.6 PLASMAHERVORMING

Plasmahervorming is een innovatieve benadering van waterstofproductie waarbij gebruik wordt gemaakt van plasma-technologie. Een van de meest prominente processen in deze categorie is het Kvaerner-proces, vernoemd naar het Noorse bedrijf dat het heeft ontwikkeld. Dit proces wordt beschouwd als milieuvriendelijk door de transformatie van koolwaterstoffen in koolstof en waterstof, door het gebruik van een plasmabrander die temperaturen bereikt tussen 1600 en 2000°C. Het unieke voordeel van dit proces is dat de koolstof wordt omgezet in roet, waardoor de uitstoot van CO₂ wordt vermeden. De output van plasmahervorming bevat ongeveer 48% waterstof, 40% koolstof (als roet) en 10% oververhitte stoom. Echter, de methode is energie-intensief, met een verbruik van 2 tot 2,5 kWh per geproduceerde kubieke meter waterstof.

Doorlopende verbeteringen in technologie verhogen de efficiëntie en verminderen de energiebehoefte van deze waterstofproductiemethoden. Ondanks de voordelen blijft de uitdaging bij het gebruik van fossiele brandstoffen voor waterstofproductie de emissie van broeikasgassen. Om de impact op het klimaat te beperken, is het noodzakelijk deze gassen op te slaan, bijvoorbeeld in lege olie- en gasvelden of in ondergrondse aquifers.

Volgens een studie uit 1996 is de opslagcapaciteit voor broeikasgassen in Europa aanzienlijk, met een geschatte capaciteit van 806 miljard ton CO₂. Vooral het Noorse continentaal plat biedt met ongeveer 476 miljard ton CO₂ aan ondergrondse waterreservoirs een substantiële opslagmogelijkheid. Deze capaciteit zou theoretisch de CO₂-uitstoot van alle elektriciteitscentrales in West-Europa voor vele eeuwen kunnen opvangen.

2.7 HOOFDSTUK SAMENVATTING:

Waterstof wordt gezien als een energiedrager en moet geproduceerd worden omdat het niet vrij in de natuur voorkomt. De productie ervan is energie-intensief en kan uit hernieuwbare of fossiele bronnen komen, waarbij de laatste bijdraagt aan het broeikas-effect. De voornaamste methoden voor de productie van waterstof uit fossiele brandstoffen zijn stoom-methaan-reforming, gedeeltelijke oxidatie en vergassing van steenkool.

Stoom-methaan-reforming is een proces waarbij methaan en waterdamp reageren in aanwezigheid van een nikkeloxide katalysator, resulterend in waterstof, CO en CO₂. Dit proces vereist hoge temperaturen (750-800°C) en een druk van 3-5 MPa. De waterstof moet vrij zijn van zuurstofverbindingen en kan worden omgezet in methaan via methanatie. De efficiëntie ligt tussen de 70% en 85%.

Gedeeltelijke oxidatie wordt gebruikt voor de productie van waterstof uit gas- en vloeibare materialen van olieverwerking, met name zware oliefracties. Het vereist hoge temperaturen (1300-1500°C) en druk (3-8 MPa) en produceert een mix van CO, CO₂, waterstof en schadelijke bijproducten zoals roet.

Waterstof wordt ook gewonnen uit raffinaderijgas door middel van processen als hydrokraken en hydrogeneren, met technieken zoals cryogene scheiding, absorptie en diffusie om het te zuiveren.

Kolenvergassing is een oudere methode waarbij kolen worden omgezet in waterstofrijk gas, en katalytische reforming maakt gebruik van platina en rhodium om lichte oliefracties om te zetten in aromatische koolwaterstoffen en waterstof.

Plasmahervorming, zoals het Kvaerner-proces, is een milieuvriendelijkere optie die koolwaterstoffen omzet in koolstof (roet) en waterstof met hoge energie-input.

Ondanks technologische verbeteringen blijft de uitstoot van broeikasgassen een probleem bij het gebruik van fossiele brandstoffen voor waterstofproductie. Opslag van CO₂ in bijvoorbeeld lege olie- en gasvelden of ondergrondse aquifers is noodzakelijk om de milieu-impact te minimaliseren. Europa heeft een aanzienlijke opslagcapaciteit voor CO₂, met name in het Noorse continentaal plat.

2.8 VRAGEN

- 1) Wat is de primaire rol van waterstof in de energiecontext?
 - A. Een traditionele brandstof
 - B. Een energiedrager
 - C. Een energiebron
 - D. Een katalysator

- 2) Welk proces wordt het meest gebruikt voor het produceren van waterstof?
 - A. Stoom-methaan-reforming
 - B. Gedeeltelijke oxidatie
 - C. Vergassing van steenkool
 - D. Alle bovengenoemde

- 3) Wat is het primaire product van stoom-methaan-reforming?
 - A. Methaan
 - B. Waterstof
 - C. Koolstofdioxide
 - D. Waterstoom

- 4) Welke katalysator wordt gebruikt in stoom-methaan-reforming?
 - A. Platina
 - B. Rhodium
 - C. Nikkeloxide
 - D. Ijzeroxide

- 5) Wat is het doel van de water-gasverschuiving in het stoom-methaan-reforming proces?
 - A. Om methaan te produceren
 - B. Om koolmonoxide om te zetten in waterstof en kooldioxide
 - C. Om water te splitsen
 - D. Om stoom te genereren

- 6) Welke technologie gebruikt cryogene scheiding voor waterstofwinning?
- A. Stoom-methaan-reforming
 - B. Gedeeltelijke oxidatie
 - C. Waterstofproductie uit raffinaderijgas
 - D. Plasmahervorming
- 7) Wat is de efficiëntie van stoommethaanreforming?
- A. 50-60%
 - B. 70-85%
 - C. 90-95%
 - D. 100%
- 8) Welk proces genereert waterstof door het verhitten van steenkool tot 900°C?
- A. Katalytische reforming
 - B. Kolenvergassing
 - C. Plasma-hervorming
 - D. Gedeeltelijke oxidatie
- 9) Wat is de primaire milieuoverweging bij de productie van waterstof uit fossiele brandstoffen?
- A. Emissie van broeikasgassen
 - B. Watervervuiling
 - C. Bodemerosie
 - D. Luchtvervuiling
- 10) Hoeveel CO₂-opslagcapaciteit wordt geschat aanwezig te zijn in Europa?
- A. 306 miljard ton
 - B. 806 miljard ton
 - C. 1006 miljard ton
 - D. 1606 miljard ton

2.8.1 Antwoorden (FOR EXAMINING QUIZ RESPONSES)

B. Een energiedrager

D. Alle bovengenoemde

B. Waterstof

C. Nikkeloxide

B. Om koolmonoxide om te zetten in waterstof en kooldioxide

C. Waterstofproductie uit raffinaderijgas

B. 70-85%

B. Kolenvergassing

A. Emissie van broeikasgassen

B. 806 miljard ton

3 WATERSTOFPRODUCTIE UIT HERNIEUWBARE BRONNEN

3.1 DOELSTELLINGEN:

- Om het principe van waterelektrolyse te definiëren;
- Om het verschil te beschrijven tussen elektrolyse van alkalisch water, elektrolyse bij hoge temperatuur en thermochemische watersplitsing;
- Om andere alternatieve technologieën voor waterstofproductie te noemen;
- Het principe van waterstofproductie met behulp van biotechnologische processen uitleggen.

3.1.1 TREFWOORDEN:

Waterelektrolyse, elektrolyse bij hoge temperatuur, Westinghouse zwavelcyclus, waterstofcentrale op zonne-energie, plasstroom, biomassa, fotolyse, fermentatie, donkere fermentatie

Meer dan 70% van het aardoppervlak is bedekt met water. Het massapercentage waterstof in water is 11,2%. Zoals gezegd bindt waterstof zich bij verbranding aan zuurstof en ontstaat er water. Daarom wordt waterstof beschouwd als een hernieuwbare energiebron.

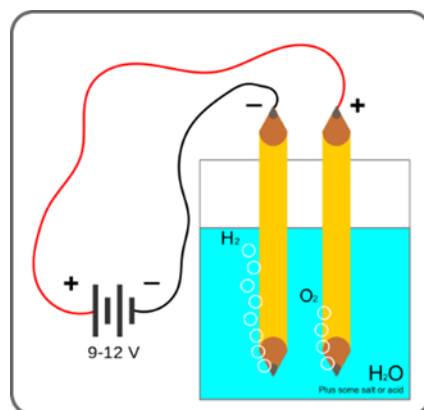
3.2 ELEKTROLYSE VAN WATER

Tijdens waterstofproductie door middel van elektrolyse wordt water (H₂O) gescheiden in de componenten waterstof (H₂) en zuurstof (O₂). Dit wordt bereikt door het toepassen van directe elektrische stroom op een waterige oplossing, waardoor de moleculaire bindingen tussen waterstof en zuurstof worden verbroken. Aan de anode vindt de reactie plaats die zuurstof produceert, terwijl aan de kathode waterstofgas wordt gegenereerd volgens de volgende reactievergelijking:



Het aan de kathode geproduceerde waterstofgas wordt verzameld en opgeslagen. Dit proces kan uitgevoerd worden bij omgevingstemperatuur en vereist enkel elektriciteit, waardoor het een efficiënte methode is die zeer zuiver waterstofgas levert zonder nood aan additionele zuivering.

Deze techniek is daarom uiterst geschikt voor toepassingen waarbij een hoge zuiverheid van waterstof en zuurstof vereist is. De toestellen die gebruikt worden voor elektrolyse worden elektrolyzers genoemd. Deze bestaan uit een vat, elektroden en een elektrolyt. De efficiëntie van waterstofproductie via elektrolyse varieert doorgaans tussen 80 en 92%, en kan verder verhoogd worden door toevoeging van een elektrolyt die de watergeleidbaarheid verbetert. Ondanks de hoge efficiëntie van het proces, wordt elektrolyse vaak beperkt door de hoge energiekosten die ermee gepaard gaan.



De algemene efficiëntie van elektrolyse is afhankelijk van de efficiëntie waarmee elektriciteit wordt geproduceerd. Met de huidige technologie ligt de efficiëntie van elektriciteitsproductie tussen 30-40%, wat betekent dat het totale rendement van elektrolyse tussen 25-35% ligt. Elektrolyse is energetisch intensief en vereist ongeveer 5,2 kWh om 1 m³ waterstof te produceren, equivalent aan 57 kWh per kilogram waterstof.

Desondanks biedt elektrolyse een veelbelovende route naar koolstofneutrale waterstofproductie, vooral als het wordt gekoppeld aan hernieuwbare energiebronnen. Naarmate de efficiëntie van energieopwekking uit hernieuwbare bronnen verbetert en de kosten van elektriciteit dalen, zal elektrolyse naar verwachting een steeds belangrijkere rol spelen in de transitie naar een duurzame energievoorziening.

3.2.1 ELEKTROLYSE VAN ALKALISCH WATER

Zure of Alkalische oplossingen worden gebruikt om water te splitsen. Een alkalische elektrolyt is ideaal om corrosie te voorkomen die optreedt bij het gebruik van zuren. Vaak wordt hoog geconcentreerd kaliumhydroxide (KOH 25-30%) gebruikt. Een groot contactoppervlak tussen elektroden en elektrolyten is nodig voor het juiste proces. Het eindproduct wordt dan gescheiden van de elektroden. Voor kathoden wordt koolstofarm staal gebruikt, soms bedekt met een dunne laag nikkel. Anoden worden gemaakt van vernikkeld koolstofarm staal of nikkelstaal. Als katalysator wordt zelden platina gebruikt. Een membraan scheidt de elektroden om een reactie tussen geproduceerde waterstof en zuurstof te voorkomen. Vroeger was het membraan gemaakt van asbest, maar vanwege de risico's voor onze gezondheid werd het verboden en werden nieuwe materialen getest.

3.2.2 POLYMEER ELEKTROLYTISCH MEMBRAAN ELEKTROLYSE

Bij polymeerelektrolyse wordt het protonuitwisselingsmembraan (PEM) gebruikt om het. Water wordt in contact gebracht met een bipolaire plaat; het circuleert naar de anode, waar het wordt gesplitst in zuurstof. De geproduceerde protonen worden door de PEM naar de kathode getransporteerd. De elektronen verlaten de anode via het externe stroomcircuit, dat de drijvende kracht van de reactie levert (celspanning). Aan de kathodezijde recombineren de protonen en elektronen tot waterstof. PEM scheidt de geproduceerde gassen af, en de elektroden staan in direct contact met PEM om ongewenste reacties te voorkomen. De elektroden zijn gemaakt van platina, en van hun legeringen; zij moeten bestand zijn tegen zuren, aangezien PEM dezelfde eigenschappen heeft als een agressief zuur.

3.2.3 ELEKTROLYSE BIJ HOGE TEMPERATUUR (HTE)

Elektrolyse bij hoge temperatuur (High-Temperature Electrolysis, HTE), ook bekend als stomelektrolyse, is een geavanceerde vorm van waterstofproductie. Dit proces is vergelijkbaar met traditionele waterelektrolyse maar onderscheidt zich door de combinatie van elektrische energie en warmte-energie om het rendement te verhogen. In de HTE-procedure wordt een mengsel van water en stoom ingevoerd in de elektrolyser, wat resulteert in een waterstofrijke gasstroom (typisch 75% waterstof en 25% stoom).

In de condensatie-eenheid worden de waterstof en stoom gescheiden. De chemische reacties binnen de HTE zijn in principe het omgekeerde van die in Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs). De bedrijfstemperaturen voor dit proces variëren tussen de 600 en 1.000°C. Een belangrijk kenmerk van HTE is dat water eerst wordt omgezet in stoom met behulp van warmte - bijvoorbeeld uit nucleaire thermische energie - en niet louter door elektriciteit. Daarna vindt dissociatie plaats bij de kathode, waar waterstofmoleculen worden geproduceerd en zuurstofionen door het solide oxide elektrolyt materiaal migreren om bij de anode zuurstofmoleculen te vormen.

Het totale rendement van HTE kan oplopen tot 45-50%, wat hoger is dan dat van traditionele elektrolysemethoden. Dit komt omdat de noodzaak voor elektriciteit afneemt naarmate de temperatuur van de toegevoerde stoom toeneemt. HTE wordt beschouwd als een milieuvriendelijke technologie voor de productie van waterstof en staat sterk in de belangstelling voor verdere ontwikkeling, met name voor grootschalige toepassingen. Kernenergie wordt vaak als een geschikte warmtebron beschouwd vanwege de hoge energiedichtheid en de mogelijkheid om stabiele energie te leveren die nodig is voor de hoge temperaturen in HTE-processen.^{8 9}

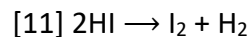
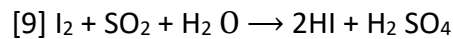
⁸ <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/high-temperature-steam-electrolysis> 17.08.2022 [online]

⁹ *Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku* [online]. Beschikbaar op http://technet.idnes.cz/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-autaielektronikup6d/tec_tecnika.aspx?c=A080127_234744_tec_tecnika_vse

3.2.4 THERMOCHEMISCHE WATERSPLITSING

Bij thermochemische watersplitsing wordt water door middel van chemische reacties gescheiden in zuurstof en waterstof. Deze reacties worden in gang gezet door warmte of door een combinatie van warmte en elektrische energie met behulp van hybride cycli. Voor dit proces zijn alleen een bron van water en warmte nodig, aangezien de rest van de chemische stoffen wordt hergebruikt. De eindproducten zijn waterstof en zuurstof.

Een van de cycli is de thermochemische zwavel-jodiumcyclus. Het is een goedkope en efficiënte methode om waterstof te produceren met behulp van kernenergie. De eerste stap van het proces is de reactie van water met jodium en zwaveldioxide [9]. De resultaten van deze reactie zijn zwavelzuur en waterstofjodium. De volgende stap is de endotherme ontleding van zwavelzuur en waterstofjodium [10 en 11], waarvoor hoge temperaturen nodig zijn (respectievelijk 800 - 1200°C en 450°C).



Het rendement van een dergelijk complex proces is moeilijk vast te stellen. In het algemeen varieert het tussen 40 en 52% (50% bij 950°C). Een hogere temperatuur betekent een hoger rendement van de cyclus. In vergelijking met elektrolyse wordt het energieverlies tijdens de productie van elektrische energie geëlimineerd. Nadelen zijn de hoge temperaturen en agressieve chemicaliën zoals zwavelzuur en waterstofzuur. Daarom moeten de containers worden gemaakt van - materialen met een hoge weerstand tegen deze chemicaliën. Net als bij elektrolyse wordt bij de thermochemische splitsing theoretisch geen afval geproduceerd. Een bepaalde hoeveelheid chemische verbindingen gaat echter verloren tijdens dit proces en moet regelmatig worden bijgevuld. Dit technologietraject op lange termijn heeft potentieel weinig of geen broeikasgasemissies, hoewel de procesbeheersing bij massaproductie een uitdaging blijft om deze technologie te vertalen naar de industrie.

3.2.5 FOTO-ELEKTROLYSE VAN WATER

Foto-elektrolyse van water is een methode waarbij waterstof wordt geproduceerd uit water met behulp van zonlicht. In dit proces worden halfgeleiders gebruikt, die vergelijkbaar zijn met de materialen in zonnecellen, om zonne-energie direct te converteren naar chemische energie om water te splitsen in waterstof en zuurstof.

In het hart van een zonnecel vind je een structuur die bekend staat als een p-n-overgang, wat simpelweg een verbinding is tussen twee soorten halfgeleidermaterialen. Deze twee soorten zijn 'p-type', dat over extra positieve ladingen (gaten) beschikt, en 'n-type', dat extra negatieve ladingen (elektronen) heeft. Wanneer zonlicht op de cel valt, worden elektronen en gaten gegenereerd. Zonder extern circuit zouden deze ladingen in de cel blijven en neutraliseren ze elkaar uiteindelijk.

Bij foto-elektrolyse dompelen we de halfgeleider in water dat een elektrolyt bevat. Als zonlicht de halfgeleider raakt, creëert het elektrische ladingen die niet in een extern circuit worden geleid, maar worden gebruikt om water direct te splitsen in zijn samenstellende elementen: waterstof aan de negatieve zijde (kathode) en zuurstof aan de positieve zijde (anode).

Deze methode heeft veel aandacht omdat het de potentie heeft om schone en hernieuwbare energie op te wekken zonder dat er verbranding of fossiele brandstoffen aan te pas komen. Het gebruik van zonne-energie maakt het een aantrekkelijke optie voor duurzame waterstofproductie, hoewel de technologie nog in ontwikkeling is en verbeterd moet worden qua efficiëntie en kosten voordat het op grote schaal kan worden toegepast.^{15, 10, 11}

¹¹ HADRAVA, Jan, Roman VOKATÝ, HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby. *Paliva* [online]. 2013, roč. 5, č. 3, 79 - 83. Beschikbaar op> <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=95>

3.3 ANDERE TECHNOLOGIEËN

3.3.1 WESTINGHOUSE ZWAVELCYCLUS

De Westinghouse-zwavelcyclus, oorspronkelijk ontwikkeld in 1975 door Westinghouse, is een geavanceerd hybride thermochemisch proces dat zwavelzuur als belangrijkste chemische tussenstof gebruikt. In dit proces is de primaire input water en zwaveldioxide, die door middel van elektrochemische reacties worden omgezet in waterstof en zwavelzuur. In een vervolgstap wordt het gevormde zwavelzuur afgebroken tot zuurstof en zwaveldioxide, wat opnieuw ingezet kan worden in het begin van de cyclus.

Dit proces onderscheidt zich door zijn relatieve eenvoud en een efficiëntie van rond de 40%. Een significante sterkte van dit systeem is dat het een aanzienlijk lagere behoefte aan elektriciteit heeft, tot wel drie- tot viermaal minder dan dat nodig is voor conventionele water elektrolyse. Echter, een uitdaging bij de Westinghouse-zwavelcyclus is de corrosieve aard van zwavelzuur, wat eisen stelt aan de gebruikte materialen en systemen om de chemische reacties te huisvesten en beheersen.

De ontwikkeling van dergelijke cycli speelt een belangrijke rol in de zoektocht naar efficiëntere en kosteneffectievere methoden voor waterstofproductie, met als doel de transitie naar een duurzamere energie-economie te versnellen. De continue verbeteringen in materialen die bestand zijn tegen corrosie en de optimalisatie van procescondities zijn daarom essentieel voor de toekomstige implementatie van de Westinghouse-zwavelcyclus op commerciële schaal

3.3.1.1 WATERSTOFCENTRALE OP ZONNE-ENERGIE

Het onderzoek van SolarLab is gericht op zonne-energie. Het door dit bedrijf ontwikkelde concept voor een waterstofcentrale werkt volgens een eenvoudig principe. Zonnepanelen zullen offshore worden geplaatst, en het rendement van de waterstofproductie kan tot 30% worden verhoogd door de koelende eigenschappen van zeewater. De elektrische energie van de zonnepanelen wordt vervolgens gebruikt voor waterelektrolyse. De waterstof zal worden opgeslagen in tanks op de zeebodem, waardoor het explosiegevaar verdwijnt, en via een pijpleiding naar de kust worden gedistribueerd, waardoor een relatief veilig en goedkoop waterstofproductieproces ontstaat.¹²

3.3.1.2 PEE POWER

Gerardine Botte, hoogleraar chemische en biomoleculaire techniek aan de Universiteit van Ohio, heeft een technologie ontwikkeld om waterstofbrandstof te genereren uit urine. Urine bevat twee verbindingen die een bron van waterstof zouden kunnen zijn: ammoniak en ureum. De technologie is gebaseerd op de principes van waterelektrolyse met een verschil in energiebehoefte aangezien de waterstofbinding in ammoniak en ureum zwakker is dan in water. De technologie van Botte heeft een zeker potentieel in omgevingen waar grote aantallen mensen samenkomen, zoals luchthavens en sportstadions. Zij kan ook worden gebruikt bij de aanpak van milieuvervuiling die samenhangt met

¹² HORČÍK, J. *Výroba vodíku s pomocí solárních elektráren* [online]. Ekologické bydlení. Beschikbaar op: <http://www.ekobydleni.eu/energie/vyroba-vodiku-s-pomocisolarnich-elektaren>

grote veehouderijen. Volgens professor Botte kan de urine van duizend koeien 40-50 kW energie opwekken en kan schadelijke ammoniak door het proces worden geëlimineerd.¹³

3.3.2 BIOLOGISCHE PRODUCTIE VAN WATERSTOF

Biomassa behoort tot de meest veelbelovende hernieuwbare hulpbronnen. Het energetisch gebruik ervan, met inbegrip van de productie van waterstof, is veelzijdig. Het gehalte ervan in biomassa (6-6,5% massafractie) is lager dan dat van aardgas (25% massafractie), maar gelijk aan het waterstofgehalte in steenkool (5% massafractie).

3.3.3 DROGE BIOMASSA

Droge biomassa is een benaming voor houten of droog plantaardig afval. Het kan verder worden verwerkt door verbranding en vergassing.

3.3.4 THERMOCHEMISCHE PROCESSEN

Thermochemische processen omvatten stoomreformatie van biomassa. Dit proces in twee stappen bestaat uit pyrolyse, waarbij gasproducten ontstaan (methaan, waterstof, koolmonoxide) en de tweede stap waarbij hoge temperaturen (600°-1.000°C) worden gebruikt. Tijdens de tweede stap vindt een reeks chemische reacties plaats, waarbij de resterende vaste stoffen en methaan worden omgezet in waterstof en kooldioxide met behulp van waterstammen en de totale opbrengst aan waterstof verder wordt verhoogd door kooldioxide om te zetten in waterstof en koolmonoxide. De in het proces gebruikte chemicaliën kunnen binnen elke cyclus opnieuw worden gebruikt, waardoor een gesloten kringloop ontstaat die alleen water verbruikt en waterstof en zuurstof produceert. Materialen die door deze methode kunnen worden verwerkt variëren van algemeen afval, afval van de voedselindustrie, landbouwafval tot steenkool. Het proces kan dan variëren op basis van de gebruikte grondstoffen, de temperatuur of het type katalysator.

3.3.5 BIOMASSA MET EEN HOOG VOCHTGEHALTE

Vergeleken met droge biomassa is biomassa met een hoog vochtgehalte om economische redenen ongeschikt voor traditionele thermochemische processen. In plaats daarvan ondergaat zij biotechnologische processen die worden gekatalyseerd door micro-organismen in een wateromgeving bij lage temperatuur en druk. Deze biologische processen maken gewoonlijk gebruik van algen of anaërobe bacteriën die voorkomen in een omgeving zonder atmosferische zuurstof. Het effect van micro-organismen verschilt dan afhankelijk van de gebruikte grondstof en procesomstandigheden.

Een overzicht van de meest gebruikelijke methoden voor waterstofproductie met behulp van biotechnologische processen:

¹³ DeWEERDT, S. *Peep power could fuel hydrogen cars* [online]. Conservation Magazine. Beschikbaar op: <http://www.guardian.co.uk/environment/2011/mar/09/peepower-brandstof-waterstof-urine>

3.3.6 DIRECTE FOTOLYSE

Directe fotolyse vertegenwoordigt een proces waarbij zonne-energie wordt aangewend voor de splitsing van water in waterstof en zuurstof, met behulp van door micro-organismen geproduceerde enzymen. Dit systeem maakt vooral gebruik van microalgen die zijn aangepast aan fotosynthetische processen om lichtenergie te vangen en deze om te zetten in de chemische energie vereist voor de splitsing van watermoleculen. Cruciaal is dat deze reacties plaatsvinden onder strikt anaërobe condities, waarbij het zuurstofgehalte beperkt blijft tot maximaal 0,1%. Dit komt doordat de betrokken enzymen extreem gevoelig zijn voor oxidatie door vrije zuurstof.

Het eenvoudige substraat voor directe fotolyse is water, wat overvloedig en makkelijk verkrijgbaar is. Echter, het huidige rendement van dit proces is bescheiden, rond de 5%, hoewel dit met geoptimaliseerde laboratoriumcondities kan worden verbeterd tot ongeveer 15%. Om de efficiëntie te verhogen, kan indirecte fotolyse worden overwogen. Dit is een meer gelaagd proces dat bestaat uit meerdere stadia, waaronder de productie van biomassa via fotosynthese, de concentratie ervan, gevolgd door anaërobe fermentatie en de transformatie van acetaten. Bij de indirecte methode zijn cyanobacteriën, die aangepast zijn voor fotosynthese, een integraal onderdeel van het proces.

Directe fotolyse blijft een onderzoeksgebied met potentieel voor innovatie, met name in de ontwikkeling van efficiëntere en stabielere enzymatische systemen en de optimalisatie van de leefomstandigheden voor de microalgen. Deze vooruitgangen kunnen bijdragen aan de haalbaarheid van directe fotolyse als een duurzame technologie voor de toekomstige productie van waterstof.

3.3.7 GISTING

Fermentatie is een biochemisch proces waarbij micro-organismen en hun enzymen organische moleculen afbreken tot eenvoudigere verbindingen, waardoor ze energie vrijmaken. Bij fermentatie worden koolhydraten zoals glucose, vaak afkomstig van aardappelen of suikerriet, getransformeerd tot kleinere moleculen zoals ethanol en kooldioxide. Dit proces vindt plaats zonder de aanwezigheid van zuurstof (anaëroob) en wordt gebruikt in zowel de voedingsindustrie voor de productie van alcoholische dranken als in de energie-industrie voor de productie van biobrandstoffen.

Er zijn voornamelijk twee categorieën van fermentatie relevant voor waterstofproductie:

1. Waterstoffermantatie, ook bekend als donkere fermentatie: In dit proces breken bacteriën organisch materiaal af tot waterstof en andere bijproducten zoals organische zuren. Deze vorm van fermentatie is niet afhankelijk van lichtenergie en kan continu plaatsvinden, zolang er voldoende substraat aanwezig is.
2. Fotofermentatie: Bij deze methode gebruiken fotosynthetische bacteriën lichtenergie om organische zuren, geproduceerd door donkere fermentatie, verder af te breken tot waterstof. Fotofermentatie is een aanvulling op de donkere fermentatie omdat het de mogelijkheid biedt om een hoger rendement van waterstofproductie uit organisch materiaal te halen.

Voor de toepassing van deze fermentatieprocessen in de waterstofproductie is het essentieel dat ze geoptimaliseerd worden om een hoge efficiëntie en rendement te bereiken. Dit kan onder meer door het selecteren van de juiste micro-organismen, het verbeteren van de procescondities en het ontwikkelen van geavanceerde bioreactoren. Fermentatie biedt een duurzaam alternatief voor fossiele brandstoffen en speelt een belangrijke rol in de overgang naar een meer circulaire en biogebaseerde economie.

3.3.8 DONKERE GISTING

Donkere fermentatie is een biochemisch proces dat plaatsvindt in de afwezigheid van licht, waarbij bepaalde micro-organismen, zoals obligate en facultatieve anaeroben, organische verbindingen afbreken om energie en waterstofgas (H₂) te produceren. Tijdens dit proces wordt de energie opgeslagen in de vorm van ATP (adenosinetriphosfaat), en de overgebleven elektronen worden gebruikt voor de productie van waterstofgas via protonreductie.

De algemene chemische omzetting bij de afbraak van glucose tijdens donkere fermentatie kan als volgt worden samengevat:



Deze vergelijking laat zien dat uit één mol glucose maximaal vier mol waterstof kan worden verkregen, en er komt een bepaalde hoeveelheid energie vrij, namelijk 206 kJ/mol. Daarnaast worden twee mol azijnzuur (CH₃COOH, acetaat) geproduceerd, die potentieel verder kunnen worden gefermenteerd om extra waterstof te produceren.

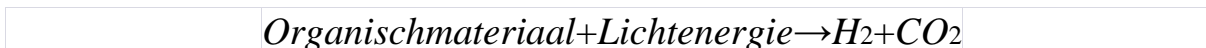
Donkere fermentatie is veelbelovend voor de duurzame productie van bio-energie, omdat het gebruikmaakt van organisch afval en bijproducten. Echter, de efficiëntie en opbrengst van het proces zijn afhankelijk van diverse factoren zoals het type en de concentratie van het organisch substraat, de fermentatieomstandigheden, en de specifieke soorten micro-organismen die worden ingezet. De uitdagingen bij het optimaliseren van dit proces omvatten het minimaliseren van de productie van ongewenste bijproducten en het maximaliseren van de waterstofproductie. Door onderzoek en ontwikkeling wordt er voortdurend gewerkt aan het verbeteren van deze processen voor de productie van schone energie.

$$\Delta H_r^0 = -206 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

3.3.9 FOTOFERMENTATIE

Fotofermentatie is een biologisch proces waarbij bepaalde bacteriën, zoals paarse niet-zwavelhoudende bacteriën, lichtenergie benutten om organische materialen om te zetten in waterstof en kooldioxide (CO₂). Deze bacteriën kunnen eenvoudige organische zuren en alcoholen verwerken in een omgeving zonder zuurstof (anaëroob). Dit proces onderscheidt zich van donkere fermentatie doordat het lichtenergie gebruikt als een drijvende kracht voor de biochemische reacties.

Het basismechanisme van fotofermentatie kan als volgt worden weergegeven:



Een van de sterke punten van fotofermentatie is de flexibiliteit van bacteriën om hun metabolisme aan te passen aan verschillende omgevingsomstandigheden, waardoor ze in diverse ecosystemen kunnen functioneren.

De integratie van donkere fermentatie en fotofermentatie kan de algehele efficiëntie en economische haalbaarheid van de waterstofproductie verhogen. Zo kan bijvoorbeeld het bijproduct acetaat van donkere fermentatie worden ingezet als input voor fotofermentatie.

De gecombineerde aanpak, vaak aangeduid als een tweestapsfermentatieproces, biedt meerdere voordelen:

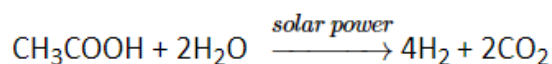
1. Verhoging van de totale waterstofopbrengst.
2. Verbeterde verwerking van organische reststromen.
3. Potentieel voor hogere economische rendementen door waarde toe te voegen aan bijproducten.

Hoewel het individuele rendement van fotofermentatie laag kan zijn (rond de 10%), kan dit door combinatie met andere processen oplopen tot wel 40%. De energie-eisen voor het proces kunnen variëren, afhankelijk van de temperatuur die nodig is om de substraten voor te bereiden en te verwerken.

Het emissieprofiel van fermentatieprocessen is over het algemeen laag, met minimale uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) en koolmonoxide (CO), die geen noemenswaardige milieu-impact zouden moeten hebben.

De potentie van fotofermentatie als technologie wordt verder versterkt door lopend onderzoek naar genetische modificatie, wat de efficiëntie van de gebruikte micro-organismen kan verhogen. Daarnaast biedt fermentatie significante voordelen voor afvalbeheer, wat steeds belangrijker wordt naarmate de wereldwijde afvalproductie blijft stijgen.

Het proces wordt beschreven door de volgende vergelijking: ^{14, 15}



3.4 HOOFDSTUK SAMENVATTING:

Dit hoofdstuk behandelt diverse methoden voor de productie van waterstof uit hernieuwbare bronnen, met de focus op het proces van elektrolyse en alternatieve technologieën.

1. Waterelektrolyse splitst water in waterstof en zuurstof met een rendement van 80-92%, maar vereist veel energie.
2. Alkalische elektrolyse gebruikt een alkalische oplossing en specifieke materialen om corrosie te voorkomen en gasen te scheiden.
3. PEM-elektrolyse maakt gebruik van een protonuitwisselingsmembraan en edele metalen voor elektroden, efficiënt bij waterstofproductie.
4. HTE elektrolyse combineert elektriciteit en warmte (600-1000°C) om het rendement te verhogen tot 45-50%.
5. Thermochemische watersplitsing gebruikt hitte-geïnduceerde chemische reacties, met de zwavel-jodiumcyclus als voorbeeld, en heeft rendementen van 40-52%.
6. Foto-elektrolyse zet zonlicht om in chemische energie om water direct te splitsen, met halfgeleidermaterialen.

De module wijst op de potentie van waterstof als sleutelement in duurzame energievoorziening, met dank aan de vooruitgang in hernieuwbare technologieën.

Verder worden de Westinghouse-zwavelcyclus, een proces uit 1975 met een efficiëntie van 40%, en innovatieve aanpakken zoals SolarLab's waterstofcentrale met zonnepanelen op zee en urine-elektrolyse genoemd. Deze methoden verminderen elektriciteitsbehoefte en landbouwvervuiling, met inachtneming van uitdagingen als corrosie.

Biomassa is een andere bron voor waterstofproductie, via verbranding en vergassing van droge varianten of met behulp van micro-organismen voor vochtige biomassa.

Biotechnologische benaderingen zoals directe fotolyse, gisting en donkere fermentatie worden verkend. Directe fotolyse maakt gebruik van microalgen en enzymen, terwijl fermentatieprocessen organische stoffen omzetten in waterstof, met variërende opbrengsten afhankelijk van de gebruikte substraten en omstandigheden.

De module benadrukt het belang van deze technologieën voor de ontwikkeling van duurzame waterstofproductie en de overgang naar een duurzame energie-economie.

¹⁴ BIČÁKOVÁ, O. *Možnosti výroby vodíku biologickými procesy* [online]. Paliva 2, 2010, s. 103-112. Beschikbaar op: http://paliva.vscht.cz/data/clanky/29_moznosti_vyroby_vodiku_biologickymi_procesy.pdf

¹⁵ DOUCEK, A., *Výroba vodíku z biomasy* [online]. Česká vodíková technologická platforma. Dostupné z: <http://hytep.cz/?loc=article&id=17>

3.5 Vragen aan het einde van het hoofdstuk:

- 1) Wat is het primaire doel van waterelektrolyse?
 - A) Om water te verwarmen.
 - B) Om water te scheiden in waterstof en zuurstof.
 - C) Om elektriciteit op te wekken uit water.
 - D) Om water te zuiveren.

- 2) Welk materiaal werd voorheen gebruikt in de membranen voor elektrolyse maar is nu verboden vanwege gezondheidsrisico's?
 - A) Platina
 - B) Asbest
 - C) Koolstofarm staal
 - D) Nikkelstaal

- 3) Welke elektrode produceert zuurstof tijdens de elektrolyse van water?
 - A) Kathode
 - B) Anode
 - C) Bipolaire plaat
 - D) Protonuitwisselingsmembraan

- 4) Welke technologie combineert elektrische energie en warmte-energie om de efficiëntie van waterstofproductie te verhogen?
 - A) Polymeer elektrolytisch membraan elektrolyse
 - B) Elektrolyse bij hoge temperatuur
 - C) Thermochemische watersplitsing
 - D) Foto-elektrolyse van water

- 5) Welk proces gebruikt zonlicht om waterstof te produceren uit water?
 - A) Elektrolyse van alkalisch water
 - B) Polymeer elektrolytisch membraan elektrolyse
 - C) Thermochemische watersplitsing
 - D) Foto-elektrolyse van water

6) Wat is de primaire input voor de Westinghouse-zwavelcyclus, zoals ontwikkeld in 1975?

- A. Biomassa
- B. Water en zwaveldioxide
- C. Urine
- D. Zonne-energie

7) Welke van de volgende aspecten is een significante sterkte van het Westinghouse-zwavelcyclus systeem?

- A. Hoge elektriciteitsbehoefte
- B. Gebruik van zonne-energie
- C. Lage behoefte aan elektriciteit
- D. Inzet van micro-organismen

8) Waarom wordt urine beschouwd als een potentieel bron voor waterstofproductie volgens de technologie ontwikkeld door Gerardine Botte?

- A. Omdat het een hoog zwavelzuurgehalte heeft
- B. Omdat het ammoniak en ureum bevat
- C. Omdat het rijk is aan biomassa
- D. Omdat het gemakkelijk omzetbaar is in zwavelzuur

9) Welke methode verhoogt het rendement van de waterstofproductie met tot 30% dankzij de koelende eigenschappen van zeewater?

- A. De Westinghouse-zwavelcyclus
- B. Waterstofcentrale op zonne-energie
- C. Pee Power-technologie
- D. Thermochemische processen

10) Welke technologie maakt gebruik van stoomreformatie en is afhankelijk van hoge temperaturen tussen 600° en 1.000°C voor de productie van waterstof?

- A. Westinghouse-zwavelcyclus
- B. Waterstofproductie via zonne-energie
- C. Biotechnologische processen
- D. Thermochemische processen

3.5.1 ANTWOORDEN: (FOR EXAMINING QUIZ RESPONSES)

1B) Om water te scheiden in waterstof en zuurstof.

2B) Asbest

3B) Anode

4B) Elektrolyse bij hoge temperatuur

5D) Foto-elektrolyse van water

6B). Water en zwaveldioxide

7B). Gebruik van zonne-energie

8B). Omdat het ammoniak en ureum bevat

9D). Thermochemische processen

10D). Thermochemische processen

4 VEILIGHEID

4.1 DOELSTELLINGEN:

- Veiligheidsrichtlijnen vaststellen voor de omgang met waterstof en de biologische effecten ervan;
- De verschillen uitleggen tussen waterstofopslag in vloeibare vorm en als gas;

4.2 TREFWOORDEN:

Dit hoofdstuk is gewijd aan waterstofveiligheid .

4.3 VEILIG GEBRUIK VAN WATERSTOF

Ondeskundig gebruik van waterstof heeft geleid tot verschillende ernstige ongevallen die de perceptie van het gebruik ervan door het publiek aanzienlijk hebben beïnvloed. Waterstof wordt als zeer gevaarlijk beschouwd. Deze ongevallen werden echter hoofdzakelijk veroorzaakt door technische problemen en storingen in de dienstverlening. Daarom is het van cruciaal belang rekening te houden met de gevaren bij het werken met waterstof en het bewustzijn voor operationele omstandigheden in waterstofinstallaties te vergroten.

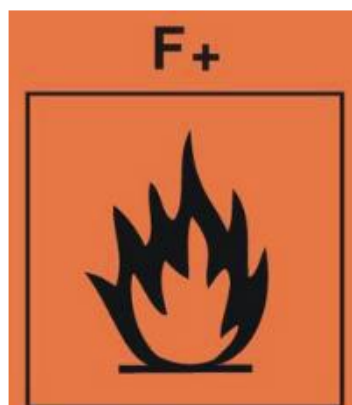


Fig. 4: Veiligheidssteken - licht ontvlambaar

Waterstof vormt een brandbare verbinding wanneer het wordt gemengd met zuurstof, fluor en chloor. De belangrijkste veiligheidsregel is het vermijden van contact van waterstof met lucht, aangezien dit mengsel zeer ontvlambaar is. Het kan gemakkelijk worden ontstoken met sigaretten, elektrische lading, vonken of zelfs hete voorwerpen. Daarom is het noodzakelijk de strikte veiligheids-, technische en brandvoorschriften en richtlijnen te volgen op alle plaatsen waar waterstof wordt gebruikt of opgeslagen.

Waterstof heeft een negatieve Joule Thomson-coëfficiënt bij standaardtemperatuur en de temperatuur stijgt daarom met afnemende druk. Dit leidt tot het risico van spontane verbranding bij snelle expansie van gecomprimeerde waterstof. Ruimten voor de opslag en het gebruik van waterstof moeten daarom goed worden geventileerd.

Aangezien waterstof lichter is dan lucht, kan het zich ook onder het dak ophopen, waardoor het risico van een explosie toeneemt. In drukcilinders met samengeperst gas stijgt de druk met de temperatuur. Daarom mogen de opslagcondities van de drukcilinders niet hoger zijn dan 50°C, anders bestaat er gevaar voor mechanische schade aan het opvangsysteem (afsluiter, regelaar, verdeelborden).¹⁶

4.4 BIOLOGISCHE EFFECTEN VAN WATERSTOF

De biologische effecten van waterstof bij hoge concentraties in besloten ruimtes kunnen schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid door de vermindering van de beschikbare zuurstof. De concentratie waterstof die nodig is om het zuurstofniveau aanzienlijk te verlagen, overschrijdt ruimschoots de concentratie die nodig is voor ontvlambaarheid, waardoor het risico op explosie groter is. Contact met vloeibare waterstof, of het koude gas dat ervan verdampt, kan bij huidcontact vorstwonden of koude brandwonden veroorzaken. Bovendien kan de huid blijven kleven aan onvoldoende geïsoleerde oppervlakken die waterstof bevatten, wat kan leiden tot potentieel scheuren bij ontsteking. Het inademen van zuivere waterstofgas kan onmiddellijk bewustzijnsverlies en de dood tot gevolg hebben als gevolg van verstikking.

¹⁶ TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. Česká asociace technických plynů: vodík[online]. Beschikbaar op: http://www.catp.cz/publikace2.php?download=catp_03-04-cz.pdf

4.5 WERKVEILIGHEID BIJ DE OPSLAG EN HET VERVOER VAN WATERSTOF

Waterstof, bekend om zijn licht ontvlambare eigenschappen, vereist zorgvuldige hantering om veiligheidsrisico's te minimaliseren. Opslag en transport dienen plaats te vinden onder hoge druk of bij extreem lage temperaturen om de explosieve eigenschappen te beheersen, wat logistieke uitdagingen en hogere kosten met zich meebrengt vergeleken met andere brandstoffen.

Een primair veiligheidsprobleem bij waterstofopslag is het risico op lekkage, aangezien waterstof kan ontsnappen uit tanks en leidingen, wat potentieel brandbare of explosieve omstandigheden creëert. Om lekken te voorkomen, is het noodzakelijk dat opslagsystemen en leidingen worden ontworpen en geconstrueerd volgens de hoogste veiligheidsnormen. Regelmatige controles en onderhoud zijn essentieel om de integriteit van deze systemen te handhaven.

Transport van waterstof vindt voornamelijk plaats via pijpleidingen of met vrachtwagens, en in mindere mate per trein of schip. Voor transport over de weg of het spoor worden speciale tanks of containers gebruikt die bestand zijn tegen de benodigde hoge druk of lage temperaturen voor waterstofopslag. Waterstof wordt vaak in cryogene vloeibare staat vervoerd, wat geïsoleerde containers vereist die de extreem lage temperaturen kunnen handhaven.

Daarnaast is het van belang om aandacht te besteden aan het risico op waterstofbranden en -explosies. Waterstofbranden kunnen ontstaan bij lekkage in combinatie met een ontstekingsbron. Daarom is het cruciaal dat opslag- en transportlocaties strategisch worden geplaatst, ver van bewoonde gebieden, en voorzien van adequate brandbestrijdingssystemen.

Samengevat moet de omgang met waterstof gekenmerkt worden door een strikte naleving van veiligheidsprotocollen, zorgvuldig ontwerp en onderhoud van apparatuur, en gedegen noodplannen om de potentiële risico's te beheersen. Hoewel waterstof een veelbelovende energiedrager is, is het prioritair dat er passende veiligheidsmaatregelen worden getroffen om personen en eigendommen te beschermen.

4.6 MOGELIJKE RISICO'S IN VERBAND MET DE OPSLAG VAN GECOMPRIMEERD WATERSTOFGAS

Bij de opslag van gecompriemd waterstofgas dienen verschillende potentiële risico's in acht genomen te worden:

- Detectie: Waterstof is een onzichtbaar, geurloos en smaakloos gas, wat de detectie van lekken bemoeilijkt zonder het gebruik van gespecialiseerde sensoren.
- Waterstofbrosheid: Waterstof kan bepaalde metalen broos maken, wat kan resulteren in materiaaldegradatie en uiteindelijk tot breuk van de opslagtank, met mogelijk een lek tot gevolg.
- Ophoping en verstikking: Langdurige accumulatie van waterstof in afgesloten ruimtes kan verstikking veroorzaken door verdringing van zuurstofrijke lucht.
- Ontvlambaarheid: Mengsels van waterstof met zuurstof of lucht zijn zeer ontvlambaar en kunnen leiden tot ontsteking of detonatie, vooral als ze in contact komen met het ventilatiesysteem van een gebouw.
- Explosiegevaar: Een explosie van een waterstofcontainer kan een drukgolf veroorzaken die schade aanricht, zoals gehoorbeschadiging, breuk van de tank en rondvliegend puin, waaronder glas.
- Ontstekingsgevoeligheid: Waterstof heeft een zeer lage minimale ontstekingsenergie (MIE) van 0,017 mJ, wat aanzienlijk lager is dan bij veel andere brandstoffen. Zelfs een statische vonk kan voldoende zijn om waterstof te ontsteken.
- Onzichtbare vlam: Zuivere waterstofvlammen zijn bijna onzichtbaar bij daglicht, wat het detecteren van een brand bemoeilijkt.
- Rookvrije verbranding: Waterstofbranden produceren geen rook, waardoor het moeilijk kan zijn om een brand snel te identificeren en te lokaliseren.
- Thermische risico's: Blootstelling aan externe brand, hitte of thermische straling kan mechanische breuk van waterstoftanks veroorzaken, met name bij tanks gemaakt van polymeer- en composietmaterialen door thermische ontbinding.
- Gezien deze risico's is het essentieel dat opslagfaciliteiten voor waterstof voorzien zijn van adequate detectieapparatuur, regelmatig onderhoud en inspectie ondergaan, en ontworpen zijn met geavanceerde veiligheidssystemen om de kans op incidenten te minimaliseren.

4.7 ALGEMENE RICHTLIJNEN VOOR VEILIG WERKEN MET WATERSTOFGAS:

- Volg alle veiligheidsvoorschriften en richtlijnen voor het omgaan met waterstofgas. Dit kan het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen omvatten, zoals handschoenen, een veiligheidsbril en vlamwerende kleding.
- Wees voorzichtig bij het hanteren van waterstofgascilinders of andere containers. Deze moeten met zorg worden gehanteerd om schade aan de tank te voorkomen, waardoor waterstofgas zou kunnen lekken of vrijkomen.
- Houd waterstofgas uit de buurt van ontstekingsbronnen zoals open vuur, vonken en elektrische apparatuur.
- Zorg er bij het vervoer van waterstofgas voor dat het gas zich bevindt in een geschikte tank die ontworpen is voor waterstofgas en in goede staat verkeert.
- Sla waterstofgas op in een goed geventileerde ruimte, uit de buurt van ontstekingsbronnen.
- Wees voorzichtig bij het overhevelen van waterstofgas van de ene tank naar de andere. Zorg ervoor dat de tanks goed vastzitten en dat het overhevelen langzaam gebeurt om morsen of lekken te voorkomen.
- In geval van een lek of lekkage van waterstofgas moet u de ruimte onmiddellijk evacueren en ventileren om het gas te verspreiden. Probeer het lek of de lekkage niet zelf te repareren, maar roep professionele hulp in.
- Controleer regelmatig de toestand van waterstofgastanks en -apparatuur om ervoor te zorgen dat deze in goede staat verkeren en geen veiligheidsrisico vormen.
- Zorg ervoor dat alle werknemers die met waterstofgas omgaan goed zijn opgeleid en bekend zijn met de gevaren van het gas.

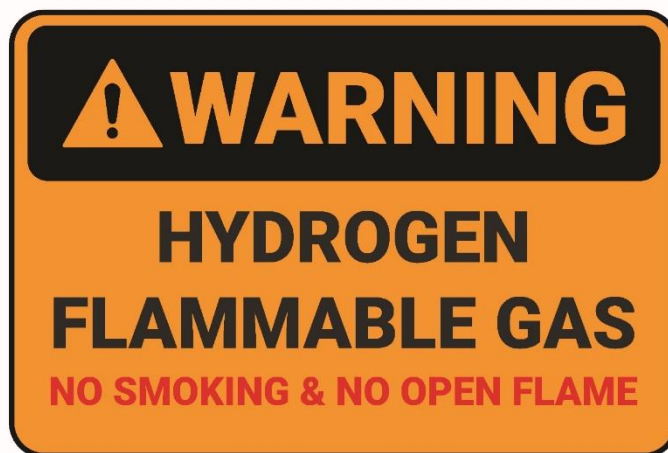


Foto nr. 1: Waarschuwingbord.

4.8 VEILIGHEID IN DE AUTOMOBIELINDUSTRIE

In de automobiellndustrle staat veiligheid centraal, aangezien alle brandstoffen - die een hoge energledlchthele bezitten - potentleel gevaarlijk kunnen zljn onder bepaalde omstandlgheden. Het is van belang om waterstof als brandstof te beschouwen als even veilig of zelfs veiliger dan conventleonele brandstoffen. Waterstoffanks ondergaan niet alleen de gebrleukeljkke botsproeven, maar worden ook onderworpen aan extreme tests, zoals weerstand tegen kogelinslagen. Deze tanks zljn ontworpen om drukken te weerstaan die aanzlenlijk hoger zljn dan wat ze in normale omstandlgheden zouden ervaren.

Bij waterstof tankstations wordt een vergelijkbaar veiligheidsniveau gehandhaafd door middel van diverse systemen die ontworpen zljn om goed te functioneren onder hoge druk. Een voordeel van waterstof is de lage dichtheid, waardoor het gas bij een lekkage snel opstljgt en zich verspreldt in de atmosfeer, wat de kans op accumulatie en het risico bij ongevallen reduceert. In het geval van een brand zullen de vlammen verticaal opstljgen, wat het risico op versprelding van het vuur verkleint, in tegenstelling tot de horizontale versprelding die vaak gezien wordt bij branden met vloeibare fosslele brandstoffen.

Gedurende de decennialange geschiedenis van waterstofproductie en -gebruik zljn er geen noemenswaardlge rampen voorgekomen. Daarnaast is waterstof niet schadelijk voor de gezondheid, wat betekent dat een lek niet direct een gevaar vormt voor mensen. De waterstoffsysteemen in hedendaagse voertuigen zljn specifiek ontworpen om bij een ongeluk de integriteit te behouden en het risico op brand snel te minimaliseren.

4.9 SAMENVATTING WATERSTOF VEILIGHEID

Waterstofveiligheid is een integraal aspect van de energietransitie, waarbij de opslag en het gebruik van waterstof centraal staan. Waterstof kan als gas of vloeistof worden opgeslagen, of chemisch vastgelegd in hydriden, met elk specifieke veiligheidsprotocollen. Hoewel waterstof een laag risico op milieuschade kent, brengt het unieke gevaren met zich mee, zoals explosiegevaar bij vermenging met lucht en het risico op verstikking in besloten ruimtes door zuurstofverdringing.

Veiligheidsrichtlijnen zijn essentieel voor de preventie van ongevallen, met nadruk op het vermijden van ontstekingsbronnen en het waarborgen van goede ventilatie, vooral omdat waterstof vlammen bijna onzichtbaar zijn en geen rook produceren. Opslagfaciliteiten moeten voorzien zijn van gespecialiseerde detectiesystemen en regelmatige inspecties ondergaan om de structurele integriteit te handhaven en lekkage te voorkomen. Dit is vooral relevant vanwege de neiging van waterstof om metalen te verzwakken, bekend als waterstofbroosheid.

Transport van waterstof stelt extra eisen aan de opslagcontainers, die zowel hoge druk als lage temperaturen moeten kunnen weerstaan. Veiligheidsmaatregelen tijdens transport omvatten ook het strategisch plaatsen van opslag- en transportroutes, ver van bewoonde gebieden, en het hebben van efficiënte noodreactieplannen.

In de automobielsector worden waterstoftanks zwaar getest om te verzekeren dat ze in geval van een botsing geen gevaar vormen. De lage dichtheid van waterstof draagt bij aan de veiligheid door het snelle opstijgen en verdunnen in de atmosfeer bij lekkage. Training in de omgang met waterstof en het toepassen van veiligheidsprocedures zijn cruciaal om incidenten te voorkomen en effectief te reageren wanneer deze zich voordoen.

4.10 VRAGEN WATERSTOF VEILIGHEID

- 1) Waarom wordt waterstof beschouwd als een zeer gevaarlijke stof?
 - A) Het is explosief in contact met water.
 - B) Het heeft een hoge toxiciteit.
 - C) Het kan gemakkelijk worden ontstoken en heeft geleid tot ernstige ongevallen.
 - D) Het is radioactief.

- 2) Wat is een primair veiligheidsrisico bij de opslag van waterstof?
 - A) Corrosie.
 - B) Lekkage.
 - C) Overdruk.
 - D) Bevriezing.

- 3) Bij welke temperatuur moeten de opslagcondities van waterstofdrukcilinders blijven om veiligheid te garanderen?
 - A) 50°C.
 - B) 100°C.
 - C) 0°C.
 - D) -273°C.

- 4) Wat is de biologische impact van hoge concentraties waterstof in besloten ruimtes?
 - A) Verbetering van de ademhaling.
 - B) Verhoogde zuurstofopname.
 - C) Vermindering van de beschikbare zuurstof.
 - D) Geen effect.

- 5) Waarom moet de ruimte waar waterstof wordt opgeslagen goed geventileerd zijn?
 - A) Om de geur van waterstof te verdrijven.
 - B) Om het risico van spontane verbranding te verminderen.
 - C) Om de temperatuur te verlagen.
 - D) Om waterstofbrosheid te voorkomen.

- 6) Wat is een unieke eigenschap van waterstofvlammen?
- A) Ze zijn felrood.
 - B) Ze produceren veel rook.
 - C) Ze zijn bijna onzichtbaar bij daglicht.
 - D) Ze hebben een hoge warmtestraling.
- 7) Hoe kan waterstof leiden tot verstikking in afgesloten ruimtes?
- A) Door toxische dampen.
 - B) Door verdringing van zuurstofrijke lucht.
 - C) Door het vrijkomen van koolmonoxide.
 - D) Door chemische reactie met koolstofdioxide.
- 8) Welke maatregel is essentieel tijdens het vervoer van waterstofgas?
- A) Gebruik van geïsoleerde containers.
 - B) Constante verwarming van de tanks.
 - C) Vervoer in vaste vorm.
 - D) Vervoer bij hoge temperaturen.
- 9) Wat moet er gebeuren als er een lek of lekkage van waterstofgas is?
- A) De ruimte onmiddellijk evacueren en ventileren.
 - B) Het lek dichten met tape.
 - C) Water over het lek sprenkelen.
 - D) Het lek negeren en doorgaan met het werk.
- 10) Wat is een belangrijk voordeel van waterstof in de automobielindustrie met betrekking tot veiligheid?
- A) Het is zwaarder dan lucht en zakt naar de grond.
 - B) Het stijgt snel op en verspreidt zich in de atmosfeer bij lekkage.
 - C) Het is makkelijk detecteerbaar door de sterke geur.
 - D) Het kan veilig gemengd worden met benzine.

4.11 ANTWOORDEN: (FOR EXAMINING QUIZ RESPONSES)

C) Het kan gemakkelijk worden ontstoken en heeft geleid tot ernstige ongevallen.

B) Lekkage.

A) 50°C.

C) Vermindering van de beschikbare zuurstof.

B) Om het risico van spontane verbranding te verminderen.

C) Ze zijn bijna onzichtbaar bij daglicht.

B) Door verdringing van zuurstofrijke lucht.

A) Gebruik van geïsoleerde containers.

A) De ruimte onmiddellijk evacueren en ventileren.

B) Het stijgt snel op en verspreidt zich in de atmosfeer bij lekkage.