



NORTH-WEST UNIVERSITY  
YUNIBESITHI YA BOKONE-BOPHIRIMA  
NOORDWES-UNIVERSITEIT  
POTCHEFSTROOMKAMPUS

**WETENSKAPLIKE BYDRAES**  
**REEKS H: INTREEREDE NR. 225**

## **Kernenergie vir Waterstofvervaardiging**

**Prof Ennis Blom**

**Intreerede gehou op 22 Mei 2009**

Die Universiteit is nie vir menings in die publikasie aanspreeklik nie.

Navrae in verband met *Wetenskaplike Bydraes* moet gerig word aan:

Die Kampusregistrateur  
Noordwes-Universiteit  
Potchefstroomkampus  
Privaatsak X6001  
POTCHEFSTROOM  
2520

Kopiereg © 2009 NWU

**ISBN** 978-1-86822-567-5

## Kernenergie vir Waterstofvervaardiging

### Die Problem



California's primary oil and gas reserves faded as its wells ran dry.

Ken County: California's No. 1 oil region



center for global energy studies  
1000 University Avenue, Suite 1000  
Berkeley, CA 94702-1000  
Tel: 415.863.1000  
www.cges.org

Die wêreld ondervind tans verskeie ernstige probleme soos byvoorbeeld die ekonomiese ineenstorting, dramatiese klimaatsverandering, die uitputting van energiebronne en ander. Die foto bo toon die besoedeling van kweekhuysgasse soos tipies verkry by 'n staal vervaardigingsaanleg. Die besoedeling wat veroorsaak word kan ook vergelyk word met die van steenkoolkragstasies waarvan daar 21 in Suid-Afrika in bedryf is. Drie van Suid-Afrika se kragstasies (by Witbank, Volksrust en Ellisras) is onder die twintig stasies in die wêreld wat die hoogste besoedeling het.

Die foto onder toon die probleem van lugbesoedeling wat ondervind was by die onlangse Olimpiese Spele in Beijing en regs kan 'n ondergrondse olie bron gesien word wat opgedroog het aangesien olie wêreldwyd teen 'n hoër tempo verbruik word as waarteen nuwe bronne gevind en ontgin word.

### Fossiel Brandstowwe

- Steenkool
- Olie
- Natuurlike Aardgas
- Rede vir klimaatsverandering
  - Koolstof + Lug → Kweekhuis-gasse (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)
- Doel is om CO<sub>2</sub> teen 2020 met 20% te verminder
- Elektriesiteitsverbruik wêreldwyd verwag om toe te neem met 2.4% p.a.



center for global energy studies  
1000 University Avenue, Suite 1000  
Berkeley, CA 94702-1000  
Tel: 415.863.1000  
www.cges.org

Die energiebronne wat verantwoordelik is vir die meeste lugbesoedeling is steenkool, olie en natuurlike aardgas, beter bekend as fossiel brandstowwe. Die energiebronne bestaan hoofsaaklik uit die elemente

koolstof en waterstof waarvan steenkool die hoogste koolstof en die laagste waterstofinhoud het, olie minder koolstof en meer waterstof en natuurlike aardgas die laagste koolstof en die hoogste waterstofinhoud het. Die probleem ontstaan egter wanneer die koolstof wat teenwoordig in genoemde energiebronne is in die teenwoordigheid van lug met suurstof brand om energie op te wek. word groot hoeveelhede koolstofdoksied, swaeldoksied en stikstofoksiedes in die atmosfeer vrygestel. Hierdie gasse staan algemeen bekend as kweekhuisgasse en word beskou as die hooforsaak wat aanleiding gee tot klimaatsverandering as gevolg van aardverwarming. Die meeste ontwikkelde lande is ondertekenaars van die Kyoto Protokol wat ten doel het om hul kweekhuis-gasvolumes, veral koolstofdoksied, met 20% te verminder teen die jaar 2020. Aan die anderkant word daar voorspel dat die wêreld se elektrisiteitsverbruik met 2.4% per jaar gaan toe neem wat dus 'n groot uitdaging stel aan hierdie doelwit. Fossiel brandstowwe sal dus in die toekoms met kernenergie of hernubare energiebronne vervang moet word om die groot hoeveelhede CO<sub>2</sub> wat in die atmosfeer vrygelaat word noemenswaardig te verminder.

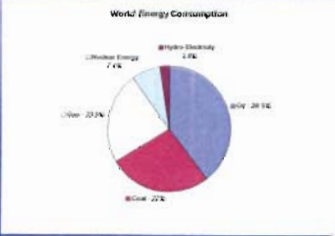
## Wêreld Ru-olie Verbruik

80 miljoen vate per dag  
 = 12.8 biljoen liters per dag  
 Verwagte leeftyd = 42 jaar




Die wêreld verbruik daaglik 80 miljoen vate ru-olie. Een vaatjie ru-olie beslaan 160 liters en as dit omgeskakel word lewer dit die astronomiese syfer van 12.8 biljoen liters per dag. Aangesien ru-olie teen 'n hoër tempo verbruik word as wat nuwe bronne ontdek word, is die verwagte leeftyd daarvan ongeveer 42 jaar. Natuurlike aardgas het 'n verwagte leeftyd van net meer as 60 jaar en dié van steenkool is meer as 150 jaar.

## Wêreld Energie Verbruik



Energy Source	Percentage
Coal	28%
Gas	23%
Oil	31%
Nuclear	2%
Renewable Energy	16%



Bostaande figuur dui die verskillende bronne aan waarop die wêreld se energie voorsiening gebaseer is. Soos voorheen bespreek is, voorsien fossiel brandstowwe ( Gas 23.5%, Steenkool 27%, Olie 39.5%) in 90% van die wêreld se energie behoeftes. Die oorblywende 10% word tans voorsien deur kernenergie ( 7.4%) en hidro-elektrisiteit (2.6%). Dit is hoofsaaklik verantwoordelik vir die vinnig toenemende produksie in kweekhuysgasse wêreldwyd.

Suid-Afrika is verantwoordelik vir ongeveer 90% van die kweekgasse wat in Afrika in die atmosfeer vrygestel word



Suid-Afrika produseer nagenoeg 250 miljoen ton steenkool per jaar en is die vyfde grootste produsent in die wêreld. As 'n mens dit in perspektief wil plaas, kan dit vergelyk word met Sjina wat die grootste produsent in die wêreld is en tien keer meer steenkool dws 2500 miljoen ton per jaar producer.

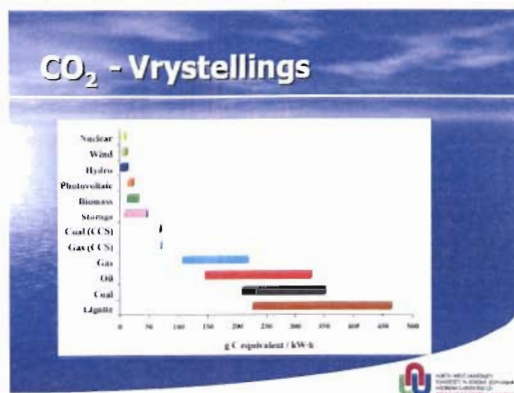
In Suid –Afrika gebruik Sasol ongeveer 40 miljoen ton steenkool per jaar in hul steenkool tot vloeibare brandstowwe en chemikalieë prosesse. Sasol voorsien slegs in 28% van Suid-Afrika se brandstof behoeftes aangesien dit meer lonend is om sintesegas na chemikalieë om te skakel.

Eskom verbruik 110 miljoen ton steenkool per jaar in hul kragstasies vir die opwekking van 40 000 MW. As gevolg van die vraag na elektrisiteit beplan Eskom om sy kapasiteit met 'n verdere 40 000MW na 80 000MW te verhoog teen 2020. Die beplanning is dat die helfte van die kragvoorsiening ,dws 20 000 MW , deur middel van Kernenergie opgewek sal word. Om dit in perspektief te plaas kan dit weer vergelyk word met 'n land soos Sjina wat 600 000 MW ontwikkel en beplan om sy kapasiteit met 100 000 MW per jaar te verhoog, dws Sjina gaan 2.5 keer meer krag op wek in een jaar as wat ons in tien jaar beplan.

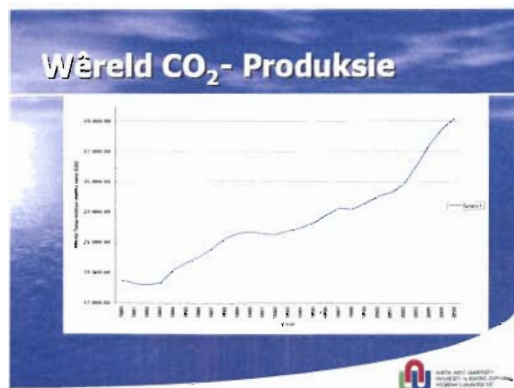
Industriële soos die staal-, chemiese – , sementbedryf en andere verbruik ongeveer 25-30 miljoen ton steenkool per jaar.

Bogenoemde sektore is dus hoofsaaklik verantwoordelik vir die produksie van groot hoeveelhede kweekhuysgasse in Suid - Afrika

Die balans, ongeveer 70-80 miljoen ton grotendeels hoë kwaliteit steenkool word jaarliks uitgevoer.

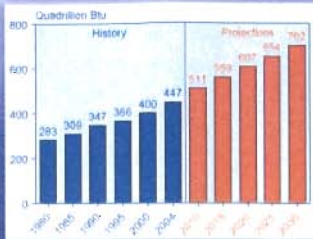


Soos reeds voorheen genoem is, kan gesien word dat die fossiel brandstowwe naamlik, olie, gas en steenkool die hoogste gram-koolstof ekwivalent per kilowatt -uur elektrisiteit wat opgewek word lewer in vergelyking met al die ander beskikbare energiebronne. Kernenergie tesame met die hernubare energiebronne soos sonenergie, wind en hidro het die laagste koolstofvlakke tot gevolg. Wind en sonenergie is baie kapitaal intensief en voorsien energie nie op 'n kontinue basis nie, wat kernenergie 'n baie aantreklike opsie maak.



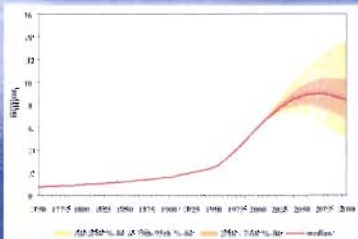
Die sterk opwaartse kurwe dui daarop hoe ernstig die probleme is wat ondervind word met die toename in CO<sub>2</sub> produksie wêreldwyd. Gedurende die periode 1984 tot 2006 het CO<sub>2</sub> produksie van 19 000 miljoen ton per jaar tot 29 000 miljoen ton per jaar gestyg, 'n toename van net meer as 50%. Om hierdie probleem enigens die hoof te bied sal daar 'n drastiese afname in die gebruik van fossiel brandstowwe as energiebronne moet plaasvind. Kernenergie en energie voorsien deur hernubare bronne blyk die ooglopendste oplossings te wees.

## Toekomstige Energieverbruik



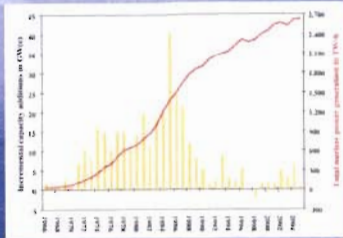
Dit word voorspel dat die toekomstige energieverbruik van die wêreld met ongeveer 50% gaan toeneem oor die volgende 20 jaar. Dit is dus uiters belangrik dat alternatiewe energiebronne ook aangewend moet word in die plek van fossiel brandstowwe, nie net om die CO<sub>2</sub> produksie te verminder nie, maar om die fossiel brandstofreserwes meer spaarsaam te gebruik tot tyd en wyl 'n meer doeltreffende tegnologie ontwikkel is wat laer vlakke van besoedeling tot gevolg het.

## Wêreld Bevolking



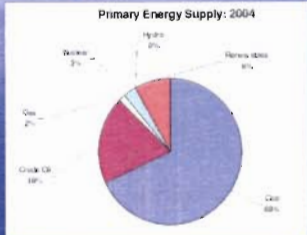
Dit word algemeen aanvaar dat die wêreld se bevolking van die huidige 6 biljoen mense gaan toeneem tot 9 biljoen teen die jaar 2060. Die toename in die vraag na meer energie is 'n direkte gevolg van die toename in ekonomiese aktiwiteit wat vir die toekoms voorspel word sowel as die vinnige groei in die bevolking soos aangetoon.

## Kernkrag Opwekking



Hierdie syfers toon aan dat elektrisiteitopwekking deur van kern tegnologie gebruik te maak alreeds 'n bewese roete is en soveel as 380 GW(e) sowat 16% van die wêreld se benodigdhede gelewer word. Die vertikale balkies dui aan die nuwe byvoegings in kernenergie installasies vir kragopwekking. Alhoewel dit 'n afname getoon het na die Three Mile Island en Chernobyl insidente, is dit nou weer besig om baie belangstelling gaande te maak. Verbeteringe in die tegnologie, ontwerp en bedryf van die nuwe generasie kernkragstasies (NGNP) het tot gevolg dat dit feitlik onmoontlik is dat soortgelyke ongelukke weer sal voorkom.

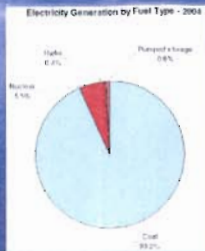
## Totale Primêre Energie voorsiening in RSA



Suid-Afrika is net soos die res van die wêreld hoofsaaklik afhanglik van steenkool, olie en gas (90%) vir die voorsiening in sy primêre energie behoeftes soos nodig deur alle sektore in die bedryf. Die grootste verskil is dat steenkool as energiebron by verre die grootste deel uitmaak (68%) vanweë die feit dat Suid-Afrika slegs oor beperkte natuurlike aardgas- en ru-olie bronne beskik. Die res van die wêreld maak van 'n meer eweredige verspreiding, ongeveer 30% tussen steenkool, olie en gas as energiebron gebruik. Verhoging in die kapasiteit van kern- en hernubare energiebronne sal in die toekoms Suid-Afrika se hoogs afhanklikheid van steenkool kan verminder.



## Elektrisiteit Opwekking-RSA



90% van Afrika se CO<sub>2</sub>



Meer as 93% van Suid-Afrika se kragopwekking is op steenkool as energiebron gebaseer terwyl slegs 5% van kernkrag afkomstig is. Dit is grotendeels die rede waarom Suid-Afrika verantwoordelik is vir bykans 90% van die CO<sub>2</sub> wat in Afrika geproduseer word. Om hierdie wanbalans in die toekoms reg te stel, sal daar sonder twyfel meer kernkragentrales opgerig moet word. Die doelwit is dat ongeveer 25% van die elektrisiteitsbenodigdhede uiteindelik deur kernkrag voorsien moet word.

## PBMR (Pty) Ltd

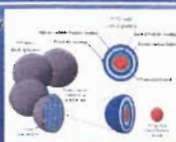
- PBMR Aandeelhouers:
  - Suid-Afrikaanse Regering
  - Eskom
  - Westinghouse V.S.A.
- Sedert 1999
- 800 werknemers en reeds meer as R6 biljoen spandeer



Suid-Afrika het in 1999 die maatskappy PBMR (Pty) Ltd gestig met die doel om kern-reaktore te ontwikkel wat kommersieel vir kragopwekking aangewend kan word. Die aandeelhouers in die maatskappy is die Suid-Afrikaanse regering, Eskom, en Westinghouse van die V.S.A. wat oor die nodige kundigheid op hierdie gebied beskik. PBMR maak van plaaslike sowel as internasionale kundiges op die gebied van kern-tegnologie gebruik en het altesame 800 personeel in diens. Tot op datum is meer as R 6 biljoen alreeds op die ontwikkeling van die tegnologie gespandeer.

## PBMR Beplanning

- Korrelbed tegnologie van Duitsland verkry
- Tegnologie is ontwikkel tot 'n vlak waar dit kommersieel aangewend kan word
- Begin met konstruksie van kern – brandstofaanleg in 2009
- Eerste 175 MWe PBMR kernkragstasie op te rig in 2012/2013
- Eskom beplan om 25 van die 175 MWe kernkragentrales op te rig



Die korrelbed-tegnologie waarop die kern reaktore gebaseer is, is oor die afgelope 30 jaar in Duitsland ontwikkel. Suid-Afrika het die potensiaal daarvan gesien en die tegnologie oorgeneem met die doel om dit verder te ontwikkel tot 'n vlak waar dit kommersieel aangewend kan word. Die verdere tegnologiese ontwikkeling het alreeds meer as 20 internasionale patente die lig laat sien. Die beplanning is dat daar later vanjaar begin sal word met die konstruksie van die brandstofaanleg wat net buite Pretoria geleë sal wees. Verder is die beplanning om die eerste 175 Mwe (500MW) PBMR kragstasie teen 2012/2013 by Koeberg op te rig. Eskom is van voornemens om 25 van die 175 MWe kernkragentrales op te rig om in hul toekomstige vraag na elektrisiteit te voorsien, maar die implementering daarvan sal afhang van hul finansiële posisie.

## Kernkrag Ontwikkelings

- Meer as 440 kernkragentrales is wêreldwyd in bedryf en lewer tesame 380 000 MW ( V.S.A., Frankryk, Japan )
- Suid –Afrika beskik oor die 4de grootste uraan reserves in die wêreld
- NGNP tegnologie (HTGR reaktore vervang PWR)



Daar is huidige meer as 440 kernkragentrales in die wêreld in bedryf wat gesamentlik 380 000 MW elektrisiteit opwek. Dit verteenwoordig ongeveer 16% van die wêreld se behoeftes. Die V.S.A met meer as 'n 100 eenhede het die meeste kernkragentrales in bedryf, gevolg deur Frankryk met meer as 50 en Japan met 50 eenhede. Kernkrag hou vir Suid-Afrika groot strategiese waarde in omdat ons oor



## Waterstof Voertuie

- Waterstofaangedrewe voertuie toegerus met brandstof-sel beskikbaar
- In staat om meer as 400 km af te lê teen snelhede van 150 km per uur
- Meer as 80% van alle voertuie wat in die VSA vervaardig word teen 2020 sal waterstof aangedrewe wees



Waterstofaangedrewe voertuie wat met 'n brandstof-sel toegerus is, is alreeds beskikbaar in die staat Kalifornië in die VSA vanaf motorhandelaars. Fabrikante soos Honda, Toyota en BMW het groot vordering op die gebied gemaak en die probleem is tans nie die ontwikkeling van die voertuie nie, maar wel die van waterstofbronne om in die toekomstige behoefte te voorsien. 'n Voertuig word tipies toegerus met drie of vier gascilinders waarin die waterstof saamgepers word tot 'n druk van 760 bar. Aangesien waterstof die ligste gas is bekend aan die mensdom, moet dit tot sulke hoë drukke saamgepers word om voldoende hoeveelhede brandstof in te neem. Die waterstof vloei onder beheerste toestande na 'n brandstof-sel waar dit verbrand word deur met lug in aanraking te kom. Die hitte wat ontwikkel word agv die verbranding van waterstof word deur die brandstof-sel in elektrisiteit omgeskakel wat dan 'n elektriese motor dryf. Die enigste gasvrystelling is waterdamp. Die voertuie is in staat om meer as 400 km af te lê teen snelhede van tot 150 km per uur.

Die voertuie neem brandstof in by 'n waterstof-vulstasie en het nie 'n wagperiode soos benodig deur 'n battery aangedrewe motor nie wanneer die battery eers weer herlaai moet word nie. Dit word voorspel dat meer as 80% van alle voertuie wat teen 2020 in die VSA vervaardig gaan word, waterstofaangedrewe voertuie sal wees.

## Waterstof as Brandstof



Waterstof word ingeneem by een van die vulstasies in Kalifornië

## Verdere Kern –Waterstof Toepassings

- Waterstof soos benodig deur die steenkool na voelbare brandstowwe en petroleum industrie
- Waterstof benodig deur die chemiese industrie
- Waterstof benodig deur die staal industrie



Kern-waterstof kan die  $H_2/CO$  verhouding van die sintesegas verhoog soos vervaardig uit steenkool vergassing of metaan stoomhervorming. Die  $H_2/CO$  verhouding is belangrik vir sekere chemiese prosesse en vir die petroleum industrie. Deur die gassamestelling met kern-waterstof aan te vul, kan 'n aansienlike afname in  $CO_2$  produksie bewerkstellig word.

Waterstof word ook gebruik as chemiese reaktant vir die vervaardiging van verskeie produkte in die chemiese industrie. Die aanwending van waterstof as reduksiemiddel in die staal industrie ipw die huidige steenkool en kooks sal tot 'n veel skoner bedryf aanleiding gee. Die vorming van duisende miljoene tonne  $CO_2$  kan op hierdie wyse wêreldwyd verhoed word.

## Kern Ingenieurs Projekte

- Tegno-ekonomiese evaluering van HYS prosesse
- Ontwerp van  $SO_2$  reaktor
- Ontwerp van plasma reaktore
- $HYS \rightarrow POX \rightarrow WGS$
- Veiligheidsaspekte
- Kern-waterstof vir staalvervaardiging



Bogenoemde is die projekte wat tans deur die Nagraadse Skool vir Wetenskap en Kerningenieurswese bestudeer word. Die HYS (Hibried swaelsuur) prosesse word algemeen aanvaar as die prosesse met die grootste potensiaal om water ekonomies op te breek in waterstof en suurstof. Die prosesse is nog in die ontwikkeling-stadium en geen kommersiële aanleg bestaan nie. Behalwe vir die tegno-ekonomiese studie wat tans onderneem word om die optimum bedryfsparameters te bepaal waar waterstof

ekonomies vervaardig kan word, word daar ook aandag gegee aan die  $\text{SO}_2$  ontbindingsreaktor en die skeiding van  $\text{SO}_2$  en  $\text{O}_2$ . Die uiteindelike sukses van die HYS proses hang hoofsaaklik af van die werkverrigting van die chemiese ontbindingsreaktor. Goëe vordering is alreeds gemaak met die ontwerp van die reaktor.

Die nie-katalitiese plasma-boog hervormingsproses behels die hervorming van metaan met  $\text{CO}_2$  as oksidasie middel vir die vervaardiging van sintesegas of waterstof. In hierdie geval word  $\text{CO}_2$  deur die proses gebruik en nie gevorm nie.

Indien daar van die HYS proses gebruik gemaak word, word daar vir elke ton waterstof wat vervaardig word, 8 ton suurstof as byproduk gevorm. Hierdie suurstof kan in 'n POX (Parsiele oksidasie) proses gekoppel aan 'n WGS (Watergas) proses gebruik word om die waterstofproduksie aansienlik te verhoog. Dit kan groot ekonomiese voordele vir die HYS proses inhou.

'n Volledige studie is ook gedoen om al die veiligheidsaspekte en voorsorgmaatreëls te bepaal wanneer 'n kernreaktor (PBMR) aan 'n chemiese aanleg gekoppel word vir die vervaardiging van waterstof.

Kern waterstof kan ook as reduksiemiddel in die staalbedryf aangewend word vir die produksie van ystereenhede. In hierdie geval word die gebruik van aansienlike hoeveelhede steenkool en kook uitgeskakel wat 'n groot vermindering in  $\text{CO}_2$  uitlaatgasse tot gevolg het.


## Chemiese Reaksies-HYS

Twee gasfase ontbindingsreaksies:

$$\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{SO}_3(\text{g}) \quad \Delta H_{298} = +97.54 \text{ kJ/mol}$$

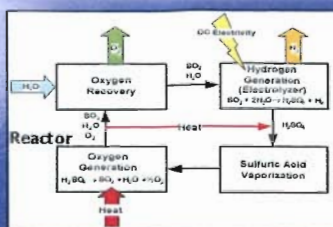
$$\text{SO}_3(\text{g}) \leftrightarrow \text{SO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \quad \Delta H_{298} = +98.92 \text{ kJ/mol}$$

$\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$



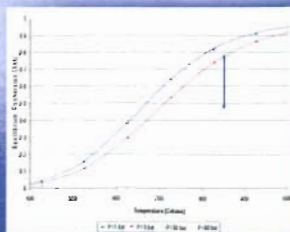
Swaelsuur word gebruik as 'n promotor om water te skei in waterstof en suurstof. Die twee gasfase ontbindingsreaksies is hoogs endotermies en ondergaan 'n volume toename tydens reaksie wat beteken dat die reaksies bevoordeel word deur hoë temperature en lae drukke. Die ontbindingsreaksie van  $\text{H}_2\text{SO}_4$  vind nie-katalities plaas by temperature van  $400^\circ\text{C}$  terwyl die reduksie reaksie van  $\text{SO}_3$  in die teenwoordigheid van 'n katalisator by temperature van  $850^\circ\text{C}$ - $900^\circ\text{C}$  plaasvind. Volgens die stoichiometrie van die netto reaksie is dit duidelik dat vir elke ton waterstof wat gevorm word, agt ton suurstof as byproduk geproduseer word.

## Hys Proses Blokdiagram



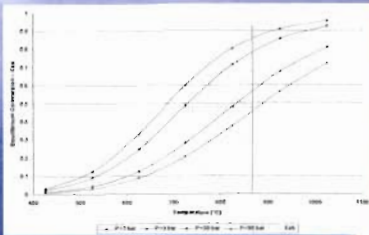
Proses hitte word aan die reaktor voorsien deur die warm helium stroom by 900°C afkomstig vanaf die PBMR. Die twee belangraste eenheidsoperasies van die proses is die chemiese ontbindingsreaktor en die elektrolyseerder. Swaelstuur met 'n konsentrasie van 50-60 mol % verlaat die elektrolyseerder en word gekonsentreer tot 90 mol% voordat dit verhit word tot 400° C -500° C waar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nie-katalities ontbind na SO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O. Die gasstroom word verder verhit tot 870° C voordat dit die ontbindingsreaktor binnegaan waar die SO<sub>3</sub> katalities gereduseer word na SO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>. Die SO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> word geskeer waar O<sub>2</sub> as 'n byproduk herwin word en die SO<sub>2</sub> met water in die elektrolyseerder reageer om waterstof en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> te vorm. 'n Kinetiese model is vir die SO<sub>3</sub> ontbindingsreaktor ontwikkel waarmee die reaktor volume, temperatuur – en konsentrasie profiele van die reagerende spesies bepaal kan word.

## Ewewigsomsetting van SO<sub>3</sub>



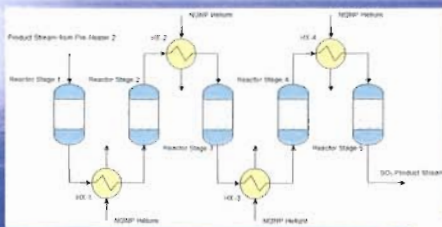
Die reduksie van SO<sub>3</sub> na SO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> word bevorder deur lae drukke en hoë temperature soos in die ewewigdiagram aangetoon. Aangesien die heliumstroom wat die PBMR verlaat by 'n temperatuur van 900° C is, is dit in staat om die reaktor waarin die SO<sub>3</sub> ontbinding plaasvind tot 'n maksimum temperatuur van 870° C te verhit. By 3 bar druk en 'n temperatuur van 870° C is die maksimum ewewigsomsetting van SO<sub>3</sub> wat bereik kan word 78%. Aangesien 'n reaktor in praktyk normaalweg ontwerp word om nie ewewigsomsetting te bereik nie, is die maksimum realistiese omsetting wat verkry kan word 74%. ( 0.95 x 78%)

## Reaktor Stadiums



Aangesien die SO<sub>2</sub> ontbindingsreaktor adiabaties bedryf word, word geen hitte tot die reaktor bygevoeg nie, maar word die verhitting deur 'n eksterne hitteuitruiler verskaf. Die energiebalans wat oor die reaktor uitgevoer is, het die volgende vergelyking tot gevolg wat die verwantskap tussen omsetting en temperatuur aantoon,  $T = T^0 - 812 X_a$ . Hiermee kan die vinnige daling in temperatuur met reaksie verloop bepaal word. Deur van die energiebalans vergelyking gebruik te maak, kan bepaal word dat die temperatuur daal na ongeveer 630 °C waar 'n ooreenstemmende omsetting van 28% omsetting van SO<sub>2</sub> by 3 bar druk verkry kan word. Uit die figuur is dit duidelik dat 5 reaktorstadiums benodig word om 'n omsetting van 74% te verkry.

## Reaktor Konfigurasi



Die figuur toon die 5 reaktor-stadium uitleg met 4 intermediêre hitteuitruilers waarmee die gasstroom elke keer nadat dit 'n reaktor-stadium verlaat het, verhit word tot 870 °C deur die warm helium stroom voordat dit die volgende reaktor-stadium binnegaan. Aangesien daar geen hitteuitruiling in die reaktor plaas vind nie, vereenvoudig dit die ontwerp vergelykings van die reaktor en kan daar meer op die reaksie kinetika gekonsentreer word. Daar is gevind dat die volume van die hitteuitruilers wat die reaksiehitte voorsien meer as tien keer groter is as die gesamentlike volumes van al die reaktorstadiums om 74% omsetting van SO<sub>2</sub> te verkry. Dit beteken dat die reaksie deur hitteoordrag beheer word en nie




kleur die reaksiekinetika nie. Die reaksie in die reaktor vind dus plaas teen die tempo waarteen hitte voorsien word

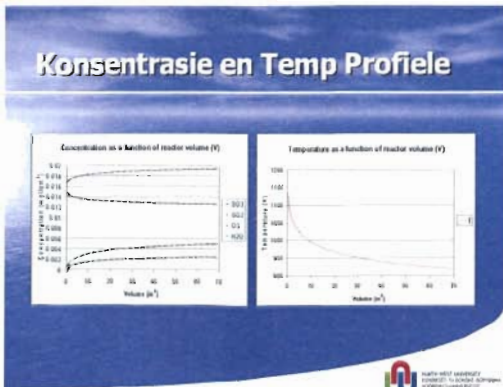
## Reaktor Ontwerpvergelykings

$$\frac{d(X)}{d(V)} = \frac{-r_1}{F_{A0}} \quad (1)$$

$$\frac{dT}{d(V)} = \frac{(-r_1) \cdot [-\Delta H_{rx}(T)]}{F_{A0} \cdot (\sum \theta_i \cdot C_{Pi} + X \cdot \Delta C_p)} \quad (2)$$

$$X = \frac{(\sum \theta_i \cdot C_{Pi}) \cdot (T - T_0)}{-[\Delta H_{rx}(T_0) + \Delta C_p(T - T_0)]} \quad (3)$$


Aangesien die reaktor adiabaties bedryf word, is  $Q = 0$  in al die ontwerpvergelykings. Nadat die reaktietempo-vergelyking ( $-r_A$ ) vir die reaksie bepaal is, kan die ontwerpvergelyking van die proploeireaktor bepaal word waarmee die omsetting wat verkry word as 'n funksie van die reaktorvolume bereken kan word (vergelyking (1)). 'n Energie balans wat oor die reaktor uitgevoer kan word lewer vergelykings (2) en (3) waarmee die temperatuurverandering oor die lengte van die reaktor bepaal kan word en die omsetting as 'n funksie van temperatuur. Die vergelykings is in differensiaal vorm en die sagte ware program "Polymath" is gebruik om die verskillende grootte te bepaal. 'n Reaksie kinetiese model is opgestel waarmee die volume van die reaktor bereken kan word om 'n sekere omsetting te verkry sowel as die berekening van die temperature en konsentrasies van die reagerende spesies by verskillende punte in die reaktor.



Die grafieke dui die konsentrasies van die reageerende spesies sowel as die temperatuur by enige punt in die reaktor aan wat met behulp van die reaktor model bereken kan word.



Vanweë die feit dat daar bewys is dat die reaktor werkweging deur hitteoordrag en nie kinetika beheer word, is daar besluit om die reaktor en hiteuitruiler in een eenheid te kombineer soos in die figuur aangetoon. Die nodige hitteoordragsvergelyking is in die reaktor ontwerpvergelyking ingesluit vir die ontwerp van die beoogde hiteuitruiler/reaktor eenheid. Daar word beoog om met die voltooiing van die finale ontwerp, 'n prototipe by NWU op te rig vir die doeleindes van verdere toetswerk en die insameling van opskaal data.