

Delft, November 1955



VERSLAG BEHORENDE BIJ HET FABRIEKSSHEMA
BEREIDING VAN WOLFRAAM

J.C.Abrahamse
Adriaan Pauwstraat 102
Delft.
J. van Dam
J.C. van Markenplein 1
Delft.

Indeling van het verslag.

Inleiding	blz. 1
Keuze van het proces	blz. 4
Beschrijving van het proces	blz. 5
Materiaalbalansen	blz. 10
Warmtebalansen	blz. 16
Apparatuur en materialen	blz. 20
Berekening van twee apparaten	blz. 22
<u>A</u> Zoutzuur voorwarmer	
<u>B</u> Waterstof - Waterstof warmtewisselaar	
Literatuurlijst	blz. 31

Hoofdstuk 1 Inleiding.

a) Voorkomen en gebruik van Wolfraam.

In de vorige eeuw omstreeks 1850 werd ontdekt dat wolfraam van belang was voor de productie van speciale staalsoorten. De toepassing van deze staalsoorten nam pas tijdens de eerste wereldoorlog een grote vlucht en dus ook de wolfraam producerende industrie. In het jaar 1910 werden de eerste gloeilampen met wolframdraad in gebruik genomen.

In de natuur komt het wolfraam voornamelijk voor als wolframiet en scheeliet. Wolframiet bestaat uit een mengsel van FeWO_4 en MnWO_4 , terwijl scheeliet voor het grootste deel bestaat uit CaWO_4 .

Wolfraam ertsen worden vooral in Azië gevonden, China en Birma zijn de grootste producenten van de wereld. Voorts leveren ook Brazilië, Bolivia, de Vereenigde Staten, Spanje en Portugal grote hoeveelheden erts.

Het gedolven erts wordt meestal op de vindplaatsen van de begeleidende gesteenten ontdaan. De Wolfraam verwerkende industrieën verwerken ertsconcentraten welke 60 tot 80 % WO_3 bevatten (Lit. 1)

In het jaar 1947 bedroeg de wereldproductie aan wolfraam ertsen ongeveer 23.000 ton , waarvan 90 % gebruikt werd voor de bereiding van verschillende wolfraam staalsoorten, 5 % voor de productie van wolframcarbide, elektrische contacten en non-ferro legeringen. De rest van de productie gaat naar de gloeilampen industrie. Voor het gebruik in gloeilampen dient het wolfraam zeer zuiver te zijn.

Voor de in dit verslag te beschrijven fabriek wordt uitgegaan van erts (wolframiet) afkomstig uit Spanje , dat 66,34 % WO_3 in geconcentreerde vorm bevat. De productie in Spanje in het jaar 1947 bedroeg 418 ton met een gemiddelde concentratie van 65 % WO_3 (Lit. 2)

b) Bereiding van wolframuit geconcentreerd erts.

Beschrijving van de mogelijke processen.

Het gehele proces is te splitsen in een drietal onderdelen:

1 Ontsluiting van het erts

2 Zuivering van het wolframzuur.

3 Reductie van het wolframoxide tot wolframpoeder.

ad 1 Een van de oudste methodes ter ontsluiting van wolframiet is het smelten met soda. Hierbij ontstaat natrium wolframaat het-

geen in water wordt opgenomen. IJzer en mangaan worden via de carbonaten tot oxyden omgezet en lossen dan niet op in het water. (lit. 5 en 6)

Een modernere methode is een behandeling van het erts met een oplossing van kali of natronloog of met vaste loog. Dit kan geschieden onder atmosferische druk of bij verhoogde druk in een autoclaaf. Na verwarmen gedurende een aantal uren wordt ook hier alkaliwolframaat gevormd. IJzer en mangaan blijven bij de behandeling met water als de hydroxyden achter. (lit. 2 en 8).

Voor de ontsluiting van scheeliet is de aangewezen weg een behandeling met zuur waarbij wolfraamzuur gevormd wordt. (lit 2)

Behalve deze methodes worden in vele octrooien nog andere methodes beschreven, welke echter niet in de industrie toegepast worden. (zie o.a. lit 1)

Uit de verkregen oplossing van alkaliwolframaat wordt het wolfraamtrioxyde neergeslagen door een behandeling met zuur. Bij deze precipitatie zijn in het bijzonder de temperatuur, concentraties en de aard van het zuur van grote invloed op de eigenschap van het verkregen wolfraamoxyde. Meestal wordt de precipitatie uitgevoerd met geconcentreerd zoutzuur. In sommige gevallen vindt ook een behandeling met calciumchloride plaats waarbij calciumwolframaat gevormd wordt, hetgeen door een behandeling met zoutzuur omgezet wordt in wolfraamzuur. (Lit 1,2,6)

ad 2 Het verkregen wolfraamzuur bevat echter nog vele onzuiverheden zoals ijzer, mangaan, silica- en aluminiumoxyde. Aangezien aan wolfraam bestemd voor de lampenindustrie zeer hoge eisen wat ^{betreft} de zuiverheid worden gesteld, dienen deze onzuiverheden verwijderd te worden. Hiertoe wordt het wolfraamzuur opgelost in ammoniak, waarbij dan ammoniumwolframaat gevormd wordt. Deze oplossing wordt vervolgens ingedampt waarbij tijdens het indampen het ammoniumparawolframaat uitkristalliseert. Door nu dit product opnieuw op te lossen in loog, na een ontleding met zoutzuur, wordt een zuivere oplossing van alkaliwolframaat verkregen. Uit deze oplossing kan men weer wolfraamzuur laten neerslaan door opnieuw zoutzuur toe te voegen. Zo nodig kan deze procedure herhaald worden totdat een product met de gewenste zuiverheid verkregen is. (lit. 2)

ad 3 Wolframmetaal kan verkregen worden door reductie van wolfraamoxyde. Indien ~~niet~~ geen product met een hoge zuiverheid wordt verlangd, kan volstaan worden met een reductie met koolstof. Dit wordt uitgevoerd door een mengsel van wolfraamoxyde en koolstof gedurende enkele uren te verhitten bij een temperatuur van 1400 °C (Lit. 1). Hierbij worden echter tevens carbiden gevormd, hetgeen

voor de bereiding van staalsoorten geen bezwaar is. Voor de bereiding van wolfraam voor de lampenindustrie dient men het wolfraamoxyde te reduceren met zuivere waterstof. Deze reductie wordt uitgevoerd in een oven bij een temperatuur welke varieert tussen de 550 en 800°C. Het gevormde wolfraampoeder is sterk afhankelijk, wat de eigenschappen betreft, van de temperatuur waarbij de reductie uitgevoerd wordt, er wordt namenlijk bij een hogere temperatuur een grover product verkregen. (Lit. 1,2,3,4,6,7,8)

Hoofdstuk II Keuze van het proces.

Waarom?

Aangezien als doel gesteld is het bereiden van wolfraampoe-
der voor de lampenindustrie en dus een product met een hoge graad
van zuiverheid verkregen moet worden, is hierdoor de keuze van
het te volgen proces al aanmerkelijk beperkt.

Gekozen is het moderne proces waarbij het erts door verwarmen
met een sterke natronloogoplossing ontsloten wordt. Deze metho-
de heeft het voordeel, dat het goedkoper is dan de methode waar-
bij het erts gesmolten moet worden met natriumhydroxyde, tevens
is van belang dat bij de voorgestelde methode reeds vele onzuiver-
heden verwijderd worden. Het gevormde wolfraamzuur wordt door herha-
ald oplossen en neerslaan in verschillende vormen ^{verontreinigingen} gezuiverd van
ongewenste producten. Uiteindelijk wordt dan zuiver wolfraamoxyde
verkregen. Het wolfraamoxyde wordt gereduceerd met behulp van ^{carbiden}
waterstof tot wolfraampoe-
der, daar met deze methode geen ~~nevenpro-~~
~~ducten~~ gevormd worden.

Omtrent het eventueel plaatsen van de fabriek in Nederland
is gedacht dit te doen ⁱⁿ ~~om~~ de nabijheid van een bedrijf waarvan
zuivere waterstof betrokken kan worden, zoals bijvoorbeeld stik-
stofbindingsbedrijven en de petroleumindustrie. ?
zout industrie?

Hoofdstuk III Beschrijving van het proces.

Als grondstof voor de bereiding van wolfraam is gekozen wolframiet waarvan een analyse zal worden gegeven in hoofdstuk IV.

Op grond van het hierna te beschrijven proces is het noodzakelijk gebleken het proces ladingsgewijs uit te voeren en slechts bij enkele onderdelen de continue werkwijze toe te passen.

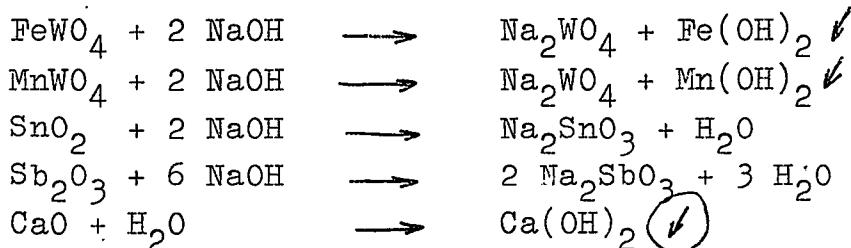
Het te volgen proces kan in de volgende onderdeelen gesplitst worden:

- a Ontsluiting van het wolframiet.
- b Bereiding van wolfraamzuur.
- c Bereiding van ammoniumparawolframaat.
- d Ontleding van het ammoniumparawolframaat en bereiding van het wolfraamoxyde.
- e Reductie van het wolfraamoxyde.

Voor de literatuur kan in het algemeen verwezen worden naar literatuur opgaven 1,2,3,4,8.

a Ontsluiting van het wolframiet.

Het gemalen erts (korrelgrootte 100-200 mesh) wordt tijdens roeren behandeld met een 20 % natronloog oplossing gedurende een achttal uren. Deze behandeling geschiedt bij een temperatuur welke varieert van 90 tot 100°C. Deze temperatuur wordt verkregen door de tank te verwarmen met stoom. Bij deze ontsluiting van het erts hebben we te maken met de volgende reacties:



Na de reactie wordt het mengsel verdund met een gelijk volume water en opnieuw opgewarmd tot 100°C waarna de vloeistof warm gefiltreerd wordt. Het verdunnen dient om het gevormde natriumwolframaat in oplossing te houden en het precipiteren van de ijzer en mangaan hydroxyden te bevorderen. Bij het filtreren worden verwijderd de genoemde ijzer en mangaan hydroxyden, alsmede calciumhydroxyde, niet omgezet wolframiet en de onoplosbare bijmengselen welke zich in het wolframiet bevinden. De verkregen koek wordt dan nog gewassen met een weinig water.

Teneinde de in de vloeistof opgeloste sulfiden te verwijderen, wordt aan het warme filtraat tijdens roeren nog een geringe hoeveelheid natriumperoxyde toegevoegd. De oplossing wordt dan weer opgewarmd tot ongeveer 85 °C en dan nog gedurende een uur geroerd,

max? of zeven?
mesh is geen maat voor de korrel, wel voor het zift

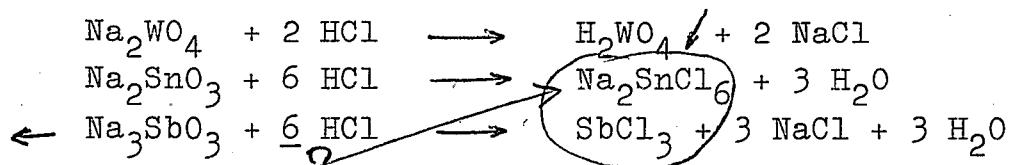
waarna de neergeslagen zwavel na afkoelen afgefiltreerd wordt. De aldus verkregen oplossing is nu gereed voor de volgende fase van het proces.

b Bereiding van wolfraamzuur.

Uit de literatuur (Lit. 1 en 2) bleek dat bij de bereiding van wolfraamzuur de zuiverheid van het verkregen product ~~ya~~ sterk afhankelijk is van de omstandigheden waaronder de precipitatie plaats vindt. In het bijzonder hebben de concentraties, de temperatuur, de aard van het zuur en de wijze van toevoegen invloed op de zuiverheid ^{van} (het neergeslagen wolfraamzuur).

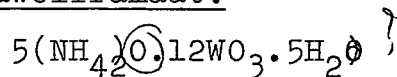
In de in de vorige alinea genoemde literatuur worden de ~~vol-~~
~~gende~~ omstandigheden opgegeven voor de bereiding van zuiver wol-
fraamzuur: De natriumwolframaat oplossing wordt behandeld met
-10% zoutzuur (20° Bé), dat verwarmd is in een voorwarmer tot een
temperatuur van 60 °C. Het verkregen mengsel laatmen vervolgens in
een tank lopen en het wordt dan verwarmd tot een temperatuur
welke ongeveer 100 °C is. Daarna wordt het mengsel tijdens krach-
tig roeren nog gedurende een uur op deze temperatuur gehouden.
Als beste concentraties voor de natriumwolframaat oplossing wor-
den opgegeven ongeveer 200 gram WO₃ en 30 tot 60 gram vrij NaOH
per liter (Lit.2). Tijdens het ontsluiten van het erts moeten dus
deze concentraties worden ingesteld.

Gedurende en na het toevoegen van het warme zoutzuur verlopen
dan de volgende reacties:



Het neergeslagen wolfraamzuur wordt afgefiltreerd en gewassen
met 10 % zoutzuur. Vervolgens wordt de koek naar een droogkast ge-
transporteerd, alwaar de koek gedroogd wordt op een temperatuur
van 170 °C. Bij deze temperatuur wordt een product verkregen dat
voor 92-93 % uit wolfraamoxyde (WO₃) en voor 7-8 % uit water
bestaat en ~~dat~~ ^{dat} dan juist ^{met} de theoretische samenstelling van het
wolfraamzuur overeenkomt. Door de literatuur wordt als rendement
van deze wolfraamzuur bereiding 98 % opgegeven (Lit 6)

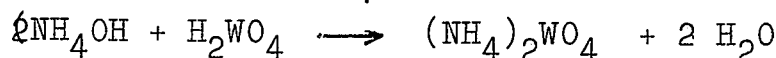
c Bereiding van het ammoniumparawolframaat.



Het verkregen wolfraamzuur poeder is door de ^{onvoldoende} zuiverheid nog
niet geschikt voor de reductie tot wolfraampoeder. Het wordt
daarom omgezet tot het kristallijne ammoniumparawolframaat. De

bereiding hiervan verloopt als volgt. Het wolfraamzuur wordt allereerst in een aparte tank gesuspenderd in gedestilleerd water, na aflaten in de reactie tank wordt aan de suspensie tijdens roeren een overmaat geconcentreerde ammonia (27 gew. %) toegevoegd. Het wolfraamzuur lost nu op onder vorming van een ammoniumwolframaat oplossing. Aan deze oplossing wordt nu zoveel gedestilleerd water toegevoegd, dat de oplossing een soortelijk gewicht van van ongeveer 1,12 verkrijgt, opdat er geen onoplosbaar parawolframaat gevormd wordt. Uit een geconcentreerde oplossing kan namelijk een onoplosbare vorm van het ammoniumparawolframaat uitkristalliseren, ^{die} ~~dat~~ elf moleculen kristal water inplaats van vijf moleculen bevat. Eventuele onzuiverheden welke nog in het wolfraamzuur aanwezig mochten zijn, lossen niet op in de ammoniakale oplossing en bezinken in de reactor. Na aflaten van deze onoplosbare producten wordt de heldere oplossing naar een verdamper gepompt, alwaar de oplossing tot een vijfde deel van het oorspronkelijke volume ingedampt wordt. Tijdens het verdampen wordt de overmaat ammoniak uitgedreven en zet het ammoniumwolframaat zich om in het ammoniumparawolframaat, waaraan de formule $5(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot 12\text{WO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ toegekend wordt. Dit product kristalliseert uit bij afkoelen en wordt verzameld op een filter. De verkregen koek wordt dan gewassen met gedestilleerd water.

De reactie die verloopt ^{is} ~~zijn~~:



In de literatuur wordt als rendement van dit deel van het proces 96 % opgegeven. (Lit. 2)

d Ontleding van het ammoniumparawolframaat en bereiding van het wolfraamxxyoxyde (WO_3)

De verkregen kristal massa van het ammoniumparawolframaat kan niet verder gezuiverd worden door omkristalliseren aangezien dit zout onoplosbaar is in water. De zuivering wordt verkregen door het product na ontleding over te voeren in een wolfraamzuur neerslag. Dit proces wordt als volgt uitgevoerd: Het ammoniumparawolframaat wordt behandeld met 40 % zoutzuur en tijdens roeren gedurende twee uren ^{gekookt,} ~~te koken~~, tijdens het koken verloopt dan de volgende ontledingsreactie:

$$5(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot 12\text{WO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 10\text{HCl} \rightarrow 10\text{NH}_4\text{Cl} + 10\text{H}_2\text{O} + 12\text{WO}_3$$

Het verkregen wolfraamzuur (of-Oxyde) laat men nu bezinken en na wegpompen van de bovenstaande heldere vloeistof wordt het neerslag nog enkele malen met gedestilleerd water gewassen, hierbij

wordt de wasvloeistof verwijderd door het neerslag te laten bezinken en de wasvloeistof weg te pompen.

Het in de reactie ketel achter gebleven wolfraamoxyde wordt nu opgelost in 28,8 % natronloog, waarbij ~~dan dus~~ een natriumwolframaat oplossing verkregen wordt welke naar een voorraadtank gepompt wordt. Het oplossen geschiedt ~~uiteraard~~ tijdens roeren en verwarmen. In verband met de volgende trap van het proces dient de natriumwolframaat oplossing een soortelijk gewicht van 1,12 te bezitten.

Teneinde nu een uniform eindproduct te kunnen bereiden, is het noodzakelijk dat vanaf dit punt ~~in het proces~~ het proces continu uitgevoerd wordt en niet meer, zoals hiervoor het geval was, ladingsgewijs.

De natriumwolframaat oplossing wordt vanuit de voorraadtank door een voorwarmer gepompt welke met stoom verwarmd wordt en welke de oplossing een temperatuur van ~~100~~ 100 °C doet aannemen. De warme vloeistof stroomt vervolgens nog door een klein filter alwaar eventuele bestanddelen vaste stof verwijderd worden en komt dan samen met de zoutzuur stroom. Gebruikt wordt zoutzuur (40 gew. % , s.g. 1,22, kookpunt 32 °C) dat tot kooktemperatuur verhit is in een voorwarmer, welke eveneens met stoom verwarmd wordt. De beide vloeistof stromen bezitten dezelfde stroomsnelheid n.l. 139 L/uur en worden even vóór de reactor samen gevoegd. Het mengsel stroomt dan de reactor in alwaar het nog geroerd wordt tijdens een verblijftijd van ongeveer 5 minuten. Dit reactie vat wordt dan ook continu afgetapt en de vloeistof wordt dan gefiltreerd over een raam en platen filter. Op dit punt heeft dan tevens het continue deel van het productie proces een einde genomen. In de reactor verloopt de volgende reactie:



Als rendement wordt aangenomen 95 %.

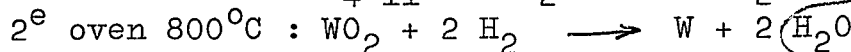
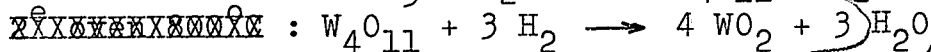
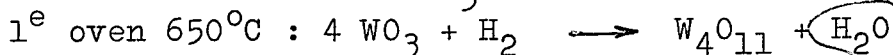
De wolfraamzuur koek wordt na goed wassen met gedestilleerd water naar een droogkast getransporteerd en gedroogd bij 200 °C. Het aldus verkregen droge wolfraamzuur wordt nu toegevoerd aan een continu werkende ~~droog~~ oven alwaar het wolfraamzuur verhit wordt op 800 °C en het de oven als wolfraamoxyde verlaat. (voeding oven: 15 kg/ uur)

Het aldus verkregen wolfraamoxyde is nu voldoende zuiver voor de reductie tot wolfraampoeier bestemd voor de lampen industrie.

e Reductie van het wolfraamoxyde.

Toegepast wordt de reductie met behulp van waterstof, ^{die} ~~dat~~ vooraf gezuiverd is door ~~het te~~ leiden over palladium op asbest (temperatuur 300 °C) en actieve kool. Het gas wordt gedroogd door het door droogtorens, gevuld met natriumhydroxyde tabletten en silica gel, te voeren.

De reductie van het WO₃ geschiedt in twee ovens



De reductie wordt als volgt uitgevoerd:

In de reductieoven I wordt het wolfraamtrioxyde gereduceerd tot wolfraamdioxyde door waterstof in tegenstroom over de door de ovenbuis bewegende vaste stof te laten strijken. Hierbij neemt de waterstof stroom het gevormde water als stoom mede. Het met de eerste oven verkregen wolfraamdioxyde wordt nu gemengd met wolfraamtrioxyde en wel in een verhouding van 1 deel WO₃ op 4,7 delen WO₂. Dit mengsel dient nu als voeding voor de tweede oven ~~dat~~ ^{die} een temperatuur van 800 °C bezit.

Beide ovenblokken zijn continu in bedrijf en worden electrisch verwarmd.

Het mengen van het wolfraamdioxyde met niet gereduceerd wolfraamtrioxyde en het handhaven van de oventemperaturen respectievelijk op 650 en 800 °C worden in de literatuur (Lit.2,3,4) als de beste omstandigheden genoemd voor het verkrijgen van een fijnkorrelig wolfraampoeder dat geschikt is voor het gebruik in de lampenindustrie.

Hoofdstuk IV Materiaalbalansen.

Zoals reeds in de inleiding vermeld is, wordt aangenomen dat Spaans wolframiet verwerkt kan worden. In de literatuur (Lit 2) wordt hiervoor de volgende samenstelling gegeven:

WO ₃	66,3 %
FeO	12,9
MnO	9,9
SiO ₂	3,9
Al ₂ O ₃	3,7
SnO ₂	1,2
Sb ₂ O ₃	0,3
As,S,P	0,5
Div.	<u>1,2</u>
	100,0 %

Voor de bepaling van de ^{te}produceren hoeveelheid wolfraam is als richtlijn aangenomen ^{men} het verbruik van wolframiet voor de lampen-industrie in Engeland en wel gedurende het jaar 1945. Voor Nederland zijn dergelijke gegevens niet gepubliceerd. Engeland verbruikte in het jaar 1945 180 long ton = 183.000 kg. erts, met een gemiddelde concentratie van 60 % WO₃.

Bij een gebruik van erts met 66 % WO₃ en onder aanname dat het bedrijf gedurende 280 dagen vol continu zal kunnen werken, geeft dit een dagelijks verbruik van:

$$\frac{60 \times 180 \times 1,016 \times 10^3}{66 \times 280} = 594 \text{ kg. erts per dag.}$$

Voor de verdere berekening is een verbruik van 700 kg. erts (66 % WO₃) per dag aangenomen.

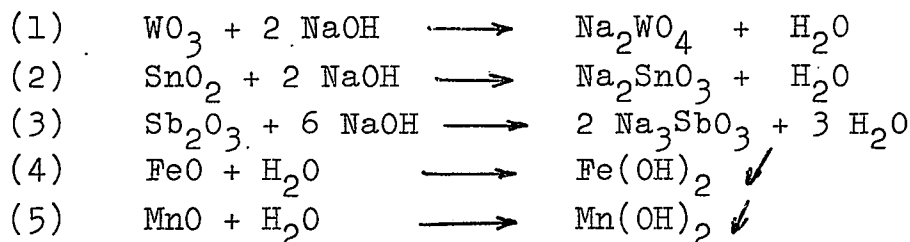
? Gewerkt wordt met 2 ladingen per dag van ieder 350 kg. erts. Dit in verband met de lange reactie tijd van het ontsluiten.

a Ontsluiting van het erts.

De oplostank krijgt als voeding:

232 kg WO ₃	} in de vorm van FeWO ₄ en MnWO ₄
41,5 kg FeO	
34,6 kg MnO	
13,7 kg SiO ₂	
13,0 Kg Al ₂ O ₃	
4,2 kg SnO ₂	
1,1 kg Sb ₂ O ₃	
1,7 kg As,S,P	
4,6 kg div.	

Het erts wordt ontleed met een natronloog oplossing. Voor de eenvoud der berekeningen wordt aangenomen dat de volgende reacties verlopen:



Nodig is aan NaOH voor reactie

$$\begin{array}{ll}
 (1) & \frac{232}{232} \times 2 \times 40 = 80,0 \text{ kg} \\
 (2) & \frac{4,2}{151} \times 2 \times 40 = 2,2, \text{ kg} \\
 (3) & \frac{1,1}{292} \times 6 \times 40 = 0,9 \text{ kg} \\
 & \text{totaal } 83,1 \text{ kg} \\
 & \text{overmaat } 45\% \quad 37,1 \text{ kg}
 \end{array}$$

? literatuur?

Totaal 120,2 kg NaOH

Theoretisch worden gevormd:

$$\begin{array}{ll}
 \text{reactie (1)} & \frac{232}{232} \times 294 = 294 \text{ kg Na}_2\text{WO}_4 \\
 & \frac{232}{232} \times 18 = 18 \text{ kg water} \\
 \text{reactie (2)} & \frac{4,2}{151} \times 213 = 5,9 \text{ kg Na}_2\text{SnO}_3 \\
 & \frac{4,2}{151} \times 18 = 0,5 \text{ kg water} \\
 \text{reactie (3)} & \frac{1,1}{292} \times 2 \times 239 = 1,8 \text{ kg Na}_3\text{SbO}_3 \\
 & \frac{1,1}{292} \times 3 \times 18 = 0,2 \text{ kg water} \\
 \text{reactie (4)} & \frac{45,1}{72} \times 90 = 56,5 \text{ kg Fe}(\text{OH})_2 \\
 & \text{nodig is } \frac{45,1}{72} \times 18 = 11,3 \text{ kg water} \\
 \text{reactie (5)} & \frac{34,6}{71} \times 89 = 43,3 \text{ kg Mn}(\text{OH})_2 \\
 & \text{nodig is } \frac{34,6}{71} \times 18 = 8,8 \text{ kg water}
 \end{array}$$

Aangezien de omzetting van wolframiet in oplosbaar natrium-wolframaat slechts met een rendement van 90 % verloopt, wordt dus gevormd 265 kg Na₂WO₄. Er kan dus ook met minder loog volstaan worden n.l. 120,2 - 8,0 = 112,2 kg NaOH

In de literatuur wordt een eindconcentratie aanbevolen van 200 gram WO₃/ liter, het eindvolume moet dus worden $\frac{209000}{2000} = 1045 \text{ L}$.

Gebruiken we loog van 20 % NaOH, dan wordt dus opgelost in 560 L 20 % ige NaOH en aan het eind verdund met 485 L water tot ~~1045 L water tot~~ 1045 L oplossing.

Resumé: in 350 kg wolframiet

560 L 20 % NaOH

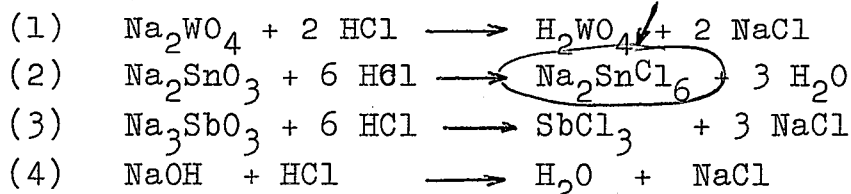
485 L water

zelfde bron? ↗

uit 1045 liter oplossing met 37,1 kg NaOH , 265 kg Na₂WO₄ , 5,9 kg Na₂SnO₃ , 1,8 kg Na₃SbO₃ alsmede neerslag en niet omgezet erts.
b Filter I Afgefiltreerd wordt 150 kg vaste stof. Nemen we aan dat de filterkoek (20 %) ^{vloeistof} water bevat, dan weegt de ~~de~~ koek totaal 180 kg Met 100 liter water wordt gewassen, het filtraat bevat de onder a genoemde stoffen.

c Zwavelverwijdering Op aanwijzing van de literatuur wordt 2 % Na₂O₂ op het aanwezige WO₃ toegevoegd, dus 4,5 kg Na₂O₂.

d Wolfraamzuurbereiding. De bereiding van wolfraamzuur geschiedt met 32 % zoutzuur. De volgende reacties verlopen:



! bij 50% overmaat!
 $\rightarrow \text{Ph} = 0,1$
 $= 0,6 \text{ N zout}$

Theoretisch is aan zoutzuur nodig 107 kg HCL. Bij gebruik van een ^{50 %} ige overmaat is in totaal nodig 160,5 kg HCL. Gebruikt wordt ^{0/10} zoutzuur met een sterkte van (20°Bé) zodat dan nodig is 435 liter zoutzuur. Als rendement wordt opgegeven 98 % dus wordt verkregen

$$\frac{98}{100} \times \frac{265}{294} \times 250 = 221 \text{ kg wolfraamzuur}$$

Uit de precipitatietank komt dus 1480 liter vloeistof, waarin 221 kg neerslag.

e Filtratatie Afgefiltreerd wordt 221 kg koek waar ^{bij} (25 %) ^{vloeistof} water.

Gewassen wordt met 1000 liter 10 % zoutzuur d.i. 315 liter 20°Bé zoutzuur in 685 liter water. Het filtraat bestaat uit 1390 liter oplossing die tezamen met de wasvloeistof in het riool verdwijnt.

f droger Als voeding dient 276 kg koek. Er uit gaat 221 kg wolfraamzuur en 55 kg waterdamp.

g Bereiding van ammoniumparawolframaat Als voeding dient 221 kg wolfraamzuur hetgeen gesuspenderd wordt in 250 liter water.

1) In de reactor verloopt de reactie :

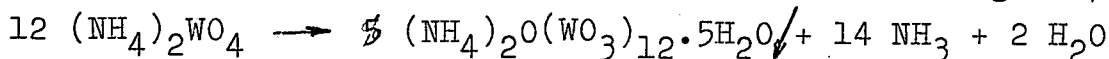


Nodig is dan $2 \times \frac{221}{250} \times 35 = 62 \text{ kg NH}_4\text{OH}$, voegen een overmaat van 10 % toe, zodat in totaal toegevoegd moet worden 68 kg NH₄OH.

Gebruikt wordt 27 % NH₄OH oplossing (s.g. 0,9), zodat dan nodig is $\frac{68}{0,27} \times \frac{1}{0,9} = 280 \text{ liter ammonia oplossing.}$

Verkregen wordt : $\frac{221}{250} \times 280 = 248 \text{ kg } (\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$ in 1250 liter oplossing, na toevoeging van 720 liter water.

2) Verdampert: Hier ontstaat ammoniumparawolframaat volgens:



Het ammoniumparawolframaat is op te vatten als een complex van 5 moleculen (NH₄)₂ WO₄

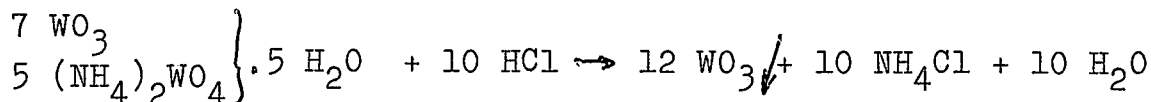
met 7 moleculen WO_3 , welk complex dan nog 5 moleculen kristalwater bevat.

Er ontstaat $\frac{221}{250 \times 12} \times 3134 \times 0,9 = 208$ kg ammoniumparawolframaat, bij een rendement van 90%.

Verdampst worden 1000 liter water en de overmaat ammoniak

h Filtratie: Gefiltreerd wordt een brei van 208 kg kristallen in 250 liter water. Gevormd wordt een koek bestaan de uit 208 kg kristallen en (20) kg water.

i Ontleding van het parawolframaat. Dit geschiedt met 40 % zoutzuur volgens de reactie vergelijking:



De literatuur geeft aan om per ~~kg~~ 100 kg kristallen 120 liter zoutzuur te gebruiken (40 %, s.g. 1,2)

Nodig is dus $2,08 \times 120 = 250$ liter zoutzuur. Gevormd wordt

$$\frac{208}{3134} \times 12 \times 232 = 185 \text{ kg } \textit{wolframaam oxyde.}$$

j Oplossen van het WO_3 in loog 185 kg WO_3 wordt, nadat de kristallen zijn gewassen met gedestilleerd water, opgelost in loog.

Daar voor de hierna volgende bewerking de concentraties van groot belang zijn wordt het voorschrift, dat in de literatuur gegeven wordt, gevolgd. Dit voorschrift luidt: 72,8 ~~liter~~ ^{kg} NaOH in 222 liter gedestilleerd water is nodig voor de precipitatie (theoretisch is nodig 64 kg.) Verdund wordt tot een soortelijk gewicht van 1,12 d.w.z. met 1450 L gedestilleerd water tot een eindvolume van 1670 liter. Stel het rendement van de wolframaamoxyde bereiding en het oplossen op 95 %, dan wordt dus gevormd:

$$\frac{95}{100} \times \frac{185}{232} \times 294 = 223 \text{ kg natriumwolframaat}$$

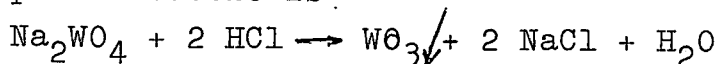
k Precipitatie van het WO_3

Deze precipitatie geschiedt dus continu.

Voeding : 1670 L oplossing (s.g. 1,12) per 12 uur

1670 L zoutzuur (s.g. 1,12) per 12 uur

De verlopende reactie is



Theoretisch is nodig $\frac{223}{294} \times 2 \times 56,5 = 55,5$ kg HCl per 12 uur

Toegevoegd wordt op aanwijzing van de literatuur 80 kg HCl per 12 uur.

Indien het rendement van de precipitatie 95 % bedraagt, dan wordt verkregen:

temperatuur?

$$\frac{95}{100} \times \frac{223}{294} \times 250 = 180 \text{ kg wolfraamzuur per 12 uur}$$

1 Filtratie : afgefiltreerd wordt 180 kg wolfraamzuur, bevattende 36 kg water.

m Drogers : Gedroogd wordt eerst discontinu en wel 1 lading per 12 uur bij een temperatuur van 200 °C. Hier wordt watervrij wolfraamzuur verkregen.

Voeding : 180 kg H_2WO_4 + 36 kg water

product : 180 kg H_2WO_4 + 36 kg gevormde waterdamp

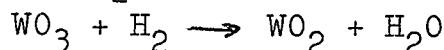
Vervolgens wordt continu gedroogd bij een temperatuur van 800°C, dan wordt watervrij wolframoxijde gevormd en wel 168 kg WO_3 per 12 uur.

n Reductieovens.

1) Serie I. 20 reductie buizen worden gevoed met 280 kg WO_3 per dag, 56 kg wordt in ovenserie II gebracht (zie aldaar).

De literatuur (Lit. 3) geeft aan, dat per ovenbuis, die 8-15 kg WO_3 per 24 uur reduceert, 800 n.liter waterstof /uur wordt overgeleid. In ons geval gebruiken we totaal 18400 n.liter waterstof per uur voor 20 buizen. Dus per buis 14 kg WO_3 /dag = 584 gram /uur en 920 nL waterstof /uur.

De eerste serie ovens reduceert, bij een temperatuur van 650 °C, het WO_3 tot WO_2 :



Theoretisch is voor deze reductie nodig:

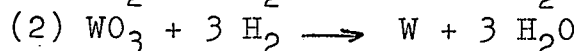
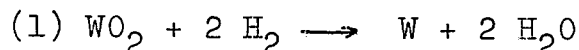
$$\frac{280}{232} \times \frac{1}{24} \times 22,4 \cdot 10^3 = 1131 \text{ (nL) } H_2/\text{uur}$$

$$\text{Gevormd wordt: } \frac{280}{232} \times \frac{1}{24} \times 18 \cdot 10^3 = 0,9 \text{ kg stoom/uur} = 1131 \text{ (nL) /uur}$$

Uit de ovens komt: $18400 - 1131 = 17269 \text{ nL } H_2$ /uur en 1131 (nL) stoom per uur.

Aan WO_2 wordt gevormd: $\frac{280}{232} \times 216 = 261 \text{ kg } WO_2/\text{dag} = 10,9 \text{ kg } WO_2/\text{uur}$.

2) Serie II. Hier worden 20 reductie buizen gevoed met 261 kg WO_2 en 56 kg WO_3 per dag. Wederom wordt gereduceerd met 18400 nL H_2 /uur. Bij de reductie temperatuur van 800°C treden de volgende reactie op:



Theoretisch is nodig aan waterstof:

$$\text{reactie (1)} \quad \frac{261}{216} \times 2 \times 22,4 \cdot 10^3 \times \frac{1}{24} = 2259 \text{ nL } H_2/\text{uur}$$

$$\text{reactie (2)} \quad \frac{56}{232} \times 3 \times 22,4 \cdot 10^3 \times \frac{1}{24} = 676 \text{ nL } H_2/\text{uur}$$

$$\text{Totaal} \quad 2935 \text{ nL } H_2/\text{uur}$$

Gevormd worden: waterdamp

$$\text{reactie (1)} \quad \frac{261}{216} \times 2 \times 18 \times \frac{1}{24} = 1,82 \text{ kg } H_2O / \text{uur}$$

$$\text{reactie (2)} \quad \frac{56}{232} \times 3 \times 18 \times \frac{1}{24} = \underline{0,54 \text{ kg H}_2\text{O /uur}}$$

$$\text{totaal} \quad 2,36 \text{ kg H}_2\text{O /uur}$$

Wolfraam

$$\text{reactie (1)} \quad \frac{261}{216} \times 184 \times \frac{1}{24} = 9,26 \text{ kg W /uur}$$

$$\text{reactie (2)} \quad \frac{56}{232} \times 184 \times \frac{1}{24} = \underline{1,84 \text{ kg W /uur}}$$

De totale productie bedraagt dus 11,1 kg W /uur.
~~Het~~ ^{De} gebruikte waterstof wordt na ^{droging} ~~zuivering~~ ^{re-}gebruikt gecirculeerd. Het totale verbruik aan waterstof voor 2 ovenseries, dus de vereiste suppletie van verse waterstof, bedraagt $1131 + 2935 = 4066 \text{ nL}$ waterstof per uur.

o Samenvatting van de materiaalbalansen.

In de onderstaande tabel is een samenvatting gegeven van de benodigde en verkregen hoeveelheden stoffen. Alle hoeveelheden zijn opgegeven voor de verwerking van één lading per 12 uur.

bewerking	W-verbinding voeding	chemicalien verbruik	water verbruik	W-verbinding opbrengst
erts opl.	700kg erts	560 L NaOH	485 L	265 kg Na_2WO_4
WO_3 prec.	265 kg Na_2WO_4	435 L (20 %)		221 kg H_2WO_4
$(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$ bereiding	221 kg H_2WO_4	32 % HCl		
		280 L	970 L	248 kg $(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$
		27 % NH_4OH	gedest. water	
verdampen	248 kg $(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$			208 kg amm. para wolframaat.
ontleding	208 kg krist.	120 L HCl		185 kg WO_3
		40 %		
oplossen	185 kg WO_3	72,8 kg NaOH	1672 L	223 kg Na_2WO_4
precipiteren	223 kg Na_2WO_4		gedest. water	
		1670 L HCl		180 kg H_2WO_4
		40 %		
drogers	180 kg H_2WO_4			168 kg WO_3
reductie	168 kg WO_3	49 nm ³ H_2		<u>133 kg W</u>

Hoofdstuk V Warmtebalansen.

Van de volgende apparaten worden de warmtehoeveelheden berekend: zoutzuur voorwarmer I ,verdampers ,zoutzuur voorwarmer II , voorwarmer voor de voeding ,droger 800 °C , reductieovens ,waterstof-waterstof warmtewisselaar , waterstof koeler.

De zoutzuur voorwarmer I en de waterstof-waterstof warmtewisselaar zijn gekozen als de apparaten welke doorgerekend werden, voor de berekening hiervan wordt verwezen naar het desbetreffende hoofdstuk.

1) Verdampers.

De verdampers wordt gevoed met 1250 liter oplossing, welke tot 250 liter wordt ingedampd. Bij atmosferische druk moet dus verdampd worden 1000 liter water.

Aan warmte is dus nodig:

1) opwarmen 1250 liter vloeistof van 20 naar 100°C (stel s.w. =1)

$$1250 \times 80 \times 4,18 \times 10^3 = 418 \cdot 10^3 \text{ kJ}$$

2) verdampen 1000 liter water $1000 \times 2250 = 2250 \times 10^3 \text{ kJ}$

Totaal is dus nodig $2668 \times 10^3 \text{ kJ}$ per lading.

Opm. de ontwijkende hoeveelheid ammoniak wordt verwaarloosd, daar deze slechts een geringe bijdrage levert tot de hoeveelheid benodigde warmte. ~~levert~~. Het kookpunt is gesteld op 100°C ,in werkelijkheid zal dit ook iets ^{lager} hoger zijn.

2 Zoutzuur voorwarmer II.

139 liter zoutzuur per uur moet van 20°C to 33°C (kookpunt) verwarmd worden. De soortelijke warmte van 40 % zoutzuur is 0,75 kcal/kg.

Voor dit voorwarmen is dus nodig :

$$1,2 \times 139 \times 13 \times 0,75 = 1,63 \times 10^3 \text{ kcal/uur} = 1,9 \text{ kW}$$

eenheden

3) Voeding voorwarmer

139 liter natriumwolframaat oplossing moet worden opgewarmd van 20 tot 100°C. Als de soortelijke warmte en het soortelijk gewicht gelijk 1 gesteld worden ,is voor dit opwarmen nodig:

$$139 \times 80 = 11120 \text{ kcal} = 12,9 \text{ kW}$$

4) Droger 800°C

180 kg wolframzuur wordt gedroogd bij 800°C, waarbij 168 kg WO₃ en 12 kg waterdamp ontstaan. Dit alles per 12 uur.

Aan warmte is nodig:

a verwarmen van de vaste stof van 20 - 800°C

b verwarmen en verdampen van het aanwezige kristalwater.

De soortelijke warmte van het wolframzuur is niet bekend, we vatten wolframzuur daarom ~~het wolframzuur~~ op als te bestaan uit
WO₃

WO₃ en een molecuul kristalwater

ad a De s.w. van WO₃ is 16,0 + 0,00774 kcal/mol. °K .De gemiddelde temperatuur is 410 °C ,de s.w. wordt dan dus 21,3 cal/mol. °C

Aan warmte is dus nodig:

$$\frac{168}{184} \times 21,3 \times 780 = 15,2 \times 10^3 \text{ Cal/12 uur} = 1470 \text{ W}$$

ad b 1 kg water per uur wordt opgewarmd van 20 - 100°C , verdampt en de damp wordt van 100 - 800°C verwarmd. De verdampingswarmte van water is 536 Cal /kg en de s.w. van waterdamp is 0,55 Cal/kg°C, *gemiddeld!*
Aan warmte is dus nodig :

$$1 \times 80 + 1 \times 536 + 1 \times 780 \times 0,55 = 1046 \text{ Cal/ uur} = 1220 \text{ W}$$

Totaal is dus nodig 2690 W, in aanmerking nemende de stralingsverliezen en het rendement stellen we het benodigd vermogen op 3 kW.
W/o verlies in 12 uur? Of duurt het drogen korter?

6) Reductieovens.

Serie I : Deze serie wordt gevoed met 11,7 kg WO₃ en 18400 nL waterstof per uur. De temperatuur van de oven is 650 °C.

Aan warmte is nodig :

a) opwarmen van het WO₃ tot 650°C

b) opwarmen van de waterstof.

c) vorming van 0,91 kg water/uur van 650°C

d) reactie warmte.

ad a) De s.w. van WO₃ bij een gemiddelde temperatuur van 335°C is 20,8 kcal/kmol. °C. Nodig is dus aan warmte:

$$\frac{11,7}{232} \times 630 \times 20,8 = 660 \text{ Cal /uur} = 770 \text{ W}$$

ad b) De waterstof komt in de ovens met een temperatuur van 500°C (zie hiervoor de berekening van het betreffende apparaat). De s.w. van waterstof bij een gemiddelde temperatuur van 575°C is 7 Cal/kmol. °C. Aan warmte is dus nodig:

$$\frac{18400}{22,4} \times 150 \times 7 = 860 \text{ Cal /uur} = 1 \text{ kW}$$

ad c) Het water moet worden verwarmd tot 100°C, worden verdampt en de waterdamp moet worden verwarmd tot 650 °C (s.w.= 0,48). Voor de eenvoud van deze globale berekeningen wordt namenlijk verondersteld dat het water bij 20 °C ontstaat(zie ad d).

Dit kost aan warmte:

$$0,91 \times 80 + 0,91 \times 536 + 0,91 \times 0,48 \times 550 = 801 \text{ Cal /uur} = 930 \text{ W}$$

ad d) De reactie warmte kan ijt de volgende vormingswarmten worden berekend: H₂O = 68,3 Cal/mol (vloeibaar 20°C)

$$\text{WO}_2 = 130 \quad "$$

$$\text{WO}_3 = 195,7 \quad "$$

Bij de vorming van WO₂ uit WO₃ en H₂ komt dus 2,6 Cal/mol vrij.

Dus bij een verwerking van 11,7 kg WO_3 per uur is dit :

$$\frac{11,7}{232} \times 2,6 \times 10^3 = 131 \text{ Cal/uur} = 153 \text{ W die vrij komt.}$$

In totaal is aan warmte nodig : $770 + 1000 + 930 + 150 = 2550 \text{ W}$, afgerond , in verband met stralingsverliezen en rendement , 3 kW voor 20 buizen, dus 150 W per buis.

Serie II : De tweede serie wordt gevoed met 10,9 kg WO_2 , 2,3 kg WO_3 en 18400 nl waterstof per uur. De temperatuur van de oven is 800°C .

Aan warmte is nodig: a opwarmen van WO_3 en WO_2 tot 890°C

b opwarmen van de waterstof.

c vorming van ~~kw~~ 2,35 kg ~~kw~~ H_2O /uur van 800°C

d reactie warmte

ad a) De soortelijke warmte van WO_2 is niet bekend , we stellen deze soortelijke warmte gelijk aan die van WO_3 bij een gemiddelde temperatuur van 410°C . s.w. WO_3 = 20,8 Cal / mol $^\circ\text{C}$.

Nodig is dan :

$$WO_2 : \frac{10,9}{216} \times 20,8 \times 780 = 820 \text{ Cal / uur} = 955 \text{ W}$$

$$WO_3 : \frac{2,3}{232} \times 20,8 \times 780 = 161 \text{ Cal/uur} = 187 \text{ W}$$

ad b) De begintemperatuur is 500°C , dus is nodig:

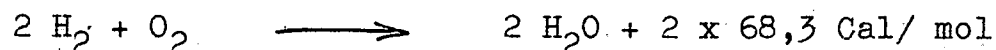
$$\frac{18400}{22,4} \times 7 \times 300 = 2 \text{ kW}$$

ad c) opwarmen , verdampen en verwarmen van de waterdamp kost:

$$2,35 \times 80 + 2,35 \times 536 + 2,35 \times 0,48 \times 700 = 2238 \text{ Cal / uur} = 2,5 \text{ kW}$$

ad d)

De reactie warmte wordt uit de volgende vergelijkingen berekend :



Bij de reductie van 10,9 kg WO_2 / uur tot wolfraam komt dus:

$$\frac{10,9}{216} \times 6,6 \times 10^3 = 332 \text{ Cal/uur} = 385 \text{ W vrij.}$$

Bij de reductie van 2,3 kg WO_3 / uur tot WO_2

$$\frac{2,3}{232} \times 2,6 \times 10^3 = 25,8 \text{ Cal / uur} = 30 \text{ W}$$

en bij de reductie tot wolfraam:

$$\frac{2,14}{216} \times 6,6 \times 10^3 = 65,3 \text{ Cal / uur} = 76 \text{ W}$$

In totaal is aan warmte nodig : $2000 + 955 + 187 + 2500 - 385 - 30 - 76 = 5151 \text{ W}$. Afgerond wordt dit 6 kW.

2) Waterstof koeler.

De gebruikte waterstof wordt, na de verse waterstof voorgewarmd te hebben, met water gekoeld alvorens het de gashouder ingaat. Het gas bestaat uit: 32734 nL H_2 / uur en 3,26 kg stoom/ uur. De temperatuur waarbij het gas de koeler inkomt bedraagt $319^{\circ}C$.

Afgestane warmte :

afkoeling H_2 van $319^{\circ}C$ tot $65^{\circ}C$: 3100 W

afkoeling waterdamp 319 tot $65^{\circ}C$: 510 W

Berekening leerde dat de waterdamp niet condenseerde, de partiële spanning bleef lager dan de verzadigingsdruk.

De op te nemen warmte door het koelwater is dus 3610 W. Stel dat het water van 10 tot $40^{\circ}C$ opgewarmd wordt, dan is nodig

$$\frac{3610}{30 \times 4200} \times 3600 = \text{Ongeveer } 100 \text{ liter water per uur.}$$

Wat is het dauwpunt?

Hoofdstuk VI Apparatuur en materialen.

De gebruikte oplos- en neerslag tanks zijn voorzien van propellorroerders met directe aandrijving door een electromotor en zijn, waar nodig, voorzien van een stoommantel voor verwarming. Waar met kokend zoutzuur of met ammoniak gewerkt wordt zijn de vaten afgesloten en voorzien van een schoorsteen om de dampen af te voeren.

Het materiaal waarvan de vaten geconstrueerd zijn, is in de regel roestvrij staal daar met corrosieve stoffen gewerkt wordt. Het ontleed vat voor het ammoniumparawolframaat is van Hastelloy A geconstrueerd. Voorraad vaten voor niet corrosieve stoffen zijn van constructie staal, voor zoutzuur van grafiet (Karbate)

Enige apparaten worden hieronder in het kort besproken.

a) Filters. Onderstaande tabel geeft voor de filterpersen de afmetingen en de gebruikte materialen.

filter No	af te filtreren stof	aantal ramen	afm. v/e raam en plaat	materiaal
1	onomezet etts	20	500x500x45	brons
2	zwavel	2	250x250x30	roestvrij staal
3	wolfraamzuur	13	500x500x60	roestvrij staal
4	amm. parawolfr.	13	500x500x60	roestvrij staal
5	wolfraamzuur ^{oxyde}	10	500x500x60	roestvrij staal

Er worden dus alleen plaat en raam filters gebruikt.

b) Voorwarmers en warmtewisselaars.

In het hoofdstuk berekening van twee apparaten zijn een voorwarmer en een warmtewisselaar uitvoerig beschreven.

De andere voorwarmers die in het systeem voorkomen zijn:

1 Voorwarmer natr iumwolframaat oplossing. Dit geschiedt met stoom van 120°C in een warmtewisselaar met zeven gangen van 930 mm. lengte, inwendige buisdiameter 12,7 mm. en een wanddikte van 3 mm. Materiaal: roestvrij staal. De gehele warmtewisselaar heeft dan als afmetingen lengte 930 mm + 2x kop van 100 mm en een uitwendige diameter van 120 mm.

2 Voorwarmer voor 40 % zoutzuur. Verwarming met stoom. Dit is een kleine voorwarmer n.l. één gang van 180 mm lengte. Het materiaal is ^{ver. p.p.p.} ~~van~~ grafiet. Karbate.

3 Waterstofkoeler. De waterstof wordt met water gekoeld in een ^{800°C} koeler met 16 gangen van 25,4 mm inwendige pijpdiameter. De totale afmetingen zijn: lengte 1125 mm, diameter 200 mm. Als constructie materiaal is staal gebruikt.

c) Verdamper.

Deze heeft 40 verticale pijpen van 51^{mm} inwendige diameter en een hoogte van 500 mm. De totale diameter is 600 mm, de hoogte 500 mm verwarmingssectie en 1250 dampsectie. Ook hier ^{milk} als constructie mate-

riaal roestvrij staal gebruikt.

Opl. is ammoniaktaal

d) Drogers.

Het wolfraamzuur wordt gedroogd bij een temperatuur van 170 respectievelijk 200°C in een kastdroger, waarin zich twee rijen van negen bakken bevinden. De afmetingen van een bak zijn: hoogte 30 mm, lengte 700 mm en breedte 400 mm. De lucht, welke in de droger circuleert met behulp van een ventilator en eventueel ververst kan worden, wordt verwarmd door elektrische verwarmingspiralen. De totale afmetingen van de kast zijn: 1800 mm hoog, 1400 mm breed en 800 mm diep.

De droger welke wolfraamzuur bij 800°C droogt bestaat uit een roterende roestvrij stalen buis in een elektrische oven. De voeding vindt plaats met behulp van een transportschroefje uit een hopper. De buis is 1500 mm lang en heeft een inwendige diameter van 30 mm.

e) Reactor voor continue WO_3 precipitatie.

Dit is een klein vat van chroom nikkel staal, 440 mm ~~lang~~ hoog en 265 mm diameter. Het is voorzien van een roerder en een stoommantel. De ^{gemiddelde} verblijftijd = $\frac{\text{volume reactor}}{\text{hoeveelheid voeding/sec}}$ = 300 sec.

f) Reductieovens, twee blokken met ieder 20 buizen, worden continu gevoed uit een hopper, die de voeding voor één dag kan bevatten, met een transportschroefje.

De buizen ~~zijn~~ 6 meter lang, waarvan 4 meter verwarmde zone. Het materiaal is ~~chroomstaal~~, de buisdiameter is 60 mm. De verwarming geschiedt elektrisch en de buizen draaien met eensnelheid van 2 tot 3 omwentelingen per minuut rond.

De voedingsvatjes en de eindproduct vaatjes worden met de hand gevuld en geleegd.

g) Regelapparatuur.

Alleen in dat gedeelte van het bedrijf waar het proces continu uitgevoerd wordt, is de benodigde regelapparatuur aangebracht. Verder is alleen ~~daar~~ ^{daar} apparatuur aangebracht, waar het meten van temperatuur van belang is.

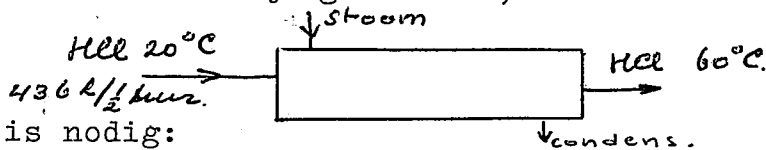
Hoofdstuk VII Berekening van twee apparaten.

A Berekening van zoutzuur voorwarmer I (J. van Dam)

*Waarom niet
in een stroomopvoer?*

a Globale afmetingen.

436 liter zoutzuur moet in een half uur van 20°C tot 60°C worden opgewarmd met verzadigde stoom van 120 °C. De sterkte van het zoutzuur is 32 % en het soortelijk gewicht 1,16.



Voor dit opwarmen is nodig:

$$436 \times 1,16 \times 0,65 \times 40 \times 1,163 \times 2 = 30,6 \text{ kJ/sec}$$

$$\text{Aan stoom nodig } \frac{30,6 \times 10^3}{526 \times 4,19 \cdot 10^3} = 12,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/sec} = 25 \text{ kg per half uur}$$

(De verdampingswarmte van 120°C stoom, 2 atm is n.l. 526 kcal/kg)

Met de formule $\phi_w = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{lm}$ is globaal het verwarmend oppervlak te berekenen.

ϕ_w = hoeveelheid toe te voeren warmte in kW

A = verwarmend oppervlak m²

U = totale warmteoverdrachtscoëfficiënt in J/m² °C sec

(ΔT)_{lm} = log. gemiddelde van het temperatuurverschil.

Voor U is in dit geval 2000 genomen.

$$A = \frac{\phi_w}{U \times (\Delta T)_{lm}} = \frac{30,6 \times 10^3}{2000 \times 78} = 0,196 \text{ m}^2$$

Daar bij benadering $A = \pi \times D \times L$ is , geldt voor een $\frac{1}{2}$ inch pijp:

$$L = \frac{A}{\pi \times D} = \frac{0,196}{3,14 \times 0,0227} = 4,9 \text{ meter}$$

Kiezen we drie pijpen , dan is de lengte van 1 pijp: 1,63 meter.

De stroomsnelheid per pijp wordt $\frac{1/3 \phi_w}{F} = \frac{436 \times 10^{-3}}{3 \times 60 \times 30 \times \frac{1}{4} \pi D^2} = 0,636 \text{ m/sec}$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} = \frac{1160 \times 0,636 \times 0,0127}{1,5 \times 10^{-3}} = 6200 \text{ Destroming is dus turbulent.}$$

b De warmteoverdrachtscoëfficiënten.

1) Condenserende stoom op pijpen.

pijpen horizontaal!

Hiervoor geldt:

$$\alpha_i = \frac{r_v \rho^2 \lambda^3 g}{n D_u \eta (\Delta T)_{fm.}} \times 0,725$$

Hierin is:

r_v = verdampingswarmte vanwater 120°C, 2 atm = 526 kcal/kg = 2200 x 10³ J/kg

ρ = soortelijk gewicht condensaat = 958,4 kg/m³

λ = geleidingsvermogen condensaat = 0,68 J/m °C sec.

g = versnelling van de zwaartekracht = $9,81 \text{ m/sec}^2$

n = aantal pijpen onder elkaar = 1

D_u = uitwendige diameter van de pijp = $19,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

η = dynamische viscositeit bij 100°C = $0,284 \times 10^{-3} \text{ Nsec/m}^2$

$T = 20^\circ\text{C}$ = temperatuur verschil tussen stoom en pijpwand. ρ, λ en η van het condensaat worden bij 100°C ~~genomen~~ ^{men}, aangenomen wordt dat ~~dit~~ de temperatuur van de pijpwand en ook de temperatuur van het condensaat is.

Na invullen van de verschillende gegevens vinden we voor:

$$\alpha_1 = 11230 \text{ J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C sec}$$

2) Geleidingsvermogen van de pijpwand.

Voor het gebruikte materiaal "Karbate impervious Graphite" geeft de fabrikant een λ_{op} van $85 \text{ BTU/hr sq ft } ^\circ\text{F/ft}$ voor $1/2 - 2$ inch pijpen.

Dit is dus $85 \times 1,73 \text{ W/m}^\circ\text{C} = 147 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

3) Warmteoverdracht zoutzuur - wand.

Deze α kan uit de volgende vergelijking, geldende voor turbulente stroming door ronde pijpen, berekend worden:

$$Nu = 0,027 (Re)^{0,8} (Pr)^{1/3} \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14}$$

(literatuur 9)

waarin $Nu = \frac{\alpha_2 D_i}{\lambda}$

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\eta}{\lambda} \frac{c_p}{\lambda}$$

$$Re = \frac{\rho v D_i}{\eta}$$

De stofconstanten worden bij de gemiddelde temperatuur van de stroming, d.w.z. 40°C , genomen.

D_i = inwendige diameter = $0,0127 \text{ m}$

λ = geleidingsvermogen van 32 % zoutzuur = $0,46 \text{ J/m}^\circ\text{Csec}$ (lit 10)

ρ = dichtheid van 32 % zoutzuur = 1147 kg/m^3 (geëxtrapoleerd uit waarden van literatuur 11)

η = dynamische viscositeit van 32 % zoutzuur = $1,6 \times 10^{-3} \text{ Nsec/m}^2$

c_p = soortelijke warmte = $2,7 \times 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

v = gemiddelde stroomsnelheid.

Nu stroomt er door de warmtewisselaar $872 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{uur}$ zoutzuur

Dit is bij 40°C $872 \times 10^{-3} \times \frac{1160}{1147} = 882 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{uur}$

Dus is voor één pijp: $v = \frac{882 \times 10^{-3}}{3 \times \frac{\pi}{4} D^2} = 232 \text{ m/uur} = 0,644 \text{ m/sec}$

Invullen van deze grootheden geeft na omwerken:

$$\alpha_2 = 2130 \times \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14}$$

De term $\frac{\eta}{\eta_w}$ is een correctie term voor het viscositeitsverschil midden in de buis en aan de wand.

De wandtemperatuur is globaal te berekenen. Immers $\dot{Q}_w = U \times A \times \Delta T$
Nemen we nu voor A het globaal berekende oppervlak van 0,196 m²
en voor $U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} \right)^{-1}$ dan is

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_w}{U \times A} = \frac{30.6 \times 10^3}{1795 \times 0.196} = 20,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dus is $T_{\text{wand}} = 100^\circ\text{C}$ bij benadering

$$\eta_w = 0,8 \text{ Nsec/m}^2$$

$$\frac{\eta}{\eta_w} = 2 \quad \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0.14} = 1,102$$

Dus wordt $\alpha_2 = 2130 \times 1,102 = 2530 \text{ J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C sec}$

4) Totale warmteoverdrachtscoefficient U

Deze berekenen we met de formule : $U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}$

We vinden na invullen van:

$$U = 1795 \text{ J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C sec}$$

c Afmetingen van de warmtewisselaar.

1) Het totaal benodigd verwarmend oppervlak van de warmtewisselaar wordt berekend met de formule $\dot{Q}_w = U \times A \times (\Delta T)_{\text{lm}}$

$$A = \frac{30600}{1795 \times 78} = 0,218 \text{ m}^2$$

Het oppervlak per meter pijplengte is $2\pi \times r_{\text{lm}}$, waarin r_{lm} = logarithmisch gemiddelde van de straal der pijpen is, $r_{\text{lm}} = 0,00785$
De totale lengte van de pijpen is dus:

$$L = \frac{A}{2\pi r_{\text{lm}}} = \frac{0,218}{2\pi \times 0,00785} = 4,41 \text{ meter.}$$

We hebben drie pijpen, dus de warmtewisselaar wordt 1,47 meter lang

2) De diameter van de warmtewisselaar is te berekenen met de formule $D_i = D' + d + 2u$ (Lit.12)

waarin : $D' = m \times t = m(d + 3,5 s)$

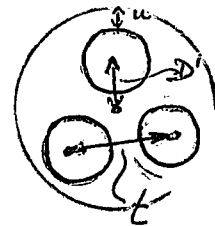
D_i = binnendiameter van
de mantel

D' zie figuur

u = afstand tussen buis en mantel, stel = 10 mm

s = wanddikte van de pijp

m = parameter.



Dus: $D_i = m(d + 3,5s) + d + 2u = 0,08665 \text{ meter}$

$$D_{\text{u1}} = D_i + 0,02 = 0,10665 \text{ m} \approx 110 \text{ mm}$$

d Opmerking over $\frac{\eta}{\eta_w}$ en L/D

Een wandtemperatuur van 100°C was aangenomen voor de correctiefactor $\left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0.14}$.

Nu A bekend is, kan deze wandtemperatuur exact worden berekend:

$$\dot{Q}_w = A \times \alpha_1 \times \Delta T_1$$

$$\Delta T_1 = \frac{\dot{Q}_w}{A \times \alpha_i} = 12^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_w = A \times \frac{\lambda}{d} \times \Delta T_2 \quad \Delta T_2 = \frac{\dot{Q}_w}{A} \times \frac{d}{\lambda} = 6,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{tot}} = 18^\circ\text{C} \text{ dus } T_{\text{wand}} = 102^\circ\text{C} \approx 100^\circ\text{C}$$

welke aanname reeds eerder werd gemaakt en dus juist was.

Literatuur 13 geeft aan dat voor L/D kleiner dan 32 of groter dan 196 een correctie op Nusselt moet worden aangebracht. Bij

$$\text{ons is } L/D = \frac{1470}{2 \times 7,85} = \frac{1470}{15,7} = 93,5$$

Er behoeft dus geen correctie te worden aangebracht.

Samenvatting van de afmetingen van de warmtewisselaar.

Pijp: drie stuks, inwendige diameter 0,0127 m , uitwendige diameter 0,01905 m, lengte van één pijp 1,47 m

Mantel: lengte 1,47 meter + 2 x kop , uitwendige diameter 0,110 m

A

B Berekening van de waterstof - waterstof warmtewisselaar.

1. Constructie?

(J.C. Abrahamse)

Het doel van het inschakelen van deze warmtewisselaar is het voorwarmen van het verse koude reductie gas met warme gas dat uit de reductieovens komt. *warm?*

Aangenomen is dat bij de zuivering van het verse gas dit gas een temperatuur van 100°C heeft aangenomen. We wensen dit gas op te warmen tot 500°C . In de beide gassystemen heerst een druk van ongeveer 1,2 atmosfeer.

De twee gasstromen zijn:

koud gas : $36800 \text{ nL H}_2 / \text{uur} = 1640 \text{ gmol per uur}$, temperatuur 100°C

warm gas : $32734 \text{ nL H}_2 / \text{uur} = 1460 \text{ gmol per uur}$

$326 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{uur} = 181 \text{ gmol per uur}$ temperatuur 700°C

s.w. waterstof: $c_p = 6,62 + 0,00081 T_{\text{abs}}$ cal/gmol $^{\circ}\text{K}$

s.w. stoom : $c_p = 8,22 + 0,00015 T_{\text{abs}} + 0,00000134 T_{\text{abs}}^2$

De gemiddelde temperatuur van de koude voeding is 573°K , op deze temperatuur wordt de soortelijke warmte van waterstof berekend. De op te nemen warmte door de koude voeding is dan:

$$\dot{Q}_w = 1640 (6,62 + 0,00081 \times 573) (500-100) = 4650 \text{ kcal/uur}$$

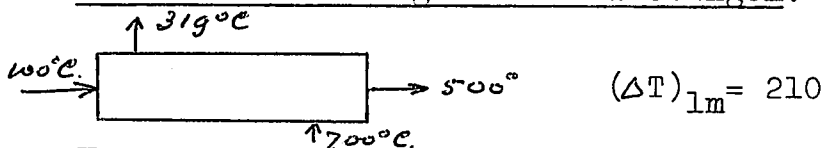
Deze warmte moet dus afgegeven worden door de warme voeding. De eindtemperatuur van de warme voeding wordt geschat 300°C te zijn, zodat de gemiddelde temperatuur dan is 773°K

De juiste eindtemperatuur T volgt dan uit :

$$\dot{Q}_w = 4650 = 1460 (6,62 + 0,00081 \times 773) (700-T) + 181 (8,22 + 0,00015 \times 773 + 0,00000134 \times (773)^2) (700-T)$$

Dit levert na uitwerken $T = 319^{\circ}\text{C}$.

Globale berekening van de afmetingen.



Het benodigde warmteoverdragende oppervlak volgt uit: $\dot{Q}_w = UA(\Delta T)_{lm}$

Voor U wordt de waarde $10 \text{ J/m}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}$ aangenomen. Aangezien bij de warmtewisselaar een bijzondere stroming wordt toegepast, is het logaritmisch gemiddelde voor de temperatuur berekend met behulp van de gegevens uit de literatuur (lit 14)

$$(\Delta T)_{lm} = \varepsilon (\Delta T)_{\text{tegenstroom}} \quad (\Delta T)_{\text{tegenstroom}} = 210$$

ε volgt uit de genoemde literatuur $\varepsilon = 0,98$ zodat $(\Delta T)_{lm} = 206$

Het benodigde warmte overdragende oppervlak heeft dus een grootte van: $A = \frac{4650 \times 1,163}{206 \times 10} = 2,60 \text{ m}^2$

Bij gebruik van een ~~1~~ één inch pijp wordt de lengte hiervan 31,1 m.

Toegepast worden 12 gangen , zodat iedere gang een lengte van 2,59 meter heeft.

Voor de mantel ,welke twee gangen moet bevatten , wordt de diameter gevonden met behulp van de aanname dat een korte bocht voor de binnenpijp gebruikt wordt, terwijl de afstand , hart op hart , gelijk aan twee inch genomen wordt. De uitwendige diameter van de binnenpijp is 0,0334 meter. De Inwendige diameter van de mantel wordt dan 0,1142 meter.

Berekening van de warmteoverdrachtscoëfficiënten.

A Waterstof - wand (stroming door de pijpen)

De gemiddelde temperatuur van het gas is 300°C ,zodat de dichtheid van het gas dan is:

$$\rho = 2 \times \frac{273}{573} \times \frac{1,2}{22,4} = 0,015 \text{ kg/m}^3$$

$$\phi_v = \frac{36800}{1,2} \times \frac{573}{273} \times \frac{1}{3600} = 0,0178 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$v = \frac{\phi_v}{F} = \frac{0,0178}{0,006 \times 92,9 \times 10^{-3}} = 32,2 \text{ m/sec}$$

Gebruikt wordt de formule:

$$Nu = 0,027 (Re)^{0,8} (Pr)^{1/3} \quad (\text{Lit 15})$$

gegevens:

$$\rho = 0,0515 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta = 0,0139 \times 10^{-3} \text{ Nsec/m}^2$$

$$D_i = 0,0266 \text{ m}$$

$$v = 32,2 \text{ m/sec}$$

$$c_p = 148,3 \times 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,178 \text{ BTU/hr sq.ft } ^\circ\text{F/ft} = 0,308 \text{ J/msec } ^\circ\text{C}$$

$$(Re)^{0,8} = \left(\frac{0,0515 \times 32,2 \times 0,0266}{1,39 \times 10^{-5}} \right)^{0,8} = (3180)^{0,8} = 633,7$$

$$(Pr)^{1/3} = \left(\frac{1,39 \times 10^{-5} \times 148,3 \times 10^3}{0,308} \right)^{1/3} = (0,670)^{1/3} = 0,875$$

$$\alpha_i = 0,027 \times 633,7 \times 0,875 \times \frac{\lambda}{D} = 0,027 \times 633,7 \times 0,875 \times \frac{0,308}{0,0266}$$

$$\alpha_i = 173 \text{ J/M}^2\text{sec } ^\circ\text{C}$$

B Warmteoverdrachtscoëfficiënt van de wand (α_w)

Als materiaal wordt gebruikt koper.

$$\lambda_{\text{koper}} = 210 \text{ BTU/ft hr } ^\circ\text{F bij } 400^\circ\text{C}$$

$$\alpha_w = \frac{\lambda}{d} = \frac{210 \times 1,73}{0,133 \times 0,0254} = 1,07 \times 10^5 \text{ J/m}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$$

op pag 20 staat staal!

C Waterstof - wand (stroming om de pijpen)

Berekenen allereerst de stromingssnelheid van de waterstof stroom. Er wordt in totaal doorgeleid 36788 nL gas per uur. Bij een gemiddelde temperatuur van 509 °C en een druk van ongeveer 1,2 atmos-

feer is dit dus :

$$\phi = \frac{782}{273} \times \frac{36,78}{3600} \times \frac{1}{1,2} = 0,0244 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Het beschikbaar oppervlak voor doorstroming is gelijk aan :

$$1/4 \times \pi \times (0,1142)^2 - 2 \times 1/4 \pi \times (1,315 \times 0,0254)^2 = 0,0086 \text{ m}^2$$

want we hebben te doen met hetvolgende beeld :

De gassnelheid wordt dan:

$$v = \frac{0,0244}{0,0086} = 2,84 \text{ m/sec}$$



Voor de berekening van de warmteoverdrachtscoefficient maken we gebruik van de hydraulische diameter.

$$\text{Oppervlak van doorstroming} = 0,0086 \text{ m}^2$$

$$\text{Totale omtrek} = \pi \times 0,1142 + 2 \pi \times 0,0334 = 0,5679 \text{ m}$$

$$\text{De hydraulische diameter } D \text{ wordt dan : } 2 \frac{0,0086}{0,5679} = 0,0303 \text{ m}$$

$$\text{Voor de stroming geldt: } Re = \frac{0,071 \times 2,84 \times 0,0303}{0,0169 \times 10^{-3}} = 3610. \text{ Voor}$$

de stof constanten volgt hierna een tabel. De stroming is dus niet turbulent, zodat voor de berekening van de warmteoverdrachtscoefficient gebruik gemaakt moet worden van de formule:

$$Nu = 1,86 (Pé)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\eta}{\mu}\right)^{0,14}$$

De gegevens zijn:

$$L = \text{lengte van een sectie} = 2,59 \text{ m}$$

$$D = \text{hydraulische diameter} = 0,0303 \text{ m}$$

$$\rho = 0,071 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{H_2} = 0,221 \text{ BTU/ft hr } ^\circ\text{F}$$

$$\lambda_{H_2O} = 0,0448 \text{ BTU/ft hr } ^\circ\text{F}$$

Aangenomen is het warmtegeleidingsvermogen van waterstof.

$$\lambda_{H_2} = 0,382 \text{ J/m sec } ^\circ\text{C}$$

$$\eta_{H_2} = 0,0169 \times 10^{-3} \text{ Nsec/m}^2$$

Aangezien het gasmengsel bestaat uit 1460 gmol waterstof en 181 gmol stoom, kan voor de soortelijke warmte van het gasmengsel berekend worden: $c_p = 3,72 \times 4,19 \times 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Alle stofconstanten gelden voor de gemiddelde temperatuur van de stroming (782°K).

$$(Pé)^{1/3} = \left(\frac{v D \rho c_p}{\lambda} \right)^{1/3} = \left(\frac{2,84 \times 0,0303 \times 3,72 \times 4,19 \times 10^3 \times 0,071}{0,382} \right)^{1/3} = (250,4)^{1/3} = 6,302$$

$$\left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} = \left(\frac{0,0303}{2,59}\right)^{1/3} = 0,2235$$

De term $\left(\frac{\eta}{\mu}\right)^{0,14}$ is zo klein dat het geen zin heeft deze bij de berekening te betrekken

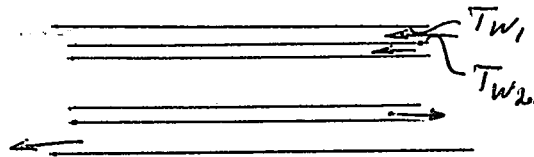
$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = 1,86 \times 6,302 \times 0,2235$$

$$\alpha_2 = 1,86 \times 6,302 \times 0,2235 \times \frac{0,382}{0,0303} = \underline{\underline{33,2 \text{ J/m}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}}}$$

D Straling.

Bij de warmtewisselaar hebben we te doen met een tweetal buizen welke geheel omhuld zijn door een andere buis welke een aanmerkelijk hogere temperatuur bezit. (Zie de tekening)

De waarde van T_{w1} wordt aangenomen, n.l. 770°K



De wandtemperatuur T_{w2} kan berekend

worden uit de reeds gevonden warmteoverdrachtscoëfficiënten en de warmtestroom per eenheid van oppervlak

$$\frac{\phi_w}{A} = U (T_{w1} - 573) \text{ waarin } U = \left(\frac{1}{1,07 \times 10^{-5}} + \frac{1}{173} \right)^{-1} = 173$$

$$\text{Dus } \frac{4650 \times 1,163}{2,60} = 173 (T_{w2} - 573) \text{ uitwerken levert } T_{w2} = 585^{\circ}\text{K}$$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt door de straling kan berekend worden met behulp van de formules:

$$\phi_s'' = \sigma (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \left(\frac{1}{a_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{a_2} - 1 \right) \right)^{-1}$$

$$\phi_s'' = \alpha_s (T_{w1} - T_{w2})$$

$$\begin{cases} a_1 = a_{\text{staal}} = 0,53 \\ a_2 = a_{\text{koper}} = 0,57 \end{cases}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{L_1 D_1}{2 L_2 D_2} = \frac{2,80 \times 0,1142}{2 \times 2,59 \times 0,0334} = 1,85$$

$$\begin{aligned} \phi_s'' &= 5,75 \times 10^{-8} ((770)^4 - (585)^4) \left(\frac{1}{0,53} + 1,85 \left(\frac{1}{0,57} - 1 \right) \right)^{-1} \\ &= 5,75 \times 10^{-8} \times 2,345 \times 10^{11} \times 0,304 \end{aligned}$$

$$\phi_s'' = \alpha_s (770 - 585)$$

$$\alpha_s = \frac{\phi_s''}{105} = \frac{22,2 \text{ J/m}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}}{105}$$

zonder straling
 $U \approx ?$ nodig?

Totale warmteoverdrachtscoëfficiënt U

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_d} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_s} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{173} + \frac{1}{1,07 \times 10^5} + \frac{1}{33,2} + \frac{1}{22,2} \right)^{-1}$$

$$U = (0,0810)^{-1} = \underline{12,26 \text{ J/m}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}} \rightarrow \text{andere wandtemperatuur}$$

Berekening van de afmetingen van de warmtewisselaar.

er
benaderen!

$$\phi_w = UA(\Delta T)_{lm}$$

$$\phi_w = 4650 \times 1,163 \text{ J/sec}$$

$$U = 12,36 \text{ J/m}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}$$

$$(\Delta T)_{lm} = 206$$

Het warmteoverdragende oppervlak moet dus een grootte hebben van:

$$A = \frac{4650 \times 1,163}{12,36 \times 206} = \underline{2,12 \text{ m}^2}$$

Bij gebruik van pijp met een diameter van 1 inch wordt de lengte van een dergelijke pijp dus:

$$\frac{A}{\pi D} = \frac{2,12}{\pi \times 1,049 \times 0,0254} = 25,4 \text{ meter}$$

Toegepast worden 12 gangen , namenlijk 6 secties ieder bestaande uit 2 gangen,(zie ook de tekening) zodat de pijplengte van een gang dan 2,1 meter wordt. Alle andere maten blijven zoals ze reeds berekend zijn.

