

H .J. Lovink,
Nassaustraat 1,
Maasdijk.



De fabricage van furfural uit stro.

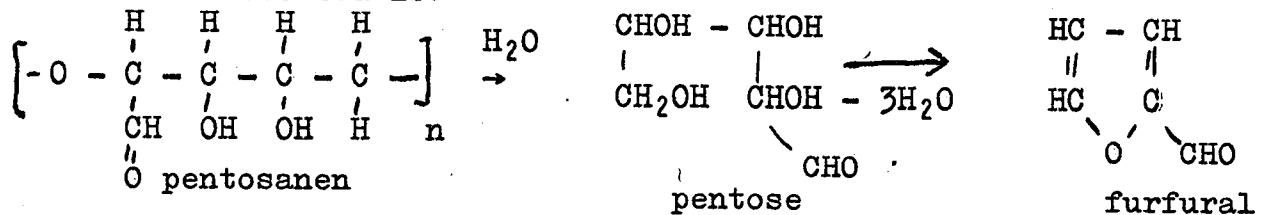
Inleiding.

Als grondstoffen worden voor de bereiding van furfural gebruikt stro van tarwe, haver en gerst, haverkaf, maïskolven, aardappelloof en andere pentosanen houdende agrarische afvalstoffen.

Steeds worden de volgende bewerkingen uitgevoerd:

Met een verdund zuur worden bij lage temperatuur (100-130°C) de pentosanen gehydrolyseerd tot een mengsel van pentosen, die bij hogere temperatuur (160-180°C) in furfural overgaan onder waterafplitsing en ringsluiting.

Het reactieschema is:



De industriële processen kunnen verdeeld worden in:

a) Eentrapsprocessen. Deze hebben boven de hieronder genoemde categorie het voordeel, dat de apparatuur eenvoudiger is; namelijk in één kookketel wordt de hydrolyse en de dehydratatie uitgevoerd. Het nadeel is, dat de cellulose-resten door de hoge eindtemperatuur zo aangetast zijn, dat ze voor verder gebruik waardeloos geworden zijn. In de V.S. wordt door Quaker Oats Co dit proces toegepast met maïskolven als grondstof.

b) Tweetrapsprocessen worden de laatste tijd voorgesteld (lit. 1, 2). Ze hebben in het algemeen de volgende voordelen:

1) Het percentage pentosanen, dat in furfural omgezet wordt is groter doordat de hydrolyse en de dehydratatie afzonderlijk uitgevoerd worden in verschillende apparaten: Na de hydrolyse wordt de cellulose van de pentose oplossing gefiltreerd en deze laatste gaat dan naar de reactor, waar het furfural gevormd wordt.

2) De cellulose resten zijn nu voor allerlei doeleinden nog te gebruiken, zoals voor de bereiding van alcohol, als kunstmest voor de tuinbouw en als filler voor verschillende plastica.

De voorgestelde fabriek kan erwtenstro, gerst- en haverstro onder dezelfde omstandigheden verwerken, maar de berekening is gebaseerd op tarwestro.

Wat de ligging der fabriek betreft, is het Noorden van Nederland, en speciaal de provincie Groningen erg gunstig, omdat daar meer stro verwerkende industrieën zijn en omdat de tuinbouw rondom Hoogezand de geneutraliseerde cellulose afval van de hydrolyse af kan nemen. Vooral voor

Molstof
?

*Waarom stro?
Is in p...?*

strocartonfabrieken kan de fabricage van furfural aantrekkelijk zijn uit economisch oogpunt.

A Keuze van de omstandigheden voor een tweekrapsproces.

Tarwestro is hier gekozen als grondstof, omdat dit in Nederland in grote hoeveelheden wordt geproduceerd. De condities voor de hydrolyse zijn ontleend aan een artikel van Dunning en Lathrop (lit. 3) over selectieve hydrolyse van pentosanen in pentosanenhoudende cellulose met verdund zwavelzuur. Het doel van selectieve hydrolyse is, dat de uit de reactor komende furfuraloplossing zo weinig mogelijk methyl- en aethylalcohol en azijnzuur bevat, wat de destillatie zeer vergemakkelijkt. Aan genoemd artikel zijn de volgende omstandigheden ontleend:

- % H₂SO₄ 1,9%
- temperatuur 121°C
- Verhouding stro : zuur= 3 : 10
- Contacttijd: 50 min.
- % pentosanen, dat ontleedt in
- xylose + furfural: 95,4%
- dextrose: 0,78%

Van de bereiding van furfural uit een zure pentose oplossing door verhitting is nog niet veel bekend. In het algemeen geldt, dat een korte tijd op hoge temperatuur het hoogste rendement geeft aangezien bij lange reactietijden veel condensatieproducten ontstaan van hoog moleculair gewicht. De firma Henckel te Düsseldorf bezit een patent waarmee de apparatuur berekend is (lit. 4); namelijk een 6-8% pentose oplossing, die 2,5% H₂SO₄ bevat moet 3 min. op 170-180°C verhit worden. Het resultaat is dan, dat 55% der pentose in furfural overgaat, 40% vormt vaste stof en 5% is niet omgezet.

stro

De destillatie van methyl- en aethylalcohol bevattende waterige furfuraloplossingen is uitgewerkt door B.W. Wilson (lit. 5).

B Beschrijving en berekening van enige apparaten.

De op het schema geschetste installaties zijn berekend op een capaciteit van 850 kg ^{stro} ~~st~~ro/uur. Het ~~st~~ro bevat 24,5% pentosanen.

In een snijmolen wordt het losse stro gesneden in stukjes van ± 1 cm lengte. Het snijdsel wordt door een exhauster aangezogen en naar een cycloon geblazen, waar het stof verwijderd wordt. Pneumatisch transport is gemakkelijk ook, omdat het verwijderen van stof er direct mee ^{gecombineerd} ~~gecontroleerd~~ kan worden. 1 m³ lucht kan onder de gunstigste omstandigheden (lit. 6) 250 gr stro vervoeren. Per min: wordt dan 3000 cuft lucht aangevoerd. Een "Niagara Conoidal Fan" met een diameter van 56 cm kan deze hoeveelheid verwerken. Het vermogen van de electromotor der exhauster kan als volgt

*Waarom dit
Hoeveel in
Londen?*

geschat worden.

Is het rendement der exhauster en motor samen 0,3 en moet het mengsel van stro en lucht een snelheid van 25 m/sec. (lit.6) hebben om homogeen te blijven (het stro mag niet uitzakken) en wordt het stro 10 m opgevoerd naar de cycloon, dan is in totaal nodig:

$$\frac{1}{0,3} \frac{V v^2}{g \times 75} + \frac{V \times 10}{0,3 \times 75} \text{ pk}$$

= dichtheid van het stro-lucht mengsel = 1,25 kg/m³

V = volume, dat per sec. aangezogen wordt = 1 m³/sec.

v = snelheid = 25 m/sec.

Dit wordt nu 2 pk
====

De diameter afvoerbuis moet 22,5 cm zijn om het lucht-stro mengsel een snelheid van 25 m/sec. te geven.

De cycloon is ontworpen en berekend volgens Rosin, die voor een standaard-cycloon een formule afgeleid heeft (lit. 7), welke het verband aangeeft tussen de diameter D_{cp} van deeltjes, waarvan de helft door de cycloon afgescheiden wordt, de invoersnelheid V_c, de diameter der cycloon D, het dichtheidsverschil van vaste stof en lucht ρ_s - ρ en de viscositeit van lucht η

$$D = \frac{8 \pi D_{cp}^2 V_c N_e (\rho_s - \rho)}{9 \eta}$$

Hierin is N_e het aantal omwentelingen, dat een afgescheiden deeltje gemaakt heeft in de cycloon. N_e is meestal ongeveer 5. De invoeropening heeft een doorsnede van 1/8 D². V_c hangt hier als volgt van af voor dit geval:

$$\frac{2500}{V_c} = \frac{1/8 D^2}{40^2}$$

Ingevuld:

$$D = \frac{8 \pi D_{cp}^2 \times 2500 \times 40^2 (\rho_s - \rho) \times 5}{9 \eta \times 1/8 D^2}$$

Nu is η = 1,84 x 10⁻⁴ gr/sec cm.

ρ_s = 15 x 10⁻² gr/cm³ ρ = 0,1 x 10⁻² gr/cm³.

Stelt men D_{cp} = 0,1 cm, dan wordt D = 22 cm.

De diameter der cycloon moet dus 22 cm zijn.

Voor deze standaardcycloon volgen de andere afmetingen hieruit, bijvoorbeeld; de lengte moet 88 cm zijn.

Na de afscheider van de cycloon passeert het stro een magneet, waar spijkers e.d. verwijderd worden.

In een roterende zeef worden graankorrels en zand uit het stro gehaald. De hoeveelheid graan is 0,5 - 1% van het stro; dat zou in ons geval ongeveer

200 kg voedergraan opleveren!

Lit. 6 geeft op, dat een roterende zeef v. $0,33$ ton/uur/m² kan werken. Hieruit volgt, dat het opp. $2,55$ m² moet zijn. De zeef wordt dan $1,7$ m lang en krijgt een diameter van 50 cm.

Het voorgaande gedeelte moet door een brandmuur gescheiden zijn van de rest van de fabriek, omdat het stro licht brandbaar is en de snijmolen met metalen voorwerpen als spijkers wel eens vonken kan geven.

Nu moet het stro met een bepaalde hoeveelheid verdund zwavelzuur gemengd en in de reactoren geperst worden.

De regeling van de stro-stroom is moeilijk, omdat gesneden stro een zeer klein s.g. heeft (60 kg/m³), waardoor een continue weging onmogelijk wordt. Ook een volumeregeling lukt niet, omdat het stro erg samendrukbaar is. Er blijft dan als enige mogelijkheid over, het stro in een weegtank te storten, deze tot een bepaald gewicht te vullen en na een zekere tijd te ledigen in een trechter van de daaropvolgende meng-perspomp.

In de weegtank moet bijvoorbeeld om de 3 min. $\frac{850}{60} = 42,5$ kg stro afgewogen worden. Het volume hiervan is $\frac{42,5}{60} = 0,71$ m³.

In de meng-perspomp wordt per uur 850 kg stro gemengd met 2140 liter 25% zwavelzuur, dat het bodemproduct der furfuraldestillatie is. De pomp is een Leistriz meng-perspomp voor suspensies, slikken, pulp etc. en kan ook als kneedpomp gebruikt worden. Het stro wordt hier geïmpregneerd met het zuur en op een druk van 2 ata gebracht.

Voordat de zure pulp in de reactoren komt moet het zuur verdund worden tot $1,9\%$ H₂SO₄ en de temperatuur tot 120°C opgevoerd worden. Met verzadigde stoom van 120°C en 2 ata wordt de pulp verwarmd. Nemen we aan, dat de s.w. van de pulp 1 Kcal/kg/ $^{\circ}\text{C}$ is, dan moet dus in totaal $(850 + 2140)(120 - 20)$ Kcal/uur door de stoom geleverd worden.

Het enthalpieverschil tussen verzadigde stoom en water van 120°C is 526 Kcal/kg.

We hebben dus $\frac{3000 \times 100}{526} = 570$ kg/uur verzadigde stoom nodig.

Om de concentratie van het zwavelzuur op $1,9\%$ te brengen moet dan verder nog 110 kg water van 120°C toegevoegd worden per uur.

In de reactoren gaat dus een mengsel van 2820 l/uur aan vloeistof, $1,9\%$ H₂SO₄ en 850 kg/uur stro. De reactoren zijn berekend aan de hand van de literatuurgegevens (lit. 3).

Om uitzakken van het stro te voorkomen wordt de zure pulp rondgepompt door drie reactoren. De temperatuur wordt geregeld door de pulp door warmtewisselaars te leiden, die verwarmd worden met condenserende stoom van 2 ata.

De pulp, die uit de laatste reactor komt, wordt tot 80° gekoeld en gefiltreerd om de pentose oplossing te scheiden van de celluloseresten. Hiervoor is een Oliver-filter gekozen, waarvan de afmetingen geschat zijn aan de hand van gegevens omtrent een analoge filtratie namelijk die van settled cane mud (lit. 11). Hiervoor wordt opgegeven, dat een Oliverfilter van de geschetste constructie 1000 lb/sq ft/dag kan verwerken: dat is 200 kg/m²/uur

Uit de reactoren komt een zure pulp, die uit 660 kg/uur droge stof en 2800 kg/uur 1,9% H₂SO₄ en 7,5% pentose oplossing bestaat.

Na filtratie bevat de cellulose afval ± 30% water (lit. 3). Het filter krijgt dus 990 kg stof per uur te verwerken. Hieruit volgt het opp.:

$$\frac{990}{200} = 5 \text{ m}^2$$

De specificatie (lit. 8) geeft hiervoor de volgende maten: Diameter 1,5 meter bij een lengte van 3 meter.

De hoeveelheid waswater is gesteld op 110 l/uur. Uit het filter komt dus de volgende pentose oplossing: 3525 l/uur pentose oplossing, die 1,48% H₂SO₄ en 5,72% pentose bevat.

Alvorens de pentose omgezet kan worden in furfural moet de concentratie van het zwavelzuur op 2,5% gebracht worden. Dit doen we door 75,5 kg 50% H₂SO₄ per uur in de pentose oplossing te injecteren. De pentose oplossing wordt m.b.v. een pomp op 10 atmosfeer gebracht en door een warmtewisselaar geleid in tegenstroom met de hete furfuraloplossing. Daarop volgt een w.wisselaar, waar verzadigde stoom van 200°C de pentose oplossing op 180°C brengt. De drie reactoren hebben een volume, dat berekend is met de gegevens van lit 4. De warmtewisselaar zal nu weer in detail berekend worden.

De twee vloeïstofstromen, die door de warmtewisselaar gaan, zijn even groot namelijk 3600 kg/uur. Deze hoeveelheden zijn zo klein, dat een dubbelpijps warmtewisselaar met concentrische pijpen de beste uitvoeringsvorm is. De pijpen zijn van ^{staal} admiralty. Na enig proberen met overall coëfficiënten vindt men, dat een binnendiameter van 1' de goede warmteoverdrachtscoëff. geeft, zodat de totale lengte niet te groot wordt. Ook het drukverval, ongeveer 0,02 atm./meter blijft klein. De ringvormige ruimte moet nu zo nauw zijn, dat de warmteoverdrachtscoëff. aan de buitenwand der binnenpijp van dezelfde orde van grootte wordt als die aan de binnenkant. De snelheid van de vloeïstof moet in de ringvormige ruimte dus in eerste instantie ongeveer even groot zijn als in de binnenpijp. De diameter der buitenpijp wordt dan 1³/₄'. De minimale wanddikte der pijpen S wordt bepaald door de druk van de vloeïstof P, de straal r en de toelaat-

bare spanning 6 . Tussen deze grootheden bestaat een betrekking n.l.

$$P = \frac{S \cdot 6}{r}$$

Ingevuld voor admiralty: $P = 10 \text{ kg/cm}^2$ $6 = 200 \text{ kg/cm}^2$ $r = 2,5$:
geeft $S = 0,125$ of $0,049$.

Hiermee is rekening gehouden bij de keuze van de pijpen van de warmtewisselaar (lit. 12).

Binnenpijp:

buitendiameter: $1,000' = 2,540 \text{ cm}$

Inwendige diam: $0,902' = 2,291 \text{ cm}$

Inwendig opp : $7,197 \text{ cm}^2/\text{cm}$

Opp. der doorsnede: $4,120 \text{ cm}^2$

Snelheid der vloeistof,

$V_{\text{inw.}}$: $2,427 \text{ m/sec.}$

Uitwendig opp.: $7,980 \text{ cm}^2/\text{cm.}$

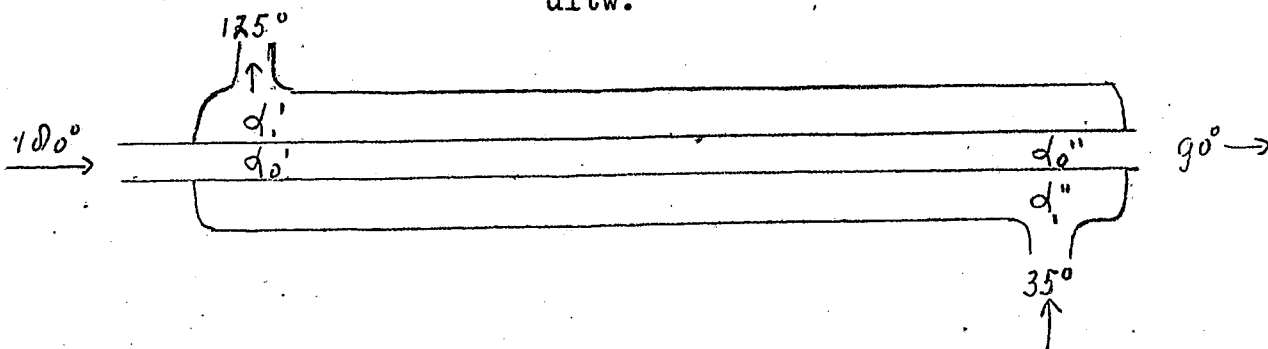
Buitenpijp: Buitendiameter: $1\frac{3}{4}' = 4,445 \text{ cm.}$

Inwendige diameter: $1,510' = 3,835 \text{ cm.}$

Ringvormige ruimte:

Opp. der doorsnede $6,484 \text{ cm}^2$

Snelheid der vloeistof, $V_{\text{uitw.}}$ $1,542 \text{ m/sec.}$



Voor de berekening van de warmteoverdrachtscoëfficiënten aan de binnenzijde der binnenpijp d_1' en d_1'' wordt gebruikt de betrekking: $Re \geq 2100$.

$$Nu = 0,027 (Re)^{0,8} \times (Pr)^{1/3} \times (-)^{0,14} \frac{1}{w}$$

M. Jacob (lit.8) heeft een relatie afgeleid voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenzijde der binnenpijp (d_1' en d_1''). Hiervoor is de voorgaande vergelijking niet te gebruiken, omdat de warmteoverdracht aan één oppervlak, maar de stroming langs twee oppervlakken plaats heeft. Deze betrekking luidt: ($Re \geq 2100$)

$$\frac{Di}{Do} = 0,029 \times (V \frac{Di}{Do})^{0,8} \times (C)^{1/3} \times (\frac{Di}{Do})^{0,5} \times (-)^{0,14} \frac{2}{Do}$$

D_i = uitwendige diameter der ringvormige ruimte

D_o = inwendige diameter der ringvormige ruimte

V = snelheid der vloeistof

η = viscositeit

η_w = viscositeit aan de wand bij de film temperatuur.

Voor een dubbelpijps-warmtewisselaar kan afgeleid worden, dat er een verband bestaat tussen de totale wamrtestroom/sec., ϕ_w , de lengte l , de temp. verschillen $\Delta T'$ en $\Delta T''$ van de vloeistofstromen en de warmte-weerstanden per strekkende meter: $\frac{1}{U'S}$ en $\frac{1}{U''S}$ van de volgende vorm:

$$\phi_w = 1. \frac{U'S\Delta T' - U''S\Delta T''}{2,303 \log \frac{U'S\Delta T'}{U''S\Delta T''}} \text{-----3.}$$

Eerst gaan we de warmteweerstanden berekenen met de verg.(1) en (2), dan de temperatuurverschillen $\Delta T'$ en $\Delta T''$ en tenslotte de lengte van de warmtewisselaar met betrekking. (3).

Stellen we nu als eis, dat de koude stroom, de pentoseoplossing, van 35°C tot 125°C opgewarmd moet worden, dan is de totale wamrtestroom $90. x 4,19 x 1 x 10^3 = 3,77 x 10^5 J/sec.$

We verwaarlozen om te beginnen het temperatuur verval over de wand en nemen $\Delta T'_w = \Delta T_o'$ en $\Delta T''_w = \Delta T_o''$ waaruit de voorlopige filmtemperaturen T' en T'' volgen:

$$T' = 150^\circ C \text{ en } T'' = 60$$

B ij deze temperaturen berekenen we de dichtheden ρ , viscositeiten η , en warmtegeleidbaarheidscoëff. λ , die uit de literatuur ten naaste bekend zijn voor verschillende oplossingen.

We werken steeds in het Giorgistelsel.

$\eta_{180^\circ} = 1,4 \times 10^{-4}$	
$\eta_{150^\circ} = 1,7 \times 10^{-4}$	$C_p = 4,077 \times 10^{-3}$
$\eta_{125^\circ} = 2,1 \times 10^{-4}$	$\lambda_{150^\circ} = 0,7614$
$\eta_{90^\circ} = 3,4 \times 10^{-4}$	$\lambda_{60^\circ} = 0,6517$
$\eta_{60^\circ} = 4,9 \times 10^{-4}$	$\rho_{150^\circ} = 1020$
$\eta_{35^\circ} = 9,3 \times 10^{-4}$	$\rho_{60^\circ} = 1059$

Hiermee berekenen we q_o' en q_o'' met formule (1):
(Re is gemiddeld $2,38 \times 10^5$)

$$\frac{q_o' \times 0,02408}{0,7614} = 0,027 \frac{(2,427 \times 1020 \times 0,02408)^{0,8}}{1,7 \times 10^{-4}} \quad x$$

$$\times \frac{(1,7 \times 10^{-4} \times 4,077 \times 10^3)^{0,33}}{0,7614} \times \left(\frac{1,4}{1,7}\right)^{0,14}$$

$$\alpha_{o'} = 20500 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$\frac{\alpha_{o''} \times 0,02408}{0,6517} = 0,027 \frac{(2,427 \times 1059 \times 0,02408)^{0,8}}{4,9 \times 10^{-4}} \times$$

$$\times \frac{(4,9 \times 10^{-4} \times 4,077 \times 10^3)^{0,33}}{0,6517} \times \left(\frac{3,4}{4,9}\right)^{0,14}$$

$$\alpha_{o''} = 11270 \text{ W/m}^2\text{C}.$$

Met de betrekking van Jacob (2) vinden we $\alpha_{1'}$ en $\alpha_{1''}$

$$\frac{\alpha_{1'} \times 0,02540}{0,7614} = 0,029 \frac{(1,542 \times 1020 \times 0,02540)^{0,8}}{1,7 \times 10^{-4}} \times \frac{(1,7 \times 10^{-4} \times 4,077 \times 10^3)^{0,33}}{0,7614}$$

$$\times \left(\frac{3,835}{2,540}\right)^{0,15} \times \left(\frac{2,1}{1,7}\right)^{0,14}$$

$$\alpha_{1'} = 18290 \text{ W/m}^2\text{C}.$$

$$\frac{\alpha_{1''} \times 0,0254}{0,6517} = 0,029 \frac{(1,542 \times 1054 \times 0,0254)^{0,8}}{4,9 \times 10^{-4}} \times \frac{(4,9 \times 10^{-4} \times 4,077 \times 10^3)^{0,33}}{0,6517}$$

$$\times \left(\frac{3,835}{2,540}\right)^{0,15} \times \left(\frac{9,3}{4,9}\right)^{0,14}$$

$$\alpha_{1''} = 10970 \text{ W/m}^2\text{C}.$$

Met deze warmteoverdrachtscoëfficiënten berekenen we nu weer de filmtemperatuur $T_{o'}$, $T_{o''}$, $T_{1'}$, $T_{1''}$.

$$\text{Nu is } \alpha_{o'} \cdot \Delta T_{o'} = \alpha_{1'} \Delta T_{1'}$$

en

$$\alpha_{o''} \times \Delta T_{o''} = \alpha_{1''} \Delta T_{1''}$$

$$\text{Ingevuld: } \Delta T_{o'} = \frac{18290}{20500} = \Delta T_{1'}$$

$$\Delta T_{o'} = 0,8923 \Delta T_{1'}$$

Verwaarlozen we het temperatuurverval over de wand, dan is

$$\Delta T_{o'} + \Delta T_{1'} = 55^\circ$$

$$1,8923 \Delta T_{1'} = 55^\circ$$

$$\Delta T_{1'} = 29,0^\circ$$

$$T_{1'} = T_{o'} = 154^\circ\text{C}.$$

$$\Delta T_{o''} = \frac{10970}{11270 \times \Delta T_{1''}}$$

$$\Delta T_{o''} = 0,9734 \times \Delta T_{1''}$$

$$\Delta T_o'' + \Delta T_1'' = 55^\circ$$

$$\Delta T_1'' = 28^\circ$$

$$T_o'' = T_o' = 63^\circ\text{C}$$

Deze wandtemperaturen kloppen goed met de aanname, zodat de q 's direct goed berekend zijn.

De totale warmteweerstand per strekkende meter is nu gelijk aan

$$\frac{1}{U'S} = \frac{1}{\alpha_o'S_o} + \frac{1}{\alpha_1'S_1} + \frac{R_2 - R_1}{2\pi\lambda\bar{R}}$$

$$\text{en } \frac{1}{U''S} = \frac{1}{\alpha_o''S_o} + \frac{1}{\alpha_1''S_1} + \frac{R_2 - R_1}{2\pi\lambda\bar{R}}$$

Hierbij is er rekening mee gehouden, dat de wand een bepaalde dikte $(R_2 - R_1)$ heeft. $\bar{R} = R_1 + R_2$ is de gemiddelde straal van de binnenpijp $\lambda = 100$.

Ingevuld:

$$\frac{1}{U'S} = \frac{1}{20500 \times 0,07565} + \frac{1}{18290 \times 0,07980} + \frac{0,125}{2 \times 3,14 \times 100 \times 1,237}$$

$$\frac{1}{U'S} = 1,464 \times 10^{-4} \quad U'S = 683,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\frac{1}{U''S} = \frac{1}{11270 \times 0,07565} + \frac{1}{10970 \times 0,07980} + \frac{0,125}{2 \times 3,14 \times 100 \times 1,237}$$

$$\frac{1}{U''S} = 2,476 \times 10^{-4} \quad U''S = 403,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Nu zijn alle grootheden gevonden, die nodig zijn om de totale lengte l van de warmtewisselaar te berekenen:

$$Q_w = l \cdot \frac{U'S\Delta T' - U''S\Delta T''}{2,303 \log \frac{U'S\Delta T'}{U''S\Delta T''}}$$

$$l = \frac{2,303 \times 3,77 \times 10^5 \times 0,2283}{55,0 \times 279,3}$$

$$l = 12,90 \text{ meter.}$$

De totale lengte wordt dus 12,90 meter.

Aangezien hiervoor de warmteweerstand van de wand in rekening gebracht is, zal nu ook het temperatuurverval over de wand berekend worden.

$$\Delta T \text{ tot } U'S = \Delta T_1' \quad \alpha_1'S_1 = \Delta T_o' \quad \alpha_o'S_o$$

$$\Delta T \text{ tot } U''S = \Delta T_1'' \quad \alpha_1''S_1 = \Delta T_o'' \quad \alpha_o''S_o$$

Ingevuld en uitgewerkt geeft dit:

$$\Delta T_o' = 24,22^\circ \quad \Delta T' = 24,73$$

$$\Delta T_o'' = 26,05^\circ \quad \Delta T'' = 25,37$$

Hieruit volgen de filmtemperaturen en het temperatuurverval over de wand ΔT_w :

$$T_o' = 180,0 - \Delta T_o' = 155,8^\circ\text{C}$$

$$T_o'' = 90,0 - \Delta T_o'' = 64,0^\circ\text{C}$$

$$T_1' = 125,0 + \Delta T_1' = 149,7^\circ\text{C}$$

$$T_1'' = 35,0 + \Delta T_1'' = 60,4^\circ\text{C}$$

$$\text{Dus } \Delta T_w' = T_o' - T_1' = 6,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_w'' = T_o'' - T_1'' = 3,6^\circ\text{C}$$

Met de vergelijking van Fanning wordt het drukverval van de vloeistof over de warmtewisselaar berekend.

a) Binnenpijp:

Voor dit Reynoldsgetal is de gemiddelde waarde genomen van de Re getallen die gebruikt zijn voor de berekening van α' en α'' :

$$Re = 2,39 \times 10^5$$

De totale lengte, inclusief de bijdragen voor de bochten, wordt $12,9 + 5,4 = 18,3$ meter (lit. 13)

De frictiefactor volgt uit het Reynoldsgetal en is $4f = 0,016$ (lit. 9)

$$\Delta P = 4f \times \frac{L}{D} \times \frac{1}{2} \frac{v^2}{g \times 10^4}$$

$$\Delta P = 0,016 \times \frac{18,3}{0,024} \times \frac{1}{2} \frac{1020 \times 2,427^2}{9,81 \times 10^4} = 0,37 \text{ Kg/cm}^2$$

b) Buitenpijp:

Hier nemen we voor de straal, de hydraulische straal m :

$$\frac{1}{4} D_i^2 - \frac{1}{4} D_o^2 = \frac{1}{4} (D_i - D_o)$$

$$D_i + D_o$$

In de vergelijkingen wordt D vervangen door $4m$: $4m = 0,01295$ m.

$$Re = \frac{1,542 \times 1060 \times 0,01295}{3,565 \times 10^{-4}} = 5,94 \times 10^4$$

De lengte is 12,9 meter en de frictiefactoe (lit. 12) $4f = 0,020$.

$$\Delta P = 0,020 \times \frac{12,9}{0,01295} \times \frac{1}{2} \frac{1060 \times 1,542^2}{9,81 \times 10^4} = 0,25 \text{ Kg/cm}^2$$

De verbindingsstukken tussen de verschillende secties der warmtewisselaar hebben een diameter van 1'

De totale lengte hiervan, inclusief de bijdragen van de bochten, is 18,3 meter.

$$Re = 1,423 \times 10^5 \quad 4f = 0,017 \quad v = 2,427$$

$$\Delta P = 0,017 \times \frac{18,6}{0,0266} \times \frac{1}{2} \frac{1060 \times 2,427^2}{9,81 \times 10^4} = 0,38 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Totaal:} \quad = 0,63 \text{ Kg/cm}^2$$

De totale drukval over de warmtewisselaar is 0,93 atm.

De furfural oplossing is door de binnenpijp geleid, omdat er vaste stof in zit, die zich kan afzetten, zodat de buis af en toe schoongemaakt moet worden. Het reinigen van de binnenpijp is gemakkelijker dan van de ringvormige ruimte.

De pentose oplossing moet nu nog verwarmd worden van 125°C tot 180°C. Dit kunnen we doen met condenserende stoom van 200°C in een verticale dubbelpijpswarmtewisselaar. Om de lengte hiervan globaal te berekenen moet de warmteoverdrachtscoëff. van de condenserende stoom naar de wand bekend zijn.

Het Reyholdsgetal van de vallende film vindt men uit de totale toegevoerde warmte per seconde, Q , de buisdiameter D en de viscositeit η .

$Re = \frac{4W}{\pi D \eta}$. De hoeveelheid warmte, die nodig is:

$$(180 - 125) \frac{3600}{3600} \times 4,18 = 2,306 \times 10^5 \text{ J/sec.}$$

Het enthalpieverschil van stoom en water van 200°C is 461 Kcal/Kg.

De benodigde hoeveelheid stoom W volgt hieruit: 0,119 Kg/sec.

De uitwendige diameter der binnenpijp is $l' = 2,540$ cm.

De viscositeit van water bij 200°C = $1,2 \times 10^{-4}$ Kg/m sec.

Het getal van Reynolds is voor de vallende film:

$$Re = \frac{4 \times 0,119}{1,2 \times 10^{-4} \times 3,14 \times 0,0254} = 4,99 \times 10^4$$

Aangezien $Re > 2100$ kunnen de betrekkingen voor een laminair vallende film niet gebruikt worden. Kirkbride heeft een relatie afgeleid voor

$$\alpha = 0,0077 (Re)^{0,4} \times \frac{(\lambda^2 \rho^2 g)^{0,33}}{\eta^2}$$

Hier moeten de Engelse eenheden gebruikt worden:

$$\lambda = 0,485 \text{ Btu/hr. sqFt. } ^\circ\text{F/Ft}$$

$$\rho = 53,9 \text{ lb/cu. Ft}$$

$$g = 4,18 \times 10^8 \text{ Ft/hr}^2$$

$$\eta = 0,484 \text{ lb/hr. Ft} \quad Re = 4,99 \times 10^4$$

Dit ingevuld geeft α in Btu/hr. sqft. °F : 3700

Omgerekend in W/m^2 °C:

$$\alpha_{uitw} = 22000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De inwendige diameter der binnenbuis is even groot genomen als die van de warmtewisselaar. De snelheden zijn dus gelijk. De temperatuur aan de wand is gemiddeld 180°C , zodat we aan de hand van de hiervoor berekende q' van de warmtewisselaar, als gemiddelde warmteoverdrachts-coëff. $q/b_i = 24300$ aan kunnen houden.

De totale warmteweerstand per meter is nu:

$$\frac{1}{US} = \frac{1}{24300 \times 0,0756} + \frac{1}{22000 \times 0,0798} + \frac{0,125}{628 \times 1,237}$$

De laatste factor is de warmteweerstand van de wand.

$$US = 785 \text{ W/m sec. }^{\circ}\text{C.}$$

Nu is

$$\Delta T_{\text{gem}} \times US \times l = Q_w$$

Het gemiddeld temperatuurverschil is 48°C

$$Q_w = 2,306 \times 10^5 \text{ J/sec.}$$

De totale lengte l moet dus zijn:

$$l = \frac{2,306 \times 10^5}{785 \times 48} = 5,98 \text{ m.}$$

De reactoren moeten een zodanig volume hebben, dat de verblijftijd van de vloeistof 3 min. is. (lit.4). De gezamenlijke inhoud moet $\frac{3600 \times 3}{60} = 180$ liter zijn.

De afmetingen zijn gekozen met behulp van lit. 14. Inw. diameter $7.813' = 19,84 \text{ cm.}$

Uitw. diameter $8.625'$.

De reactoren zijn ieder 2 meter hoog en voorzien van een stoommantel om een goede temperatuurregeling mogelijk te maken.

In de reactoren komt dus 3600 Kg oplossing, die 5,7% pentose en 2,5% zwavelzuur bevat. Tijdens de reactie wordt 55% der pentose omgezet in furfural. 40% geeft condensatieproducten, 5% blijft onveranderd. Uit de reactoren komt dus: 3515 Kg oplossing/uur, 2,5% H_2SO_4 , 3,2% furfural, 85 Kg vaste stof/uur.

De uit de warmtewisselaar komende furfural oplossing gaat door een water koeler en loopt dan op een filter. De condensatieproducten kunnen slijmerig van aard zijn, zodat een filter-aid toegevoegd moet worden. In lit. 15 wordt opgegeven, dat een continu vacuumfilter ongeveer 250 lb/sq ft/dag kan verwerken. Dit is $50 \text{ Kg/m}^2 \text{ uur.}$

Per uur moet 85 Kg vaste stof gefiltreerd worden. Het oppervlak moet dus $1,7 \text{ m}^2$ zijn.

Op het schema is een topfeedfilter geschetst. Gezien de slijmerige aard van de vaste stof is het misschien beter een gewoon Oliver filter te

gebruiken. De hoeveelheid waswater is 85 Kg/uur. Uit het filter komt 3590 l. 3% furfural oplossing. Het hierop volgende gedeelte, de destillatie van de furfuraloplossing is door de heer Geerlings behandeld.

Literatuur.

- 1) Bombrine Parodi. Delfino. Fr. pat. 953475
- 2) " " " Fr. pat. 939810
- 3) Ind. Eng. Chem. 37 24 (1945)
- 4) Henckel D.R.P. 566153
- 5) B.W. Wilson J.Co Sci. Ind. Res. 231. 202 1947
- 6) Zellstof u. Papier 17. 20 1937
- 7) Rosin. Z. Ver. deut. Ing. 76 433-437 1932
- 8) M. Jacob Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 42 1015 1946
- 9) Wilson, McAdams Ind. Eng. Chem. 14, 105, 1922
- 10) Kirkbride Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 30 170 1933
- 11) Perry. Chemical Engineers' Handbook III ed. pag. 980
- 12) " " " " " " pag. 425
- 13) " " " " " " pag. 390
- 14) " " " " " " pag. 410
- 15) " " " " " " pag. 990