

1048

PRODUCTIE VAN ADIPINEZUUR UIT BUTAANDIOL 1,4.

Beschrijving behorende bij het fabrieksschema van
E.J.Jacobs.

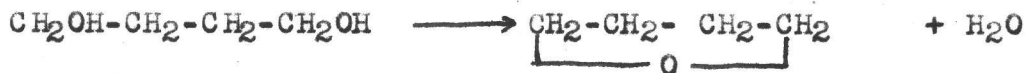
October 1947

De bereiding van adipinezuur volgens de methode van Reppe verloopt in de volgende trappen:

1. $C_2H_2 + 2 H_2C=O \longrightarrow HO-CH_2-C \equiv C-CH_2OH$
aethyn formaldehyd butyndiol 1,4
2. $HO-CH_2-C \equiv C-CH_2OH + 2 H_2 \longrightarrow CH_2OH-CH_2-CH_2-CH_2OH$
butaandiol 1,4
3. $CH_2OH-CH_2-CH_2-CH_2OH \longrightarrow \begin{array}{c} CH_2-CH_2 \\ | \quad | \\ CH_2-CH_2 \\ \diagdown \quad / \\ O \end{array} + H_2O$
tetrahydrofuraan
4. $\begin{array}{c} CH_2-CH_2 \\ | \quad | \\ CH_2-CH_2 \\ \diagdown \quad / \\ O \end{array} + 2 CO + H_2O \longrightarrow HOOC-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-COOH$
adipinezuur

In aansluiting op het fabrieksschema van H.C.Staats, waarin de eerste twee trappen zijn behandeld, zullen hier slechts de derde en vierde trap van het proces worden beschreven.

De omzetting van butaandiol 1,4 in tetrahydrofuraan.



Deze omzetting, die neerkomt op het onttrekken van 1 mol water per mol butaandiol, wordt uitgevoerd bij verhoogde temperatuur en druk (280 °C en 100 atm.) terwijl fosforzuur als katalysator wordt toegevoegd.

Uitvoering.

Een 35-40 % waterige butaandiol-oplossing wordt door een pomp (1) via een 'burge'tank (2), waarin eventuele drukschommelingen worden opgevangen, door enige voorwarmers (3,4 en5) naar de vloeistof-converter (8) gepompt. Voorwarmer 3 wordt met stoom van 20 ato en 4 met 100 ato stoom verhit, terwijl 5 een elektrische voorwarmer is.

Tank 6 bevat 60 % fosforzuur, dat door middel van een injectiepompje (7) met een zodanige snelheid in de vloeistof-stroom wordt gepompt, dat een fosforzuur concentratie van 0,3 %

W

wordt bereikt.

Dit mengsel wordt in de reactor (8) gebracht (er worden 2 reactoren parallel toegepast), die inwendig met een staalsoort, die weinig wordt aangetast, bekleed is. Voor dit doel kan een staal met b.v. 18 % Cr, 8 % Ni, 1 % W en 1 % Ti uitstekend dienst doen.

De optredende reactie is zeer zwak exotherm (+ 3 kcal/mol) en het is danook noodzakelijk de geheel met vloeistof gevulde convertor, b.v. door uitwendige, elektrische verwarmingselementen, op de gewenste temperatuur van 270 - 280 °C te houden.

Het onderafvloeiende reactieproduct gaat door een koeler (9), waarin warm water als koelmiddel wordt gebruikt, dat in stoom van omstreeks 18 ato wordt omgezet. Deze stoom kan worden gebruikt voor het verhitten van de reboilers (13) der fractioneerkolommen of eventueel voor de eerste voorwarmer (3).

Het reactiemengsel wordt tot ongeveer 110 °C afgekoeld en vervolgens wordt de druk tot atmosferisch gereduceerd door zgn. 'flashing' in de eerste destillatie-kolom (11). Hierbij wordt de vloeistof tevens, door toevoegen van NaOH-oplossing uit tank 10, geneutraliseerd.

Bovenuit kolom 11 wordt een mengsel van tetrahydrofuraan, wat butanol, afkomstig uit het gebruikte, niet geheel zuivere butaandiol, en water verkregen, terwijl onderaan een waterige oplossing wordt afgetapt, die natriumfosfaat en alle niet-vluchtige verharingsproducten van deze en vorige trappen van het proces bevat. Uit tank 12 kunnen de waterige onderlaag en de harsen-bevattende bovenlaag gescheiden worden afgetapt.

Het gekoelde destillaat wordt deels als reflux bovenin de kolom teruggepompt en deels in de tweede kolom (16) verder gefractioneerd. Deze kolom levert als topproduct zeer zuiver tetrahydrofuraan, terwijl onderaan hoofdzakelijk water afvloeit.

De verkregen opbrengsten zijn zeer goed. Er worden rendementen van omstreeks 93 % opgegeven.

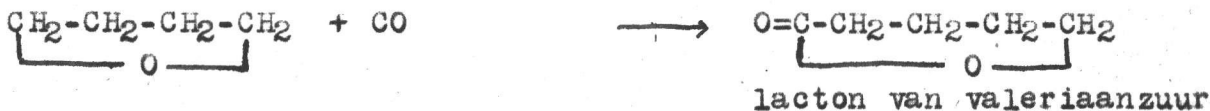
Het tetrahydrofuraan wordt in tank 40 opgeslagen, waaruit het kan worden afgetapt of in het volgende deel van het proces worden ingevoerd.

De omzetting van tetrahydrofuraan in adipinezuur.



Deze omzetting vindt plaats onder een druk van 200 atm. en bij een temperatuur van 250 °C, terwijl NiJ₂ als katalysator wordt toegepast. Ni(CO)₄ dient als CO-overdrager.

Onder deze omstandigheden treden de volgende nevenreacties op:



Handwritten notes:
 ?
 goed in de reactor
 warm water
 van?
 van water?
 van water?

Handwritten notes:
 geen CO
 ingevoerd?
 (2)

*Er zijn Co-conc
van de reactie
die is niet
aan de hand*

Bij de hoge temperatuur veroorzaakt het CO onder druk moeilijkheden in verband met de keuze van het materiaal van de convertor, waarin de omzetting wordt uitgevoerd. Vrijwel alle bruikbare metalen vormen onder deze omstandigheden met grotere of kleinere snelheid carbonylen. Uit de aard der zaak dient deze aantasting tot het uiterste beperkt te worden, waartoe Reppe in de semi-technische apparatuur een platina bekleding aanbracht. Ook koper zou voor dit doel kunnen worden gebruikt, hoewel de levensduur daardoor ongetwijfeld zou worden verkort.

Ook deze reactie is exotherm (72 kcal/mol). Het is echter de vraag of deze reactiewarmte voldoende is om de convertor op temperatuur te houden, danwel te groot, zodat koeling nodig zou zijn. Voort met op temperatuur brengen wordt een uitwendige elektrische verwarming toegepast, die geïsoleerd moet worden. Hierdoor is uitwendige koeling bezwaarlijk. Zowel de vloeistof als het gas worden vóór het invoeren in de reactor verwarmd en door het regelen van deze temperaturen is ook de temperatuur in de convertor waarschijnlijk reeds behoorlijk in de hand te houden, speciaal wanneer b.v. de vloeistof door een inwendig aangebrachte dubbele spiraal van boven naar beneden en omgekeerd door de reactor wordt geleid, alvorens aan de reactie te kunnen deelnemen.

De elegantste oplossing zou wellicht een uitwendige mantel zijn, waardoor met behulp van Dowtherm de gewenste temperatuur kan worden verkregen en gehandhaafd, hetzij door verwarmen, hetzij door koelen van de Dowtherm.

Uitvoering.

In de reactor (24) wordt bovenin een waterige tetrahydrofuraan-oplossing gebracht, waarin tevens NiJ_2 katalysator (1 % op tetrahydrofuraan betrokken) en $Ni(CO)_4$ zijn opgelost. Tevens ontvangt deze reactor een koolmonoxyde-stroom, terwijl het geheel onder 200 atm. staat.

hoe werkt die?

→ Via een automatisch werkende reduceerafsluiter stromen de reactieproducten naar koeler 28, waarin de temperatuur tot 180 °C daalt. Het ontwijkende CO loopt via een spatvanger (29) naar een koeler (30). In de separator 31 wordt het gas van de vloeistof, die zich bij afkoeling afscheidt, bevrijd, waarna het door een circulatiepomp weer naar de reactor (24) wordt teruggepompt.

De druk van de vloeistof, die zich in de separator (31) heeft afgescheiden, wordt afgelaten en het onomgezet tetrahydrofuraan-watermengsel wordt na koeling (33) in tank 40 opgevangen, waarna het via de menger (18) weer in de kringloop wordt teruggebracht. In deze menger wordt tevens het verse tetrahydrofuraan, afkomstig van de voorafgaande trap van het proces, ingevoerd. Bovendien kan hier water worden toegevoegd tot de vereiste tetrahydrofuraan-water-verhouding is bereikt. De drie vloeistofhoeveelheden moeten kunnen worden gemeten.

Het adipinezuur verlaat de koeler (28) bij 180 °C in gesmolten toestand (smeltpunt bij 760 mm 152-153 °C) en wordt in koeler 34 verder gekoeld, waarna de druk wordt afgelaten. Eventueel daarbij ontwijkend gas wordt in 35 afgescheiden en in de kringloop teruggevoerd. Het adipinezuur gaat vervolgens via een wachtbak (36) naar een continue centrifuge (19), waarin

het met het juist in het proces ingevoerde tetrahydrofuraan-watermengsel wordt uitgewassen. Nadat het adipinezuur in de kristalliseur (20) is omgekristalliseerd wordt het wederom gecentrifugeerd in een continue centrifuge (21), waarin het met water kan worden uitgewassen. Tenslotte wordt het zuivere adipinezuur bij 41 ~~atm~~ afgevoerd.

De wasvloeistof uit de centrifuge (19) gaat naar de mengbak (22), waarin $Ni(CO)_4$ wordt toegevoegd. Het mengsel wordt door de pomp (23) weer bovenin de reactor (24) gepompt.

Een deel van het nikkelfcarbonyl komt in de afvoergassen van de reactor terecht en dit deel wordt in Ni en CO ontleed in de separator (26), waarin het Ni achterblijft. Heeft zich in 26 een hoeveelheid nikkel afgezet, dan wordt de afvoer door 27 geleid, terwijl het Ni in 26 met behulp van vers CO onder 200 atm. weer wordt opgelost.

De afvoergassen worden gekoeld (37), eventueel nog aanwezig carbonyl wordt in 38 afgescheiden en in het reservoirtje (39) opgevangen, vanwaaruit het aan de vloeistof in de mengbak (22) kan worden toegevoegd.

Er worden in de literatuur over deze trap van de adipinezuur-bereiding opbrengsten van 70-90 % van de theoretische vermeld.

Literatuur .

Bios rapport No 350
351
367.

Verklaring van de nummers in het fabrieksschema
van
E.J.Jacobs.

1. Pomp voor butaandiol-oplossing.
2. Surge-tank.
3. Voorwarmer (20 ato stoom)
4. Voorwarmer(100 ato stoom)
5. Voorwarmer (electrisch)
6. Fosforzuur tank.
7. Zuurinjectiepompje.
8. Reactor.
9. Koeler.
10. Loog tank.
11. Destillatiekolom.
12. Hars afscheider.
13. Reboiler.
14. Centrifugaalpompje.
15. Condensor en koeler.
16. Tetrahydrofuraan rectificatiekolom.
17. Roerder.
18. Mengbak tetrahydrofuraan.
19. Continue centrifuge.
20. Kristalliseur.
21. Continue centrifuge.
22. Mengbak.
23. Vloeistof circulatiepomp.
24. Reactor adipinezuur.
25. CO pomp.
- 26.
27. Ni - CO reactor
28. Koeler.
29. Spatvanger.
30. Koeler.
31. Separator.
32. CO circulatiepomp.
- 33.
34. Koeler.
35. CO separator.
36. Adipinezuur tank.
37. Koeler.
38. Afgas separator.
39. Nikkelcarbonyl reservoir.
40. Tetrahydrofuraan tank.
41. Adipinezuur afvoer.

Berekening van een condensor

behorende bij de methanol-rectificatiekolom, voorkomende in
het fabrieksschema van H.C.Staats over de adipinezuurberei-
ding volgens Reppe, deel I,
uitgevoerd door
E.J.Jacobs.

October 1947.

Aangenomen worden: Dwarsstroom van de damp t.o.v. het
koelwater, dat in double pass door 2x40 parallelle, horizon-
tale, koperen pijpen stroomt.

Uitwendige pijpdiameter: $\frac{1}{2}$ "

Temperatuur dampinvoer	:	149 °F	=	65 °C
condensaatafvoer	:	90 °F	=	32 °C
koelwaterinvoer	:	50 °F	=	10 °C
koelwaterafvoer	:	80 °F	=	27 °C

Filmcondensatie.

De benodigde hoeveelheid koelwater per uur.

In de methanolkolom wordt per uur ingevoerd
100 l 70 gewichts % methanol van 65 °C.

S.g. van dit mengsel bij die temperatuur	:	0,8
Dus totaal gewicht ingevoerd mengsel	:	80 kg/h
70 gew.% methanol	:	56 kg/h
30 gew.% water	:	24 kg/h

Aangenomen, dat geen methanol onderuit de *Kolom*
komt. Bovenuit komt 95 gew.% methanol.

Dus uit kolom naar condensor aan methanol	:	56 kg/h
water	:	3 kg/h

De refluxverhouding is vastgesteld op 1:1.

Dus in totaal te condenseren aan methanol	:	112 kg/h
water	:	6 kg/h

De verkregen vloeistof wordt gekoeld van 65-32 °C.

Af te voeren warmte

a. Condensatiewarmte methanol	112 x 262,8	:	129434	kcal/h
water	6 x 560	:	3360	kcal/h
b. Afkoelen van 65 - 32 °C	118 x 23 x 0,6	:	1628	kcal/h

Totaal af te voeren warmte	:	34422 kcal/h
	of	136600 Btu/h

Hoeveelheid water, die hiermede van 10-27 °C
kan worden verwarmd:

$\frac{34422}{0,998 \times 17}$:	2030 kg/h
---------------------------------	---	-----------

Dat is per pijp <u>2030/40</u>	:	51 kg/h
--------------------------------	---	---------

Inwendige diameter van een pijp	0,379 in.	:	0,94 cm ²
Oppervlak doorsnede van de pijp	$\pi \times 0,47^2$:	0,69 cm ²

*toch niet
1/2" condensor
mog niet tot 32 °C
want 1/2" in 6"-C*

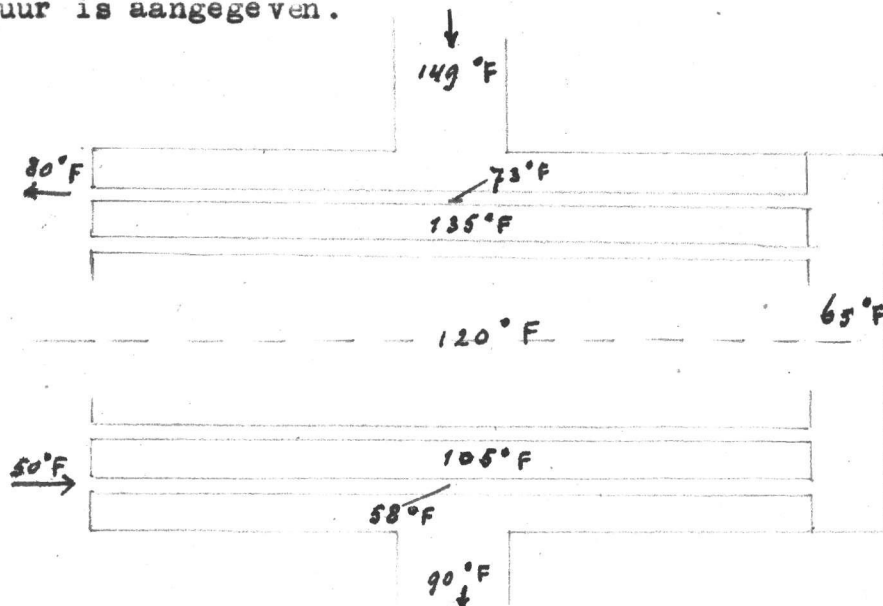
meer weinig pijp

double pass

Massasnelheid	$\frac{51}{0,69}$	$= \frac{51000}{0,69 \times 3300} \frac{g}{cm^2 \cdot sec}$:	74	kg/cm ² .h
→ Viscositeit water			:	20,5	g/cm ² .sec
			:	0,0085	poises
Reynolds getal	$\frac{0,94 \times 20,5}{0,0085}$:	2270	

Aangenomen mag worden, dat de stroming van het water in de koelbuizen turbulent is.

Stel de temperatuurverdeling in de condensor zoals in onderstaande figuur is aangegeven.



De filmcoëfficiënt voor het koelwater.

Uit dimensie-analyse, toegepast op het probleem der warmte-overdracht op vloeistoffen in buizen met cirkelvormige dwarsdoorsnede, volgt de bekende vergelijking

$$(hD/k)(c\mu/k)^{n-1} \approx 0,0225 (DG/\mu)^{0,8}$$

Voor het beschouwde geval, waarin de vloeistof verwarmd wordt is $n = 0,6$, zodat

$$h = 0,0225 k/D (Re)^{0,8} (Pr)^{0,4}$$

$$= 0,0225 k/D (2270)^{0,8} (c\mu/k)^{0,4}$$

waarin k = warmtegeleidingsvermogen (Btu/hr.sqft.°F/ft)
 D = inwendige diameter (ft)
 c = soortelijke warmte (Btu/lb.°F = cal/g.°C)
 μ = absolute viscositeit (lb/hr.ft)

$$h = 0,0225 \cdot 0,340 / 0,031 \cdot (2270)^{0,8} \cdot (1,2,44 / 0,340)^{0,4}$$

$$h = 263.$$

De filmcoëfficiënt voor de condensaatzijde.

Stel, dat de filmcoëfficiënt aan de buitenzijde der pijpen van dezelfde orde van grootte is als aan de binnenzijde. Dan zal dus de gemiddelde wandtemperatuur ongeveer midden tussen de temperatuur binnen en buiten de pijp liggen. Als gemiddelde condensaatfilmtemperatuur nemen we aan het gemiddelde tussen pijpwand en damp.

Beschouwen we eerst de helft van de condensor boven de stippellijn (zie fig.), waarin het water van rechts naar links stroomt.

Gemiddelde watertemperatuur	: 73 °F
Gemiddelde damptemperatuur	: 135 °F
Dus gemiddelde wandtemperatuur	: 104 °F
Gemiddelde condensaatfilmtemperatuur	: 120 °F.

Toepassen van de vergelijking van Nusselt geeft:

$$h = 0,725 \left(\frac{k^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \lambda}{D_o \cdot \mu \cdot \Delta t} \right)^{1/4}$$

waarin g = versnelling van de zwaartekracht
 λ = condensatiewarmte methanol
 D_o = uitwendige diameter
 Δt = temperatuurverschil damp - wand.

De waarden voor 120 °F hierin gesubstitueerd geven:

$$h = 0,725 \left(\frac{0,114^3 \cdot 46,8^2 \cdot 4,18 \times 10^8 \cdot 475}{0,04 \cdot 0,96 \cdot 31} \right)^{1/4}$$

$$h = 622.$$

De filmcoëfficiënt aan de dampzijde is dus aanzienlijk groter dan de waterfilmcoëfficiënt en de aanname, dat de wandtemperatuur het gemiddelde zou zijn tussen de temperaturen aan binnen- en buitenkant is dus niet juist.

De weerstanden tegen warmte-overdracht van dampfilm, wand en waterfilm zullen zich n.l. verhouden als

$$\frac{1}{622 \times 0,5} ; \frac{(0,5-0,37)/2 \times 12}{60 \times 0,44} ; \frac{1}{263 \times 0,37}$$

$$= 0,0032 : 0,0002 : 0,0103$$

Het temperatuurverval door de condensaatfilm is dus:

$$(135 - 73) \cdot 0,0032/0,0137 = 14,5 \text{ °F}$$

En door de waterfilm:

$$(135 - 73) \cdot 0,0103/0,0137 = 46,6 \text{ °F}$$

Op deze wijze wordt dus voor de gemiddelde dampfilmtemperatuur 127,8 °F en voor Δt 14,5 °F gevonden.
 Met deze gegevens berekend, wordt

$$h = 0,725 \left(\frac{0,112^3 \cdot 46,7^2 \cdot 4,18 \cdot 10^8 \cdot 475}{0,04 \cdot 0,92 \cdot 14,5} \right)^{1/4}$$

$$h = 749.$$

De verhouding van de drie weerstanden wordt in dit geval:

$$0,0026 : 0,0002 : 0,0103$$

en het temperatuurverval door de condensaatfilm is dus

$$(135 - 73) \cdot 0,0026 / 0,0131 = 12,1 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

Het heeft weinig zin de berekening voor h nu nogmaals te corrigeren. Gesteld mag worden :

$$h = 750$$

De overall-coëfficiënt, die hieruit volgt, wordt nu:

$$U = \frac{1}{\frac{D_u}{D_i \cdot h_i} + \frac{D_u \cdot d}{D_{gem} \cdot k} + \frac{1}{h_u}}$$

$$= \frac{1}{0,00514 + 0,00010 + 0,00133}$$

$$U = 152$$

De lengte van de pijpen kan nu als volgt worden berekend:

$$q = U \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta t$$

waarin q = de hoeveelheid over te dragen warmte per buis

$$= \frac{136600}{2 \cdot 40} = 1707,5 \text{ Btu}$$

Hieruit volgt voor L

$$L = \frac{1707,5}{152 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 62} = 1,44 \text{ ft.}$$

Berekend voor de bovenste helft van de condensor zou de pijp-lengte dus moeten zijn

$$1,5 \text{ ft.}$$

Beschouwen we nu de onderste helft, waarin het water van links naar rechts stroomt.

Gemiddelde watertemperatuur : 58 $^\circ\text{F}$

Gemiddelde damp temperatuur : 105 $^\circ\text{F}$

Er kan nu al direct worden aangenomen, dat de wandtemperatuur

*berekening
of D met h en U*

0.370 inch met

niet het gemiddelde van deze twee temperaturen zal zijn, gezien de resultaten bij de voorafgaande berekening.

Stel de wandtemperatuur is 98°F

Condensaatfilmtemperatuur 101°F .

$$h = 0,725 \left(\frac{0,110^3 \cdot 47,0^2 \cdot 4,18 \cdot 10^8 \cdot 475}{0,04 \cdot 0,98 \cdot 7} \right)^{1/4}$$

$$h = 932.$$

De weerstanden van condensaatfilm, wand en waterfilm verhouden zich nu als

$$\frac{1}{932 \times 0,5} : \frac{(0,5-0,37)/2 \times 12}{60 \times 0,44} : \frac{1}{263 \times 0,37}$$

$$= 0,0021 : 0,0002 : 0,0103$$

Het temperatuurverval door de dampfilm wordt dus

$$(105 - 58) \cdot 0,0021/0,0126 = 8^{\circ}\text{F}.$$

en de gemiddelde dampfilmtemperatuur wordt inderdaad 101°F .

De hiervoor vermelde aanname was dus juist.

De hieruit te berekenen overall-coëfficiënt wordt

$$U = \frac{1}{\frac{0,5}{0,37 \cdot 263} + \frac{0,5 \cdot 0,065}{0,44 \cdot 60 \cdot 12} + \frac{1}{932}}$$

$$U = 158$$

De lengte der pijpen is dus :

$$L = \frac{1707,5}{158 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 47} = 1,8 \text{ ft.}$$

Hieruit blijkt, dat de aanname van de heersende temperatuurverdeling niet geheel juist was, immers, de berekende lengten voor de bovenste en onderste helft stemmen niet geheel overeen.

Er mag echter worden aangenomen, dat een lengte der pijpen van

1,6 ft of 50 cm

als voor het doel geschikt kan worden beschouwd.

Literatuur.

1. Perry : Chemical Engineers Handbook New York 1941
2. Mc Adams : Heat transmission New York 1942
3. Badger, Mc Cabe : Elements of Chemical Engineering New York 1936
4. Walker, Lewis, McAdams, Gilliland : Principles Chemical Engineering New York 1937.

Verzamen met de bekende formules met de Adams toepast!
 1.69 ft = 1.7 ft

Verlobing

Berekening van een condensor

behorende bij de methanol-rectificatiekolom, voorkomende in het fabrieksschema van H.C.Staats over de adipinezuurbereiding volgens Reppe, deel I, uitgevoerd door

E.J.Jacobs

October 1947

Aangenomen worden: Dwarsstroom van de damp t.o.v. het koelwater, dat in double pass door 2 x 30 parallelle, horizontale, koperen pijpen stroomt.

Uitwendige pijp diameter : $\frac{1}{2}$ '

Temperatuur dampinvoer	:	149 °F = 65 °C
condensaatafvoer	:	149 °F = 65 °C
koelwaterinvoer	:	50 °F = 10 °C
koelwaterafvoer	:	80 °F = 27 °C.

Filmcondensatie.

De benodigde hoeveelheid koelwater per uur.

In de methanol kolom wordt ingevoerd per uur 100 l 70 gew.% methanol van 65 °C.

S.g. van dit mengsel bij die temperatuur	:	0,8	
Dus totaal gewicht ingevoerd mengsel	:	80	kg/h
70 gew.% methanol	:	56	kg/h
30 gew.% water	:	24	kg/h

Aangenomen, dat geen methanol onderuit de kolom komt.

Bovenuit komt 95 gew.% methanol.

Dus uit kolom naar condensor aan methanol	:	56	kg/h
water	:	3	kg/h

De refluxverhouding is vastgesteld op 1 : 1.

Dus in totaal te condenseren aan methanol	:	112	kg/h
water	:	6	kg/h

Af te voeren warmte

a. Condensatie warmte methanol	112 x 262,8	:	29434	kcal/h
b. water	6 x 560	:	3360	kcal/h
Totaal		:	32794	kcal/h
		of :	130127	Btu/h

Hoeveelheid water, die hiermede van 10-27 °C kan worden verwarmd:

$$\frac{32794}{0,998 \times 17} : 1934 \text{ kg/h}$$

Dat is per pijp $1934/30$: 64,5 kg/h

Inwendige diameter van een pijp 0,370 in. : 0,94 cm
 Oppervlak doorsnede van een pijp $\pi \times 0,47^2$: 0,69 cm²

Massasnelheid $\frac{64500}{0,69 \times 3600}$: 26 g/cm² sec

Gemiddelde viscositeit water : 0,0085 poises

Reynolds getal $\frac{0,94 \times 26}{0,0085}$: 2875

Aangenomen mag worden, dat de stroming van het water in de koelbuizen turbulent is.

De filmcoëfficiënt voor het koelwater.

Uit dimensie-analyse, toegepast op het probleem der warmteoverdracht op vloeistoffen in buizen met cirkelvormige dwarsdoorsnede, volgt de bekende vergelijking:

$$(hD/k)(c/\mu/k)^{n-1} = 0,0225 (DG/\mu)^{0,8}$$

Voor het beschouwde geval, waarin de vloeistof verwarmd wordt is $n = 0,6$, zodat

$$\begin{aligned} h &= 0,0225 k/D (Re)^{0,8} (Pr)^{0,4} \\ &= 0,0225 k/D (2875)^{0,8} (c/\mu/k)^{0,4} \end{aligned}$$

waarin k = warmtegeleidingsvermogen (Btu/hr.sqft. $^{\circ}$ F/ft)
 D = inwendige diameter (ft)
 c = soortelijke warmte (Btu/lb. $^{\circ}$ F = cal/g. $^{\circ}$ C)
 μ = absolute viscositeit (lb/hr.ft)

$$h = 0,0225 \times 0,340/0,031 \cdot (2875)^{0,8} \cdot (11,2,44/0,340)^{0,4}$$

$$\underline{h = 317}$$

De filmcoëfficiënt voor de condensaatzijde.

Aannemend, dat het temperatuurverval door de condensaatfilm kleiner is, dan door de koelwaterfilm en veronderstellend, dat de temperatuur van de condensaatfilm het gemiddelde is tussen de temperatuur van de wand en van de hoofdmasse van de damp, kan men zich de onderstaande temperatuurverdeling bij de koelwaterinvoer en -afvoer denken.

149 $^{\circ}$ F	149 $^{\circ}$ F
137	140
125	130
50 $^{\circ}$ F	80 $^{\circ}$ F
Invoerszijde	Afvloerszijde

Aan de koelwaterinvoerszijde

Toepassen van de vergelijking van Nusselt geeft:

$$h = 0,725 \left(\frac{k^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \lambda}{D_0 \cdot \mu \cdot \Delta t} \right)^{1/4}$$

waarin g = versnelling van de zwaartekracht
 λ = condensatiewarmte methanol
 D_0 = uitwendige diameter
 Δt = temperatuurverschil damp - wand

De waarden voor 137 °F hierin gesubstitueerd geven:

$$h = 0,725 \left(\frac{0,111^3 \cdot 46,6^2 \cdot 4,18 \times 10^8 \cdot 475}{0,04 \cdot 0,96 \cdot 24} \right)^{1/4}$$

$$h = 663.$$

De weerstanden tegen warmte-overdracht van dampfilm, wand waterfilmverhouden zich nu als

$$\frac{1}{663 \times 0,5} : \frac{(0,5-0,37)/2 \times 12}{60 \times 0,44} : \frac{1}{317 \times 0,37}$$

$$= 0,0030 : 0,0002 : 0,0085$$

Het temperatuurverval door de condensaatfilm is dus :

$$0,0030/0,0117 \times (149 - 50) = 25,4 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Door de waterfilm is het temperatuurverval:

$$0,0085/0,0117 \times (149 - 50) = 71,9 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

D.w.z. dat de temperatuurverdeling als volgt is:

$$\begin{array}{r} 149 \\ \hline 123,6 \\ \hline 121,9 \\ \hline 50 \end{array}$$

De aanname van de temperatuurverdeling wijkt hiervan slechts weinig af en het heeft weinig zin de berekening voor dit kleine verschil nog te corrigeren.

De overall-coëfficiënt, die hieruit volgt, wordt nu :

$$U = \frac{1}{\frac{D_u}{D_i \cdot h_i} + \frac{D_u \cdot d}{D_{gem} \cdot k} + \frac{1}{h_u}}$$

$$= \frac{1}{0,00426 + 0,00010 + 0,00150}$$

$$U = 171$$

Aan de koelwaterafvoerszijde.

De waarden voor 140 °F in de vergelijking van Nusselt ingevuld geven :

$$h = 0,725 \left(\frac{0,110 \times 46,6 \times 4,18 \times 10^8 \times 475}{0,04 \times 0,87 \times 19} \right)^{1/4}$$

$$h = 700$$

De weerstanden tegen warmte-overdracht van condensaatfilm, wand en waterfilm verhouden zich nu als

$$\frac{1}{700 \times 0,5} : \frac{(0,5-0,37)/2 \times 12}{60 \times 0,44} : \frac{1}{317 \times 0,37}$$

$$= 0,0029 : 0,0002 : 0,0085$$

Het temperatuurverval door de condensaatfilm is dus :

$$0,0029/0,0116 \times (149 - 80) = 17,2 \text{ °F}$$

Door de waterfilm is het temperatuurverval :

$$0,0085/0,0116 \times (149 - 80) = 50,6 \text{ °F.}$$

D.w.z. dat de temperatuurverdeling als volgt is :

$$\begin{array}{r} 149 \\ \hline 140 \quad \leftarrow 131,8 \\ \hline 131,2 \\ \hline 80 \quad \leftarrow 130,6 \end{array}$$

Ook hier wijkt de aangenomen temperatuurverdeling slechts weinig van de hier gevonden waarden af.

De hieruit volgende overall-coëfficiënt wordt :

$$U = \frac{1}{0,00426 + 0,00010 + 0,00143}$$

$$U = 173$$

De overall-coëfficiënt blijkt dus weinig te veranderen tussen begin en einde van de condensor. Als gemiddelde overall-coëfficiënt kan dus worden gerekend met :

$$\underline{\underline{U = 172}}$$

De lengte van de pijpen kan nu als volgt worden berekend :

$$q = U \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta t$$

waarin q = de hoeveelheid over te dragen warmte per buis

$$= \frac{130127}{2 \times 30} = 2169 \text{ Btu}$$

Hieruit volgt voor L :

$$L = \frac{2169}{172 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 84}$$

$$\underline{\underline{L = 1,17 \text{ ft}}}$$

(Voor Δt kan hier zowel het logaritmisch gemiddelde als het rekenkundig gemiddelde worden gesubstitueerd; beide bedragen $84 \text{ }^\circ\text{F}$)

Literatuur .

- | | | | |
|--------------------|--------------------------------------|----------|-------|
| 1. Perry | : Chemical Engineers Handbook | New York | 1941 |
| 2. Mc Adams | : Heat Transmission | ,, | 1942 |
| 3. Badger, Mc Cabe | : Elements of Chemical Engineering | ,, | 1936 |
| 4. Walker, Lewis, | | ,, | 1937. |
| McAdams, Gilliland | : Principles of Chemical Engineering | | |