

MASTER

De invloed van de schraperbladhoogte op de warmteoverdracht en het opgenomen vermogen in een geschraapte warmtewisselaar

Hulsman, D.R.J.G.A.

Award date:
1990

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Scheikundige Technologie
Vakgroep Chemische Proceskunde
Laboratorium voor Fysische Technologie

**DE INVLOED VAN DE SCHRAPERBLADHOOGTE OP
DE WARMTEOVERDRACHT EN HET OPGENOMEN
VERMOGEN IN EEN GESCHRAAPTE
WARMTEWISSELAAR.**

afstudeerverslag
van
D.R.J.G.A. Hulsman

Afstudeer hoogleraar : prof.dr.ir. D.Thoenes
Afstudeer begeleiders : ir. J.G. Wijers
ir. J.L.H. Muijens

Eindhoven, oktober 1990

SAMENVATTING

Een manier om water uit een produktstroom te verwijderen, is vriesconcentreren. Bij het vriesconcentreren wordt een deel van het in het produkt aanwezige water uitgekristalliseerd waarna het ijs uit de processtroom wordt afgescheiden. Voor het kristalliseren van water kan een geschraapte warmte-wisselaar gebruikt worden. Over de invloed van de procesvariabelen en de apparaatgeometrie op de warmte-overdracht en het opgenomen vermogen is nog onvoldoende bekend.

In een geschraapte warmte-wisselaar met een warmte-uitwisselend oppervlak van 0.113m^2 is de invloed van de hoogte van het schraperblad op de warmte-overdracht en het opgenomen vermogen onderzocht, voor situaties met en zonder fasenovergang. De hoogte van de gebruikte schraperbladen, gemaakt van fosforbrons, bedroegen 10 en 20 millimeter. Als koelmiddel werd methanol gebruikt, als procesvloeistof werden dextrose in water oplossingen gebruikt. De gevarieerde procesvariabelen zijn : het toerental van de schraperas (tussen 100 en 1000 rpm), het dextrose-percentages in de procesvloeistof (tussen 10wt% en 56wt%), het debiet van de procesvloeistof (tussen 0 en 0.16 kg/s) en de koelmiddeltemperatuur (tussen -5C en -22C).

Voor de uitwendige warmteoverdrachtscoefficient $\alpha(u)$ werd gevonden dat deze berekend kon worden met de vergelijking: $Nu_u = 0.0656 \cdot Re_u^{0.8} \cdot Pr_u^{0.4}$.

De hoogte van het schraperblad bleek van invloed op de warmte-overdracht; $\alpha(i)$ bepaald met het 10mm schraperblad was ongeveer 15% lager dan het $\alpha(i)$ met het 20mm schraperblad. De invloed van het schraperblad kan tot uiting gebracht worden door het rechter lid van de empirische relatie $Nu = \text{constante} \cdot Re^a \cdot Pr^b$ te vermenigvuldigen met de dimesieloze groep $(H_b/d_h)^c$. Voor situaties met fasenovergang wordt voor de warmte-overdracht gevonden : $Nu = 4.61 \cdot Re^{0.40} \cdot Pr^{0.33} \cdot (H_b/d_h)^{0.40}$; voor situaties zonder fasenovergang wordt gevonden: $Nu = 1.79 \cdot Re^{0.46} \cdot Pr^{0.33} \cdot (H_b/d_h)^{0.46}$. In het in dit onderzoek onderzochte gedeelte van het turbulente gebied blijken de waarden voor $\alpha(i)$ voor situaties met fasenovergang een factor 1.45 tot 1.77 maal groter dan voor situaties zonder fasenovergang.

Om uit het door de motor op de schraperas geleverde koppel het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen te berekenen is het op de as gemeten koppel verminderd met de wrijving in de lagers en keerringen. De bijdrage aan het koppel veroorzaakt door wrijvingsverliezen kan beschreven worden met de vergelijking: $K = 0.00014 \cdot N - 0.0143$. Voor situaties met fasenovergang kan het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen berekend worden met de relatie: $P = 0.00055 \cdot N^2 \cdot \mu^{0.5}$. Voor situaties zonder fasenovergang kan het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen berekend worden met: $P = 0.00051 \cdot N^2 \cdot \mu^{0.5}$. Het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen lijkt onafhankelijk van de hoogte van het schraperblad.

Het energie rendement van een geschraapte warmtewisselaar kan uitgedrukt worden in het quotient van de hoeveelheid overgedragen warmte en het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen ten gevolge van schrapen. Het energie rendement blijkt maximaal voor lage toerentallen van de schraperas en lage temperatuursverschillen tussen de koel- en proces-vloeistof.

Er is een aanzet gemaakt voor een modelmatige beschrijving van de warmteoverdracht in een geschraapte warmtewisselaar. Onder bepaalde aannamen is de verhouding van de hoeveelheid overgedragen warmte in situaties met fasenovergang en de hoeveelheid overgedragen warmte in situaties zonder fasenovergang beschreven. Voor een nauwkeuriger beschrijving van de warmteoverdracht in een geschraapte warmtewisselaar heeft het model verdere verfijning.

INHOUDSOPGAVE

		blz.
Hoofdstuk 1	Inleiding	1
Hoofdstuk 2	Theorie	3
Hoofdstuk 3	Meetopstelling en Meetapparatuur	16
Hoofdstuk 4	Berekeningswijze	
	4.1 De berekening van de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt U	19
	4.2 De berekening van de uitwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(u)$	20
	4.3 De berekening van de inwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(i)$	21
	4.4 De berekening van het gedissipeerde vermogen	22
Hoofdstuk 5	Meetresultaten	
	5.1 De uitwendige warmteoverdrachts- coëfficiënt $\alpha(u)$	23
	5.2 De inwendige warmteoverdrachts- coëfficiënt $\alpha(i)$ met fasenovergang	26
	5.3 De inwendige warmteoverdrachts- coëfficiënt $\alpha(i)$ zonder fasenovergang	33
	5.4 De bepaling van de correctiefactor voor de wrijvingsbijdrage	38
	5.5 Vermogensopname met fasenovergang	40
	5.6 Vermogensopname zonder fasenover- gang	45
Hoofdstuk 6	Bespreking	
	6.1 Warmteoverdracht	49
	6.2 Het gedissipeerde vermogen	58
Hoofdstuk 7	Conclusies	64
	Symbolenlijst	
	Literatuur	

1 INLEIDING

Een groot aantal produkten in de voedingsmiddelenindustrie bevatten veel water. Dit water kan niet alleen leiden tot bederf van het produkt, maar maakt ook de opslag en het transport van het produkt on-economisch. De kosten voor opslag en transport worden voornamelijk bepaald door het aanwezige watervolume. Het kan dus wenselijk zijn het watergehalte van het produkt tot een minimum te reduceren. De twee belangrijkste industrieel toegepaste methoden zijn die van het verdampen (warmte aan het systeem toevoeren) en het vriesconcentreren (warmte aan het systeem onttrekken).

Het verdampen van het oplosmiddel heeft als nadeel dat door de hoge temperaturen (70-100C) ook een gedeelte van de aroma componenten zullen verdampen. Daarnaast kan het gebeuren dat thermolabiele componenten onder invloed van de hoge temperatuur ontleden.

De methode van het zogenaamde vriesconcentreren heeft de bovengenoemde nadelen niet. Bij vriesconcentreren wordt aan het produkt warmte onttrokken waardoor het aanwezige water, al dan niet gedeeltelijk, in ijs omgezet wordt. Hierna wordt het gevormde ijs van de moederoplossing gescheiden. Een nadeel van deze methode is dat er naast water ook een klein gedeelte van het produkt in het gevormde ijs ingebouwd kan worden of zich aan het kristaloppervlak zal hechten. Het aroma verlies is hier echter minder dan bij het thermisch concentreren.

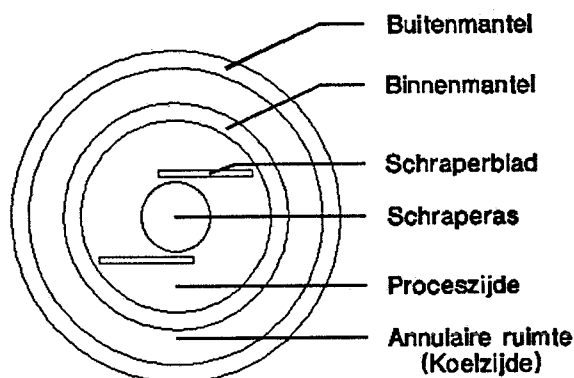


fig.(1.1): Schematische voorstelling van een geschraapte warmtewisselaar (dwarsdoorsnede)

Voor het laten kristalliseren van de vloeistof kan men gebruik maken van een zogenoemde geschraapte warmtewisselaar (zie figuur 1.1). De geschraapte warmtewisselaar bestaat uit twee concentrische cilinders. Door de annulaire

ruimte stroomt een koelvloeistof, waardoor de wand van de binnenste cilinder op een lage temperatuur gehouden wordt. Door de binnenste cilinder stroomt de procesvloeistof. Aan of in de nabijheid van de wand zal de procesvloeistof gedeeltelijk kunnen kristalliseren. Om eventueel aan de wand gevormd ijs te verwijderen en de ijskristallen met de bulk te mengen, is er in de binnencilinder een roterende as, met daaraan bevestigd een aantal schraperbladen, aangebracht. In de bulk zullen de ijskristallen (gedeeltelijk) afsmelten en zo de bulktemperatuur doen dalen.

Geschraapte warmtewisselaars worden meestal gebruikt voor het opwarmen of afkoelen van visceuze vloeistoffen. De aanwezige schraperbladen zorgen voor opmenging van de tussen twee opvolgende schrapingen ontstane grenslaag en de bulk van de procesvloeistof. Door deze voortdurende temperatuurvereffening neemt de effectieve warmte-overdracht toe ten opzichte van de situatie zonder schrapen

Om tot een optimaal ontwerp van een geschraapte warmte-wisselaar als kristallisator te komen, wordt door de T.U.E. in samenwerking met Grenco Process Technology BV onderzoek gedaan. De voornaamste aandachtspunten van het onderzoek zijn de warmte-overdracht aan de proceszijde en het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen. In dit afstudeer-onderzoek wordt de invloed van de hoogte van het schraperblad op de warmte-overdracht en het gedissipeerde vermogen onderzocht, voor situaties zowel met als zonder fasenovergang. Om de invloed van de schraperbladgeometrie te beschrijven werden de volgende systeemp parameters gevarieerd:

1. Het toerental van de roeras
2. Het debiet van de procesvloeistof
3. De fysische eigenschappen van de procesvloeistof
4. De koelmiddel temperatuur

2 THEORIE

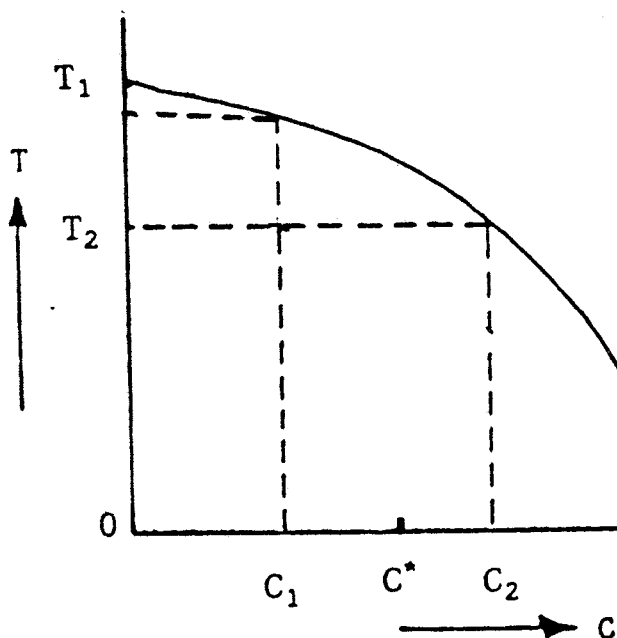
Kristalgroei uit een oplossing kan plaatsvinden wanneer de oplossing oververzadigd of onderkoeld is. De mate waarin onderkoeling bereikt wordt oftewel hoe verder het systeem zich uit de evenwichtsituatie bevindt, is de bepalende faktor in kristalgroei. Elk kristallisatieproces bestaat uit 3 stappen:

1. het bereiken van een situatie van onderkoeling of oververzadiging
2. vorming van kristalkiemen (nucleatie)
3. groei van het kristal

Op elk van de 3 stappen zal een toelichting gegeven worden.

Oververzadiging of onderkoeling

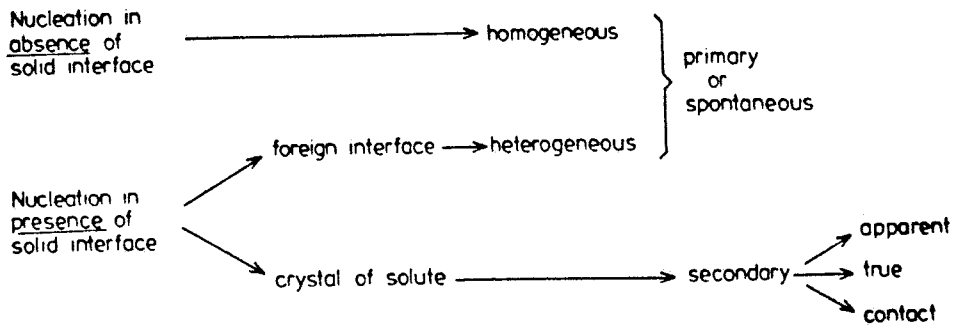
Oververzadiging van een oplossing kan bereikt worden door de vloeistof te onderkoelen (zie figuur 2.1). De bij temperatuur T_1 behorende evenwichtsconcentratie is C_1 de bij temperatuur T_2 behorende evenwichtsconcentratie is C_2 . Wordt de vloeistof met temperatuur T_1 zo snel afgekoeld tot T_2 dat de concentratie verandering de vriespuntsdaling-curve niet kan volgen, dan is de oververzadiging gelijk aan $C^* - C_2$.



figuur 2.1 : Vriespuntsdalingscurve

Nucleatie

Kristallen groeien aan in de oplossing aanwezige kristallisatie-kernen. Het ontstaan van deze groeikernen uit de oververzadigde oplossing heet nucleatie. Er kunnen 3 verschillende nucleatie-mechanismen onderscheiden worden (Botsaris [1]); figuur 2.2 geeft een overzicht.



figuur 2.2: overzicht verschillende nucleatie-mechanismen (Garside [13])

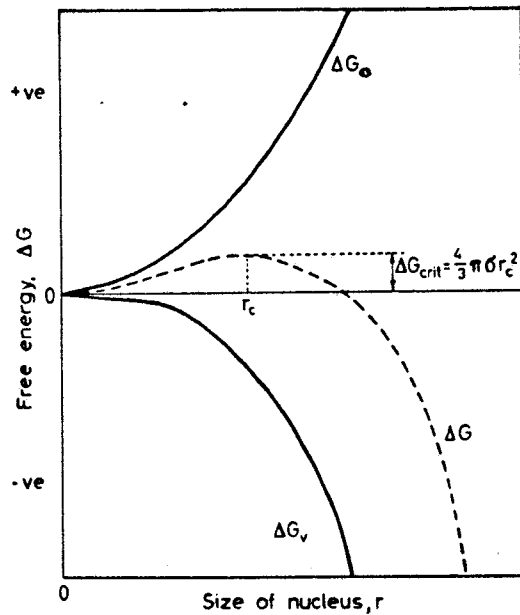
Klassieke theorieën van primaire of spontane nucleatie gaan er van uit dat in oververzadigde oplossingen atomen of molekulen combineren tot geordende aggregaten, ook wel embryo's genoemd. De vrije enthalpie ΔG van dit proces is gelijk aan (Mullin [2]):

$$\Delta G = G_{vast} - G_{vloeistof} \quad (\text{vgl. 2.1})$$

De kristallisatie-kiem kan alleen groeien als $\Delta G < 0$. ΔG is voor kleine onderkoeling groter dan nul: de vorming van een nieuw vast-vloeistof grensvlak brengt een toename van de vrije oppervlakte-enthalpie met zich mee. Voor een bolvormige kiem met straal r en oppervlakte-enthalpie γ per eenheid van oppervlak zal de toename van de vrije oppervlakte-enthalpie $\Delta G_0 = 4\pi r^2 \gamma$ bedragen. Is Δg_v de vrije-enthalpie per volume-eenheid gekristalliseerde stof bij stollen dan is de enthalpie-winst gelijk aan $-\Delta G_v = (4/3)\pi r^3 \Delta g_v$. De totale verandering van vrije enthalpie is dan:

$$\Delta G = -\Delta G_v + \Delta G_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_v + 4 \pi r^2 \gamma \quad (\text{vgl. 2.2})$$

In figuur 2.3 is het verloop van $-\Delta G_v$, ΔG_0 en ΔG met de straal van de kiem geschetst. De ΔG -curve blijkt een maximum te vertonen bij een kritische straal r_k .



figuur 2.3 : Vrije energie van een kristal als functie van de straal (Mullin [2]).

Differentieren van vergelijking 2.2 geeft:

$$\frac{\delta G}{\delta r} = 4 * \pi * r^2 * \Delta g_v + 8 * \pi * r * \gamma \quad (\text{vgl. 2.3})$$

De kritische straal r_k wordt gevonden uit: $(\delta G / \delta r)_{r=r_k} = 0$:

$$r_{kr} = \frac{-2 * \gamma}{\Delta g_v} \quad (\text{vgl. 2.4})$$

De bij de kritische straal behorende waarde voor de oppervlakte-vrije enthalpie ΔG_{kr} is gelijk aan:

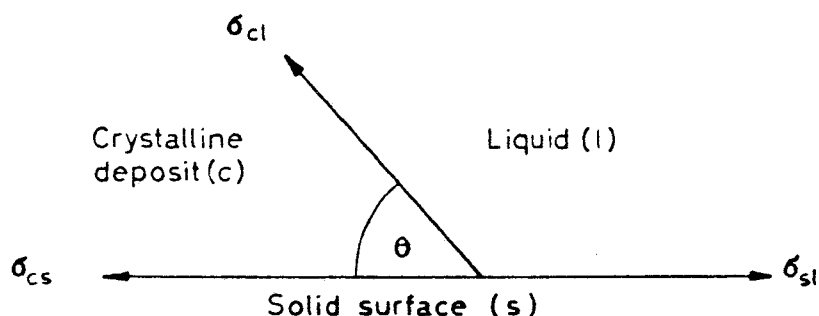
$$\Delta G_{kr} = \frac{16 * \pi * \gamma^3}{3 * (\Delta g_v)^2} \quad (\text{vgl. 2.5})$$

Kiemen met een straal groter dan r_k kunnen verder groeien daar voor $r > r_k$ geldt dat $(\delta G / \delta r)_{r > r_k} < 0$. Kiemen met een straal kleiner dan r_k zullen weer afsmelten daar $(\delta G / \delta r)_{r < r_k} > 0$.

De snelheid waarmee nieuwe deeltjes ontstaan wordt bepaald door het 'gemak' waarmee de embryo's over het maximum in de vrije-energie curve kunnen komen. De primaire nucleatie-snelheid B kan met de volgende algemene vergelijking beschreven worden (Nielsen [3]):

$$B = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{C_2 \cdot \gamma_s^3}{T^3 \cdot \ln^2 S}\right) \quad (\text{vgl. 2.8})$$

waarin S de oververzadigingsratio (c/c_{eq}) is. De primaire nucleatiesnelheid is niet lineair met de oververzadiging. Voor lage waarden van S is B ongeveer 0, voor grote waarden van S stijgt B echter snel.



figuur 2.4 : Oppervlakte-energieën op het grensvlak tussen drie fasen; een vaste fase en twee vloeibare fasen (Mullin [2]).

Wanneer de oververzadigingsratio laag is, zal de homogene nucleatiesnelheid laag zijn. Bij een lage oververzadigingsratio vindt nucleatie plaats aan/of in de nabijheid van een vaste stof anders dan het kristal (heterogene nucleatie). In figuur 2.4 is de situatie voor heterogene nucleatie geschetst. De contacthoek θ speelt een belangrijke rol, voor $\theta = 0^\circ$ is er sprake van volledige bevochtiging, voor $\theta = 180^\circ$ is er geen bevochtiging. Daar heterogene nucleatie optreedt bij een kleinere onderkoeling dan voor homogene nucleatie nodig is, zal de $\Delta G_{kritisch}$ voor heterogene nucleatie kleiner zijn dan de $\Delta G_{kritisch}$ voor homogene nucleatie:

$$\Delta G_{kritisch}^{heterogeen} = \phi \cdot \Delta G_{kritisch}^{homogeen} \quad (\text{vgl. 2.7})$$

met $\phi < 1$.

Voor ϕ is de volgende relatie bekend (Volmer [4]):

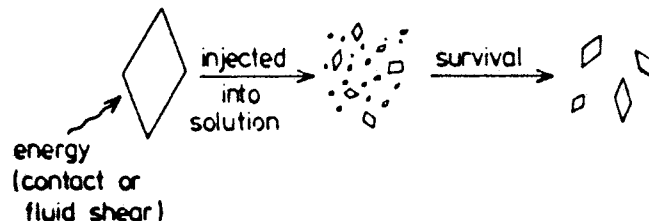
$$\phi = \frac{(2 + \cos\theta) * (1 - \cos\theta)^2}{4} \quad (\text{vgl. 2.8})$$

Als er geen bevochtiging is, is $\theta = 180^\circ$. Er geldt dan :

$$\Delta G_{\text{kritisch}}^{\text{heterogeen}} = \Delta G_{\text{kritisch}}^{\text{homogeen}} \quad (\text{vgl. 2.9})$$

De snelheidsvergelijking voor heterogene nucleatie is van dezelfde vorm als die voor homogene nucleatie, maar de katalytische werking van de heterogene nucleï reduceert de kritische oververzadiging waarboven snelle groei optreedt.

Secundaire nucleatie treedt op wanneer kristallen van de te kristalliseren stof in de oververzadigde oplossing worden gebracht. Van de 3 mogelijke mechanismen van secundaire nucleatie wordt hier alleen het 'contact' mechanisme besproken. Contact tussen een groeiend kristal en de wand van de warmtewisselaar, de schraperas, de schraperbladen of andere kristallen kan leiden tot de vorming van 'contact-nucleï'. Het principe is weergegeven in figuur 2.5 (Botsaris [1]).



figuur 2.5 : Principe van het 'contact'-mechanisme voor secundaire nucleatie (Garside [13]).

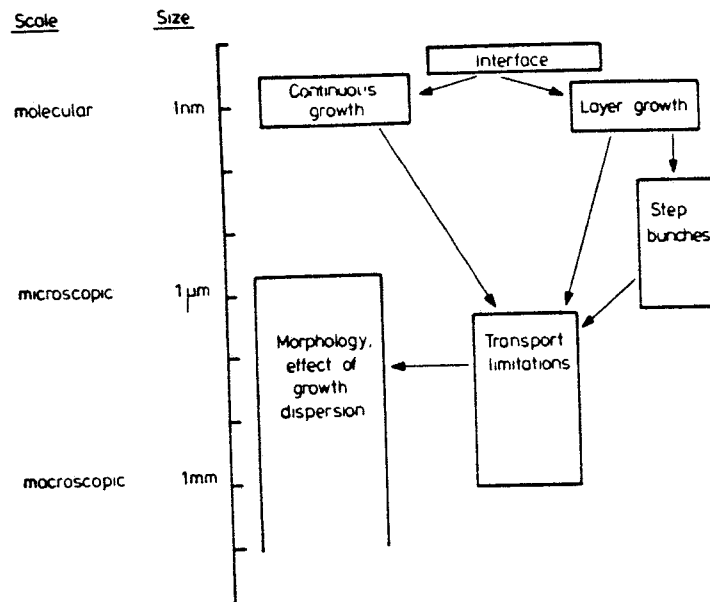
Deeltjes die groter zijn dan de kritische straal zullen verder kunnen groeien, deeltjes die kleiner zijn dan de kritische straal smelten weer af. De algemene vorm van de nucleatie-snelheidsvergelijking voor secundaire nucleatie is (Garside [5]):

$$B = K_B * f_{geom} * \Delta C^b * M * N^k \quad (\text{vgl. 2.10})$$

- Waarin K_B : nucleatie snelheidscoefficient
 f_{geom} : geometrische faktor
 ΔC : drijvende kracht in termen van concentratie: $C - C_{eq}$
 M : totale kristal massa
 N : toerental van de schraperas

Groei van het kristal

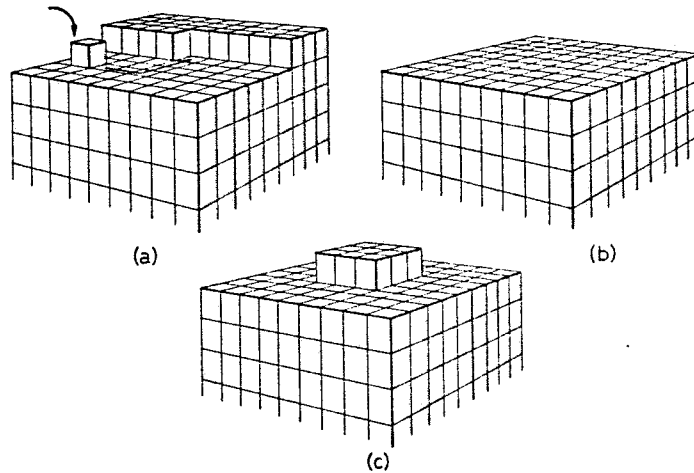
Wanneer een onderkoelde oplossing stabiele nuclei bevat ($r > r_{kr}$) dan zullen deze nuclei groeien. Het proces van kristalgroei kan op verschillende grootte-orde niveau's beschreven worden (zie figuur 2.6).



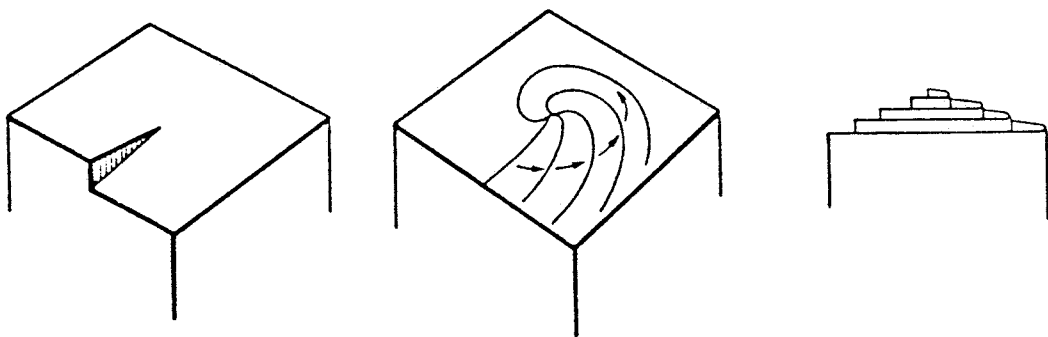
figuur 2.6 : Kristalgroei-verschijnselen voor verschillende grootte-orde niveaus (Garside [13]).

Op moleculair niveau zijn twee groei-modellen te onderscheiden: het 'continuous growth' model en het 'layer growth' model. In beide modellen beschouwt men een molecuul dat vanuit de bulk van de vloeistof naar het oppervlak diffundeert en zich daar aan de vaste stof hecht. Het molecuul zal zich daar aan het kristal hechten waar de attractie-krachten het

grootst zijn, d.w.z. daar waar al reeds eerder molekulen in het rooster zijn ingebouwd. Wanneer het kristal-oppervlak glad is, zullen er weinig plaatsen zijn waar het molekuul zich aan het oppervlak kan hechten. Groei vindt dan laag voor laag plaats ('layer growth'). In de figuren 2.7 en 2.8 worden twee voorbeelden van 'layer growth' gegeven.



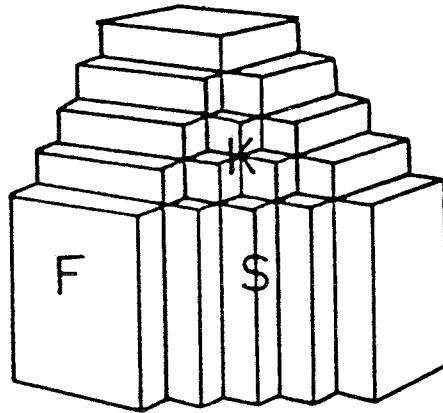
figuur 2.7 : mechanisme van 'layer growth' aan een oppervlak zonder dislocaties: (a) migratie over het oppervlak naar een energetisch gunstige plaats; (b) compleet aangelegde laag; (c) oppervlakte nucleatie



figuur 2.8 : mechanisme van 'layer growth' aan een oppervlak met dislocaties.

Is het kristal-oppervlak daarentegen oneffen (zie figuur 2.9) dan is de kristalgroei relatief snel: er zijn dan meer dan voldoende plaatsen waar molekulen uit oplossing kunnen aanhechten ('continuous growth').

Op microscopische schaal kunnen zogenoemde "step bunches" waargenomen worden. Dit zijn oneffenheden in het oppervlak met een afmeting van enkele honderden atomen maar zijn zelf relatief vlak.



figuur 2.9 : kristal met F (flat), S (stepped) en K (kinked) vlakken.

De ruwheid van het oppervlak kan beschreven worden met de oppervlakte-entropie-factor α (Jackson [6], Tempkin [7]):

$$\alpha = \frac{4 \cdot \epsilon}{k \cdot T} \quad (\text{vgl. 2.11})$$

waarin ϵ de verandering van potentiële energie per vast-vloeistof binding is:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \cdot (\phi_{ff} + \phi_{ss}) - \frac{1}{2} \cdot \phi_{fs} \quad (\text{vgl. 2.12})$$

Hoge waarden van α duiden op een glad oppervlak. Naarmate de oplosbaarheid van de te kristalliseren component toeneemt, neemt Φ_{sf} toe en daarmee ϵ : α wordt lager. Een hogere oplosbaarheid leidt tot een ruwer kristal-oppervlak en vergroot dus de groeisnelheid. In tabel 2.1 is voor verschillende waarden van α het groeimechanisme, de oppervlakte-morfologie en de algemene groeisnelheidsvergelijking gegeven (Ohara [8]).

α	groeimodel	oppervlakte morfologie	groeisnelheidsvergelijking
<3	continuous growth	ruw	$v=C.\sigma$
3-4 omslag gebied		$v=A_1G^{5/6}.\exp(-A_2/\sigma)$
>4	layer growth	glad	$v=C(\sigma^2/\sigma_c)\tanh(\sigma/\sigma_c)$

tabel 2.1 : groeimodel, oppervlaktemorfologie en groeisnelheidsvergelijking voor diverse waarden van de oppervlakte entropie-factor α .

Voor kristalliserende systemen met gladde oppervlakken en bij lage oververzadiging ($\sigma \ll \sigma_c$) kan de groeisnelheidsvergelijking voor $\alpha > 4$ vereenvoudigd worden tot:

$$v = c \cdot \frac{\sigma^2}{\sigma_c} \quad (\text{vgl. 2.13})$$

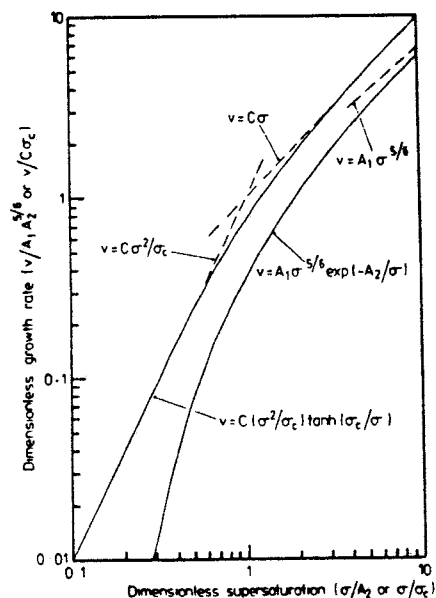
Voor hoge oververzadiging ($\sigma \gg \sigma_c$) kan de groeisnelheidsvergelijking vereenvoudigd worden tot:

$$v = c \cdot \sigma \quad (\text{vgl. 2.14})$$

De werkelijke groeisnelheidsvergelijking zal liggen tussen de waarden berekend met vergelijking 2.13 en 2.14:

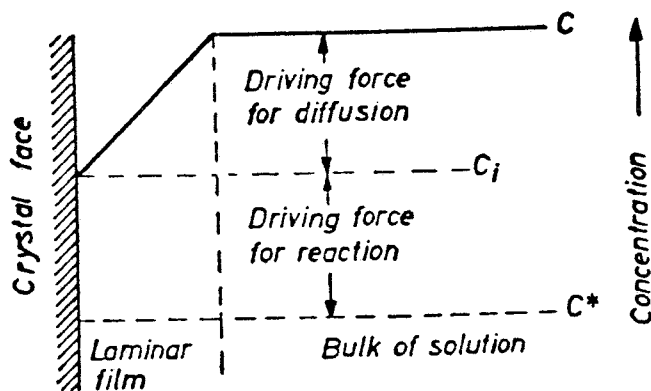
$$v = c \cdot \sigma^r \quad (\text{vgl. 2.15})$$

met $1 < r < 2$. In figuur 2.10 zijn de voor de verschillende situaties gegeven groeisnelheidsvergelijking weergegeven als functie van de dimensieloze oververzadiging.



figuur 2.10 : dimensieloze groeisnelheden als functie van de dimensieloze oververzadiging zoals voorspeld door de groeimodellen in tabel 2.1 (Garside [13]).

De constante in vergelijking 2.15 bepaalt voor een gegeven systeem de maximale kristalgroeisnelheid. De fysische betekenis van de constante C volgt uit een massa-balans over het fase-grensvlak van het kristal (zie figuur 2.11).



figuur 2.11 : drijvende krachten voor stofoverdracht en reactie in kristallisatie vanuit oplossingen (Mullin [2]).

In de stationaire toestand is de hoeveelheid materie $M_{x=\delta}$ die per seconde door de laminaire grenslaag diffundeert gelijk aan de hoeveelheid materie $M_{x=0}$ die per seconde in het kristal ingebouwd wordt:

$$M_{x=0} = M_{x=\delta} \quad (\text{vgl. 2.16})$$

De beide massa-fluxen kunnen als functie van de drijvende kracht geschreven worden:

$$M_{x=0} = k_R * (c_i - c^*)^r \quad M_{x=\delta} = k_d * (c - c_i) \quad (\text{vgl. 2.17})$$

De kristalgroeisnelheid v is gelijk aan $M_{x=0}$. Combineren van de uitdrukkingen voor de massa-fluxen gegeven in vergelijking 2.17 geeft:

$$v = k_R * \left[(c - c^*) - \frac{v}{k_R} \right]^r \quad (\text{vgl. 2.18})$$

Voor $r=1$ en $r=2$ kan vergelijking 2.18 expliciet in v geschreven worden:

$$r = 1 : \quad v = \frac{k_d * k_R}{(k_d + k_R)} * (c - c^*) \quad (\text{vgl. 2.19})$$

$$r = 2 : \quad v = k_d * \left(1 + \frac{k_d}{2 * k_R * (c - c^*)} - \left[\left(1 + \frac{k_d}{2 * k_R * (c - c^*)} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right) * (c - c^*)$$

Voor waarden van r ongelijk aan 1 of 2 moet v numeriek worden opgelost uit de twee vergelijkingen gegeven in vergelijking 2.17.

Om de invloed van diffusielimitering op de groeisnelheid te verdisconteren wordt een groei-effectiviteits-factor η ingevoerd (Garside [9]):

$$\eta = \frac{\text{werkelijke groeisnelheid}}{\text{maximale groeisnelheid}} = \frac{v}{k_r * (c - c^*)^r} \quad (\text{vgl. 2.21})$$

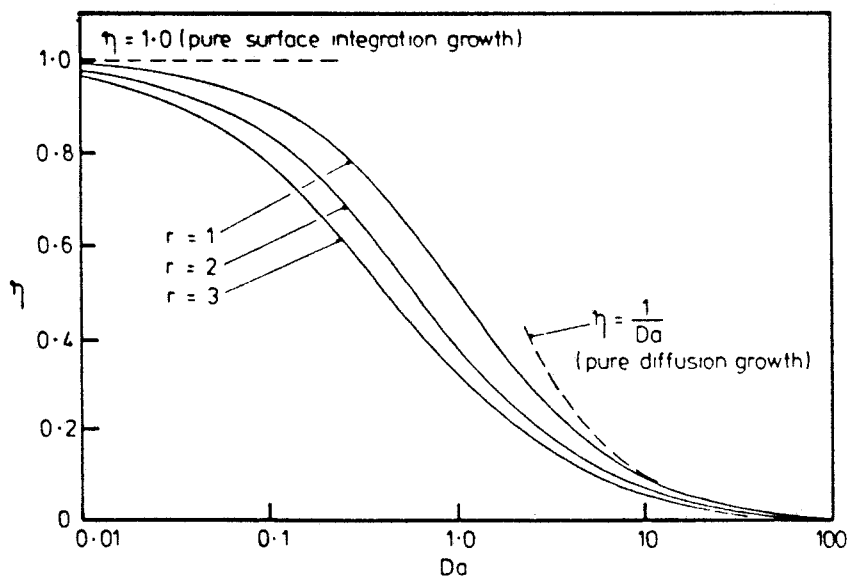
De werkelijke groeisnelheid is de groeisnelheid aan het kristaloppervlak, de maximale groeisnelheid is de groeisnelheid die het kristal zou hebben als het aan de bulkcondities bloot gesteld zou zijn. Combineren van vergelijking 2.18 met 2.21 levert:

$$v = k_R * (c - c^*)^r * \left[1 - \frac{v}{k_d * (c - c^*)} \right]^r \quad (\text{vgl. 2.22})$$

combineren van vergelijkingen 2.21 en 2.22 levert:

$$\eta = (1 - Da * \eta)^r \quad (\text{vgl. 2.23})$$

waarin het Damkohler-getal Da gedefinieerd is als: $Da = k_r(C - C^*)^{r-1} / k_d$. In figuur 2.11 is het verloop van η als functie van Da weergegeven. η nadert tot 1 als de invloed van de diffusie afneemt.



figuur 2.11 : de effectiviteits-factor voor kristalgroei als functie van het Damkohler-getal (Garside [13]).

Voor de reactie-snelheids-constante voor kristallisatie k_r is voor waterige dextrose-oplossingen de volgende relatie bekend (Huige [10]):

$$k_R = 1.45 * 10^{-3} * \exp(-0.03 * c_D) \quad (\text{vgl. 2.24})$$

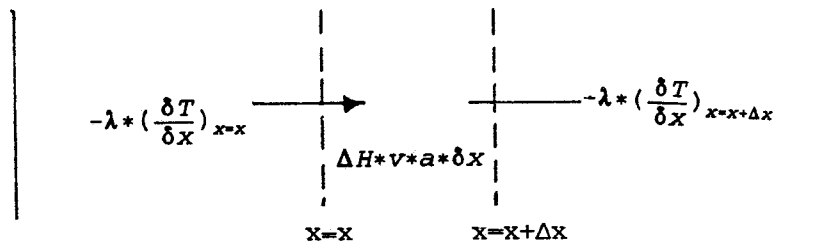
De waarde voor de stofoverdrachts-coëfficiënt k_d kan uit een relatie van de vorm:

$$Sh = 2 + \phi * Sc^a * Re^b \quad (\text{vgl. 2.25})$$

berekend worden. Voor uit oplossing kristalliserende systemen geldt vaak (Garside [11]) dat $\phi Sc^a Re^b \gg 2$ waardoor vergelijking 2.25 vereenvoudigd tot:

$$Sh = \phi * Sc^a * Re^b \quad (\text{vgl. 2.26})$$

Het verschil in de hoeveelheid overgedragen warmte voor situaties met fasenovergang en situaties zonder fasenovergang kan worden afgeleid uit een warmte-balans over de filmlaag aan de wand van de warmte-wisselaar.



figuur 2.12 : warmte-transport door een vloeistoflaag in de laminaire film aan de wand van de warmte-wisselaar.

De hoeveelheid warmte die door geleiding de laag binnengaat op $x=x$ is gelijk aan: $-\lambda(\delta T/\delta x)_{x=x}$. De hoeveelheid warmte die door geleiding de laag verlaat op $x=x+\Delta x$ is gelijk aan $-\lambda(\delta T/\delta x)_{x=x+\Delta x}$. De warmte-productie in de film met dikte δx is gelijk aan $\Delta H * v * a * \delta x$. De warmte-balans in de stationaire toestand is gelijk aan :

$$in - uit + produktie = 0 \quad (\text{vgl. 2.27})$$

invullen van de uitdrukkingen voor de diverse warmte stromen geeft :

$$-\lambda * \left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)_{x=x} + \lambda * \left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)_{x=x+\Delta x} + \Delta H * v * a * \delta x = 0 \quad (\text{vgl. 2.28})$$

waarin v de ijsgroeisnelheid is in $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ en a het specifiek ijsoppervlak in $[\text{m}^2_{\text{ijs}}/\text{m}^3_{\text{vloeistof}}]$.

Na delen door δx en $\delta x \rightarrow 0$ volgt uit vergelijking 2.27 :

$$\lambda * \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \right) + \Delta H * v * a = 0 \quad (\text{vgl. 2.28})$$

De ijsgroeisnelheid v en het specifiek oppervlak a zijn nog functies van de temperatuur. Wanneer de temperatuurafhankelijkheid van v en a echter verwaarloosd wordt, is vergelijking 2.28 eenvoudig analytisch oplosbaar. De algemene oplossing van vergelijking 2.28 is : $T = A * x^2 + B * x + C$.

randvoorwaarden : (1) $x=0$; $T=T_w$
(2) $x=\delta$; $T=T_b$

Uit randvoorwaarde (1) volgt dat : $C=T_w$. Uit randvoorwaarde (2) volgt dat:

$$B = \frac{(T_b - T_w) - A * \delta^2}{\delta} \quad (\text{vgl. 2.29})$$

Voor A kan een uitdrukking gevonden worden door de tweede afgeleide van de algemene oplossing in te vullen in vergelijking 2.28 :

$$A = \frac{-\Delta H * v * a}{2 * \lambda}$$

De warmte-flux q naar de wand van de warmte-wisselaar is gelijk aan :

$$q = -\lambda * \left(\frac{\delta T}{\delta x} \right)_{x=0} \quad (\text{vgl. 2.30})$$

Voor de warmte-flux naar de wand in situaties met fasenovergang q_{krist} kan geschreven worden :

$$q_{krist} = \frac{\delta * \Delta H * v * a}{2 * \lambda} + \frac{(T_b - T_w)}{\delta} \quad (\text{vgl. 2.31})$$

Voor situaties zonder fasenovergang is v gelijk aan nul; voor de warmte-flux q_{koel} naar de wand kan geschreven worden :

$$q_{koel} = \left(\frac{T_b - T_w}{\delta} \right) \quad (\text{vgl. 2.32})$$

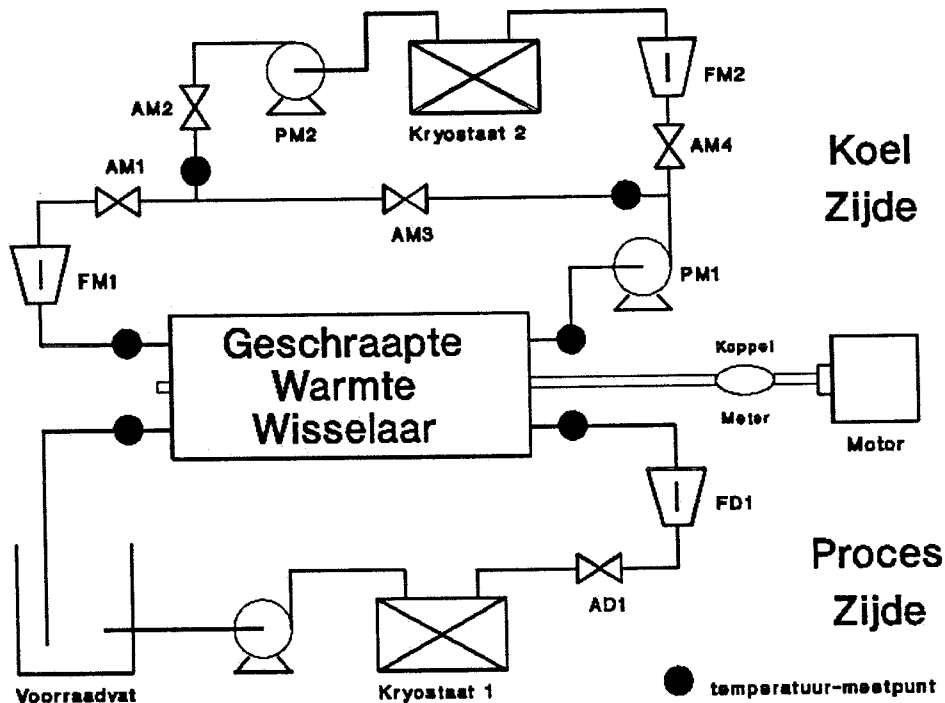
Delen van vergelijking 2.31 door vergelijking 2.32 geeft:

$$\frac{Q_{krist}}{Q_{koel}} = 1 + \frac{\Delta H \cdot v \cdot a \cdot \delta^2}{2 \cdot \lambda \cdot (T_b - T_w)} \quad (\text{vgl. 2.33})$$

Uit vergelijking 2.33 volgt dat er bij gelijk temperatuursverschil en gelijk toerental van de schraperas in situaties met fasenovergang meer warmte wordt overgedragen dan in situaties zonder fasenovergang.

3 MEETOPSTELLING EN MEETAPPARATUUR

In figuur 3.1 is de gebruikte meetopstelling schematisch weergegeven.



figuur 3.1 : Schematische weergave van de meetopstelling

Proces zijde.

Als procesvloeistof wordt een waterige dextrose oplossing gebruikt die vanuit het voorraadvat rondgepompt wordt door de warmtewisselaar. Het debiet van de processtroom kan worden ingesteld met de in de persleiding aanwezige afsluiter AD1 en worden afgelezen op flowmeter FD1. De in de toevoerleiding opgenomen cryostaat dient ervoor om de procesvloeistof op een zo constant mogelijke temperatuur de warmtewisselaar te laten binnenkomen. De afvoerleiding van de warmtewisselaar stroomt uit in het voorraadvat. In het voorraadvat moet de in de warmtewisselaar overgedragen warmte weer worden toegevoerd en het eventueel gevormde ijs weer worden afgesmolten. In het voorraadvat is een roerder aangebracht om een uniforme tempera-

tuurverdeling in het voorraadvat te krijgen. Het ijs kan worden afgesmolten met behulp van een verwarmingsspiraal.

Koel zijde.

Als koelmiddel wordt methanol gebruikt. Om de meetnauwkeurigheid te verhogen (zie paragraaf 4.1), is het koel-circuit opgebouwd uit twee kringlopen :

1. de hoofdkringloop, bestaande uit pomp PM1, afsluiters AM3 en AM1 en de flowmeter FM1 en
2. de bijkringloop, bestaande uit kryostaat 2, afsluiters AM2 en AM4, pomp PM2 en flowmeter FM2.

Het koelmiddel wordt voortdurend in de hoofdkringloop door de warmtewisselaar gepompt, in tegenstroom met de procesvloeistof. Het koelmiddel-debiet kan worden ingesteld door middel van afsluiter AM1 en worden afgelezen op flowmeter FM1. Om de koelmiddeltemperatuur constant te houden, kan aan het koelmiddel in de hoofdkringloop een hoeveelheid koude methanol uit de bijkringloop worden toegevoerd. Het toevoer-debiet uit de bijkringloop kan worden ingesteld met afsluiter AM2 en worden afgelezen op flowmeter FM2.

Temperatuur meetpunten.

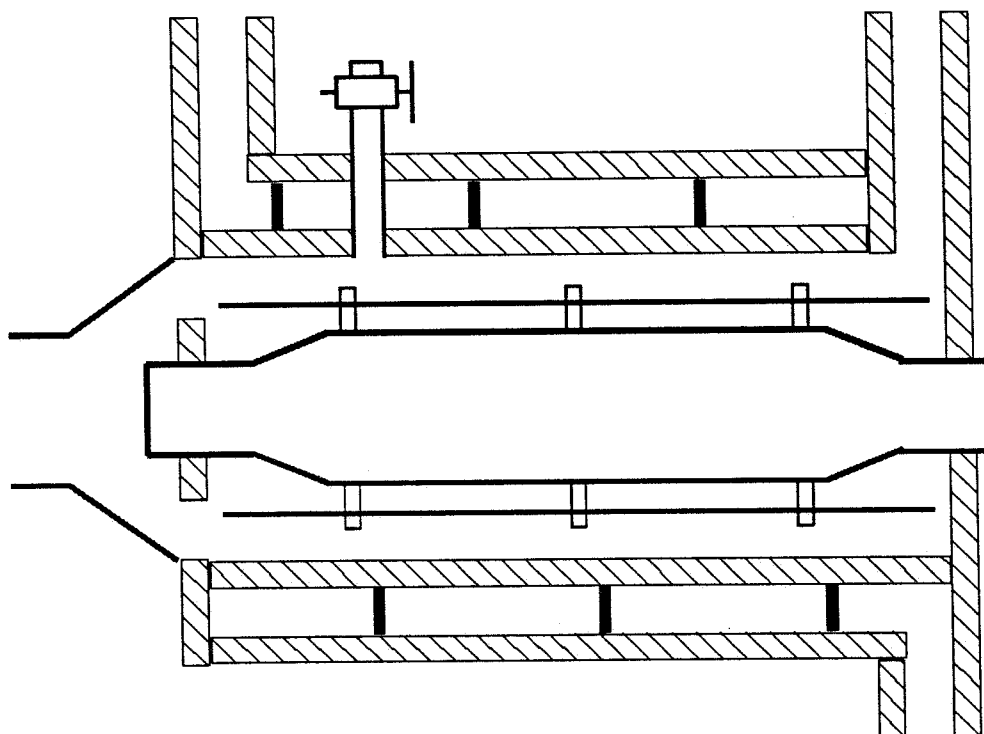
Om de hoeveelheid overgedragen warmte in het systeem te kunnen bepalen zijn op verscheidene plaatsen koper-constantaan thermokoppels aangebracht (zie figuur 3.1). Om de nauwkeurigheid van de temperatuurbepalings aan de ingang en uitgang van de warmtewisselaar te verhogen, zijn de temperatuur meetpunten hier dubbel uitgevoerd. De signalen van alle thermokoppels worden geregistreerd op een datarecorder. Deze datarecorder communiceert continu met een PC. De PC berekend:

- a) de hoeveelheid warmte die aan het voorraadvat moet worden toegevoerd om het gevormde ijs weer af te smelten en
- b) de stationaire waarde van de inwendige warmte overdrachtscoëfficiënt.

Voor een gedetailleerde beschrijving van de berekeningswijze wordt verwezen naar hoofdstuk 4.

De warmtewisselaar.

In figuur 3.2 is een lengtedoorsnede van de geschraapte warmtewisselaar geschetst. In de binnenste cilinder (de proceskant) draait de schraperas. Aan de schraperas zijn de schraperbladen beweeglijk bevestigd. Door de stromingsweerstand die deze schraperbladen van de visceuze vloeistof ondervinden, zullen de bladen tegen de wand gedrukt worden. Om verstoppingen door het gevormde ijs te voorkomen, is de afvoer aangebracht in het verlengde van de schraperas. Om de warmtewisselaar lucht vrij te houden, is in de nabijheid van de afvoer een ontluchtingskraantje aangebracht en is de



figuur (3.2) : Lengte-doorsnede van de geschraapte warmte-wisselaar

warmtewisselaar enigszins hellend opgesteld. Het toerental van de schraperas kan gevarieerd worden met een motor met regelbaar toerental. Het toerental van de schraperas wordt bepaald met een optische cel. Tussen de aandrijfmotor en de schraperas is een koppelmeter bevestigd waaruit het opgenomen vermogen berekend kan worden.

Het koelmiddel stroomt tussen de binnenste en de buitenste pijp, in tegenstroom met de dextrose oplossing. Om een betere warmte overdracht aan de koelkant te bereiken, is om de binnenpijp een spiraalvormige draad gelast die de dikte heeft van de annulaire ruimte. De spoed van de spiraalvormige draad bedraagt 9 centimeter (zie bijlage 3).

4 BEREKENINGSWIJZE

4.1 De berekening van de totale warmteoverdrachtscoefficient U.

De totale hoeveelheid warmte Q die in de warmtewisselaar wordt overgedragen, kan worden beschreven met de volgende vergelijking:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{1n} \quad (\text{vgl. 4.1.1})$$

De totale warmteoverdrachtscoefficient U kan betrokken worden op twee oppervlakken:

1. Het totale oppervlak van de warmtewisselaar
2. Het effectief voor kristallisatie aanwezige oppervlak. Wanneer de procesvloeistof de warmtewisselaar binnenkomt met een temperatuur hoger dan het stolpunt zal een deel van het wandoppervlak gebruikt worden om de procesvloeistof af te koelen tot het stolpunt. Het voor kristallisatie beschikbare oppervlak wordt daardoor kleiner.

In dit onderzoek wordt alleen de eerste berekeningswijze gebruikt.

Voor de totale hoeveelheid overgedragen warmte Q kan geschreven worden:

$$Q_m = G_m \cdot c_{p,m}(\bar{T}) \cdot (T_{m,uit} - T_{m,in}) \quad (\text{vgl. 4.1.2})$$

Combineren met vergelijking 4.1.1 geeft:

$$G_m \cdot c_{p,m}(\bar{T}_m) \cdot (T_{m,uit} - T_{m,in}) = U \cdot A \cdot \Delta T_{1n} \quad (\text{vgl. 4.1.3})$$

In Figuur 3.1 is de plaats van de temperatuur-meetpunten in de meetopstelling aangegeven.

Om een zo groot mogelijke warmte-overdracht te bewerkstelligen, is een hoge waarde van $\alpha(u)$ gewenst. Uit vergelijking 4.2.3 volgt dat $\alpha(u)$ toeneemt met toenemend koelmiddeldebiet. Hoe groter echter het koelmiddeldebiet, hoe kleiner de temperatuur-verandering van het koelmiddel over de warmtewisselaar. Uit deze temperatuur-verandering wordt de hoeveelheid in de warmtewisselaar overgedragen warmte berekend, waaruit de waarde voor U berekend kan worden. Voor een nauwkeurige bepaling van U is het van belang dat de meetfout in de temperatuur-verandering zo klein mogelijk is. Bij

kleine temperatuur-veranderingen over de warmte-wisselaar is de meetfout relatief groot ten opzichte van de temperatuur-verandering. Om bij een hoog koelmiddeldebiet de temperatuur-verandering toch nauwkeurig te kunnen bepalen, wordt het koelcircuit uitgevoerd met twee kringlopen (zie figuur 3.1). De hoeveelheid overgedragen warmte Q_{proces} kan worden teruggerekend uit:

$$Q_{proces} = G_{m,1} * c_{p,m} * \Delta T_{m1} - Q_{pomp} \quad (\text{vgl. 4.1.4})$$

waarin Q_{pomp} de hoeveelheid warmte is die door de pomp PM1 aan het koelmiddel in de hoofdkringloop wordt toegevoerd. De hoeveelheid koud koelmiddel die wordt toegevoerd ($G_{m,1}$) kan worden afgelezen op flowmeter Fm2. De diverse temperaturen kunnen worden bepaald worden met de in de koelmiddelloop aanwezige thermo-koppels. De waarde van Q_{pomp} kan worden bepaald door het koelmiddel in de hoofdkringloop continu door de warmte-wisselaar rond te pompen zonder koelmiddel uit de bijkringloop toe te voeren en zonder de processtroom rond te pompen. Uit de temperatuurstijging in de tijd kan het door de pomp overgedragen vermogen worden berekend. Voor Q_{pomp} is een waarde van 700W gemeten. Combineren van vergelijking 4.1.1 met vergelijking 4.1.4 geeft :

$$G_{m,1} * c_{p,m} * \Delta T_{m1} - Q_{pomp} = U * A * \Delta T_{ln} \quad (\text{vgl. 4.1.5})$$

4.2 De berekening van de uitwendige warmteoverdrachtscoefficient $\alpha(u)$.

De waarde voor $\alpha(u)$ kan worden berekend uit de zogenaamde Dittus Boelter vergelijking:

$$Nu_u = constante * Re_u^{0.8} * Pr_u^{0.40} \quad (\text{vgl. 4.2.1})$$

De constante uit deze vergelijking kan berekend worden uit de eigen meetwaarden. Uit vergelijking 4.2.1 volgt:

$$Nu_u \sim Re_u^{0.8} \quad (\text{vgl. 4.2.2})$$

dus:

$$\frac{1}{\alpha(u)} \sim \frac{1}{G_m^{0.8}} \quad (\text{vgl. 4.2.3})$$

De uitwendige warmte-overdrachtscoëfficiënt $\alpha(u)$ kan niet direkt gemeten worden; de totale warmte-overdrachtscoëfficiënt U echter wel. U en $\alpha(u)$ hangen als volgt samen:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha(u)} + \frac{1}{\alpha(i)} * \frac{d_u}{d_i} + \frac{d_u * \ln(\frac{d_u}{d_i})}{2 * \lambda_{staa1}} \quad (\text{vgl. 4.2.4})$$

$\alpha(u)$ kan uit de gemeten waarde voor U berekend worden door U te verminderen met de weerstand tegen warmte-overdracht aan de proceskant en de weerstand van de wand. De som van deze twee weerstanden kan gevonden worden door de totale warmte-overdrachts-coëfficiënt als functie van het koelmiddeldebiet, G_m te bepalen. Uit vergelijking 4.2.3 volgt dat wanneer $(1/G_m)^{0.8}$ naar nul nadert ook $(1/\alpha(u))$ naar nul nadert. Vergelijking 4.2.4 kan dan vereenvoudigd worden tot:

$$\frac{1}{U_\infty} = \frac{1}{\alpha(i)} * \frac{d_u}{d_i} + \frac{d_u * \ln(\frac{d_u}{d_i})}{2 * \lambda_{staa1}} \quad (\text{vgl. 4.1.5})$$

De door extrapoleren gevonden waarde van $1/U_\infty$ is nog een funktie van het toerental van de schrapper-as daar $\alpha(i)$ variabel is met het toerental. Wanneer alle gemeten waarden voor $1/U$ met $1/U_\infty$ verminderd worden, kan de constante uit vergelijking 4.2.1. berekend worden.

4.3. De inwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(i)$.

Wanneer de koelmiddel-debietten en -temperaturen bekend zijn, kan uit vergelijking 4.2.3 of uit vergelijking 4.2.5 de totale warmteoverdrachts-coëfficiënt U berekend worden. De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt U is een functie van de inwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(i)$ en de uitwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(u)$. De uitwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(u)$ kan berekend worden met de aan de eigen meetwaarden aangepaste Dittus Boelter vergelijking (zie paragraaf 4.2). $\alpha(i)$ kan dan berekend worden uit :

$$\frac{1}{\alpha(i)} = \frac{d_i}{d_u} * \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{\alpha(u)} - \frac{d_u * \ln(\frac{d_u}{d_i})}{2 * \lambda_{staa1}} \right) \quad (\text{vgl. 4.3.1})$$

4.4 De berekening van het gedissipeerde vermogen.

De grootte van het door de motor te leveren koppel wordt beïnvloed door drie factoren:

1. een bijdrage veroorzaakt door de viscositeit van de procesvloeistof (de schraperbladen moeten de processtroom verplaatsen).
2. een bijdrage veroorzaakt door het lopen over de wand van de schraperbladen.
3. een bijdrage veroorzaakt door de wrijvingskrachten die op de schraperas werken (lagers en keerringen etc.)

De bijdrage van lagers etc. aan de grootte van het koppel wordt bepaald door de mechanische uitvoering van de warmte-wisselaar en is geen indicatie voor de processen in de warmte-wisselaar. Het gemeten koppel moet dan ook voor deze bijdrage gecorrigeerd worden. De grootte van deze correctiefactor kan bepaald worden door het koppel op de schraperas te meten zonder schraperbladen als functie van de viscositeit bij verschillende toerentalen. Wanneer de gevonden meetwaarden voor een bepaald toerental geëxtrapoleerd worden naar een viscositeit nul, wordt het gevonden koppel alleen nog bepaald door de wrijvingskrachten op de schraperas. Wanneer dit voor een aantal toerentalen gedaan wordt, kan de correctie-factor als functie van het toerental geschreven worden.

Uit het gecorrigeerde koppel kan het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen berekend worden. Koppel en gedissipeerd vermogen hangen als volgt samen:

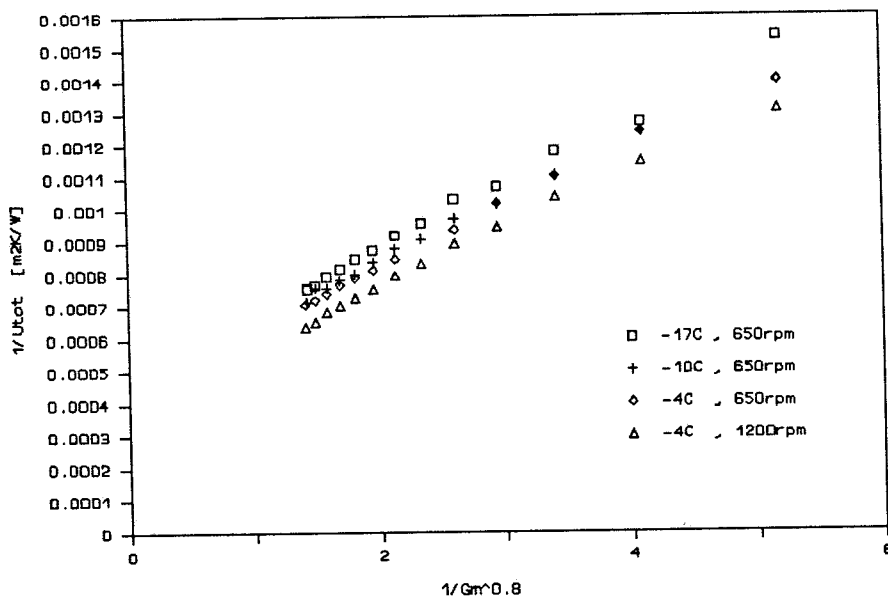
(vgl. 4.4.1)

$$P = 2 * \pi * K_{corr} * N$$

5 MEETRESULTATEN

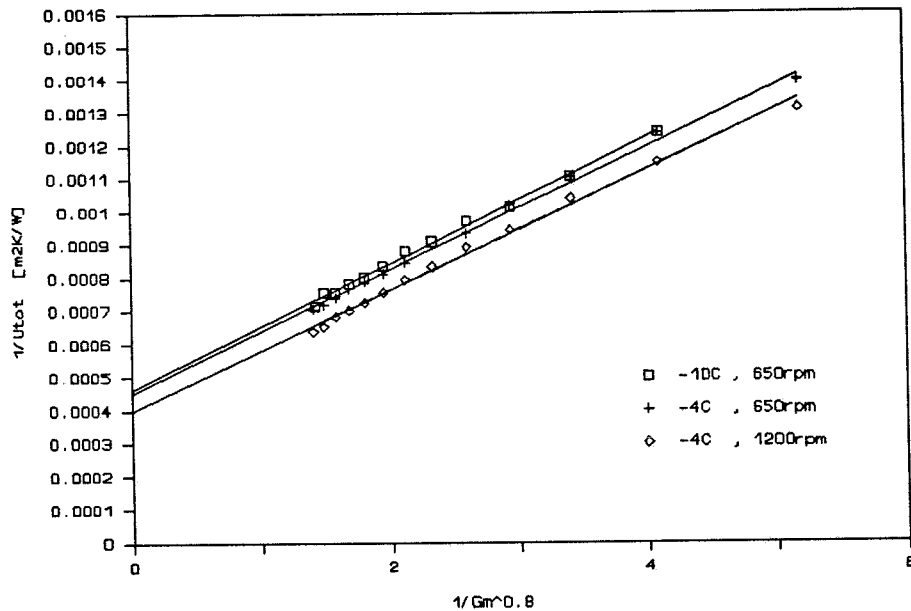
5.1 De uitwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(u)$.

De waarde voor $\alpha(u)$ kan bepaald worden met de Dittus Boelter vergelijking zoals is beschreven in paragraaf 4.2; de constante uit deze vergelijking kan berekend worden uit de eigen meetwaarden. Daartoe is bij verschillende methanoltemperaturen en bij verschillende toerentallen het methanoldebiet gevarieerd en de bijbehorende waarde voor de totale warmte-overdrachtscoëfficiënt U bepaald. Als procesvloeistof is een 10wt% dextrose oplossing gebruikt. De meetresultaten worden gepresenteerd in bijlage 4.



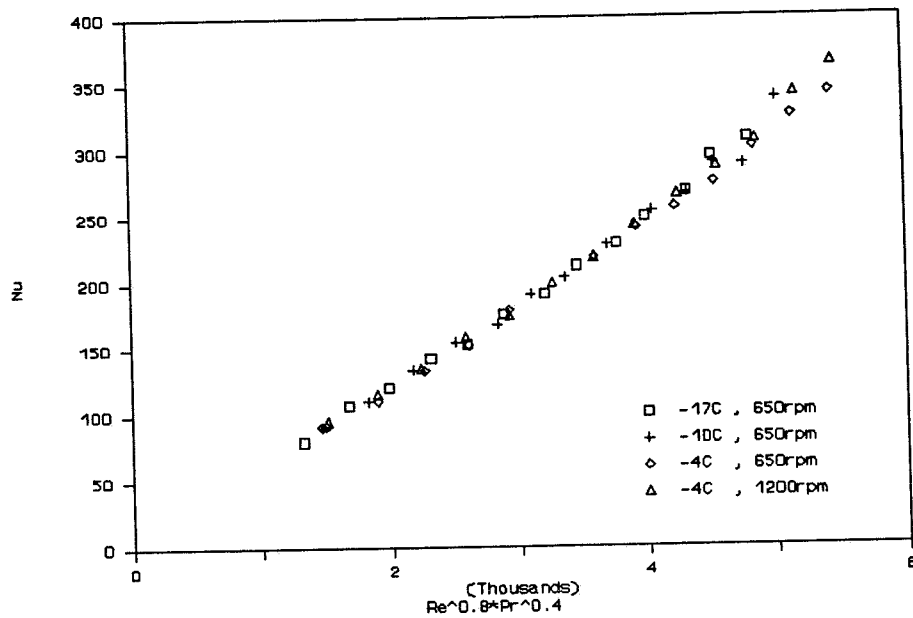
figuur 5.1.1 : Totale warmte-overdracht-coëfficiënt U als functie van het debiet bij verschillende toerentallen en debieten.

In paragraaf 4.2 is betoogd dat $(1/U)$ een lineaire functie is van $(1/G_m)^{0.8}$. Voor alle meetpunten (zie bijlage 4) zijn de waarden van $(1/G_m)^{0.8}$ berekend en uitgezet tegen $(1/U)$ (zie figuur 5.1.1).



figuur 5.1.2 : As-afsneden voor $1/G_m \rightarrow 0$.

Om de waarde van $\alpha(u)$ uit de gemeten waarde van U te berekenen, moet deze laatste waarde verminderd worden met een constante die de bijdrage van de wand en $\alpha(i)$ verdisconteert. Deze constante kan gevonden worden door de meetpunten te extrapoleren naar $1/G_m \rightarrow 0$ (zie figuur 5.1.2). De asafsneden voor 650 rpm zijn nagenoeg even groot, de asafsnede voor 1200 rpm wijkt duidelijk van de anderen af. Dit komt doordat de waarde voor $\alpha(i)$ bij 650 rpm anders is dan die bij 1200 rpm. Tevens blijkt dat de methanol-temperatuur van invloed is. Dit effect kan in de Dittus Boelter vergelijking verdisconteerd worden door de waarden van c_p , λ , μ en ρ temperatuur afhankelijk te nemen.



figuur 5.1.3 : Gecorrigeerde meetwaarden $\alpha(u)$.

Om de constante uit vergelijking 4.2.1. kunnen berekenen zijn in grafiek 5.1.3 de waarden voor Nu_u uitgezet tegen $Re_u^{0.8} * Pr_u^{0.4}$. Bij het berekenen van Re_u , Pr_u en Nu_u zijn de waarden voor c_p , λ , μ en ρ temperatuurafhankelijk genomen (zie bijlage 1). De vergelijking van de met behulp van lineaire regressie gevonden lijn is:

$$Nu_u = 0.0656 * Re_u^{0.8} * Pr_u^{0.40} \quad (\text{vgl. 5.1.1})$$

De temperatuurafhankelijkheid van $\alpha(u)$ komt beter tot uitdrukking in de empirische relatie :

$$\alpha(u) = 3700 * (1 + 0.0086 * \bar{T}_m) \quad (\text{vgl. 5.1.2})$$

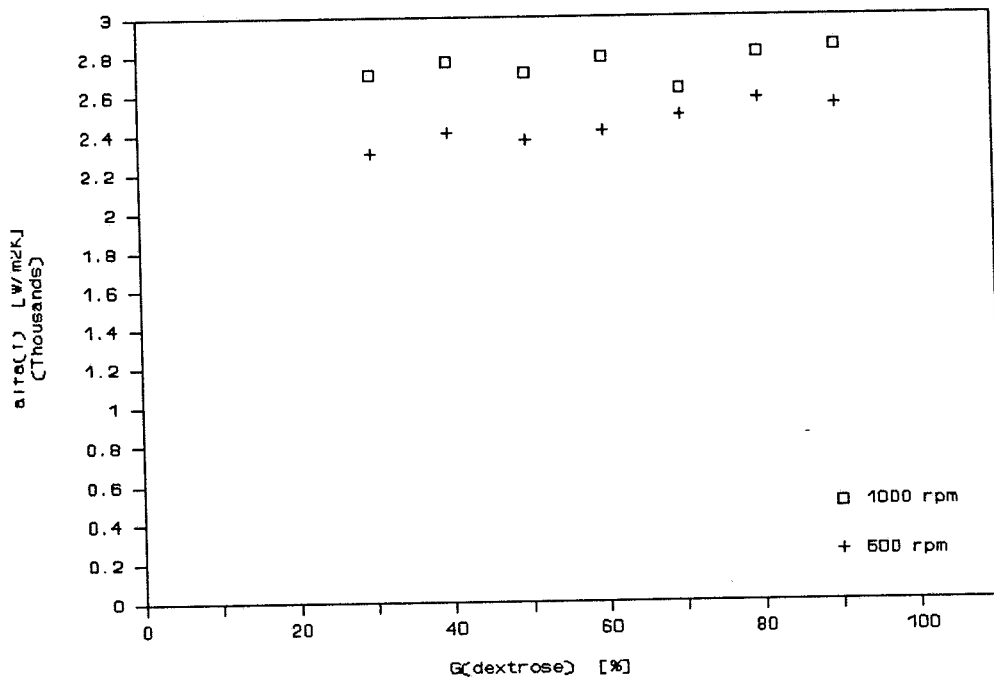
In vergelijking 5.1.2 is de temperatuur afhankelijkheid van de stofconstanten van methanol verwerkt. Vergelijking 5.1.2 is alleen geldig voor een methanol-debiet van 0.644 kg/s.

5.2 De inwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(i)$ met fasenovergang.

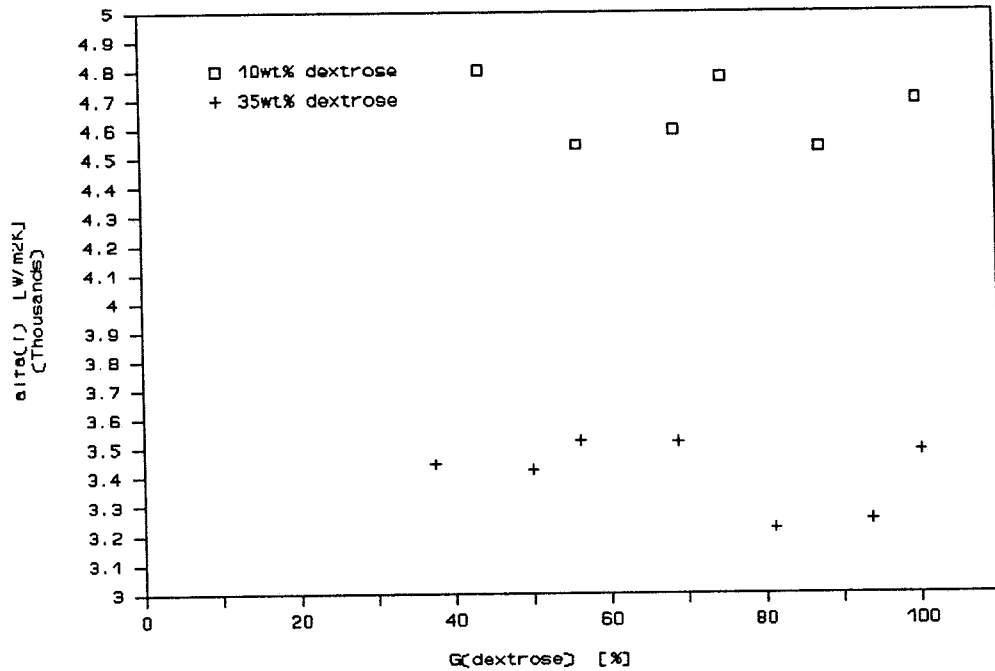
De afhankelijkheid van het debiet van de procesvloeistof.

In grafiek 5.2.1 zijn de uit de temperatuurmetingen berekende waarden voor $\alpha(i)$ uitgezet tegen het dextrose-debiet voor het 10mm schraperblad bij twee verschillende toerentallen. Het gebruikte dextrose-percentage is 35wt%. In grafiek 5.2.2 zijn de berekende waarden voor $\alpha(i)$ uitgezet tegen het dextrose-debiet voor het 20mm schraperblad voor twee verschillende dextrose concentraties. Het toerental van de schraper-as is voor beide metingen 1000 rpm. Het debiet is weergegeven als percentage van het maximale debiet (0.14 kg/s).

Algemeen kan opgemerkt worden dat het dextrose-debiet geen invloed op de warmte-overdrachts-coëfficiënt heeft. De warmte-overdrachts-coëfficiënt is voor het 20mm schraperblad groter dan voor het 10mm schraperblad.



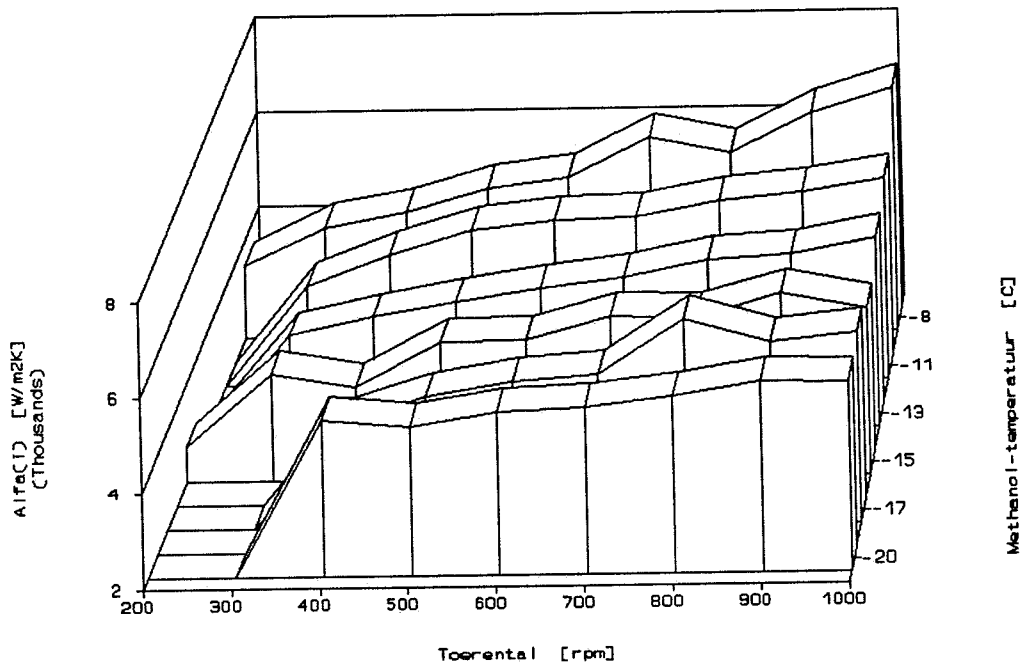
figuur 5.2.1 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-debiet bij verschillende toerentallen voor het 10mm schraperblad (35wt% dextrose).



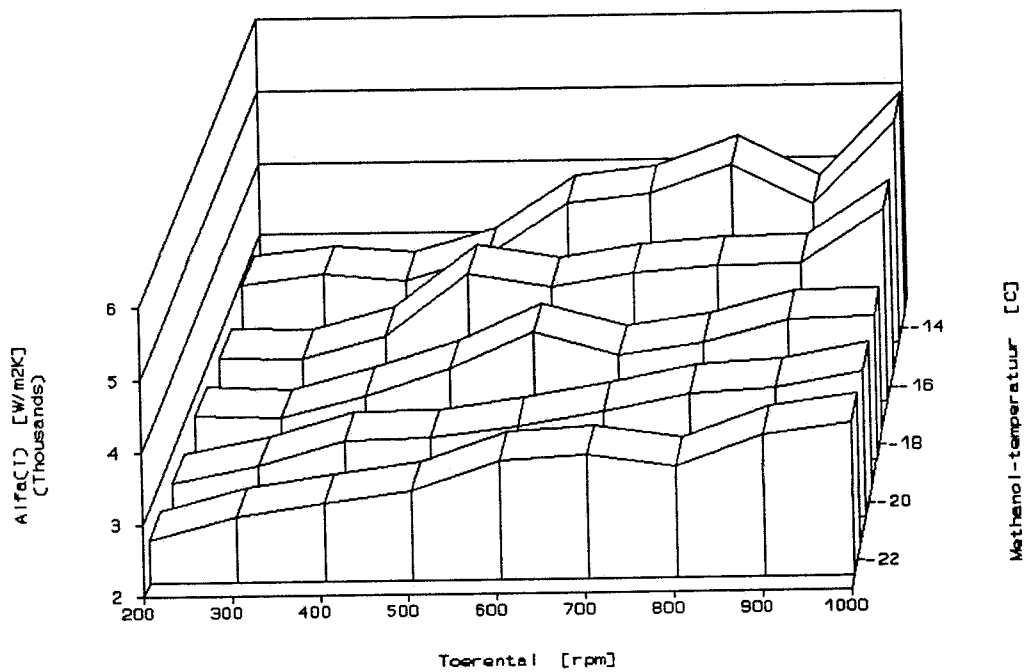
figuur 5.2.2 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-debiet bij verschillende gewichts-percentages dextrose voor het 20mm schraperblad (1000 rpm).

De afhankelijkheid van het toerental.

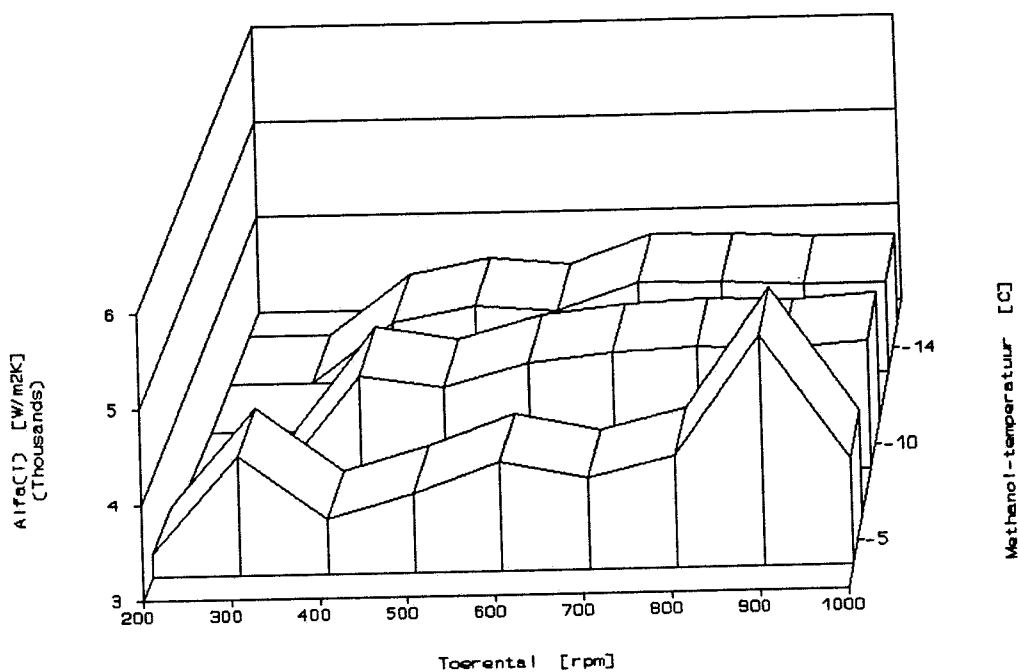
In de grafieken 5.2.3 t/m 5.2.6 zijn de uit temperatuurmetingen berekende waarden voor $\alpha(i)$ (zie paragraaf 4.3) uitgezet tegen het toerental bij verschillende methanoltemperaturen. De gebruikte bladhoogten bedragen 10mm en 20mm ; de gebruikte dextrose percentages bedragen 10wt% en 35wt%. In alle vier de situaties neemt de waarde voor $\alpha(i)$ toe met toenemend toerental. Bij een bladhoogte van 10 millimeter ligt de waarde voor $\alpha(i)$ lager dan bij een bladhoogte van 20 millimeter. Uitzondering hierop vormt de meting van het 10 millimeter blad bij -8C. Deze afwijking wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een meet-onnauwkeurigheid.



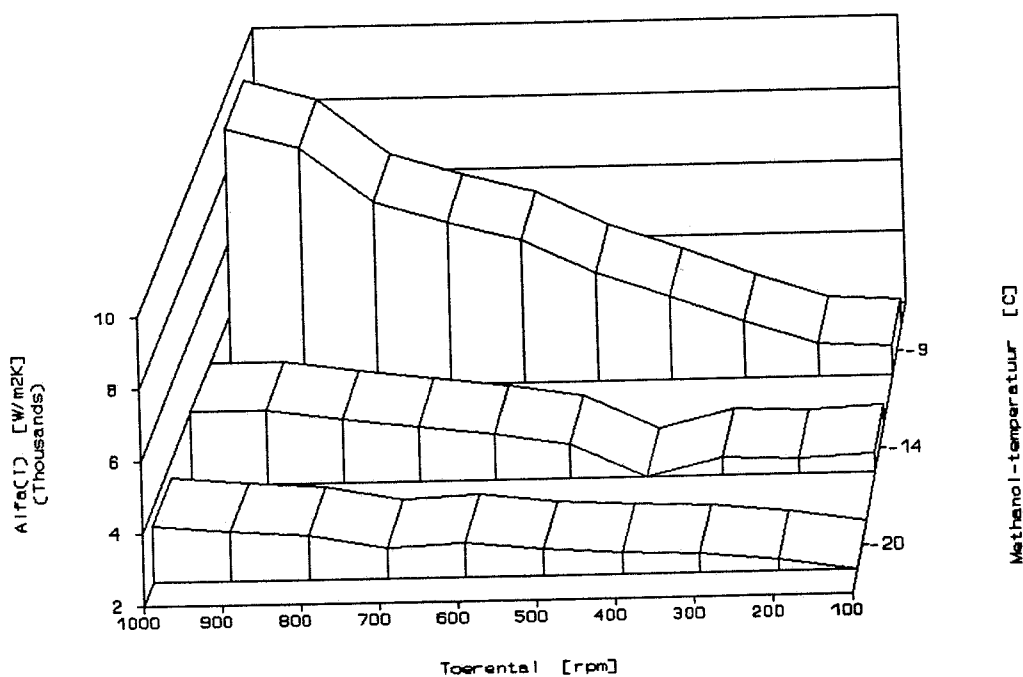
figuur 5.2.3 : $\alpha(i)$ als functie van het toerental bij verschillende koelmiddeltemperaturen (10wt% dextrose , 20mm schraperblad)



figuur 5.2.4 : $\alpha(i)$ als functie van het toerental bij verschillende koelmiddeltemperaturen (35wt% dextrose , 20mm schraperblad)



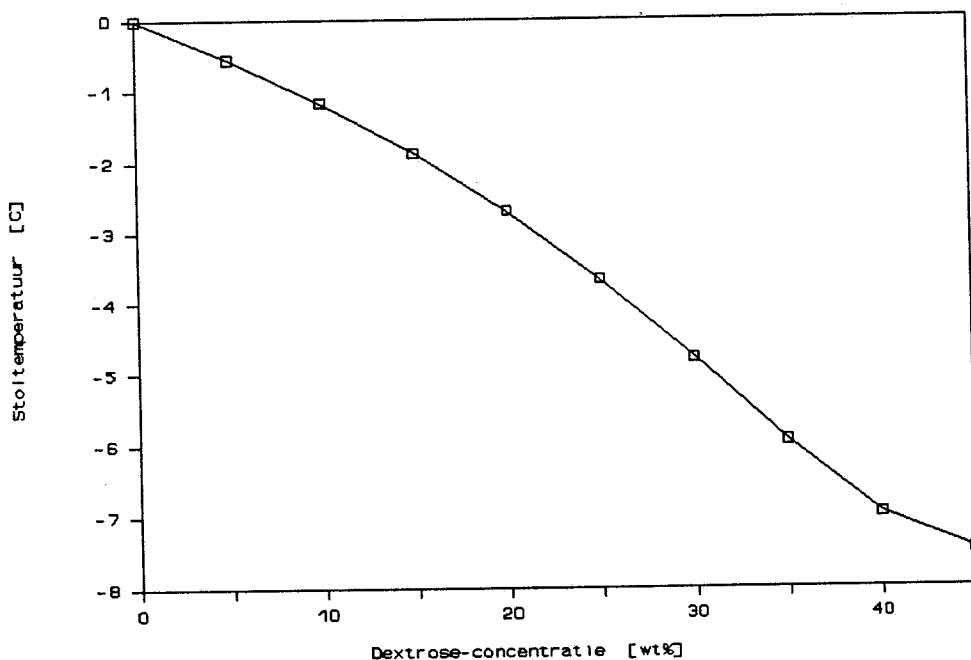
figuur 5.2.5 : $\alpha(i)$ als functie van het toerental bij verschillende koelmiddeltemperaturen (10wt% dextrose , 10mm schraperblad)



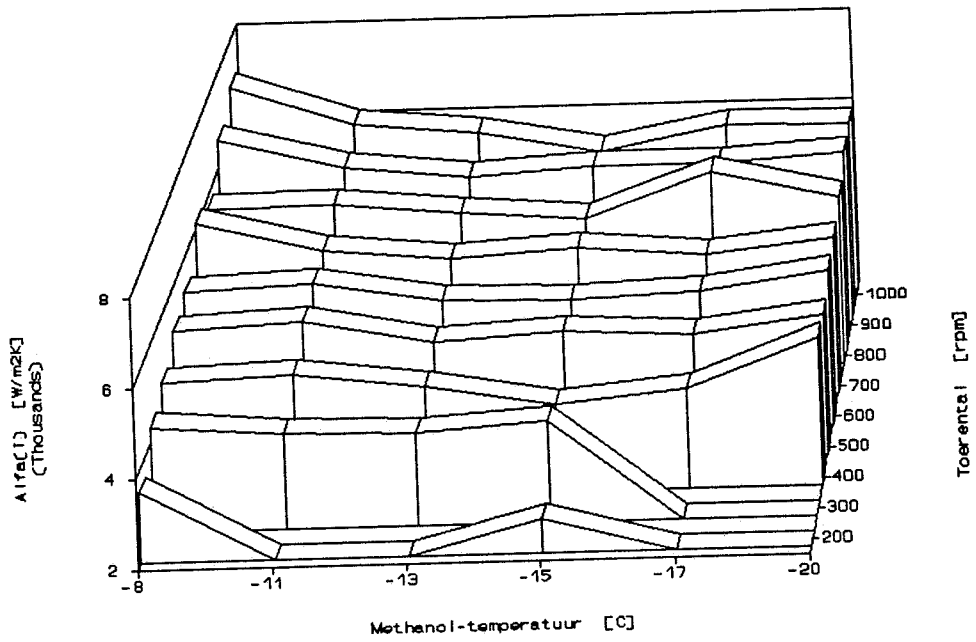
figuur 5.2.6 : $\alpha(i)$ als functie van het toerental bij verschillende methanoltemperaturen (35wt% dextrose , 10mm schraperblad)

Afhankelijkheid van de koelmiddeltemperatuur.

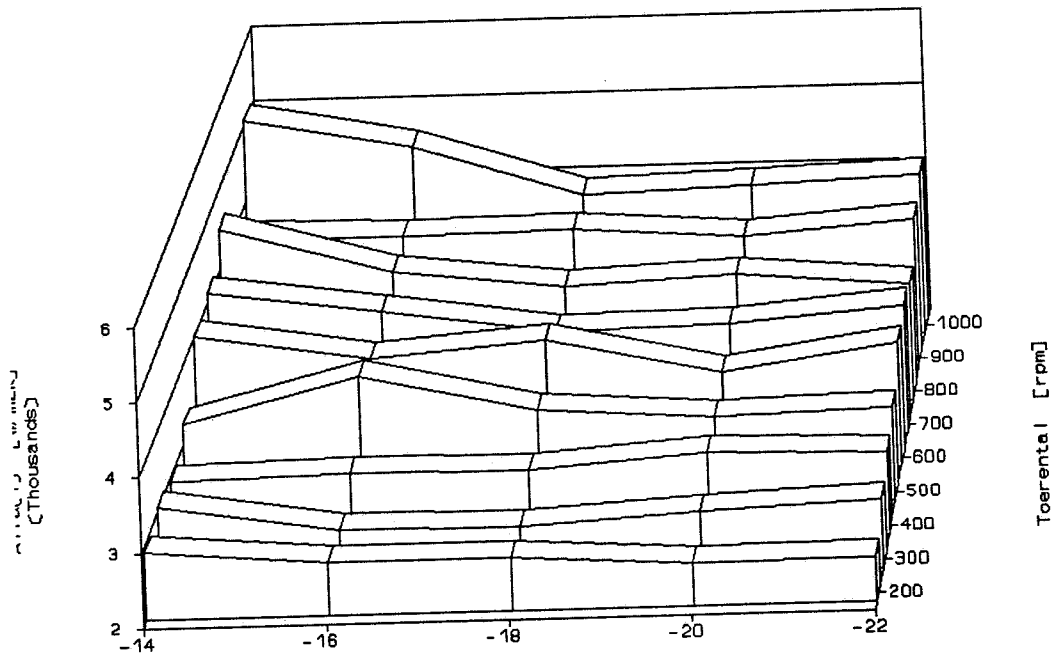
In grafieken 5.2.8 t/m 5.2.11 is de afhankelijkheid van de koelmiddeltemperatuur op $\alpha(i)$ bij verschillende toerentallen weergegeven. Bij koelmiddeltemperaturen die laag zijn ten opzichte van het stolpunt (zie figuur 5.2.7) is er geen sprake van invloed op de waarde voor $\alpha(i)$. Voor hogere methanol temperaturen echter is er wel sprake van invloed op de waarde van $\alpha(i)$: bij toenemende methanoltemperatuur neemt de waarde voor $\alpha(i)$ toe. Waarschijnlijk wordt deze trend veroorzaakt door een meeton nauwkeurigheid in de warmte-balans. Wordt voor deze meeton nauwkeurigheid een waarde van 10% aangenomen, dan valt de stijging van $\alpha(i)$ met toenemende koelmiddeltemperatuur binnen de foutenmarge van de warmte-balans.



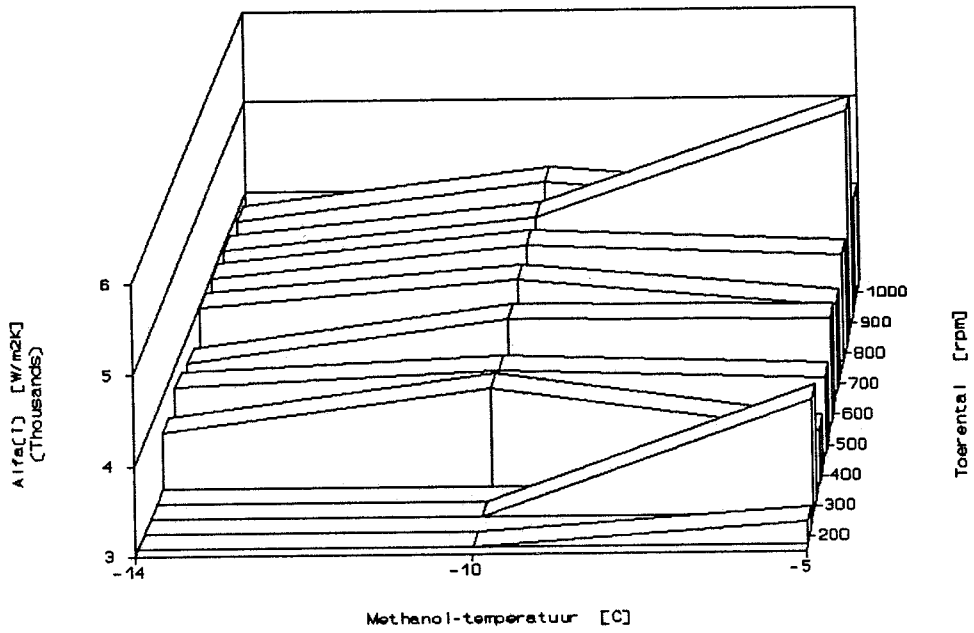
figuur 5.2.7 : stolpunten van waterige dextrose-oplossingen als functie van de dextrose-concentratie.



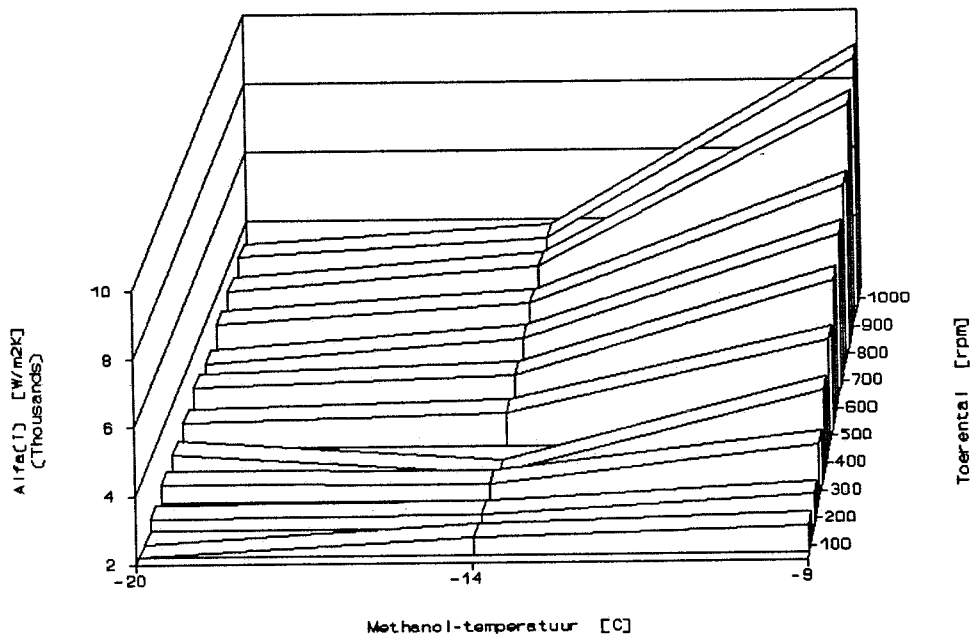
figuur 5.2.8 : $\alpha(i)$ als functie van de koelmiddeltemperatuur bij verschillende toerentallen (10wt% dextrose , 20mm schraperblad).



figuur 5.2.9 : $\alpha(i)$ als functie van de koelmiddeltemperatuur bij verschillende toerentallen (35wt% dextrose , 20mm schraperblad).



figuur 5.2.10 : $\alpha(i)$ als functie van de koelmiddeltemperatuur bij verschillende toerentallen (10wt% dextrose , 10mm schraperblad).



figuur 5.2.11 : $\alpha(i)$ als functie van de koelmiddeltemperatuur bij verschillende toerentallen (35wt% dextrose , 10mm schraperblad).

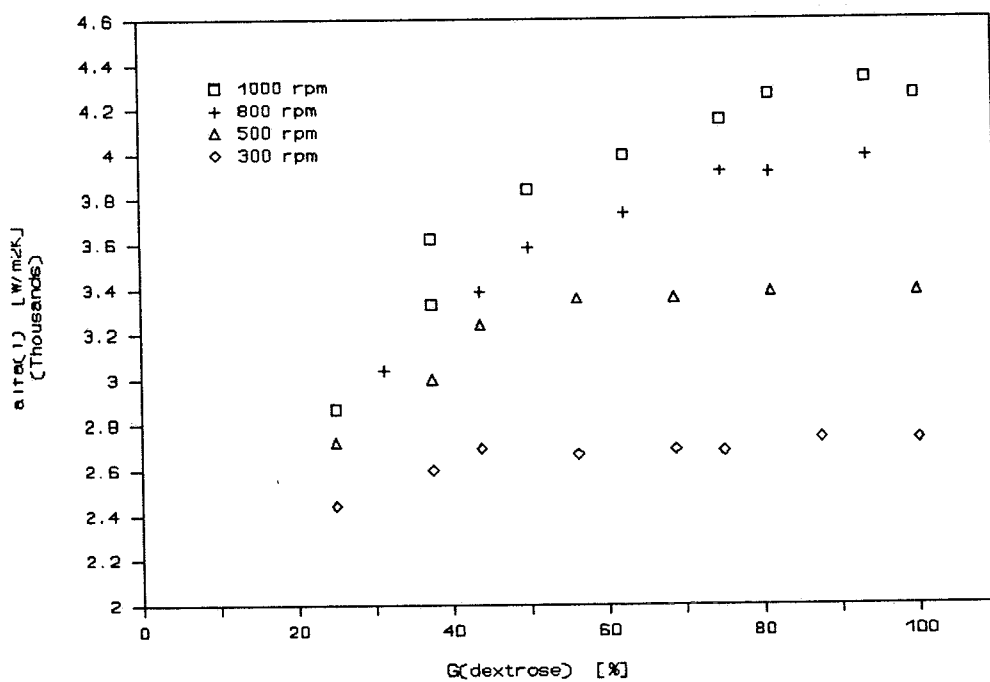
5.3 De inwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(i)$ zonder fasenovergang.

De invloed van het debiet van de procesvloeistof.

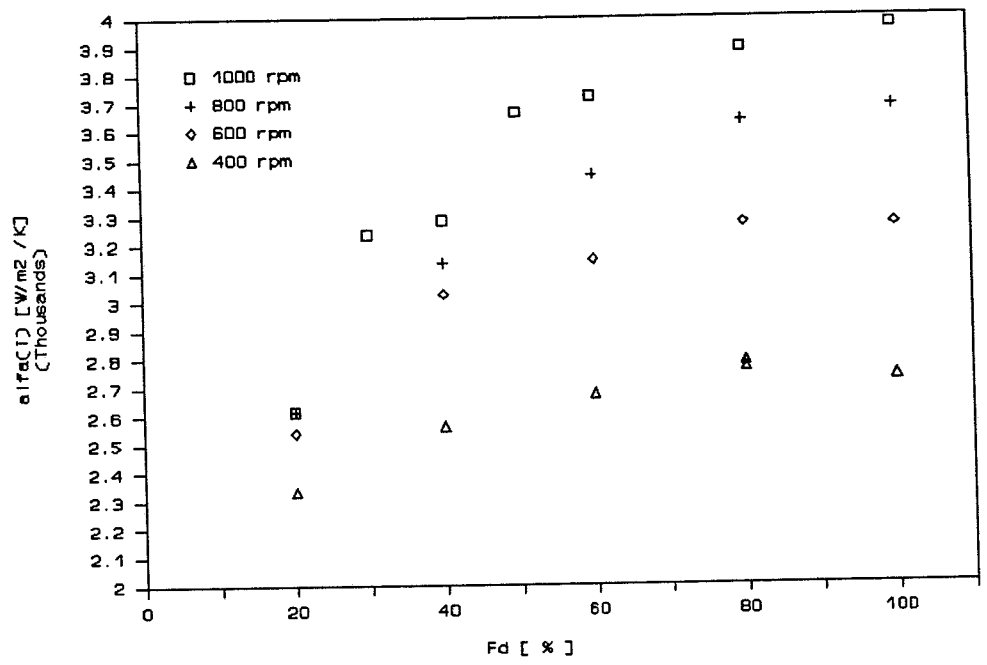
In de grafieken 5.3.1 t/m 5.3.3 zijn de bepaalde waarden voor $\alpha(i)$ uitgezet tegen het dextrose-debiet bij verschillende toerentallen. Grafiek 5.3.2 bevat de bepaalde waarden van $\alpha(i)$ voor het 10mm schraperblad en 10wt% dextrose; grafiek 5.3.3 bevat de bepaalde waarden voor $\alpha(i)$ voor hetzelfde schraperblad bij 35wt% dextrose. Grafiek 5.3.1 bevat de bepaalde waarden van $\alpha(i)$ voor het 20mm schraperblad en 10wt% dextrose.

Uit grafieken 5.3.1 en 5.3.2 (10wt% dextrose) kan worden opgemaakt dat de bepaalde waarden van $\alpha(i)$ voor het 20mm schraperblad groter zijn dan die van het 10mm schraperblad (200 a 300 W/m²K).

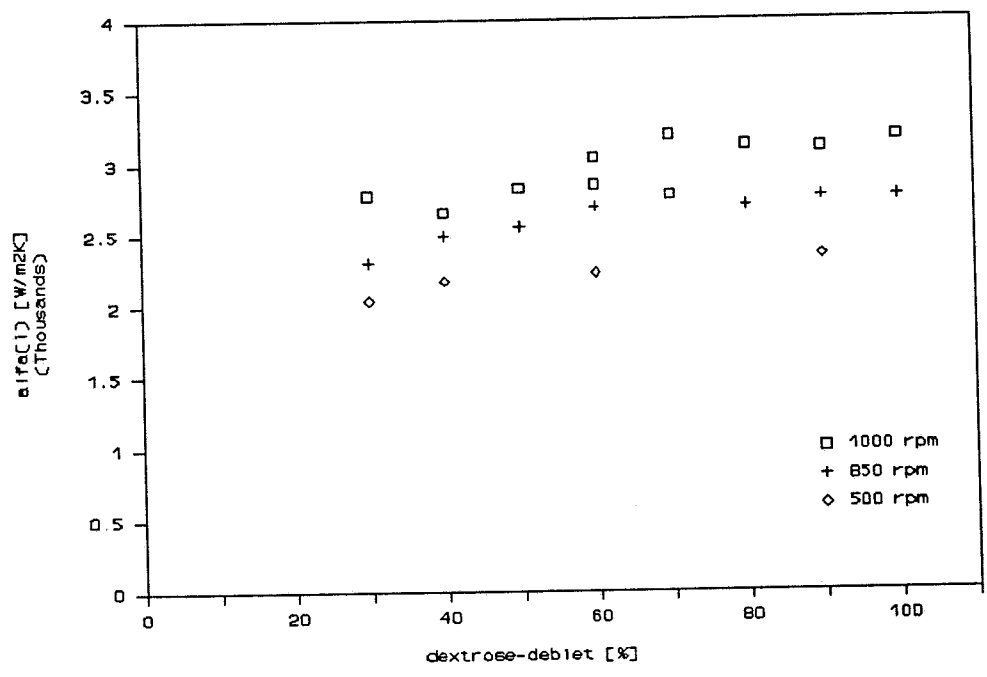
Uit de grafieken 5.3.2 en 5.3.3 (10mm schraperblad) kan worden opgemaakt dat de bepaalde waarden van $\alpha(i)$ bij 35wt% dextrose veel minder sterk variëren met het debiet dan bij 10wt% dextrose.



figuur 5.3.1 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-debiet bij verschillende toerentallen (20mm schraperblad, 10wt% dextrose).



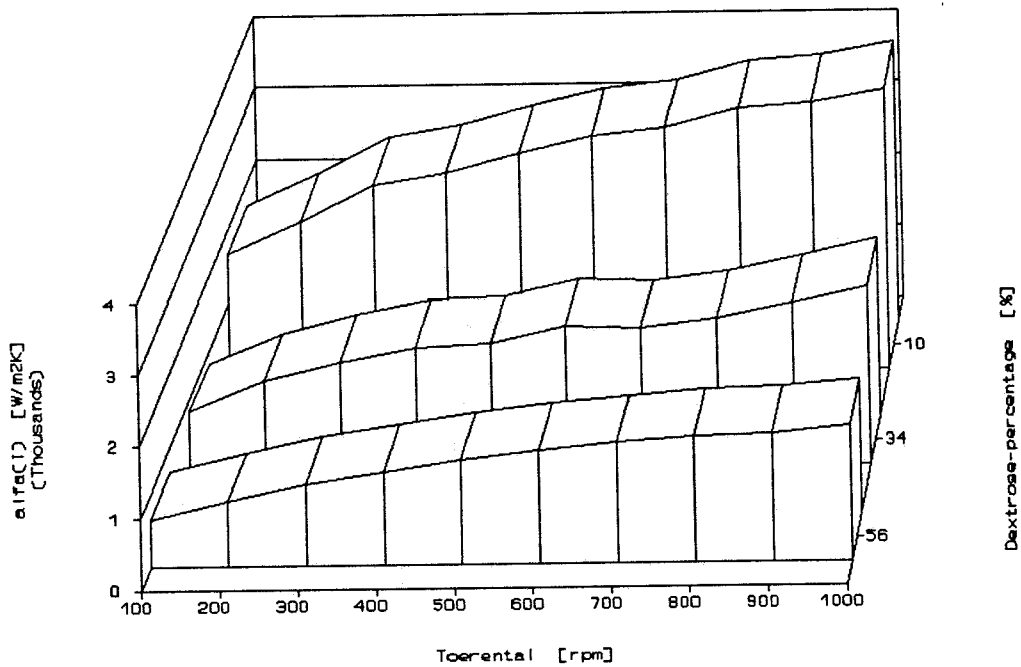
figuur 5.3.2 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-debiet bij verschillende toerentallen (10mm schraperblad, 10wt% dextrose).



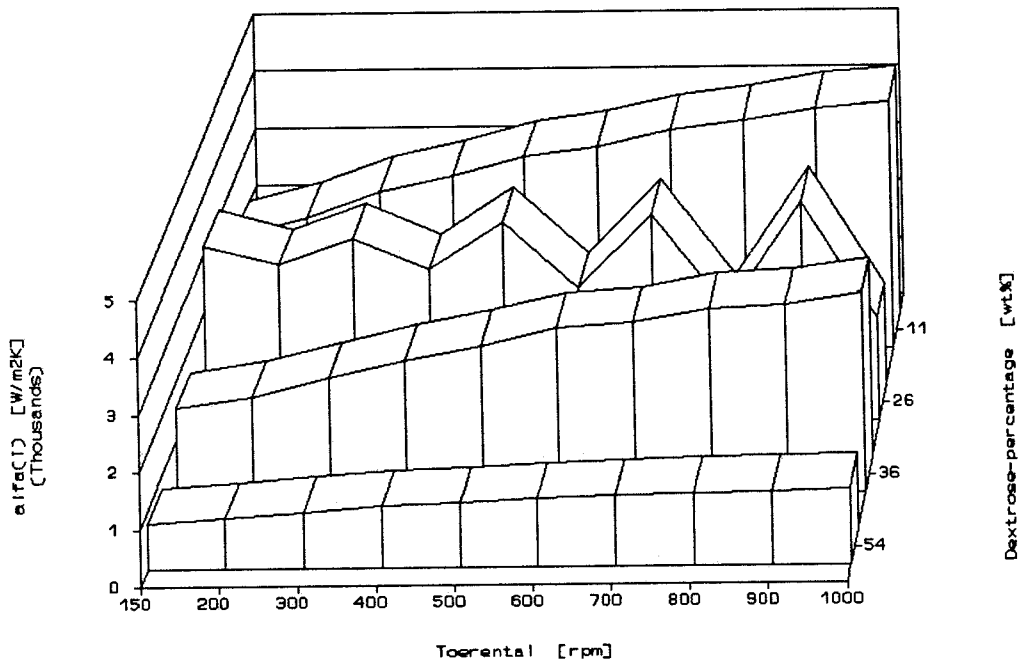
figuur 5.3.3 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-debiet bij verschillende toerentallen (10mm schraperblad, 35wt% dextrose).

De invloed van het toerental.

In de grafieken 5.3.4 en 5.3.5 zijn de bepaalde waarden voor $\alpha(i)$ zonder fasenovergang uitgezet tegen het toerental bij verschillende dextrose percentages. Figuur 5.3.4 bevat de meetwaarden voor het 10mm schraperblad, figuur 5.3.5 bevat de meetwaarden voor het 20mm schraperblad. Naarmate het dextrose-percentage toeneemt, neemt de warmte-overdrachtscoefficient $\alpha(i)$ af. De waarde voor $\alpha(i)$ bij gelijk toerental en viscositeit is in beide gevallen ongeveer even groot.



figuur 5.3.4 : $\alpha(i)$ als functie van het toerental bij verschillende dextrose-percentages (10mm schraperblad).

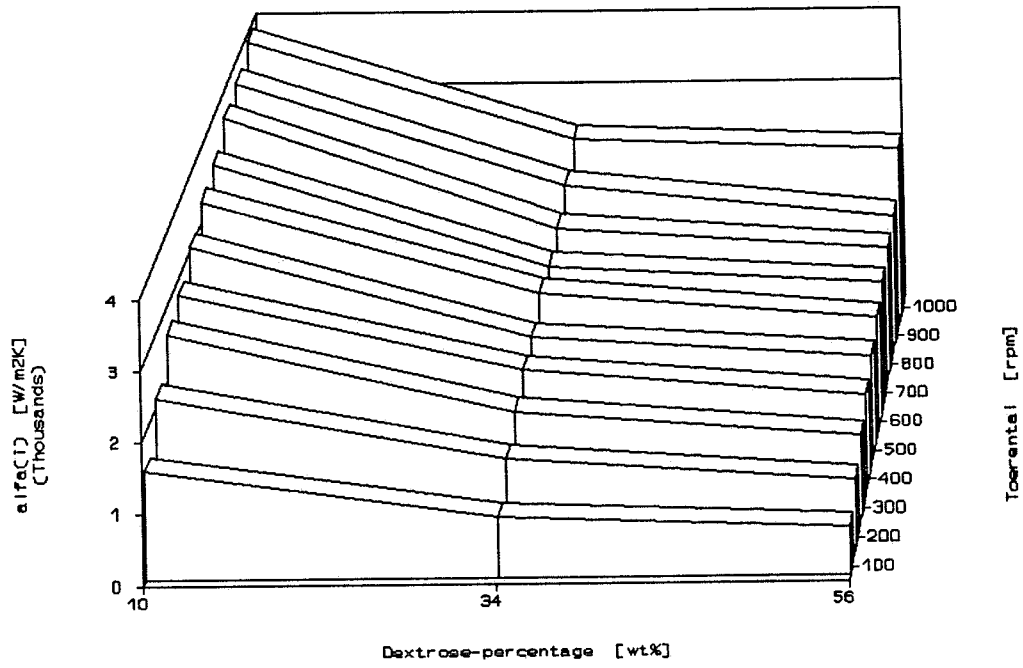


figuur 5.3.5 : $\alpha(i)$ als functie van het toerental bij verschillende dextrose-percentages (20mm schraperblad, Perree [14]).

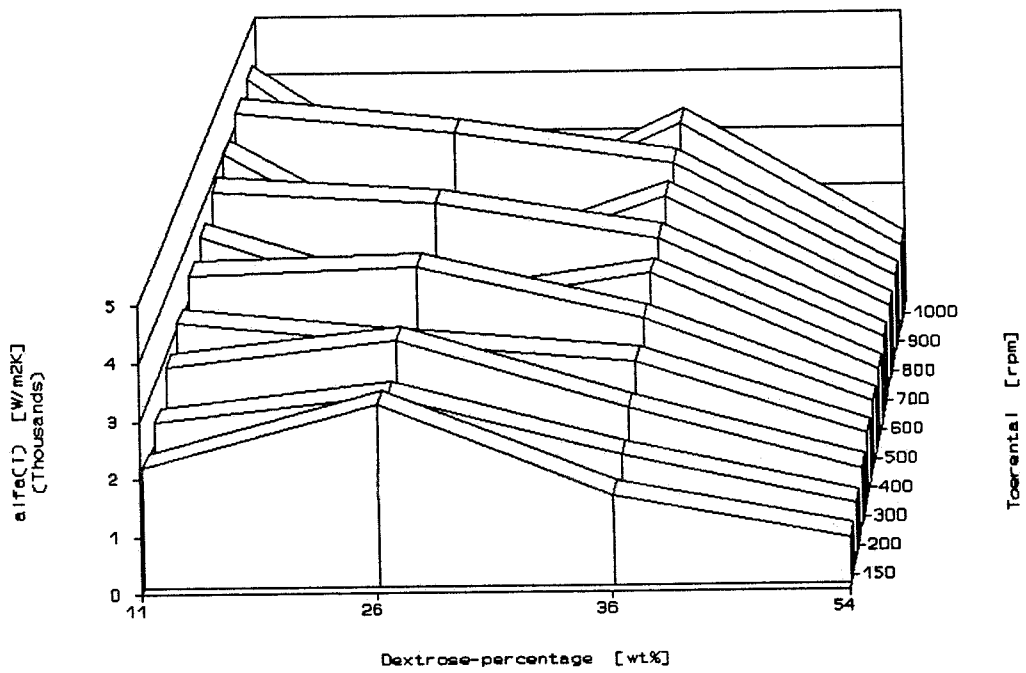
De invloed van het dextrose-percentage.

In de grafieken 5.3.6 en 5.3.7 zijn de bepaalde waarden van $\alpha(i)$ uitgezet tegen het dextrose-percentage bij verschillende toerentallen. Grafiek 5.3.6 bevat de bepaalde waarden van $\alpha(i)$ voor het 10mm schraperblad, grafiek 5.3.7 bevat de bepaalde waarden voor $\alpha(i)$ voor het 20mm schraperblad.

Zowel voor het 10mm schraperblad als het 20mm schraperblad blijkt de bepaalde waarde van $\alpha(i)$ toe te nemen met afnemend dextrose-percentage. De gemeten waarden van $\alpha(i)$ voor het 10mm schraperblad zijn lager dan de gemeten waarden van $\alpha(i)$ voor het 20mm schraperblad.



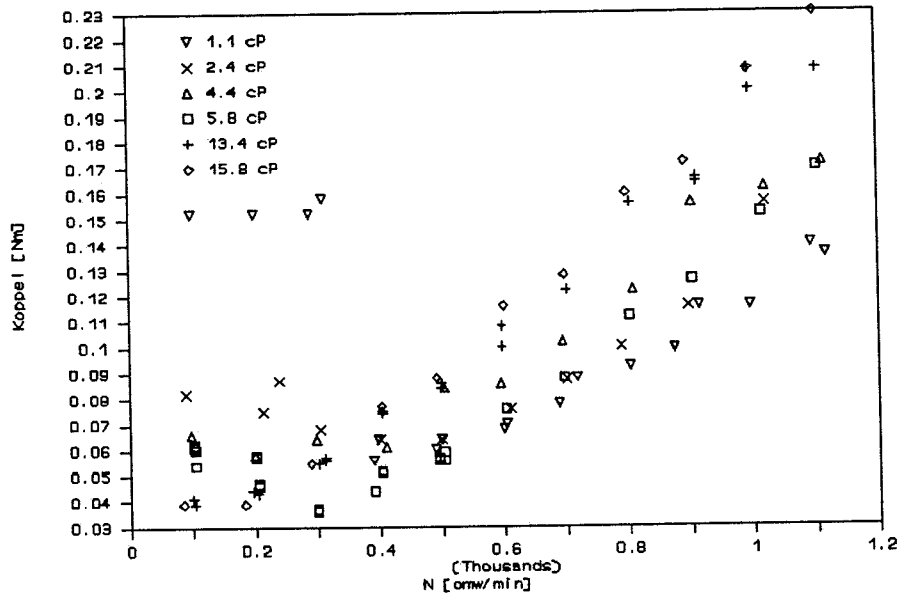
figuur 5.3.6 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-percentage bij verschillende toerentallen (10mm schraperblad).



figuur 5.3.7 : $\alpha(i)$ als functie van het dextrose-percentage bij verschillende toerentallen (20mm schraperblad).

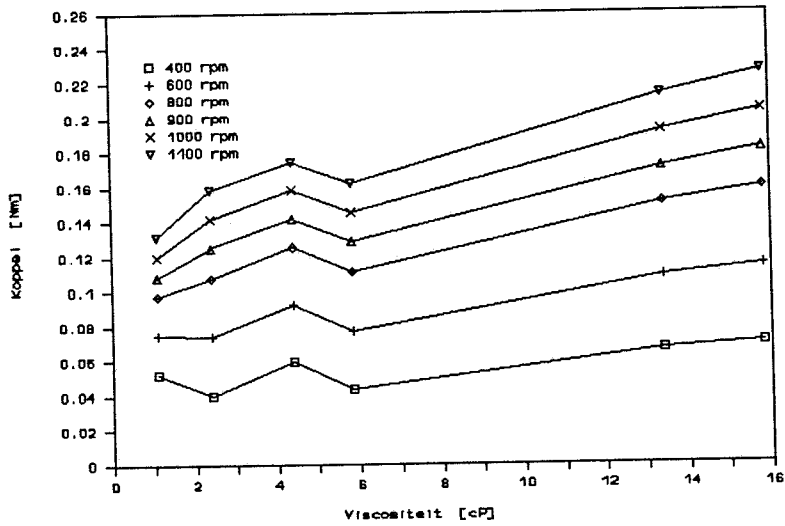
5.4 Bepalen van de correctie-factor voor de wrijvingsbijdrage.

Om de wrijvingsbijdrage aan het koppel op de schraper-as te bepalen is het koppel op de as zonder schraperbladen gemeten bij verschillende viscositeiten als functie van het toerental. De resultaten zijn weergegeven in figuur 5.4.1 .



figuur 5.4.1 : Gemeten koppels op de schraper-as zonder schraperbladen als functie van het toerental bij verschillende viscositeiten.

In figuur 5.4.2 zijn de gemeten koppels als functie van de viscositeit uitgezet. Daar er aan de schraperas geen schraperbladen bevestigd zijn, wordt de grootte van het koppel op de schraperas bepaald door de wrijving in de lagers en door de afschuifkrachten die de schraperas op de vloeistof uitgeoefend wordt. De bijdrage aan het gemeten koppel van de wrijving in de lagers kan bepaald worden door de meetwaarden te extrapoleren naar een viscositeit nul. Bij een viscositeit nul oefent de schraperas geen afschuifkrachten uit op de vloeistof. De asafsnode in figuur 5.4.3 bij een viscositeit gelijk aan nul, is gelijk aan de wrijvings-verliezen in de lagers en keerringen.

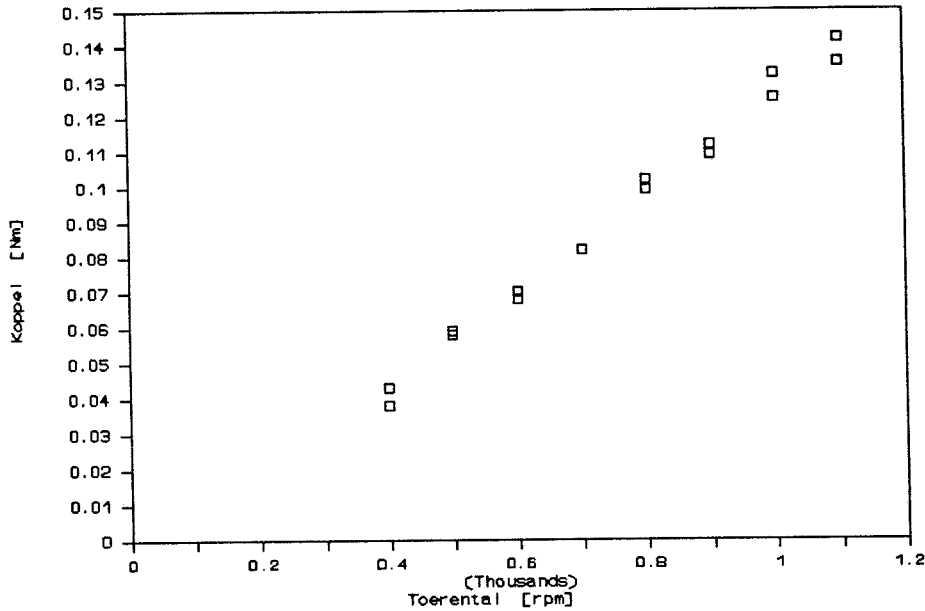


Figuur 5.4.3 : Gemeten koppels op een schraper-as zonder schraperbladen als functie van de viscositeit bij verschillende toerentallen.

De uit figuur 5.4.3 bepaalde asafsneden zijn nog een functie van het toerental van de schraperas. In figuur 5.4.4 zijn de asafsneden uitgezet tegen het toerental. De lijn door de meetpunten kan beschreven worden met de vergelijking ($N > 400$ rpm):

$$K_{wrijving} = 0.00014 * N - 0.0143 \quad (\text{vgl. 5.4.1})$$

Bij een gegeven toerental kan nu met vergelijking 5.4.1. de waarde van $K_{wrijving}$ berekend worden waarmee het gemeten koppel verminderd moet worden om het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen te berekenen.



figuur 5.4.4 : Door extrapolatie naar $\mu=0$ bepaalde koppels op de schraperas zonder bladen.

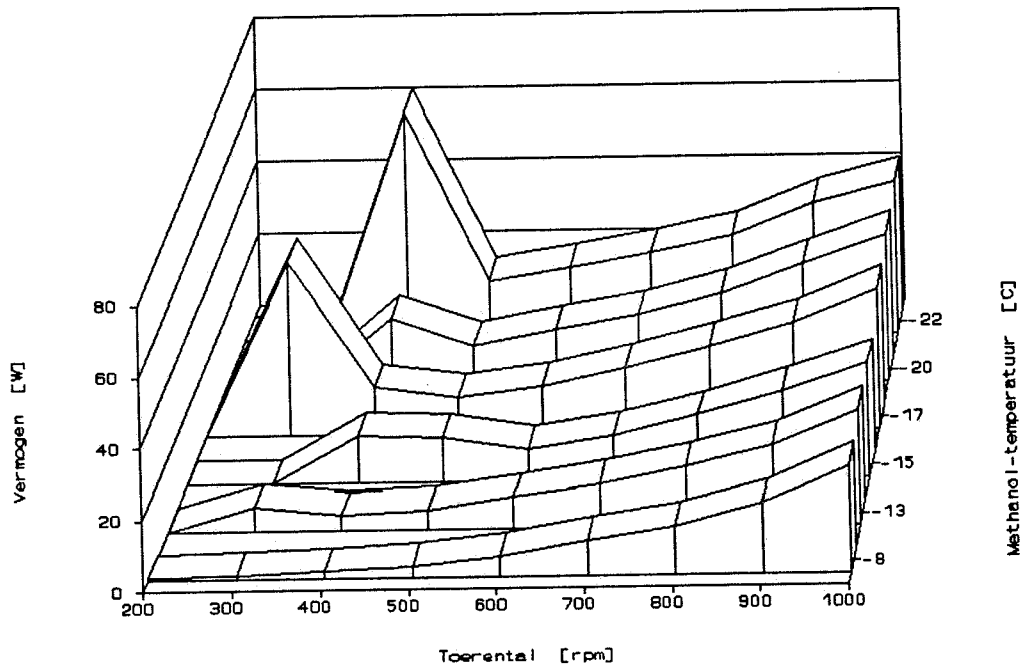
5.5 Vermogen-opname met fasenovergang.

De afhankelijkheid van het toerental.

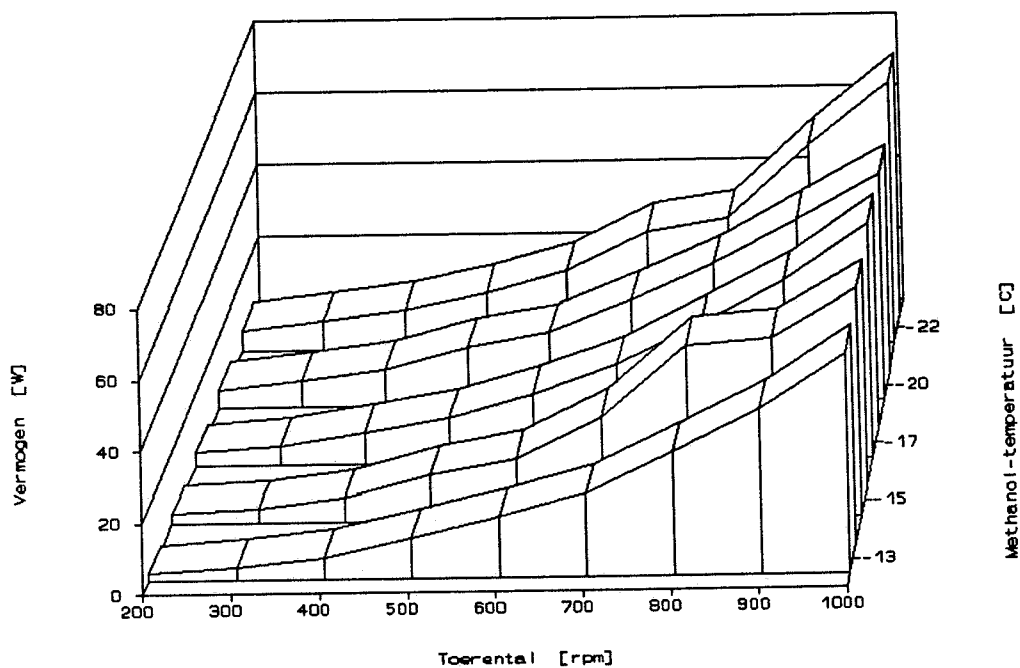
In figuur 5.5.1 t/m 5.5.4 zijn de met de gecorrigeerde koppels berekende gedissipeerde vermogens weergegeven als functie van het toerental. Algemeen kan opgemerkt worden dat het gedissipeerde vermogen stijgt met toenemend toerental. In figuren 5.5.1 en 5.5.3 is te zien dat ook bij lage toerentalen het gedissipeerde vermogen stijgt, echter nu met afnemend toerental. Deze toename bij lage toerentalen wordt veroorzaakt door het vastlopen van de schraperas. Bij 10wt% dextrose is het gedissipeerde vermogen lager dan bij 35wt% dextrose oplossingen. Het gedissipeerde vermogen voor de verschillende bladhoogten bij gelijk toerental en koelmiddeltemperatuur is even groot.

De afhankelijkheid van de koelmiddeltemperatuur.

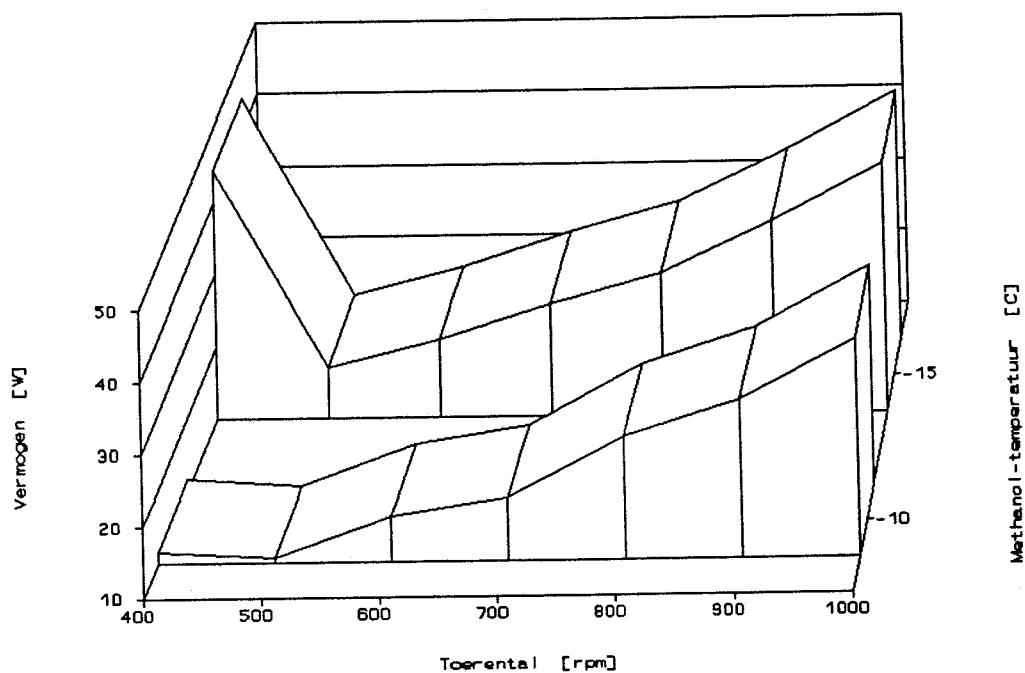
In figuur 5.5.5 t/m 5.5.8 zijn de met de gecorrigeerde koppels gedissipeerde vermogens weergegeven als functie van de koelmiddeltemperatuur. Er blijkt een geringe invloed van de koelmiddel-temperatuur op het gedissipeerde vermogen te zijn.



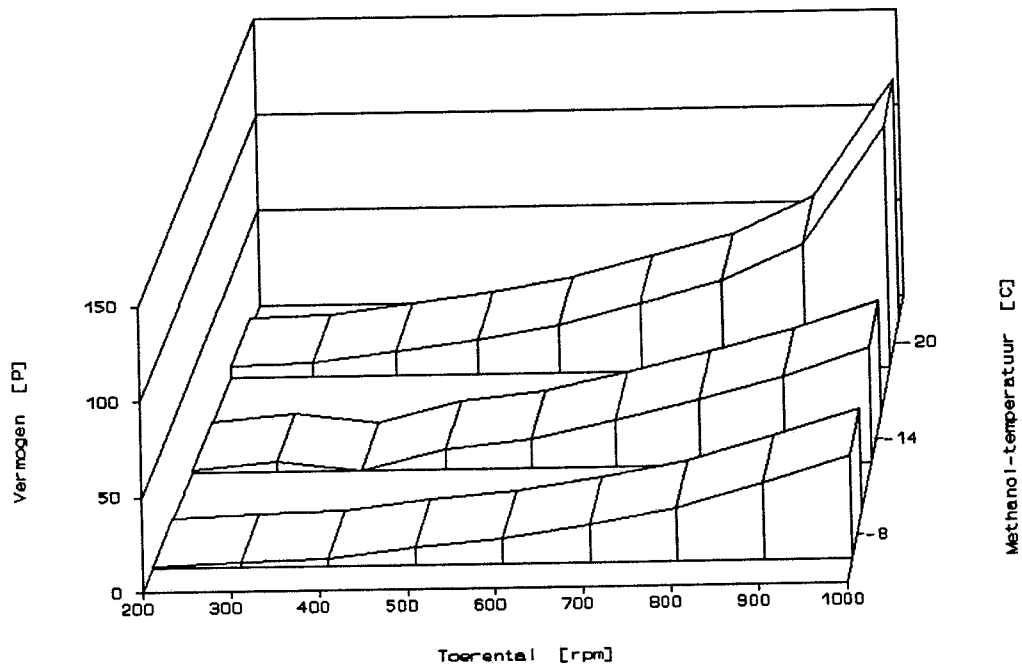
figuur 5.5.1 : Gedissipeerde vermogen als functie van het toerental.
(10wt% dextrose , 20mm schraperblad)



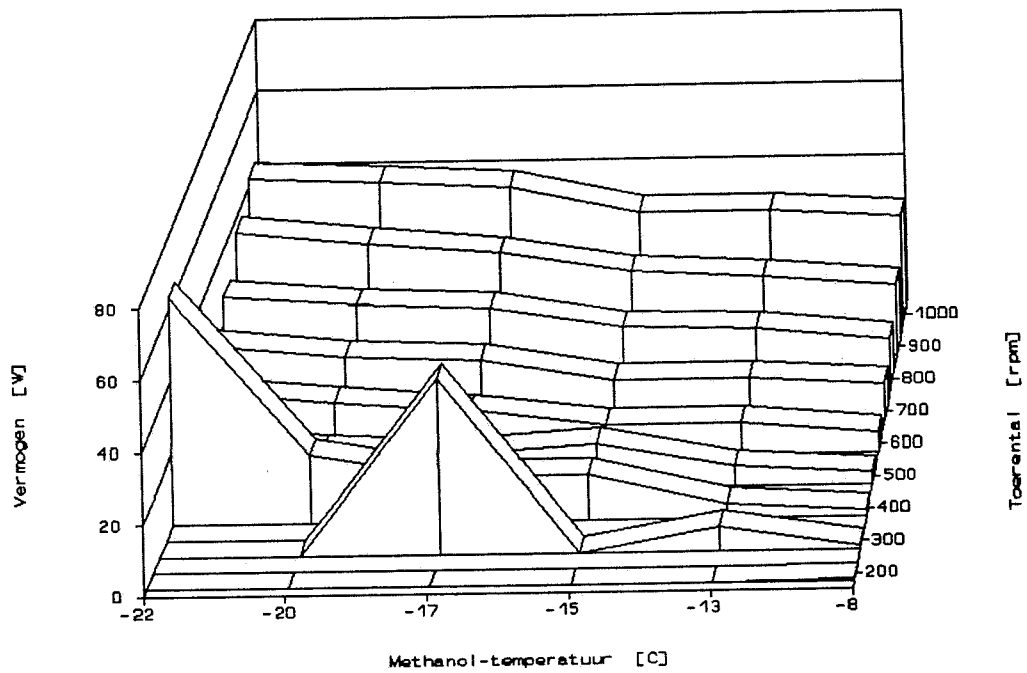
figuur 5.5.2 : Gedissipeerde vermogen als functie van het toerental.
(35wt% dextrose , 20mm schraperblad)



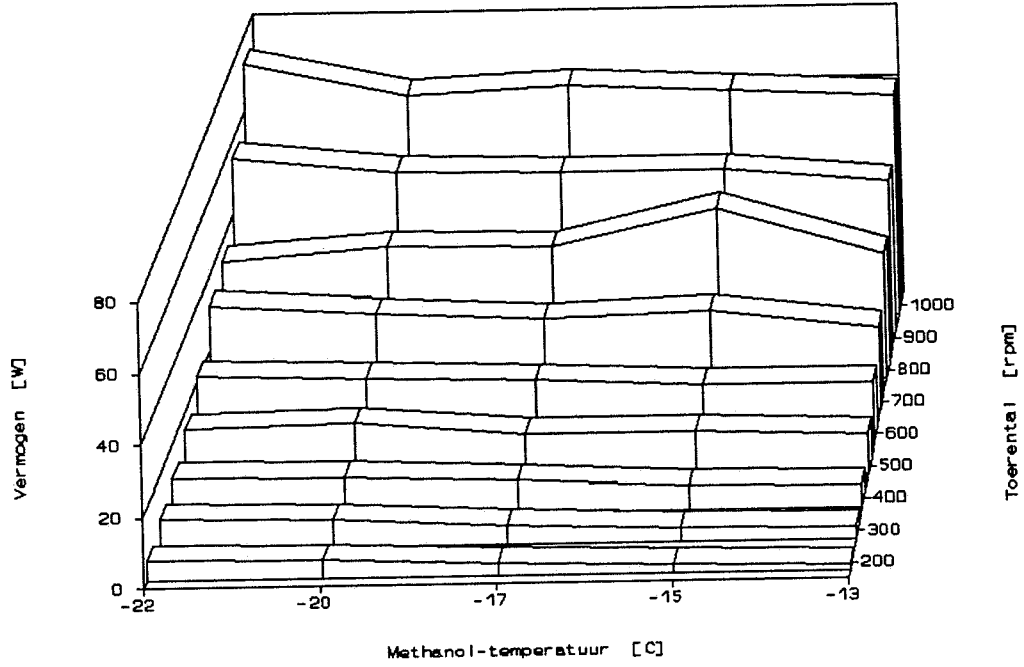
figuur 5.5.3 : Gedissipeerde vermogen als functie van het toerental.
(10wt% dextrose , 10mm schraperblad)



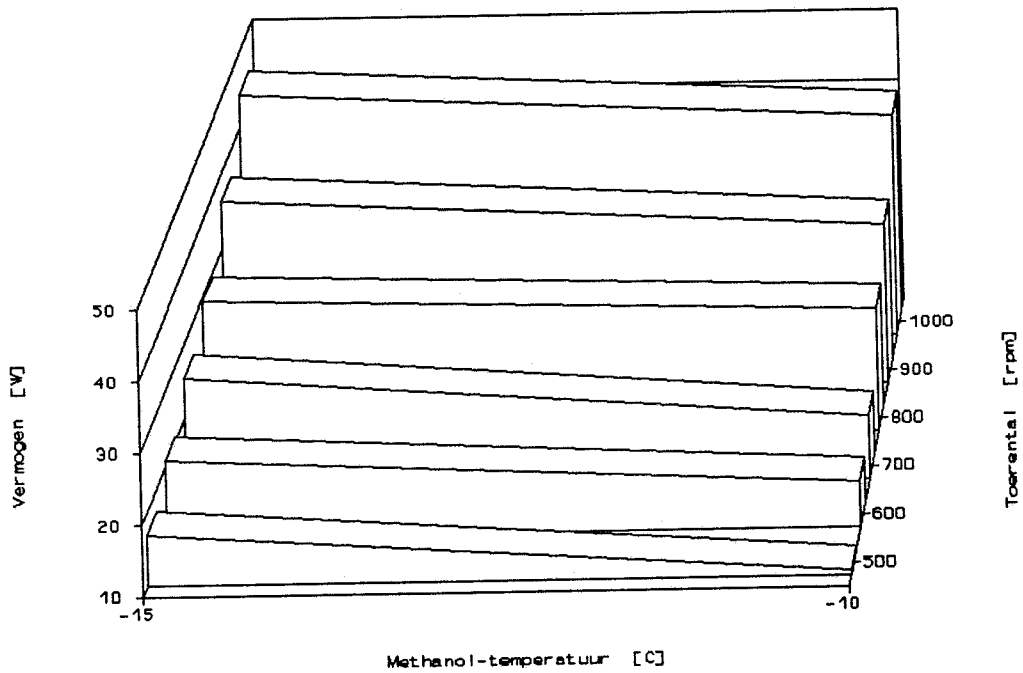
Figuur 5.5.4 : Gedissipeerde vermogen als functie van het toerental.
(35wt% dextrose , 10mm schraperblad)



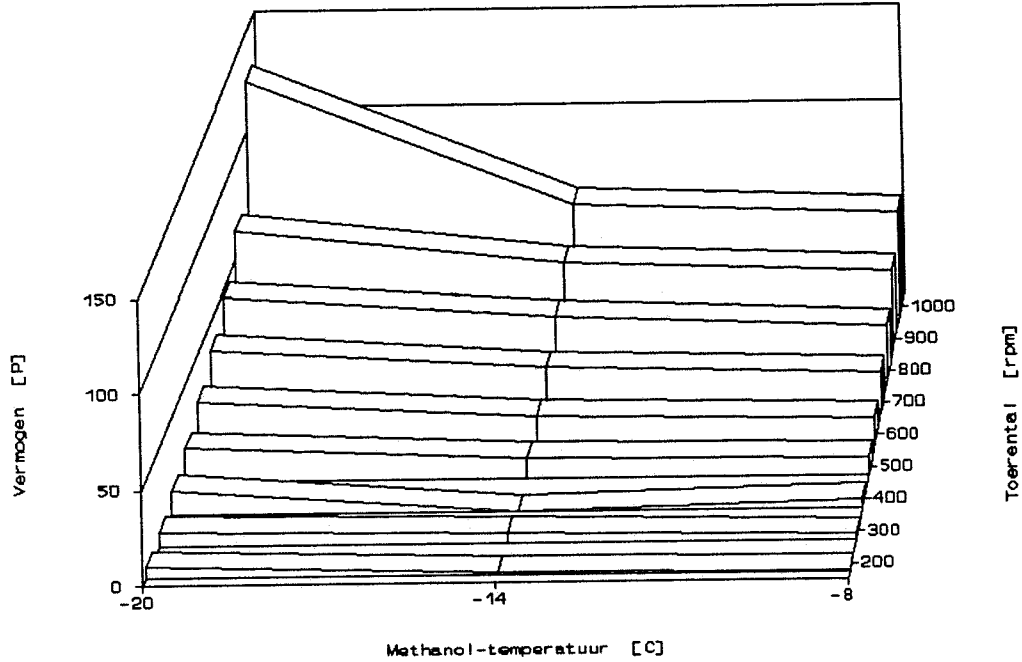
figuur 5.5.5 : Gedissipeerde vermogen als functie van de koelmiddel-
temperatuur (10wt% dextrose , 20mm schraperblad).



figuur 5.5.6 : Gedissipeerde vermogen als functie van de koelmiddel-temperatuur (35wt% dextrose , 20mm schraperblad).



figuur 5.5.7 : Gedissipeerde vermogen als functie van de koelmiddel-temperatuur (10wt% dextrose , 10mm schraperblad).



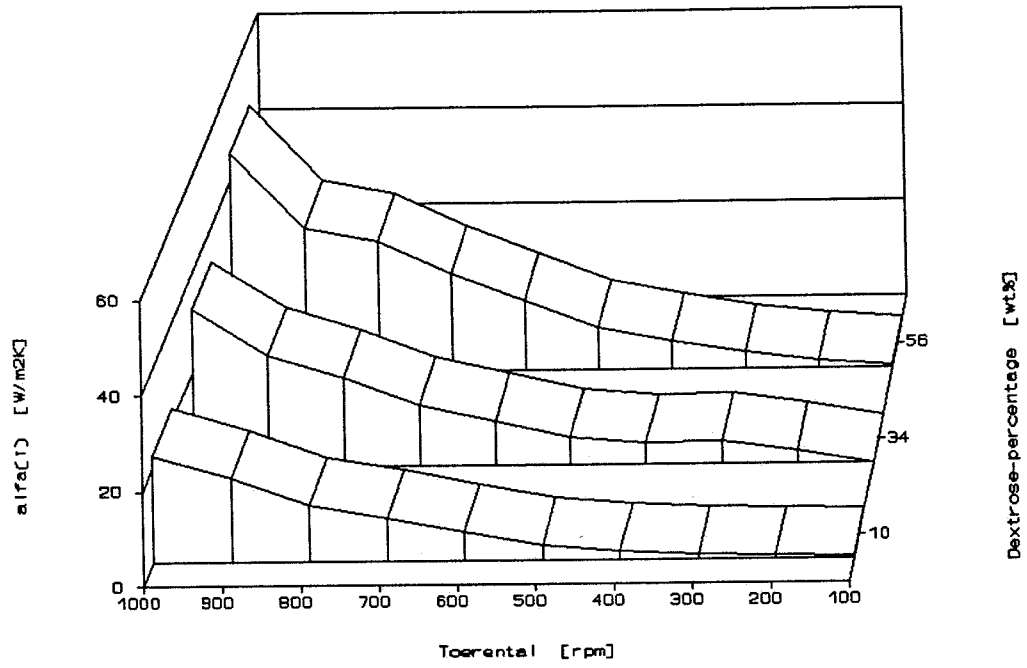
figuur 5.5.8 : Gedissipeerde vermogen als functie van de koelmiddeltemperatuur (35wt% dextrose , 10mm schraperblad).

5.6 Vermogen-opname zonder fasenovergang.

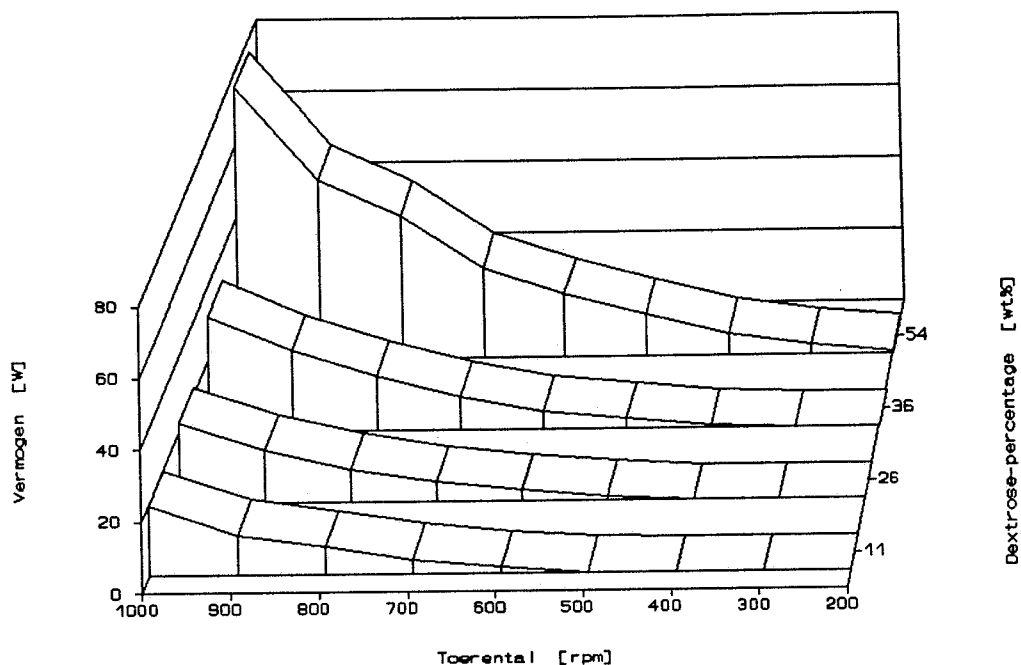
De invloed van het toerental.

In de figuren 5.6.1 en 5.6.2 is het voor schrapen benodigde vermogen in situaties zonder fasenovergang uitgezet als functie van het toerental bij verschillende dextrose-percentages. In figuur 5.6.1 zijn de berekende vermogens voor het 10mm schraperblad uitgezet, in figuur 5.6.2 zijn de berekende vermogens voor het 20mm schraperblad uitgezet.

Voor beide schraperbladen neemt het gedissipeerde vermogen toe met toenemend toerental. Voor de 10wt% dextrose-oplossing neemt het gedissipeerde vermogen voor het 10mm schraperblad harder toe met toenemend toerental dan het gedissipeerde vermogen voor het 20mm schraperblad. Voor de 34wt% dextrose-oplossing is de toename van het gedissipeerde vermogen met toenemend toerental voor beide schraperbladen even groot. Voor de 56wt% dextrose-oplossing is de stijging het gedissipeerde vermogen voor het 20mm schraperblad met toenemend toerental groter dan voor het 10mm schraperblad.



figuur 5.6.1 : opgenomen vermogen ten gevolge van schrapen als functie van het toerental bij verschillende dextrose-percentages (10 mm schraperblad).

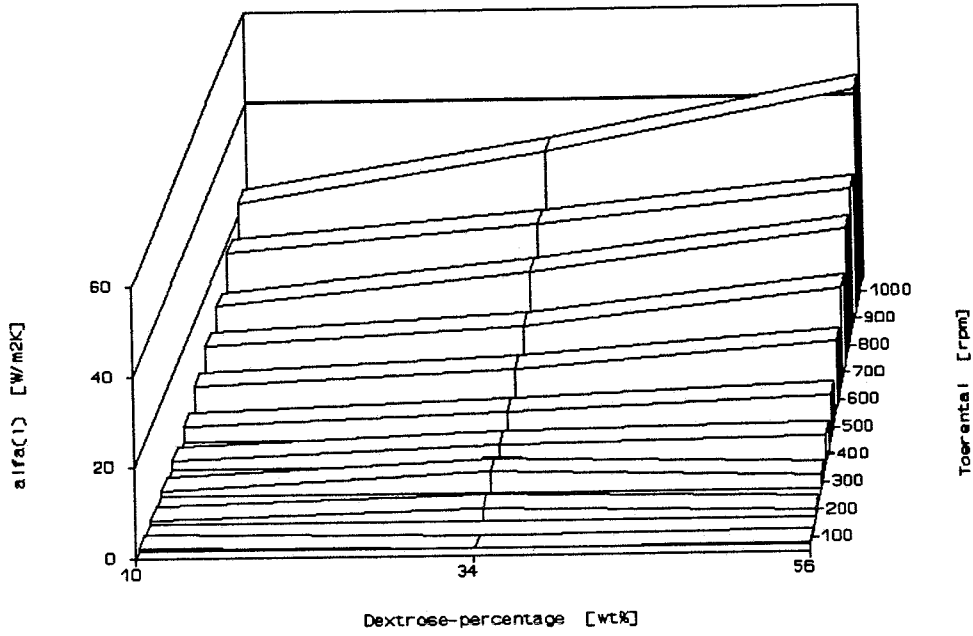


figuur 5.6.2 : opgenomen vermogen ten gevolge van schrapen als functie van het toerental bij verschillende dextrose-percentages (20 mm schraperblad).

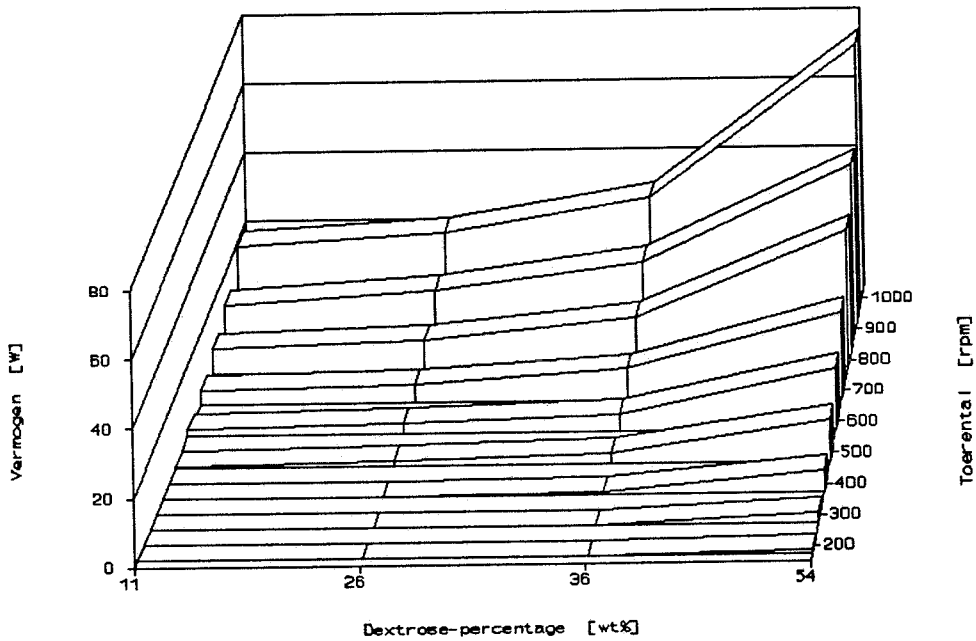
De invloed van het dextrose-percentage.

In de figuren 5.6.3 en 5.6.4 zijn de voor schrapen benodigde vermogens uitgezet als functie van het dextrose-percentage bij verschillende toerentallen. In figuur 5.6.3 zijn de meetwaarden voor het 10mm schraperblad uitgezet, in figuur 5.6.4 zijn de meetwaarden voor het 20mm schraperblad uitgezet.

Voor beide schraperbladen neemt het voor schrapen benodigde vermogen toe met toenemend dextrose-percentage. De stijging van het gedissipeerde vermogen met toenemend dextrose-percentage lijkt voor het 10mm schraperblad lineair te zijn, voor het 20mm schraperblad lijkt deze toename exponentieel te zijn.



figuur 5.6.3 : opgenomen vermogen ten gevolge van schrapen als functie van het dextrose-percentage bij verschillende toerentallen (10mm schraperblad).



figuur 5.6.4 : opgenomen vermogen ten gevolge van schrapen als functie van het dextrose-percentage bij verschillende toerentallen (20mm schraperblad).

6 BESPREKING

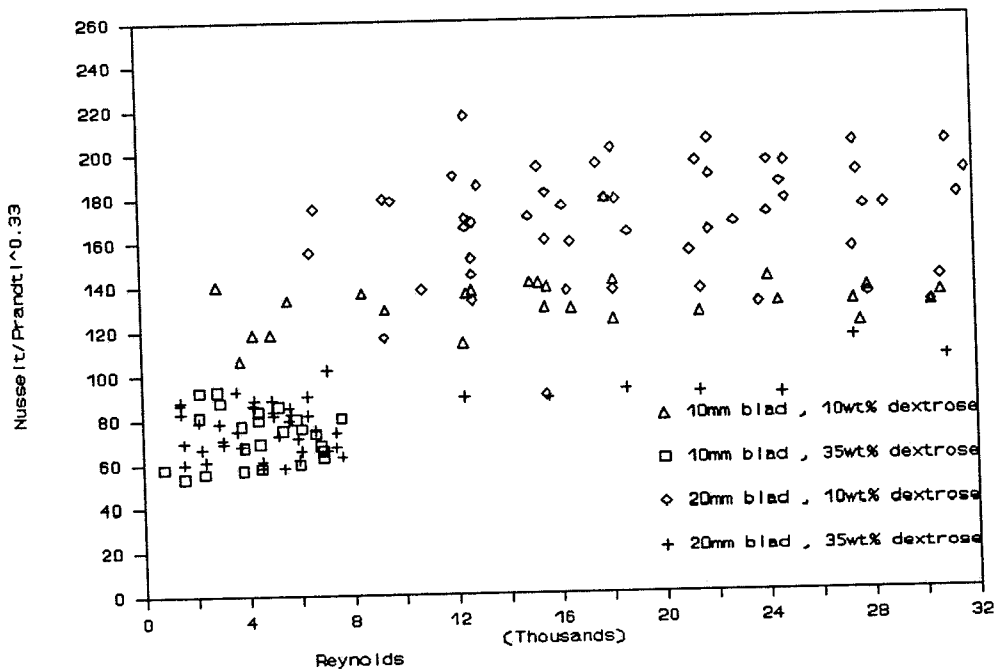
6.1 Warmte-overdracht.

Om de bij verschillende toerentallen, viscositeiten en bladhoogten gevonden waarden voor $\alpha(i)$ te kunnen vergelijken, worden de meetwaarden gepresenteerd in de algemene vorm :

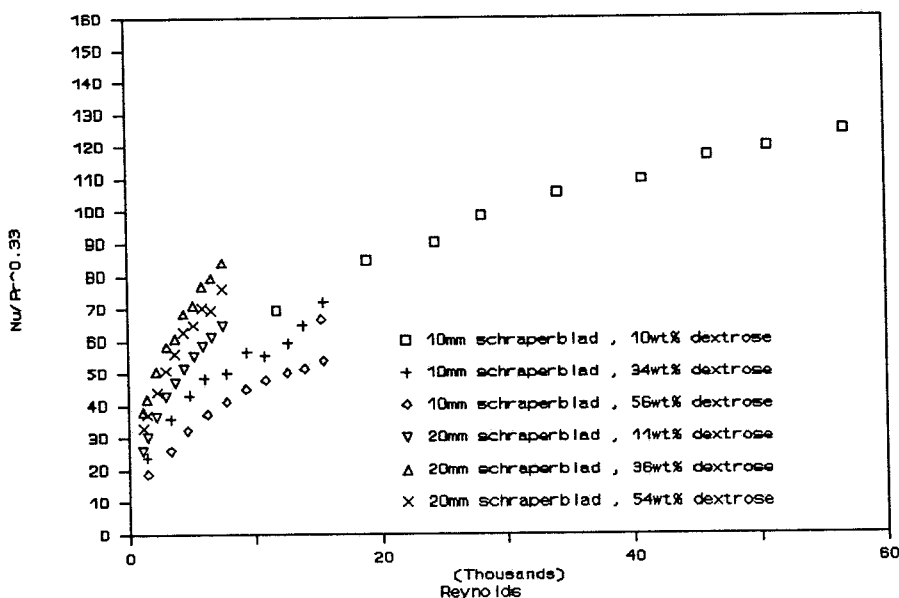
$$Nu = \text{constante} * Re_{rot}^a * Pr^b \quad (\text{vgl. 6.1.1})$$

Voor de macht b van het Prandtl-getal wordt een waarde van 0.33 aangenomen, de stofconstanten in de kengetallen van Nusselt, Reynolds en Prandtl worden betrokken op de gemiddelde temperatuur van de processtroom.

In figuur 6.1.1 is voor alle meetwaarden met fasenovergang $Nu/Pr^{0.33}$ uitgezet tegen het Reynolds-getal; in figuur 6.1.2 voor is alle meetwaarden zonder fasenovergang $Nu/Pr^{0.33}$ uitgezet tegen het Reynolds-getal. Voor beide situaties blijkt er een afhankelijkheid van de hoogte van het schraperblad te zijn.



figuur 6.1.1 : $Nu/Pr^{0.33}$ als functie van Reynolds voor situaties met fasenovergang voor twee verschillende dextrose-percentages en twee verschillende hoogten van het schraperblad.

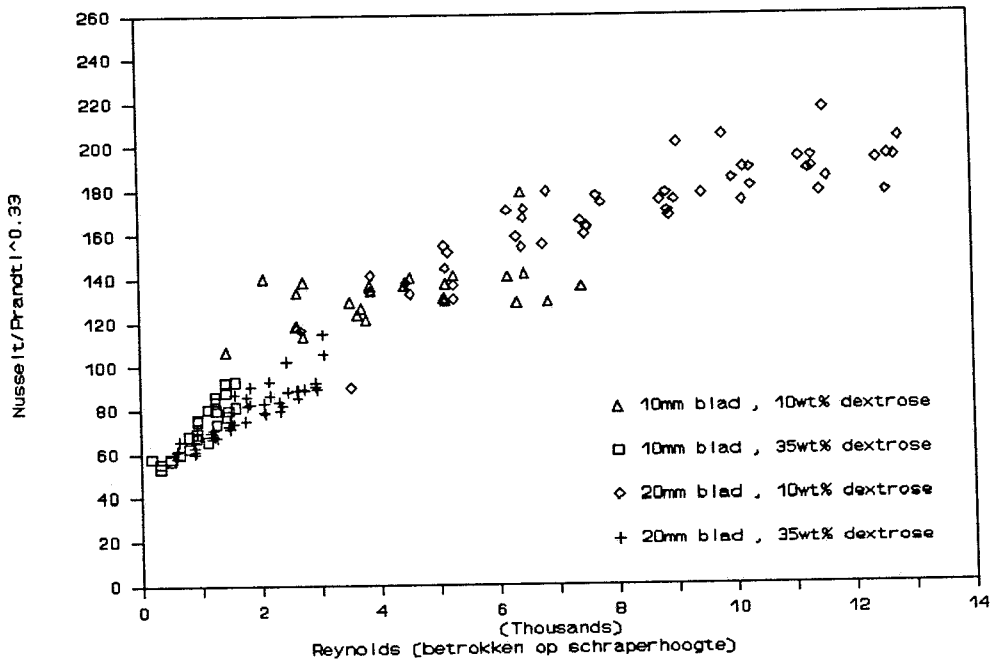


figuur 6.1.2 : Nu/Pr^{0.33} als functie van Reynolds voor situaties zonder fasenovergang voor verschillende dextrose-percentages en twee verschillende hoogten van het schraperblad.

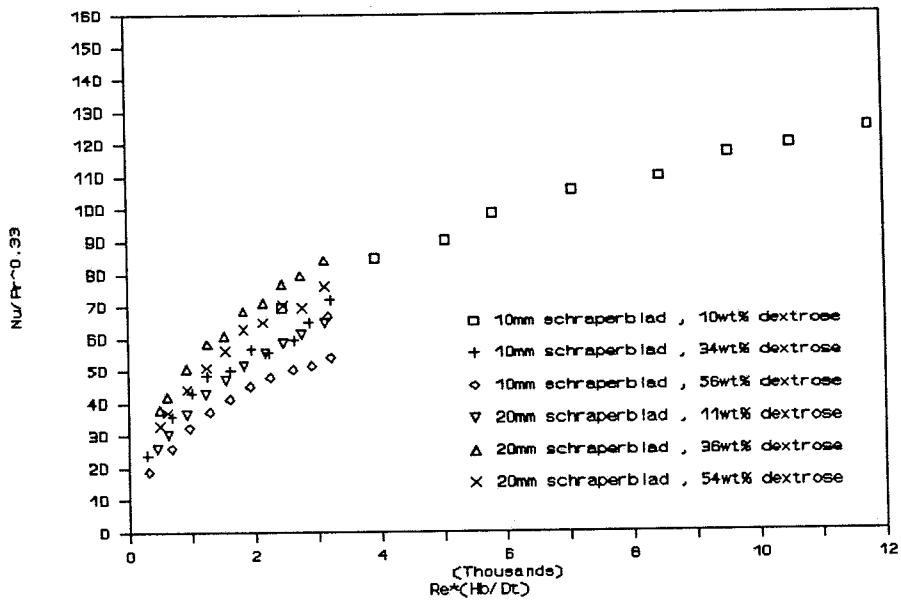
Om de invloed van de hoogte H_b van het schraperblad op de warmteoverdracht te verdisconteren, wordt het rechter lid in vergelijking 6.1.1 vermenigvuldigd met de dimensieloze groep $(H_b/d_h)^c$. De algemene vergelijking wordt dan:

$$Nu = constante * Re_{rot}^a * Pr^b * \left(\frac{H_b}{d_h}\right)^c \quad (\text{vgl. 6.1.2})$$

Voor de machtsafhankelijkheid b van Prandtl wordt wederom een waarde van 0.33 aangenomen. Tevens wordt aangenomen dat de machtsafhankelijkheid van het Reynolds-getal en de dimensieloze groep $(H_b/d_h)^c$ aan elkaar gelijk zijn ($a=c$). In figuur 6.1.3 is voor alle meetwaarden met fasenovergang Nu/Pr^{0.33} uitgezet tegen $Re * (H_b/d_h)$; in figuur 6.1.4 is voor alle meetwaarden zonder fasenovergang Nu/Pr^{0.33} uitgezet tegen $Re * (H_b/d_h)$. De meetpunten blijken nu een eenduidiger verband te vertonen.



figuur 6.1.3 : $Nu/Pr^{0.33}$ als functie van $Re \cdot (H_b/d_h)$ voor situaties met fasenovergang voor twee verschillende dextrose-percentages en twee verschillende hoogten van het schraperblad.



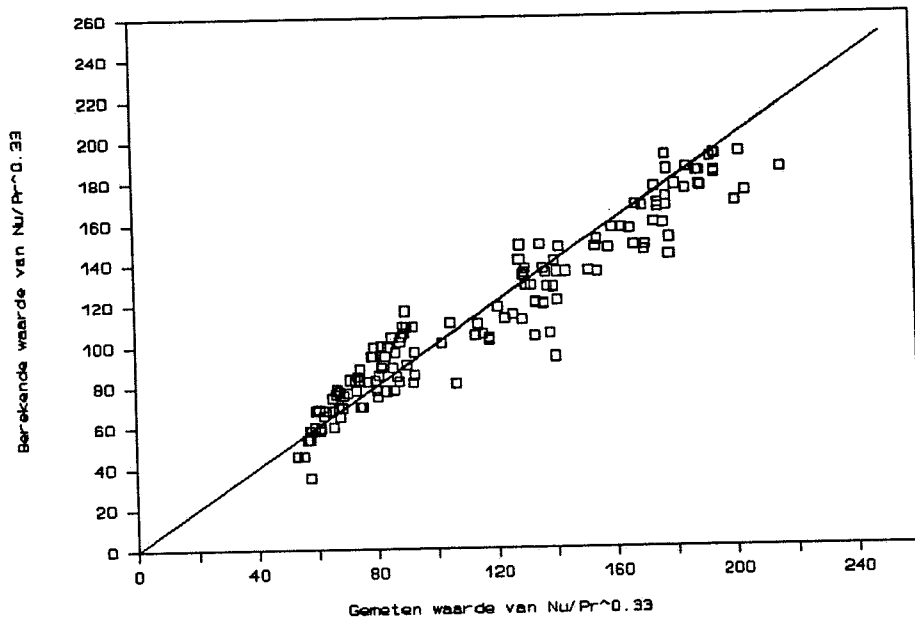
figuur 6.1.4 : $Nu/Pr^{0.33}$ als functie van $Re^*(H_b/d_h)$ voor situaties zonder fasenovergang voor verschillende dextrose-percentages en twee verschillende hoogten van het schraperblad.

Uit de meetpunten in de figuren 6.1.3 en 6.1.4 kan de machtsafhankelijkheid van de groep $Re^*(H_b/d_h)$ en de waarde van de constante uit vergelijking 6.1.2 bepaald worden voor respectievelijk situaties met fasenovergang en situaties zonder fasenovergang:

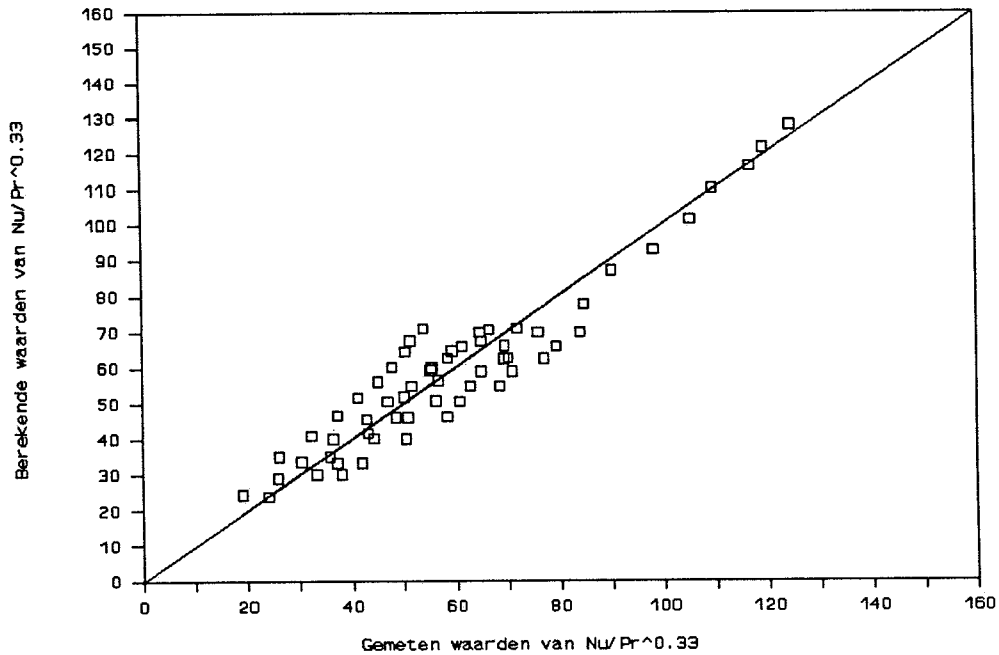
$$\text{met fasenovergang} \quad Nu = 4.61 * Re^{0.40} * Pr^{0.33} * \left(\frac{H_b}{d_h}\right)^{0.40}$$

$$\text{zonder fasenovergang} \quad Nu = 1.79 * Re^{0.46} * Pr^{0.33} * \left(\frac{H_b}{d_h}\right)^{0.46}$$

De betrouwbaarheid van de fit op de meetwaarden met fasenovergang bedraagt 91% ; de betrouwbaarheid van de fit op de meetwaarden zonder fasenovergang bedraagt 87%. In figuur 6.1.5 zijn de berekende waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ uitgezet als functie van de gemeten waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ voor situaties met fasenovergang. In figuur 6.1.6 zijn de berekende waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ uitgezet als functie van de gemeten waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ voor situaties zonder fasenovergang.



figuur 6.1.5 : berekende waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ tegen de gemeten waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ voor situaties met fasenovergang.

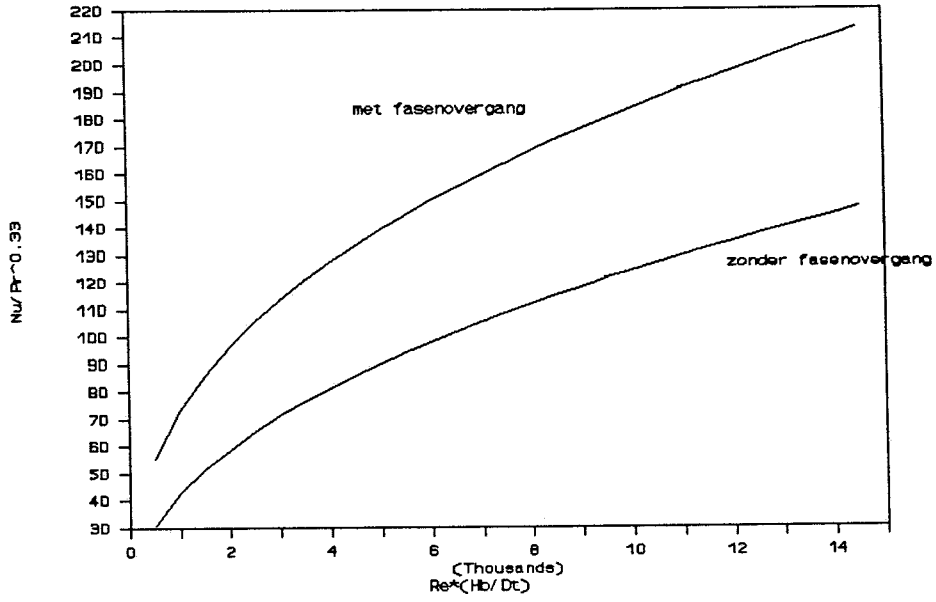


figuur 6.1.6 : berekende waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ tegen de gemeten waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ voor situaties zonder fasenovergang.

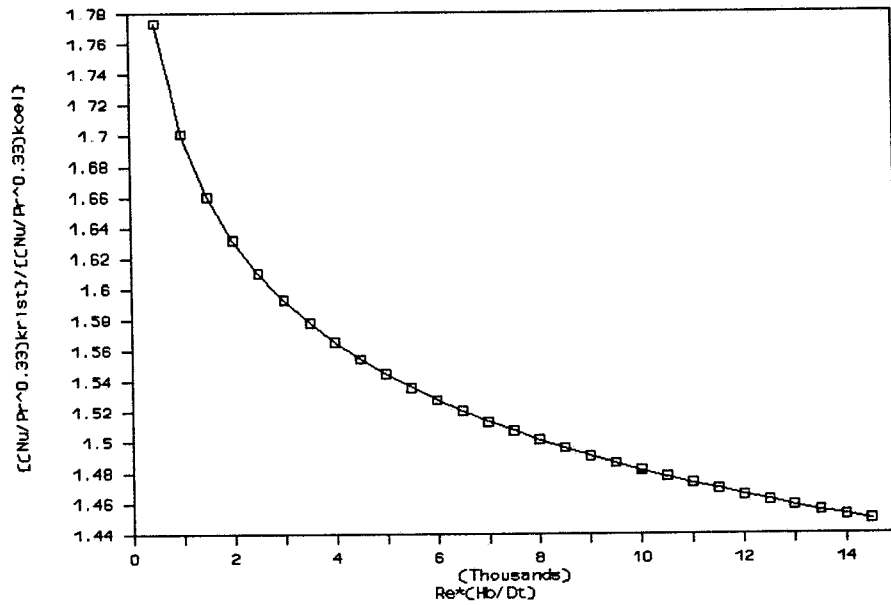
In figuur 6.1.7 zijn de berekende waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ uitgezet als functie van $Re*(H_b/d_h)$ voor situaties zowel met als zonder fasenovergang. De waarden van $Nu/Pr^{0.33}$ voor situaties zonder fasenovergang blijken lager te zijn dan de waarden voor situaties met fasenovergang. Het quotient van de berekende waarden voor $Nu/Pr^{0.33}$ voor situaties met fasenovergang $(Nu/Pr^{0.33})_{krist}$ en situaties zonder fasenovergang $(Nu/Pr^{0.33})_{koel}$ is een functie van $Re*(H_b/d_h)$:

$$\frac{(Nu/Pr^{0.33})_{krist}}{(Nu/Pr^{0.33})_{koel}} = 2.575 * (Re * (\frac{H_b}{d_h}))^{-0.06} \quad (\text{vgl. 6.1.6})$$

In figuur 6.1.8 is de met vergelijking 6.1.6 berekende verhouding uitgezet als functie van $Re*(H_b/d_h)$. In het in dit onderzoek onderzochte gedeelte van het turbulente gebied blijkt de warmte-overdracht in situaties met fasenovergang een faktor 1.45 tot 1.77 toe te nemen ten opzichte van situaties zonder fasenovergang.



figuur 6.1.7 : vergelijking van de berekende waarden voor $(Nu/Pr^{0.33})$ voor situaties met en zonder faseovergang.



figuur 6.1.8 : quotient van $(Nu/Pr^{0.33})_{krist}$ en $(Nu/Pr^{0.33})_{koel}$ als functie van $Re^*(H_b/d_h)$.

In hoofdstuk 2 is afgeleid dat voor de verhouding van de hoeveelheid overgedragen warmte met fasenovergang Q_{krist} en de hoeveelheid overgedragen warmte zonder fasenovergang Q_{koel} geldt dat:

$$\frac{Q_{krist}}{Q_{koel}} = 1 + \frac{\Delta H * v * a * \delta^2}{2 * \lambda * (T_b - T_w)} \quad (\text{vgl. 2.33})$$

Daar $\alpha(i)$ evenredig is met de hoeveelheid overgedragen warmte geldt:

$$\frac{\alpha(i)_{krist}}{\alpha(i)_{koel}} = \frac{Q_{krist}}{Q_{koel}} \quad (\text{vgl. 6.1.7})$$

In tabel 6.1.1 zijn de waarden voor de grootheden uit vergelijking 2.33 weergegeven voor 10wt% dextrose en 35wt% dextrose. Aangenomen wordt dat de gemiddelde onderkoeling van de ijsdeeltjes 0.15 C bedraagt. De waarde van de thermische filmdikte is berekend uit de penetratie-theorie :

$$\delta = \sqrt{\frac{30 * \pi * \lambda}{\rho * c_p * N}} \quad (\text{vgl. 6.1.8})$$

De waarde van k_r is berekend uit relatie 2.24; de temperatuur- en concentratie afhankelijkheid van de overige fysische grootheden zijn vermeld in bijlage 1. De waarden voor k_d , v en a zijn niet bekend, deze moeten worden geschat.

	ΔH [J/kg]	λ [W/m ² K]	ΔT [C]	δ [m]	$c - c^*$ [kg/m ³]	k_r [m/s]
10%	334000	0.479	10	$1.35 * 10^{-4}$	0.5	$1.1 * 10^{-5}$
35%	334000	0.401	10	$1.28 * 10^{-4}$	4	$0.5 * 10^{-5}$

tabel 6.1.1 : waarden van de fysische grootheden in vergelijking 2.33.
(voor N=600 rpm)

Wanneer wordt aangenomen dat het inbouwen van watermolekullen in een ijskristal een eerste orde proces is dan geldt voor v :

$$v = \frac{k_d * k_r}{k_d + k_r} * (c - c^*) = K * (c - c^*) \quad (\text{vgl. 6.1.9})$$

Het quotient in het rechter lid van vergelijking 2.33 kan dan geschreven worden als:

$$\frac{\Delta H * \delta^2}{2 * \lambda * \Delta T} * K * a = \Psi * K * a \quad (\text{vgl. 6.1.10})$$

Ψ voor 10wt% dextrose : $\Psi_{10}=3.175 \cdot 10^{-4}$

Ψ voor 35wt% dextrose : $\Psi_{35}=2.756 \cdot 10^{-3}$

De waarde van K kan berekend worden wanneer k_d bekend is. De absolute waarde van k_d zal hier niet berekend worden maar voor k_d zal een drietal grootte-orden onderscheiden worden: $k_d = 10 \cdot k_r$, $k_d = k_r$, $k_d = 0.1 \cdot k_r$. De waarde van a kan berekend worden door een gemiddelde deeltjes diameter en een volume-percentag e ijs te schatten; voor de deeltjes diameter worden twee waarden aangenomen nl. $10^{-8}m$ en $10^{-9}m$, voor het volume-percentag e ijs wordt een waarde van 5% aangenomen. Voor bolvormige deeltjes geldt:

$$a = \frac{6}{d_p} * \text{volumefractieijs} \quad (\text{vgl. 6.1.11})$$

De waarden van a zijn dan:

$10^{-8}m$ deeltjes : $a=3 \cdot 10^7 [m^2_{ijs}/m^3_{vloeistof}]$

$10^{-9}m$ deeltjes : $a=3 \cdot 10^8 [m^2_{ijs}/m^3_{vloeistof}]$

In tabel 6.1.2 zijn de voor de verschillende waarden van k_d en de deeltjes-grootte waarden van het quotient van Q_{krist} en Q_{koel} uitgezet.

	10wt% $10^{-8}m$	10wt% $10^{-9}m$	35wt% $10^{-8}m$	35wt% $10^{-9}m$
$k_d=10 \cdot k_r$	1.10	1.95	1.45	5.55
$k_d=k_r$	1.05	1.52	1.21	2.07
$k_d=0.1 \cdot k_r$	1.01	1.10	1.00	1.04

tabel 6.1.2 : berekende waarden voor Q_{krist}/Q_{koel} .

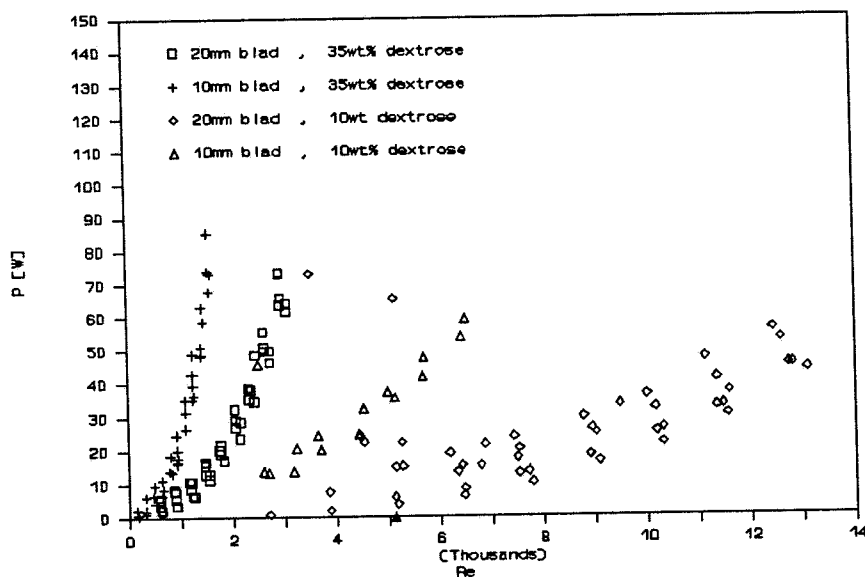
De gemeten waarden voor Q_{krist}/Q_{koel} vallen binnen de waarden zoals deze met het model berekend worden. Om een nauwkeurigere beschrijving te geven moet niet alleen de temperatuur-afhankelijkheid van v en a in de in hoofdstuk 2 afgeleide differentiaal-vergelijking verwerkt worden, maar ook is meer informatie nodig over de deeltjes-grootte en deeltjes-grootte verdeling.

6.2 Het gedissipeerde vermogen.

Om de bij de verschillende toerentallen, viscositeiten en bladhoogten berekende waarden voor het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen te kunnen vergelijken worden de meetwaarden gepresenteerd in de algemene vorm:

$$P = \text{constante} \cdot Re^a \quad (\text{vgl. 6.2.1})$$

Wanneer de voor de verschillende viscositeiten en hoogten van het schraperblad het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen wordt uitgezet tegen het Reynoldsgetal, blijkt er geen eenduidige trend waarneembaar (zie figuur 6.2.1).



figuur 6.2.1 : opgenomen vermogen ten gevolge van schraper als functie van Reynolds voor verschillende hoogten van het schraperblad en verschillende dextrose-percentages.

Wanneer echter het in de warmtewisselaar gedissipeerde vermogen wordt uitgezet tegen het toerental in plaats van tegen het gemodificeerde Reynoldsgetal, blijkt er wel een trend waarneembaar (zie figuur 6.2.2 en figuur 6.2.3). Naast een afhankelijkheid van het toerental is ook nog een afhankelijkheid van de viscositeit van de procesvloeistof waarneembaar.

Om deze toerental- en viscositeitsafhankelijkheid te kunnen verdisconteren, worden de meetwaarden gefit op de volgende vergelijking:

$$P = \text{constante} * N^a * \mu^b \quad (\text{vgl. 6.2.2})$$

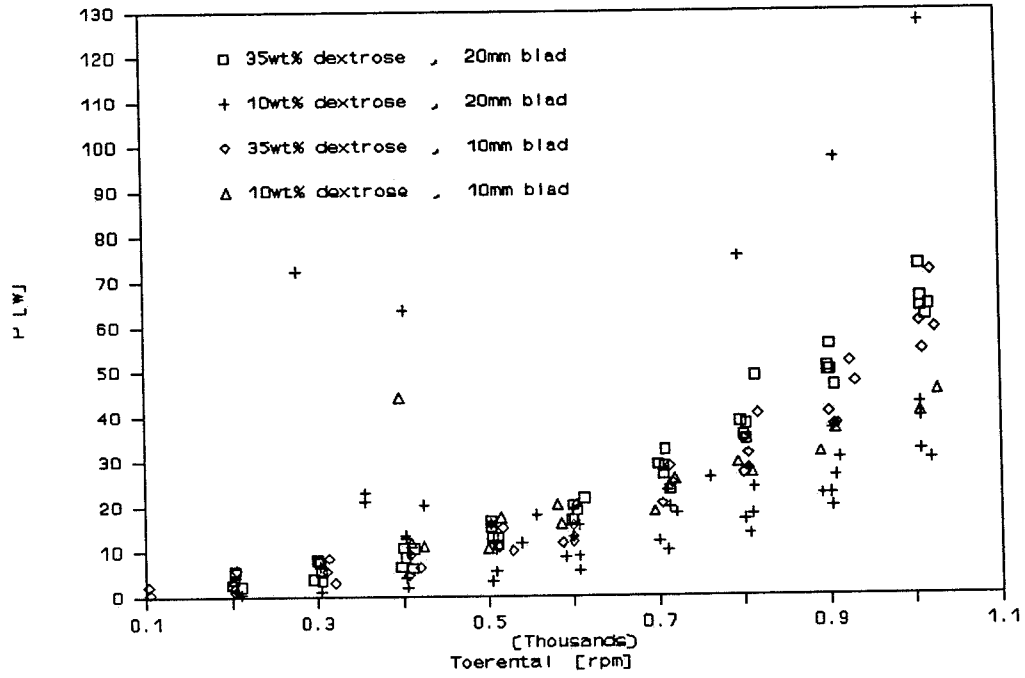
Uit de gevonden meetwaarden kan dan de waarde voor a, b en de constante gevonden worden voor situaties met en zonder fasenovergang:

$$\text{met fasenovergang} \quad P = 0.00055 * N^2 * \mu^{0.5} \quad (\text{vgl. 6.2.3})$$

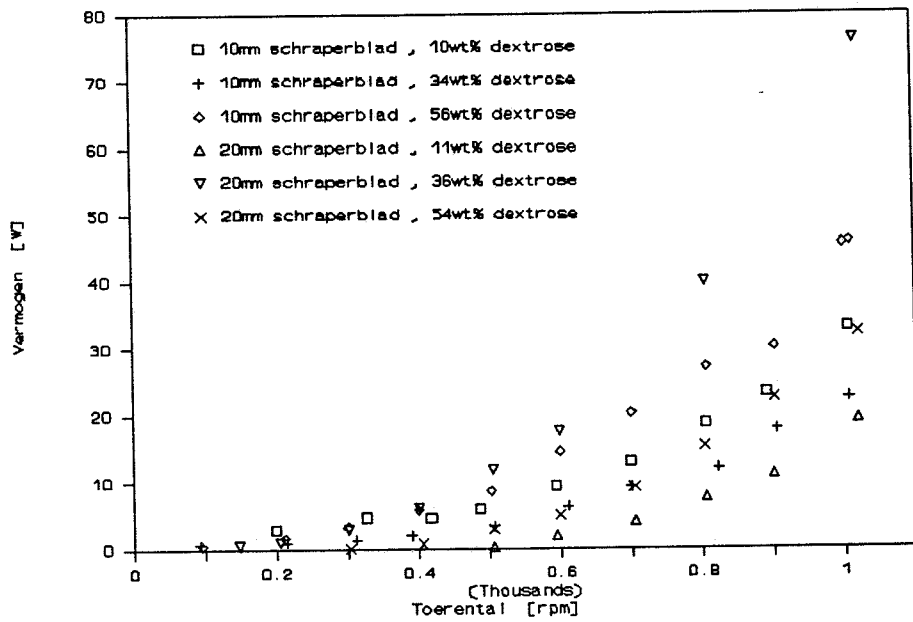
$$\text{zonder fasenovergang} \quad P = 0.00051 * N^2 * \mu^{0.5} \quad (\text{vgl. 6.2.4})$$

Het gedissipeerde vermogen is voor beide situaties nagenoeg gelijk. Dit zou erop kunnen duiden dat het over de wand lopen van de schraperbladen de voornaamste oorzaak van energie-dissipatie in de warmte-wisselaar is.

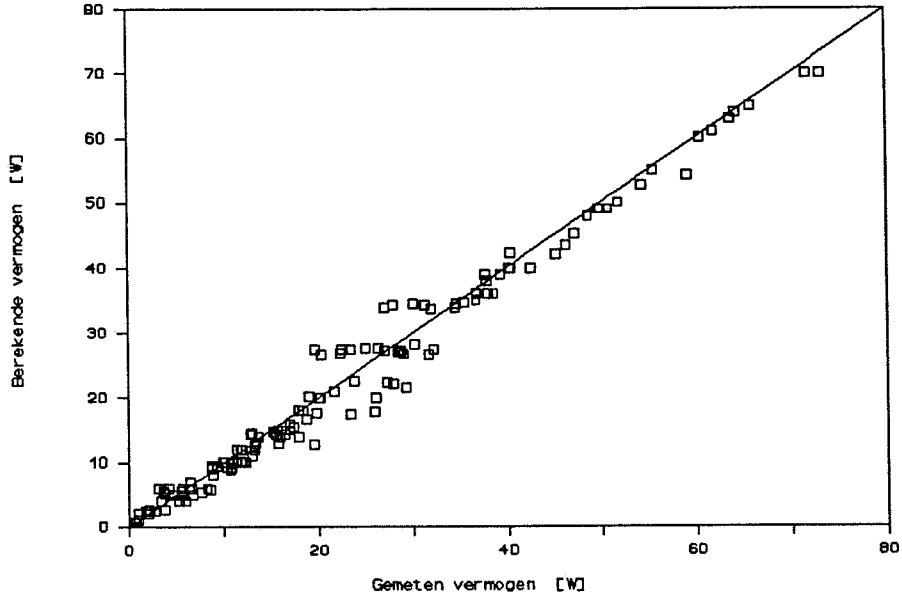
In figuur 6.2.4 is het met vergelijking 6.2.3 berekende vermogen uitgezet tegen het gemeten vermogen voor situaties met fasenovergang. De betrouwbaarheid van de fit van de meetwaarden op vergelijking 6.2.3 is gelijk aan 97%. In figuur 6.2.5 is het met vergelijking 6.2.4 berekende vermogen uitgezet tegen het gemeten vermogen voor situaties zonder fasenovergang. De betrouwbaarheid van de fit van de meetwaarden op vergelijking 6.2.4 is gelijk aan 98%.



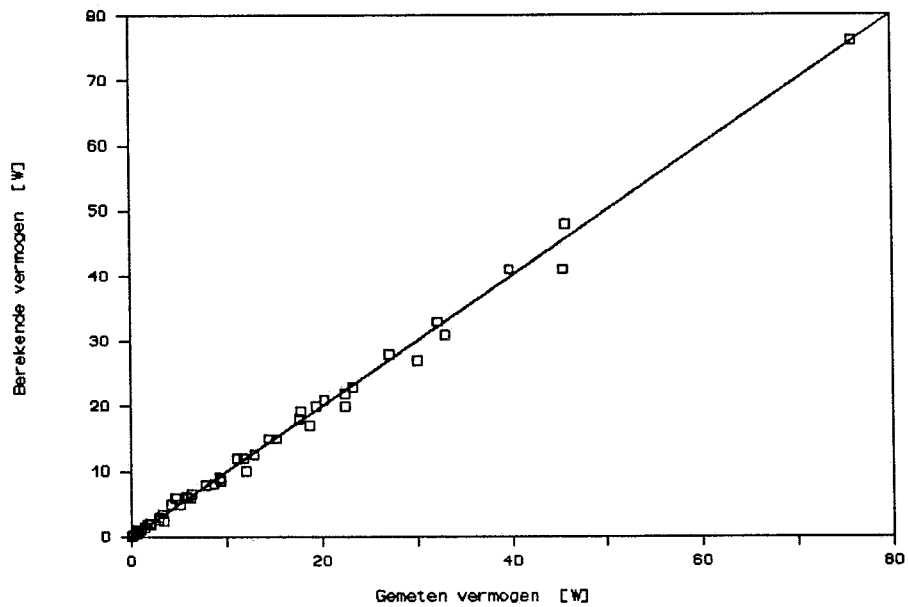
figuur 6.2.2 : gedissipeerd vermogen als functie van het toerental voor situaties met fasenovergang.



figuur 6.2.3 : gedissipeerd vermogen als functie van het toerental voor situaties zonder fasenovergang.



figuur 6.2.4 : met vergelijking 6.2.3 berekende waarden voor het gedissipeerde vermogen als functie van het gemeten vermogen voor situaties met fasenovergang.



figuur 6.2.5 : met vergelijking 6.2.4 berekende waarden voor het gedissipeerde vermogen als functie van het gemeten vermogen voor situaties zonder fasenovergang.

Voor de geschraapte warmte-wisselaar kan een vermogens-rendement-factor ξ gedefinieerd worden:

$$\xi = \frac{\text{overgedragenvermogen}}{\text{opgenomenvermogen tgv schrapen}} = \frac{Q_{trans}}{Q_{diss}} \quad (\text{vgl. 6.2.5})$$

Het in de warmte-wisselaar overgedragen vermogen Q_{trans} kan berekend worden uit:

$$Q_{trans} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad (\text{vgl. 6.2.6})$$

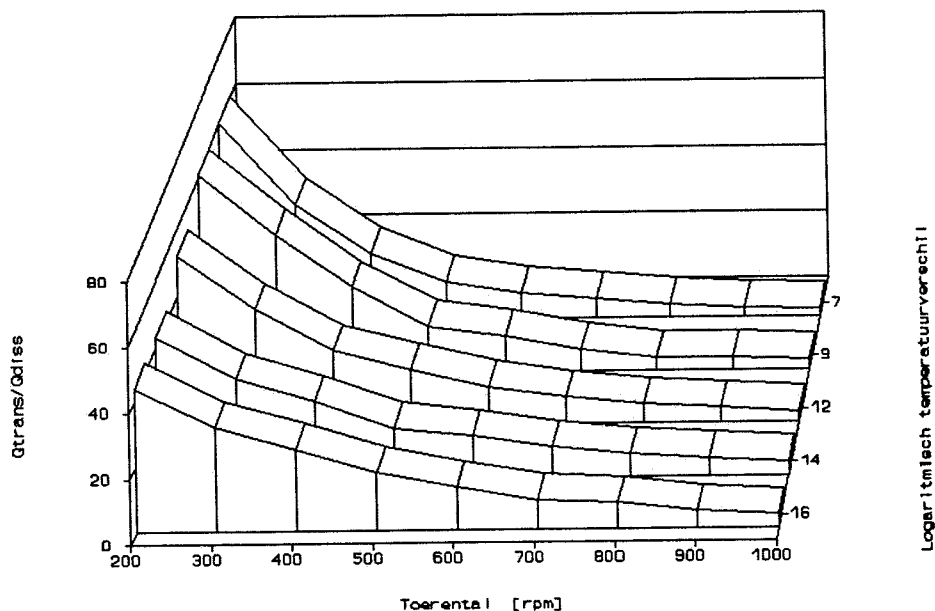
Het opgenomen vermogen ten gevolge van schrapen Q_{diss} is gelijk aan:

$$Q_{diss} = 2 \cdot \pi \cdot K_{corr} \cdot N \quad (\text{vgl. 6.2.7})$$

Invullen van de vergelijkingen 6.2.6 en 6.2.7 in vergelijking 6.2.5 geeft voor ξ :

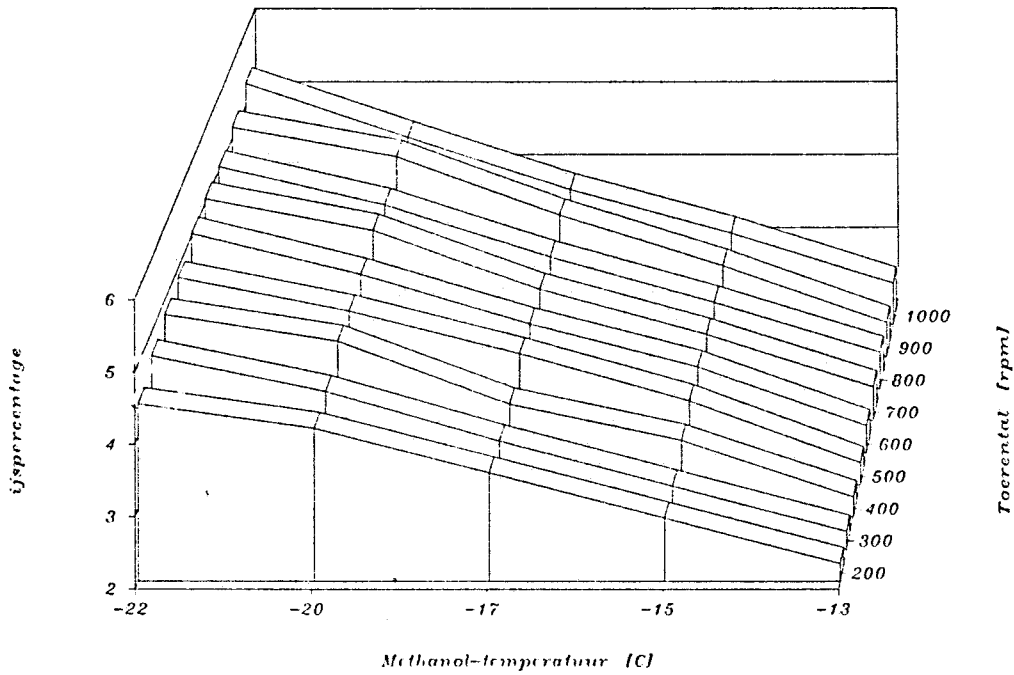
$$\xi = \frac{U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}}{2 \cdot \pi \cdot K_{corr} \cdot N} \quad (\text{vgl. 6.2.8})$$

In figuur 6.2.6 zijn de voor het 20mm schraperblad bij 35wt% dextrose bepaalde waarden van ξ uitgezet tegen het toerental en het logaritmisch temperatuurverschil.



figuur 6.2.6 : ξ als functie van het toerental bij verschillende logaritmische temperatuurverschillen (20mm schraperblad , 35wt% dextrose).

Het energie rendement blijkt het hoogst te zijn voor lage toerentallen en kleine logaritmische temperatuurverschillen. Uit figuur 6.2.7 blijkt dat het gemaakte ijspercentage voor de situatie van maximaal energie-rendement niet maximaal groot is. De optimale ijsproduktie wordt bereikt bij hoge toerentallen en een groot temperatuursverschil tussen de processtroom en het koelmiddel. Het energie rendement van de warmte-wisselaar daalt echter sterk met toenemend toerental, zodat het bedienen van de warmtewisselaar bij maximale ijsproduktie on-economisch is. De daling van het gemaakte ijspercentage daalt minder snel met afnemend toerental dan het rendement stijgt.



7 CONCLUSIES

- De uitwendige warmte-overdrachts-coëfficiënt $\alpha(u)$ kan berekend worden uit de vergelijking : $Nu_u = 0.0656 * Re_u^{0.8} * Pr_u^{0.40}$.
- Het effect van de schraperbladhoogte op de warmte-overdracht in een geschraapte warmte-wisselaar kan tot uitdrukking gebracht worden door aan de algemene warmte-overdrachts-vergelijking $Nu = constante * Re^a * Pr^b$ de term $(H_b/d_h)^c$ toe te voegen: $Nu = constante * Re^a * Pr^b * (H_b/d_h)^c$.
- De warmte-overdracht in de geschraapte warmte-wisselaar kan als volgt beschreven worden :
situaties met fasenovergang : $Nu = 4.61 * Re^{0.40} * Pr^{0.33} * (H_b/d_h)^{0.40}$
situaties zonder fasenovergang : $Nu = 1.79 * Re^{0.46} * Pr^{0.33} * (H_b/d_h)^{0.46}$
De warmte-overdracht neemt bij situaties met fasenovergang een factor 1.45 tot 1.77 toe ten opzichte van situaties zonder fasenovergang.
- Om uit het door de motor op de schraperas uitgeoefende koppel het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen te kunnen berekenen, is het gemeten koppel verminderd met de bijdrage van de wrijvingsverliezen in de lagers en keerringen. De bijdrage aan het koppel van deze wrijvingsverliezen kan beschreven worden met : $K = 0.00014 * N - 0.0143$.
- Het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen worden kan als volgt beschreven worden :
situaties met fasenovergang : $P = 0.00055 * N^2 * \mu^{0.5}$
situaties zonder fasenovergang : $P = 0.00051 * N^2 * \mu^{0.5}$
- De inwendige warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha(i)$ voor het 10mm schraperblad is ongeveer 15% kleiner dan $\alpha(i)$ voor het 20mm schraperblad. Het in de warmte-wisselaar gedissipeerde vermogen is voor beide bladen even groot.

SYMBOLENLIJST

*Latijnse symbolen

A	: warmte-overdragend oppervlak	[m ²]
B	: nucleatie-snelheid	
c	: concentratie	
c	: evenwichtsconcentratie aan het fasengrensvlak	
c _p	: soortelijke warmte	[J/(kgC)]
D _a	: axiale diffusie-coëfficiënt	[m ² /s]
D _t	: diameter van de schraperas	[m]
d _h	: hydraulische diameter	[m]
d _i	: inwendige diameter van de binnenpijp	[m]
d _u	: uitwendige diameter van de binnenpijp	[m]
g _v	: vrije enthalpie per volume-eenheid	[J/m ³]
G	: massa-debiet	[kg/s]
G _{ml}	: koelmiddeldebiet in de bijkringloop	
G _{vast}	: vrije enthalpie van de vaste stof	[J]
G _{vloeistof}	: vrije enthalpie van de vloeistof	[J]
H _b	: hoogte van het schraperblad	[m]
k	: constante van Boltzmann	
k _d	: stofoverdrachtscoëfficiënt	[m/s]
k _r	: reactiesnelheidsconstante	
K	: koppel	[Nm]
K _{corr}	: voor wrijving gecorrigeerd koppel	[Nm]
K _{wrijving}	: bijdrage van de wrijving aan het koppel	[Nm]
L	: lengte van de warmte-wisselaar	[m]
M	: massaflux	[kg/m ² s]
N	: toerental	[rps]
P	: vermogen	[W]
Q	: overgedragen warmte	[W]
Q _{pomp}	: door de pomp aan het koelmiddel overgedragen warmte	[W]
Q _{proces}	: door de procesvloeistof aan het koelmiddel overgedragen warmte	
r	: reactie-orde	
r	: straal	[m]
r _{kr}	: kritische straal	[m]
S	: oververzadigingsratio	
T	: temperatuur	[C]
U	: totale warmte-overdrachts-coëfficiënt	[W/(m ² C)]
v	: ijsgroeisnelheid	
X	: dextrose percentage	[%]

* Griekse symbolen

α	: oppervlakte-entropie factor
$\alpha(i)$: inwendige warmte-overdrachts-coefficient [W/(m ₂ C)]
$\alpha(u)$: uitwendige warmte-overdrachts-coefficient [W/(m ₂ C)]
γ	: oppervlakte-enthalpie per eenheid van oppervlak [J/m ²]
ΔG	: verandering van vrije enthalpie
ΔT_{ln}	: logaritmisches temperatuurverschil over de warmte-wisselaar
ΔT_{ml}	: temperatuurverschil over de bijkringloop [C]
ϵ	: verandering in potentiële energie per vast-vloeistof binding
η^{20}_d	: brekings-index bij 20C
θ	: contacthoek
λ	: warmte-geleidbaarheid-coefficient [W/(mC)]
μ	: viscositeit [Ns/m ²]
ρ	: dichtheid [kg/m ³]
σ	: oververzadiging
σ_c	: kritische oververzadiging
Φ_{ff}	: potentiële energie per vloeistof-vloeistof binding [J]
Φ_{fs}	: potentiële energie per vloeistof-vast binding [J]
Φ_{ss}	: potentiële energie per vast-vast binding [J]
ϕ	: correctie-factor

* Dimensielose kengetallen

Nu	: Nusselt-getal	= $\alpha*d/\lambda$
Pe	: Peclet-getal	= $v*L/D_a$
Pr	: Prandtl-getal	= $\mu*c_p/\lambda$
Re	: Reynolds-getal	= $\rho*v*d_h/\mu$ = $\rho*N*d_h^2/\mu$
Re _{mod}	: gemodificeerd Reynolds-getal	= $\rho*N*d_h*h_b/\mu$

* Ondervoegsels

d	: dextrose
m	: methanol
i	: inwendig
u	: uitwendig
in	: aan de ingang van de warmte-wisselaar
uit	: aan de uitgang van de warmte-wisselaar

LITERATUUR

- [1] Botsaris G.D., Lecture at British Association for Crystal Growth meeting on Secondary Nucleation, March 1980.
- [2] Mullin J.W., Crystallization, Butterworth, London 1961.
- [3] Nielsen A.E., Crystal Growth (Edited by Peiser H.S.), p.419, Pergamon Press, New York 1967.
- [4] Volmer M., Kinetik der Phasenbildung, Steinkopf, Dresden 1939.
- [5] Garside J. en Davey R.J., Chem.Engng.Comm., 1980 4 393.
- [6] Jackson K.A., Liquid Metals and Solidification, p.174, Amm.Soc. Metals, Cleveland 1959.
- [7] Tempkin D.E., Crystallization Processes, p.15, Consultants Bureau, New York 1964.
- [8] Ohara M., Reid R.C., Modelling Crystal Growth Rates from Solution, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1973.
- [9] Garside J. en Tavare N.S., Chem.Eng.Sci, 1981 36 863.
- [10] Huige H.J.J., Nucleation and growth of icsi crystals from water and sugar solutions in continuous stirred tank crystallizers, Proefschrift T.H.E., 1972.
- [11] Garside J., Chem.Eng.Sci, 1971 26 1425.
- [12] Muijtjens J.L.H., Literatuuronderzoek naar de warmteoverdracht en energiebehoefte bij geschraapte warmtewisselaars, TU Eindhoven, januari 1990.
- [13] Garside J., Chem.Eng.Sci, 1985 40 1 3.
- [14] Perree, Warmteoverdracht en opgenomen vermogen in een geschraapte warmtewisselaar, afstudeerverslag T.U.E. 1990

Bijlage 1 : Fysische eigenschappen van de gebruikte stoffen.

bron : Muijtjens [12]

* dextrose

$$T_{\text{stol}} = -(1.573 \cdot 10^{-3} + 0.100 \cdot X + 2.252 \cdot 10^{-3} \cdot X^2 - 1.155 \cdot 10^{-4} \cdot X^3 + 6.286 \cdot 10^{-6} \cdot X^4 - 9.12 \cdot 10^{-8} \cdot X^5)$$

$$c_{p,d} = 4160.89 - 21.99 \cdot X$$

$$\rho_d = 994 + 4.48 \cdot X$$

$$\lambda_d = (3.3974 \cdot 10^{-6} - 1.88 \cdot 10^{-8} \cdot X) \cdot (\rho_d^{1.33} \cdot c_{p,d} / (273.15 + T_{d, \text{gem}}))$$

$$\mu_0 = \exp(6.699513 - 0.02235 \cdot T_{d, \text{gem}} + (21.42623 - 0.06857 \cdot T_{d, \text{gem}}) \cdot X + (-1.13941 + 0.0240088 \cdot T_{d, \text{gem}}) \cdot X^2) / 1000$$

$$\eta_d^{20} = 1.3316 + 0.166 \cdot X$$

* ijs

$$\Delta H_{kr} = 334 \text{ kJ/kg}$$

$$c_p = 2 \text{ kJ/kgC}$$

$$\lambda_{ijs} = 2.1 \text{ W/mC}$$

$$\rho_{ijs} = 917 \text{ kg/m}^3$$

* methanol

$$c_{p,m} = 3489.71 - 13.32 \cdot (273.15 + T_{m, \text{gem}}) + 0.03406 \cdot (273.15 + T_{m, \text{gem}})^2$$

$$\lambda_m = 0.208 - 0.00031 \cdot T_{m, \text{gem}}$$

$$\mu = \exp\{-5.03516 + 1320.002 / T_{m, \text{gem}}\}$$

$$\rho_m = 790 - T_{m, \text{gem}}$$

Bijlage 2 : Gebruikte apparatuur.

- * Koelmachines: ultra-cryostaat UK 06 SDW 2200 W
ultra-cryostaat UK 40 DW 1500 W
Zephyr 59:01 16 kW

- * Pompen:
 - koelzijde
Stuart Turner , 670 W , 205-70 l/min , 4-14 m
Stuart Turner , 950 W , 2000-850 GPH , 5-45 m

 - proceszijde
Stuart Turner nr 12 , 200 W , 600-200 GPH , 5-35 m

- * Roermotoren:
 - warmte-wisselaar : rotor 3 , 1.5 kW , 50 Hz

 - voorraadvat : Stephan-Werke Hameln , 1370 rpm , 0.09 kW

- * Rotameters:
 - koelzijde : FP-1-1/2-27-G-10/8

 - proceszijde : FP-3/4-27-G-10/80

- * Verwarmingsspiraal: 3kW

Bijlage 3 : Afmetingen van de gebruikte geschraapte warmte-wisselaar.

lengte L	: 0.46 m
warmte overdragend oppervlak	: 0.113 m ²
diameter van de schraper-as d_s	: 0.046 m
inwendige diameter van de binnenpijp d_i	: 0.076 m
uitwendige diameter van de binnenpijp d_u	: 0.08 m
inwendige diameter van de buitenpijp d_t	: 0.10 m
hoogte van de doorgang (annulaire ruimte)	: 0.01 m
breedte van de doorgang	: 0.09 m
hydraulische diameter aan de proceskant $d_{h,p}$: 0.0482 m
hydraulische diameter aan de koelkant $d_{h,k}$: 0.018 m
dikte van het schraperblad	: 0.0008 m
materiaal schraperblad	: fosforbrons
aantal schrapers	: 2

Bijlage 4 : Meetwaarden

20mm schraperblad , ijsmetingen

datum meetserie : 17 en 18 april
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.9 %
 methanol temperatuur : -22 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -6.15 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3371 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0126 [Ns/m2]
 ro,d : 1155 [kg/m3]

UITVOERGEGEVENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,s	sturry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]	[kg/m3]					
204	-22.06	-20.75	-5.45	-6.17	1.41	0.28	2084	15.59	2603	5.98	0.003	0.0127	1154	1436	254	87	63	0.003	
300	-22.13	-20.70	-5.41	-6.26	1.48	0.29	2187	15.58	2912	9.11	0.003	0.0127	1154	2112	285	87	30	0.003	
400	-22.19	-20.74	-5.44	-6.30	1.52	0.30	2246	15.59	3095	12.57	0.004	0.0127	1154	2810	303	87	18	0.003	
503	-22.01	-20.57	-5.34	-6.24	1.54	0.35	2277	15.50	3247	18.44	0.003	0.0127	1154	3544	317	87	13	0.002	
613	-21.90	-20.43	-5.54	-6.20	1.59	0.41	2351	15.29	3654	26.32	0.006	0.0128	1153	4286	357	87	10	0.005	
708	-21.93	-20.40	-5.53	-6.21	1.60	0.52	2366	15.29	3717	38.55	0.006	0.0128	1153	4951	363	87	10	0.005	
800	-22.13	-20.60	-5.41	-6.21	1.60	0.52	2365	15.55	3549	43.56	0.004	0.0127	1154	5616	347	87	8	0.003	
902	-21.91	-20.40	-5.54	-6.34	1.63	0.70	2410	15.21	3970	66.12	0.006	0.0128	1153	6302	388	88	8	0.005	
1007	-22.08	-20.53	-5.39	-6.28	1.68	0.82	2483	15.47	4124	86.47	0.005	0.0128	1154	7062	403	87	8	0.004	

datum meetserie : 18 en 19 april
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.9 %
 methanol temperatuur : -20 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -6.15 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3371 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0126 [Ns/m2]
 ro,d : 1155 [kg/m3]

UITVOERGEVEENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]						
204	-20.76	-19.53	-5.49	-6.11	1.30	0.26	1925	14.34	2582	5.55	0.003	0.0127	1154	1438	252	87	59	0.002	
303	-20.42	-19.22	-5.44	-6.14	1.32	0.27	1956	14.03	2809	8.57	0.002	0.0127	1154	2138	275	87	28	0.002	
413	-20.56	-19.32	-5.42	-6.10	1.40	0.29	2074	14.18	3145	12.54	0.003	0.0127	1154	2911	307	87	16	0.002	
503	-20.34	-19.09	-5.22	-6.15	1.39	0.37	2060	14.03	3174	19.49	0.000	0.0126	1155	3569	310	86	14	0.000	
599	-20.40	-19.11	-5.46	-6.13	1.41	0.39	2090	13.96	3330	24.46	0.003	0.0127	1154	4215	326	87	10	0.003	
700	-20.45	-19.13	-5.12	-6.17	1.46	0.48	2164	14.14	3518	35.18	0.000	0.0126	1155	4975	344	86	9	0.000	
796	-20.06	-18.75	-5.46	-6.26	1.43	0.56	2121	13.54	3742	46.68	0.004	0.0127	1154	5599	366	87	8	0.003	
899	-20.58	-19.25	-5.36	-6.27	1.50	0.65	2223	14.10	3811	61.19	0.003	0.0127	1154	6335	373	87	8	0.002	
1008	-19.81	-18.51	-5.46	-6.30	1.44	0.73	2136	13.28	4034	77.05	0.004	0.0127	1154	7089	394	87	7	0.003	

INVOERGEVEENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]						
204	-20.76	-19.53	-5.49	-6.11	1.30	0.26	1925	14.34	2582	5.55	0.003	0.0127	1154	1438	252	87	59	0.002	
303	-20.42	-19.22	-5.44	-6.14	1.32	0.27	1956	14.03	2809	8.57	0.002	0.0127	1154	2138	275	87	28	0.002	
413	-20.56	-19.32	-5.42	-6.10	1.40	0.29	2074	14.18	3145	12.54	0.003	0.0127	1154	2911	307	87	16	0.002	
503	-20.34	-19.09	-5.22	-6.15	1.39	0.37	2060	14.03	3174	19.49	0.000	0.0126	1155	3569	310	86	14	0.000	
599	-20.40	-19.11	-5.46	-6.13	1.41	0.39	2090	13.96	3330	24.46	0.003	0.0127	1154	4215	326	87	10	0.003	
700	-20.45	-19.13	-5.12	-6.17	1.46	0.48	2164	14.14	3518	35.18	0.000	0.0126	1155	4975	344	86	9	0.000	
796	-20.06	-18.75	-5.46	-6.26	1.43	0.56	2121	13.54	3742	46.68	0.004	0.0127	1154	5599	366	87	8	0.003	
899	-20.58	-19.25	-5.36	-6.27	1.50	0.65	2223	14.10	3811	61.19	0.003	0.0127	1154	6335	373	87	8	0.002	
1008	-19.81	-18.51	-5.46	-6.30	1.44	0.73	2136	13.28	4034	77.05	0.004	0.0127	1154	7089	394	87	7	0.003	

datum meetserie : 19 en 20 april
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.9 %
 methanol temperatuur : -17.5 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -6.15 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3371 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0126 [Ns/m²]
 ro,d : 1155 [kg/m³]

INVOERGEDGEVENS

UITVOERGEDGEVENS

N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alfa i	P	Y	mu	ro,slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W]		[Ns/m ²]	[kg/m ³]						
203	-18.11	-17.12	-5.56	-6.07	1.10	0.19	1636	11.80	2713	4.04	0.002	0.0127	1154	1434	265	87	43	0.002	
304	-18.18	-17.15	-5.49	-6.09	1.10	0.20	1636	11.87	2675	6.37	0.001	0.0126	1155	2152	262	86	20	0.001	
403	-17.82	-16.79	-5.42	-6.10	1.12	0.25	1667	11.54	2973	10.55	0.000	0.0126	1155	2857	291	86	14	0.000	
504	-18.08	-17.00	-5.37	-6.10	1.20	0.30	1785	11.80	3323	15.83	0.001	0.0126	1155	3573	325	86	11	0.000	
604	-17.41	-16.39	-5.47	-6.11	1.19	0.37	1773	11.11	3816	23.40	0.002	0.0127	1154	4269	373	87	10	0.001	
706	-17.90	-16.80	-5.42	-6.13	1.20	0.45	1786	11.57	3495	33.27	0.001	0.0126	1155	4997	342	86	8	0.001	
803	-17.70	-16.60	-5.31	-6.20	1.20	0.55	1787	11.39	3643	46.25	0.000	0.0126	1155	5704	356	86	8	0.000	
898	-17.78	-16.79	-5.54	-6.19	1.24	0.64	1846	11.42	3954	60.18	0.003	0.0127	1154	6326	387	87	7	0.002	
1008	-17.47	-16.40	-5.39	-6.22	1.21	0.75	1802	11.13	3974	79.17	0.001	0.0126	1155	7140	388	86	7	0.001	

datum meetserie : 23 en 25 april 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.4 %
 methanol temperatuur : -15.5 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -6.04 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3382 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0121 [Ns/m2]
 ro,d : 1153 [kg/m3]

INVOEREGEVENIS

UITVOEREGEVENIS

N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[K]	[1/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]					
200	-15.88	-15.06	-5.30	-6.40	0.90	0.14	1344	9.62	2711.	2.93	0.002	0.0121	1153	1480	264	83	33	0.001
296	-16.04	-15.12	-5.41	-6.43	0.90	0.15	1344	9.66	2685	4.65	0.000	0.0121	1153	2182	262	83	16	0.000
398	-15.81	-15.16	-5.23	-6.09	0.96	0.20	1434	9.82	2989	8.34	0.002	0.0121	1153	2947	291	82	12	0.000
511	-15.33	-14.51	-5.42	-6.06	0.99	0.30	1480	9.18	3831	16.05	0.001	0.0121	1152	3758	373	83	11	0.001
598	-15.48	-14.86	-5.27	-6.16	1.00	0.34	1495	9.45	3635	21.29	0.001	0.0121	1153	4418	354	83	9	0.001
707	-15.43	-14.64	-5.39	-6.11	1.00	0.47	1495	9.28	3815	34.80	0.000	0.0121	1152	5204	372	83	9	0.000
814	-15.55	-14.78	-5.78	-6.13	1.00	0.67	1494	9.21	3898	57.11	0.005	0.0123	1151	5917	380	84	10	0.004
901	-15.60	-14.81	-5.52	-6.16	1.02	0.64	1524	9.36	3929	60.38	0.002	0.0122	1152	6602	383	83	7	0.002
1018	-15.28	-14.37	-5.74	-6.24	1.02	0.73	1525	8.83	4658	77.82	0.005	0.0123	1151	7406	454	84	7	0.004

datum meetserie : 26 en 27 april 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.4 %
 methanol temperatuur : -13 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -6.04 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3382 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0121 [Ns/m2]
 ro,d : 1153 [kg/m3]

UITVOERGEVEENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,s	slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]	[kg/m3]					
211	-13.51	-12.75	-5.81	-6.01	0.70	0.11	1050	7.22	2904	2.43	0.003	0.0122	1152	1542	283	84	23	0.003	
305	-13.45	-12.73	-5.85	-6.18	0.70	0.14	1050	7.07	3040	4.47	0.004	0.0122	1152	2227	296	84	14	0.003	
411	-13.44	-12.56	-5.38	-6.08	0.71	0.19	1065	7.27	2951	8.18	0.002	0.0120	1153	3045	288	82	11	0.002	
511	-13.39	-12.68	-5.72	-6.23	0.72	0.27	1080	7.06	3265	14.45	0.002	0.0122	1152	3744	318	83	10	0.002	
600	-13.14	-12.35	-5.50	-6.56	0.74	0.34	1111	6.71	3988	21.36	0.000	0.0121	1153	4426	389	83	9	0.000	
713	-13.42	-12.62	-5.87	-6.36	0.77	0.40	1155	6.90	4114	29.87	0.005	0.0123	1152	5194	401	84	7	0.004	
803	-13.32	-12.35	-5.69	-6.43	0.78	0.51	1171	6.77	4511	42.88	0.002	0.0122	1152	5882	440	83	7	0.002	
907	-13.40	-12.59	-5.93	-6.04	0.77	0.60	1155	7.00	3955	56.99	0.005	0.0123	1151	6594	385	84	7	0.004	
1014	-13.36	-12.42	-5.88	-6.52	0.80	0.71	1200	6.69	5068	75.39	0.005	0.0123	1151	7379	494	84	7	0.004	

INVOERGEVEENS

datum meetserie : 28 mei 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10 %
 methanol temperatuur : -7.5 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -1.17 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3941 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m²]
 ro,d : 1039 [kg/m³]

UITVOERGEVEENS																	
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln alfa i	P	Y	mu	ro,s	Re,i	Mu,i	Pr,i	Po	Y*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m ² K]	[W]		[Ns/m ²]	[kg/m ³]					
211	-7.83	-7.37	-0.91	-1.16	0.70	0.04	1061	6.56	3546	0.88	0.002	1039	6513	303	18	9	0.002
304	-7.61	-7.03	-0.95	-1.14	0.72	0.06	1092	6.27	4310	1.91	0.003	1038	9368	368	18	7	0.003
405	-7.43	-6.86	-0.89	-1.15	0.72	0.09	1093	6.12	4622	3.82	0.002	1039	12505	395	18	6	0.002
504	-7.56	-6.88	-0.86	-1.22	0.75	0.12	1138	6.18	5087	6.33	0.002	1039	15568	435	18	5	0.002
607	-7.28	-6.64	-0.87	-1.17	0.73	0.16	1108	5.94	5303	10.17	0.002	1039	18751	453	18	5	0.002
710	-7.67	-6.90	-0.92	-1.18	0.80	0.22	1214	6.23	6126	16.36	0.003	1038	21865	524	18	5	0.003
806	-7.70	-6.94	-0.94	-1.17	0.79	0.26	1198	6.26	5766	21.94	0.003	1038	24810	493	18	4	0.003
903	-7.45	-6.73	-0.93	-1.18	0.79	0.32	1199	6.03	6599	30.26	0.003	1038	27805	564	18	4	0.003
1019	-7.49	-6.77	-0.78	-1.19	0.82	0.41	1244	6.14	7095	43.75	0.001	1039	31516	606	18	4	0.001

INVOERGEVEENS

datum meetserie : 22 mei 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10 %
 methanol temperatuur : -10.5 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -1.17 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3941 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m2]
 ro,d : 1039 [kg/m3]

INVOERGEGEVENS										UITVOERGEGEVENS									
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,s	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]						
303	-11.00	-10.00	-0.81	-0.70	-1.09	0.24	1643	9.73	4093	7.61	0.004	0.0026	1038	9312	350	18	27	0.003	
404	-10.85	-9.75	-0.93	-0.78	1.11	0.14	1674	9.43	4727	5.92	0.006	0.0026	1038	12361	404	18	9	0.005	
509	-10.71	-9.64	-0.85	-0.71	1.14	0.16	1720	9.38	5225	8.53	0.005	0.0026	1038	15607	447	18	6	0.004	
606	-10.83	-9.73	-0.85	-0.80	1.16	0.21	1749	9.44	5409	13.33	0.005	0.0026	1038	18574	462	18	6	0.004	
700	-11.11	-10.14	-0.88	-0.70	1.21	0.25	1824	9.82	5446	18.33	0.006	0.0026	1038	21412	465	18	5	0.005	
801	-10.75	-9.65	-0.87	-0.83	1.17	0.30	1765	9.34	5786	25.16	0.005	0.0026	1038	24529	495	18	5	0.005	
892	-11.00	-9.89	-0.84	-0.70	1.22	0.35	1839	9.66	5936	32.69	0.005	0.0026	1038	27316	507	18	5	0.005	
1007	-10.83	-9.71	-0.85	-0.88	1.20	0.43	1810	9.39	6193	45.34	0.005	0.0026	1038	30839	529	18	4	0.005	
1007	-10.83	-9.71	-0.85	-0.88	1.20	0.43	1810	9.39	6193	45.34	0.005	0.0026	1038	30839	529	18	4	0.005	

datum meetserie : 7 en 8 mei 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10.4 %
 methanol temperatuur : -17 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -1.22 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3932 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m²]
 ro,d : 1041 [kg/m³]

UITVOERGEVEENS																		
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	qm	dT ln	alpha i	P	gamma	mu	ro,slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	gamma*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W]		[Ns/m ²]	[kg/m ³]					
425	-17.08	-15.43	-0.85	-1.02	1.70	0.50	2535	15.31	4206	22.25	0.008	0.0027	1040	12716	360	19	29	0.007
425	-17.08	-15.43	-0.85	-1.02	1.70	0.50	2535	15.31	4206	22.25	0.008	0.0027	1040	12716	360	19	29	0.007
425	-17.08	-15.43	-0.85	-1.02	1.70	0.50	2535	15.31	4206	22.25	0.008	0.0027	1040	12716	360	19	29	0.007
538	-16.77	-15.20	-0.31	-1.01	1.77	0.27	2641	15.32	4739	15.21	0.002	0.0026	1040	16370	406	18	10	0.002
606	-16.95	-15.27	-0.75	-1.03	1.79	0.32	2670	15.21	5022	20.31	0.008	0.0027	1040	18160	430	19	9	0.007
714	-17.13	-15.41	-0.56	-1.12	1.83	0.35	2729	15.42	5153	26.17	0.006	0.0027	1040	21518	441	19	7	0.005
796	-16.98	-15.21	-0.84	-1.06	1.90	1.00	2834	15.13	6299	83.35	0.010	0.0027	1039	23728	539	19	17	0.009
910	-16.52	-14.87	-0.87	-1.16	1.80	1.13	2687	14.67	5802	107.68	0.010	0.0027	1039	27152	497	19	14	0.008
1012	-17.33	-15.51	-0.60	-1.06	1.93	1.33	2877	15.58	5977	140.94	0.007	0.0027	1040	30397	512	19	14	0.006

INVOERGEVEENS

datum meetserie : 9 en 10 meei 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10.4 %
 methanol temperatuur : -15 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -1.22 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3932 [J/kgK]
 mu,d : 0.0026 [Ns/m²]
 ro,d : 1041 [kg/m³]

INVOERGEGEVENS

UITVOERGEGEVENS

N [rpm]	Tm,in [C]	Tm,uit [C]	Td,in [C]	Td,uit [C]	dT m [C]	K [Nm]	Qm [W]	dT ln [W/m ² K]	P [W]	Y	mu [Ns/m ²]	ro,slurry [kg/m ³]	Re,i	Mu,i	Pr,i	Po	Y*
279	-15.20	-13.95	-0.57	-0.98	1.30	2.50	1945	13.80	73.04	0.002	0.0026	1040	8493	236	18	335	0.001
357	-14.75	-13.33	-0.71	-1.07	1.47	0.65	2201	13.14	24.30	0.005	0.0027	1040	10780	362	19	53	0.004
403	-14.86	-13.37	0.68	-1.03	1.52	0.36	2276	13.94	15.19	0.013	0.0026	1042	12729	337	18	23	0.012
509	-14.74	-13.27	-0.83	-1.07	1.53	0.25	2291	13.05	13.33	0.007	0.0027	1040	15289	417	19	10	0.006
599	-14.68	-13.20	-0.72	-1.10	1.53	0.28	2291	13.02	17.56	0.005	0.0027	1040	18060	420	19	8	0.005
721	-14.57	-13.10	-0.73	-1.10	1.56	0.33	2337	12.91	5373	0.006	0.0027	1040	21717	460	19	7	0.005
812	-14.59	-13.12	-0.72	-1.11	1.56	0.38	2337	12.93	32.31	0.006	0.0027	1040	24467	458	19	6	0.005
912	-14.59	-13.12	-0.86	-1.11	1.59	0.43	2382	12.86	41.07	0.008	0.0027	1040	27333	498	19	5	0.007
1007	-14.69	-13.20	-0.75	-1.11	1.58	0.50	2366	13.01	52.72	0.006	0.0027	1040	30300	468	19	5	0.005

datum meetserie : 26 en 27 april 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10.4 %
 methanol temperatuur : -20 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -1.22 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3932 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m2]
 ro,d : 1041 [kg/m3]

UITVOERGEVEENS																		
N	Tm,in [C]	Tm,uit [C]	Td,in [C]	Td,uit [C]	dTm [C]	K [Nm]	Qm [W]	dT ln [W/m2K]	alpha i [W/m2K]	p [W]	Y	mu [Ns/m2]	ro,slurry [kg/m3]	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	y*
403	-20.13	-19.63	-0.66	-1.12	0.70	1.55	1037	18.99	619	65.41	0.002	0.0026	1041	12379	53	18	100	0.002
503	-20.30	-18.24	-0.83	-1.13	2.16	0.36	3204	18.28	5259	18.96	0.012	0.0027	1039	14924	450	19	15	0.010
557	-20.06	-18.50	-0.76	-1.07	2.20	0.37	3263	18.36	5517	21.58	0.011	0.0027	1039	16553	472	19	12	0.010
600	-20.00	-18.01	-0.66	-1.11	2.12	0.38	3146	18.11	5102	23.88	0.009	0.0027	1039	17920	437	19	11	0.008
710	-19.86	-17.82	-0.75	-1.09	2.13	0.40	3162	17.91	5390	29.74	0.010	0.0027	1039	21136	461	19	8	0.009
761	-19.94	-17.96	-0.48	-1.07	2.17	0.42	3221	18.17	5466	33.47	0.007	0.0027	1040	22845	468	19	8	0.006
805	-19.84	-17.78	-0.57	-1.07	2.17	0.43	3221	17.98	5674	36.25	0.008	0.0027	1040	24092	486	19	7	0.007
904	-19.94	-17.62	-0.84	-1.08	2.18	0.50	3236	17.80	5986	47.33	0.012	0.0027	1039	26801	513	19	6	0.011
1006	-19.66	-17.63	-0.77	-1.65	2.13	0.53	3163	17.43	5944	55.83	0.011	0.0027	1039	29927	509	19	5	0.009

10 mm schraperblad , ijsmetingen

LIT. : Tstol : -6.01 [C] Praktijk -5.8 C
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3386 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0120 [Ns/m2]
 ro,d : 1152 [kg/m3]

datum meetserie : 29 t/m 31-07-90
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.3 %
 methanol temperatuur : -8 [C]
 methanol loop debiet : 0.644 [kg/s]
 verliees omgeving : 790 [W] (gemiddelde waarde)

UITVOERGEVEENS																		
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	Fm,toe	Tm,toe	Tm,af	dT m	dT toe/af	K	qtoe_af	Qm	BALANS	dT (n a(i): qtoa(i): Qm	P	Y	m	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[%]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W]	[%]	[W/m2/K]	[W]		[Ns]	
104	-8.52	-8.35	-5.08	-5.56	34.0	-10	-8	0.30	2.49	0.06	442	454	97	3.11	2807	0.65	0.009	0.
204	-8.23	-8.09	-4.79	-5.39	38.0	-10	-7	0.30	2.31	0.06	489	454	108	3.06	2908	1.28	0.013	0.
321	-8.26	-8.04	-4.86	-5.80	38.0	-11	-10	0.30	2.42	0.12	545	454	120	2.80	3581	4.17	0.012	0.
406	-9.14	-8.74	-5.07	-6.03	55.0	-11	-9	0.39	1.72	0.15	584	590	99	3.38	4351	6.38	0.009	0.
420	-8.13	-7.97	-5.18	-5.80	35.0	-11	-10	0.30	2.53	0.19	495	454	109	2.55	4617	8.36	0.008	0.
529	-8.40	-8.20	-5.17	-5.80	41.0	-11	-10	0.34	2.29	0.24	573	515	111	2.81	5039	13.29	0.008	0.
587	-8.94	-8.58	-4.91	-5.91	54.0	-11	-8	0.40	1.70	0.26	545	605	90	3.34	4867	15.98	0.010	0.
600	-8.01	-7.87	-5.20	-5.80	34.5	-11	-10	0.31	2.63	0.28	527	470	112	2.43	5987	17.59	0.008	0.
705	-8.26	-8.07	-5.15	-5.80	41.0	-11	-10	0.35	2.30	0.36	579	530	109	2.68	6502	26.58	0.008	0.
805	-8.10	-7.87	-5.17	-5.88	35.0	-11	-10	0.34	2.61	0.43	536	515	104	2.45	8355	36.25	0.008	0.
805	-9.78	-9.50	-5.30	-5.80	50.0	-11	-9	0.45	2.01	0.47	670	680	99	4.09	3821	39.62	0.005	0.
900	-8.22	-8.03	-5.11	-5.83	41.0	-11	-10	0.37	2.29	0.54	573	560	102	2.65	8671	50.89	0.008	0.
1010	-8.14	-8.00	-5.18	-5.80	36.0	-11	-9	0.37	2.50	0.64	517	560	92	2.57	9957	67.69	0.007	0.
1010	-8.14	-8.00	-5.18	-5.80	37.0	-11	-9	0.37	2.50	0.64	554	560	99	2.57	9957	67.69	0.007	0.
1025	-9.58	-9.31	-5.30	-5.79	54.0	-11	-9	0.46	1.72	0.68	559	695	80	3.90	4634	72.99	0.005	0.

datum meetserie : 26 en 27 juli 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.18 %
 methanol temperatuur : -14.5 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -5.99 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3387 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0119 [Ns/m²]
 ro,d : 1152 [kg/m³]

Musselt-relatie : Reynolds: 0.23
 Prandtl : 1.86
 Const. : 1.34E-02
 Vermogen-relatie: N [rpm] : 1.68
 Const. : 4.90E-04

UITVOERGEDGEVENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,s	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	y*	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W]		[Ns/m ²]	[kg/m ³]						
103	-14.66	-14.03	-5.58	-5.74	0.79	0.20	1182	8.68	2544	2.16	0.002	0.0120	1151	768	248	82	178	0.001	
203	-14.36	-13.71	-5.04	-5.68	0.77	0.10	1153	8.67	2419	2.13	0.005	0.0117	1153	1541	235	80	23	0.004	
311	-14.41	-13.70	-5.56	-5.68	0.76	0.20	1138	8.43	2497	6.51	0.001	0.0119	1151	2323	243	82	20	0.001	
511	-14.68	-13.52	-5.49	-5.91	0.82	0.26	1228	8.39	2977	13.91	0.001	0.0119	1151	3820	290	82	9	0.001	
600	-14.36	-13.57	-5.24	-5.79	0.83	0.26	1243	8.45	3018	16.34	0.002	0.0118	1152	4520	294	81	7	0.002	
600	-14.23	-13.48	-5.11	-5.75	0.86	0.32	1288	8.42	3308	20.11	0.004	0.0118	1152	4536	322	81	8	0.003	
600	-14.22	-13.44	-5.12	-5.79	0.85	0.32	1273	8.37	3263	20.11	0.004	0.0118	1152	4535	318	81	8	0.003	
717	-14.26	-13.37	-5.35	-5.86	0.86	0.42	1288	8.21	3531	31.53	0.001	0.0119	1152	5379	344	81	8	0.001	
800	-13.84	-13.08	-5.45	-5.84	0.83	0.42	1244	7.81	3664	35.18	0.000	0.0119	1152	5987	357	82	6	0.000	
800	-13.93	-13.18	-5.40	-5.88	0.85	0.51	1274												

INVOERGEDGEVENS

800	-14.05	-13.27	-5.05	-5.80	0.86	0.51	1289	7.91	3770	42.72	0.000	0.0119	1152	5994	367	81	8	-0.000
906	-14.00	-13.18	-5.31	-5.73	0.89	0.51	1334	8.23	3505	42.72	0.004	0.0118	1153	6059	341	81	8	-0.004
910	-13.78	-13.23	-5.05	-5.32	0.90	0.51	1349	8.07	4052	48.39	0.001	0.0119	1152	6801	394	81	6	-0.001
932	-14.10	-13.20	-5.03	-5.76	0.86	0.60	1289	8.32	3845	48.60	0.004	0.0118	1153	6886	374	81	6	-0.003
1007	-13.93	-13.15	-5.07	-5.71	0.90	0.70	1349	8.25	3484	58.56	0.005	0.0118	1153	7063	339	80	7	-0.004
								8.15	4066	73.81	0.004	0.0118	1153	7616	396	81	7	-0.003

datum meetserie : 25 en 26 juli 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 35.18 %
 methanol temperatuur : -20.5 [C]
 methanol debiet : 0.644 [kg/s]

Tstol : -5.99 [C]
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3387 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0119 [Ns/m2]
 ro,d : 1152 [kg/m3]

Nusselt-relatie : Reynolds: 0.24
 Prandtl : 1.58
 Const. :3.47E-02
 Vermogen-relatie: N [rpm] : 1.66
 Const. :6.80E-04

UITVOERGEGEVENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,s	slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[K]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]	[kg/m3]					
205	-20.83	-19.64	-5.01	-5.85	1.28	0.29	1896	14.80	2345	6.23	0.001	0.0119	1152	1541	228	81	65	0.001	
314	-20.68	-19.46	-4.88	-5.78	1.32	0.29	1955	14.74	2527	9.54	0.003	0.0118	1152	2368	246	81	28	0.002	
409	-20.57	-19.38	-5.14	-5.79	1.32	0.26	1956	14.51	2617	11.14	0.001	0.0119	1151	3059	255	82	15	0.000	
516	-21.00	-19.44	-5.07	-5.86	1.37	0.34	2029	14.75	2736	18.37	0.000	0.0119	1152	3864	266	81	12	0.000	
604	-20.39	-19.18	-5.45	-5.81	1.36	0.39	2016	14.15	2965	24.67	0.005	0.0121	1150	4469	289	82	10	0.004	
713	-20.95	-19.29	-5.01	-5.90	1.39	0.47	2059	14.66	2869	35.09	0.000	0.0119	1152	5347	279	81	9	0.000	
817	-20.34	-19.17	-5.26	-5.73	1.42	0.57	2105	14.26	3232	48.77	0.003	0.0120	1151	6074	315	82	8	0.002	
925	-20.21	-18.86	-5.10	-5.76	1.43	0.65	2120	14.10	3384	62.96	0.001	0.0119	1151	6911	329	82	7	0.001	
1020	-20.32	-18.97	-5.11	-5.77	1.47	0.80	2179	14.20	3567	85.45	0.001	0.0120	1151	7612	347	82	7	0.001	

INVOERGEGEVENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	dT m	K	Qm	dT ln	alpha i	P	Y	mu	ro,s	slurry	Re,i	Nu,i	Pr,i	Po	Y*
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[K]	[W/m2K]	[W]		[Ns/m2]	[kg/m3]	[kg/m3]					
205	-20.83	-19.64	-5.01	-5.85	1.28	0.29	1896	14.80	2345	6.23	0.001	0.0119	1152	1541	228	81	65	0.001	
314	-20.68	-19.46	-4.88	-5.78	1.32	0.29	1955	14.74	2527	9.54	0.003	0.0118	1152	2368	246	81	28	0.002	
409	-20.57	-19.38	-5.14	-5.79	1.32	0.26	1956	14.51	2617	11.14	0.001	0.0119	1151	3059	255	82	15	0.000	
516	-21.00	-19.44	-5.07	-5.86	1.37	0.34	2029	14.75	2736	18.37	0.000	0.0119	1152	3864	266	81	12	0.000	
604	-20.39	-19.18	-5.45	-5.81	1.36	0.39	2016	14.15	2965	24.67	0.005	0.0121	1150	4469	289	82	10	0.004	
713	-20.95	-19.29	-5.01	-5.90	1.39	0.47	2059	14.66	2869	35.09	0.000	0.0119	1152	5347	279	81	9	0.000	
817	-20.34	-19.17	-5.26	-5.73	1.42	0.57	2105	14.26	3232	48.77	0.003	0.0120	1151	6074	315	82	8	0.002	
925	-20.21	-18.86	-5.10	-5.76	1.43	0.65	2120	14.10	3384	62.96	0.001	0.0119	1151	6911	329	82	7	0.001	
1020	-20.32	-18.97	-5.11	-5.77	1.47	0.80	2179	14.20	3567	85.45	0.001	0.0120	1151	7612	347	82	7	0.001	

datum meetserie : 17 en 20 augustus 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10.1 %
 methanol temperatuur : -10 [C]
 methanol loop debiet : 0.644 [kg/s]
 overlies omgeving : 700 [W] (gemiddelde waarde)

LIT. : Tstol : -1.18 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3938 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m2]
 ro,d : 1039 [kg/m3]

INVOERGEDEGEVENS													UITVOERGEDEGEVENS				
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	Fm,toe	Tm,toe	Tm,af	dT m	dT toe/af	K	Qtoe_af	Qm	BALANS	dT ln a(i): Qtoa(i): Qm	P	Y	m
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[%]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W]	[%]	[W/m2/K]	[W]		[Ns]
410	-10.28	-9.38	-0.80	-1.01	50.0	-9	-12	1.00	3.12	0.32	1564	1509	104	8.92	13.74	0.003	0.
425	-10.14	-9.22	-0.84	-1.02	50.0	-9	-13	1.00	3.11	0.30	1555	1510	103	8.74	13.35	0.003	0.
500	-10.09	-9.20	-0.75	-1.03	47.0	-9	-13	1.00	3.25	0.26	1515	1510	100	8.75	13.61	0.002	0.
586	-10.17	-9.23	-0.87	-1.08	50.5	-9	-12	1.00	3.06	0.33	1543	1510	102	8.72	20.25	0.004	0.
695	-9.97	-9.08	-0.64	-1.11	47.0	-9	-13	1.00	3.29	0.34	1542	1510	102	8.65	24.74	0.001	0.
810	-10.11	-9.19	-0.82	-1.10	50.0	-9	-13	1.02	3.11	0.42	1555	1540	101	8.69	35.62	0.003	0.
890	-10.10	-9.16	-0.63	-1.13	50.0	-9	-13	1.01	3.12	0.45	1562	1525	102	8.75	41.94	0.001	0.
1007	-10.12	-9.18	-0.66	-1.13	52.0	-9	-13	1.05	3.01	0.51	1569	1586	99	8.75	53.78	0.001	0.

datum meetserie : 15 en 16 augustus 1990
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10.1 %
 methanol temperatuur : -15 [C]
 methanol loop debiet : 0.644 [kg/s]
 verliees omgeving : 700 [W] (gemiddelde waarde)

L.I.T. : Tstol : -1.18 [C]
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3938 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m2]
 ro,d : 1039 [kg/m3]

UITVOERGEDGEVENS																		
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	Fm,toe	Tm,toe	Tm,af	dT m	dT toe/af	K	qtoe_af	Qm	BALANS	dT ln a(i)	qtoa(i)	P	Y	m
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[%]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W]	[%]	[W/m2/K]	[W/m2/K]	[W]		[Ns]
398	-14.73	-13.36	-0.78	-1.07	45.0	-13	-18	1.48	4.47	1.10	2192	2216	99	13.11	3621	45.84	0.006	0.
515	-14.95	-13.66	-0.79	-1.06	50.5	-13	-18	1.54	4.10	0.38	2277	2305	99	13.37	3788	20.49	0.007	0.
581	-15.66	-14.19	-0.76	-1.09	47.0	-14	-19	1.60	4.54	0.40	2362	2392	99	13.99	3712	24.34	0.007	0.
720	-14.68	-13.24	-0.70	-1.10	46.0	-13	-18	1.53	4.49	0.43	2269	2291	99	13.05	4000	32.42	0.006	0.
794	-15.72	-14.15	-0.68	-1.10	49.0	-13	-18	1.61	4.45	0.45	2435	2407	101	14.04	3979	37.42	0.006	0.
908	-14.91	-13.47	-0.77	-1.19	50.0	-13	-18	1.58	4.15	0.50	2283	2365	97	13.20	3945	47.54	0.007	0.
1027	-15.80	-14.30	-0.53	-1.16	54.0	-14	-19	1.64	4.07	0.55	2454	2451	100	14.20	3939	59.15	0.004	0.

INVOERGEDGEVENS

20 mm schraperblad , koelmetingen

zie meetwaarden afstudeerverslag van Henk Perree

10mm schraperblad , koelmetingen

LIT. : Tstol : [C] Praktijk altijd lager
 Tstol : [K]
 Cp,d : [J/kgK]
 mu,0 : [Ns/m2]
 ro,d : 1244 [kg/m3]

datum meetserie : 27 sept 90
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 55.7 %
 methanol temperatuur : -3 [C]
 methanol loop debiet : 0.644 [kg/s]
 Qverlies omgeving : 750 [W] (gemiddelde waarde)

UITVOERGEDEVENS																			
N	Tm,in	Tm,uit	Td,in	Td,uit	Fm,toe	Tm,toe	Tm,af	dT m	dT toe/af	K	Qtoe_af	Qm	BALANS	dT ln a(i)	Qtoe(i)	P	Y	m	
[rpm]	[C]	[C]	[C]	[C]	[%]	[C]	[C]	[C]	[C]	[Nm]	[W]	[W]	[%]	[W/m2/K]	[W/m2/K]	[W]		[Ns]	
95	-2.28	-1.51	20.35	16.64	40.0	-4	-1	0.80	3.30	0.05	1198	1228	98	20.35	659	680	0.50	0.348	0.
212	-1.61	-0.68	20.20	15.70	40.0	-4	-0	0.99	3.69	0.09	1430	1524	94	19.04	906	989	2.00	0.344	0.
300	-1.15	-0.12	20.04	14.94	40.0	-4	0	1.07	3.95	0.13	1584	1652	96	18.05	1126	1198	4.08	0.340	0.
400	-0.55	0.57	20.28	14.80	40.0	-3	1	1.15	4.12	0.18	1686	1772	95	17.44	1298	1401	7.54	0.343	0.
503	-0.46	0.67	19.93	14.15	40.0	-3	1	1.18	4.20	0.22	1738	1823	95	16.83	1436	1549	11.59	0.338	0.
600	-0.19	1.00	20.22	14.27	40.0	-3	1	1.25	4.35	0.30	1828	1921	95	16.73	1570	1705	18.85	0.341	0.
701	-0.12	1.09	20.23	14.07	40.0	-3	1	1.28	4.43	0.36	1872	1982	94	16.54	1663	1832	26.43	0.341	0.
807	0.32	1.56	20.63	14.28	40.0	-3	2	1.30	4.49	0.42	1910	2011	95	16.38	1745	1906	35.49	0.347	0.
903	0.23	1.46	20.22	13.82	40.0	-3	2	1.30	4.47	0.43	1896	2007	94	16.04	1786	1973	40.66	0.341	0.
1000	0.57	1.77	19.64	13.72	40.0	-3	2	1.29	4.82	0.56	2107	1988	106	15.39	2326	2088	58.64	0.332	0.
1010	0.19	1.43	19.77	13.52	41.0	-3	2	1.31	4.38	0.56	1910	2020	95	15.70	1879	2076	59.23	0.334	0.

INVOERGEDEVENS

LIT. : Tstol : -5.65 [C] Praktijk altijd lager
 Tstol : 267 [K]
 Cp,d : 3420 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0106 [Ns/m2]
 ro,d : 1145 [kg/m3]

datum meetserie : 24-25 sept 90
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 33.7 %
 methanol temperatuur : -3 [C]
 methanol loop debiet : 0.644 [kg/s]
 overlies omgeving : 750 [W] (gemiddelde waarde)

UITVOERGEVEENS																			
N	Tm,in [C]	Tm,uit [C]	Td,in [C]	Td,uit [C]	Fm,toe [%]	Tm,toe [C]	Tm,af [C]	dT m [C]	dT toe/af [C]	K [Nm]	Qtoe_af [W]	Qm [W]	BALANS [%]	dT ln a(i): Qtoa(i) [W/m2/K]	P [W]	Y	m [Ns]		
92	-1.96	-1.08	20.15	16.56	40.0	-5	-1	0.93	3.65	0.07	1404	1432	98	19.85	837	859	0.67	0.344	0.
214	-0.91	0.23	20.11	15.61	40.0	-4	0	1.15	4.16	0.06	1709	1771	97	18.15	1249	1317	1.34	0.341	0.
312	-0.44	0.78	20.10	15.21	40.0	-4	1	1.23	4.40	0.07	1851	1890	98	17.42	1502	1553	2.29	0.340	0.
390	-0.08	1.14	20.10	15.24	40.0	-3	1	1.29	4.56	0.09	1951	1996	98	17.08	1689	1756	3.68	0.339	0.
506	-0.10	1.18	20.10	14.77	40.0	-3	1	1.33	4.57	0.12	1957	2049	96	16.81	1743	1886	6.36	0.339	0.
610	0.20	1.50	20.10	14.74	40.0	-3	2	1.37	4.75	0.17	2063	2107	98	16.49	1973	2050	10.86	0.338	0.
700	0.21	1.59	20.06	14.59	40.0	-3	2	1.39	4.68	0.21	2022	2151	94	16.34	1935	2164	15.39	0.337	0.
823	0.60	1.92	20.09	14.55	40.0	-3	2	1.39	4.73	0.24	2052	2153	95	15.97	2066	2259	20.68	0.338	0.
905	0.14	1.63	19.90	14.36	42.0	-3	2	1.51	4.71	0.30	2180	2329	94	16.16	2265	2580	28.43	0.334	0.
1007	0.99	2.33	20.09	14.43	40.0	-3	3	1.42	4.98	0.34	2207	2195	101	15.50	2507	2480	35.85	0.338	0.

INVOERGEVEENS																			
N	Tm,in [C]	Tm,uit [C]	Td,in [C]	Td,uit [C]	Fm,toe [%]	Tm,toe [C]	Tm,af [C]	dT m [C]	dT toe/af [C]	K [Nm]	Qtoe_af [W]	Qm [W]	BALANS [%]	dT ln a(i): Qtoa(i) [W/m2/K]	P [W]	Y	m [Ns]		
92	-1.96	-1.08	20.15	16.56	40.0	-5	-1	0.93	3.65	0.07	1404	1432	98	19.85	837	859	0.67	0.344	0.
214	-0.91	0.23	20.11	15.61	40.0	-4	0	1.15	4.16	0.06	1709	1771	97	18.15	1249	1317	1.34	0.341	0.
312	-0.44	0.78	20.10	15.21	40.0	-4	1	1.23	4.40	0.07	1851	1890	98	17.42	1502	1553	2.29	0.340	0.
390	-0.08	1.14	20.10	15.24	40.0	-3	1	1.29	4.56	0.09	1951	1996	98	17.08	1689	1756	3.68	0.339	0.
506	-0.10	1.18	20.10	14.77	40.0	-3	1	1.33	4.57	0.12	1957	2049	96	16.81	1743	1886	6.36	0.339	0.
610	0.20	1.50	20.10	14.74	40.0	-3	2	1.37	4.75	0.17	2063	2107	98	16.49	1973	2050	10.86	0.338	0.
700	0.21	1.59	20.06	14.59	40.0	-3	2	1.39	4.68	0.21	2022	2151	94	16.34	1935	2164	15.39	0.337	0.
823	0.60	1.92	20.09	14.55	40.0	-3	2	1.39	4.73	0.24	2052	2153	95	15.97	2066	2259	20.68	0.338	0.
905	0.14	1.63	19.90	14.36	42.0	-3	2	1.51	4.71	0.30	2180	2329	94	16.16	2265	2580	28.43	0.334	0.
1007	0.99	2.33	20.09	14.43	40.0	-3	3	1.42	4.98	0.34	2207	2195	101	15.50	2507	2480	35.85	0.338	0.

LIT. : Tstol : -1.17 [C] Praktijk -0.9 C
 Tstol : 272 [K]
 Cp,d : 3941 [J/kgK]
 mu,0 : 0.0026 [Ns/m2]
 ro,d : 1039 [kg/m3]

datum meetserie : 23 augustus 90
 debiet dextrose : 80 %
 dextrose concentratie : 10.0 %
 methanol temperatuur : -5 [C]
 methanol loop debiet : 0.644 [kg/s]
 Overlies omgeving : 750 [W] (gemiddelde waarde)

UITVOERGEDEVENS																	
N [rpm]	Tm,in [C]	Tm,uit [C]	Td,in [C]	Td,uit [C]	Fm,toe [%]	Tm,toe [C]	Tm,af [C]	dT m [C]	dT toe/af [C]	K [Nm]	Qtoe_af [W]	Qm [W]	BALANS [%]	dT ln a(i): Qtoa(i): Qm [W/m2/K]	P [W]	Y	m [Ns]
200	-3.79	-1.80	25.89	19.64	45.0	-7	0	2.14	6.11	0.15	3298	3277	101	25.50	3.14	0.359	0.
326	-3.39	-1.26	25.28	18.27	45.0	-7	0	2.20	6.35	0.17	3457	3373	102	24.02	5.80	0.349	0.
417	-3.13	-1.09	25.54	18.57	45.0	-7	0	2.31	6.52	0.15	3569	3543	101	24.08	6.55	0.352	0.
486	-2.98	-0.76	24.97	17.82	45.0	-7	0	2.30	6.54	0.17	3583	3529	102	23.18	8.65	0.344	0.
593	-2.84	-0.60	24.80	17.28	45.0	-7	0	2.32	6.59	0.22	3616	3561	102	22.66	13.66	0.341	0.
700	-2.80	-0.51	25.53	17.21	45.0	-7	0	2.39	6.73	0.26	3709	3669	101	22.89	19.06	0.351	0.
806	-2.63	-0.32	24.55	16.92	45.0	-7	0	2.40	6.70	0.32	3689	3686	100	22.10	27.01	0.337	0.
892	-2.64	-0.34	24.31	16.78	45.0	-7	0	2.41	6.71	0.36	3695	3701	100	21.93	33.63	1.334	0.
1006	-2.70	-0.42	23.87	16.32	45.0	-7	0	2.42	6.71	0.44	3695	3716	99	21.55	46.35	1.327	0.

INVOERGEDEVENS