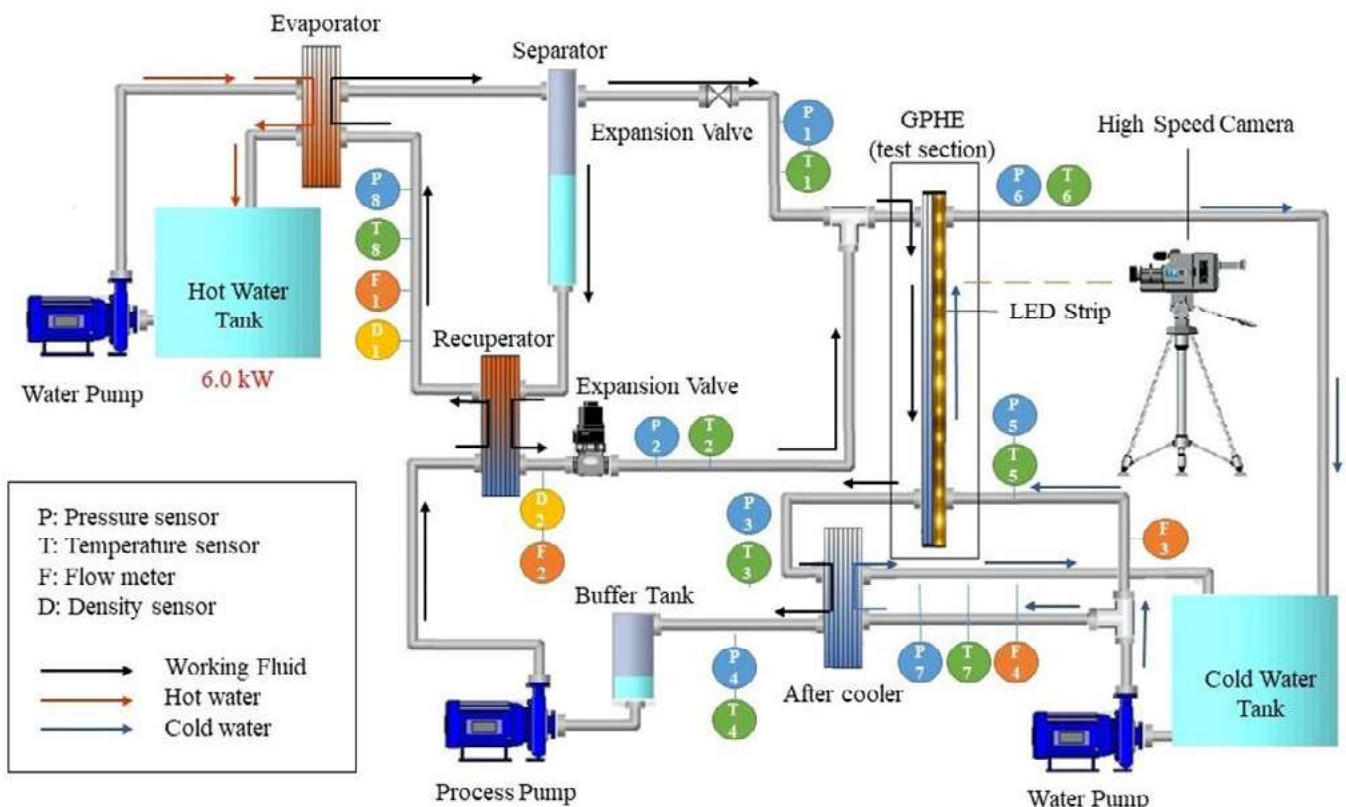


Auteur Maaïke Marie-Louise Leichsenring

Stromingsvisualisatie van ammoniak in een platenwarmtewisselaar

Het twee-fase gedrag van vloeistoffen en gassen in platenwarmtewisselaars (PWW's) is door de wetenschap nog niet helemaal begrepen. Dit resulteert in onder- en overschatten van gepubliceerde warmteoverdrachts- en drukvalcorrelaties [1]. Het wordt verwacht dat een verbeterde voorspelling van vloeistofpatronen zal leiden tot verbeterde warmteoverdrachts- en drukvalberekeningen [2]. Vloeistofpatronen worden visueel bepaald met behulp van een experimentele setup, waar de stroming wordt geobserveerd door een transparante visualisatieplaat. Dit onderzoek vergelijkt de resultaten van zuiver ammoniak stromingsvisualisatie in een verticale PWW met eerder uitgevoerde lucht-water experimenten [2].

Stromingspatronen worden gedefinieerd aan de hand van de geometrische configuratie van twee-fase stroming (gas en vloeistof) in een buis of kanaal. Ze worden geclassificeerd in vier hoofd-stromingspatronen: Bubbly flow, slug flow, churn flow en film flow. De verwachting is dat de verscheidene patronen corresponderen met variërende vormen van warmteoverdracht. Een flow pattern map (FPM) helpt met het grafisch onderscheiden van de verschillende stromingspatronen. Referentie [2] creëerde een FPM for twee-fase verticale stromingen gebaseerd op vooral lucht-water experimenten (zie figuur 5). De assen van de FPM maken gebruik van de dimensieloze getallen: het vloeistof Reynolds getal Re_l [-] en twee fase Froude getal Fr_{TP} [-]. Re_l [-] is gedefinieerd door (2):



Figuur 1: Schematische representatie van de experimentele setup van de OTEC demo cyclus



Figuur 2: Links) Visualisatiesectie.
Rechts) Visualisatiesectie en positie
hogesnelheidscamera.

$$Re_L = G(1 - x)d_h \mu_L^{-1} \quad (1)$$

Waar G [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$] de totale massaflux is, x [-] de massadampkwaliteit en d_h [m] de hydraulische diameter van het kanaal. Het twee fase Froude getal is gedefinieerd door (3) en representeert de ratio van inertiaalcracht over de zwaartekracht en wordt verwacht een rol te spelen in verticale PWWs [2]:

$$Fr_{TP} = xG(gd_h \rho_G (\rho_L - \rho_G))^{-0.5} \quad (2)$$

Waar g [kg s^{-2}] de gravitatieconstante representeert, ρ_G de dichtheid van de gas-fase en ρ_L de dichtheid van de vloeistoffase representeert.

Experimentele Setup

Experimentele apparatuur en procedure

In samenwerking met de Technische Universiteit Delft heeft BlueRise B.V. een kleinschalige test demo geïnstalleerd in het laboratorium van het Process & Energy departement. Deze installatie wordt gebruikt om de prestatie te testen van een Ocean Thermal Energy

Cyclus (OTEC), welke gelijke componenten bevat als dat van een koelingscyclus. De 100 W OTEC-demo bestaat uit een Organic Rankine cyclus (ORC) waar pure ammoniak de werkvloeistof is. Fig. 1 geeft een schematische representatie van de test opstelling weer. Pure ammonia wordt partieel verdampt in de verdamper met behulp van ammoniak. De twee-fase ammoniak stroomt door een expansieklep naar een condenser. Deze wordt vervolgens gecondenseerd in de Gasketed Plate Heat Exchanger (GPHE) met behulp van koud water afkomstig van een water tank.

Testsectie voor visualisatie

De testsectie bestaat uit een GPHE, met een koud-water kanaal en het ammoniak-kanaal. De buitenste plaat van de PWW aan de ammoniak zijde is vervangen door een transparante visualisatieplaat, bestaande uit een laag Polystyreen en Plexiglas. De hybride polymeren plaat heeft dezelfde geometrie en ribbelpatronen als de warmteoverdrachtsplaten. De drie kijkramen (bovenste, middelste en onderste) maken de visualisatie-experimenten mogelijk. De plaat wordt zijwaarts verlicht door een LED strip. Een hoge snelheidscamera van 3000 fps is voor de visualisatieplaat gepositioneerd. De experimentele setup is weergegeven in figuur 2.

Testprocedure

De ammoniak massaflux G_a [kgm^{-2}s] is bepaald door (4), waar A_f [m^2] het doorstromend oppervlak representeert. De ammoniak massaflow $\dot{m}_a$ [kgs^{-1}] is gemeten door flow meter F1, zie Fig. 1.

$$G_a = \dot{m}_a A_f^{-1} \quad (3)$$

Tijdens de experimenten is de massaflux constant gehouden, terwijl de massadampkwaliteit stapsgewijs werd verhoogd. Zowel de invloed van de massaflux als de massadampkwaliteit zijn vastgelegd voor alle drie kijkramen.

Experimentele Resultaten

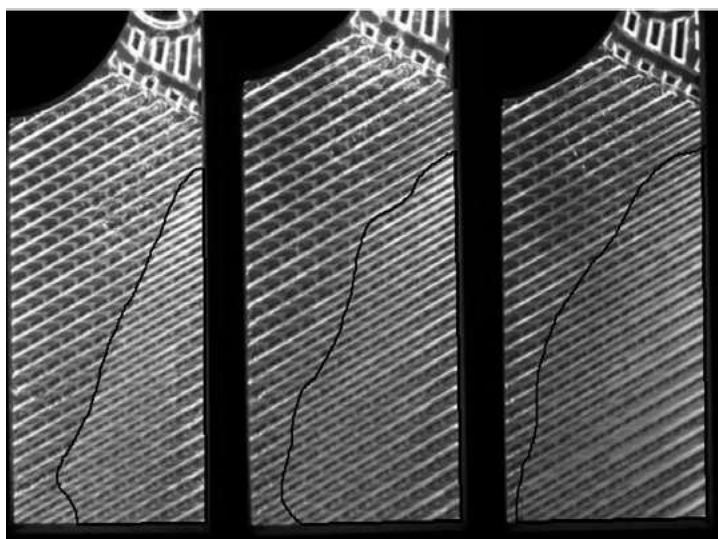
Voor alle experimenten is een framerate van 3000 fps met een resolutie van 1024 x 1024 pixels gebruikt. De transparante plaat bleef intact voor 7 dagen, maar liet de eerste tekenen van verval en aanslag zien op de 8^e dag. De degradatie was zichtbaar door kleine scheuren in het PS oppervlak en vlekken op de plexiglas (PMMA) laag die langzaam groeiden. Er is geconcludeerd dat Polystyreen (PS) een gelimiteerde chemische resistentie heeft wanneer het in direct contact is met zuiver vloeibare en gasvormige ammoniak.

Stromingspatronen en stromingspad

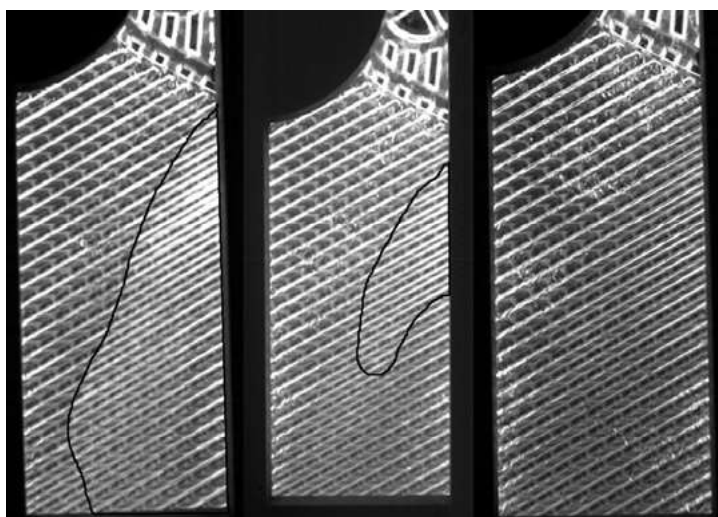
Voor alle experimenten geldt dat er geen bubbles, slugs of churns zijn geobserveerd en dat slechts film flow en partiële film flow zijn vastgelegd.

Het stromingspad van het gas en vloeistof vertoonde weinig verschillen wanneer de massaflow of de dampkwaliteit werd aangepast. Het bovenste kijkraam liet zien dat door de vorm van de plaat bij de distributiezone van de inlaat, het merendeel van de vloeistof over de linker bovenste diagonaal van de plaat wordt geduwd.

Hierdoor stroomt het merendeel van gas over de onderste rechter diagonaal van de plaat, wat indiceert dat er sprake is van een gescheiden stroming. Het oppervlak van de vloeistoffilm die over de bovenste diagonaal stroomt neemt toe met massaflux en werd geïdentificeerd als een vloeistof doordat de zone licht reflecteerde en in meerdere richtingen golfvorming liet zien. De zone die geen lichtreflecties en golfvorming liet zien werd geïdentificeerd als gas. In het bovenste kijkraam was te zien dat de stroming de richting van de ribbels volgde. In het middelste kijkraam zorgde de verandering van de hoek van het



Figuur 3: $\bar{x} = 0.31$ [-]. a) $G = 43$ [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$] b) $G = 64$ [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$] c) $G = 81$ [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$].



Figuur 4: $G = 43$ [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]. a) $\bar{x} = 0.22$ [-]. b) $\bar{x} = 0.48$ [-] c) $\bar{x} = 0.62$ [-]

ribbelpatroon ervoor dat de stroming recht naar beneden werd geforceerd. Dit zorgde voor een goede distributie van het gas en de vloeistof over de plaat. Een lagere hoeveelheid gas werd geconstateerd. Het onderste kijkglas liet een evenredig gedistribueerde vloeistof film laag zien.

Invloed van massaflux en massadampkwaliteit op stromingsconfiguratie

Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen film flow en partiële film flow. Bij film flow bestaat een vloeistoffilm beide wanden van het kanaal en stroomt het gas in de kern van het kanaal. Bij partiële film flow bestaat de vloeistoffilm niet het gehele oppervlak van het kanaal waardoor op sommige plekken het gas in direct contact is met de wand. Wanneer partiële film flow ontstaat in de GPHE en droge zones aanwezig zijn op de transparante plaat, wordt een ondoorzichtige zone zichtbaar. De droge zones zijn geïndiceerd in Fig. 3 en 4 met een zwarte omranding. Alleen het bovenste kijkraam is gepresenteerd omdat deze de sterkste configuratieverschillen liet zien.

Fig. 3 laat zien dat voor een constante massadampkwaliteit maar toenemende massa flux de droge zone afneemt in oppervlak. Fig. 3 a, b indiceert partiële film flow door de aanwezigheid van de droge zone. Fig. 3 c laat zien dat voor een hogere massa flux van $81 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, de droge zone verdwijnt, ofwel film flow ontstaat. Dit indiceert dat de massaflux G een sterke invloed heeft op de transitie van partiële naar volledige film flow. Een lage massaflux toont gladde (smooth) vloeistof-film karakteristieken, geïndiceerd in de links bovenste diagonaal van Fig. 3 a) door het ontstaan van een helder beeld. Met toenemende massaflux transiteert de film naar ruige (rough) filmkarakteristieken geïndiceerd door sterke lichtreflectie in de bovenste diagonaal, zie Fig. 3 c). Fig. 4 laat zien dat voor een constante massaflux en toenemende massadampkwaliteit de droge zone toeneemt. Dit komt alleen voor bij lage massafluxes en partiële film flow.

Vergelijking van resultaten met Flow Pattern Map [2]

De operationele condities van de experimenten zijn weergegeven in figuur 5. Figuur 5 toont een FPM gegenereerd door [2] voor PWW's dat gebruik maakt van de dimensieloze getallen Re_L en Fr_{TP} die zwaartekracht, visceuze krachten en inertia krachten meenemen. Deze constructie is gebaseerd op de resultaten van eerder uitgevoerde visualisatie-experimenten van neerwaartse

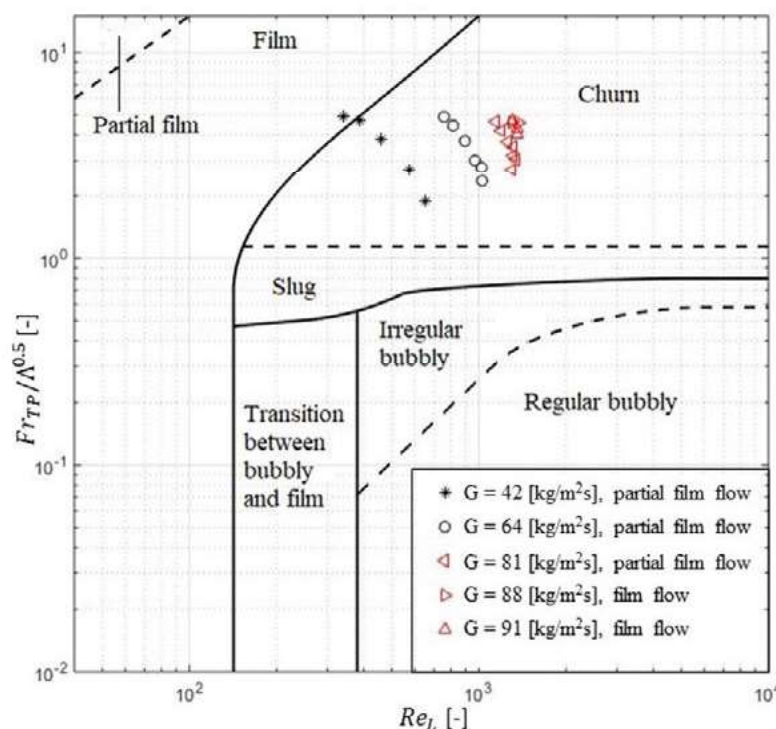
lucht-water stromingen in platenwisselaars. De parameter λ corrigeert voor stoffeigenschappen indien de werkstof anders dan water is en is geïncorporeerd om het toepassingsgebied van de FPM te vergroten naar andere werkstoffen, zoals koelmiddelen. De FPM voorspelt churn flow voor de experimentele condities van dit onderzoek. De resultaten van de visualisatie-experimenten laten echter film flow en partiële film flow zien, wat aanduidt dat de FPM nog niet toepasbaar is voor ammoniak.

Voorgestelde Flow Pattern Map

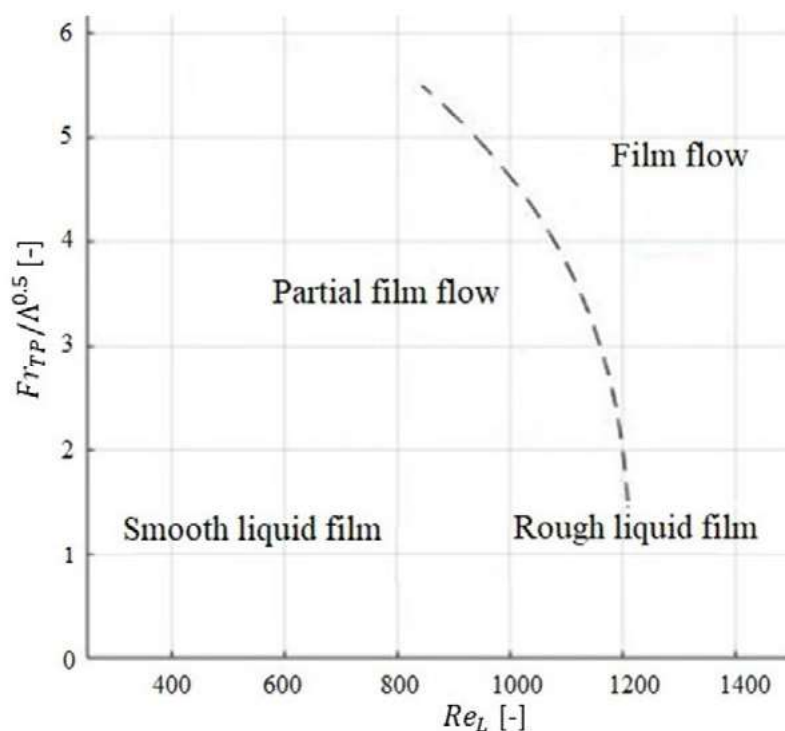
Een FPM voor condenserende ammoniak in de huidige geometrie en stromingsrichting van de GPHE is voorgesteld. Fig. 6 geeft de voorgestelde FPM weer voor een GPHE met een ribbelhoek van $\beta = 60^\circ$. Deze FPM kan worden gebruikt om het stromingspatroon voor condenserende ammoniak te voorspellen. De FPM beschrijft de transitie van partiële naar volledige film flow en de transitie van een gladde naar een ruige vloeistoffilm. Meer visualisatie-experimenten zijn benodigd met een breder bereik van experimentele condities om de toepasbaarheid van FPM's voor condenserende ammoniak te vergroten voor dit type wisselaars en geometrie.

Discussie van resultaten

PS heeft een gelimiteerde chemische resistentie tegen ammoniak onder deze condities voor zeven dagen. Stromingspatronen zijn visueel gedetermineerd, waardoor de classificatie van



Figuur 5: Experimentele operationele condities weergegeven in een versimpelde FPM voor twee-fase stromingen in PWW's gegenereerd door [2].



Figuur 6: De voorgestelde flow pattern map als een functie van Fr_{TP} , λ en Re_L voor condenserende ammoniak in een GPHE die de transitie beschrijft van partiële film flow naar film flow.

stromingspatronen tot op de dag van vandaag subjectief is. De testprocedure en de experimentele condities beïnvloeden het beoordelingsvermogen van de observeerder op hoe stromingspatronen gerelateerd zijn aan de transitielijnen in de FPM. Hier moet rekening mee gehouden worden wanneer FPM's geconstrueerd worden of wanneer aannames over het gedrag van stromingspatronen worden gemaakt.

Conclusies

De stromingsmorfologie van condenserende ammoniak is vastgelegd in een verticale stroming GPHE waar de ammoniak van boven naar beneden stroomt. Een geribbelde visualisatieplaat is geproduceerd van transparante PS en is bestand tegen pure ammoniak voor 7 dagen. Alleen film flow en partiële film flow zijn geobserveerd tijdens de uitgevoerde experimenten. Een duidelijke relatie was geobserveerd tussen de massaflux, massadampkwaliteit en de vastgestelde stromingspatronen. De droge zone vergroot met toenemende massadampkwaliteit en verkleint met toenemende massaflux, totdat de droge zone volledig verdwijnt. De massaflux bepaalt de transitie van partiële film flow naar film flow. Met toenemende massaflux transitioneert de film van een gladde film naar een ruige film. De operationele condities van de experimenten zijn weergegeven in de FPM gegenereerd door [2]. De observaties gemaakt in het experiment

komen niet overeen met de voorspelde stromingspatronen van de FPM. Om deze reden is een FPM voorgesteld voor condenserende ammoniak in een geribbelde GPHE die de transitie beschrijft van partiële film flow naar film flow. De resultaten van deze studie kunnen gebruikt worden om de prestatieberekeningen van dit type warmtewisselaars te verbeteren. Meer uitgebreide visualisatiestudies zijn nodig om:

- De toepasbaarheid van de FPM te vergroten voor verscheidene twee-fase werkvloeistoffen in GPHE's.
- Twee-fase correlaties voor ammoniak op grotere schaal te verbeteren en daarmee het ontwerp van PWW's in HVAC&R systemen te verbeteren.



Maaïke Marie-Louise Leichsenring

Referenties

1. R. Amalfi, F. Vakili-Farahani and J. Thome. "Flow boiling and frictional pressure gradients in plate heat exchangers," International Journal of Refrigeration, vol 61, pp. 166-184, 2016.
2. X. Tao, M. Nuijten & C. Infante Ferreira, "Two-phase vertical downward flow in plate heat exchangers: Flow patterns and condensation mechanisms," International Journal of Refrigeration, vol 85, pp. 489-510, 2018.