

Door S. Filippini en U. Merlo
LU-VE Spa, Italië

Tests met nadruk op koelvermogen en oppervlakte Een nieuwe generatie NH₃-luchtkoelers dient zich aan

LU-VE heeft onlangs verscheidene tests uitgevoerd met ammoniak (NH₃) luchtkoelers. Traditioneel zijn de belangrijkste ontwerpcriteria het koelvermogen, luchthoeveelheid, oppervlakte, lamelafstand en de koelerconfiguratie.

De R&D-afdeling van LU-VE legde de nadruk op koelvermogen en oppervlakte.

Bij NH₃-installaties is dikwijls voor een bepaald koelvermogen (en lamelafstand) al een minimaal koelend oppervlak voor de luchtkoeler voorgescreven.

De LU-VE R&D-afdeling vroeg zich af of dit wel de juiste benadering was.

De nieuwe LU-VE-serie industriële NH₃-lucht-koelers, type LSA.

Het is de bedoeling dat met een minimum verdamperoppervlak een bepaalde prestatie wordt bereikt, gedurende de werktijd. Ook als tijdens het koelproces ijsvorming plaatsvindt, zal de luchtkoeler zijn koelvermogen moeten houden. Bij ieder type luchtkoeler is een aantal essentiële parameters kenmerkend voor de prestatie van het geheel. Een warmtewisselaar met teveel rijen zal bijvoorbeeld een slechtere prestatie leveren tijdens het berijpen van de warmtewisselaar, doordat de ventilator niet meer de juiste luchthoeveelheid kan leveren. Het doel van dit onderzoek was dan ook producten te ontwikkelen met de hoogst mogelijke efficiëntie, onder werkelijke praktijkomstandigheden.

Type LSA

De nieuwe LU-VE-serie industriële NH₃-luchtkoelers – type LSA – is het resultaat van een lang en intensief onderzoek, dat zowel theoretisch als experimenteel hoofdzakelijk streefde naar het bepalen van de optimale combinatie van de warmtewisselaar en ventilatorgroep.

De twee drijvende krachten die de LU-VE ontwerpfilosofie achter het thermodynamisch ontwerp samenvatten zijn: het verkleinen van de pijpdiameter en de optimalisatie van het lameloppervlak.

De toepassing van pijpen met een kleinere diameter heeft veel voordelen. Een verhoging van de warmteoverdrachtcoëfficiënt en een vermindering van massa en volume van de warmtewisselaar zijn de belangrijkste. De diametervermindering heeft voor warmtewisselaars met als koudemiddel ammoniak nog twee andere belangrijke voordelen, namelijk het vermogen de



optimale mediumsnelheid aan te nemen bij de te bepalen mediumhoeveelheid en een vermindering van de hoeveelheid ammoniak in de verdamper.

Daarnaast heeft het gebruik van externe oppervlakken die de warmte efficiënter over kunnen dragen, een gunstig effect. Een voorbeeld daarvan is een louverd lamel: een lamel met kleine openingen (ook wel turbulators genoemd), die zorgen voor turbulentie en dus een betere warmteoverdracht. Vergeleken met traditionele oplossingen (gladde pijpen en gladde lamellen) geeft dit een aanmerkelijke verbetering van de warmteoverdrachtcoëfficiënt.

CFD-benadering

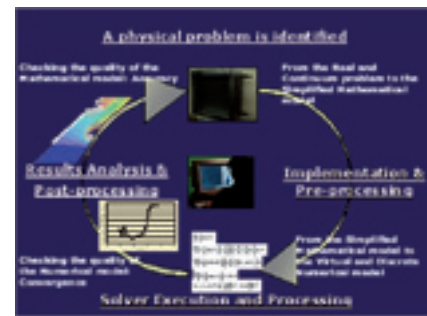
Voor een juiste wetenschappelijke benadering moeten CFD (Computational Fluid Dynamics)-modellen inzicht kunnen geven in reproduceerbare, geschatte en ook traceerbare resultaten. Dit betekent toepassing van algemene procedures en standaardmethodes die in het proces van de CFD-analyse moeten worden gebruikt. De CFD-methode is geen volledig lineair proces; de resultaten zijn niet verkregen in één meting. De resultaten moeten worden gecontroleerd, de instellingen worden aangepast en deze cyclus moet meerdere malen doorlopen worden (modellen, materiële eigenschappen en zelfs grensvoorwaarden). Elke nieuwe analyse van het systeem moet verbeterd zijn, om een nauwkeurigere voorspelling te kunnen doen.

Er is een standaard CF 'toepassingsprotocol' gebruikt voor de voltooiing van de analyse. Deze is gebaseerd op eerdere ervaringen van de onderzoekers op het gebied van CFD. Deze procedure houdt rekening met de 'excellent Best Practice Guideline', ontwikkeld in een door de Europese Gemeenschap gesponsord programma met de specifieke doelstelling om het vertrouwen en de kwaliteit van industriële CFD-resultaten te verbeteren. Het algemene doel van de procedure is reproduceerbaarheid van de resultaten te kunnen waarborgen en een solide experimentele test, die de definitieve CFD-conclusies bevestigt.

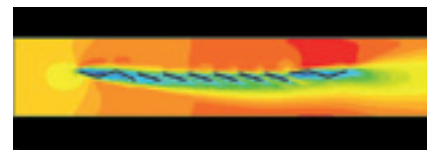
Voordelen daarvan zijn het helpen en het versnellen bij het ontwerpen van de prototypeprocessen, het verminderen van de globale ontwikkelingskosten van het ontwerp zonder de productiekosten te beïnvloeden en het verminderen van experimentele testen. De bevestiging van de eerste fase van de onderzoekactiviteiten, gebaseerd op de bestaande en bekende configuraties met louverd lamellen, en de verkregen resultaten, geven de onderzoekers de mogelijkheid verdere innovatieve ontwerpen te onderzoeken door het gehele potentieel van CFD te gebruiken.

Aangezien de aandacht van deze CFD-analyse hoofdzakelijk is geconcentreerd op het vloeibare dynamische gedrag van de lamellen dichtbij de turbulators van de louverd lamel, moet het numerieke model aan twee belangrijke voorwaarden voldoen: hoge nauwkeurigheid om kleinschaligheid (turbulentie en warmte overdracht) dicht bij de opening in de lamel goed te kunnen herleiden en hoge flexibiliteit voor een snelle implementatie van de parametrische analyse.

Deze kenmerken zijn vaak tegenwerkend en kunnen niet gemakkelijk door een 3D-model passend worden gemaakt. Ze zouden een groot aantal cellen door de 3D-toepassing, een goede resolutie in de kleine openingen (die opnieuw het aantal cellen verhogen) en een redelijke 'running-time' voor elke simulatie moeten hebben. Aangezien de meeste karakteristieken van het verschijnsel beïnvloed worden door de dominante snelheid en in de stromingsrichting, dan wordt een redelijk compromis in deze fase van het onderzoek gevonden in het gebruiken van een periodiek 2D-model, geconcentreerd op het ontwerp van de louverd lamel. Daaraan zitten enkele beperkingen, waardoor er slechts een evaluatie kan plaatsvinden van de prestatievergelijking uit de analyse van de verschillende geteste ontwerpen. In dit stadium kan er slechts een geschatte kwantitatieve evaluatie voor de absolute waarden van het warmtecoëfficiënt en de drukverliezen worden gegeven. De definitieve vergelijking moet wachten op de experimentele



1. CFD-procescyclus.



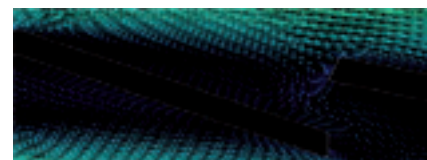
2. Snelheidsgebied van het basisonwerp.

testen.

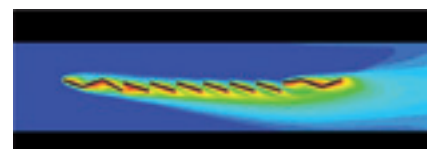
De verbeterde stroming en temperatuurgebied

De resultaten van het originele basisonwerp werden vergeleken met die van het definitieve ontwerp. Het snelheidsgebied en het temperatuurgebied, zoals aangegeven in figuren 2, 3, 4, 5, 6 en 7, vormen het bewijs van de verhoogde uniformiteit die voor de beide gebieden wordt verkregen.

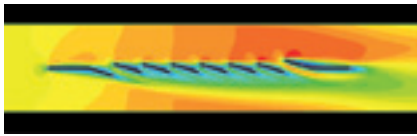
Figuur 3 en 4 van het basisonwerp geven aan dat het eerste deel van de lamel, vlak na de inham, niet werkt. Door de geometrische configuratie van het basisonwerp, gaat de snelheidsstroom niet vloeiend door de eerste opening en een warme temperatuurvlak kan worden gezien in figuur 4. Het definitieve ontwerp – figuur 5, 6 en 7 – toont een ander gedrag en het snelheidsge-



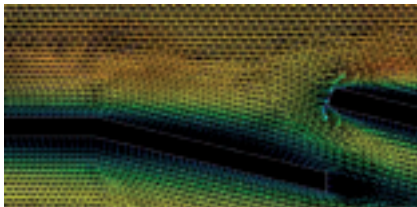
3. Snelheidsvectoren in het eerste gat van het basisonwerp.



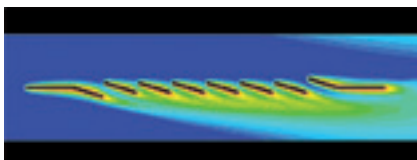
4. Temperatuurgebied van het basisonwerp.



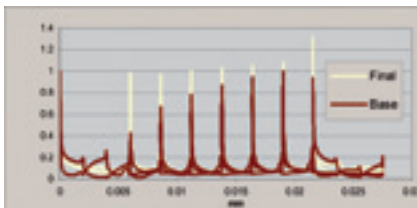
5. Snelheidsgebied van het definitieve ontwerp.



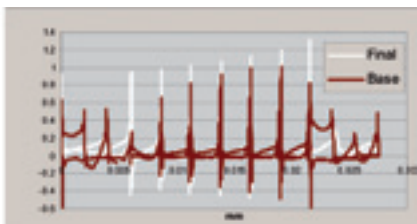
6. Snelheidsvectoren in het eerste gat van het definitieve ontwerp.



7. Temperatuurgebied van het definitieve ontwerp.



8. Warmtestromen genormaliseerd naar de maximale warmtestroom over de vin in het basisontwerp.



9. X-Wall shear stress genormaliseerd naar de maximale warmtestroom over de vin in het basisontwerp.

bied vormt het bewijs van beter aerodynamisch gedrag. Let op de snelheidsvectoren: de recirculatie zone is nu verdwenen en de snelheidsstroom gaat nu vloeiend door de eerste opening. Er is nu geen warme temperatuurvlak te zien in het temperatuurveld van het definitieve ontwerp (fig. 7).

De warmtestroom en drukverliescoëfficiënten

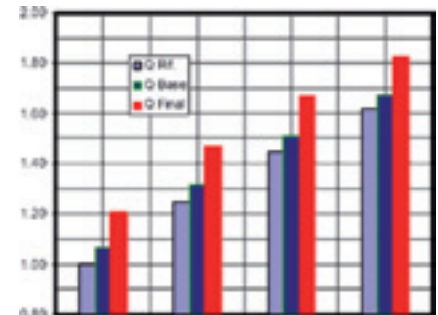
De verbeterde aerodynamische eigenschappen van het definitieve ontwerp en de verbeterde uniformiteit van het stroomgebied over de lamellen, hebben een direct gevolg op de prestaties van de lamel. Het is nu mogelijk om te concluderen dat het definitieve ontwerp tot een paar interessante voordelen leidt, namelijk een meer uniforme warmtestrooming en een hoger warmteoverdrachtniveau.

Ondanks de relevante verhoging van de warmtestroom (fig. 8), is het interessant om te zien dat de verhoging van de drukval (fig. 9) lager is dan in eerste instantie zou worden verwacht.

Deze eigenschap is eveneens een gevolg van de betere aerodynamische eigenschappen die met het definitieve ontwerp worden verkregen. In figuur 8 – waarin de warmtestroom bij de turbulators van het definitieve ontwerp en het basisontwerp tegen elkaar afgezet zijn – is duidelijk te zien dat het definitieve ontwerp een hogere en meer uniforme warmtestroom heeft. In figuur 9 zijn de drukvalverschillen bij de verschillende turbulators van de lamel te zien.

Totale prestatie

Het prestatieniveau, de gemiddelde verhoging van het koelvermogen die met geoptimaliseerde oppervlakten wordt verkregen ten opzichte van de traditionele oplossing, is vrij opmerkelijk. De figuren 10 en 11, die



Figuur 10

vergelijkingen bij gelijke ventilatiehoeveelheden weergeven, maken dit duidelijk. Figuur 10 laat de sverhoging zien van het koelvermogen, verkregen met het nieuwe pijppatroon (geometrie 55x55) met geturbuleerde lamellen, vóór (Q base) en na (Q final) de CFD-optimalisatie, met de golvende lamel als (Q Rif) als referentiepunt. Figuur 11 laat de verschillen in koelvermogen zien tussen luchtkoelers die werken met koudemiddel R404A en luchtkoelers die werken met koudemiddel NH₃ (DX Systeem en Pomp systeem). Voor elk koudemiddel worden de variaties tussen TF3 (pijpgeometrie 55x27.5 - buis 12.7) en TF4 (pijpgeometrie 55x55 - buis 12.7) getoond, voor zowel lamellen met een golvende configuratie als voor lamellen met een louvered configuratie. Ondanks het gebruik van intern gladde, roestvrijstalen buizen voor de ammoniak (ten opzichte van de intern geribbelde koperen pijp bij HCFK's), is het warmteoverdrachtcoëfficiënt bij het gebruik van NH₃ superieur aan die van HCFK's.

Aerodynamica

Zoals al eerder opgemerkt, heeft elke ventilatorgroep zijn eigen karakteristieke 'curve', die voor de juiste luchthoeveelheid zorgt. Aan de andere kant zorgt de

Design/Type	Pipe Size	Capacity	Heat capacity		External surface		Internal surface		Total capacity coefficient		Notes
			Q ₁ (kW)	Q ₂ (kW)	Q ₁ (m ²)	Q ₂ (m ²)	Q ₁ (m ²)	Q ₂ (m ²)	Q ₁ (kW)	Q ₂ (kW)	
R404A	TF3 - wavy	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF3 - louvered	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF4 - wavy	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF4 - louvered	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
R404A	TF3 - wavy	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF3 - louvered	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF4 - wavy	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF4 - louvered	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
NH ₃	TF3 - wavy	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF3 - louvered	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF4 - wavy	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion
	TF4 - louvered	10000	85%	85%	34.3	287	34.3	287	10000	400	Capable for expansion

Figuur 11

weerstand van de warmtewisselaar en uitblaasrooster voor een weerstandcurve die voor iedere luchthoeveelheid de drukval gaat bepalen. Het snijpunt van de twee curven bepaalt het werkpunt en daarmee de luchthoeveelheid die door de warmtewisselaar gaat.

Als zich rijp aan de oppervlakte van de lamel gaat vormen, wijzigt deze curve zich natuurlijk. Ook het werkpunt zal verschuiven waardoor er minder lucht door de warmtewisselaar zal stromen. De ventilatoren op de LU-VE luchtkoelers hebben vergeleken met conventionele ventilatoren, een meer verticale curve; dat wil zeggen kleinere variaties in luchtstroom als de weerstand over de warmtewisselaar stijgt (bijvoorbeeld door middel van berijping). Dit gedrag heeft een zeer positief effect op de prestatie van de luchtkoeler onder berijpte omstandigheden.

Air streamer - luchttrichtingsturend uitblaasrooster

Als de luchtweerstand over de warmtewisselaar stijgt, neigt het stroompatroon naar een wanordelijke en onstabiele vorm, met een aanzienlijke hoeveelheid 'terugslaan'de' lucht. Dit probleem kan worden opgelost door een air streamer ofwel een luchttrichtingsturende korf of rooster te monteren. Deze handhaaft ook bij een stijgende weerstand over de warmtewisselaar een geordende luchtstroming en daarmee ook een voldoende lange luchtwerp van de unit. Om de vorm van de gelijkrichters in de korf te perfectioneren, werd de CFD Fluent® berekeningscode gebruikt. Daarmee kon het aantal experimentele tests aanzienlijk worden verminderd, en daarmee ook de tijd tussen de ontwerpstudie en de experimentele bevestiging van het ontwerp. Door de bijdrage van CFD werden merkbare verbeteringen verkregen in vergelijking met de vorige versie van het uitblaasrooster, specifiek:

- verhoging luchthoeveelheid +8%;
- verhoging aan het "werkpunt" van ventilator (van 40 naar Pa 55) + 35%;
- vergroting van de luchtwerp +35%;
- onveranderd geluidsniveau.

Om de studie naar de perfecte vorm te vereenvoudigen werden de beveiligingsroosters van het uitblaasrooster niet meegenomen in de studie. Deze beveiligingsroosters dienen alleen om contact van hand of

vingers met de ventilatorbladen te voorkomen. Vanuit airdynamisch gezichtspunt is de invloed van deze beveiligingsroosters te verwaarlozen.

Optimale configuratie

Na de CFD-analyse om de optimale vorm en het optimale aantal gelijkrichters te bepalen, volgde eerst de prototype fase en daarna de experimentele fase. Op de prototypes werden drie experimentele tests uitgevoerd, namelijk

- luchtstroom, hoeveelheid en weerstand en het opgenomen elektrische vermogen;
- de evaluatie van lengte van de luchtwerp;
- geluidsniveau.

Figuur 12 geeft volgens de curve van de ventilator met een air streamer een aanmerkelijke verbetering weer, zowel in luchthoeveelheid als in het opvoeren van het 'snijpunt', dat het maximum werkpunt van de ventilator is.

Figuur 13 toont het patroon van luchtsnelheid in de asrichting bij de uitrede van de ventilator. Door deze test kon de vergroting van de luchtwerp met het nieuwe type rooster worden bepaald. De lengte van luchtwerp wordt bepaald door de afstand van de unit tot aan het punt waarop de luchtsnelheid 0,25 m/s is. De unit met het nieuw ontwikkelde rooster (genaamd Jet-Streamer®) bleek een verbeterde werp van ongeveer 35% te hebben. Dat betekent voor deze unit dat de werp is verbeterd van circa 14 meter bij de oude uitvoering, naar 19 meter bij de nieuwe uitvoering. De laatste experimentele test was om te bepalen of er een verschil was in het geluidsniveau tussen de oude en de nieuwe versie. Beide units werden onder dezelfde omstandigheden getest in een akoestische kamer. Ook in dit geval werd een lichte verbetering voor de nieuwe versie (Jet-streamer) geconstateerd. Er was een verbetering van 0,7 dB(A), die gold voor zowel het totale geluidsniveau als over het volledige frequentiespectrum.

Experimentele test met berijping

Een lange en nauwkeurige experimentele test werd uitgevoerd om het gedrag van de luchtkoelers bij lage temperaturen (onder 0°C) te verifiëren. De doelstelling was om het nieuwe ontwerp te testen bij het ontstaan van berijping op de warmtewisselaar en eventueel enkele aanpassingen aan te

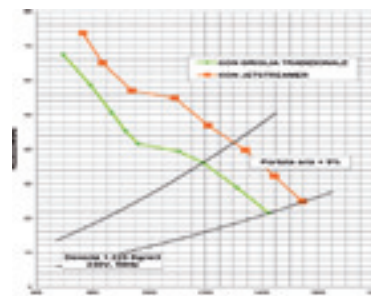


Figure 12

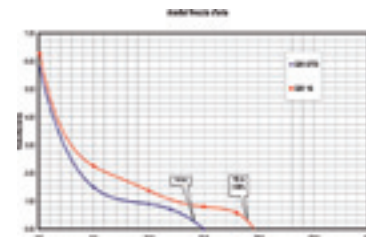


Figure 13

brengen om het geheel (warmtewisselaar en ventilator) te perfectioneren.

In figuur 14 heeft elke unit een vermogenswaarde van 1, gemeten onder droge omstandigheden. Hiermee wil het onderzoeksteam aantonen dat het mogelijk is dat luchtkoelers die werken met identieke warmtewisselaars maar met verschillende ventilatoreenheden (motor + waaier + rooster), afwijkende prestaties leveren. De rode lijn (oude uitvoering) toont een grotere daling in prestaties in het normale werkgebied onder berijpte omstandigheden, dan de groene lijn (het nieuwe ontwerp), die een bijna lineaire daling laat zien tot het ontdooipunt (nieuwe ontdooicyclus op ongeveer 0,7 tot 0,75 % van het beginpunt).

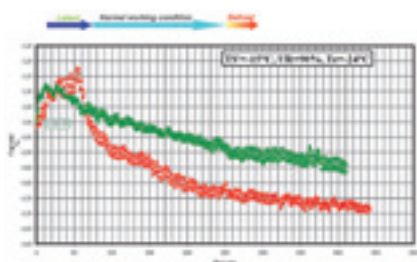
Globaal gezien, is de richting van de curve klassiek. Er is een eerste fase waarin het koelvermogen dankzij de verwijdering van latente warmte stijgt (er komt vocht vrij, dat op de lamellen neerslaat). Tijdens de tweede fase is een regelmatige daling van het koelvermogen te zien. Deze is zichtbaar afhankelijk van de prestaties van de toegepaste ventilatoreenheid (motor + waaier + rooster).

Fotografische analyse

Een zeer zorgvuldige fotografische studie werd uitgevoerd om de tendens van de neerslaande berijping op de lamellen en in het bijzonder op turbulators in de lamel-

Koelinstallaties en warmtepompen

RCC KOUDE & LUCHTBEHANDELING



Figuur 14

len zichtbaar te maken. De reeks foto's (Fig. 15) toont duidelijk aan dat de hoog efficiënte lamelgeometrie zijn efficiëntie behoudt tijdens het ontstaan van berijping op het lameloppervlak. Op de foto's is te zien dat de turbulators open blijven en goed zichtbaar zijn gedurende gehele koelcyclus, waardoor de lamel zijn efficiëntie behoudt.

Conclusies

Om de getoonde resultaten van het onderzoek te onderbouwen, werden twee NH₃-luchtcoolers uit de nieuwe LU-VE serie type LSA (een maal met een hoge luchtsnelheid LS64A en een met een lagere luchtsnelheid LS63A) met twee marktconforme producten vergeleken.

De eerst genoemde traditionele luchtcooler in de tabel wordt veelvuldig in de markt

toegepast en heeft een pijpgeometrie van 50x50 met rvs pijpen en aluminium lamellen. De andere veelvuldig in deze markt toegepaste luchtcooler heeft een pijppatroon van 60x60 en gebruikt het in de NH₃-sector traditionele materiaal gegalvaniseerd staal, voor zowel de pijp als voor de lamel.

De voordelen van de nieuwe serie LSA-luchtcoolers zijn de grotere koelvermogens bij een gelijkblijvend oppervlak en een kleinere koudemiddelinhoud van de coeler. Dit laatste punt levert een groot voordeel op als gekeken wordt naar de NH₃-vulling in de luchtcooler. Bovendien heeft de LSA-luchtcooler een lager gewicht bij een gelijkblijvend koelvermogen, wat weer veel andere voordelen kan opleveren, zoals bijvoorbeeld lagere transportkosten, minder dure bevestigingsconstructies en eenvoudigere montage.

Dankzij de grote lamelefficiëntie en de geoptimaliseerde pijpdiameter voor NH₃

is de LSA-serie NH₃-luchtcoolers een belangrijke stap voorwaarts voor toepassing in de industriële koudetechniek.

REFERENCES

1. Wang CC 2000, *Recent progress on the air-side performance of Fin-tube Heat Exchangers*, Int. J. of Heat Exchanger 1 (1524-5608): 49-76.
2. Lozza G., Merlo U. 2001, *An experimental investigation of heat transfer and friction losses of interrupted and wavy fins for fin-and-tube heat exchangers*, Int. J. of Refrig. 24: 409-416.
3. Patankar S.V. 1980, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Mc Graw-Hill, New York.
4. Wilcox C.D. 2004, *Turbulence Modelling for CFD*, Second Edition, DCW Industries Inc.
5. Pope, S.B. 2000, *Turbulent flows*, Cambridge University Press, Cambridge
6. Refrigeration ASHRAE Handbook 1997
7. Heat Exchanger Design Handbook 1983, Hemisphere Publishing Inc.

		LS64A 7302-7	LS63A 6802-7	Example 1	Example 2
Technology		Al/Inox	Al/Inox	Al/Inox	Fe/FeZn
Geometry	mm	55 x 55	55 x 55	50 x 50	60 x 60
Tube diameter	mm	12,7	12,7	15,0	22,0
Capacity SC2 - R717	W	31,46	25,01	23,60	24,54
Fin spacing	mm	7,5	7,5	7,0	7,5
External surface	m ²	139,6	139,6	138,4	199,2
Air volume	m ³ /h	16470	11330	11190	10650
Fan power consumption	W	2580	980	810	1100
Tubes volume	dm ³	25	25	38	73
Weight	kg	207	207	264	570
Capacity / Ext. Surface	W/m ²	0,225	0,179	0,171	0,123



15. Lamel turbulator tijdens de berijping. Links: geen rijp, midden: tijdens het berijpen en rechts: aan het eind van de periode met veel rijp op het oppervlak.

Meer informatie

RECUPAIR NEDERLAND B.V.
T: 0162 434222
F: 0162 434550
E: sales@recupair.nl