



Best Practice Selectie en conditiebewaking warmtewisselaars

1. Inleiding

Het rendement van warmtewisselaars is afhankelijk van de vervuiling. Hoe vuiler de warmtewisselaar, hoe slechter de warmteoverdracht. Het periodiek reinigen van warmtewisselaars is één van de onderhoudswerkzaamheden die gepland, begroot en uitgevoerd moeten worden.

Voor warmtewisselaars bestaan de vervuilingskosten uit:

- energieverlies door een verslechterde warmteoverdracht;
- extra energiekosten door een verhoging van de druk in de warmtewisselaar (o.a. pompenergie);
- lagere doorzet (bijvoorbeeld door de beperkingen van het fornuis) en capaciteitsverlies.

Deze brochure beschrijft het vervuilingsmechanisme, de modellen om vervuiling te voorspellen, richtlijnen voor een warmtewisselaarontwerp en de recente ontwikkeling van software om de conditiebewaking en onderhoudsplanning voor een warmtewisselaar te kunnen uitvoeren. Ook zullen gebruikelijke en nieuw ontwikkelde reinigingsmethoden behandeld worden.

2. Vuistregels

- Zorg voor [voldoende snelheid](#) in een shell&tube (S&T) warmtewisselaar; 0,5 m/s voor de rompzijde en 1 m/s voor de pijpen.
- Zorg voor een [voldoende hoge afschuifspanning](#) in platenwisselaars (PHE). Een typische afschuifspanning om de vervuiling in een PHE te verminderen is 50 – 70 Pa.
- Goed gekozen [vervuilingsweerstand](#), voorkom overdimensionering en vervuiling door te lage flows. Om hier voor S&T warmtewisselaars kennis voor op te doen is noodzaak. [Tabellen](#) over vervuilingsweerstand zijn beschikbaar in het Heat Exchanger Design Handbook (second edition)(1).
- Retrovitten van S&T warmtewisselaars kan door het wijzigen van [keerschotten](#) en/of het implementeren [van pijpinzetstukken](#).
- Voor [conditiebewaking](#) van warmtewisselaars kunnen flow-, temperatuur- en drukanalyses gemaakt worden.

3. Typen vervuiling

Vervuiling is het belangrijkste probleem bij warmteoverdracht. Vervuiling is te omschrijven als het zich afzetten op warmteoverdrachtvlakken van ongewenste materie en is veelal een onvermijdbaar gevolg van warmteoverdracht tussen twee stromen.

Er bestaan diverse vervuilingsmechanismen en in veel situaties kan een combinatie van twee of meer daarvan voorkomen bij warmtewisselaars:

- chemische reactie; toenemende reactiesnelheid door stijging van de temperatuur in de richting van het verwarmend oppervlak;
- polymerisatie; heet oppervlak verhoogt polymerisatiegraad waardoor hoog-viskeuze sublagen ontstaan;
- corrosie; corrosieproducten van warmtewisselaarpijpen, leidingen of apparatuur in het proces, verzamelen zich op hete oppervlakken, c.q. er ontstaat 'under deposit corrosion' (udc) onder lagen van welk type vervuiling dan ook;
- afzetting van deeltjes: katalysatormateriaal of andere vaste stof zet zich af op het warmtewisselend oppervlak;
- kristallisatie; afnemende oplosbaarheid is er de oorzaak van dat oplossingen verzadigd raken dichtbij het verwarmend oppervlak. Ook kan koken van vloeistof er toe leiden dat er verzadiging ontstaat of afzettingen optreden op droge oppervlakken;
- scaling; ontstaat door corrosie tezamen met kristallisatie;
- biologische activiteit; onder andere door groei van algen in open koelwatersystemen;



- bevroering; stollen van vloeistoffen of wasvorming op koude oppervlakken.

Bij vervuiling spelen ook meerdere processen een rol tijdens de toe- of afname van de vervuiling. De afzettingssnelheid is bepaald door:

- reactiesnelheid; van toepassing op kristallisatie, polymerisatie en corrosieachtige vervuiling;
- kernvorming; toepasbaar op beginnende vervuiling van nieuwe oppervlakken waar plaatselijk 'hechtplaatsen' aanwezig kunnen zijn;
- diffusie; bij lage snelheden met zeer kleine deeltjes zoals chemische componenten met een lage diffusiviteit maar een hoge reactiesnelheid;
- zwaartekrachtafhankelijke sedimentatie; in het bijzonder bij grote vaste deeltjes en lage stromingssnelheden;
- verdampingsresten van een oplossing; bij verdamping van een bijna verzadigde oplossing van een niet-vluchtige stof;
- andere mechanismen; zoals elektroforese (veroorzaakt door elektrische lading) en thermoforese (in verband met temperatuurgradiënten in de laminaire onderlaag).

De mate waarin de afzettingen weer verwijderd worden, hangt af van het warmteoverdrachtsoppervlak en het evenwicht tussen de afschuifspanning van het procesmedium en de hechtkracht van het afzettingendeeltje, ofwel door de verblijftijdspreiding van deeltjes in de laminaire grenslaag. De hechtkracht is ook een functie van de eigenschappen van het oppervlak; speciaal geprepareerde gladde oppervlakken kunnen de vervuiling in sommige gevallen vertragen.

De netto vervuilingsgraad is hierbij gedefinieerd als het verschil tussen de afzettingssnelheid en de mate waarin de afzettingen weer verwijderd worden.

Het afzettingproces kan worden voorafgegaan door een inductieperiode waarin nauwelijks enige afzetting plaatsvindt. In deze periode worden wel lokale microkernen gevormd. Na een bepaalde tijd worden deze plaatsen met microkernen zo talrijk dat ze zich verenigen tot een complete laag, waarna de afzettingssnelheid snel toeneemt. Een inductieperiode wordt vaak waargenomen bij nieuwe en geconditioneerde warmtewisselaars en zal na enige malen mechanisch reinigen steeds korter worden. Dit wordt veroorzaakt door het in de loop van de tijd ruwer worden van het oppervlak waardoor zich na een reiniging steeds meer kernen kunnen vormen. De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt U , is de reciproque waarde van de som R_t van alle warmtestroomweerstand. Naast de interne en externe vervuilingweerstand R_{fi} en R_{fe} zijn er een kleine weerstand ten gevolge van het pijpwandmateriaal R_w en de weerstanden van de laminaire grenslagen van beide stromende media R_i en R_e . In een algemene formule samengevat geldt dat:

$$R_t = R_i + R_{fi} + R_w + R_{fe} + R_e = 1/U$$

De som van de vervuilingweerstand R_{fi} en R_{fe} verklaart een groot deel van de totale weerstand R_t . Een meer gedetailleerde bespreking van een aantal vereenvoudigde modellen die het vervuilingsgedrag beschrijven is te vinden in [2].



4. Energiezuinig ontwerp warmtewisselaars

Een energiezuinige warmtewisselaar is er één waarbij zo min mogelijk vervuiling optreedt. Om te komen tot een ontwerp van een warmtewisselaar waarbij zo min mogelijk vervuiling zal optreden, is een aantal aspecten van belang:

- selecteren van het type warmtewisselaar;
- procesdata in verband met vervuiling;
- keuze van de vervuilingsgraad.

4.1 Selecteren van het type warmtewisselaar

Bij het selecteren van het type warmtewisselaar dient rekening gehouden te worden met:

- thermische en hydraulische eisen – Het thermisch vermogen, eigenschappen van de media, in- en uitlaattemperaturen, vervuilingsgedrag en toelaatbaar drukverlies zijn meestal gegeven als resultaat van het procesontwerp;
- geschiktheid voor de media en bedrijfscondities – De constructiematerialen dienen geschikt te zijn voor de ermee in aanraking komende media zonder buitengewone corrosie. Ook dient de constructie bestand te zijn tegen de spanningen die ontstaan als gevolg van de drukken en temperatuurverschillen (thermische spanningen) van de media. De gevoeligheid voor vervuiling moet beoordeeld worden en de juiste vervuilingsweerstand gespecificeerd om een goed functioneren gedurende de gewenste bedrijfstijd te kunnen bereiken;
- onderhoud – Er dient rekening gehouden te worden met eisen in verband met de reiniging (mechanisch of chemisch) van de warmtewisselaar;
- beschikbaarheid – Projectplanningen vereisen soms het toepassen van standaardontwerpen in verband met kortere levertijden;
- economische factoren – Voor de uiteindelijke keuze zijn naast de investeringskosten, ook de onderhouds- en bedrijfskosten van belang.

Warmtewisselaars die algemeen toepassing vinden in de chemische industrie kunnen grofweg in drie hoofdcategorieën ingedeeld worden.

Pijpbundelwarmtewisselaar (Shell- and -Tube heat exchanger, S&T HE)

Deze hebben een totaal marktaandeel van circa 80% en zijn ook het meest toegepaste type in de chemische procesindustrie. Tientallen jaren ervaring bij de toepassing van S&T HE hebben geleid tot een hoge mate van vertrouwen in deze apparatuur. Er zijn nu beproefde computerprogramma's voor het thermische en hydraulische ontwerp, evenals codes voor het mechanisch ontwerp en de constructie. Speciale constructieve uitvoeringen, samen met een grote variatie aan materialen waarvan ze gefabriceerd kunnen worden, staan er borg voor dat de S&T HE in bijna elk proces kan worden toegepast, inclusief hoge temperatuurniveaus, extreme temperatuurverschillen, hoge drukken, verdampings- en condensatieprocessen, ernstige vervuiling en corrosieve media. Terwijl de S&T HE een zeer robuuste constructie heeft en extreem hoge drukken kan weerstaan, is dit type wel gevoelig voor vervuiling, in het bijzonder aan de rompzijde.

Luchtgekoelde warmtewisselaar (Air-Cooled heat exchanger, ACHE)

Het marktaandeel hiervan is circa 15% in de chemische procesindustrie, vooral daar waar koelwater kostbaar of schaars is. In de ACHE stroomt het te koelen of te condenseren medium door de pijpen (meestal uitwendig voorzien van vinnen of koelribben), die in een rechthoekig blok zijn gearrangeerd. Ten behoeve van de koeling zijn ventilatoren onder of boven het blok aangebracht, waardoor respectievelijk een geforceerde of een geïnduceerde trek ontstaat. Voor de ACHE worden proceszijdig dezelfde weerstanden voor de vervuiling gehanteerd als bij de S&T HE.

Daar staat tegenover dat de luchtzijdige vervuiling van plaats tot plaats kan verschillen en meestal niet in de berekening wordt verwerkt omdat de luchtzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt nogal laag is (weerstand betrekkelijk hoog) en weinig of geen invloed op het berekende oppervlak heeft. De vervuiling aan de luchtzijde van de gevinde pijpen wordt naast olie en vet, afkomstig van de ventilator- en motorlagers, veroorzaakt door een scala van atmosferische verontreinigingen. Het is bekend dat bijvoorbeeld zaadpluizen van populieren ernstige problemen kunnen veroorzaken.

Compacte warmtewisselaars, voornamelijk bestaande uit Plate-and-Frame heat exchangers (PHE) en Plate-Fin heat exchangers (PFHE)



Het aandeel van deze groep in de warmtewisselaarmarkt is 5%. De compacte warmtewisselaars vervuilen minder snel dan de beide vorige typen door de afwezigheid van dode ruimten en de hogere snelheden op de warmteoverdrachtvlakken.

Daar staat tegenover dat de compacte warmtewisselaars slechts geschikt zijn voor ontwerpdrukken tot 20 à 40 bar en ontwerptemperaturen tot 250°C (platen), respectievelijk 400°C (gespiraliseerde platen). Ook dient opgemerkt te worden dat de nauwe doorgangen tussen de gegolfde platen, die het warmtewisselend oppervlak vormen, ze gevoelig maakt voor verstopping. In tegenstelling tot de PHE's met afdichtingen zijn de naden van de PFHE's geheel gelast of gesoldeerd en daardoor ontoegankelijk voor reiniging. Daarentegen heeft de PHE met afdichting meer lekkansen naar de omgeving en kan dientengevolge niet toegepast worden voor gevaarlijke of toxische media. De PHE's worden voornamelijk ingezet bij water/water processen en ook wel bij slurries, indien het om relatief kleine deeltjes gaat. De vervuilingsfactoren van de S&T HE zijn hier niet bruikbaar.

Door de nauwe doorgangen zijn de snelheden hoog en dragen daardoor bij aan het verwijderen van vervuiling. Om rekening te houden met eventuele vervuiling wordt gewoonlijk bij de ontwerpberekening een vast percentage extra oppervlak ingecalculleerd.

4.2 Proces data met betrekking tot vervuiling

De belangrijkste vervuilingsparameter vormt de aard van het medium zelf. De neiging tot afzetting van een medium wordt verder bepaald door:

- de snelheid van het medium;
- de oppervlaktetemperatuur van het warmteoverdrachtvlak;
- de constructiematerialen en oppervlakteconditie.

4.2.1 Snelheid van het medium

In een situatie waarbij de vervuiling bij een gegeven raakvlaktemperatuur afneemt bij toenemende snelheid kan zich de invloed van de snelheid op twee manieren manifesteren:

1. als de afzetting zacht is kan de snelheid bij de wand de erosie van de vervuilde laag versterken waardoor de afzettingssnelheid wordt verlaagd;
2. als het vervuilende materiaal gevormd wordt in de grenslaag van het hete oppervlak (waar de vormingssnelheid het hoogst is) dan zou de gevormde vervuiling naar de bulkvloeistof kunnen diffunderen. Een snelheidsverhoging zou het massatransport van de vervuiling doen toenemen en als gevolg daarvan de vervuiling doen afnemen.

Toch is het zo, dat de effecten van de mediumsnelheid op de vervuiling door koolwaterstoffen nog steeds niet geheel begrepen worden. Als een algemene vuistregel kunnen de volgende (één fase) vloeistofsnelheden aangehouden worden als een minimaal vereiste snelheid ter vermindering van de neiging van een vloeistof om afzettingen te vormen:

- ingeval van een S&T HE: 0,5 m/s voor de rompzijde en 1 m/s voor de pijpen;
- bij een compacte warmtewisselaar (zoals een PHE) is het gebruikelijker om te spreken van afschuifspanning aan de wand (direct verband houdend met de snelheid). Een typische afschuifspanning om de vervuiling in een PHE te verminderen is 50 – 70 Pa.



4.2.2 Oppervlaktetemperatuur van het warmteoverdrachtvlak

De temperatuur van het vervuilende medium op het contactvlak is een vitale parameter in verband met de mate van vervuiling. De bulk mediumtemperaturen en de warmteoverdrachtscoëfficiënten zijn bepalend voor de contactvlaktemperatuur. Er is reeds veel onderzoek gedaan naar het vervuilingsgedrag van (in het bijzonder) koolwaterstoffen, de diverse onderzoeksresultaten laten echter geen eenduidig beeld zien.

4.2.3 Constructiematerialen en oppervlakteconditie

Het kiezen van het juiste warmtewisselaarmateriaal is buitengewoon belangrijk. Een gefundeerde keuze kan een mogelijke vervuiling ten gevolge van corrosie voorkomen. Enige typen van biologische vervuiling kunnen vertraagd worden door koperlegeringen toe te passen. De ruwheid, afmeting en bezettingsdichtheid van kleine holten hebben invloed op de kristallijne kernvorming, op de bezinking en de neiging tot verkleven van afzettingen. Zowel het constructiemateriaal als de oppervlaktebehandeling beïnvloeden eerder het begin van vervuiling dan het verloop van het vervuilingsproces.

Momenteel worden voor sommige warmte-toepassingen kunststof warmtewisselaars aangeboden, bijvoorbeeld voor de condensatie van rookgassen. Deze warmtewisselaars hebben het voordeel dat er geen/ minder corrosie optreedt.

4.3 Kiezen van een vervuilingsweerstand

Het is niet alleen van belang om het meest geëigende type warmtewisselaar te kiezen, maar het is even belangrijk om de juiste waarde te kiezen voor de vervuilingsweerstand, juist omdat talrijke factoren daarbij een rol spelen. Naast de stromingssnelheid bepalen temperatuur en materialen en de grote variatie c.q. combinatie van procesvloeistoffen de waarde van de vervuilingsweerstand. Een uitgebreide ervaring opgedaan in de procesindustrie heeft geresulteerd in een tabel met verwachte waarden voor die weerstand, dat wil zeggen de maximum (waarschijnlijk constante) waarde na langdurig gebruik van de warmtewisselaar. Deze waarden, uitgedrukt in m^2K/W , zijn gepubliceerd door de Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) en zijn van toepassing op S&T HE's. In het bijzonder is aandacht gegeven aan de waarden voor water (in relatie tot het type koelwater) en stoom daar dit veel toegepaste media zijn voor proceskoeling en verhitting. De waarden van de vervuilingsweerstand zijn gegeven zonder de variaties in aanmerking te nemen ten gevolge van de boven beschreven factoren (zie 4.2). Een grondige kennis van de vervuilingsweerstand is noodzakelijk omdat de waarden in de tabel aangepast zijn voor een bepaalde mate van extra oppervlak in de situatie dat de warmtewisselaar nieuw of juist gereinigd is. Gebruik van te hoge waarden zal leiden tot veel te grote warmtewisselaars en te hoge installatiekosten. Bovendien zullen over-gedimensioneerde warmtewisselaars tot gevolg hebben dat de stromingssnelheden te laag worden, hetgeen weer leidt tot extra vervuiling. Het effect van de vervuilingsweerstand op het geïnstalleerde warmtewisselaaroppervlak is het grootst als de (schone) overall-warmteoverdrachtscoëfficiënt en de vervuilingsweerstand beide hoog zijn.

4.4 Configuratie van pijpbundelwarmtewisselaars (S&T HE)

Bij toepassing van S&T HE's is het mogelijk te kiezen voor een concept waarbij de vervuilende processtroom door de pijpen, respectievelijk door de romp gaat. Omdat bij een S&T HE de pijpzijde veel eenvoudiger te reinigen is dan de rompzijde is het raadzaam om bij voorkeur de vervuilende stroom via de pijpen te laten gaan. Er zal dus een afweging gemaakt dienen te worden tussen de bedrijfsvoering (reinen van vervuilde oppervlakken) en de investeringskosten van de warmtewisselaar. Bij het vastleggen van het concept zijn de volgende aandachtspunten van belang.

4.4.1 Vervuilende processtroom door de pijpen

In het detailontwerp kunnen de volgende regels gehanteerd worden:

- grote pijpdiameters toepassen;
- hoge snelheden aanhouden;
- voldoende reserve incalculeren voor het drukverlies;
- een reserve pijpbundel of complete warmtewisselaar aanschaffen;
- pijpinzetstukken (tube inserts) toepassen;
- rekening houden met on-line-reiniging.

4.4.2 Vervuilende processtroom door de romp

Bij dit concept worden de volgende ontwerpapunten aangeraden:

- haarspeld (U-tube) of losse kop (floating head) ontwerp gebruiken;
- toepassen van 90° of 45° pijppatronen, waardoor de pijpenrijen beter reinigbaar zijn;
- hoge snelheden aanhouden;
- ontwerpen met een grotere pijpafstand voor erg vervuilende media.

4.5 Methoden om vervuiling tegen te gaan

Tot de methoden ter bestrijding van vervuiling van warmtewisselaars kunnen de volgende systemen gerekend worden:

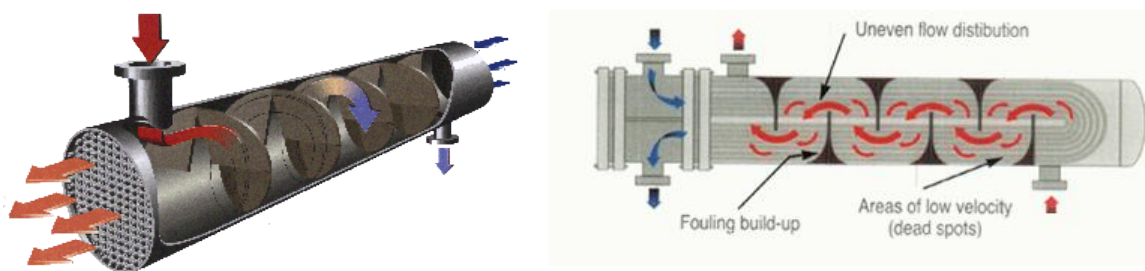
- helicoïde keerschotten (helical flow baffles);
- pijpinzetstukken (tube inserts);
- getordeerde pijpwarmtewisselaars (twisted tube HE).

4.5.1 Helicoïde keerschotten

In de traditionele S&T HE hebben gesegmenteerde schotten de functie om een kruisstroom te veroorzaken over de pijpen en dat kan leiden tot een verhoogde neiging tot vervuiling als gevolg van de variërende afschuifspanning rondom de pijpen. Een recente ontwikkeling waarbij de bevestiging van de schotten zó is gewijzigd dat er een helicoïde stroming door de warmtewisselaar ontstaat, wordt HELIXCHANGER™ genoemd. Dit type warmtewisselaar wordt tegenwoordig veel toegepast bij retrofitting en debottle-necking, maar de investeringskosten liggen circa 20% boven die van de gebruikelijke systemen.

Bij een vergelijking van warmtewisselaars voorzien van gesegmenteerde schotten c.q. met helicoïde schotten, valt het volgende op:

- in een conventionele warmtewisselaar zijn dode zones waar de vloeistof relatief in rust is wat aanleiding geeft tot vervuiling. Bij een warmtewisselaar met helicoïde schotten worden deze dode zones vermeden;
- bij een gegeven drukverschil kan de warmteoverdrachtscoëfficiënt bij een warmtewisselaar met helicoïde schotten veel hoger zijn, waardoor de wandtemperatuur lager wordt. Bovendien zal ten gevolge van de hogere stromingsnelheden en de toegenomen afschuifspanning aan de wand de tendens tot vervuiling afnemen;
- in warmtewisselaars met helicoïde schotten is de verdeling van de verblijftijden aan de rompzijde veel gelijkmatiger omdat het stromingspatroon die van een propstroming benadert.



Figuur 1: Voorbeeld van een warmtewisselaar met en zonder helicoïde schotten. Bron: ECN-I-01-009.

4.5.2 Pijpinzetstukken

Er is goede ervaring opgedaan met pijpinzetstukken ter vermindering van de neiging tot vervuiling. Dit is verklaarbaar door de extra turbulentie dichtbij het warmtewisselend oppervlak met als gevolg een aantal zeer voordelige effecten:

- een verkorting van de verblijftijd van deeltjes dichtbij een warm oppervlak;
- een kleiner vloeistofvolume dat tot een temperatuur boven die van de bulkvloeistof verwarmd wordt;
- het elimineren van kernvorming op het oppervlak;
- een toename van de mate waarin afzettingen verwijderd of losgemaakt worden op of dichtbij de wand.

Deze inzetstukken zijn ook toepasbaar bij luchtgekoelde warmtewisselaars, met dien verstande dat in dergelijke gevallen alleen een verbetering kan optreden als de productzijde een slechtere warmteoverdracht heeft dan de luchtzijde.

Er zijn diverse inzetstukken ontwikkeld, waar er hieronder vier van worden behandeld. De TWISTED TAPE en de HiTRAN[®] zijn stationaire inzetstukken, bedoeld om de warmteoverdracht te bevorderen. De overige inzetstukken bewegen in de pijp waarmee vuilophopingen minder kans krijgen.

SPIRELF[®].

Dit systeem bestaat uit een flexibele metalen veer die uitgerekt in de pijpen wordt aangebracht en aan de uiteinden bevestigd wordt, zie figuur 2. Door een combinatie van verhoogde turbulentie en trilling wordt een reductie van de vervuiling en een betere warmtewisseling bereikt. De voordelen zijn energiebesparing, langere bedrijfstijd en verhoging van de productie.



Figuur 2: Het SPIRELF[®] - systeem. Bron: Petroval brochure.

HiTRAN[®].

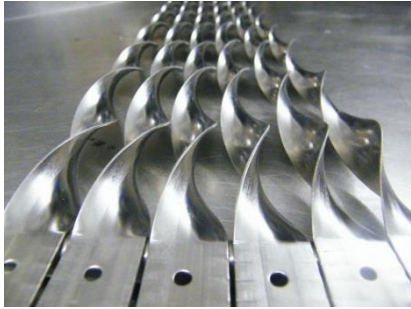
Dit systeem bestaat uit een gazen radiaal meng-element dat de grenslaag aan de binnenwand van de pijp continu verplaatst, waardoor een gelijkmatige temperatuur- en snelheidsverdeling wordt gerealiseerd. Dit resulteert in een toegenomen warmteoverdracht en voorkomt afzetting. Het nadeel van dit systeem is het relatief hogere drukverlies vergeleken met andere typen inzetstukken.



Figuur 3: HiTRAN[®] system. Bron: Calgavin.com.

TWISTED TAPE[®].

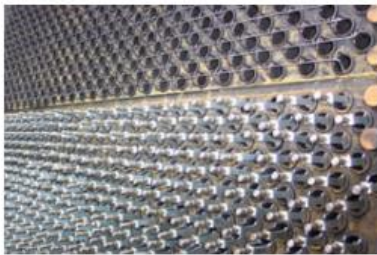
Het systeem met een getordeerd metalen lint geeft, vergeleken met een gladde pijp van dezelfde diameter, een betere warmteoverdrachtscoëfficiënt (door het turbulent maken van laminaire stromingen) en met een vergelijkbaar drukverlies.



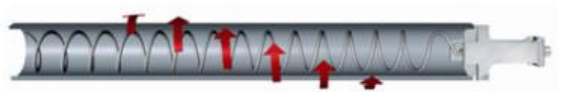
Figuur 4: TWISTED TAPE® . Bron: Calgavin.com.

TURBOTAL® element.

Dit bestaat uit een onbuigzaam helicoïdaal mobiel element, dat in de pijpen wordt geplaatst en kan roteren als gevolg van de vloeistofstroming. Tijdens het roteren schuurt het element de pijpwand, welke daardoor schoon blijft en door een hoge turbulentie in de directe nabijheid van de pijpwand ontstaat een verbeterde warmteoverdracht.



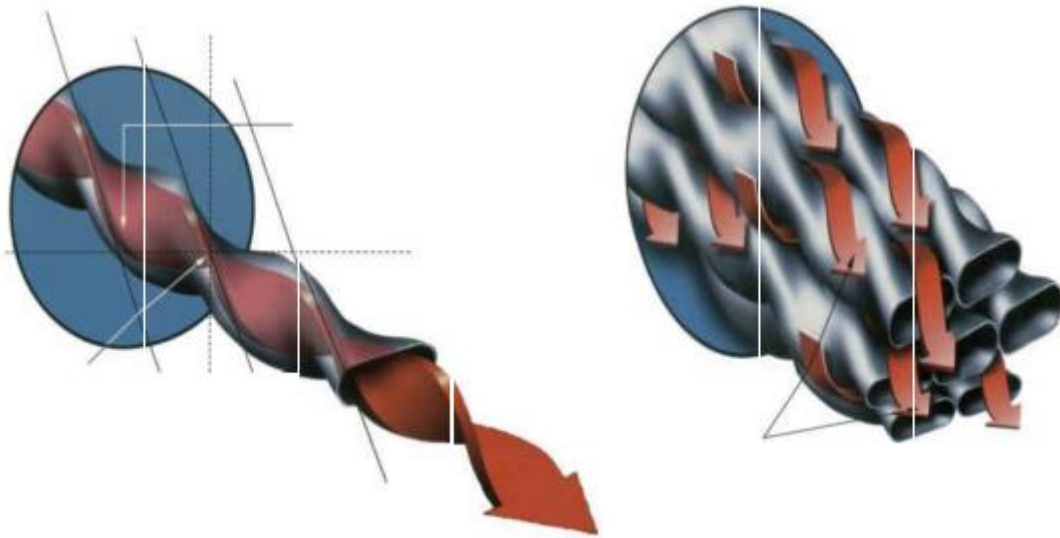
HELICOIDAL DEVICE ROTATING
BY THE FLUID FLOW



Figuur 5: TURBOTAL® element. Bron: Petroval brochure.

4.5.3 Getordeerde pijpwarmtewisselaars

De gedraaide pijpwarmtewisselaar is een type dat een verbeterde warmteoverdracht en een verminderde vervuiling aan zowel de pijpzijde als ook aan de rompzijde heeft. Deze TWISTED TUBE™ warmtewisselaar is weergegeven in figuur 6. In dit ontwerp worden pijpbundels samengesteld met gedraaide pijpen. De pijpen ondersteunen elkaar met de uitstulpingen van de naastliggende. De ene vloeistof stroomt door de pijpen en de andere in de lengterichting van de pijpen via de tussenruimten. Daardoor wordt een verbetering van de warmteoverdracht bereikt aan de pijp- en aan de rompzijde. Er wordt verwacht dat de neiging tot vervuiling vermindert als gevolg van die verhoogde warmteoverdrachtscoëfficiënt, waardoor lagere wandtemperaturen bij de te verwarmen vloeistof zullen optreden. Tevens wordt bereikt dat de kans op dode hoeken minimaal is aan de rompzijde en zal er een meer uniforme snelheidsverdeling ontstaan. Dit type warmtewisselaar wordt ook veel toegepast bij retrofitting en debottle-necking, maar de investeringskosten liggen circa 20% boven die van de gebruikelijke pijpbundel.



Figuur 6: Twisted Tube™ warmtewisselaar. Bron: ECN-I-01-009.

4.6 Reinigingsmethoden

Reiniging van warmtewisselaars kan worden uitgevoerd tijdens bedrijf (on-line) of bij buiten bedrijf zijn (off-line), afhankelijk van het betreffende proces en de plaats van de warmtewisselaars in het proces. Bovendien hangt het nog van het type warmtewisselaar af of een reiniging wel uitvoerbaar is. Ook kan het pijppatroon bepalen of een warmtewisselaar aan de rompzijde reinigbaar is.

4.6.1 Reiniging tijdens bedrijf

De koelwaterzijde van warmtewisselaars is meestal reinigbaar tijdens bedrijf. De volgende reinigingsprocedures zijn bruikbaar gebleken bij het reinigen van de waterzijde van koelers en condensors:

- spoelen in tegenstroom – De stromingsrichting van het koelwater wordt omgekeerd om slijm, slib, zand en andere vervuilingen weg te spoelen;
- reinigen met zand-slurry – Terugspoelen van water dat met lucht en zand geïnjecteerd is om meer turbulentie en een schurende werking te verkrijgen;
- zuurinjectie – Intermitterende injecties met zuursuspensies in het koelwater;
- circulatie met zuur – Het koelwater wordt tijdelijk vervangen door een verdund zuur dat gecirculeerd wordt;
- ultrasonische trillingen – Deze nieuwe techniek wordt momenteel gereedgemaakt voor commerciële toepassing;
- mechanische reiniging – Hieronder vallen de reiniging met circulerende sponsballetjes en de heen en weergaande borsteltjes in pijpenbundels.

4.6.2 Reiniging bij buiten bedrijf zijn

Indien de processtroom om de warmtewisselaar heen wordt geleid, met de warmtewisselaar ingeblokt en afgetapt, dan zijn de volgende reinigingsmethoden toe te passen.

Een gesloten warmtewisselaar (romp- en pijpzijde) is te reinigen door:

- circulatie met zuur – Vanuit een aparte tank wordt een verwarmde reinigingsvloeistof gecirculeerd;
- circulatie met organisch oplosmiddel – Typische oplosmiddelen zijn kerosine en zware aromaten;
- doorweken met organisch oplosmiddel – De oplosmiddelen blijven een tijd in de warmtewisselaar staan om bijvoorbeeld polymeervervuiling op te lossen.

Bij een geopende warmtewisselaar kunnen de pijpen gereinigd worden door:

- waterstraal – Hoge druk lansen 350 – 700 bar;
- boren – Kan nodig zijn alvorens de pijpen met een lans te reinigen;
- schrapen – Indien reiniging met waterstraal niet mogelijk (of niet beschikbaar) is;



- borstelen met oplosmiddel – Roterende staalborstel, met injectie van oplosmiddel via de as;
- pyrolyse – Afbranden van cokes en polymeren in een oven met een sub-stoichiometrische luchtstroom bij 450°C.

Als de pijpenbundel getrokken is kan de buitenzijde van de pijpen, naast met bovengenoemde methoden, ook gereinigd worden door:

- reinigen met zandslurry – Zand geïnjecteerd in het water van de reinigingslans om een schurende werking te verkrijgen;
- slijpende straal – Scherp grit, zand of staalgrit als slijpmiddel in een gas- of luchtstraal;
- onderdompeling in een tank – Met hete of koude oplossing of oplosmiddel om het vuil te doorweken en/of te verwijderen;
- straalreiniging in tank – Ondergedompelde nozzles reinigen buitenzijde van pijpbundels;
- stralen met ijs – IJsschilfers worden met perslucht verstoven (kan ook met vast koolzuur geschieden);
- pulsed power – Deze nieuwe techniek wordt momenteel gereedgemaakt voor commerciële toepassing.

4.6.3 Milieu- en veiligheidsaspecten

Bij alle bovengenoemde technieken, met uitzondering van de methode met ijsstralen, ontstaat een aanzienlijke hoeveelheid afval die afgevoerd dient te worden. Soms heeft het afval nog een voorbehandeling nodig alvorens het afgevoerd kan worden. Daarom is de methode met ijsstralen een relatief schone techniek.

In het bijzonder dient men aandacht te schenken aan:

- voorkomen van verontreiniging van het milieu door de vrijgekomen afzettingen uit de warmtewisselaars en de toegepaste chemicaliën;
- persoonlijke veiligheids- en gezondheidsaspecten tijdens de reiniging en het behandelen van het afval. Gespecialiseerde reinigingsfirma's zijn voor de uitvoering van deze werkzaamheden en het verzorgen van het afval veelal gecertificeerd.

4.7 Conditiebewaking

Door de conditie van warmtewisselaars in verband met vervuiling en afzettingen nauwlettend te bewaken, kan het optimale moment van de bedrijfstijd ingeschat worden waarop het noodzakelijke onderhoud en de reiniging plaats zou kunnen vinden. In het verleden waren hiervoor softwarepakketten beschikbaar, welke nu niet meer voorhanden zijn. Mogelijk worden ze nog wel gebruikt, maar in dat geval niet meer ondersteund.

In plaats van statistische conditiebewaking van warmtewisselaars met software, waarbij verouderingsprocessen en vervuilingsgraden ingevuld dienen te worden om tot onderhoudsmomenten te komen, worden de onderhoudsmomenten nu vaak op basis van ervaring en meetwaardenanalyse bepaald.

4.7.1 Conditiebewaking op basis van ervaring

Bij de fabrikanten van warmtewisselaars is inmiddels zoveel ervaring opgedaan dat ze goed kunnen aangeven welke onderhoudsfrequentie een bepaalde wisselaar nodig heeft.

Bij het of-line onderhoud van een warmtewisselaar, het retrovitten van een warmtewisselaar of het vernieuwen van een warmtewisselaar, wordt de situatie zoals die wordt aangetroffen meegewogen in een onderhoudsplanning of planningsadvies.

Tegenwoordig vindt in de hele installatiebranche een wijziging plaats door het introduceren van zogenaamde prestatiecontracten. Condities van warmtewisselaars worden up-to-date gehouden door onderhoudsfirma's, waarbij de prestaties van de warmtewisselaar contractueel zijn vastgelegd.

4.7.2 Conditiebewaking op basis van meetwaardenanalyse

Tegenwoordig wordt veel meetdata verzameld. Meetdata die de conditie van warmtewisselaars aangeven zijn:

- benodigde pompdruk - een hoger druk duidt op vervuiling;
- flow over de warmtewisselaar - meer flow kan een vervuiling betekenen;



- temperatuur - hotspots kunnen thermografisch worden weergegeven en kunnen duiden op een vervuiling.

5. Referenties

Dit is een publicatie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl).

In de periode 2000 - 2002 heeft de VNCI een reeks brochures uitgebracht onder de verzamelnaam "Leidraad voor energie-efficiency". In de reeks worden dertig verschillende bestaande praktische toepassingen beschreven van energiebeheer in chemische bedrijven. Deze publicatie, 'Best Practice Selectie en conditiebewaking warmtewisselaars' is een actualisering van het document 'Leidraad voor energie efficiency, Conditiebewaking warmtewisselaars', ee15.

De huidige actualisering van de Best Practice is tot stand gekomen in het kader van meerjarenaafspraken energie-efficiëntie MJA3 en MEE. Als onderdeel van de samenwerking met de VNCI is besloten het merendeel van deze Best Practices geactualiseerd opnieuw te publiceren. Deze Best Practice Selectie en conditiebewaking warmtewisselaars is geactualiseerd met medewerking van Industrial Energy Experts.

De meerjarenaafspraken energie-efficiëntie MJA3 en MEE zijn overeenkomsten tussen de overheid en bedrijven, instellingen en gemeenten. Het ministerie van Economische Zaken (EZ) het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) stimuleren met deze afspraken het effectiever en efficiënter inzetten van energie. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) is verantwoordelijk voor de uitvoering van de meerjarenaafspraken.

5.1 Weblinks

Warmtewisselaars design en onderhoud:

Tranter, specialists in heat transfer

www.tranter.com

Bronswerk heat transfer

www.bronswerk.com

Altena groep

www.altena.com

The Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.

www.tema.org

Pijpinzetstukken (Tube Inserts):

TURBOTAL[®], SPIRELF[®]

www.petroval.com

TWISTED TAPE[®], HiTRAN[®]

www.calgavin.com

Digitale documentatie:

ECN

<https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-I--01-009>

Overzicht commercieel verkrijgbare warmtewisselaars: technische en economische kentallen

Kuppan Thulukkanam

[https://books.google.nl/books?id=ZsU5A1mANWUC&pg=PA28&dq=heat+exchanger+selection&hl=nl&sa=X&ei=CsQGVa6LMYPQOPPjgbqJ&redir_esc=y%22%20%22v=onepage&q=heat%20exchanger%20selection&f=false" \ | "v=snippet&q=heat%20exchanger%20selection&f=false](https://books.google.nl/books?id=ZsU5A1mANWUC&pg=PA28&dq=heat+exchanger+selection&hl=nl&sa=X&ei=CsQGVa6LMYPQOPPjgbqJ&redir_esc=y%22%20%22v=onepage&q=heat%20exchanger%20selection&f=false)

5.2 Literatuur

[1] Kuppan Thulukkanam, "Heat Exchanger Design Handbook, second edition", 2013.

[2] Taborek, "Fouling: The major unresolved problem in heat transfer", Chemical Engineering Progress, February 1972.

[3] S.F. Smeding, "Overzicht commercieel verkrijgbare warmtewisselaars", ECN-I--01-009, 2001.



Colofon

Dit is een publicatie van:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Prinses Beatrixlaan 2 | 2595 AL Den Haag
Postbus 93144 | 2509 AC Den Haag
T +31 (0) 88 042 42 42
F +31 (0) 88 602 90 23
E info@rvo.nl
www.rvo.nl

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (EZ) het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koningsrijkrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M)

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | juli 2015
Publicatienummer: RVO-122/1501/RP-DUZA

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) stimuleert duurzaam, agrarisch, innovatief en internationaal ondernemen. Met subsidies, het vinden van zakenpartners, kennis en het voldoen aan wet- en regelgeving. RVO.nl werkt in opdracht van ministeries en de Europese Unie.

RVO.nl is een onderdeel van het ministerie van Economische Zaken.

Hoewel deze publicatie met de grootst mogelijke zorg is samengesteld kan RVO.nl geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele fouten.