



ENERGIATEHOKAS LÄMMÖNSIIRTO

SISÄLTÖ

TEHOSTA LÄMMÖNSIIRTOA - SÄÄSTÄ KUSTANNUKSIA	3
Ongelmat lämmönsiirrossa lisäävät kustannuksia	3
Ylimitoitus kiihdyttää likaantumista	3
Lika kasvattaa kuluja	3
Jättisäästöt lämmönsiirron tehostamisesta	3
TEHOKKUUS ON MONEN TEKIJÄN SUMMA	4
Haastelliset lämpövirrat teollisuudessa	5
Lääkkeeksi suunnittelu, ennaltaehkäisy ja puhdistus	6
Mittaa, analysoi ja seuraa lämmönsiirron tehokkuutta	6
ONGELMAT LÄMMÖNSIIRROSSA HEIKENTÄVÄT ENERGIA TEHOKKUUTTA	7
Lika syö lämmönsiirtokerrointa ja lämpötehoa	7
Kasvava painehäviö lisää pumppaus- tai puhallustarvetta	9
Ongelmat heijastuvat ympäröiviin prosesseihin	11
Likaantumisen vaikutukset huolto- ja kunnossapitotarpeeseen	11
MITTAA, SEURAA JA ANALYSOI LÄMMÖNSIIRRON ENERGIA TEHOKKUUTTA	12
Hyötyä mittauksista	12
Avaintunnusluvut seurantaan	12
Eri tapoja seurata ja analysoida	12
Avuksi likanäytteiden analysointi	13
RATKAISUJA LIKAISTEN JA ONGELMALLISTEN LÄMPÖVIRTOJEN LÄMMÖNSIIRTOON	14
LIKAANTUMISEN MONET MEKANISMIT JA SYYT	16
MITEN VÄHENTÄÄ LIKAANTUMISTA?	18
Puhdistus, huolto ja kunnossapito avainasemassa	18
Avuksi hyvä suunnittelu	21
ESIMERKKEJÄ	22
Raakaöljyn esilämmitin öljynjalostamolla	22
Automaattinen putkien puhdistusjärjestelmä	22
KIRJALLISUUTTA JA LINKKEJÄ	23
Kirjallisuutta	23
Linkkejä	23

TEHOSTA LÄMMÖNSIIRTOA – SÄÄSTÄ KUSTANNUKSIA

ONGELMAT LÄMMÖNSIIRROSSA LISÄÄVÄT KUSTANNUKSIA

Lämmönvaihtimien likaantuminen ja siitä aiheutuva energiatehokkuuden heikkeneminen on merkittävä taloudellinen ongelma, joka lisää usein mm.

- primääripolttoaineiden kulutusta lämmönsiirtokyvyn heikentyessä
- kasvihuonekaasupäästöjä
- huolto- ja työvoimakustannuksia sekä
- hankalan ja likaisen puhdistustyön tarvetta.

Lämmönvaihtimien likaantumisesta yrityksille suoraan aiheutuvat

- korkeampia investointikustannuksia
- lisääntyneitä energiakustannuksia
- menetetyistä tuotannosta aiheutuvia kustannuksia ja
- lisääntyneitä huoltokustannuksia.

YLIMITOITUS KIIHDYTTÄÄ LIKAANTUMISTA

Likaavia ainevirtoja sisältävissä kohteissa lämmönvaihtimet on tyypillisesti mitoitettu noin 20–50 % normaalia suuremmiksi. Ylimitoituksen tarkoitus on taata lämmönvaihtimen toiminta likaantumisesta huolimatta. Todellisuudessa ylimitoitus laskee virtausnopeuksia ja luultavasti kiihdyttää likaantumista. Investointikustannuksia lisäävät esimerkiksi erikoisjärjestelyt, jotka on tehty helpomman mekaanisen puhdistamisen, käytönaikaisen puhdistamisen tai rinnakkaisen lämmönvaihtimen vuoksi erittäin tärkeissä prosesseissa.

LIKA KASVATTA KULUJA

Lämmönsiirtopintojen likaantuminen johtaa aina energiakustannusten kasvamiseen. Mikäli lämmönsiirtokerroin huononee, joko kylmä virta ei lämpene tai kuuma virta jäähydy tarpeeksi. Tämä edellyttää lisäjäähdystä tai -lämmitystä. Tätä ei kuitenkaan aina joko huomata tai siitä ei välitetä, jos prosessille ei aiheudu suoranaisia ongelmia.

Jos lämmönsiirtokertoimen heikkeneminen puolestaan kompensoidaan virtausnopeuksia nostamalla, painehäviöt kasvavat. Tällöin pumppauksen tai puhalluksen vaatima energia kasvaa eksponentiaalisesti. Painehäviöt kasvavat myös ilman virtausnopeuksien erillistä nostamista, sillä virtauskanavan poikkipinta-ala pienenee ja virtausvastus suurenee.

Yleinen ratkaisu on puhdistaa likaantuneita lämmönsiirtopintoja aika ajoin poistamalla lämmönvaihdin käytöstä. Mikäli tuotanto pitää keskeyttää, aiheutuu heti ylimääräisiä kustannuksia. Vaikka rinnalla olisi toinen lämmönvaihdin ja tuotantoa ei tarvitsisikaan keskeyttää, nousevat käyttökustannukset joka tapauksessa puhdistamisen huoltokustannusten vuoksi.

Lähes jokaisella teollisuudenalalla esiintyy lämmönsiirtoa. Sen energiatehokkuuden heikentyminen näkyy välittömästi tuotteiden ja valmisteiden hinnoissa esimerkiksi tuotannon keskeytysten sekä korkeampien energia-, pumppaus-, puhallus- ja huoltokustannusten kautta.

JÄTTISÄÄSTÖT LÄMMÖNSIIRRON TEHOSTAMISESTA

Lämmönsiirron tehokkuus on merkittävä asia myös kansantaloudellisesti. Lämmönvaihdinten likaantumisen aiheuttamien kustannusten on arvioitu olevan noin 0,25 prosenttia bruttokansantuotteesta esimerkiksi Yhdysvalloissa, Englannissa, Japanissa, Saksassa ja Ranskassa (Belmiloudi, 2011). Suomen bruttokansantuote oli vuonna 2013 noin 201 miljardia euroa. Suomessa se merkitsee, että lämmönvaihtimien likaantuminen aiheuttaa noin 500 miljoonaa euron kustannukset vuosittain.

Jos kaikkien Suomessa toimivien hiililauhdevoimalaitosten luonnonvesilauhduttimien painetta pitäisi likaantumisen vuoksi nostaa noin 1,5 kPa (noin 5 °C:n lämpötilan nousu) sähkön tuotannon hyötysuhde alenisi noin puoli prosenttiyksikköä. Tällöin hiiltä kuluisi alkuperäisestä sähkön tuotannon hyötysuhteesta riippuen runsas prosentti enemmän. Vuonna 2010 olisi se tarkoittanut esimerkiksi yli 30 000 tonnin hiilen lisäostoa, mikä vastaa nykyisillä hinnoilla yli 6 miljoonaa euroa (alv 0 %).

TEHOKKUUS ON MONEN TEKIJÄN SUMMA

Teollisuudessa lämpöä siirretään lähes kaikkialla. Siirtäminen on mahdollista toteuttaa joko suoralla lämmityksellä ainevirtojen osuessa toisiinsa tai epäsuorasti lämpöpintojen välityksellä.

Suoran lämmittämisen ongelma on usein yleinen soveltumattomuus sekä höyryn tapauksessa pieni lauhteen palautusprosentti. Tämän vuoksi ainevirtoja sekoittamattomat lämmönvaihtimet ovat yleisin ratkaisu lämmön siirtämiseen.

Lämmönvaihtimen läpi siirtyvä teho voidaan esittää kaavoilla

$$\phi = \dot{m} c_p \Delta T = U \Delta T_{ln} \quad (\text{VDI Heat Atlas 1993}).$$

missä	ϕ	on lämpöteho [kW]
	\dot{m}	on jommankumman virtaavan aineen massavirta [kg/s]
	c_p	on saman aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]
	ΔT	on saman ainevirran tulo- ja menolämpötilojen erotus [K]
	U	on lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K]
	ΔT_{ln}	on nk. logaritminen lämpötilaero [K]

Logaritminen lämpötilaero riippuu lämmönvaihtimen tyypistä, mutta esimerkiksi myötä- ja vastavirtavaihtimelle sen voi esittää muodossa

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (\text{VDI Heat Atlas 1993}),$$

missä	ΔT_1	on virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen alkupäässä [K]
	ΔT_2	on virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppupäässä [K]

Lämmönvaihtimen tehokkuutta kuvaa puolestaan usein nk. rekuperaatioaste

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{max}}{\theta_0},$$

missä	ε	on rekuperaatioaste
	ΔT_{max}	on suurempi kylmän ja kuumen virran lämpötilamuutoksista
	θ_0	on suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus.



Rekuperatioaste kuvaa paljonko lämpöä on mahdollista saada talteen teoreettisesta maksimista. Energiatehokkuus on parhaimmillaan, kun ΔT_{max} on mahdollisimman suuri. Tämä edellyttää, että lämpö siirtyy mahdollisimman tehokkaasti virrasta toiseen, jolloin kokonaislämmönsiirtokerroimen U on oltava hyvä. Logaritmiseen lämpötilaeroon vaikuttavat virtojen keskinäiset lämpötilaerot. Kun virtausnopeudet pysyvät vakiona, lämmönsiirtokerroimen arvoihin vaikuttaa olemassa olevan lämmönvaihtimen tapauksessa eniten lämpöpintojen puhtaus. Toisaalta myös ympäröivä prosessi voi asettaa rajoitteita lämmönvaihtimien energiatehokkuudelle. Jos esimerkiksi virtausnopeuksia täytyy jostain syystä rajoittaa, lämmönsiirtokerroin laskee.

Myös lämmönvaihtimen painehäviöt ovat osa lämmönvaihtimien energiatehokkuutta, sillä ylimääräinen pumppaus- tai puhallustarve lisää aina energian (useimmiten sähköenergian) kulutusta. Lämmönsiirtopintojen likaantuminen heikentää energiatehokkuutta edellä esitetyn lisäksi myös painehäviöiden kasvaessa.

HAASTEELLISET LÄMPÖVIRRRAT TEOLLISUUDESSA

Lämmönsiirtopintojen likaantuminen ja sen aiheuttama energiatehokkuuden heikkeneminen on ongelma lähes jokaisessa teollisuusprosessissa, jossa lämpöä täytyy siirtää. Prosessien lämpövirrat voi usein jakaa kolmeen osaan:

- prosessiin tuotaviin (lämmitys)
- prosessista poistettaviin (jäähdytys) sekä
- prosessin sisäisiin lämpövirtoihin.

Yleensä prosessin taserajan ulkopuolella tapahtuva lämmönsiirtopintojen likaantuminen ei riipu teollisuuden alasta, kun prosessin sisällä tilanne on päinvastainen.

Ongelmalliset lämpövirrat prosessien ulkopuolella

Yleisimmät ongelmalliset prosessien ulkopuoliset lämpövirrat ovat kattiloissa tai muissa lämmönvaihtimissa (kuten lauhduttimissa) esiintyvät

- savukaasu-
- vesi-
- höyry- ja
- ilmavirrat.

Savukaasujen taipumus liata lämpöpintoja riippuu pitkälti käytetystä polttoaineesta, mutta myös esimerkiksi savukaasujen lämpötilasta ja virtausnopeudesta. Tyypillisiä ongelmallisia polttoaineita ovat esimerkiksi metsäteollisuuden sivutuotteet (yleisimpänä mustalipeä), masuuneissa syntyvät kaasut ja erilaiset koksit.

Ilmavirrat likaavat lämpöpintoja tyypillisesti silloin, jos ne kuljettavat mukanaan joko pinnoille kertyviä pienhiukkasia tai aineita, jotka edistävät korroosiota. Hiukkasia voi esiintyä esimerkiksi teräs-, tekstiili-, paperi- ja sellutehtaiden ilmassa.

Prosessin ulkopuoliset vesi- ja höyryvirrat ovat yleensä kattilan tai muun prosessiin lämpöä tuovan lämmönvaihtimen syöttövetä sekä lauhduttimessa tai muussa jäähdyttävässä lämmönvaihtimessa virtaavaa jäähdytysvettä. Syöttöveden

laadulla on suuri merkitys lämpöpintojen hyvän lämmönsiirtokyvyn säilymiselle, ja sitä voi parantaa veden käsittelyn avulla.

Jäähdytysvetenä käytetään puolestaan usein joista, järvistä tai merestä saatavaa luonnonvettä prosessin veden kulutuksen hillitsemiseksi. Luonnonvesivirtojen ongelma on erityisesti biologinen likaantuminen, jossa pieneliöt (esim. levät ja bakteerit) kertyvät lämmönsiirtopinnoille.

Ongelmalliset lämpövirrat prosessin sisällä

Tyypilliset teollisuusprosessien sisäiset ja ongelmalliset lämpövirrat liittyvät yleensä

- lämmön talteenottoon likaisista ainevirroista (esim. tyypillisen väliaineen, kuten veden, sisältämät kemikaalit tai muu ”ylimääräinen” aines, epätavallinen väliaine jne.),
- likaisten ainevirtojen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen tai
- likaisiin poltettavaksi kelpaaviin prosessin sivutuotteisiin.

Tyypillisiä epäpuhtauksien aiheuttajia ovat mm.

- elintarviketeollisuuden ainevirtojen rasva, bakteerit ja biologiset nesteet
- tekstiiliteollisuuden kemikaalit ja nukka
- sellun valmistuksessa käytettävät kemikaalit sekä sellu- ja paperikoneiden kuivatusosan poistoilman sisältämä pöly ja kuidut
- kemianteollisuudessa syntyvät jätokaasut ja nesteet sekä käytettävät kemikaalit ja raaka-aineet
- öljynjalostuksen erotusprosesseissa syntyvät poltettavaksi kelpaavat sivutuotteet (esim. asfalteeni) ja raakaöljyn sisältämät epäpuhtaudet (esim. liete) sekä
- sementti- ja metalliteollisuudessa suoran kuumentamisen seurauksena muodostuvat epäpuhtaat lämpimät kaasut ja ilmavirrat sekä lämmitettävien materiaalien epäpuhtaudet.

Esimerkkejä lämmönsiirron kannalta ongelmallisista prosesseista teollisuudessa ovat mm.

- titaanioksidipigmentin valmistus
- mustalipeän haihdutus
- erilaisten prosessien jäähdytys meri-, järvi- ja jokivedellä
- nikkelintuotannon sivutuotteena saatavan ammoniumsulfaatin kiteyttäminen sekä
- raakaöljyn esilämmitys.

Etenkään järvi- ja jokivettä jäähdytysaineena käyttäviä lämmönvaihtimia ei mitata usein, joten tehostamispotentiaalia on todennäköisesti runsaasti. Tilanne on sama myös sellu- ja paperikoneiden kuivatusosien lämmön talteenotoissa.

LÄÄKKEEKSI SUUNNITTELU, ENNALTAEHKÄISY JA PUHDISTUS

Lämmönvaihdinten energiatehokkuuteen voi vaikuttaa

- hyvällä suunnittelulla
- ongelmien ennaltaehkäisyllä (esim. vedenkäsittely ja ainevirtojen suodattaminen) sekä
- käytön- ja huollon aikaisella puhdistamisella.

Suunnittelussa huomio kannattaa kiinnittää

- lämmönvaihtimen tyypin ja materiaalien valintaan
- mitoitukseen
- puhdistusjärjestelmien ja -mahdollisuuksien suunnitteluun.

Tärkeitä suunnitteluperusteita ovat

- Virtaavien aineiden ominaisuudet, kuten
 - lämpötilat
 - paineet
 - virtausmäärät
 - likaamis- ja korroosiotaipumukset
- Haluttu energiatehokkuustaso eli rekuperaatioaste ja sallitut painehäviöt
- Elinkaarikustannukset (esim. suuri investointi ja pienet käyttökustannukset vs. pieni investointi ja suuret käyttökustannukset)
- Käytön, kunnossapidon ja puhdistamisen järjestelyt.

Hyvä suunnittelu auttaa tekemään lämmönvaihtimesta mahdollisimman energiatehokkaan. Tyypillisiä keinoja ovat mm. virtauskenttien ja -nopeuksien muuttaminen, lämmönsiirto- ja -alujen kasvattaminen sekä erilaiset materiaalivalinnat. Tehokkuusparametrien ohella täytyy miettiä, miten ennaltaehkäistä likaantumista, jotta energiatehokkuus säilyisi hyvänä mahdollisimman kauan ennen tarvetta huoltoseisokille. Lisäksi tulee pohtia esimerkiksi lämmönvaihtimen sijoittamista, ympäröiviä tiloja, eri puhdistusmenetelmien ja -välineiden sopivuutta, jotta myös puhdistaminen (joko huoltoseisokin tai käytön aikana) olisi mahdollisimman helppoa.

Tarkastele koko elinkaaren aikaisia kustannuksia

Suunnitteluun liittyvät keinot tarkoittavat käytännössä suurempia investointikustannuksia. Kustannusmielessä on päätettävä, valitaanko kalliimmat investointikustannukset ja halvemmat käyttökustannukset vai päinvastoin.

Putkilämmönvaihtimet ovat kuitenkin edelleen yksi yleisimmistä lämmönvaihdintyypeistä teollisuudessa, vaikka ne likaantuvat helposti. Monimutkaisissa prosesseissa lämmönvaihdinten likaantumiskustannuksia voi olla hankala määrittää. Tämän vuoksi kalliimmalle investoinnille voi olla hankala laskea takaisinmaksuaikaa, kun likaantumisen ja puhdistamisen aiheuttamat kalliimmat käyttö- ja energiakustannukset sulautuvat muihin kustannuksiin ja tulevat kuitenkin huomioiduksi tuotteiden tai valmisteiden hinnoissa.

Kustannuksia kannattaa kuitenkin aina miettiä koko elinkaaren ajalta, eikä minimoida pelkkää investointia. Suomessa työvoima on kallista, minkä vuoksi kalliimpi investointi maksaa itsensä usein takaisin vähentyneen puhdistustarpeen kautta säästyneinä työvoimakustannuksina. Elinkaarikustannukset ovat tapauskohtaisia.

Esimerkki:

Investointi maksaa 50 000 € enemmän, mutta jo 600 euron kuukausisäästö tuottaa positiivisen nettonykyarvon halvempaan investointivaihtoehtoon verrattuna, kun laskentakorko on 3 % ja tarkastelu aika 10 vuotta.

Myös puhdistamista ja ongelmien ennalta ehkäisemistä voi lähestyä eri tavoin. Toinen ääripää on käyttää runsaasti ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä, kuten vedenkäsittelyä ja käytönaikaista puhdistusta, jopa varmuuden vuoksi. Toisessa ääripäässä lämmönvaihdinta on käytössä likaantumisen huolimatta niin kauan kuin mahdollista, minkä jälkeen se poistetaan käytöstä perusteellisen puhdistuksen ajaksi.

MITTAA, ANALYSOI JA SEURAA LÄMMÖNSIIRRON TEHOKKUUTTA

Jatkuva mittaaminen ja seuranta on oleellinen osa energia- ja tehokkuutta, sillä se saattaa olla monessa tapauksessa ainoa keino huomata esimerkiksi mitättömältä tuntuva muutos, jolla on merkittävä kustannusvaikutus.

Lämmönvaihtimien energiatehokkuutta voi tarkkailla mittaamalla

- virtojen lämpötiloja,
- painehäviöitä sekä
- siirtynyttä lämpötehoa

ja analysoida niiden perusteella lämmönsiirtokertoimen muuttumista.

Yksinkertaisempia menetelmiä ovat esimerkiksi yhden suureen, kuten painehäviön tai jäädytettävän ainevirran loppulämpötilan, jatkuva mittaaminen ja vertaaminen tunnettuun tilanteeseen, jossa energiatehokkuus on hyvä. Mikäli energiatehokkuuden heikkenemisen syy on lämmönsiirtopintojen likaantuminen, voi myös olla järkevää ottaa likanäytteitä. Näin ymmärrys lämmönsiirron heikkenemisen perimmäisistä syistä kasvaa, mikä auttaa valitsemaan puhdistusmenetelmät aiempaa paremmin.

Teollisuudessa on jatkuvia prosesseja, joissa lämpöä otetaan talteen virrasta, jonka massavirta voi olla satoja kiloja sekunnissa.

Esimerkiksi veden virtauksella 200 kg/s ainoastaan reilun yhden celsiusasteen ero tarkoittaa jo lähes megawatin lämpötehon muutosta. Jos vastaava lämpötehon menetys tarvitsee kompensoida esimerkiksi kevyttä polttoöljyä polttamalla, jo pelkkä polttoainekustannus nousee tuhansiin euroihin vuorokaudessa.

Mittaamisella ja seurannalla on mahdollista huomata heikentynyt lämmönsiirto ajoissa, ilman lämmönvaihtimen käytöstä poistoa.

ONGELMAT LÄMMÖNSIIRROSSA HEIKENTÄVÄT ENERGIA TEHOKKUUTTA

LIKA SYÖ LÄMMÖNSIIRTOKERROINTA JA LÄMPÖTEHOA

Kun tarkastellaan lämmön siirtymistä kahden eri ainevirran välillä (kuva 1), joista

- toinen virtaa putkessa ja toinen sen ulkopuolella
- putken seinämän molemmilla puolilla on likakerros

voi kaavassa $\phi = \dot{m}c_p \Delta T = U\Delta T_{in}$ olevalle kokonaislämmönsiirtokertoimelle U johtaa lausekkeen

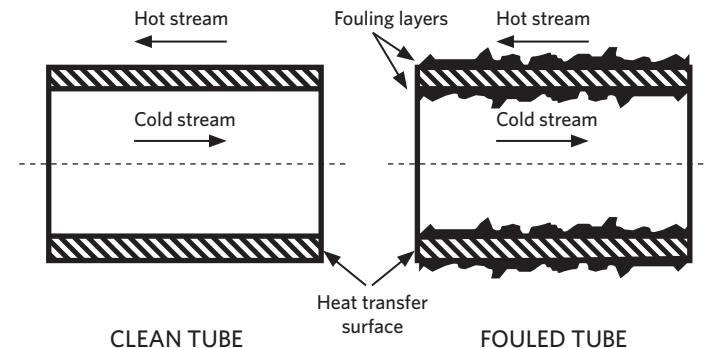
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_s} + R_{fs} + \frac{r_s \ln(r_u/r_s)}{\lambda} + \frac{A_s}{A_u} \left(R_{fu} + \frac{1}{\alpha_u} \right) \quad (\text{Hammo 1994})$$

missä	α_s	on putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin [W/(m²K)]
	R_{fs}	on putken sisäpinnan likavastus [m²K/W]
	r_u	on putken ulkosäde [m]
	r_s	on putken sisäsäde [m]
	λ	on putkimateriaalin lämmönjohtavuus [W/(mK)]
	A_s	on putken sisäpinnan pinta-ala [m²]
	A_u	on putken ulkopinnan pinta-ala [m²]
	R_{fu}	on ulkopinnan likavastus [m²K/W]
	α_u	on putken ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin [W/(m²K)].

Likavastus tarkoittaa likakerroksen aiheuttamaa lämpövastusta, jonka voi määrittellä lausekkeena samoin kuin mikä tahansa muunkin lämpövastuksen

$$R = \frac{\delta}{\lambda}$$

missä	δ	on likakerroksen paksuus [m]
	λ	on likakerroksen lämmönjohtavuus [W/(mK)].

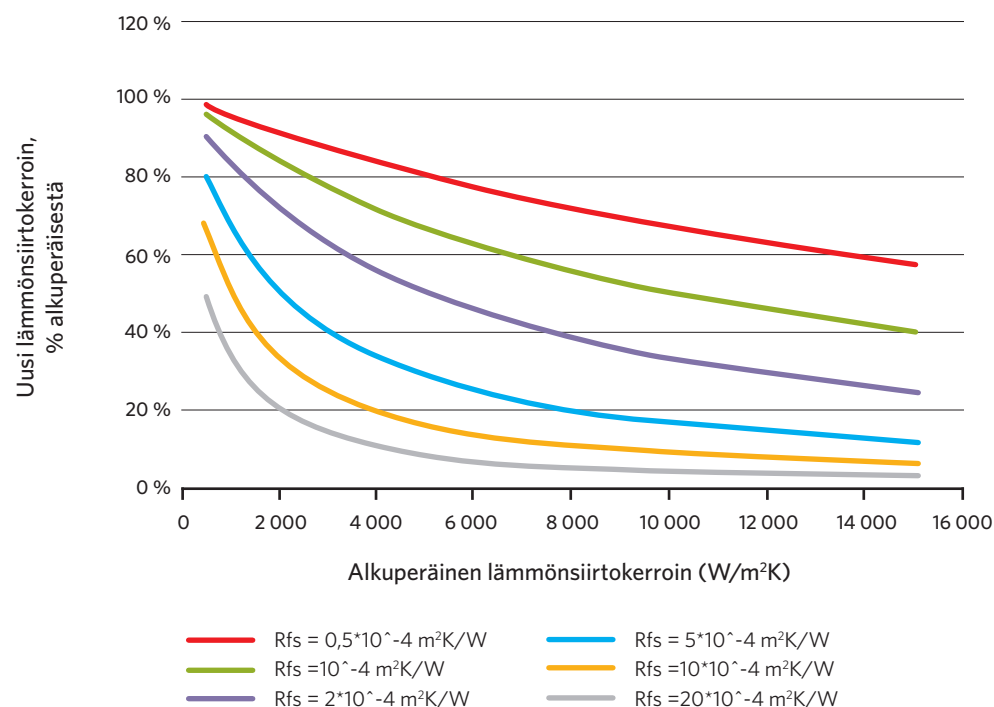


Kuva 1 Putkilämmönvaihtimen lämmönsiirtopinnat ilman likakerroksia ja niiden kanssa (Belmiloudi 2011).

Taulukko 1 Virtaavien aineiden aiheuttamia tyypillisiä likavastuksen arvoja levy- ja putkilämmönvaihtimissa (Belmiloudi 2011).

Virtaava aine	Likavastus ($10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$)	
	Levylämmönvaihdin	Putkilämmönvaihdin
Pehmennetty vesi	0,018	0,18-0,35
Jäähdytystornin jäähdytysvesi	0,044	0,18-0,35
Merivesi	0,026	0,18-0,35
Jokivesi	0,044	0,35-0,53
Voiteluöljy	0,053	0,36
Orgaaniset liuottimet	0,018-0,053	0,36
Vesihöyry (puhdistetusta vedestä)	0,009	0,18

Kuva 2 Putkivirtauksen sisäpuolisen likavastuksen ($R_{f,s}$) vaikutus kokonaislämmönsiirtokertoimeen (Pöry).



Tarkkojen ohjearvojen määrittäminen likavastuksille on hankalaa, sillä likakerroksen paksuuteen ja lämmönjohtavuuteen vaikuttavat mm. kulunut aika, virtaavien aineiden ominaisuudet, lämmönvaihtimen rakenne ja käyttöolosuhteet. Likavastuksen yleisin suuruusluokka on $10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$, mutta esimerkiksi puhtaan veden ja levylämmönvaihtimen tapauksessa $10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$. Taulukossa 1 on esitetty joitain tyypillisiä likavastuksen arvoja erilaisille virtaaville aineille levy- ja putkilämmönvaihtimissa. Käytännössä todelliset arvot voivat poiketa merkittävästikin taulukossa esitetyistä.

Jo erittäin ohut likakerros heikentää lämmönsiirtoa merkittävästi.

Kuvassa 2 on havainnollistettu pelkän putken sisäpuolisen likavastuksen ($R_{f,s}$) vaikutusta kokonaislämmönsiirtokertoimeen. Oletuksena on, että putken sisäpuolinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin pysyy vakiona. Todellisuudessa sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin kasvaa hieman, sillä massavirran pysyessä vakiona virtausnopeus kasvaa likakerroksen aiheuttaman halkaisijan pienentymisen vuoksi. Myös likakerros yleensä karhentaa lämmönsiirtopintaa lisäten turbulenssia. Tätä ei yleensä huomioida erikseen, vaan sen ajatellaan sisältyvän likavastuksen arvoon (Shah ja Sekulic 2007). Kuvan 2 perusteella voi todeta, että likaantumisen ja erityisesti likavastuksen arvolla on huomattava vaikutus lämmönsiirtokertoimeen ja siirtyneeseen lämpötehoon jo melko pienilläkin alkuperäisen lämmönsiirtokertoimen arvoilla.

Yleispätevän kaavan esittäminen lämmönvaihtimen läpi saatavan lämpötehon heikkenemisestä on käytännössä mahdotonta, sillä lämpötehoon vaikuttaa lämmönsiirtokertoimen lisäksi myös ns. logaritminen lämpötilaero, joka riippuu virtaavien aineiden keskinäisistä lämpötilaeroista. Lämpötehon heikkeneminen on aina tapauskohtaista. VDI Heat Atlaksessa (1993) on esitetty todellinen tapaus, jossa erään raakaöljyn esilämmitykseen käytetyn putkilämmönvaihtimen läpi siirtyvän lämpötehon huomattiin laskevan 57 prosenttia ensimmäisten kuuden kuukauden aikana puhdistuksen jälkeen, kun virtaukset pidettiin vakioina.

Lämpötehon heikkenemistä voi kompensoida tiettyyn raajaan asti nostamalla virtausnopeuksia, jolloin niiden konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet paranevat. Tällöin painehäviö kuitenkin kasvaa melko voimakkaasti, ja energiatehokkuus heikenee jälleen. Virtausnopeuksia ei myöskään voi nostaa rajattomasti mekaanisten rajoitteiden vuoksi. Esimerkiksi putkilämmönvaihtimien kohdalla se saattaa aiheuttaa putkien värähtelyä.

KASVAVA PAINEHÄVIÖ LISÄÄ PUMPPAUS- TAI PUHALLUSTARVETTA

Pelkkä lämmönsiirtopinnoille muodostunut likakerros lisää jo itsessään pinnan karheutta ja pienentää virtauksen poikkipinta-alaa, mikä aiheuttaa välittömästi aiempaa suuremman painehäviön. Lisäksi likakerroksen takia huonontunut lämmönsiirron mahdollinen kompensointi nostaa painehäviötä entisestään. Jotta lämmönsiirtopintojen läpi saataisiin menemään sama lämpövirta kuin ilman likakerrosta, on virtausnopeutta nostettava, mikä puolestaan kasvattaa painehäviötä eksponentiaalisesti. VDI Heat Atlaksen (1993) mukaan yleisin syy lämmönvaihtimen puhdistamiselle on useimmiten nimenomaan kohonnut painehäviö eikä huonontunut lämmönsiirto, jonka voi kompensoida tiettyyn rajaan asti virtausnopeuksia nostamalla.

Yleensä pumppaukseen tai puhallukseen käytetään sähköä, jolloin painehäviön aiheuttama sähköteho on

$$P = \frac{\dot{m} \Delta p}{\rho \eta}$$

missä	P	on sähköteho [W]
	\dot{m}	on virtaavan aineen massavirta [kg/s]
	Δp	on painehäviö [Pa]
	ρ	on virtaavan aineen tiheys [kg/m ³]
	η	on pumppauksen tai puhalluksen kokonaishyötysuhde [-].

Pumppauksen tai puhalluksen energiatehokkuus riippuu lineaarisesti painehäviöstä, jos hyötysuhde ja tiheys pysyvät vakiona. Yleensä muutos on kuitenkin hieman suurempi, sillä usein pumppun tai puhaltimen hyötysuhde heikkenee. Likaantumisen aiheuttaman painehäviön kasvun tarkka määrittäminen on hankalaa ja riippuu lämmönvaihtimen tyypistä. Shah ja Sekulic (2007) esittävät yleiselle tilanteelle eli putkivirtaukselle seuraavan kaavan, kun massavirta pysyy vakiona:

$$\frac{\Delta p_f}{\Delta p_c} = \left(\frac{f_f}{f_c} \right) \left(\frac{D_c}{D_f} \right)^5$$

missä	Δp_f	on likaantuneen putken painehäviö
	Δp_c	on puhtaan putken painehäviö
	f_f	on likaantuneen putken kitkavastus
	f_c	on puhtaan putken kitkavastus
	D_c	on puhtaan putken sisähalkaisija
	D_f	on likaisen putken sisähalkaisija.

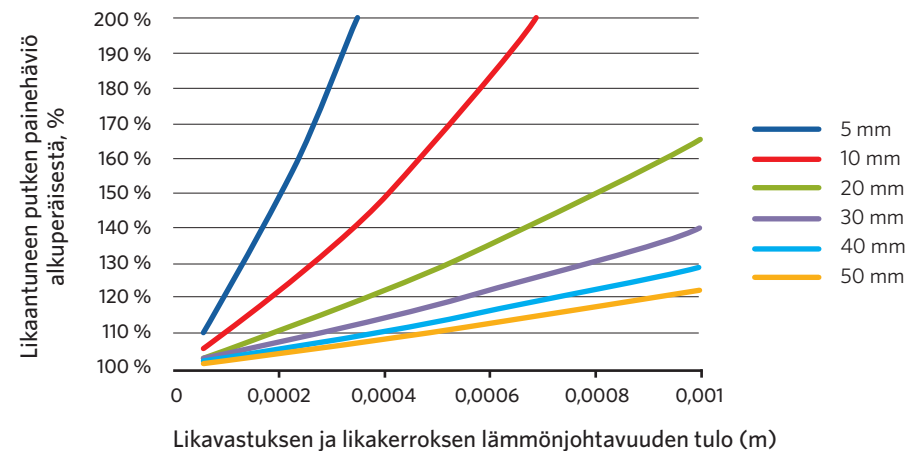
VDI Heat Atlaksessa (1993) on myös esitetty lauseke likaisen putken sisähalkaisijan arvioimista varten

$$D_f = D_c \exp \left(\frac{-2\lambda_f R_f}{D_c} \right)$$

missä	R_f	on putken sisäpinnan likavastus
	λ_f	on likakerroksen lämmönjohtavuus.

Eri likakerrosten lämmönjohtavuuden arvot vaihtelevat tyypillisesti välillä 0,5-2,9 W/(m²K) (Hammo 1994). Tyypillinen likavastuksen suuruusluokka on 10⁻⁴ m²K/W, joten myös tulo $\lambda_f R_f$ on samassa suuruusluokassa.

Kuva 3 havainnollistaa miten pelkkä likaantumisen aiheuttama putken sisähalkaisijan pieneneminen vaikuttaa painehäviöön. Oletuksena on, että virtauksen kitkavastus ei muutu merkittävästi likaantumisen myötä. Todellisuudessa painehäviö on suurempi, sillä likakerros ei ole jakautunut tasaisesti putken seinämälle, kuten kaavojen yhteydessä on oletettu, ja se nostaa myös kitkavastuksen arvoa.



Kuva 3 Putkivirtauksen likaantumisen aiheuttaman halkaisijan pientymisen vaikutus painehäviöön tyypillisellä likavastuksen ja likakerroksen lämmönjohtavuuden tulon vaihteluvälillä sekä eri putkihalkaisijoilla. Todellinen painehäviö on suurempi likakerroksen epätasaisen jakautumisen ja sen aiheuttaman kitkavastuksen suurenemisen vuoksi (Pöyry).

Painehäviöt kasvavat helposti merkittäviksi likakerroksen muodostumisen myötä, etenkin pienissä putkissa. Pumppujen ja puhaltimien lisäenergian tarve riippuu lineaarisesti painehäviöstä, jos virtaavan aineen tiheys ei muutu merkittävästi ja pumppauksen hyötysuhde pysyy likimain vakiona.

Vaikka sähkö on lämpöä kalliimpaa, sitä kuluu vähän lämmönvaihtimien läpi kulkeviin lämpömääriin verrattuna. Tästä syystä lisäsähkön taloudellinen vaikutus on useimmiten pienempi kuin menetetyn lämpötehon.

Esimerkki:

Erään lämmönvaihtimen tapauksessa likaantuminen aiheutti noin 57 prosentin eli yli 2 MW:n lämpötehon heikkenemisen. Lämmönvaihtimen rakenteen muuttamisen jälkeen putki- ja vaippapuolen painehäviöt nousivat moninkertaisiksi eli suuremmiksi kuin pelkän likaantumisen tapauksessa, mikä aiheutti noin 10 kW:n pumppaustehon nousemisen.

Jos oletetaan, että likaantumisesta aiheutuva keskimääräinen lämpötehon menetys käyttöjakson aikana oli aikaisemmin karkeasti puolet ja uudistuksen jälkeen noin neljännes edellä mainitusta 2 MW:sta, lisäsähkön tarve on noin 2 prosenttia säästetystä lämpöenergiasta.

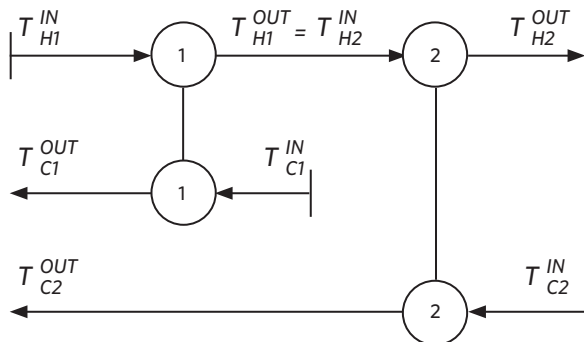
Tällöin sähkön kustannuksen tulisi olla noin 50-kertainen korvaavaan lämpöön verrattuna, mikä toteutuu erittäin harvoin.



ONGELMAT HEIJASTUVAT YMPÄRÖIVIIN PROSESSEIHIN

Tehtaan lämmönvaihtimia voi ajatella lämmönvaihdinverkkona, sillä teollisuusprosesseissa on käytännössä aina useampia lämmönvaihtimia. Tällöin yhdenkin lämmönvaihtimen likaantumisen merkittävä vaikutus koko verkkoon ja prosessiin. Asiaa voi havainnollistaa yksinkertaisen esimerkin avulla.

Kuvassa 4 on esitetty erittäin yksinkertainen lämmönvaihdinverkko. Jos esimerkiksi lämmönvaihdin numero 1 likaantuu ja sen lämmönsiirtoteho laskee, kylmän virran C1 suunniteltua vähäisemmän lämpenemisen lisäksi myös lämmönvaihtimelle 2 menevän virran H2 lämpötila nousee. Koska lämmönvaihtimen 2 kokonaislämmönsiirtokerroin voi ajatella pysyvän riittävällä tarkkuudella vakiona, sen siirtämä lämpöteho kasvaa virtojen suurentuneen lämpötilaeron vuoksi. Tämän vuoksi virta C2 lämpenee suunniteltua enemmän, ja todennäköisesti myös virran H2 loppulämpötila poikkeaa aiemmasta. Tässä esimerkissä ainoastaan lämmönvaihtimen 1 likaantuminen muutti jokaisen prosessista ulos lähtevän lämpövirran loppulämpötilaa.



Kuva 4 Esimerkki yksinkertaisesta lämmönvaihdinverkosta (Belmiloudi 2011).

Monesti likaantumisen aiheuttamaa lämmönvaihtimen tehokkuuden heikkenemistä kompensoidaan virtausnopeuksien nostamisella. Tämä voi kuitenkin osoittautua ongelmalliseksi

lämmönvaihdinverkon tapauksessa. Jos esimerkiksi kuvan virtojen C1 ja H1 virtausnopeuksia nostetaan lämmönvaihtimen 1 likaantumisen vuoksi, eikä muita säätöjä tehdä, lämmönsiirtokerroin paranee lämmönvaihtimessa 2, ja sen siirtämä lämpöteho kasvaa. Vaikka virran C1 ulostulolämpötila olisikin oikea, virtojen H2 ja C2 ulostulolämpötilat poikkeavat edelleen suunnitellusta.

LIKAANTUMISEN VAIKUTUKSET HUOLTO- JA KUNNOSSAPITO- TARPEESEEN

Lämpöpintojen likaantuminen ja sen aiheuttama energiatehokkuuden huonontuminen lieenee yleisin syy lämmönvaihtimien käytöstä poistamiselle ja puhdistamiselle. Vaikutukset huoltoon ja kunnossapitoon ovat merkittävät. Lämmönvaihtimien usein toistuva puhdistaminen voi tuntua kalliilta ratkaisulta tuntuvien huoltokustannusten vuoksi, mutta sen on osoitettu olevan usein kokonaistaloudellisesti edullisempaa kuin harvoin puhdistaminen. Ihanteelliseen puhdistusväliin toki vaikuttavat menetetyt energian ja puhdistuksen aiheuttamat kustannukset. Jo erittäin ohut likakerros heikentää lämmönsiirtoa merkittävästi. Vaikka lämmönvaihdinta voitaisiinkin käyttää pitkiä aikoja puhdistamatta, sen kokonaislämmönsiirtokerroin saattaa olla suurimman osan ajasta esimerkiksi vain puolet tai alle suunnitteluarvosta. Lisäksi mitä likaisempi lämmönvaihdin on, sen työlämpö on myös puhdistaminen.

Koska huolto ja kunnossapito vaativat lähes aina ihmistyötä ja puhdistuksessa käytetään myös erilaisia kemikaaleja ja laitteistoja, kustannuksien osuus on kuitenkin merkittävä myös suhteellisesti. VDI Heat Atlaksen (1993) mukaan tyyppillisessä prosessiteollisuudessa noin 15 prosenttia kaikista huolto- ja kunnossapitokustannuksista liittyy lämmönvaihtimiin ja kattiloihin. Likaantumisen ja energiatehokkuuden huonontumisen uskotaan selittävän luvusta ainakin puolet.

Yhden lämmönvaihtimen
likaantuminen
voi vaikuttaa haitallisesti
koko prosessiin.

Esimerkki:

Erään eurooppalaisen öljynjalostamon krakkausprosessissa on käytössä lämmönvaihdin, joka toimii jäähdyttimenä ja ottaa lämpöä talteen. Kun puhdistus tehtiin kahdesti vuodessa, likaantumisen ja puhdistamisen yhteisvaikutus vuotuisen siirrettyyn lämpömäärään oli noin 31 prosenttia. Kun puhdistuskertoja oli kerran kuukaudessa, vaikutus oli tippunut 12,5 prosenttiin. Ero vastasi lämpömääränä noin 1550 MWh. Lisääntyneiksi huoltokustannuksiksi arvioitiin noin 60 000 €, jolloin puhdistuksen lisäämisellä talteen saadun lämpöenergian hinnaksi tuli noin 39 €/MWh, mikä oli selvästi vähemmän kuin saman lämpömäärän tuottaminen öljyllä. (Alfa Laval)

MITTAA, SEURAA JA ANALYSOI LÄMMÖNSIIRRON ENERGIA TEHOKKUUTTA

HYÖTYÄ MITTAUKSISTA

Lämmönvaihtimien energiatehokkuuden luotettava seuranta on erittäin tärkeää, jotta suoritettavia toimenpiteitä voi parantaa ja saavuttaa kustannussäästöjä. Monesti käytönaikaista kemiallista puhdistusta tehdään liian usein ”varmuuden vuoksi”. Tällöin haittoina ovat tarpeettoman korkeat puhdistamiskustannukset ja mahdollinen riski lämmönsiirtopintojen ennenaikaisesta kulumisesta tai korroosiosta.

Toisaalta myös puutteellisen mittaroinnin aiheuttama liian harva puhdistus tuottaa ongelmia. Mikäli toimiin ryhdytään vasta, kun esimerkiksi painehäviöt ovat suuret tai lämmönsiirtokyky on heikentynyt huomattavasti, lämmönvaihdinta ei todennäköisesti voida enää puhdistaa ilman käytöstä poistamista. Tällöin myös yhtäjaksoinen käyttöaika on lyhyempi kuin ennaltaehkäisevästi puhdistettaessa.

Yleensä lämmönvaihtimen siirtämä lämpöteho laskee likaantumisen myötä. Mikäli näin ei käy, vaan heikentyneen lämmönsiirtokertoimen arvo on mahdollista nostaa aikaisemmalle tasolle virtausnopeuksia nostamalla, painehäviöt kasvavat. Joka tapauksessa likaantuminen aiheuttaa aina energiakustannusten nousua, mikä on kohtuullisen helppo määrittää. Lisäksi useiden mittarointikertojen avulla saa yleensä kohtuullisen tarkan mallin siitä, miten energiankulutus ja -kustannukset nousevat. Mittaroinnin tärkein tehtävä on auttaa käyttöhenkilöstöä päättämään, mikä on kustannusmielessä optimaalinen ajankohta poistaa lämmönvaihdin käytöstä puhdistusta varten tai suorittaa käytönaikaista puhdistusta.

AVAITUNNUSLUVUT SEURANTAAN

Tyypillisimpinä tarkkailtavia avaintunnuslukuja lämmönvaihdinten käytön aikana ovat:

Kriittisenä pidetty lämpötila

- Prosessin kannalta kriittisten virtojen lämpötiloja (esimerkiksi jäähdytettävä kohde) kannattaa ehdottomasti tarkkailla.

Lämmönsiirto

- Kun virtaukset pidetään vakiona, lämmön vaihtimen likaantuminen on mahdollista huomata aiempaa pienemmän siirtyvän lämpötehon perusteella. Mikäli lämmönsiirtokerrointen määrittäminen onnistuu helposti, likavastusta voi yrittää arvioida puhtaan ja likaisen lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerrointen avulla.

Painehäviö

- Lämmönsiirtopinnan likaantuminen vaikuttaa suoraan painehäviöön virtauskanavan pienentyneen poikkileikkausalan sekä lisääntyneen pinnankarheuden kautta.

Likakerroksen paksuus

- Muodostuvan likakerroksen paksuutta on järkevä mitata, jotta likaantumisen voi havaita ajoissa. Mittaus tapahtuu käytännössä optisesti tai resistiivisesti.

ERI TAPOJA SEURATA JA ANALYSOIDA

Lämmönvaihtimen energiatehokkuuden seurantaan ja analysointiin voi käyttää esimerkiksi seuraavia menetelmiä:

Lämmönsiirron analysointimenetelmä on ainoa tapa selvittää lämmönvaihtimen läpi kulkeva lämpöteho edes jollain tarkkuudella. Lämmönvaihtimen tyypistä riippuen on mahdollista määrittää myös logaritminen lämpötilaero kokonaislämmönsiirtokertoimen ja likavastusten arvioimista varten. Vaatimuksena on, että toisen virtauksen massavirta ja molempien virtauksien lämpötilat voi mitata. Menetelmä tarjoaa hyvät mahdollisuudet likaantumisen havaitsemiselle ajoissa sekä kokemuseräisten korrelaatioiden määrittämiselle.

Lämpötilan analysointimenetelmä mittaa yksittäistä kriittistä lämpötilaa, kuten esimerkiksi jäähdytettävän virran loppulämpötilaa. Etuina ovat helppous ja edullisuus. Menetelmä ei tosin korreloi suoraan lämmönvaihtimen likaantumisen ja energiatehokkuuden kanssa.

Lämpötilojen vertailumenetelmä vertaa kriittisenä pidetyn lämpötilan arvoja muiden lämpötilojen funktiona, kun lämmönvaihtimen energiatehokkuus on tunnetusti hyvä. Tällöin käytön aikana poikkeamat valvotuissa olosuhteissa mitatuista lämpötiloista antavat viitteitä energiatehokkuuden heikentymisestä. Menetelmän etuina ovat yksinkertaisuus ja edullisuus lämmönsiirronanalysointimenetelmään verrattuna ja parempi korrelaatio energiatehokkuuden kanssa verrattuna pelkkään lämpötilan tarkkailuun. Huono puoli on, että käyttötilanteessa energiatehokkuuteen voi vaikuttaa monia tekijöitä, jotka eivät sisälly vertailuarvojen mittaolosuhteisiin.

Painehäviön analysointimenetelmä on melko helppo toteuttaa. Ongelma on, että painehäviö ei suoraan kerro energiatehokkuudesta, ellei käytössä ole aiemmin mitattuja tai muuten kokemukseen perustuvia korrelaatioita.

Likakerroksen optinen tarkkailu onnistuu erilaisilla optisilla mittareilla tai sensoreilla. Hyvä puoli on likaantumisen havaitseminen ajoissa sekä tieto likakerroksen paksuudesta. Huonoja puolia voivat olla suurehkot kustannukset sekä mittaustulosten luotettavuus.

AVUKSI LIKANÄYTTEIDEN



ANALYSOINTI

Likanäytteiden analysointi lämmönvaihdivien huoltoseisokkien yhteydessä voi avata uusia mahdollisuuksia esimerkiksi likaantumisopeuksien ja -mekanismien määrittämiseksi sekä tunnistamiseksi. Kun likaantumismekanismi ymmärretään, puhdistuskemikaali osataan valita paremmin ja likaantumisen kemiallinen hillitseminen käytön aikana helpottuu.

Taulukko 2 Likakerrosten ominaisuuksia ja niiden tyypillisiä aiheuttajia (Hammo 1994).

Kerrostuman tyyppi tai suoritettu koe	Tyypillinen aiheuttaja
Samanlainen kerrostuma eri kohdissa	Liian pieni virtausnopeus ja/tai suuri lämpötila
Kova kerrostuma	Kiteytynyt suola, kemialliset reaktiot tai partikkelit
Lika muuttuu pölyksi kuivana	Pienet partikkelit
Huokoinen kerrostuma	Faasimuutokset (yleensä kiehuminen)
Kerros on sitkeä ja tervamainen	Polymeeriset tai orgaaniset aineet
Lima	Mikrobikasvusto
Lika liukenee veteen	Kiteytynyt likakerros
Vesi hajottaa likakerroksen	Partikkelit
Likakerros poreilee happoa lisättäessä	Kovat karbonaattisuolat tai biologinen kasvusto
Likakerros palaa hyvin	Orgaaninen aines
Likakerros höyrystyy lämmitettäessä	Biologinen kasvusto

RATKAISUJA LIKAISTEN JA ONGELMALLISTEN LÄMPÖVIRTOJEN LÄMMÖNSIIRTOON

Lämmönvaihtimen rakenne sekä käytetyt materiaalit ovat merkittävässä roolissa ongelmallisten lämpövirtojen hyödyntämisen onnistumisessa sekä huoltotarpeen minimoinnissa.

Yleisimmät lämmönvaihdintyyppit kaasumaiselle aineelle ja höyrylle

Yleisiä kaasumaisen aineen ja höyryn lämmönsiirtoon käytettäviä lämmönvaihdintyyppejä ovat ainakin

- perinteiset putkilämmönvaihtimet
- putkilämmönvaihtimet, joiden ohjauslevyt ovat spiraalimaiset ripaputkilämmönvaihtimet ja
- lamellilämmönvaihtimet.

Jos lämmönsiirtoon osallistuvan väliaineen paine on ympäristöä suurempi, sille soveltuvan lämmönvaihtimen on oltava paineastia. Lisäksi jos höyry tai kaasumainen aine ei lauhdu tai höyrysty, on lämmönsiirtopintaa oltava paljon kohtuullisessa tilassa nestevirtausta huonomman lämmönsiirtokertoimen vuoksi. Tämän vuoksi esimerkiksi levylämmönvaihtimia ei yleensä käytetä tällaisissa tapauksissa.

Yksi yleisimmistä teollisuuden lämmönvaihdintyypeistä on putkilämmönvaihdin. Vaippapuolella (shell side) virtaa höyry tai kaasu ja putkipuolella (tube side) yleensä neste. Perinteinen putkilämmönvaihdin soveltuu likaisille kaasu- tai höyryvirroille kohtuullisen hyvin oikeastaan vain silloin, kun ne virtaavat putkipuolella. Vaippapuolen puhdistaminen on haasteellista

ja se on taipuvainen likaantumiselle erityisesti käytettäessä ohjauslevyjä (baffle), joiden läheisyydessä virtausnopeus pienenee merkittävästi. Edellä mainituista syistä onkin kehitetty putkilämmönvaihdin, jossa ohjauslevyt ovat spiraalimaisia, jolloin vaippapuolen virtaus pysyy jatkuvasti nopeana ja turbulentsisena, mikä oleellisesti pienentää likaantumisriskiä.

Kun kaasumaisen aineen paine ei eroa ympäristön paineesta, tyypillisiä lämmönvaihdintyyppejä ovat ripaputki- ja lamellilämmönvaihtimet, jolloin neste, höyry tai kaasumainen aine virtaa putkissa, joihin on kiinnitetty ripoja tai lamelleja. Ripojen ja lamellien avulla kaasupuolen lämmönsiirtopintojen pinta-alaa on mahdollista kasvattaa lämmönvaihtimen koon pysyessä kohtuullisena. Tämä on tarpeellista nestevirtausta huonomman lämmönsiirtokertoimen vuoksi.

Likaisten lämpövirtojen tapauksessa ongelmiksi muodostuvat jälleen ripojen ja lamellien puhdistamisen hankaluus sekä mahdollisesti virtausnopeuden paikalliset alenemiset. Käytännössä ainoat lämmönvaihtimien suunnitteluun liittyvät keinot vähentää ripa- ja lamellipuolien likaantumista ovat pintojen harvennus ja virtausnopeuksien pitäminen suurina. Toisaalta lamellien ja ripapintojen on todettu likaantuvan hitaammin kuin pelkkien putkipintojen lähinnä lisääntyneen turbulenssin ansiosta.

Edellä mainittujen lämmönvaihdintyyppien lisäksi Spirax Oy on tuonut markkinoille nk. lämpöputkilämmönvaihtimen, jota on tosin käytetty myös aikaisemmin. Toimintaperiaate perustuu putkeen, jonka sisällä on sopiva määrä höyrystyvää ja lauhtuvaa nestettä. Putki kiinnitetään kuumaa ja kylmää lämpövirtoja erottavaan levyyn. Putken alaosa on upotettu kuumaan kaasuvirtaan, joka höyrystää putken sisällä olevan veden. Höyrystynyt vesi nousee putken yläosaan, joka

puolestaan on upotettu kylmään virtaan. Höyry lauhtuu lämpöputken sisällä, ja lämpöä siirtyy kylmään virtaan. Lämpöputkilämmönvaihdin soveltuu likaisille kaasuvirroille hyvin erittäin helpon puhdistettavuuden ansiosta.

Yleisimmät lämmönvaihdintyyppit nesteille

Yleisiä lämmönvaihdintyyppejä puhtaille ja likaisille nesteille ovat ainakin

- levylämmönvaihtimet
- edellä esitetyt putki-, ripaputki- ja lamellilämmönvaihtimet (neste virtaa putkipuolella) sekä
- kaavintalämmönvaihtimet.

Yleisin lämmönvaihdintyyppi siirrettäessä lämpöä nesteestä toiseen lienee levylämmönvaihdin, vaikka myös putkilämmönvaihtimia käytetään. Levylämmönvaihtimissa sopivasti aseteltujen ja muotoiltujen levyjen väliin muodostuu virtauskanavia, joissa kuuma- ja kylmäpuolen nesteet virtaavat yleensä toisiaan vastaan. Virtoja erottava seinämä on tyypillisesti erittäin ohut. Levylämmönsiirtimen etuja ovat hyvä kokonaislämmönsiirtokerroin, likakerrostumien muodostumista ehkäisevät voimakkaat leikkausjännitykset sekä melko helppo, vaikkakin työläs, puhdistaminen. Toisaalta ahtaiden kanavien riski on myös tukkeutuminen.

Mikäli neste sisältää huomattavan paljon ylimääräistä lämmönsiirtoa haittaavaa ainesta, voidaan käyttää myös nk. kaavintalämmönvaihdinta (scraped surface heat exchanger). Tyypillinen ratkaisu on lieriö, jonka keskellä sijaitsevassa putkessa kulkee puhdas ainevirta. Putken ulkoreunoilla on pyörivät lavat, jotka jatkuvasti sekoittavat

lieriön sisällä ja putken ulkopuolella virtaavaa likaista nestettä, jolloin sen sisältämä ylimääräinen aines ei pääse kiinnittymään putken ulkopinnoille ja haittaamaan lämmönsiirtoa yhtä merkittävästi kuin ilman lapoja.

Eri materiaalien soveltuvuus erilaisille virtaaville aineille ja olosuhteille

Oikeilla materiaalivalinnoilla voi vaikuttaa lämmönsiirtopintojen likaantumiseen, kulumiseen ja tiivisteiden kestävyys. Lämmönsiirtopintojen materiaalivalintoihin vaikuttavat mm.

- virtaavan aineen koostumus
- lämpötila
- virtausnopeus
- pH sekä
- mahdollinen ylimääräinen aines, kuten partikkelit.

Virtaavan aineen olomuoto (neste/kaasu) vaikuttaa lähinnä mekaaniseen kestävyys. Käytetyimmät hiiliteräkset ja muut erilaiset teräseokset kestävä mekaanisen rasituksen hyvin. Taulukon 2 alkuosassa on esitetty tyypillisesti käytettäviä teräksiä eri lämpötila-alueilla, kun mekaaninen kestävyys on ainoa huomioitava asia.

Materiaalivalinnoilla voi vaikuttaa erityisesti korroosio- likaantumiseen ja biologiseen likaantumiseen. Korroosiota kestäviä materiaaleja ovat esimerkiksi erilaiset ruostumat- tomat teräkset, titaani ja metalliseokset, joiden sisältämiä tyypillisiä seosaineita ovat esimerkiksi nikkeli, kromi ja molybdeeni. Erikoismateriaalien hinta on luonnollisesti huo- mattavasti eniten käytettyä hiiliterästä korkeampi. Taulukon 2 loppuosassa on esitetty tyypillisesti käytettyjä materiaaleja erilaisia korroosiota aiheuttavia käyttöympäristöjä varten.

Kupari vähentää biologista likaantumista huomattavasti, mutta sitä ei yleensä voida käyttää esimerkiksi korkeapai- neisissa voimalaitoksissa, sillä riskinä on kupariseosten mahdollisten korroosiotuotteiden päätyminen turbiiniin, jossa ne voivat aiheuttaa merkittäviä ongelmia. Lisäksi kupari

Taulukko 3 Tyypillisiä lämmönvaihdinmateriaaleja eri lämpötilatasoille sekä korroosiota aiheuttaviin ympäristöihin.

EI KORROOSIORISKIÄ	
Materiaali	Lämpötila-alue (oC)
Alumiini sekä austeniittinen kromi-nikkeliteräs	T < -100
Nikkeliteräs	-100 < T < -45
Hiiliteräs	-45 < T < 500
Kuumuutta kestäväällä materiaalilla päällystetty teräs tai kuumuutta kestävä teräs	T > 500
KORROSIIVISET OLOSUHTEET	
Materiaali	Tyypilliset käyttöolosuhteet
Hiiliteräs, alumiini	Vain lievästi syövyttävät fluidit kuten käsitelty jäähdytysvesi
Ferriittiset hiili-molybdeeni- ja kromi-molybdeeniseokset	Rikkiä sisältävät öljyt korkeissa (yli 300 oC) lämpötiloissa, vety korkeissa lämpötiloissa
Ferriittinen kromiteräs	Kohtuullisesti syövyttäviin olosuhteisiin, lisäksi päällysteeksi putkiin ja kanaviin, joissa rikkiä sisältävää öljyä
Austeniittinen kromi-nikkeliteräs (myös pinnoitteena)	Voimakkaasti syövyttävät olosuhteet
Kupariteräkset, alumiinimessinki, kuparinikkeli	Luonnonvedet
Korkean pitoisuuden nikkeli-kromi-molybdeeniteräkset	Mineraalihapot ja klooria sisältävät hapot
Titaani	Merivesi
Lasi	Ilman esilämmittimet
Pinnoitteet: alumiini, epoksihartsi lyijy ja kumi	Merivesi
Muovi	Teollisuuspoistojen LTO, alle 70 °C

on haitallista vesistöille. Titaanin on puolestaan todettu olevan ominaisuuksiensa puolesta hyvä materiaali käytet- täväksi luonnonvesien kanssa, mutta sen hinta on korkea.

Harvemmin käytetyistä materiaaleista (lasi, muovi, grafiitti tai teflon) valmistettujen putkien on todettu vähen- tävän likaantumista ja helpottavan puhdistamista, mutta niiden lämmönjohtavuus on selvästi perinteisiä materiaaleja huonompi. Se lisää lämmönsiirtopinta-alaa ja investoin- tikustannuksia. Lisäksi teflon ei sovi kaikille lämpötiloille.

Kompromissina voidaan käyttää myös lämmönvaihtimia, joissa perinteinen materiaali on pinnoitettu esimerkiksi lasilla (kuten emalilla), muovilla, grafiitilla tai polymeereillä.

Materiaalia valittaessa kannattaa myös pitää silmällä miten materiaali kestää tarvittavia puhdistusmenetelmiä. Vaikka nykyään tarjolla on erilaisia materiaalivaihto- ehtoja, perinteiset ruostumattomat ja hiiliteräkset ovat edelleen selkeästi yleisin valinta edullisuutensa vuoksi.

LIKAANTUMISEN MONET MEKANISMIT JA SYYT

Lämmönvaihtimien likaantumisessa ei-toivotut materiaalit kerääntyvät lämmönsiirtopinnoille. Likaantuminen vauhdittaa yleensä myös korroosiota ja eroosiota, mikä voi pahimmassa tapauksessa johtaa jopa lämmönvaihtimen vaurioitumiseen. Alla on lueteltu tyypilliset likaantumismekanismit, joita voi esiintyä monessa tapauksessa myös samanaikaisesti.

Hiukkaslikaantuminen

Hiukkaslikaantuminen on yksi yleisimmistä likaantumismekanismeista. Siinä lämpöpinnoille kerääntyy virtaavien aineiden sisältämiä partikkeleita. Mikäli hiukkaset ovat massaltaan suuria, ne voivat aiheuttaa likaantumisen lisäksi myös eroosiota eli lämpöpintojen mekaanista kulumista. Partikkeleita voivat olla esimerkiksi korroosiotuotteet, savi- ja mineraalihiukkasen luonnonvesissä, nokihiukkasen savukaasuissa sekä pölyhiukkasen ilmassa.

Saostuminen

Lämmönsiirtopinnoille saostuu lämpötilan muuttumisen seurauksena erilaisia sakoiksi kutsuttavia suoloja, jotka ovat alun perin liuenneina virtaaviin aineisiin eivätkä ”irrallaan”, kuten hiukkaslikaantumisen tapauksessa. Tyypillisesti lämpötilan laskeminen vähentää suolojen liukoisuutta, mutta joillain suoloilla tilanne on päinvastainen (engl. inverse solubility). Lämpötilan nousun seurauksena syntyviä saostumia kutsutaan usein kattilakiveksi, sillä ne ovat kovia sekä sitkeitä. Lämpötilan laskemisen aiheuttamat saostumat ovat lietettä, jotka ovat pehmeitä sekä puuromaisia. Tyypillisiä esimerkkejä saostuvista nesteistä ovat käsittelemätön merivesi ja muut suoloja sisältävät liuokset.

Kemiallinen likaantuminen

Kemiallisessa likaantumisessa virtaavat nesteet tai kaasut sisältävät alkuaineita tai yhdisteitä, jotka reagoivat keskenään. Reaktioiden seurauksena muodostuu sakkaa, joka tarttuu lämmönsiirtopinnoille. Itse lämmönsiirtopinta ei osallistu

reaktioon, mutta se voi toimia katalyyttinä. Esimerkkejä aineista, jotka aiheuttavat kemiallisesta likaantumisesta ovat petrokemiassa ja öljynjalostuksessa esiintyvät raaka-ainevirrat.

Korroosiolikaantuminen

Korroosiolikaantumisessa lämmönsiirtopinnan ja virtaavan fluidin välillä tapahtuu joko kemiallinen tai elektrokemiallinen reaktio, minkä seurauksena muodostuu ruostetta. Sen lisäksi, että ruoste haittaa lämmönsiirtoa korroosio kohdassa, se voi myös kulkeutua muualle ja aiheuttaa hiukkaslikaantumista. Korroosiolikaantumista esiintyy monessa sellaisessa paikassa, jossa esiintyy myös kemiallista likaantumista. Korroosio-ongelmia esiintyy etenkin fossiilisia polttoaineita käyttävissä kattiloissa, jos kemiallisesti muodostettua suojaavaa happikerrosta eli magnetiittia ei synny joka paikkaan tai se pääsee häviämään.

Biologinen likaantuminen

Biologinen likaantuminen tarkoittaa erilaisten makro- ja mikro-organismien kiinnittymistä ja kasvua lämmönsiirtopinnoilla. Mikro-organismeihin kuuluvat esimerkiksi levät, hiivat, sienet, homeet sekä bakteerit ja makroeliöihin simpukat, siimajalkaiset ja kasvillisuus. Käytännössä biologinen likaantuminen näkyy lämmönsiirtopinnassa biofilminä, joka on sitkeä ja tahmea. Tyypillisimmät biologisen likaantumisen esiintymispaikat ovat lämmönvaihtimet, joissa jäähdytykseen käytetään luonnonvesiä.

Jähmettyminen

Lämmönsiirtopinnalle voi muodostua kiinteä kerros myös jähmettymällä. Tällöin pinnan lämpötila laskee niin alhaiseksi, että joko virtaava aine itsessään tai jokin sen sisältämä useammasta komponentista jähmettyy.

Merkittävin lämmönsiirtopintojen likaantumiseen vaikuttava yksittäinen tekijä on yleensä virtaava aine. Jopa samaan

kemialliseen luokkaan kuuluvien nesteiden välillä voi olla huomattavia eroja. Esimerkiksi kevyet hiilivedyt (kuten bensiini), likaavat lämpöpintoja vain vähän, kun taas raskaiden hiilivetyjen (kuten öljynjalostuksessa krakkauksen seurauksena syntyvä pohjaöljy) likaamistaipumus on suuri. Voidaan kuitenkin todeta, että keskimäärin nesteet likaavat lämpöpintoja herkemmin kuin kaasumaiset aineet.

Virtausnopeus

Pääsääntöisesti virtausnopeuden kasvattaminen vähentää lämmönsiirtopintojen likaantumista, sillä pinnan leikkausjännitys kasvaa. Toisaalta liian suuret virtausnopeudet saattavat puolestaan edistää eroosiota.

Lämmönsiirtopinnan ja virtaavan aineen lämpötila

Lämpötilan vaikutus on tapauskohtaisempi kuin virtausnopeuden. Monet kemialliset reaktiot kiihtyvät voimakkaasti ja jotkut suolat saostuvat lämpötilan kohotessa. Toisaalta useimpien suolojen liukoisuus paranee. Korroosion osalta lämpötilalla ei ole suurta vaikutusta useimpien materiaalien tapauksessa, kun lämpötila on riittävän korkea. Oma lukunsa on kuitenkin matalalämpötilakorroosio, jossa esimerkiksi kaasumaisen aineen sisältämä rikki muodostaa lämpöpintoja voimakkaasti syövyttävää rikkihappoa, kun lämpötila alittaa nk. happokastepisteen. Biologinen likaantuminen on suurimmillaan noin 35 °C:ssa. Mikäli lämpötilaan voi vaikuttaa, yleisohjeena suositellaan matalia lämpötiloja. Lämpötilalla ei vaikuta olevan merkittävää vaikutusta hiukkaslikaantumiseen.

Lämmönsiirtopinnan materiaali

Materiaalilla on suuri vaikutus etenkin korroosioon sekä biologiseen likaantumiseen.

Lämmönsiirtopinnan karheus

Vaikka lämmönsiirtopinnan karheus yleensä lisää turbulenssia, sen on silti todettu edistävän likaantumista. Syynä pidetään

sileää pintaa suurempaa kontaktipinta-alaa sekä partikkelien helpompaa kiinnittymistä ja epätodennäköisempää irtoamista.

Lämmönsiirtoprosessi

Lämmönsiirtoprosessista on hankala vetää yleispäteviä johtopäätöksiä. Voidaan kuitenkin todeta, että jopa samojen aineiden likaantumiskäyttäytymiset voivat poiketa huomattavasti toisistaan riippuen siitä tapahtuuko lämmön siirtyminen esimerkiksi nestefaasissa vai kiehumalla tai kostean poistoilman tapauksessa kuivana vai kondensoitumalla.

Taulukko 4 Eri suureiden vaikutus nestevirtauksen likaantumiseen. (Shah ja Sekulic 2007).

Muuttuja	Saostuminen	Jähmettyminen	Hiukkaslikaantuminen	Kemiallinen likaantuminen	Korroosio	Biologinen likaantuminen
Lämpötila	↑↓	↓	↑↓↔	↑↓	↑↓	↑↓↔
Virtausnopeus	↓↔	↑↓	↓	↓	↑↓↔	↑↓
Liuoksen ylikylläisyys	↑	↑				
pH	↑		↑↓		↑↓	↑↓
Epäpuhtaudet		↓				
Ylim. aineen konsentraatio	↑	↑	↑			
Pinnan karheus	↑	↑	↑↔		↑↔	↑
Paine	↔	↔		↑	↑	↑↓
Happipitoisuus	↔	↔		↑	↑	↑↓

Taulukko 5 Eri suureiden vaikutus kaasuvirtauksen likaantumiseen. (Shah ja Sekulic 2007).

Muuttuja	Hiukkaslikaantuminen	Jähmettyminen	Kemiallinen likaantuminen	Korroosio
Lämpötila	↑↓	↓	↑	↑↓↔
Virtausnopeus	↑↓↔	↓	↑↓↔	↑↔
Epäpuhtaudet		↓		
Ylim. aineen konsentraatio	↑	↑		↑
Polttoaineen suhde ilmaan	↑		↑	
Pinnan karheus	↑↔			↑↔
Happipitoisuus	↔	↔	↑	
Rikkipitoisuus			↑	↑

↑ = edistää likaantumista

↓ = hidastaa likaantumista

↔ = vähäinen vaikutus

= asiaa ei ole tutkittu riittävästi/tulokset epä johdonmukaisia

MITEN VÄHENTÄÄ LIKAANTUMISTA?

Likaantumisongelmien vähentämisen keinot voi jakaa

- käytönaikaisiin toimenpiteisiin
- huoltoseisokin aikaisiin toimenpiteisiin (käytännössä lämmönvaihtimien perusteellinen puhdistaminen) sekä
- suunnittelun keinoihin.

Lämmönvaihtimien likaantumista voi estää ja energiatehokkuutta parantaa oikeanlaisella ajotavalla, käytönaikaisella puhdistamisella, olosuhteiden muuttamisella ja järjestelmän huolellisella huuhtelulla ennen käyttöönottoa. Yhtenä peruseriaatteena voi todeta, että lämmönvaihtimia kannattaa ajaa jatkuvasti täydellä lämpöteholla, jos se on mahdollista. Tällöin virtausnopeudet pysyvät suurina, mikä ehkäisee likaantumista ja energiatehokkuuden huonontumista. Jos lämpötilatasoihin voi vaikuttaa, yleisohje on pitää ne matalana.

PUHDISTUS, HUOLTO JA KUNNOSSAPITO AVAINASEMASSA

PUHDISTUS KÄYTÖN AIKANA

Käytönaikaiset keinot likaantumisen ja korroosion ennaltaehkäisemiseksi sekä lämmönvaihtimien puhdistamiseksi voi jakaa mekaanisiin ja kemiallisiin menetelmiin.

Mekaanisia menetelmiä:

- Virtaavan aineen mekaaninen suodattaminen mahdollisen ylimääräisen aineksen poistamiseksi. Tyypillisin suodattintyyppi on lieriömäisen suodatussihdin sisältävä putki. Sihtiä voi useimmiten puhdistaa esimerkiksi automaattisella kaapimella tai huuhtelemalla esimerkiksi korkeapaineisella vedellä joko virtaussuuntaan tai sitä vastaan. Edellä mainitun tyyppin lisäksi on mahdollista käyttää myös

yksinkertaisempaa suodatinta, joka on putkiston osana oleva lieriö. Virtausnopeus tippuu suodattimen kohdalla, jolloin kiinteä aines tippuu pohjalle tyhjentämistä varten.

Suodattimet soveltuvat esimerkiksi

- jäähdytysvesille
- geelihiukkasille
- poly- ja monomeereille
- jätevesille
- erilaisille prosessivesille
- öljyille ja rasvoille sekä
- kaukolämpövesille.

- Virtausnopeuden hetkellinen kasvattaminen poistaa likaa etenkin sellaisista lämmönvaihtimen kohdista, joissa nopeus pienenee paikallisesti. Näitä ovat esimerkiksi putkilämmönvaihtimen vaippapuolen jakolevyjen lähialueet.
- Korkeapaineisen kaasun, kuten paineilman, tai höyryn johtaminen lämmönvaihtimeen käytön aikana aiheuttaa hetkellisesti suuria leikkausjännityksiä likakerroksien pinnalle. Kaasumaisten lämmönsiirtoon osallistuvien aineiden yhteydessä puhutaan yleensä nuohouksesta etenkin kattilatekniikassa.
- Muita mahdollisia menetelmiä ovat esimerkiksi erilaisten esineiden, kuten kierteisten metallilankojen sijoittaminen putkiin turbulenssin ja leikkausjännitysten kasvattamiseksi sekä jonkin puhdistavan aineen, kuten hiekan tai esimerkiksi karkeasta vaahtomuovista valmistettujen puhdistuspallojen (engl. sponge balls), kierrättäminen likakerrosten irrottamiseksi. Nämä menetelmät vaativat kuitenkin huomattavia erikoisjärjestelyjä. Esimerkiksi erillisen kierrätysjärjestelmän asentaminen jälkikäteen saattaa olla hankalaa, ja myös uuden lämmönvaihtimen yhteydessä kustannukset voivat olla huomattavat. Investointi voi olla kuitenkin kannattava,

mikäli likaantuminen on vakava ja suuria kustannuksia aiheuttava ongelma.

Kemialliset menetelmät tarkoittavat likakerrosten poistamista tai likaantumisolosuhteiden muuttamista erilaisten kemiallisten yhdisteiden avulla sekä virtaavan aineen esipuhdistusta kemiallisin reaktion.

Kemiallisia menetelmiä:

- Saostumien muodostumista voi vähentää tehokkaasti vastaavanlaisella ioninvaihdolla kuin voimalaitoksen vedenkäsittelyssä. Huonoja puolia ovat kuitenkin kalliit investointi- ja käyttökustannukset. Halvempia keinoja ovat pH:n pitäminen riittävän korkealla esimerkiksi rikkihapon avulla (pH yleensä noin 6,5-7,5 tai korroosiota kestävien materiaalien tapauksessa enemmän) tai saostumista estävien yhdisteiden lisääminen (kuten esimerkiksi polyfosfaatit kalsiumkarbonaatin saostumisen estämiseksi).
- Hiukkaslikaantumisen aiheuttamaa partikkelikerrosta voi heikentää ja hajottaa dispergointiaineilla.
- Tyypillisimmät yhdisteet kemiallisen likaantumisen hillitsemiseksi ovat antioksidantit (hapon kiihdyttämiä reaktioita varten), metalleja deaktivoivat yhdisteet (engl. metal deactivators, kemialliset reaktiot, joissa metallit toimivat katalyyttinä) sekä myös hiukkaslikaantumisen yhteydessä mainitut dispergointiaineet, jotka estävät liukenemattomia reaktiivisia partikkeleita (kuten polymeerejä) yhdistymästä suuremmaksi yhtenäiseksi alueeksi ja kiihdyttämästä kemiallisia reaktioita.
- Biologisen likaantumisen hillitsemiseksi on tyypillisesti käytetty klooria, joka muodostaa veden kanssa reagoidessaan

hypokloorihapoketta (HOCl) estäen solujen energian tuotantoa. Kloorin huonoja puolia ovat esimerkiksi tarve jatkuvalle lisäämiselle sekä mahdollinen korroosion edistäminen ainakin joidenkin teräslaatujen tapauksessa. Muun muassa näistä syistä klooria on alettu korvata muilla kemikaaleilla, kuten kloorifenoleilla.

- Korroosiota voi hillitä materiaalivalintojen lisäksi kemiallisesti erilaisilla inhibiittoreilla, jotka estävät tai hidastavat elektrokemiallisia korroosioreaktioita. Toisaalta ne voivat joissain tapauksissa edistää saostumien muodostumista lähtien virtaavan aineen kokonaissuolapitoisuutta. Korroosiota voi vähentää myös muuttamalla ympäristön olosuhteita vähemmän syövyttäväksi esimerkiksi poistamalla vedestä happea, hiilidioksidiä, ioneita ja mineraaleja vedenkäsittelyn avulla tai päällystämällä syöpyvä materiaali korroosiota kestävällä pinnoitteella.

PUHDISTUS KÄYTTÖJAKSOJEN ULKOPUOLELLA

Useissa teollisuusprosesseissa likaantuminen voi edetä tai sen annetaan tietoisesti edetä niin pitkälle, että lämmönvaihdin täytyy poistaa käytöstä perusteellisen puhdistamisen ajaksi. Puhdistustavat voi jakaa mekaanisiin ja kemiallisiin menetelmiin.

Mekaaniset menetelmät

Seisokin aikana yleisin tapa lämmönsiirtopintojen puhdistamiseen on peseminen korkeapaineisella vedellä tai höyryllä. Myös hankaavia aineita, kuten hiekkaa, voi käyttää höyryn tai veden joukossa. Putkien sisäpintojen osalta voi käyttää esimerkiksi korkeapaineiden veden mukana lähetettäviä kumisia tai

metallisia kaapimia (scrapers). Veteen ja höyryyn liittyvät puhdistustavat ovat yleensä turvallisia, mutta menetelmissä, joissa jokin kiinteä aine hankaa lämmönsiirtopintoja, on riskinä itse pintojen sekä myös mahdollisen korroosiolta suojaavan oksidi- tai muiden suojaavien kerrosten kuluminen. Muita tyypillisiä menetelmiä ovat lähinnä kuivajää- ja ultraäänipuhdistus. Kuivajääpuhdistuksessa rakeinen hiilidioksidi muuttuu kaasuksi osuessaan puhdistettavaan pintaan, ja se on vähemmän kuluttava kuin perinteiset mekaaniset menetelmät. Ultraäänipuhdistus perustuu nesteeseen syntyvien kuplien luhistumiseen paineen vaikutuksesta, mikä saa likakerroksen hajoamaan. Myös ultraäänipuhdistus on lämpöpinnoille turvallisempi vaihtoehto kuin perinteiset mekaaniset menetelmät. Lisäksi nykyjärjestelmiä voi asentaa prosessin yhteyteen, jolloin lämmönvaihdinta voi ajaa pitkiä aikoja hyvällä hyötysuhteella ilman tarvetta huoltoseisokille. Huonona puolena on toimivuus ainoastaan nesteessä sekä toimivuuden riippuvuus nesteen ominaisuuksista.

Kemialliset menetelmät

Kemialliset menetelmät lämmönvaihtimien puhdistamiseksi huoltoseisokin aikana tarkoittavat käytännössä erilaisten liuotimien käyttöä. Edut verrattuna mekaanisiin menetelmiin ovat:

- Ei riskiä mekaanisesta vaurioitumisesta.
- Voidaan käyttää paikoissa, joihin ei mekaanisilla menetelmillä päästä.
- Puhdistus on yleensä mekaanisia menetelmiä nopeampaa.
- Työvoimaa tarvitsee vähemmän.

Kemiallisen puhdistuksen huono puoli on, että liian tehokkaat liuottimet voivat vakavasti vahingoittaa lämpöpintoja ja tiivisteitä esimerkiksi syövyttämällä. Tämän vuoksi liuotimien käytön tulee perustua joko kokemukseen tai asiaan erikoistuneiden ammattilaisten ohjeisiin.

Tyypillisiä kemiallisesti poistettavia ja orgaanisia likakerroksia ovat mm.

- öljyt
- rasvat
- vahat
- pehmeät hiilivedyt
- terva
- erilaiset pienhiukkaset
- polymeerit
- hartsit
- maalit ja
- biologinen aines.

Epäorgaanisia poistettavia aineita ovat esim.

- ruoste
- magnetiitti
- kalsiumkarbonaatti
- kalsiumsulfaatti
- kalsiumfosfaatti
- magnesiumhydroksidi
- magnesiumsilikaatti
- piidioksidi
- kupari
- kuparioksidi
- alumiinioksidi ja
- nikkelioksidi.

Taulukossa 6 on esitetty tyypillisiä liuottimia ja esimerkkejä käyttökohteista.

Taulukko 6 Joitain tyypillisiä kemiallisia liuottimia lämpöpintojen puhdistukseen (VDI Heat Atlas 1993).

Liuotin	Esimerkki käyttökohteesta	Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen N:o 1272/2008 mukaiset varoitusmerkinnät ja vaaralausekkeet
Hydrokloorihappo	Ruosteen ja metallihilseen irrotus metalliputkista	Syövyttävä Haitallinen / ärsyttävä / herkistävä / vaarallinen otsonikerrokselle
Inhibioitu (korroosiota aiheuttamaton) suolahappo (HCl)	Sama kuin edellinen	Syövyttävä Haitallinen / ärsyttävä / herkistävä / vaarallinen otsonikerrokselle
Rikkihappo	Sama kuin edelliset mutta vain haponkestävälle teräkselle, vaarallinen ihmisille	Syövyttävä
Inhiboitu rikkihappo	Sama kuin edellinen, myös muille kuin ruostumattomalle teräkselle	Syövyttävä
Glykolihappo	Sama kuin edellinen, turvallisempi kuin rikkihappo	Syövyttävä Haitallinen / ärsyttävä / herkistävä / vaarallinen otsonikerrokselle
Muurahaishappo	Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen lämpöpintojen sekä ei-ferriittisten materiaalien saostumat	Syövyttävä
Ammonisoitu sitruunahappo	Kuparihiukkasten tai -kerrostumien poisto	Haitallinen / ärsyttävä / herkistävä / vaarallinen otsonikerrokselle
Hydrofluorihappo	Silikaattikerrostumien poisto	Välittömästi myrkyllinen Syövyttävä
Sulfamiinihappo	Rautaoksidien poisto	Haitallinen / ärsyttävä / herkistävä / vaarallinen otsonikerrokselle
Erilaiset bromaatit	Kuparin poisto	Yleensä välittömästi myrkyllinen riippuen yhdisteestä
Fosforihappo	Erilaisten oksidien ja metallihilseiden poistoon, miedompi kuin rikkihappo mutta vahvempi kuin sulfamiinihappo	Syövyttävä
Natriumkloridi	Veden kovuuden aiheuttamat saostumat	

AVUKSI HYVÄ SUUNNITTELU

Mitoita oikein

Kun lämmönvaihtimen tyyppi ja materiaali on valittu, yleinen tapa huomioida likaantuminen on lämmönsiirtopintojen ylimitoitus verrattuna optimitilanteeseen. Likavastukselle määritetään yleensä kokemukseen perustuen arvo, jonka avulla lämmönsiirtopinnat mitoitetaan niin suuriksi, että haluttu lämpöteho on mahdollista siirtää ilman merkittävää virtausnopeuden nostamista ja painehäviön kasvamista. Likavastusten tarkkojen arvojen määrittäminen on kuitenkin hankalaa. Mikäli lämmönsiirtopinnat tehdään liian suuriksi, puhtaan lämmönvaihtimen virtausnopeudet laskevat merkittävästi, mikä puolestaan yleensä kiihdyttää likaantumista. Suurin osa lämmönvaihtimista toimii jo muutenkin toimintapisteissä, joissa virtaamat ovat alle suunnitteluarvojen. Myös rinnankytkennän tapauksessa yksittäisten lämmönvaihtimien virtausnopeudet saattavat laskea etenkin, jos vaihdinkohtaiset kertosäädöt on jätetty tekemättä.

Likavastuksille tulisi käyttää mieluummin liian pieniä kuin liian suuria arvoja.

Vaikuta virtauksiin

Muut keinot liittyvät lämmönsiirtoon osallistuvien aineiden virtaukseen. Esimerkiksi virtauskenttään, -nopeuksiin ja lämpötilatasoihin voi yleensä vaikuttaa jonkin verran suunnittelun keinoin. Hyvä esimerkki virtauskentän muuttamisesta on putkilämmönvaihtimen vaippapuolen ohjauslevyjen rakenteen muuttaminen siten, että virtaukseen tulee lisää pyörteisyyttä virtaussuunnan akselin suhteen. Sen on todettu vähentävän likaantumista. Myös putkien ulkopinnan poimuttamisen (corrugated tubes) vaikutus on samankaltainen.

Virtausnopeuksia voi nostaa käyttämällä pieniä putkia ja kapeita virtauskanavia. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin

painehäviön nopea kasvaminen, eroosioriskin suurentuminen sekä muut mekaaniset ongelmat, kuten putkien värähtely, minkä vuoksi täytyy tyytyä jonkinlaiseen optimiarvoon.

Tyypilliset virtausnopeudet ovat

- teräksille putkilämmönvaihtimien putkipuolella noin 2 m/s tai hieman yli ja vaippapuolella noin 1-2 m/s
- mekaanista räsytystä hyvin kestävästä materiaalista, kuten titaanista, valmistetussa putkessa jopa 5 m/s.
- Levylämmönvaihtimissa tyypillisesti alle 1 m/s, sillä niiden virtauskanavat ovat erimuotoiset kuin putkien tapauksessa, minkä vuoksi turbulenttinen virtaus ja suuret leikkausjännitykset voi saavuttaa pienemmillä virtausnopeuksilla.

Lämpötilatasoja voi hallita lähinnä sillä, kuinka korkeaksi tai matalaksi lämmönsiirtoon osallistuvan aineen lämpötila päästetään. Esimerkiksi matalalämpötilakorroosion estämiseksi tyypillisin vaihtoehto kalliille materiaaleille on huolehtia, että lämpötila ei missään vaiheessa pääse laskemaan alle happokastepisteen.

Helpota huuhtelua

Suunnitteluvaiheessa tulee miettiä pelkän likaantumisen estämisen lisäksi lämmönvaihtimen puhdistusta. Esimerkiksi huuhtelu- ja liuotuspesumahdollisuudet paranevat huomattavasti, kun lämmönvaihtimen molemmat virtauspuolet varustetaan molemmiin puoliin käsiventtiileillä ja letkuliittimillä. Tällöin lämmönvaihtimen voi huuhdella kohtuullisen vaivattomasti molempiin suuntiin käyttäen korkeita virtausnopeuksia ja pesuaineita tarpeen mukaan.

Sijoita puhdistusta silmällä pitäen

Myös lämmönvaihtimen sijoitus vaikuttaa oleellisesti puhdistamisen helppouteen. Huomioi seuraavat asiat lämmönvaihtimen sijoituksessa:

- Lämmönvaihtimen rakenne ja siihen liittyvät erikoisjärjestelyt puhdistamisen kannalta, kuten esimerkiksi putkilämmönvaihtimissa irrotettava putkipakka.
- Lämmönvaihtimen osien puhdistuksen aiheuttaman mahdollisen mekaanisen rasituksen kestävyys, esimerkiksi paksummat rivat ja lamellit.
- Riittävä huoltotila puhdistusta varten.
- Riittävät kuljetusväylät ja tarvittaessa nostokiskot lämmönvaihtimen osien ja puhdistuslaitteistojen siirtämistä varten.
- Valuma-allas mahdollisia haitallisia ja viemäriin kelpaamattomia puhdistuskemikaaleja varten.

Älä ylimitoita lämmönsiirtopintoja

ESIMERKKEJÄ

RAAKAÖLJYN ESILÄMMITIN ÖLJYNJALOSTAMOLLA

Eräällä öljynjalostamolla käytettiin raakaöljyn esilämmitykseen putkilämmönvaihdinta. Lämmönvaihtimen puhdistuksen jälkeisessä seurannassa huomattiin, että lämmönvaihdin likaantui pahasti ensimmäisen kuuden kuukauden aikana. Likaantumisen johdosta lämmönsiirtokyky alkuperäisillä virtauksilla laski noin 57 prosenttia.

Koska lämmittäminen toteutettiin polttamalla öljyä, kokonaiskustannukset nousivat noin 62 000 euroon kuukaudessa. Kaksi vuotta kestäneessä seurannassa selvisi, että lämmönsiirtokyky ei enää muutu kuuden kuukauden jälkeen.

Kun lämmönvaihdin avattiin, sen vaippapuolen (savukaasupuolen) huomattiin likaantuneen selkeästi. Likakerros ei kuitenkaan ollut erityisen tahmeaa ja kovasti kiinnittynyttä. Tämän ja edellä mainitun lämmönsiirtokyvyn vakioitumisen perusteella pääteltiin, että vaippapuolen leikkausjännitysten kasvattaminen todennäköisesti vähentäisi likaantumista. Vaippapuolta muutettiin siten, että keskimääräinen virtausnopeus kasvoi arvosta 0,37 m/s arvoon 1,85 m/s. Myös putkipuolen virtausnopeuksia nostettiin, jotta sen lämmönsiirtokerroin olisi lähempänä vaippapuolen uutta lämmönsiirtokerrointa.

Vaikka painehäviö kasvoikin vaippapuolella noin 10-kertaiseksi ja putkipuolella moninkertaiseksi, likaantuminen väheni murto-osaan merkittävästi suurentuneiden leikkausjännitysten ansiosta. Kasvaneet painehäviöt nostivat pumppaus- ja puhalluskustannuksia, mutta siitä huolimatta kokonaissäästöt kohosivat keskimäärin noin 68 000 euroon kuukaudessa vähentyneiden polttoaine- ja puhdistuskustannusten ansiosta.

(VDI Heat Atlas 1993)

AUTOMAATTINEN PUTKIEN PUHDISTUSJÄRJESTELMÄ

Eräällä öljynjalostamolla asennettiin automaattinen puhdistusjärjestelmä putkilämmönvaihtimeen. Lämmönvaihtimen tehtävä oli jäähdyttää vedellä (vaippapuoli) vesihöyryn ja rikkivedyn seosta (putkipuoli, massavirta noin 2,4 kg/s), jota syntyi raakaöljyn rikin poistamisen ja muutaman välivaiheen jälkeen. Jäähdytyksen seurauksena seoksen vesihöyry lauhtuu ja rikkivety on mahdollista saada talteen.

Rikkivedyn ja vesihöyryn seos sisältää kuitenkin monia likaantumista vauhdittavia epäpuhtauksia, minkä seurauksena putkiin oli usein muodostunut merkittäviä likakerroksia. Likaantumisen vuoksi lämmönsiirto oli huonontunut ja ajoittain vain osa vesihöyrystä oli lauhtunut. Pahimmillaan se oli aiheuttanut katkoksia rikin tuotantoon. Häiriöt rikin tuotannossa olivat maksaneet keskimäärin kymmeniä tuhansia USA:n dollareita päivässä. Lisäkustannuksia oli aiheuttanut myös toisinaan lämmönvaihtimen ulkopinnoille suihkutettu vesi, jonka tehtävä oli tehostaa jäähdytystä. Arvio lämmönvaihtimen lämmönsiirtokerroimen huonontumisesta oli peräti noin 75 prosenttia ja painehäviön noin 57 prosenttia.

Ongelma ratkaistiin asentamalla automaattinen, pesupalloja putkissa kierrättävä, puhdistusjärjestelmä lämmönvaihtimen putkipuolta varten. Järjestelmän ansiosta suunnitelmattomia käyttökatkoja ei enää esiintynyt. Lisäksi kustannussäästöä syntyi myös säästetystä ylimääräisestä jäähdytysvedestä sekä lämmönvaihtimen vähentyneen puhdistus- ja tiivisteiden uusimistarpeen kautta. Arvio kokonaissäästöstä oli noin 62 000 dollaria vuodessa.

(Sugarmen ym. 2007)

KIRJALLISUUTTA JA LINKKEJÄ

KIRJALLISUUTTA

Belmiloudi A. 2011. *Heat Transfer – Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*. ISBN 978-953-307-226-5. Saatavissa: <http://www.intechopen.com/books/heat-transfer-theoretical-analysis-experimental-investigations-and-industrial-systems>.

Lämmönsiirtoa käsittelevä vapaasti saatavilla oleva kirja, jossa hyvä luku (Chapter 20) lämmönvaihtimien likaantumisen ja energiatehokkuudesta.

Garret-Price B.A. ym. 1985. *Fouling of Heat Exchangers*. ISBN 0-8155-1016-0. Vanhahko mutta melko kattava teos lämmönvaihtimien likaantumisen ja energiatehokkuudesta.

Hammo S. 1994. *Lämmönsiirtimien likaantuminen*. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. ISBN 951-763-923-6. Teknisesti hyvä mutta suppea esitys lämmönvaihtimien likaumisesta.

Kuppan T. 2013. *Heat Exchanger Design Handbook*. ISBN 978-1-4398-4213-3. Saatavissa: <http://www.slideshare.net/vijayabhaskar83/heat-exchanger-design-42097751>. Kattavanoloinen lämmönvaihtimien suunnittelua käsittelevä kirja, jossa kokonainen luku likaantumisongelmista.

Mitrovic J. 2009. *Heat Exchangers – Basics Design Applications*. ISBN 978-953-51-0278-6. Saatavissa: <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-applications>. Lämmönvaihtimien suunnittelua käsittelevä kirja, jossa käsitellään myös likaantumista.

Shah R & Sekulic D. 2007. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. ISBN 9780471321712. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9780470172605>. Lämmönvaihtimien suunnittelua käsittelevä kirja, jossa energiatehokkuutta ja likaantumista (luku 13) sekä materiaaleja (luku 10) käsittelevät luvut.

VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). 1993. *VDI Heat Atlas*. ISBN 978-3-540-77876-9. Massiivinen lämmönvaihtimien mitoitus ja suunnittelua käsittelevä kirja, jossa luku lämmönvaihtimien likaumisesta.

LINKKEJÄ

<http://www.heatexchanger-fouling.com/index.htm>. Lämmönvaihdinten likaantumista ja puhdistamista käsittelevään konferenssiin liittyviä artikkeleita. Case-studyyn (luku 6.2) liittyvä artikkeli: Sugarmen C., Siboni U. & Volansky R. 2007. *Automatic Tube Cleaning System (ATCS) Installation In Sulfide Retrieval Monoethanolamine Treatment Plant: Case Study and Fouling Global Perspectives*. 7th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – Challenges and Opportunities.

Nuutinen J. 2001. *Lämmönsiirtimien likaantuminen öljynjalostuksessa*. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/35369/nbnfi-fe20011204.pdf?sequence=1>.

Haslego C. 2010. *Basics of Industrial Heat Transfer*. <http://www.cheresources.com/content/articles/heat-transfer/basics-of-industrial-heat-transfer?pg=1>. Kompakti tyypillisimpiä lämmönvaihdintyyppejä käsittelevä artikkeli.

Motiva on tuottanut tämän aineiston osana vuosina 2014-2016 toteutettua yhteistyö-hanketta, jossa tarkasteltiin teollisuuden lämmönsiirron energiatehokkuutta.

Hankkeeseen osallistuivat Baxis Oy Ltd, Huntsman Pigments and Additives, KL-Lämpö Oy, Spirax Oy, SSAB Europe Oy ja Suomen Sokeri Oy.

Lisäksi hankkeeseen osallistuivat Pöyry Finland Oy ja Motiva Services Oy. Työtä rahoittivat hankkeeseen osallistuneet yritykset, työ- ja elinkeinoministeriö ja Energiavirasto. Hanketta koordinoi Motiva.

