



# LÄMMÖNSIIRTIMIEN LIKAANTUMINEN JA SEN ESTÄMINEN:

Kokeellisen tutkimuksen ja uusien mallinnustekniikoiden yhdistäminen

<sup>1</sup>**Markus Riihimäki**, <sup>2</sup>Eini Puhakka, <sup>1</sup>Tiina M. Pääkkönen, <sup>2</sup>Ulla Ojaniemi,  
<sup>2</sup>Timo Pättikangas, <sup>2</sup>Mikko Manninen, <sup>1</sup>Esa Muurinen, <sup>1</sup>Riitta L. Keiski

<sup>1</sup>University of Oulu, Department of Process and Environmental Engineering  
FIN-90014 University of Oulu, P.O.Box 4300  
<sup>2</sup>VTT, FIN-02044 VTT, P.O. Box 1000



# LÄMMÖNSIIRTIMET

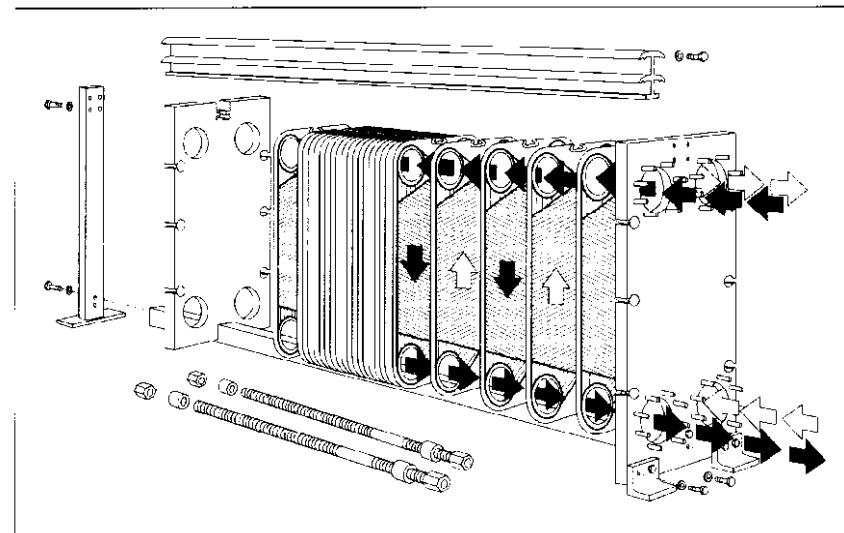
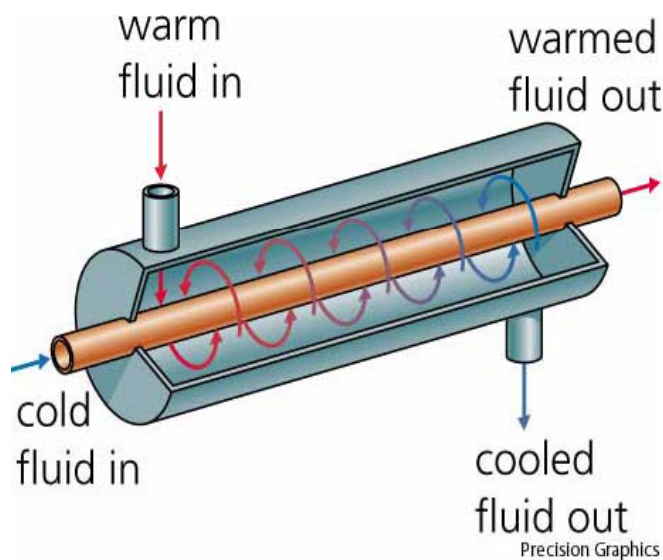
Siirtävät lämpöä kuumasta väliaineesta kylmempään

- Kaasu-kaasu, kaasu-neste, neste-neste
- Levylämmönsiirtimet, putkilämmönsiirtimet

**Prosesseissa**

- kemialliset reaktiot tuottavat lämpöä, jota joudutaan poistamaan lämmönvaihtimella
- usein reaktion käynnistäminen tai nopeuttaminen vaatii lämpöä, joka tuodaan lämmönvaihtimella
- lämmönvaihtimilla voidaan siirtää lämpöä prosessin osasta toiseen

**Mahdollistaa energiatehokkaan tuotannon!**



# TUTKIMUSONGELMA

**Likaantuminen** on ei-toivotun aineen kertymistä lämmönsiirtimien pinnoille. Se aiheuttaa merkittäviä ongelmia laitteiden käytössä ja suunnittelussa

- Lämmönsiirto heikkenee ja painehäviö kasvaa
  - energiatehokkuus heikkenee
  - ympäristövaikutukset lisääntyvät
- Prosessikatkot lisääntyvät ja huoltokustannukset nousevat
  - taloudellinen kannattavuus heikkenee

## TUTKIMUKSEN TAVOITTEET:

### Lämmönsiirtopinnat likaantumattomiksi

- Materiaalivalinnat: pinnan karheus, pinnoite
- Virtausolosuhteiden parantaminen
- Prosessiolosuhteiden valinta/säätö

### Kustannustehokas puhdistettavuus

- Mekaaninen puhdistus
- Kemiallinen puhdistus
- Sähkökemiallinen puhdistus





# MILLOIN LIKAANTUMISTA TAPAHTUU?

## Kiteytyvä likaantuminen

- Tapahtuu ylikylläisistä liuoksista
- Lämmönvaihtimissa:
  - Lämpötilan kohoaminen vähentää likaavien yhdisteiden liukoisuutta
- Prosessihaihduttimissa:
  - Lämpötilan kohoamisen lisäksi liuoksesta poistuu vettä ja liukoisuus ylitetään liuoksen konsentroituaessa

## Partikkelilikaantuminen

- Pienet hiukkaset kiinnittyvät lämmönvaihtimen pintaan
- Kiinnittymistä tapahtuu pintavoimien vaikutuksesta ja irtoamista pinnan lähellä vaikuttavien hydrodynaamisten voimien vaikutuksesta

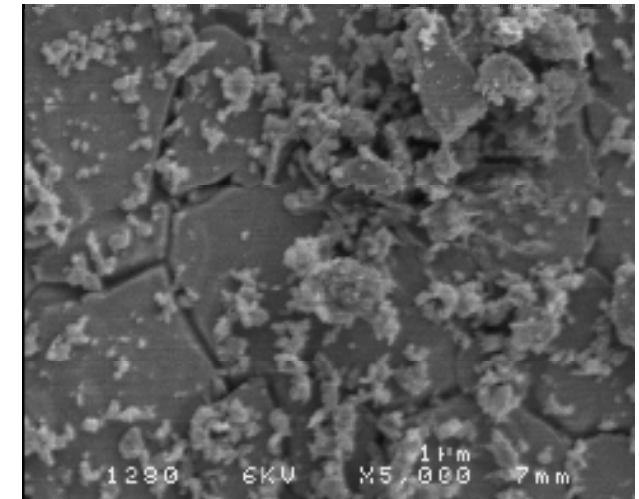
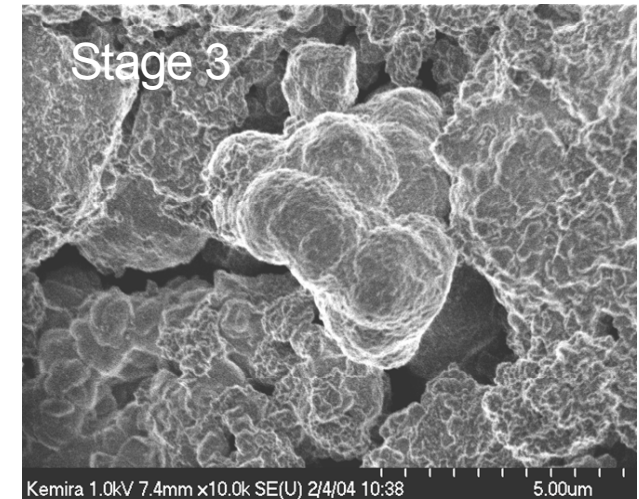
## Muita likaantumisen muotoja

- Mikrobilikaantuminen, biologiset kasvustot
- Kemiallisten reaktioiden kautta likaantuminen
- Korroosiolikaantuminen
- Jäätymisen tai jähmettymisen aiheuttama lämmönsiirtimien tukkeutuminen

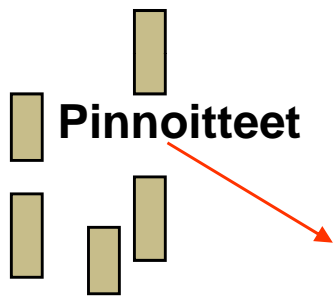




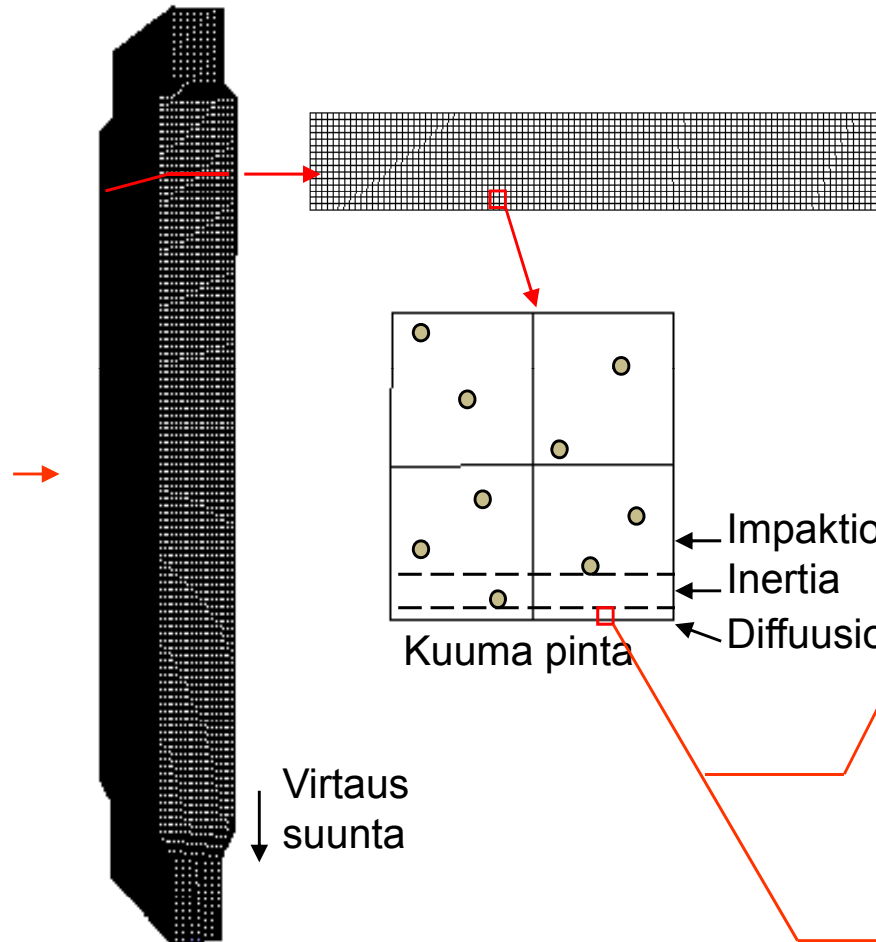
# LIKAANTUNEET LÄMMÖNVAIHTIMET



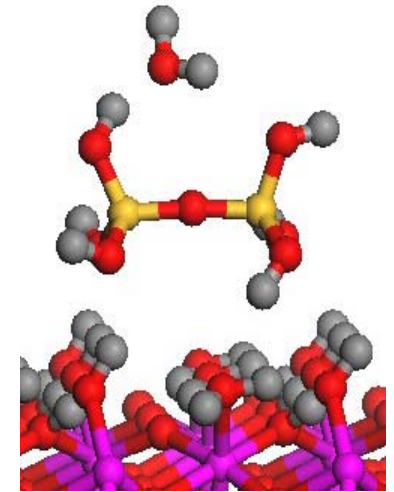
# TUTKIMUSMENETELMÄT



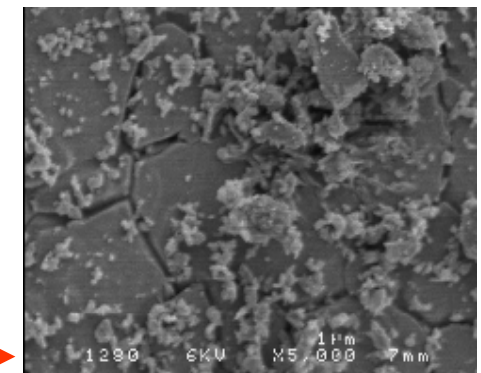
**LIKAANTUMIS-KOKEET**



**CFD-MALLINNUS**



**MOLEKYYYLI-MALLINNUS**

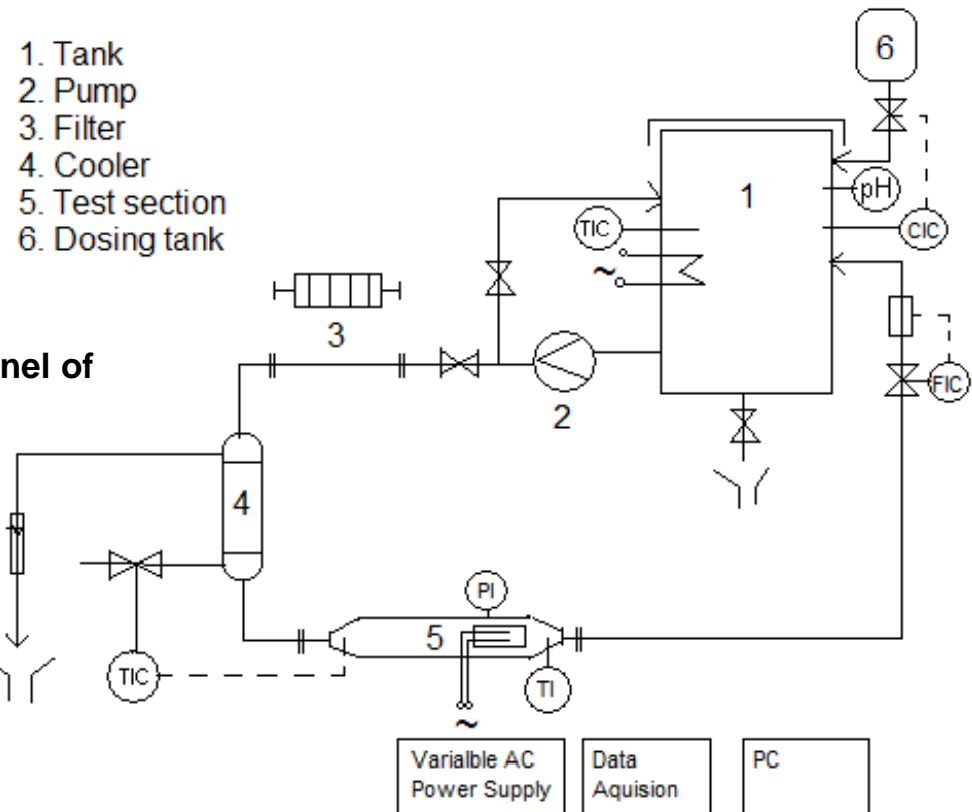
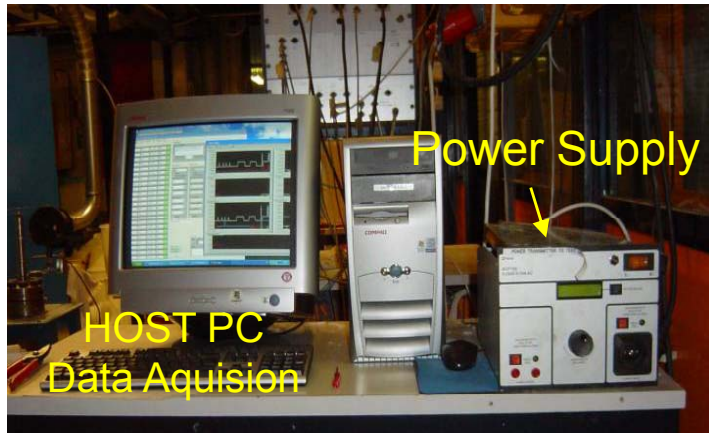


**Kuva elektronimikroskooppilla**





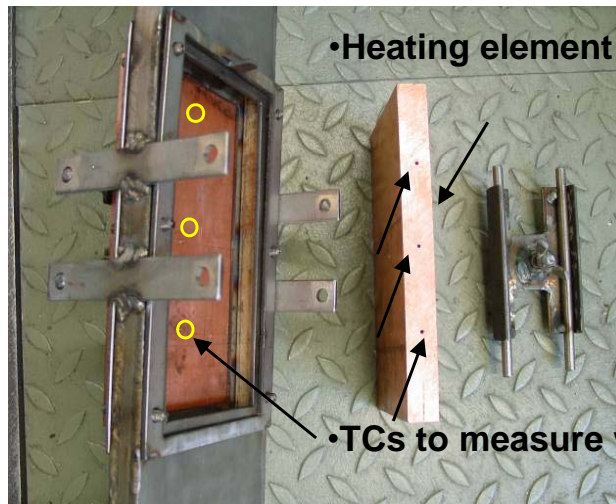
# KOELAITTEISTO – Fouling Test Apparatus



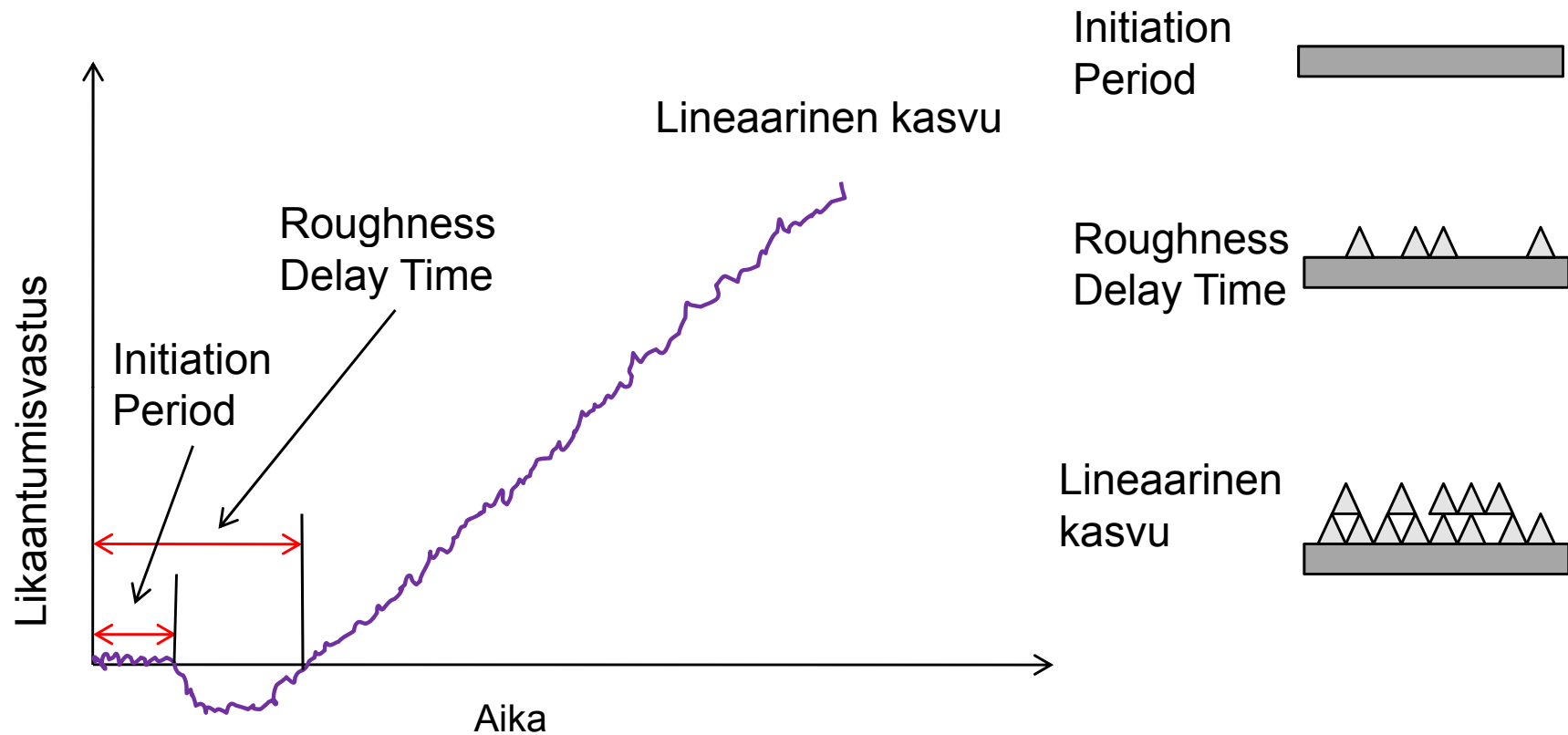
Test surface:  
Coated  
Sheet metal



Sample holder in the rectangular flow channel of the test section 5.



# LIKAANTUMISKOKEET



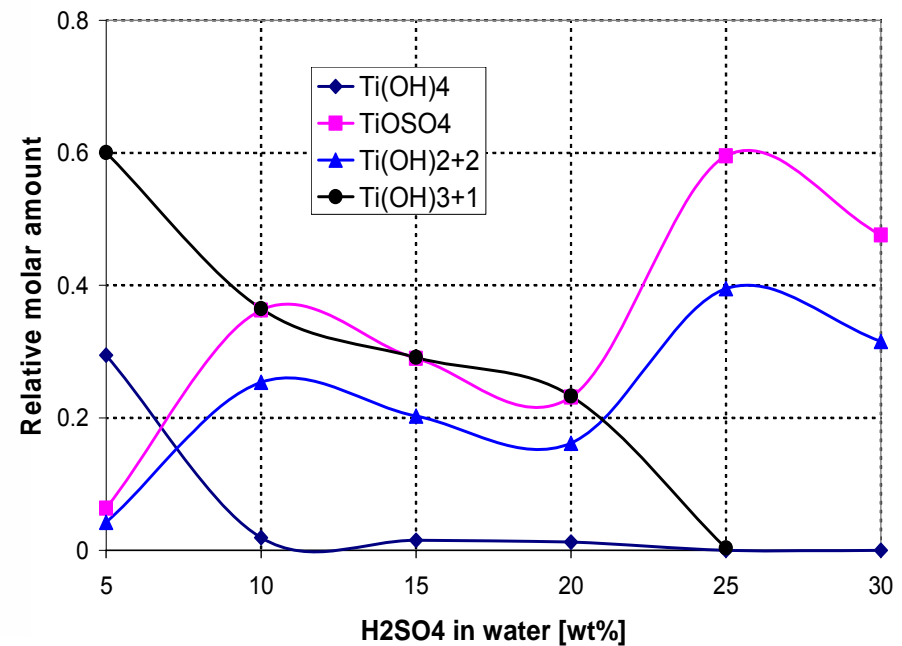
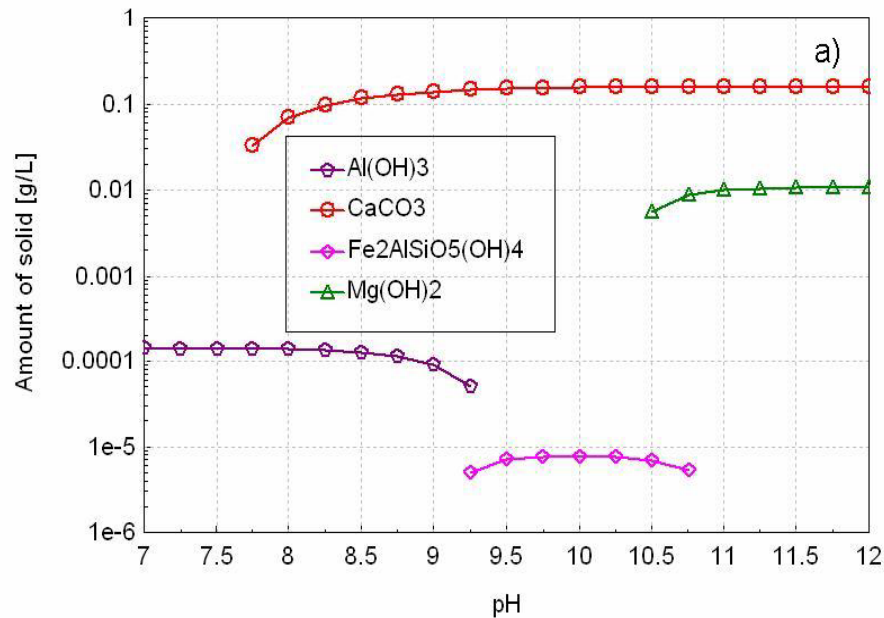
- Likaantumista kuvaa viiveaika (pintamateriaali) ja olosuhteita (likaantumisnopeus)
- Kokeen jälkeen liattu pinta tutkitaan pinta analytiikan keinoin: SEM, XRD, FTIR





# ELEKTROLYYTTIEN TERMODYNAMINEN MALLINNUS

Suolojen kiteytymis alueet pH:n, lämpötilan muuttuessa tai veden haihtuessa  
Liukoisten yhdisteiden ja kompleksien spesiaation määrääminen  
Case studies: Mustalipeä, kalsiitti pigmentin prosessointi, merivesi, savukaasun pesuri



# PARTIKKELIN JA PINNAN VÄLISEN VUOROVAIKUTUKSEN MALLINTAMINEN

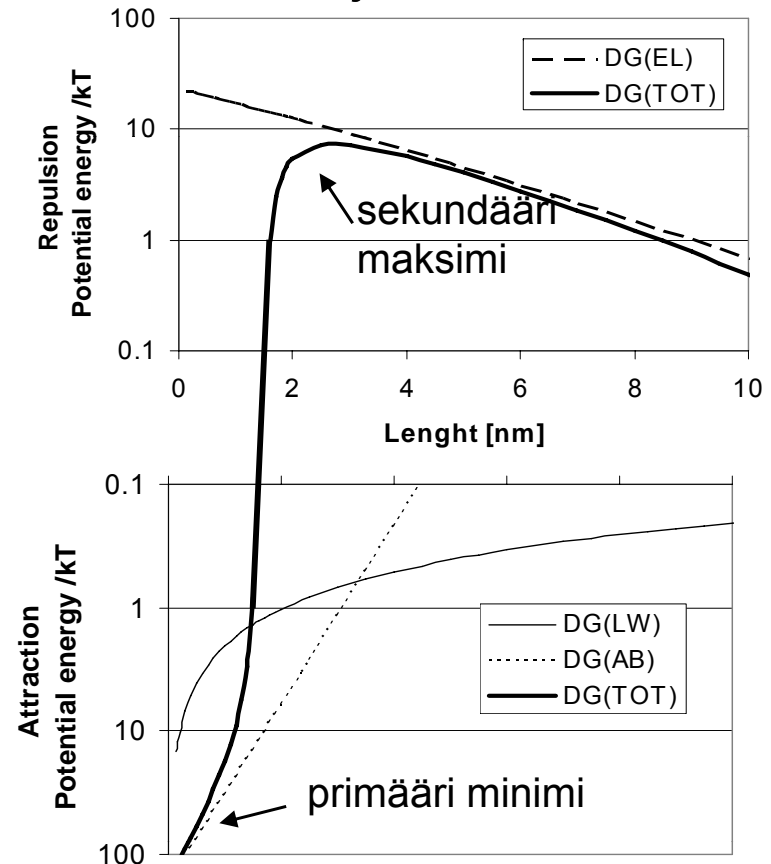
Kolloidisten partikkelien vuorovaikutuksia kuvaa XDLVO-teoria

$$\Delta G^{TOT} = \Delta G^{LW} + \Delta G^{EL} + \Delta G^{AB} + \Delta G^{Br}$$

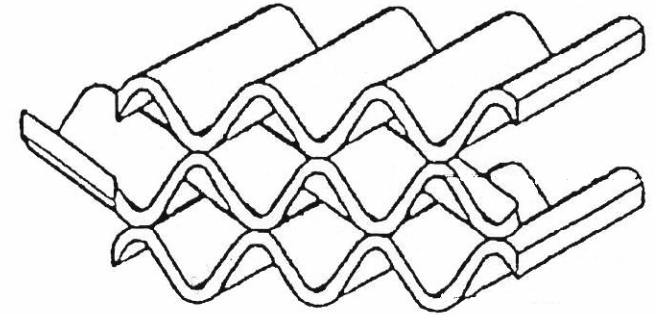
**SiO<sub>2</sub>-partikkelin adheesio pinnoitettu AISI316L 2B:lle**

Pinnoite	$\Delta G^{TOT} / kT$	
TiN	28.6	↑ Repulsio
SiO <sub>x</sub> -CVD	25.3	
SiF impl	-5.7	↓ Adheesio
Sol-gel	-21.6	
MoS <sub>2</sub> impl	-26.8	
DLCsput	-31.0	

Käsittelemätön AISI316L 2B  
Metastabiili → johtaa likaantumiseen

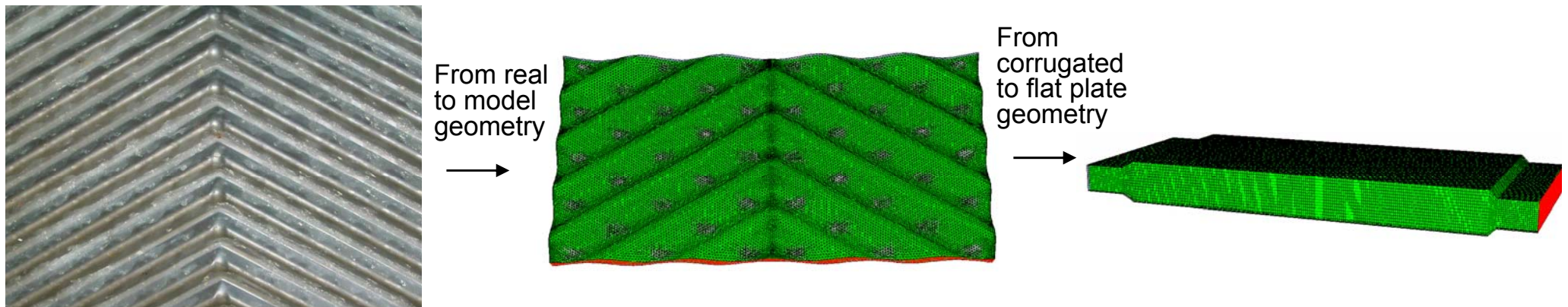


# LÄMMÖNSIIRTIMIEN TUTKIMINEN VIRTAUSLASKENNALLA (CFD)



- Mallissa voidaan huomioida mm.:
  - Virtausnopeus, pyörteisyys
  - Lämmönsiirto
  - Partikkeleiden kulkeutuminen ja tarttuminen pintaan (XDLVO)
  - Suolojen kiteytyminen pinnoille (liukoisuus, pintareaktiot)

→ Ennustetaan lämmönsiirtimien likaantumista





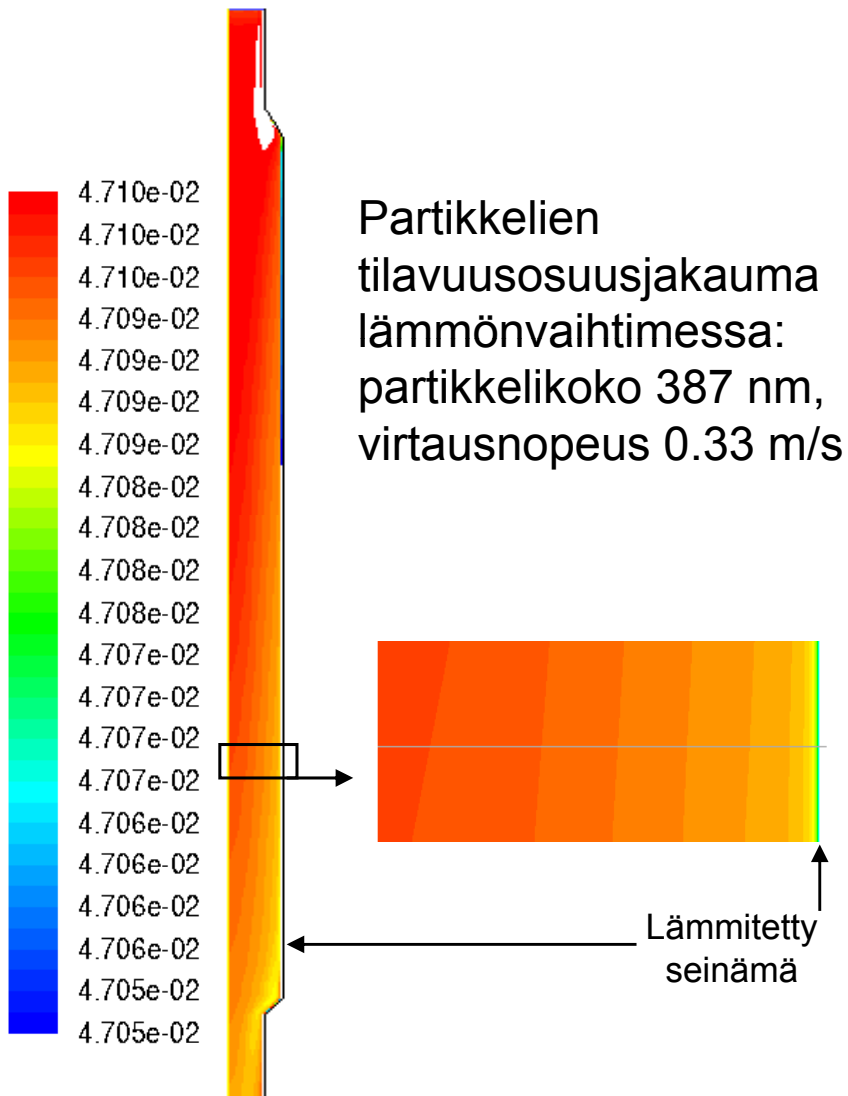
# CFD-MALLI PARTIKKELI- LIKAANTUMISELLE

- Likaantumisprosessi voidaan ajatella sarjana prosesseja, joissa partikkelit kulkeutuvat seinämän läheisyyteen, ja kiinnittyvät seinämään
  - CFD -mallissa suurimmat partikkelien kulkeutumiseen vaikuttavat voimat on huomioitu: diffuusio, termoforeesi, vastus- ja nostovoimat
  - Partikkelin kiinnittyminen seinämään (adheesio) on mallinnettu XDLVO-teorian avulla
- Mallia on sovellettu aikariippuvana 2D laskentana käyttäen Eulerian kaksifaasi -mallia
  - Mallit on implementoitu Fluent -ohjelmistoon omina aliohjelmina
- Lämmönvaihtimen koelaitteistoa on käytetty testitapauksena mallin validoinnissa
  - Testitapauksena on tutkittu alle mikronin kokoisten  $\text{CaCO}_3$  partikkelien aiheuttamaa likaantumista kuumennetulle AISI 316L teräspinnalle

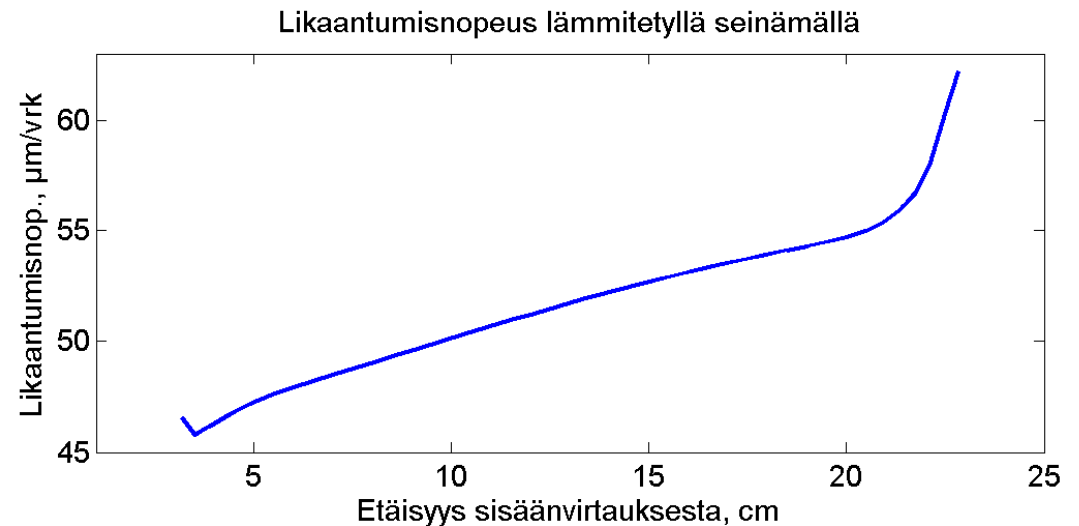




# CFD:n LASKENTATULOKSIA



Likaantumisnopeus lämmitetyllä seinämällä etäisyyden funktiona nesteen sisäänvirtaus-aukosta.



Keskimääräinen kasvunopeus:

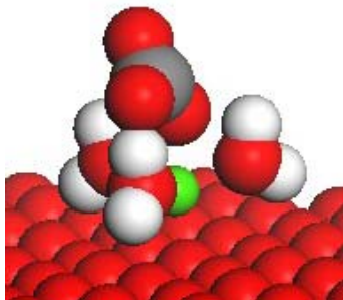
- CFD -mallilla – 51.7 µm/vrk
- Kokeellinen tulos – 75.2 µm/vrk



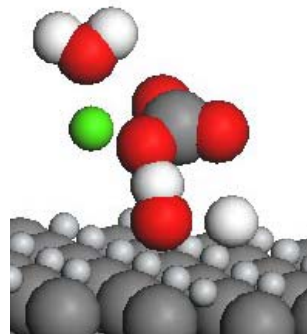
# MOLEKYYLIMALLINUS

Saostumien muodostumista on tutkittu erilaisilla pinnoilla määrittämällä  $\text{CaCO}_3$  muodostumismekanismi ja vertailemalla muodostumisenergioita

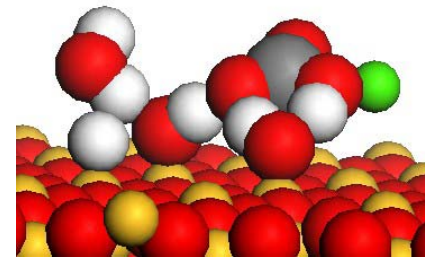
- Saostumien kemiallinen koostumus ja saostumien sitoutumisvoimakkuus riippuu voimakkaasti veden reaktioista (adsorptio tai dissosiaatio) pinnoilla
  - Pinnan hydrofobisuudella ja hydrofiilisyydellä on merkittävä vaikutus saostumien muodostukselle
- Saostumien tapahtuu usein  $\text{HCO}_3^-$  -välituotteiden kautta



$\text{Cr}_2\text{O}_3$ -pinta



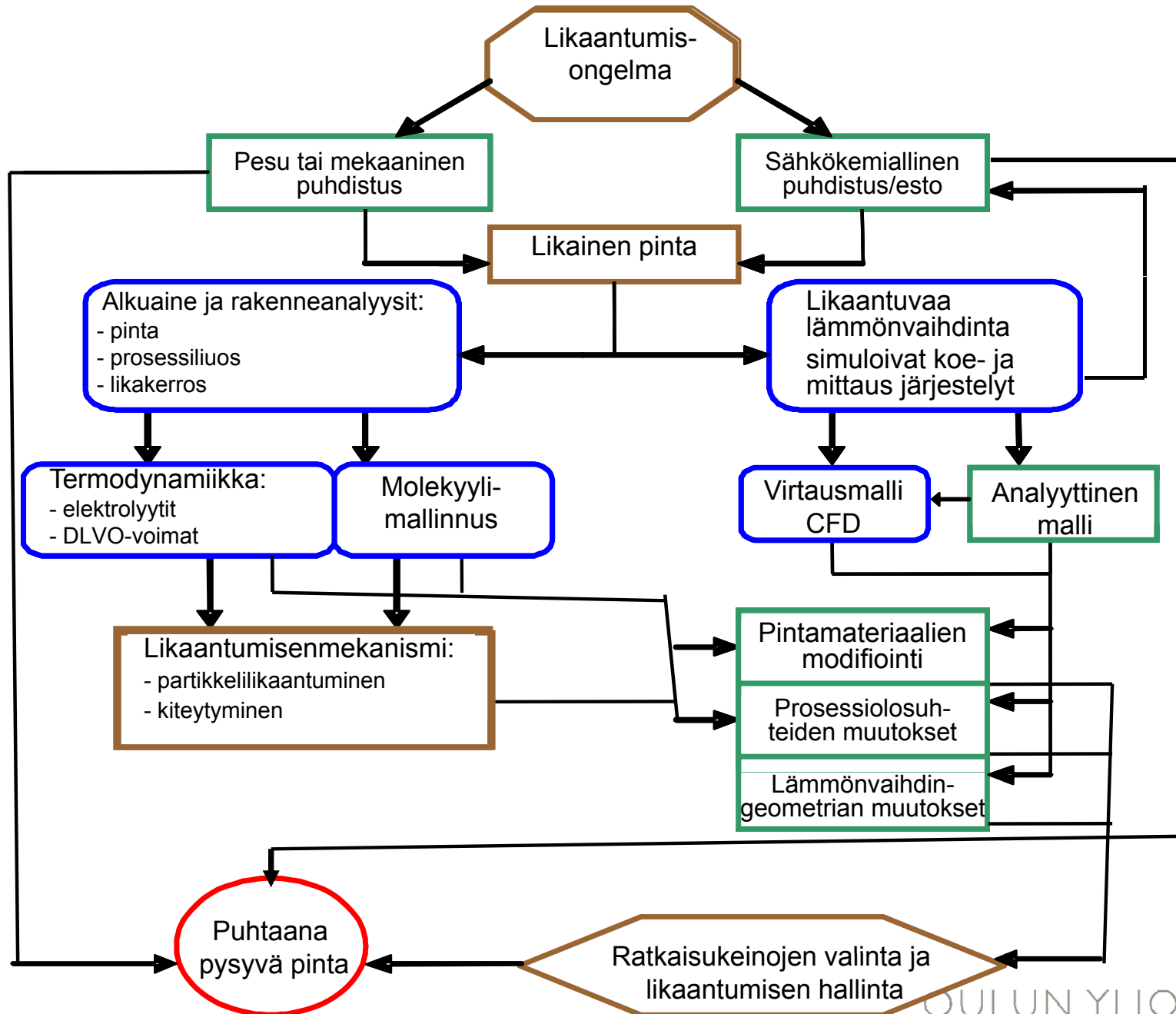
TiC-pinta



$\text{SiO}_2$ -pinta



# TYÖKALUT LIKAANTUMISEN ESTÄMISEKSI





# TUTKIMUSVERKOSTO

## **FOULSURFACE-projekti (2007-2009)**

- Konsortioprojekti (EU/MATERA ERA-Net), jossa mukana OY/PYOLÄM, VTT, SINTEF (Norja), UCD (Irlanti)
- Pinnan (AISI 316L + pintakäsittely) ja partikkelin välinen vuorovaikutuksen mallinnus ja kokeellinen tutkiminen, teräspinnan ja pinnoitteiden molekyylihallinnus

## **KEMLIKA-projekti (2003-2006)**

- Tekesin Pinta-teknologiaohjelman projekti, jossa mukana OY/PYOLÄM, VTT, TKK: Korroosion ja materiaalikemian laboratorio

Väitöstutkimukset: Markus Riihimäki, Tiina Pääkkönen, Reeta Ylönen

Diplomityöt: 11 kpl

Tutkijanvaihto: 3kpl tutkijoita + prof. Simonsonin sapattivapaavierailu

