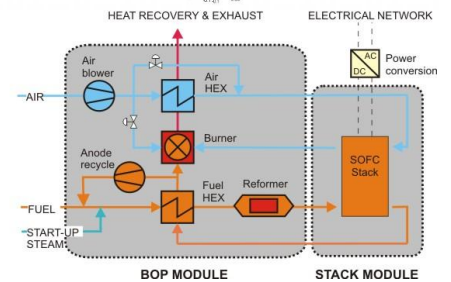
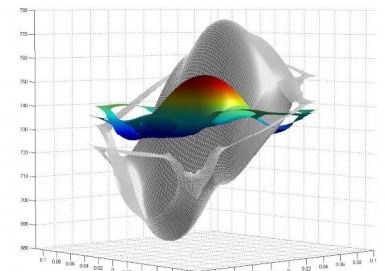




Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology



Aalto-yliopisto



SofcPower 2007—2011

Loppuraportti

Kirjoittajat: Matias Halinen, Jari Pennanen, Olli Himanen, Pertti Silventoinen, Jari Backman, Pauli Salminen, Jari Kiviaho

Luottamuksellisuus: Julkinen



Raportin nimi SofcPower 2007-2011 loppuraportti		
Asiakkaan nimi, yhteystiedot Tekes	Asiakkaan viite	
Projektin nimi SofcPower 2007—2011 ”Tutkimuksella demonstrointiin”	Projektin numero/lyhytnimi SofcPower	
Raportin laatija(t) Matias Halinen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 30/0	
Avainsanat SOFC, kiinteäoksidipolttokenno	Raportin numero VTT-R-03187-12	
Tiivistelmä <p>SofcPower 2007—2011 oli kiinteäoksidipolttokennojen (SOFC) tutkimukseen keskittynyt ryhmähanke, jonka tutkimuspartnereita olivat Teknologian tutkimuskeskus VTT, Lappeenrantaan teknillinen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto sekä Aalto-yliopisto. Hanke kuului Tekesin Polttokennot -tutkimusohjelmaan ja sitä rahoittivat tutkimuspartnereiden ja Tekesin lisäksi joukko teollisuusyrityksiä ja energian tuottajia.</p> <p>Hankkeen tavoitteena oli edetä tutkimusta tehden kohti kokonaisten SOFC -järjestelmien demonstrointia ja lopulta kohti niiden kaupallistamista. Hankkeen tarkoituksena oli näin ollen tukea niitä yrityksiä, jotka pyrkivät luomaan uutta liiketoimintaa SOFC -järjestelmien rakentamisella, järjestelmäkomponenttien valmistamisella, polttoainetoimittajana tai polttokennojärjestelmien loppukäyttäjänä.</p> <p>Hankkeen konkreettisena päätavoitteena oli tehdä VTT:lle SOFC-voimalaitosdemonstraatio, joka kokoaisi hankkeen eri työpaketeissa tehdyn tutkimustyön tuloksia samaan koeympäristöön ja todentaisi hankkeessa syntyneiden teknisten ratkaisujen ja innovaatioiden toimivuutta todellisessa käyttöympäristössä. Tämä tavoite saavutettiin ja demonstraatiojärjestelmällä on tuotettu maakaasusta verkkokelpoista sähköä useiden tuhansien tuntien pituisten koeajojen aikana.</p> <p>Tässä raportissa kuvataan tutkimushankkeen kulku sekä päätulokset.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 2.5.2012 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Matias Halinen Erikoistutkija	Jari Kiviaho Johtava erikoistutkija	Satu Helynen Teknologiajohtaja
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) SofcPower 2011 -hankkeen osallistujat		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

Alkusanat

SofcPower 2007—2011 oli viisivuotinen kiinteäoksidipolttockennojen (SOFC) tutkimukseen keskittynyt ryhmähanke, jonka tutkimuspartnereita olivat Teknologian tutkimuskeskus VTT, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto sekä Aalto-yliopisto. Hanke oli osa Tekesin Polttokennot –tutkimusohjelmaa ja sen rahoittivat tutkimuspartnereiden ja Tekesin lisäksi joukko teollisuusyrityksiä ja energian tuottajia.

Hanke käynnistettiin vuonna 2007 ja sen tavoitteena oli edistää ja tukea SOFC-teknologian sovellusten demonstrointia ja tätä kautta kaupallistumista valituilla tutkimusalueilla, joihin kuuluivat SOFC-laitoksissa tarvittavat komponentit kuten kennostot, polttoaineen prosessointi, kierrätyspuhallin ja tehoelektronikka, mutta myös laitojen suunnittelun, mallinnuksen ja ohjauksen työkalut. Hankkeen suurimpana tavoitteena oli rakentaa SOFC-voimalaitosdemonstraatio VTT:lle, jotta syntyneiden tulosten toimivuus voitaisiin todentaa todellisessa käyttöympäristössä. Tämä tavoite saavutettiin ja demonstraatiojärjestelmällä on tuotettu maakaasusta verkkokelpoista sähköä useiden tuhansien tuntien pituisten koeajojen aikana.

Tavoitteena oli myös päästä kansainvälisesti vahvaan asemaan SOFC-tutkimuksessa ja edistää kaupallistumisen kannalta välttämättömän teknologian siirtoa kotimaisten yritysten käyttöön. Hankkeen aikana/myötä VTT:llä on ollut aktiivista tutkijavaihtoa eurooppalaisten tutkimusryhmien kanssa ja toimintaa IEA:n eri työryhmissä. VTT on osallistunut yhteensä viiteen EU:n kuudennen puiteohjelman projektiin ja on edelleen osallisena kahdeksassa EU:n seitsemännen puiteohjelman projektissa, joista kahdessa se toimii koordinaattorin roolissa. Hankkeen aikana on demonstroitu ensimmäisenä maailmassa kanadalaisen Versa Power Systemsin kehittämää suurta SOFC-kennostoa VTT:n 10 kW SOFC demonstraatioissa. Hankkeen tulokset ovat saavuttaneet merkittävän näkyvyyden ja varsinkin VTT on nykyisin haluttu kumppani kansainvälisissä hankkeissa.

Hankkeen kokonaisbudjetti vuosien 2007—2011 aikana oli yhteensä noin 11,5 M€, joista Tekesin osuus oli 8,0 M€, tutkimuspartnereiden osuus 2,0 M€ ja yritysten osuus 1,5 M€. Uuden teknologian tutkimus on pitkäjänteistä työtä, jossa voi mennä kauan ennen konkreettisten tulosten saavuttamista. Hankkeen onnistuminen ei olisi ollut mahdollista ilman Tekesin ja osallistuvien yritysten tiivistä sitoutumista viiden vuoden aikana.

SofcPower-hankkeessa on työskennellyt sen eri vaiheiden aikana ainakin sata henkilöä. Jokaisen henkilön erikoisosaaminen ja korkeatasoinen työpanos on ollut edellytys hankkeen onnistumiselle. Kiitokset kuuluvat myös hankekokonaisuuden johtoryhmän jäsenille, jotka ovat vaikuttaneet projektin päämäärien saavuttamiseen tukemalla ja ohjaamalla tutkimuksen suoritusta.

Espoo 2.5.2012

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Tutkimushankkeen tavoitteet.....	4
2 Järjestelmäintegraatio	5
2.1 SOFC -voimalaitosdemonstraatio	5
2.2 Järjestelmäkomponentit	7
2.3 Demonstraation mekaaninen rakenne ja lämmöneristys	8
3 Kennostotutkimus ja -kehitys.....	9
3.1 Finnstack 2007-2009	9
3.2 Kennoston ja järjestelmän vuorovaikutus.....	10
4 Ohjausjärjestelmät ja mallinnus.....	11
5 Polttoaineiden tuotantoketjut ja prosessointi.....	14
5.1 Polttoaineiden tuotantoketjut.....	14
5.2 Polttoaineiden prosessointi	15
6 Demonstrointi	16
7 Kierrätyspuhallin	18
8 Tehoelektroniikka	20
9 Kansallinen ja kansainvälinen verkottuminen	23
10 Yhteenveto	24
11 Opinnäytteet	25
12 Julkaisut ja esitelmät	26

1 Tutkimushankkeen tavoitteet

SofcPower 2007-2011 tutkimushankkeen käynnistyessä sen alkuperäisenä ja pääasiallisena tavoitteena oli edetä tutkimusta tehden kohti kokonaisten SOFC -järjestelmien demonstrointia ja lopulta kohti niiden kaupallistamista. Hankkeen tarkoituksena oli näin ollen tukea niitä yrityksiä, jotka pyrkivät luomaan uutta liiketoimintaa SOFC -järjestelmien rakentamisella, järjestelmäkomponenttien valmistamisella, polttoainetoimittajana tai polttokennojärjestelmien loppukäyttäjänä.

Projektille asetettiin myös koulutuksellinen tavoite, joka liittyy yritysten tulevaisuuden tarpeisiin, jotta projektiin osallistuvat tutkijat ja tekninen henkilökunta saavuttavat riittävän osaamistason SOFC -järjestelmien poikkitekniisten ja haastavien ongelmien ratkaisemiseksi. Hankkeessa syntynyt uusi korkeatasoinen osaaminen turvaa yrityksille niiden tarvitseman tuen saatavuuden, kun ne tuovat SOFC -teknologiaan perustuvia tuotteitaan markkinoille.

Tavoitteena oli myös päästä kansainvälisesti vahvaan asemaan SOFC -tutkimuksessa ja edistää kotimaisesta teollisuudesta puuttuvan, mutta demonstroinnin ja kaupallistumisen kannalta välttämättömän teknologian siirtoa kotimaisten yritysten käyttöön. Käytännössä tämä oli tarkoitus toteuttaa laajalla osallistumisella tutkimusalueen EU-projekteihin, käynnistämällä säännöllinen tutkijavaihto valittujen eurooppalaisten tutkimuslaitosten kanssa, sekä aloittamalla tiivis yhteistyö strategisesti välttämättömiksi katsottujen ulkomaisten yritysten kanssa.

Hankkeen konkreettisenä päätavoitteena oli tehdä VTT:lle SOFC –voimalaitosdemonstraatio, joka kokoaisi hankkeen eri työpaketeissa tehdyn tutkimustyön tuloksia samaan koeympäristöön ja todentaisi kehitettyjen ratkaisujen toimivuutta todellisessa käyttöympäristössä. Hankkeessa tehtävä tutkimustyö jakautui useaan eri työpakettiin, joissa tehtiin tiivistä yhteistyötä eri tutkimuspartnereiden välillä. Alla on esitetty hankkeen eri työpaketit, vastuuorganisaatio ja konkreettinen päätavoite viiden vuoden hankkeen loppuessa.

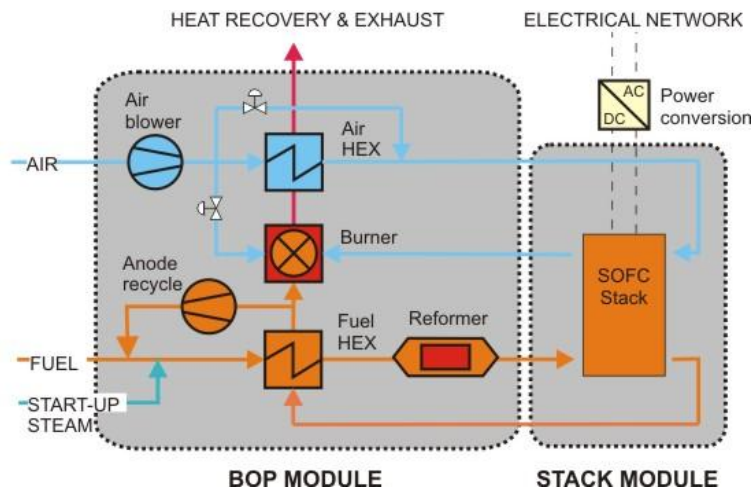
Työpaketti	Vastuu	Päätavoite
Järjestelmäintegraatio	VTT	SOFC voimalaitosdemonstraation rakentaminen sekä pitkäaikaisajo
Kennostokehitys	VTT	SOFC kennoston suunnittelu ja valmistaminen
Ohjausmenetelmät ja mallinnus	VTT	SOFC-laitoksen suunnittelun ja ohjauksen työkalujen toteutus
Polttoaineiden tuotantoketjut	VTT	Polttoaineiden valinta ja prosessointi
Demonstrointi	VTT	Demonstroinnin käsikirja yritysten käyttöön
Kierrätyspuhallin	LTY	Anodikaasun takaisinkierrätyspuhallimen prototyyppi
Tehoelektroniikka	LTY	Tehonmuokkauslaitteisto SOFC-järjestelmään

2 Järjestelmäintegraatio

2.1 SOFC -voimalaitosdemonstraatio

Järjestelmäintegraatiotutkimuksen tavoitteena oli rakentaa integroitu SOFC -voimalaitosdemonstraatio. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tuli kehittää, valmistaa ja testata demonstraatioyksikön eri Balance of Plant (BoP) komponentit ja lopuksi suorittaa valmiilla järjestelmällä 5000–10000 tunnin pitkäaikaisajo. Voimalaitosdemonstraation tarkoituksena oli koota hankkeen eri työpaketeissa tehdyn tutkimustyön tulokset samaan koeympäristöön ja todentaa kehitettyjen ratkaisujen toiminta todellisessa käyttöympäristössä.

10 kW teholuokan maakaasukäyttöinen SOFC-demonstraatioyksikkö (Kuva 1), jossa on käytetty suurelta osin projektissa kehitettyjä järjestelmäkomponentteja ja –ratkaisuja, on kiistatta SofcPower-hankkeen näkyvin tulos. Demonstraatio on myös kansainvälisellä tasolla ainutlaatuinen – siinä on käytetty ensimmäistä kertaa maailmassa suuria 10 kW teholuokan planaari SOFC -kennostoja osana kokonaista järjestelmää.



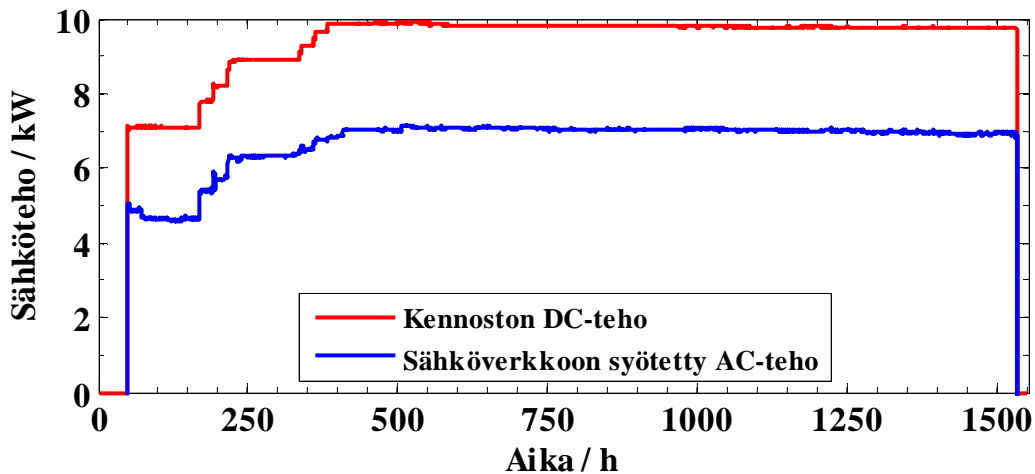
Kuva 1. 10 kW SOFC-voimalaitosdemonstraatio (vas.) ja sen prosessikaavio (oik.).

Demoyksikön rakenne suunniteltiin modulaariseksi siten, että SOFC-kennosto ja BoP-komponentit integroitiin erillisiin lämpöeristettyihin moduuleihin, jotka kytkettiin yhteen (Kuva 1). Kanadalaisen yhteistyökumppanin Versa Power Systemsin (VPS) valmistama ja toimittama kennostomoduli sisältää SOFC-kennoston lisäksi mm. kennoston instrumentoinnin ja puristusjärjestelmän. BoP-moduuli sisältää SOFC-laitoksissa tarvittavat komponentit. Ilmajärjestelmä koostuu ilmapuhaltimen, lämmönsiirrinten ja katalyyttisen polttimen lisäksi kahdesta ilman ohisyöttölinjasta, joilla voidaan hallita polttimen ja kennoston lämpötilaa. Polttoainejärjestelmä koostuu lämmönsiirrinten ja reformerin lisäksi anodikaasun takaisinkierätyslinjasta ja kierrätyspuhaltimesta, jotka mahdollistavat järjestelmän käyttämisen ilman ulkoista veden syöttöä. Kennoston tuottama DC-teho muunnetaan verkkokelpoiseksi sähköksi erillisellä virranmuokkauslaitteistolla. Demoyksikkö kykenee toimimaan miehittämättömästi ja itsenäisesti, sillä sen toimintaa valvoo ja ohjaa erillinen prosessinohjausjärjestelmä.

Demoyksikön tarkempi suunnittelu ja rakentaminen aloitettiin vuonna 2009, kun yksikön kennostotoimittajaksi oli varmistunut Versa Power Systems ja laitteiston rakentamiseen soveltuvat komponentit oli identifioitu ja kehitetty. Suuritehoinen kennosto aiheutti merkittäviä teknisiä haasteita niin koko järjestelmän kuin myös yksittäisten komponenttien rakenteelle ja mitoitukselle. Järjestelmän prosessirakenteen optimointi ja komponenttien mitoitus tehtiin

täysin projektissa kehitetyillä mallinnustyökaluilla. Ilman näitä työkaluja ja eri järjestelmäkomponenttien toiminnan syvällistä tuntemusta demonstraation toteuttaminen ei olisi onnistunut. Hyötysuhdetavoitteiksi asetettiin kennoston tuottaman sähkön osalta 60% ja järjestelmän verkkoon tuottaman sähkön osalta 50%.

Demoyksiköllä suoritettiin useita pitkäaikaiskokeita (Kuva 2), joiden aikana tutkittiin kennoston ja muiden järjestelmäkomponenttien luotettavuutta, elinikää ja suorituskykyä. Demoyksikössä on tähän mennessä operoitu SOFC-kennostoja yhteensä 5000 tunnin ajan, ja tänä aikana kennostot ovat tuottaneet sähköä yli 40 MWh. Hankkeessa kehitetty ohjausjärjestelmä valvoi ja ohjasi järjestelmän toimintaa autonomisesti ja mahdollisti erittäin stabiilin ja luotettavan toiminnan. Ohjausjärjestelmä reagoi myös ympäristön aiheuttamiin häiriöihin tai laitevikoihin suunnitellusti ja ajoi järjestelmän tarvittaessa turvallisesti alas. Kennoston tuottamaa sähköä syötettiin verkkoon LTY:n hankkeessa kehittämällä virranmuokkauslaitteistolla. Demoyksikön päästöt (NO_x, SO_x, CO, HC) ovat olleet alle mittaustaitteiden määritysrajan ja hankkeessa on onnistuttu tältä osin osoittamaan SOFC-teknologian potentiaali sähköntuotantoon erittäin pienillä päästöillä.

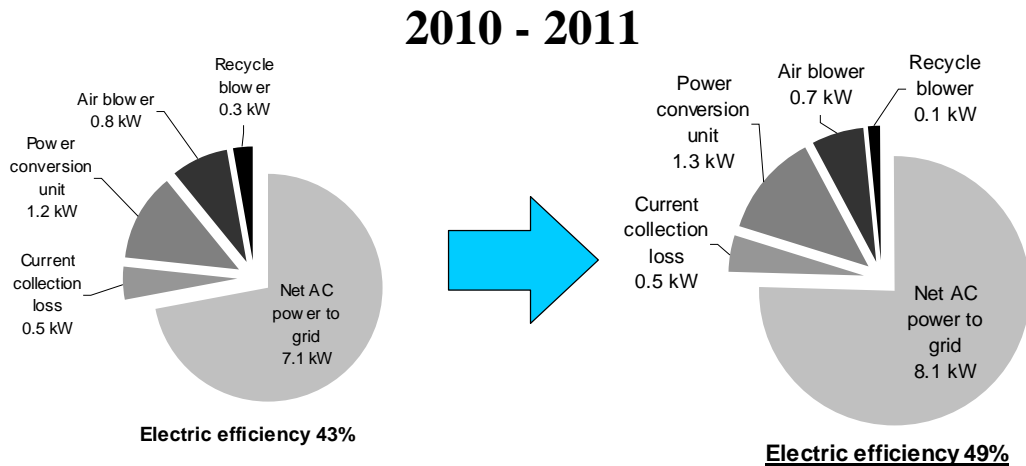


Kuva 2. Ote 10kW demonstraation pitkäaikaiskokeista, jossa on kuvattuna kennoston tuottama sähköteho ja järjestelmän verkkoon syötämä sähköteho kokeen aikana.

Kokeiden aikana havaittiin että operointi demoyksikön nimellispisteessä täydellä teholla ei vaikuta merkittävästi kennostojen elinikään ts. kennostojen jännitedegradaatio oli vertailukelpoinen kennostovalmistajan laboratorio-olosuhteissa tehtyihin mittaustuloksiin verrattuna. Tulos on merkittävä siksi, että sen perusteella demoyksikössä käytetyt järjestelmäratkaisut, -komponentit ja normaalitilan ajo-olosuhteet soveltuvat käytettäväksi kaupallisissa SOFC-järjestelmissä. Kokeiden aikana tunnistettiin järjestelmäkomponentteja, jotka eivät sovellu käytettäväksi SOFC-järjestelmässä. Esim. alkuperäinen kierrätyspuhallin korvattiin kaasulaakeroidulla puhaltimella, mikä on osoittautunut luotettavammaksi ratkaisuksi. Suurin osa komponenteista sekä käytetty järjestelmäkonsepti havaittiin kuitenkin luotettavaksi ja toimivaksi koeajojen aikana.

Demoyksikön rakennetta ja ohjausparametreja optimoitiin koeajojen tulosten perusteella vielä vuonna 2011 ja käyttämällä uutta entistä suorituskykyisempää kennostoa saavutettiin merkittävä parannus järjestelmän suorituskyvyssä ja sähköhyötysuhteessa (Kuva 3). Järjestelmän sisäistä sähkönkulutusta onnistuttiin vähentämään pienentämällä järjestelmäkomponenttien painehäviöitä ja käyttämällä tehokkaampia puhaltimia. Kennoston DC-hyötysuhteeksi mitattiin 65%, mikä on lähes 10% suhteellinen parannus aikaisempaan verrattuna. Kennoston parantunut suorituskyky ja puhaltimien alentunut tehonkulutus mahdollistivat koko järjestelmän

suorituskyvyn nostamisen merkittävästi ja demoyksikölle asetettujen hyötysuhdetavoitteiden saavuttamisen.



Kuva 3. 10 kW demon sähköhyötysuhteen kehittyminen hankkeen aikana.

Voimalaitosdemonstraation kehittäminen, rakentaminen ja sen onnistuneet koeajot ovat konkreettisin osoitus koko SofcPower-hankkeen korkealaatuisesta työstä ja kansainvälisesti merkittävistä tuloksista. Demonstraatiossa on käytetty myös suomalaisen teollisuuden toimittamia tai valmistamia komponentteja sekä tutkimushankkeen aikana kehitettyä täysin uutta erityisesti SOFC-laitoksiin soveltuvaa teknologiaa. Hankkeen tuloksia on otettu käyttöön Wärtsilän polttokennoyksiköissä ja tulosten perusteella Wärtsilä on siirtynyt käyttämään myös VPS:n kennostoteknologiaa omissa testijärjestelmissään.

2.2 Järjestelmäkomponentit

SofcPower-projektissa rakennetun järjestelmän BoP-komponenttien tutkimus-, kehitys ja testaustyön tarkoituksena oli ensisijaisesti löytää 10 kW SOFC demonstraatiossa käytettäväksi sopivat ratkaisut. Koska suurta osaa järjestelmän komponenteista ei ollut kaupallisesti valmiina saatavilla, ne piti suunnitella ja testata itse. Jokaisen yksittäisen komponentin ollessa mahdollinen vikaantumiskohde ja koska yhdenkin komponentin vikaantuminen johtaa yleensä koko järjestelmän vikatilaan, BoP-komponenttien erillistestaukseen kiinnitettiin erityistä huomiota. Järjestelmäkomponenttien tutkimus- ja kehitystyö tehtiin pääosin vuosien 2007-2009 aikana, ennen 10 kW demojärjestelmän rakentamista ja koeajoja.

Joidenkin järjestelmään hankittujen kaupallisten tai esikaupallisten komponenttien kehitystyötä tehtiin yhdessä komponentteja kehittävien yritysten kanssa. Tällaisista mainittakoon esimerkkinä korkean lämpötilan lämmönsiirtimien kehitystyö polttokennojärjestelmän tarpeisiin, joka tehtiin yhdessä Raucell Oy:n kanssa. Tässä yhteistyössä VTT suoritti virtausmekaanista suunnittelua ja optimointia sekä kartoitti sopivia materiaaleja käytettäväksi Raucellin tuotteessa. Näitä lämmönsiirtimiä käytettiin lopulta 10 kW demonstraatiossa sekä ilma- että polttoainejärjestelmässä.

Projektin puitteissa kehitettiin myös useita uusia järjestelmäkomponentteja, kuten jälkipoltin ja integroitu lämmönvaihdin-jälkipoltin. Integroidun lämmönvaihdin-jälkipolttimen prototyyppi, jota kehitettiin yhteistyössä Raucell Oy:n ja Ecocat Oy:n kanssa, osoittautui toimivaksi, joskin pitkäaikaistestauksessa havaittiin siinä käytetyn katalyytin aktiivisuuden vähenemistä. Kehitetyn kaltaisilla integroiduilla komponenteilla on mahdollista pienentää järjestelmän

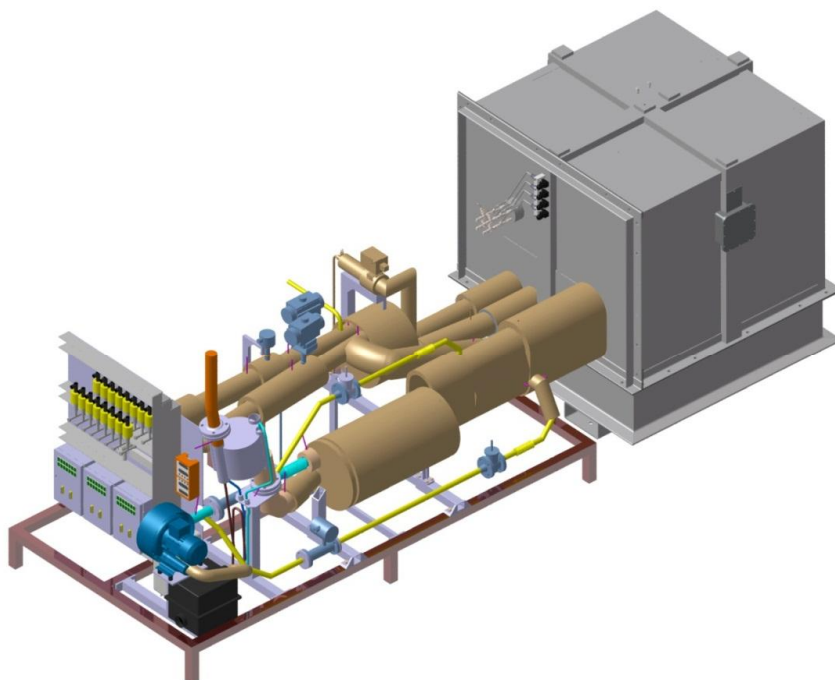
kokoa ja parantaa tehotiheyttä. Muita projektissa kehitettyjä järjestelmäkomponentteja olivat mm. katalyyttinen jälkipoltin ja siihen liittyvä kaasusekoituskammio, järjestelmän käynnistämiseen suunniteltu höyrystin sekä polttoaineen prosessointijärjestelmä.

Kehitetyjä komponentteja käytettiin 10 kW polttokennoyksikössä, jossa ne myös tulivat testatuksi todellisissa järjestelmäolosuhteissa. Näistä kokeista saatiin arvokasta palautetta niin omaan kehitystyöhön, kuin myös yhteistyössä yritysten kanssa kehitettyjen komponenttien osalta komponenttivalmistajille. Lisäksi koeajotuloksista on ollut hyötyä polttokennojärjestelmiä ja –komponentteja kehittäville yrityksille.

2.3 Demonstraatioon mekaaninen rakenne ja lämmöneristys

Hankkeen alussa asetetut vaatimukset 10 kW voimalaitosdemonstraatiolle mm. komponenttien integrointiasteen ja lämpöhäviöiden osalta edellyttivät laitteiston mekaanisen rakenteen eri toteutusvaihtoehtojen kattavaa selvitystä ja huolellista suunnittelua. Aalto-yliopiston koneenrakennustekniikan laitos teki projektin alusta lähtien tiivistä yhteistyötä VTT:n tutkimusryhmän kanssa demonstraatioyksikön BoP-moduulin konseptoinnin ja mekaanisen rakenteen kehittämisessä sekä moduulin lämpöeristyksen suunnittelussa. Hankkeen aikana on viety eteenpäin korkeissa lämpötiloissa toimivien laitteiden mekaanisen rakenteen suunnittelua, ja tutkittu lämpölaajenemisen aiheuttamien ilmiöiden hallintaa sekä eri lämmöneristyskonseptien vaikutusta SOFC-laitoksen rakenteeseen.

Tutkimustyön tuloksena syntyi 10 kW demonstraatioyksikön mekaaninen rakenne ja komponenttien lämpöeristys (Kuva 4). Laitteiston ja lämmöneristyksen valmistamista ja kokoonpanoa varten laaditut suunnitelmat sisälsivät yli 100 teknistä piirustusta. Valmistumisen jälkeen lämpöeristyksen rakennetta on kuvattu lämpökameralla ja havaitut ongelmakohdat on korjattu. Kokonaisuutena laitteiston rakenne ja lämpöeristys on toiminut kiitettävästi – tästä ovat osoituksena demoyksiköllä onnistuneesti suoritettut koeajot.



Kuva 4. 10 kW demonstraation BoP-moduulin rakenne.

Koeajojen aikana havaittiin kuumakorroosion aiheuttamia vaurioita demonstraatioyksikön putkipalkeissa. Korroosion aiheuttajaksi identifioitiin lämpöeristyksessä käytetty EMPE-liima. Vaurion syyn selvittäminen oli tärkeää SOFC-järjestelmien kehitykselle, sillä tämän tiedon perusteella vaurioita voidaan ennaltaehkäistä. Mekaanisten vaurioiden välttäminen on tärkeää laitteistojen eliniän ja luotettavuuden kasvattamiselle.

SOFC-laitokset toimivat erittäin korkeissa lämpötiloissa (jopa 800 °C), jolloin lämmöneristyksellä on suuri merkitys laitteistojen rakenteen suunnittelun, koon, kustannusten ja hyötysuhteen kannalta. Lämmöneristyksen kehittäminen on ollut, ja on myös jatkossa, tärkeässä asemassa kun suunnitellaan laitteiden sarjavalmistusta. Kehitystyö on tarpeellista alan kotimaiselle teollisuudelle, sillä alan osaamista voivat hyödyntää kaikki energia-tekniikan alat, joissa toimitaan korkeissa lämpötiloissa.

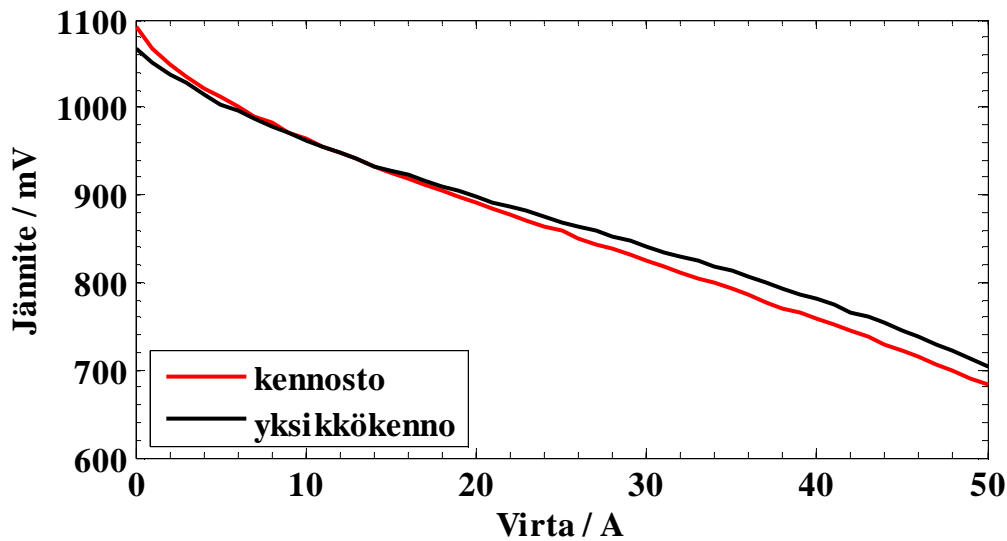
Mekaanisen rakenteen ja lämmöneristyksen tutkimuksen osalta tavoitteet toteutuivat tärkeimpien osa-alueiden suhteen suunnitelmien mukaisesti ja demonstraatiolaitteisto valmistui aikataulussa. Työpaketin päävastuu oli kuumien komponenttien-, teräsrakenteiden-, putkiston- ja lämmöneristyksen suunnittelussa. Tulokset ovat siirtyneet hankkeeseen osallistuneille yrityksille ja yhteistyökumppaneille käytännön toiminnan ja tiiviin yhteistyön kautta.

3 Kennostotutkimus ja -kehitys

3.1 Finnstack 2007-2009

Kennostokehitykseen keskittyvässä alaprojektissa alkuperäisenä tavoitteena oli kehittää suomalainen 1-3 kW polttokennosto hyödyntäen mahdollisimman paljon olemassa olevaa kotimaista osaamista. Kennostokehityksen tärkein tulos oli kennostosuunnittelun, materiaalien ja valmistusmenetelmien kehittäminen tasolle, joka mahdollisti onnistuneen 3000 tunnin koeajon projektissa kehitetyllä kennostolla. Saavutetut tulokset mahdollistivat erillisen yritysprojektin aloittamisen kennostokehityksen osalta vuonna 2010..

Finnstack -alaprojektissa tutkittiin kiinteäoksidipolttokennostoon liittyvää teknologiaa. Työ keskittyi kennoston materiaalien ja valmistustekniikoiden kehittämiseen sekä kennoston suunnitteluun ja karakterisointiin. Työtä tehtiin yhteistyössä DeSign, Genius, SOFC600 ja FCTESqa EU-projektien kanssa sekä FINNED-konsortion kanssa, johon kuuluivat VTT:n lisäksi ECN, Sandvik AB, Delftin teknillinen korkeakoulu sekä Euro-Techniek-Eindhoven B.V. Projektissa kehitettiin, rakennettiin ja evaluoitiin useita kennostoja, joiden suorituskyky oli vertailukelpoinen kaupallisesti saatavilla olevien SOFC-yksikkökennojen suorituskyvyn kanssa. (Kuva 5).



Kuva 5. Kennoston suorituskyky verrattuna yksikkökennoon.

Varsinainen kennostokehitys SofcPower –hankkeessa päättyi vuonna 2009, jonka loppuun mennessä suoritettiin onnistuneesti 3000 tunnin koeajo projektissa suunnitellulla ja valmistetulla kennostolla. Tähän kennostoon oli integroitu projektissa kehitetyt suojapinnoitteet, tiivisteet ja kennostorakenne. Suojapinnoitteiden valmistusmenetelmä ja materiaali oli kehitetty projektissa, tiivisteet oli kehitetty yhteistyössä Flexitallic Ltd:n kanssa ja kennostorakenne oli suunniteltu ja mallinnettu hankkeessa kehitetyillä mallinnustyökaluilla.

Uusi yritys Elcogen Oy on aloittanut kaupallisen kennoston kehitystyön projektissa saavutettujen tulosten pohjalta ja hyödyntää projektissa kehitettyä osaamista. Projektissa syntyi 2009 mennessä kolme keksintöilmoitusta, jotka Elcogen Oy on ostanut ja aloittanut oman kennostokehitysohjelman niiden pohjalta.

3.2 Kennoston ja järjestelmän vuorovaikutus

Vuosien 2010-2011 aikana toiminta keskittyi kennoston ja järjestelmän välisten vuorovaikutussuhteiden tutkimiseen. Tärkeimpinä tavoitteina oli tutkia eri järjestelmäkomponenttien vaikutusta kennoston elinikään, sekä kehittää menetelmä kennoston sisäisten vuotojen määrittämiseksi toiminnan aikana.

Järjestelmäkomponenteista tutkittiin virranmuokkauslaitteiston aiheuttaman nopean virranvaihtelun, metalliosista höyrystyvän kromin, tiivisteistä höyrystyvien epäpuhtauksien ja hätäalasajojärjestelmän vaikutuksia SOFCien elinikään. Kennoston ja järjestelmän elinikää alentaa merkittävästi kuumankestävistä teräksistä höyrystyvä kromi. Tämän ilmiön tutkimiseksi ja minimoimiseksi kehitettiin menetelmä BOP-komponenteista höyrystyvän kromimäärän mittaamiseksi. Menetelmän toimivuus on osoitettu ja tulokset vastaavat viimeisimpiä kirjallisuusarvoja. Höyrystyvän kromin määrä väheni 75% lämpökäsittelyllä ja 90% laskettaessa lämpötila 750 asteesta 650 asteeseen. Tämä on tärkeä tulos tavoiteltaessa 40000 tunnin toiminta-aikaa. Järjestelmässä käytettävien korkean lämpötilan tiivisteiden vaikutusta kennoston elinikään tutkittiin erillisillä kennokokeilla joissa havaittiin että tutkitut tiivisteet eivät nopeuttaneet kennon degradaatiota. Myös virranmuokkauslaitteiston aiheuttaman korkeataajuisen virran väreiden vaikutusta kennoston elinikään mitattiin yksikkökennoilla. Kokeiden perusteella myöskään tämä ilmiö ei lisää kennojen jännitodegradaatiota.

Kennoston sisäisten vuotojen mittaamiseksi kehitettiin menetelmä, jolla pystytään havaitsemaan anodilta katodille vuotavan polttoaineen määrä järjestelmän toiminnan aikana. Kennoston sisäiset vuodot vaikuttavat merkittävästi paitsi kennoston suorituskykyyn ja toimintaan, myös kennoston lämpötaseeseen ja tätä kautta eri järjestelmäkomponenttien mitoitukseen ja koko järjestelmän rakenteeseen. Menetelmä tarjoaa mahdollisuuden sekä kennostojen vuotojen tarkkaan karakterisointiin että SOFC-laitosten vikadiagnostiikkaan ja ohjaukseen. Lisäksi verrattiin erilaisten hätäalajasajomenetelmien toimivuutta yksikkökenno- ja kennostokokeilla.

Työpaketissa tehty tutkimus on ollut hyödyllistä SOFC-laitosten yksittäisten komponenttien ja osajärjestelmien optimoinnin kannalta. Tulosten avulla järjestelmäintegraattorit pystyvät optimoimaan mm. hätäalajasajossa tarvittavia varajärjestelmiä sekä ottamaan SOFC-kennostojen vuodot huomioon laitojen suunnittelussa ja ohjauksessa aiempaa tarkemmin ja luotettavammin.

4 Ohjausjärjestelmät ja mallinnus

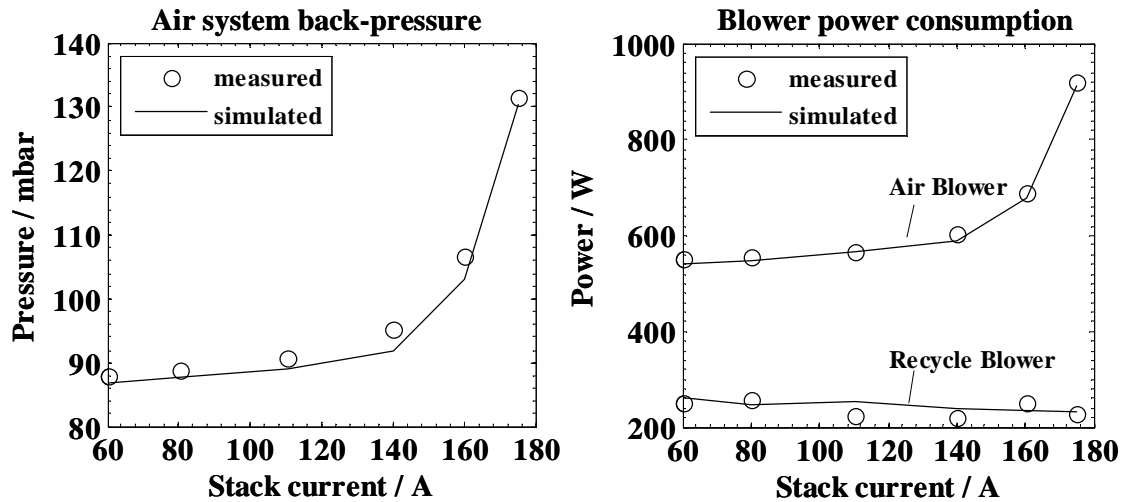
Tutkimusprojektin perustamisvaiheessa Ohjausmenetelmät ja mallinnus –työpaketin tavoitteeksi kirjattiin mallinnuksen hyödyntäminen SOFC-demoyksikön ja sen vaatimien komponenttien suunnittelussa sekä tarvittavien ohjausjärjestelmien ja –menetelmien kehittämisessä. Rinnakkaistavoitteena on ollut syventää projektin henkilöstön mallinnusosaamista kokonaisvaltaisesti sekä parantaa käytettäviä työkaluja vastaamaan mallinnuksessa esiintyviä tarpeita.

Suunnittelun ja mallinnusosaamisen osalta yllä mainitut tavoitteet on saavutettu ja useissa tapauksissa jopa ylitetty. Projektin aikana kertynyttä mallinnusosaamista käytetään nyt rutiininomaisesti lähes kaikissa VTT:n polttokennoprojekteissa ja projektin aikana luotujen ohjelmistojen laajamittainen hyödyntäminen on aloitettu myös Wärtsilän toimesta.

SOFC-demoyksikön ohjausjärjestelmien ja –menetelmien kehittämisen osalta alkuperäiset tavoitteet ovat myös toteutuneet. Hankkeen aikana todettiin, että 10 kW –demoyksikön suunnitteluvaiheessa esiin tullessiin lukuisiin ”entäs jos” –kysymyksiin vastataan parhaiten Matlab/Simulink-pohjaisten tasapainotilan järjestelmämallien avulla, minkä johdosta nämä mallit, alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen, korvasivat Aproksen ensisijaisena polttokennojärjestelmien suunnittelutyökaluna. Samalla dynaamiseen mallinnukseen käytettävien Aprospohjaisten mallinnustyökalujen kehityksen painopiste siirtyi yhä enemmän polttokennosysteemin eri komponenttien välisten dynaamisten vuorovaikutusten kuvaamiseen. Tärkeimmät dynaamisen mallinnustyön tavoitteet saavutettiin painopistemuutoksesta huolimatta, sillä esimerkiksi alun perin tavoitteina mainittu demoyksikön ylös- ja alasajojen suunnittelu tehtiin dynaamisen mallin sijasta käyttäen Matlab/Simulink-pohjaista tasapainotilan järjestelmämallia.

Ohjausmenetelmät ja mallinnus –työpaketin ylivoimaisesti tärkein tulos on projektin aikana luodut mallinnustyökalut ja syntynyt mallinnusammattitaito. Paras esimerkki projektin aikana saavutetusta mallinnusosaamisen tasosta on projektin aikana rakennettu 10 kW –voimalaitosdemonstraatio, jonka suunnittelu ja komponenttien mitoitus toteutettiin kokonaan projektin aikana kehitetyillä mallinnustyökaluilla. Näiden osalta taas hyvän esimerkin muodostavat projektissa kehitetyt Matlab/Simulink-pohjaiset ProSofc-järjestelmämallinnustyökalut, joita on SofcPower-projektin lisäksi hyödynnetty myös EU-projekteissa (ASSENT, CATION) ja jotka on otettu tuotannolliseen käyttöön myös Wärtsilän polttokennoryhmässä. ProSofc-työkaluilla on mahdollista mallintaa SOFC-laitoksen toimintaan ja hyötysuhteeseen vaikuttavia suureita, kuten eri järjestelmäkomponenttien aiheuttamia

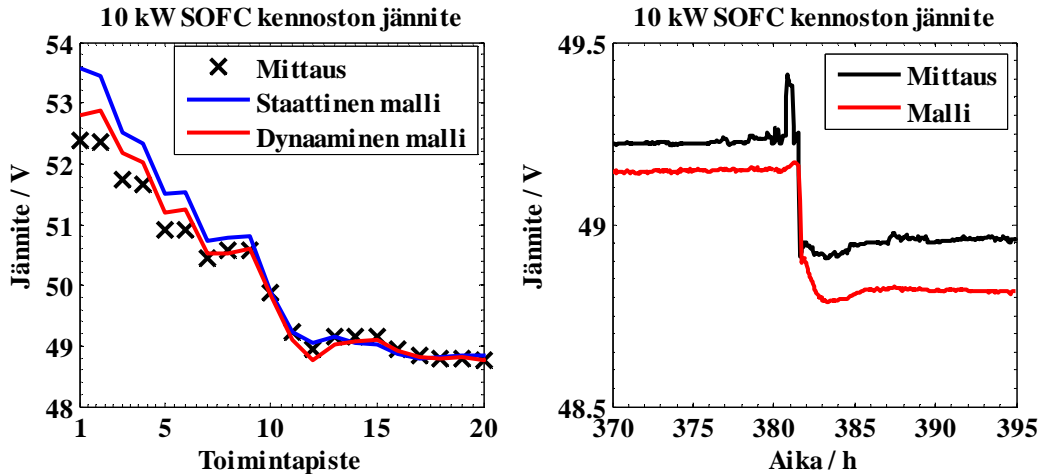
painehäviöitä tai puhaltimien tehonkulusta hyvinkin tarkasti ennen varsinaisen laitoksen rakentamista (Kuva 6).



Kuva 6. ProSofc –mallinnustyökaluilla laskettu 10 kW demonstraation ilmajärjestelmän painehäviö ja puhaltimien tehonkulutus verrattuna mittaustuloksiin.

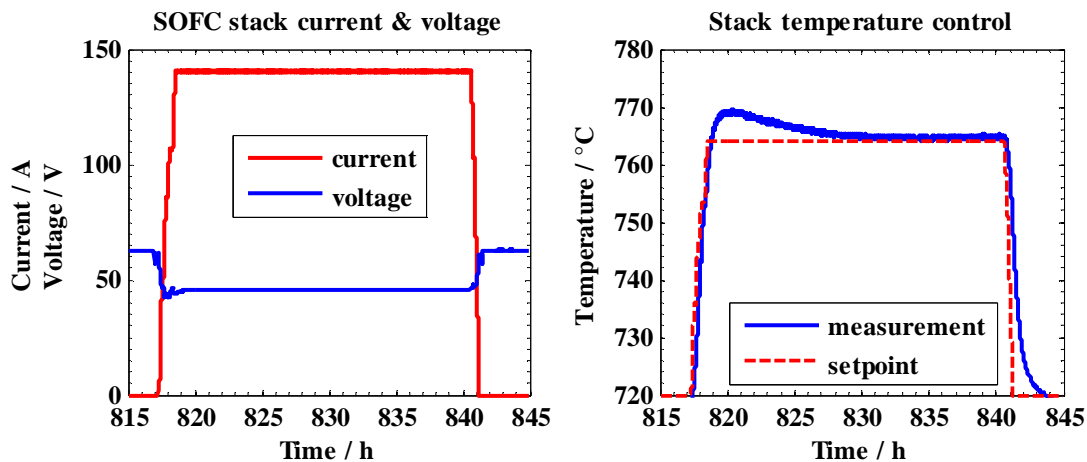
Ohjausmenetelmät ja mallinnus –työpaketti puitteissa suoritettavat työt muodostivat yhtenäisen jatkumon muutaman tunnin kertaluontoisista mallinnustehtävistä jopa useamman vuoden pituisiin tutkimustöihin. Mikäli huomio kiinnitetään ainoastaan laajoihin kokonaisuuksiin, kuten em. järjestelmämallinnustyökalujen tai polttokennojärjestelmien sydämen muodostavien kennostojen toimintaa kuvaavien polttokennomallien kehitykseen, saadaan vain rajoittunut kuva projektin aikana tuotetuista mallinnustuloksista. Kuluneen viiden projektivuoden aikana luotiin useita satoja eri sovelluskohteisiin räätälöityjä malleja ja tuotettiin tuhansia yksittäisiä mallinnustuloksia, joiden avulla pystyttiin vastaamaan lukuisiin 10 kW voimalaitosdemonstraation rakennetta ja käyttöä koskeviin kysymyksiin. Samalla muodostui kattava kokemuseräinen kuva siitä mihin SOFC-voimalaitosten suunnitteluun, rakentamiseen tai käyttöön liittyviin kysymyksiin voidaan ja (mikä usein vielä tärkeämpää) mihin ei voida luotettavasti vastata mallinnuksen avulla.

VTT:n kehittämien järjestelmämallinnustyökalujen lisäksi 10 kW -demonstraatioon suunnittelussa hyödynnettiin runsaasti FEM-pohjaista 3D-mallinnusta, jonka avulla optimoitiin rakennettavan laitteiston geometriaa kaasujen virtauksiin, lämmönsiirtoon ja rakenteiden mekaniikkaan liittyvien kysymysten osalta. Tutkimuksellisesti haastavin osa-alue oli ja on edelleen kuitenkin itse polttokennoston mallinnus järjestelmäolosuhteissa, jota on tehty sovelluskohteista riippuen niin 0-, 1-, 2- kuin 3-ulotteisilla, staattisilla ja dynaamisilla malleilla. Hankkeen aikana kehitetyillä polttokennomalleilla on mahdollista laskea ja ennustaa kennoston ja järjestelmän toiminnan kannalta välttämättömiä prosessisuureita. Kuva 7 esittää VTT:llä kehitettyjen 2D -kennostomallien vastaavuutta 10 kW -demonstraatioyksikön mittaustuloksiin kennoston jännitteen osalta eri toimintatiloissa.



Kuva 7. Kennostomallien vastaavuus mittaustuloksiin 10 kW demonstraation eri toimintapisteissä (vas.) sekä dynaamisen kennostomallin vastaavuus mittauksiin kuormitusmuutoksen aikana (oik.).

Kaikki hankkeessa luodut dynaamiset mallit toteutettiin VTT:n omassa Apros-ympäristössä. Tätä varten kehitettiin kaksi erilaista dynaamista SOFC-kennostomallia, jotka nykyään ovat osa Aproksen polttokennomallikirjastoa. Nämä mallit mahdollistavat Aproksen käyttämisen SOFC-voimalajärjestelmien ja erityisesti niiden ohjaus- ja automaatiojärjestelmien suunnittelussa ja simuloinnissa. SofcPower-hankkeessa Aproksen SOFC-mallien avulla toteutettiin ja validoitiin mittausdataa vasten dynaaminen malli 10 kW –demonstraation kennostomoduulista, järjestelmän kokonaisvaltaista säätösuunnittelua ja dynaamista simulointia varten. Dynaamisten mallien avulla tutkittiin mm. kennoston lämpötilan hallintaa ja viritettiin lopulta ohjausjärjestelmän säätimien parametreja. Kuva 8 esittää 10 kW demonstraatioon implementoidun kennoston lämpötilasäädön toimintaa kuormitusmuutosten aikana.



Kuva 8. Kennoston virta ja jännite (vas.) sekä lämpötilasäätö kuormitusmuutosten aikana (oik.).

Projektin aikana Suomeen on onnistuttu luomaan kansainvälisesti vertailukelpoinen mallinnusosaamis pohja, joka jo tässä vaiheessa voidaan nähdä elintärkeäksi kotimaiselle polttokennotutkimukselle ja sitä hyödyntävälle yritystoiminnalle. Kehitettyjä työkaluja hyödynnetään sekä kansallisissa ja kansainvälisissä jatkotutkimushankkeissa että Wärtsilän tuotekehitystyössä. Edellä mainittu ProSofc-mallinnustyökalupaketti on lisensoitu Wärtsilälle. Hankkeessa saavutetut tulokset ovat jatkossa tehtävälle mallinnustyölle, niin kennosto-, komponentti- kuin systeemitasollakin välttämättömiä perustuloksia. Näin ollen tuloksista hyötyvät erityises-

ti ne, jotka tutkivat ja kehittävät SOFC-laitoksia sekä niiden automaatio- ja ohjausjärjestelmiä, tärkeimpinä Wärtsilä ja VTT.

5 Polttoaineiden tuotantoketjut ja prosessointi

5.1 Polttoaineiden tuotantoketjut

SofcPower-hankkeen 'Polttoaineiden tuotantoketjut' -alaprojekti toteutettiin kolmessa vaiheessa vuosien 2007-2008 aikana. Aluksi tehtiin selvitys tulevaisuuden polttoainevaihtoehdoista. Selvityksen perusteella arvioitiin tarkemmin todennäköisin biopolttoainevaihtoehto ja lopuksi tehtiin kustannusarvio yrityksistä kiinnostavimmasta vaihtoehdosta.

Biopolttoaineselvityksen perusteella biokaasut olivat lupaavimpia biopolttoaineita SOFC:lle. Biojättemäärät kasvavat, tuotantotekniikka on kaupallista ja metaani on paras polttoaine SOFC:lle. Selvityksen perusteella ehdotettiin lisätutkimusta biokaasun talteenoton ja puhdistuksen osalta, jotta voidaan määrittää järkevin kaasun talteenotto-kaasunpuhdistusjärjestelmä laadultaan vaihteleville biokaasuille. Myös tarkempi teknistaloudellinen vertailu eri biokaasun tuotantoympäristöjen (kaatopaikat, jätevedenpuhdistamot, maatilat) välillä ennalta valituissa kohteissa havaittiin tarpeelliseksi. Nestemäisten biopolttoaineiden osalta biodiesel ja metanoli identifioitiin parhaiksi vaihtoehdoiksi. Kaikkien selvityksen biopolttoaineiden tuotantokustannukset arvioitiin selvästi fossiilista maakaasua kalliimmiksi. Kaikkien synteetikaasutuotteiden, Fischer-Tropsch-dieselin, metanolin, synteettisen maakaasun ja vedyn, tuotantokustannukset olisivat integroidussa systeemissä samaa luokkaa.

Seuraavassa vaiheessa tehtiin arvio jätevedenpuhdistamolta syntyvän kaasun puhdistusvaatimuksista, tarvittavasta teknologiasta ja kustannuksista. Selvityksen kokoluokiksi valittiin 50 kW, 250 kW sekä 1 MW. Orgaanisia piiyhdisteitä, kuten siloksaaneja, silaaneja ja silanoleja esiintyy jäteveden puhdistamon biokaasussa tai kaatopaikkakaasussa jopa yli kymmenen erilaista. Biokaasu sisältää lisäksi rikkivetyä, orgaanisia sulfideja, merkaptaaneja sekä mahdollisesti myös muita orgaanisia rikkiyhdisteitä, jotka on poistettava ennen SOFC-käyttöä. Kaasu sisältää lisäksi orgaanisia klooriyhdisteitä ja suurimolekyylisempiä hiilivetyjä, nk. VOC yhdisteitä, jotka on myös poistettava.

SOFC-käyttöön soveltuvan puhdistetun biokaasun laatuvaatimukset ovat tiukat sallittavien epäpuhtauksien suhteen. Ilman aktiivihilien ja muiden sorbenttien (silikageeli, rautayhdisteet) käyttöä laatuvaatimuksia ei nykytekniikalla saavuteta. Lisäksi vain harva laitetoimittaja uskalltaa antaa puhdistusprosessilleen toiminnalliset takuuarvot esimerkiksi orgaanisten piiyhdisteiden suhteen. Epäpuhtauksien määrä ja laatu vaihtelevat eri jäteveden puhdistamoilla ja vaihtelua voi esiintyä samallakin puhdistamolla vuodenajasta riippuen. Kaasun puhdistuskustannukset riippuvat yhdisteiden määrästä ja osin myös laadusta. Sovelluskohteen biokaasun epäpuhtaudet on tunnettava tapauskohtaisesti, jotta voidaan tehdä yksityiskohtainen kaasun puhdistuslaitteistojen suunnittelu.

Projektin lopuksi arvioitiin vihreää ruokohelpeä käyttävien biokaasun tuotantovaihtoehtojen tuotantokustannuksia. Lähtökohtana pidettiin tuotetun biokaasun käyttöä turpeen tuotannon työkoneissa ja kuljetuksissa. Työssä laskettiin biokaasuvaihtoehtojen kustannukset kolmella eri tuoreen ruokohelven tehdashinnalla, jotka olivat välillä 40 - 180 €/t. Tuoreen ruokohelven viljelypinta-alaksi arvioitiin 400 ha biokaasun tuotantomäärän ollessa 1 MW. Satotasona käytettiin 8 t kuiva-ainetta/ha. Ruokohelven tehdashinnalla 40 €/t biometaanin tuotantokustannukset olivat 1-1,3 €/l diesel ekv.

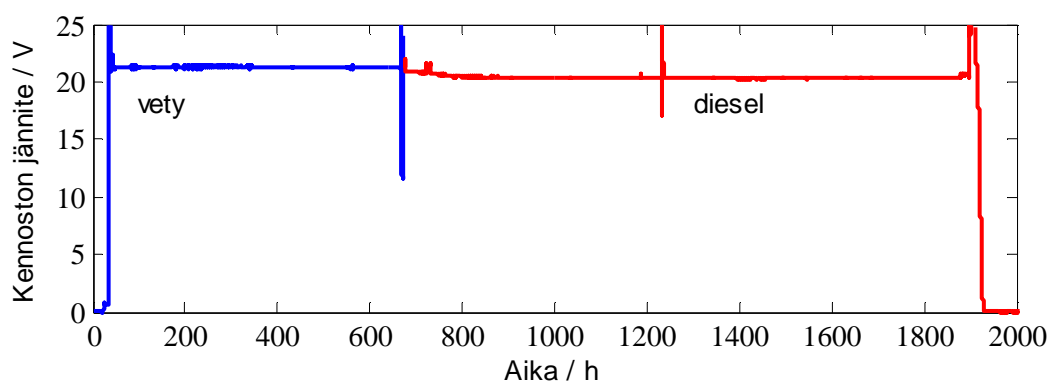
Biokaasun puhdistustekniikat kehittyvät nopeasti, jonka seurauksena myös puhtaan kaasun tuotantokustannukset laskevat. Tämä pätee sekä jo teollisesti sovellettaviin prosesseihin että kehitysvaiheessa oleviin prosesseihin, jotka saattavat aiheuttaa lähiaikoina suuriakin toimintatapamuutoksia biokaasun puhdistusjärjestelmiin. Hyödyntämismahdollisuuksien kannalta aktiivinen seuranta on tarpeellista. Kaatopaikan biokaasujen talteenotto ja jalostus biometaaniksi on osoittautunut edullisimmaksi vaihtoehdoksi.

5.2 Polttoaineiden prosessointi

TKK:n teknillisen kemian laboratorio ja VTT tutkivat nestemäisten polttoaineiden prosessointia vuosina 2007-2008. TKK:lla työ keskittyi kestävien, aktiivisten ja selektiivisten jalometallikatalyyttien kehittämiseen nestemäisten biopolttoaineiden (metanolin, etanolin ja BTL-polttoaineiden) autotermistä reformointia varten. VTT:llä tutkittiin jalometallikatalyytillä reformoidun dieselin soveltuvuutta SOFC-kennoston polttoaineeksi pitkäaikaisessa käytössä.

Jalometallikatalyytit (Pt, Rh ja RhPt) osoittautuivat erittäin aktiivisiksi ja selektiivisiksi katalyyteiksi niin uusiutuvien (metanoli, etanoli, NExBTL) kuin uusiutumattomien (rikittömän diesel) polttoaineiden reformoinnissa. Lisäksi kaksin muodostus pysyi alhaisena myös pitkäkestoisissa koeajoissa (100h). Katalyyttien rikinkestävyyttä testattiin NesteOilin ns. rikittömällä dieselillä (<10 ppmS) sekä rikkivetyä sisältävillä hiilivetyseoksilla. Rikkivety, joka on yleisesti käytetty malliaine, ei yllättäen soveltunut vähärikkisten polttoaineiden malliaineeksi, sillä se deaktivoi katalyyttiä voimakkaasti, kun taas rikittömällä dieselillä deaktivoituminen oli huomattavasti vähäisempää, vaikka rikkiä oli sama määrä (10 ppm S). NesteOilin NExBTL:n alhaisella rikkipitoisuudella (<1ppm) ei ollut vaikutusta jalometallikatalyyttien kestävyYTEEN, vaan katalyytti säilytti aktiivisuutensa.

Dieselpolttoaineen reformointitekniologiaa testattiin käytännössä yhdistämällä VTT:n kehittämä dieselreformeritanskalaisen Topsoe A/S:n SOFC-kennostoon. Dieselreformerilla tuotettiin kennoston tarvitsema polttoaine käyttäen lähtöaineena vähärikkistä dieseliä (<10 ppmS). Kuva 9 esittää kennoston suorituskyvyn koeajon aikana. Ensimmäisen 700 h aikana kennostoa polttoaineena käytettiin vetyä, ja tämän jälkeen siirryttiin käyttämään reformoitua dieselpolttoainetta. Dieselpolttoaineelle siirryttäessä havaittiin lievä suorituskyvyn lasku ensimmäisen sadan tunnin aikana, jonka jälkeen kennoston suorituskyky pysyi hyvällä tasolla kokeen loppuun saakka. Vähärikkisen dieselin käyttäminen polttoaineena on varteenotettava vaihtoehto, eikä sen sisältämällä rikkiyhdisteillä ole merkittävää vaikutusta kennoston pitkäaikaiskestävyyteen.



Kuva 9. Kennoston jännite koeajon aikana. Sinisellä värillä polttoaineena vety ja punaisella värillä kun polttoaineena diesel.

Nestemäisten polttoaineiden lisäksi VTT:llä tutkittiin maakaasun reformointia käyttämällä jalometallikatalyyttiä ja anodikaasun takaisinkierrätystä. Tavoitteena oli kehittää SOFC-voimalaitosdemonstraatiota varten takaisinkierrätyksellä toimiva reformeriyksikkö, jolla voidaan tuottaa SOFC-kennoston tarvitsemat suojakaasut järjestelmän lämmityksen ja tyhjäkäyntitilan aikana. Näillä ratkaisuilla on mahdollista yksinkertaistaa SOFC-laitoksen rakennetta ja alentaa sen kustannuksia.

Tutkimustyön aluksi selvitettiin prosessiolosuhteet, joissa reformeri toimii tehokkaasti ja turvallisesti, eli tuottaa halutun kaasuseoksen ilman järjestelmän toiminnan kannalta vaarallista koksautumista. Tutkimus tehtiin suorittamalla koeajoja reformerin prototyypillä käyttäen synteettistä kierrätyskaasua. Reformerin tuotekaasun koostumus vastasi laskennallista tasapainotilan kaasukoostumusta kierrätyskaasulla myös huomattavan suurilla virtausnopeuksilla ja vaihtumalla, eikä hiilenmuodostumista havaittu vaikka kokeissa käytettiin äärimmäisen alhaisia kierrätysasteita. Vuonna 2009 ko. reformeri rakennettiin osaksi 10 kW – voimalaitosdemonstraatiota ja se on toiminut erittäin luotettavasti koeajojen aikana. Demoyksiköllä suoritettiin sarja kokeita, joissa reformerilla tuotettiin järjestelmän vaatimat suojakaasut. Järjestelmä lämmitettiin useita kertoja huoneenlämpötilasta käyntilämpötilaan ja käynnistettiin menestyksekkäästi. Kennoston suorituskyvyssä ei havaittu merkittäviä muutoksia käynnistyskokeiden välillä.

Tulosten perusteella vähärikkisten nestemäisten polttoaineiden hyödyntämiseen on erittäin hyvät edellytykset vety- ja polttokennoteknologiassa. Jalometallikatalyytit toimivat erittäin hyvin sekä nestemäisten että kaasumaisten polttoaineiden reformoinnissa. Hankkeessa kehitetyn reformeriyksikön toiminta todennettiin 10 kW –demonstraatiossa ja so. työpaketin tavoitteet saavutettiin. Tulokset voidaan hyödyntää suoraan kaupallisten SOFC –laitosten polttoainejärjestelmien kehitystyössä.

6 Demonstrointi

SOFC-laitosten demonstrointia käsittelevä työpaketti toteutettiin vuosina 2007-2008. Kokonaistavoitteena oli laatia tekninen käsikirja SOFC-laitosten demonstrointia suunnittelevien yritysten käyttöön, jossa on huomioitu tämän teknologian erityispiirteet niin kansainvälisten standardien, lainsäädännön kuin kytkentöjen osalta. Käsikirja valmistui suunnitellusti vuonna 2008. Käsikirjan lisäksi demonstroinnin vaatimuksia ja edellytyksiä selvitettiin tapauskohtaisesti VTT:n pilot-hallissa, jota suunniteltiin Wärtsilän SOFC-laitoksen demonstrointikohteeksi. Työn aikana määritettiin mm. SOFC-laitoksen CHP-kytkentään liittyvät tekniset rajaukset ja viranomaisvaatimukset rakennusten sekä aluelämpöverkon näkökulmasta. Työssä selvitettiin myös verkkopalvelun toimittajien, kiinteistön omistajien ja tulevien käyttäjien näkemykset ja toiveet.

Vuonna 2008 polttokennoja koskevia standardeja vasta kehitettiin CEN/CENELEC-järjestön yhteisen työryhmän "Fuel Cell Gas Heating Appliances" valmisteleva eurooppalainen standardiluonnos prEN 50465 on toistaiseksi keskeisin sovellusstandardi. Polttokennoja koskevat vaatimukset kuvataan myös IEC TC 105 komitean valmistelemisissa standardeissa, joista standardipaketti (IEC 62282-3, osat 1-3) on tärkein perusta sovellusta valmistettaessa. Turvallisuuden edellytyksenä on, että asennettavan polttokennojärjestelmän on oltava CE-merkitty, ja täytettävä siksi joukko Euroopan unionin asettamia direktiivejä (mm. kone-, pienjännite-,

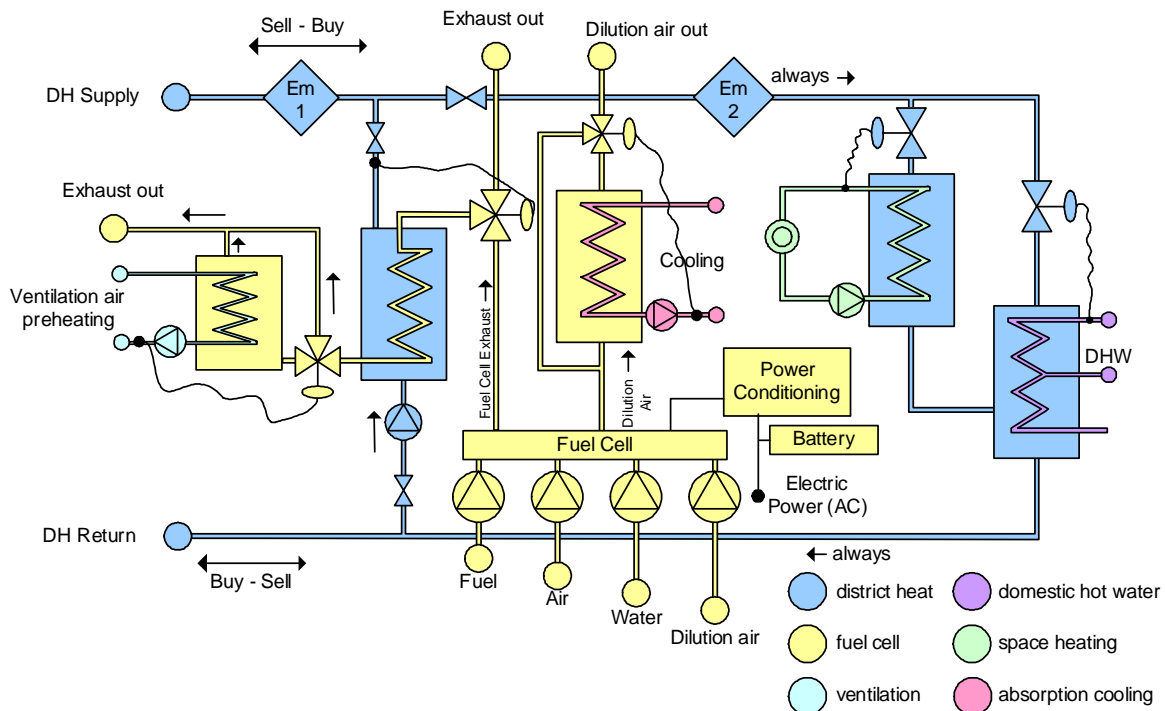
paineastidirektiivi yms.), tilanteessa, jossa kansainvälinen standardijärjestelmä ei vielä tällaista järjestelmää oikein kunnolla tunne.

Yleisen turvallisuuden nimissä polttokennojärjestelmien asennuksissa on huolehdittava seuraavista asioista:

- Palavien ja/tai myrkyllisten kaasujen tai kaasu-, neste- ja kiinteiden aineiden vapautuminen on estettävä
- Riskien eliminointi polttokennojärjestelmän ulkopuolella äkillisen energian ja/tai kaasujen purkautumisen varalle
- Näkyvät turvamerkinnot laitteistossa ja tilassa muiden riskien osalta

Polttokenno ja siihen liittyvät laitteet, komponentit ja säätimet on sijoitettava ja asennettava noudattaen valmistajien ohjeita. Tila, johon polttokenno on asennettu, on varustettava vetyilmaisimella. Lisäksi vaaditaan kirjallinen palontorjunta- ja pelastussuunnitelma.

SOFC-laitoksen CHP-kytkennän osalta havaittiin, että Suomessa on muutama tyypillinen kaukolämpöliitäntä esihyväksytty käytettäväksi rakennuksissa, mutta mikään näistä ratkaisuista ei ota huomioon mahdollista paikallista lämmön tuotantoa rakennuksessa. Siksi kehitettiin toimistorakennukselle uusi kytkentäehdotus (Kuva 10), jossa polttokennojärjestelmä yhdistetään muuten tyypilliseen kaukolämpökytkentäkaavioon. Kytkennän toteutuksessa on otettava huomioon useita tärkeitä varotoimia (mm. materiaalien, paineiden ja lämpötilatasojen osalta). Kaukolämpöverkkokytkennän kautta ylimääräistä lämpöä voidaan hyödyntää rakennuksen ulkopuolellakin.



Kuva 10. SOFC-laitos liitettynä rakennuksen lämmitysjärjestelmän kytkentäkaavioon.

SOFC-laitos syöttää sähköenergiansa sähköverkkoon ja sähköenergiaa tuottavia laitteita, jotka aiotaan liittää osaksi pienjänniteverkkoa invertterin avulla, koskee joukko vaatimuksia. Kaikki avoinna olevat sähköä johtavat osat on kytkettävä maadoituspiiriin. Mahdollinen nollassuunta on liitettävä päämaadoitusterminaaliin. Liitäntälaitteen lähtösuodattimet eivät saa aiheuttaa häiriöitä muuhun sähköverkkoon, eikä häiriövaikutuksia sallita muillekaan reaktiivisille kom-

ponenteille. Inverttereillä varustettuja järjestelmiä voidaan kytkeä osaksi verkkoa ilman erillistä synkronointilaitetta.

Projektin tuloksena kerättiin ajan tasalla oleva tieto SOFC-CHP laitteiston rakennukseen liittämistä ohjaavista teknisistä ja viranomaisvaatimuksista ”yksiin kansiin”. Tulokset on julkaistu SOFC CHP-demonstraatiolaitoksen asennuksen käsikirjana, joka on sekä painettuna että sähköisessä muodossa palvelemissa tulevia käyttäjiä laitteistojen toteutuksessa. Julkaisut on tehty englannin kielellä, joten niiden globaali käyttö on mahdollista.

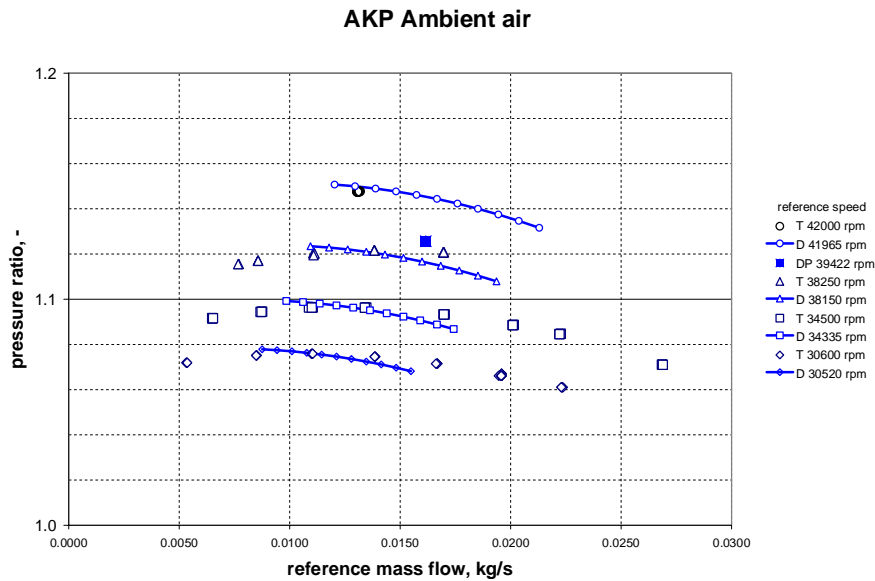
7 Kierrätyspuhallin

Lappeenrannan teknillisen yliopiston Virtaustekniikan laboratorio (LFD) tutki ja kehitti hankkeen aikana SOFC-laitoksen anodikaasun takaisinkierätykseen soveltuvan puhallinratkaisun. Anodikaasun takaisinkierätys on hyödyllistä SOFC-voimalaitoksissa, sillä siten saadaan (i) hyödynnettyä kennoston pakokaasujen sisältämä vesihöyry polttoaineen reformoinnissa ja (ii) nostettua polttoainetta käyttöastetta. Puhaltimien käyttökohteeksi valittiin 50-250 kW SOFC-laitokset, sillä tällä sovellusalueella nähtiin paremmat toimintaedellytykset puhaltimien kaupalliselle käytölle kuin pienissä muutaman kilowatin mikroCHP SOFC-järjestelmissä.

Kierrätyskaasun korkea lämpötila on puhaltimen rakenteen ja toiminnan kannalta merkittävä haaste, eikä tähän tarkoitukseen ei ole saatavilla sarjavalmistuksessa olevia kaupallisia puhaltimia. Korkea lämpötila asettaa teknisiä haasteita mm. puhallinpyörän suunnittelun, puhaltimen materiaalien valinnan sekä käyttölaitteen osalta. Tutkimustyön tulosten pohjalta LTY suunnitteli, valmistutti ja testasi kaksi anodikaasun takaisinkierätykseen soveltuvaa puhallinta.

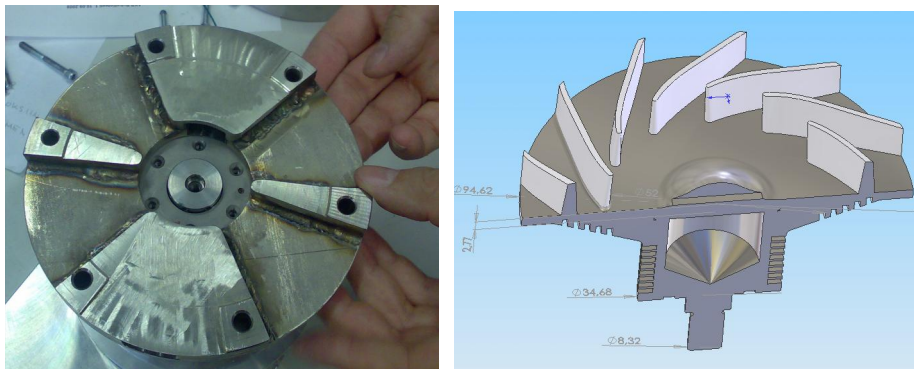
Ensimmäinen projektissa toteutettu puhallin oli tarkoitettu käytettäväksi 50 kW SOFC-laitoksessa. Puhaltimen teho oli 500 W eli se kuluttaa vain prosentin laitoksen tuottamasta sähkötehosta. Puhallin toteutettiin keskipakopumppua muistuttavana radiaalipuhaltimena erikoisteräksestä, ja sen toiminta testattiin 300 °C toimintaympäristössä. Puhaltimen suunnittelussa toimintapisteessä pyörimisnopeus on 66 000 rpm ja kaasun massavirta 0.012 kg/s. Kuva 11 esittää puhaltimen tunnuskentää, josta ilmenee sekä suunniteltu että mitattu toimintakyky.

Toinen puhallinpyörä suunniteltiin 250 kW:n polttokennolaitteistoon ja edelleen puhaltimen tehonkulutus oli noin yhden prosentin luokkaa.



Kuva 11. 50 kW –järjestelmään suunnitellun puhaltimen suorituskyky, suunnitteluarvot jatkuvalla pistejoukolla, mittauspisteet yksittäisinä pisteinä.

Käyttölaitteen ja puhallinpyörän mekaanisen integroinnin osalta suurimmat haasteet syntyivät niiden eri toimintalämpötilasta. Sähköinen käyttölaitte ei voi toimia puhallinpyörän 300°C lämpötilassa. Tämän ratkaisemiseksi kehitettiin puhallinpyörän osalta innovatiivinen ratkaisu, jolla ehkäistään lämmön johtumista akselia pitkin sähkökoneeseen. Lisäksi puhaltimen ja sähkömoottorin väliin kehitettiin erillinen ilmajäähdytyskanavisto (Kuva 12).



Kuva 12. Vasemmalla puhaltimen ilmajäähdytyskanavistoa ja oikealla 250 kW SOFC-laitoksen kierrätyspuhaltimen juoksupyörä

Hankkeessa kehitetyt korkeassa lämpötilassa toimivat öljyvapailla laakereilla toteutetut puhaltimet ovat ainutlaatuisia, eikä mikään yritys sellaisia valmista. Ensimmäistä puhallinta varten rakennettiin sekä kaasu- että magneettilaakeroidut käyttölaitteet. Koska sekä laakereiden että sähkömoottorin suunnittelu osoittautui erittäin haastavaksi, hankittiin puhallinpyörän testausta varten käyttölaitte myös kaupalliselta toimijalta. Tutkimuksen aikana saatiin myös itse suunnitellut käyttölaitteet valmiiksi.

Puhallinsuunnittelun osalta saavutettiin sille asetut tavoitteet erittäin hyvin. Puhaltimen hyötysuhteeksi mitattiin 70%, mikä on näin pienen kokoluokan laitteessa erinomainen tulos. Puhaltimen käyttölaitteen suunnittelun osalta LTY tutki ja kehitti yhteistyössä Saimaan ammattikorkeakoulun (Saimia) kanssa erillisessä yhteistyöprojektissa magneettilaakeroitua kesto-

magneettimoottoria. Laite saatiin koekäyttöön aivan tutkimuksen loppumetreillä, joten koeajojen tulokset puhaltimen kanssa eivät ole vielä käytettävissä tätä kirjoitettaessa. Jo saatujen kokemusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että alkuperäiset tavoitteet ovat toteutuneet myös käyttölaitteen osalta.

Kuumaa anodikaasuvirtausta on pystytty siirtämään haluttu määrä 300 °C lämpötilassa hyvällä hyötysuhteella ja vakiintuneissa olosuhteissa. Tutkimuksen tuloksena on saavutettu hyvä tekninen osaaminen puhaltimien suunnittelun työkaluista ja mekaanisesta rakenteesta. Hankkeen aikana puhallintutkimuksen tuloksia jalkautettiin teollisuuden käyttöön toimittamalla kaksi ensimmäisen prototyypin mukaista puhallinta Wärtsilän polttokennojärjestelmään ja käyttämällä niitä todellisessa toimintaympäristössä useita tuhansia tunteja.

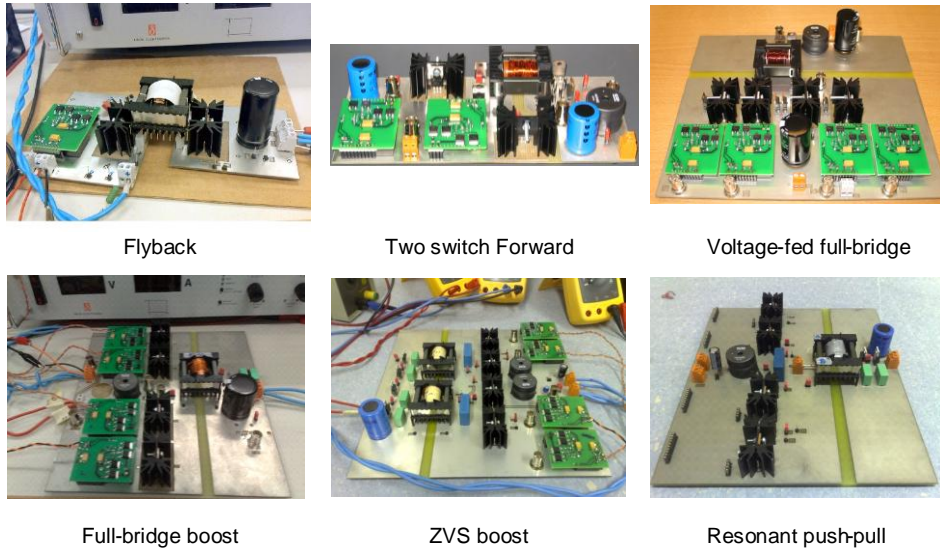
Puhallintutkimuksesta ei ole tähän mennessä syntynyt uutta liiketoimintaa, mutta tämä on mahdollista SOFC-laitosten kaupallistuessa ja sarjojen kasvaessa. LTY:n ja Saimian kehittämän käyttölaitteen kaupallistamismahdollisuuksia selvitetään myös muissa sovelluskohteissa kuin polttokennolaitoksissa. Puhallintutkimuksessa syntyneitä osaamista ja tuloksia voivat hyödyntää yritykset jotka ovat kiinnostuneita valmistamaan puhallinosia tai kokonaisia puhallinpaketteja toimilaitteineen.

8 Tehoelektroniikka

Polttokennojärjestelmien tehoelektroniikan tutkimuksen tarkoituksena on ollut kehittää hyvällä hyötysuhteella toimiva tehoelektroniikkayksikkö polttokennojärjestelmän sähkötehon muokkaukseen ja todentaa tutkimuksen tulokset prototyypeillä. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi tutkittiin tehoelektroniikkaratkaisuja simuloinnein sekä laboratoriotestein ja kehitettiin säätöjärjestelmä tehoelektroniikalle. Konkreettisenä tavoitteena oli todentaa tutkimuksen tulokset tehomuokkaimen prototyypillä VTT:n 10 kW –voimalaitosdemonstraatiassa

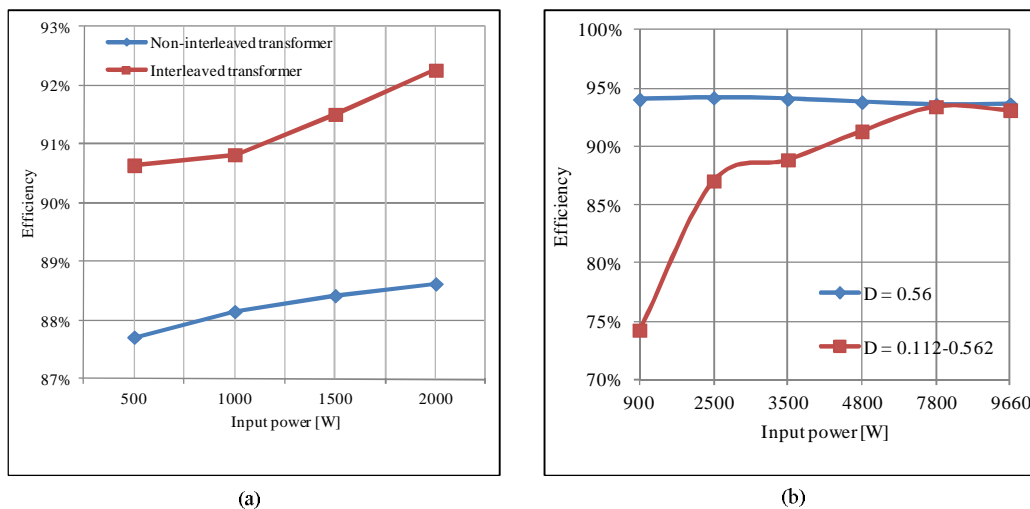
Hankkeessa on tutkittu SOFC-järjestelmän asettamia vaatimuksia sähkötehon muokkausjärjestelmälle ja kartoitettu erilaisia teknisiä ratkaisuja jotka soveltuvat käytettäväksi polttokennojärjestelmän sähkötehonmuokkaukseen. Hankkeessa on kehitetty järjestelmä, jolla polttokennon tuottama sähköenergia saadaan syötettyä hyvällä hyötysuhteella sähköverkkoon. Työn tuloksena on toteutettu 10 kW:n prototyypilaitteisto, jossa on sekä DC-jännitetasen nosto että verkkovaihtosuuntaaja.

Polttokennojärjestelmän tehonmuokkaimen keskeisinä toimintavaatimuksina ovat pieni tulovirran väre, korkea jännitteen muuntosuhde, korkea hyötysuhde sekä saumaton toiminta polttokennojärjestelmän ohjauslogiikan kanssa. Vaaditut toimintavaatimukset toteuttavia valmiita kaupallisia ratkaisuja ei löytynyt, joten soveltuvia ratkaisuja lähdettiin hakemaan kirjallisuus- ja prototyypitutkimuksen kautta. Monet aihepiiristä löytyneet teoreettiset tutkimukset osoittautuivat käytännön laite- ja järjestelmäsuunnittelun kannalta osittain harhaanjohtaviksi ja jopa virheellisiksi. Skaalatuilla prototyypeillä tehdyt lukuisat testit olivat tavoitteiden saavuttamisen kannalta välttämättömiä, joskin aikaa vieviä. Kuva 13 on koottu hankkeessa rakennetut pienitehoiset (150 W) prototyypit, joita rakennettiin yhteensä kuusi kappaletta. Prototyypeissä käytetyistä topologioista kaksi lupaavinta valittiin jatkokehitykseen skaalattavaksi suurempaan teholuokkaan.



Kuva 13. Pienitehoiset tutkimusprototyypit, joiden tulosten perusteella tehonmuokkaustopologia valittiin. Topologioista full-bridge boost ja resonant push-pull valittiin skaalattaviksi suurempaan teholuokkaan.

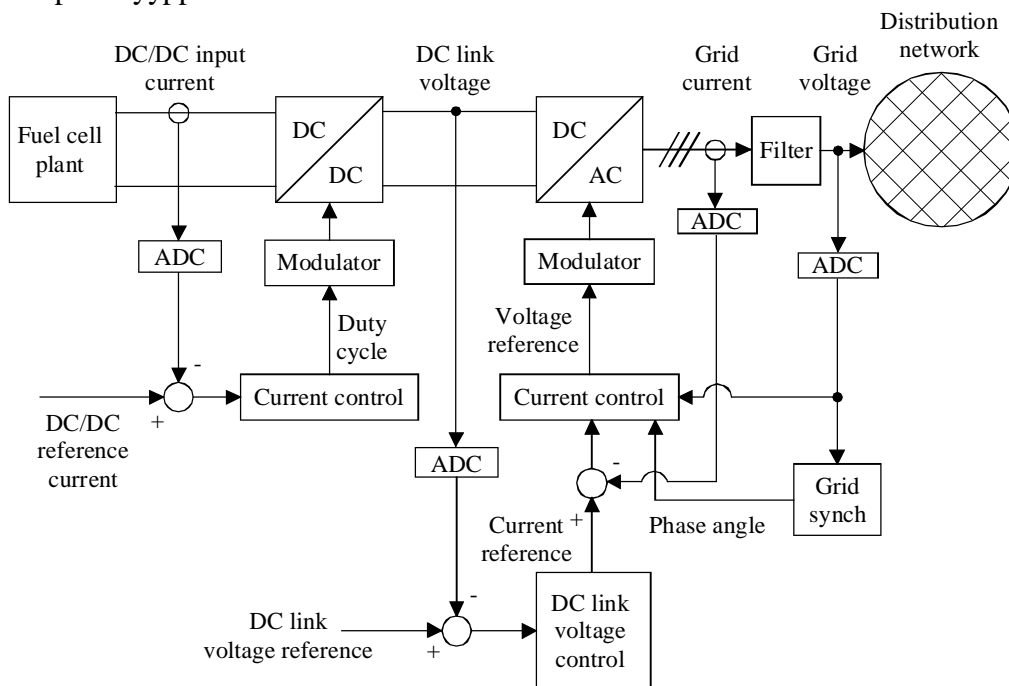
Prototyypitesteissä havaittiin, että virtasyötetyt topologiat, joiden tutkimus on kiihtynyt viimeisen vuosikymmenen aikana, soveltuvat matalan jännitteen ja korkean virran polttokennosovelluksiin paremmin kuin perinteinen jännitesyötetty kokosilta. Kriittisin yksittäinen komponentti hyötysuhteen kannalta on tutkimusten mukaan muuntaja, jonka läpi johdetaan tehollisarvoltaan suurta vaihtovirtaa. Yksi merkittävä hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä on myös hakkurin toimintapisteen valinta, joka vaikuttaa komponenttien keskinäisiin mitoituksiin ja häviöihin. Tutkimuksessa on etsitty ja kehitetty soveltuvia menetelmiä eri komponenttien häviöiden laskentaan. Laskentamenetelmiä voidaan hyödyntää suunnittelun tukena sekä arvioida topologioiden soveltuvuuksia ja kustannuksia eri teholuokissa. Kuvassa 13 (a) on esitetty muuntajarakenteen (lomitettu/lomittamaton) ja Kuvassa 13 (b) pulssisuhteen vaikutus tehonmuokkauksen hyötysuhteeseen.



Kuva 14: Muuntajarakenteen (a) ja toimintapisteen (b) vaikutus DC/DC hakkurin hyötysuhteeseen.

Oma iso kokonaisuutensa hankkeessa on ollut tehomuokkauksen säätötekniikan tutkimus- ja kehitystyö. Säätötekniikan kehitys projektissa jakaantui vahvasti mallinnukseen ja diskreetti-aikaiseen toteutukseen. Mallinnus puolestaan jakautui yksittäisen konvertterin mallinnukseen sekä koko järjestelmän mallinnukseen, kun puolestaan diskreetti-aikainen toteutus käsitti sisälleen nopean aikataason toteutuksen (modulaatio, muunnokset), sekä hitaamman aikataason toteutuksen (säätöalgoritmit, kommunikaatio). Projektissa on kehitetty käytetylle resonanssi push-pull hakkurille dynaaminen malli säätösuunnittelun avuksi, sekä verifioitu kyseinen malli. Lisäksi dynaaminen malli on kehitetty virtasyötetylle kokosilta-boost hakkurille, jolle ei löydy kirjoitushetkellä dynaamista mallia kirjallisuudesta. Jotta koko tehomuokkausjärjestelmän mallinnus olisi ollut mahdollista, on myös johdettu jännitesyötetyn verkkovaihtosuuntaajan dynaaminen malli. Tutkimuksen tuloksena on saatu soveltuva tehonmuokkausyksikön malli säätö- ja järjestelmäsunnittelun tueksi.

Varsinaisten säätöalgoritmien kehitys keskittyi kriittisesti vaimennettuun virtasäätöön DC/DC-hakkurissa sekä verkkovaihtosuuntaajan aikaansaaman matalataajuisen värähtelyn hallintaan. Lisäksi säätöalgoritmien toiminta erikoistilanteissa siten, että turvataan sekä tehonmuokkausyksikkö että estetään haitallisten transienttien näkyminen kennolle, oli tutkimuksen keskipisteessä. Mallien avulla kehitettiin tehonmuokkaimelle säätöjärjestelmä (Kuva 15), joka toteutettiin prototyypin.



Kuva 15. Tutkimuksessa kehitetty säätöjärjestelmä. Säätöjärjestelmän lohkoaviossa on esitetty A/D muunnokset, D/A muunnokset (modulaattori), säätöalgoritmit, sekä verkkoon tahdistuminen.

Lupaavimmista konvertteriratkaisuista valittiin kaksi parasta täysitehoisen tehonmuokkaimen suunnittelulähtökohdiksi, joista rakennettiin 10 kW prototyypit. Keskinäisen vertailun jälkeen paras konvertteriratkaisu monistettiin ja yksi yksikkö toimitettiin VTT:lle polttokennojärjestelmään. Hankkeessa on kehitetty tutkimustarkoituksiin myös oma verkkovaihtosuuntaaja, jolloin on päästy tutkimaan koko tehonmuokkausketjun toimintaa. Tällaisesta järjestelmästä ei ole löytynyt julkaisuja muualta maailmasta. Kokonaisjärjestelmän varsin kunnianhimoista tavoitehyötysuhdetta 97 % ei aivan saavutettu, johtuen kaupallisen verkkovaihtosuuntaajan hyötysuhteesta sekä DC-DC tehonmuokkaimen prototyypin komponenteista, jotka valittiin enemmän järjestelmän luotettavuutta kuin hyötysuhdetta painottaen. DC-DC tehonmuokkai-

men prototyypille mitattiin kuitenkin yli 95% hyötysuhde, mikä on merkittävä saavutus. Hankkeessa kehitettyä tehonmuokkaimen prototyyppiä on käytetty useita tuhansia tunteja 10 kW demonstraatioissa ja sillä on onnistuneesti muokattu polttokennon tuottama DC-teho verkkoiseksi AC-tehoksi.

Tehoelektronikatutkimuksen keskeisimmät akateemiset tulokset ovat kaksi esitarkastuksessa olevaa väitöskirjaa, niihin liittyvät tieteelliset julkaisut sekä lukuisat muut opinnäytetyöt. Uusia liiketoimintamahdollisuuksia on kartoitettu kattavasti yhteistyössä sekä LUT:n innovaatiopalvelujen että pääomasijoittajien kanssa. Yhdistettynä muun hajautetun voimantuotannon, kuten aurinkopaneelijärjestelmien tehonmuokkaustekniikkaan liiketoimintapotentiaalia todennäköisesti on. Hajautetun voimantuotannon volyymit ovat erittäin voimakkaassa kasvussa ja tilaa uusille toimijoille löytyy.

Osallistuvat yritykset ovat saaneet merkittävän määrän tietoa varsinkin polttokennojärjestelmän tehoelektronikalle asettamista erityisvaatimuksista. Myös tehoelektronikan hyötysuhteen parantamisen kustannus on polttokennosovelluksessa saatu selvitettyä ja tämä tieto on yritysten toiminnassa varsin keskeinen. Hankkeessa työskennelleitä tutkijoita on rekrytoitu rahoittavien yritysten palvelukseen.

9 Kansallinen ja kansainvälinen verkottuminen

SOFC-tutkimuksen piirissä tehtiin kansainvälistä yhteistyötä monella eri tasolla. EU:n sisällä osallistuttiin EU:n strategia- ja projektisuunnitteluun, JTI-organisaation rakentamiseen, EU-projekteihin sekä tehtiin kahdenvälistä yhteistyötä useiden eri instituutioiden kanssa. EU:n ulkopuolinen kansainvälinen yhteistyö on kanavoitunut lähinnä IEA Advanced Fuel Cells -sopimuksen kautta. Tässä hankekokonaisuudessa kansainvälinen yhteistyö toteutui yli odotusten. SofcPower-hanke toimi mitä parhaimpina alustana kaikenlaiselle yhteistyölle ja loi tarvittavan verkoston ja osaamistason tulevaisuuden hankkeisiin osallistumiseen. Yhtenä tulevaisuuden hankkeena voidaan mainita mm. EERAn vuonna 2010 käynnistyneet polttokennoaktiviteetit, joissa VTT on vastuussa yhden aliohjelman vetämisestä.

VTT:llä on ollut aktiivista tutkijavaihtoa Genovan yliopiston (IT), Lundin yliopiston (SWE) EPFL:n (CH), ja FZJ:n (DE) välillä sekä runsaasti toimintaa eri IEA AFC:n työryhmissä. Pitkäkestoista tutkijavaihtoa on ollut yhteensä yli 70 htkk SofcPower-hankkeen aikana. Lisäksi lyhyempiä vierailuja ja henkilöstövaihtoa on ollut lukematon määrä mm. kahden välisessä yhteistyössä sekä HyCo-Eranet hankkeissa (FINNED ja Accelent). SofcPower-hankkeen tutkijat ovat myös osallistuneet eurooppalaisen SOFC-tutkijakoulun toimintaan sekä opiskelijoina että luennoitsijoina. Kaiken kaikkiaan SofcPower-hanke on ollut erittäin suuressa määrin kansainvälisesti verkottunut ja toimii malliesimerkkinä siitä kuinka verkostoja tulee luoda kansainvälisiin toimijoihin.

VTT on osallistunut yhteensä viiteen EU:n kuudennen puiteohjelman projektiin (Real-SOFC, Large-SOFC, FCTESTNET, FCTESqa ja SOFC600) ja on edelleen osallisena kahdeksassa EU:n seitsemännen puiteohjelman projektissa (ASSENT, CATION, Genius, DeSign, H2FC-Intra, FC-Eurogrid, SOFC-Life ja SOFCOM). Kahdessa näistä VTT on koordinaattori.

Hankkeen aikana on demonstroitu ensimmäisenä maailmassa kanadalaisen Versa Power Systemin kehittämää suurta SOFC-kennostoa VTT:n 10 kW SOFC-voimalaitosdemonstraatioissa ja näin edistetty tämän kaupallisten SOFC-laitosten rakentamisen kannalta välttämättömän teknologian siirtoa kotimaisen teollisuuden käyttöön.

SofcPower-hankkeessa tehty tutkimus ja sen tulokset ovat saavuttaneet merkittävän kansainvälisen näkyvyyden ja VTT on nykyisin haluttu kumppani kansainvälisissä hankkeissa.

10 Yhteenveto

SofcPower-hankkeen suurimpana haasteena ja tavoitteena oli kehittää ja rakentaa SOFC-voimalaitosdemonstraatio VTT:lle ja suorittaa sillä pitkäaikaiskoe. Voimalaitosdemonstraatiolla pyrittiin kokoamaan hankkeen eri työpaketeissa tehdyn tutkimustyön tulokset samaan koeympäristöön ja todentaa kehitettyjen ratkaisujen toiminta todellisessa käyttöympäristössä. Tämä tavoite saavutettiin ja demonstraatiojärjestelmällä on tuotettu maakaasusta verkkokelpoista sähköä useiden tuhansien tuntien pituisten koeajojen aikana. Voimalaitosdemonstraatioissa on otettu käyttöön ensimmäisenä maailmassa 10 kW teholuokan planaari SOFC - kennostoteknologiaa osana kokonaista järjestelmää.

Hankkeelle asetetut tavoitteet vahvan kansainvälisen aseman luomiseksi ovat myös toteutuneet. VTT:llä on ollut useiden eurooppalaisten tutkimusryhmien kanssa aktiivista tutkijavaihtoa, ja VTT on haluttu partneri kansainvälisissä tutkimushankkeissa. Osoituksena tästä on vahva osallistuminen FCH JU EU-hankkeisiin, myös koordinaattorin roolissa.

Projektin aikana Suomeen on syntynyt kansainvälisesti vertailukelpoista ja korkeatasoista osaamista lähes kaikilla SOFC-järjestelmien tutkimukseen ja kehitykseen tarvittavilla osa-alueilla. Tämä osaaminen voidaan jo tässä nähdä elintärkeäksi kotimaiselle polttokennotutkimukselle ja sitä hyödyntävälle yritystoiminnalle. Kehitettyjä menetelmiä, malleja, komponentteja ja koetuloksia on hyödynnetty niin kansallisissa ja kansainvälisissä jatkotutkimushankkeissa kuin yritysten tuotekehitystyössä.

Yritykset ovat hyötäneet hankkeesta uusien teknologisten ratkaisujen ja innovaatioiden lisäksi myös rekrytoimalla hankkeessa koulutettuja tai sen aikana pätevöityneitä polttokennoalan osaajia. Hankkeessa on syntynyt kolme väitöskirjaa ja toista kymmentä opinnäytetyötä. Myös kansainvälinen julkaisutoiminta on ollut aktiivista niin tieteellisissä aikakauslehdissä kuin alan konferensseissa. Tutkimustuloksia on tuotu myös laajemman yleisön tiedoksi lehdistötiedotteella ja antamalla haastatteluja valtamediaan sekä yritysten sidosryhmälehtiin.

Hankkeessa saavutetut tulokset ovat olleet välttämättömiä SOFC-järjestelmien tutkimus- ja kehitystyölle, niin kennosto, komponentti kuin systeemitasollakin ja näin ollen hankkeesta ovat hyötäneet ensisijaisesti ne teollisuuden alat, jotka kehittävät SOFC-järjestelmiä ja niissä käytettäviä komponentteja. Hankkeen tuloksia on otettu käyttöön Wärtsilän polttokennoyksiköissä, ja Wärtsilä on siirtynyt käyttämään myös VPS:n kennostoteknologiaa omissa järjestelmissään. Pidemmällä aikavälillä hankkeen tuloksista hyötyvät myös polttoainetoimittajat ja loppukäyttäjät, joiden on mahdollista avata uusia liiketoiminta-alueita SOFC-teknologian kaupallistuuessa.

Voimalaitosdemonstraation kehittäminen, rakentaminen ja onnistuneet koeajot ovat konkreettisin osoitus koko SofcPower-hankkeen korkealaatuisesta työstä ja kansainvälisesti merkittävistä tuloksista. Voimalaitosdemonstraatioissa on käytetty suomalaisten yritysten toimittamia tai valmistamia komponentteja, sekä tutkimushankkeen aikana kehitettyä täysin uutta erityisesti SOFC-laitoksiin soveltuvaa teknologiaa ja järjestelmäratkaisuja.

11 Opinnäytteet

1. L. Hyvärinen, *Mangaani-kobolttispinellien syntetisointi bipolaarilevyjen suoja-pinnoite-materiaaliksi*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2008.
2. S. Koivu, *Numerical 2D Solid Oxide Fuel Cell Model for Dynamic System Simulation*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2008.
3. E. Ahlgren, *Kiinteäoksidipolttokennolaitteiston rakenteen suunnittelu*, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2009.
4. L. Neuvonen, *Automated Testing of Solid Oxide Fuel Cell Units' Control System*, Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2011.
5. I. Kauppi, *Dieselpolttoaineen autoterminen reformointi*, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo 2009.
6. M. Ruohonen, *Tiedonsiirto moniprosessoriympäristössä, esimerkkitoetus*, Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2011.
7. J. Hiltunen, *Vertailu kahden erityyppisen virtasyötetyn hakkurin soveltuvuudesta polttokennokäyttöihin*, Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2010.
8. J. Hiltunen, *Diskreettiaikainen liukuvan moodin säätö kiinteäoksidipolttokennon DC-tasonnostossa*, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2011.
9. P. Mustonen, *Tasajännitetaso nosto polttokennosovelluksessa*, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2009.
10. M. Purhonen, *Verkkovaihtosuuntaajan säätö verkon erikoistilanteissa polttokennosovelluksessa*, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2009.
11. L. Seppä, *Polttokennojärjestelmien tehoelektroniikkaratkaisut*, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2007.
12. T. Riipinen, *Verkkovaihtosuuntaajan vektorisäädön toteutus FPGA-piirillä*, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2007.
13. R. Kaila, *Autothermal reforming of simulated and commercial fuels on zirconia-supported mono- and bimetallic noble metal catalysts*, Väitöskirja, TKK dissertations 141, Teknillinen korkeakoulu, 2008.
14. V. Väisänen, *Performance and Scalability of Isolated DC-DC Converter Topologies in Low Voltage, High Current Applications*, Väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2012 (esitarkastuksessa).
15. T. Riipinen, *Modeling and Control of the Power Conversion Unit in a Solid Oxide Fuel Cell Environment*, Väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2012 (esitarkastuksessa).

12 Julkaisut ja esitelmät

1. M. Halinen, M. Rautanen, J. Saarinen, J. Pennanen, A. Pohjoranta, J. Kiviaho, M. Pastula, B. Nuttall, C. Rankin, B. Borglum, *Performance of a 10 kW SOFC Demonstration Unit*, ECS Transactions, Vol. 35, Nr. 1, pp. 113-120, 2011.
2. M. Halinen, J. Saarinen, M. Rautanen, J. Pennanen, J. Kiviaho, M. Pastula, T. Machacek, B. Nuttall, B. Borglum. *SOFC Demonstration Unit with a 10 kW stack*, Fuel Cell Seminar & Exposition, San Antonio, Texas, USA, 19 - 21 Oct. 2010. <http://www.fuelcellseminar.com/media/5575/halinen.pdf>
3. M. Halinen, O. Thomann, J. Kiviaho. *Effect of anode off-gas recycling on reforming of natural gas for solid oxide fuel cells systems*, Submitted to Wiley Fuel Cells.
4. M. Halinen, J. Saarinen, M. Noponen, I. C., Vinke, J., Kiviaho. *Experimental analysis on performance and durability of SOFC demonstration unit*. Fuel Cells, 2010, Vol. 10, Nr. 3, Pp. 440 – 452 doi:10.1002/fuce.200900152.
5. M Halinen, M. Rautanen, J. Saarinen, J. Pennanen, A. Pohjoranta, J. Kiviaho, M. Pastula, B. Nuttall, C. Rankin, B. Borglum. *Performance of a 10 kW SOFC Demonstration Unit*, Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC-XII), 219th ECS Meeting, Montreal, QC, Canada, 1 - 6 May 2011.
6. M. Rautanen, M. Halinen, M. Noponen, K. Koskela, H. Vesala, J. Kiviaho. *Experimental study of a SOFC stack operated with autothermally reformed diesel fuel*. Submitted to Journal of Power Sources.
7. M. Halinen. *Effect of anode gas recycle on the performance of a natural gas reformer*, 3rd Workshop in Workshop Series: Large Fuel Cell Systems, Bruges, Belgium, (2010).
8. M. Halinen. *SOFC Systems: Concepts and Balance of Plant Components*, 5th International Solid Oxide Fuel Cell Summer School, Chania, Crete, 2008.
9. P. Auerkari, S. Yli-Olli, J. Veivo, P. Jauhiainen, S. Homström ja J. Kiviaho. *Oxidation and Impact of Thermal Exposure on SOFC Interconnector Alloys*, Lucerne Fuel Cell Forum, 30.6-4.7.2008, Lucerne, Sveitsi.
10. O. Himanen, S. Holmström, M. Rautanen, U. Bexell, ja J. Kiviaho. *Characterization of SOFC Interconnect Materials: Sandvik Sanergy HT and Crofer 22 APU*, Fuel Cell Seminar, 27-30.10.2008, Phoenix, USA.
11. V. Saarinen, O. Himanen, M. Rautanen, J. Kiviaho, T. Klasila ja U. Tapper. *Degradation Analysis of High Temperature Materials for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*, Gordon Research Conference on High Temperature Materials, Processes & Diagnostics, 20-25.7.2008 Waterville, USA.
12. A. Janssen. V. Saarinen, J. Kiviaho ja B. Rietveld. *Harmonization of SOFC test procedures under FCTESqa*, Lucerne Fuel Cell Forum, 30.6–4.7.2008, Lucerne, Sveitsi.
13. J. Lagerbom, A.-P. Nikkilä, M. Kylmälahti, P. Vuoristo, U. Kanerva ja T. Varis. *Phase stability and structure of conductive perovskite ceramic coatings by thermal spraying*, Proc. Int. Thermal Spray Conf. 2008, June 2-4, 2008, Maastricht, The Netherlands, CD-ROM proceedings.

14. M. Rautanen, O. Himanen, V. Saarinen, J. Kiviaho. *Compression Properties and Leakage Tests of Mica-Based Seals for SOFC Stacks*. Fuel Cells, 5, 753-759.
15. A. Aarva, M. Noponen, J. Kiviaho. *Study on effect of ethylene on performance of SOFC*. 3rd European Fuel Cell Technology and Applications Conference, Rome, Italy, Pp. 39-40. ISBN 978-88-8286-211-4. 2009.
16. J. Puranen, J. Lagerbom, L. Hyvärinen, M. Kylmälahti, O. Himanen, M. Pihlatie, J. Kiviaho, P. Vuoristo. *The structure and properties of plasma sprayed iron oxide doped manganese cobalt oxide spinel coatings for SOFC metallic interconnectors*, Journal of Thermal Spray Technology 20 (1-2), pp. 154-159, 2010.
17. J. Puranen, J. Lagerbom, L. Hyvärinen, T. Mäntylä, E. Levänen, M. Kylmälahti, P. Vuoristo. *Formation and structure of plasma sprayed manganese-cobalt spinel coatings on preheated metallic interconnector plates*, Surface and Coatings Technology Volume 205, Issue 4, 15, Pages 1029–1033, 2010.
18. J. Lagerbom, T. Varis, J. Puranen, M. Pihlatie, O. Himanen, V. Saarinen, J. Kiviaho, E. Turunen. *MnCo₂O₄ spinel chromium barrier coatings for SOFC interconnect by HVOF*, 9th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering, Liège 27-29 September, 2010.
19. K. Uusi-Esko, E. L. Rautama, T. Sajavaara, M. Pihlatie, M. Karppinen. *Control of oxygen non-stoichiometry in MnCo₂O₄+ δ thin films grown by ALD*, 10th International conference on atomic layer deposition (ALD 2010), June 20-23, 2010, Seoul, South Korea.
20. M. Pihlatie, *Stability of Ni-YSZ composites for solid oxide fuel cells during reduction and re-oxidation*, Doctoral dissertation, VTT Publications 740, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, 2010, ISBN 978-951-38-7400-1, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2010/P740.pdf>
21. O. Thomann, M., Pihlatie, J. A. Schuler, O. Himanen, J. Kiviaho. *Method for Measuring Chromium Evaporation from SOFC Balance-of-Plant Component*, Electrochemical and Solid-State Letters. Vol. 15 No: 3, B35-B37, 2012.
22. O. Thomann. *Quantification of the chromium concentration in hot air*. 4th Workshop in Workshop Series: Large Fuel Cell Systems, Bruges, Belgium 24/25 May 2011.
23. J. Kiviaho. *Overview of Worldwide Research on Degradation Issues in SOFC*, 2nd International Workshop on Degradation Issues of Fuel Cells, Thessaloniki, Greece, 2011.
24. O. Thomann, M. Pihlatie, J. Schuler, O. Himanen, J. Kiviaho. *Method for measuring chromium evaporation from SOFC balance-of-plant components*. ECS Transactions, Volume: 35, Issue: 1, Pages: 2609-2616, Journal, 2011.
25. *Method for Measuring Chromium Evaporation from SOFC Balance-of-Plant Component*. 219th ECS Meeting in Montreal, Canada (May 1-6, 2011).
26. *Chromium contamination from BoP components: toward in situ measurement*. 3rd Workshop in Workshop Series: Large Fuel Cell Systems. Bruges, Belgium, 18/05/2010.
27. S. Karvonen. *Balance of Plant Modelling*, 1st Joint European Summer School on Fuel Cell and Hydrogen Technology, Viterbo, Italy, 2011.

28. J. Saarinen, M. Halinen, M. Nojonen, J. Kiviaho. *Modeling and Dynamic Simulation of 5 kW SOFC Demonstration Unit with APROS*. Invited presentation: 4th Symposium on Fuel Cell Modelling and Experimental Validation. Aachen, Germany, 6 - 7 March 2007.
29. J. Saarinen, M. Halinen, M. Nojonen, J. Ylijoki, J. Kiviaho. *Dynamic Model of 5 kW SOFC CHP Test Station*. Journal of Fuel Cell Science and Technology, November 2007, Vol. 4, Issue 4, pp. 397-405.
30. T. Ollikainen, J. Saarinen, M. Halinen, T. Hottinen, M. Nojonen, E. Fontell, J. Kiviaho. *Dynamic Simulation Tool APROS in SOFC Power Plant Modeling at Wärtsilä and VTT*. ECS Transactions. Vol. 7 (2007) No: 1, 1821-1829.
31. R. K. Kaila, A. Gutierrez, and A. O. I. Krause. Oral presentation. *Autothermal Reforming Commercial and Simulated Fuels in the Presence of Sulfur*, Europacat VIII, Turku, Finland, August 26-31, 2007.
32. R. Kaila, *Researcher's View: Reforming of renewable and fossil fuels on noble metal catalysts*, UMK-Newsletter (Center for new materials) 3 (2007).
33. R. K. Kaila, A. Gutierrez, S. T. Korhonen and A. O. I. Krause. *Autothermal Reforming of n-Dodecane, Toluene and their Mixture on Mono- and Bimetallic Noble Metal Zirconia Catalysts*. Catal. Lett. 115 (2007) 70-78.
34. R. K. Kaila, A. Gutierrez and A.O.I. Krause. *Autothermal reforming of simulated and commercial diesel: The performance of zirconia-supported RhPt catalyst in the presence of sulfur*, Applied Catalysis B 84 (2008) 324-331.
35. R. K. Kaila, A.Gutierrez, R.Slioor, M.Kemell, M.Leskelä and A.O.I. Krause. *Zirconia supported bimetallic RhPt catalysts: Characterization and testing in autothermal reforming of simulated gasoline*, Applied Catalysis B 84 (2008) 223-232.
36. K. Klobut, T. Vesanen, M.-L. Pykälä, K. Sipilä, J. Kiviaho, R. Rosenberg. *Handbook of SOFC system in buildings. Legislation, standards and requirements*. Espoo, VTT. 79 p. VTT Tiedotteita - Research Notes; 2465. 2009. ISBN 978-951-38-7264-9; 978-951-38-7265-6. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2465.pdf>
37. K. Klobut, J. Kiviaho, R. Rosenberg, T. Vesanen, M.-L. Pykälä, J. Laine. *Preparation of the SOFC integration with an office building*. First International Conference and Workshop on Micro-Cogeneration Technologies and Applications. Micro-Cogen 2008, Ottawa, Canada, April 29 - May 1, 2008. Natural Resources Canada. Ottawa, Canada (2008).
38. Beausoleil-Morrison, K. Klobut, et al. *An Experimental and Simulation-Based Investigation of the Performance of Small-Scale Fuel Cell and Combustion-Based Cogeneration Devices Serving Residential Buildings - Final Report of Annex 42 of the IEAs Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*. Ottawa, Canada, Natural Resources Canada, CANMET Energy Technology Centre. 70 pages ISBN 978-0-662-47924-6, 2008.
39. R. Rosenberg., M. Valkiainen, K. Klobut, J. Kiviaho and J. Ihonon. *Residential fuel cell systems*. 9th REHVA World Congress Clima 2007, proceedings, ISBN 972-952-99898-3-6, ss. BO5C1666. Clima 2007, WellBeing Indoors (Clima2007), Helsinki, Finland, 10-14 June 2007.

40. T. Vesänen, K. Klobut, J. Shemeikka. *Implementation of a Fuel Cell System Model Into Building Energy Simulation Software IDA-ICE*. Journal of Fuel Cell Science and Technology -- November 2007 -- Volume 4, Issue 4, pp. 511-515 (2007).
41. T. Jastrzebski and R. Pöllänen. *Compensation of nonlinearities in active magnetic bearings with variable force bias for zero- and reduced-bias operation*, Mechatronics, vol. 19 pp. 629-638, 2009.
42. T. Jastrzebski and R. Pöllänen. *Centralized Optimal Position Control for Active Magnetic Bearings*, Electrical Engineering, vol. 91, pp. 101-114, 2009.
43. Backman, Tang, Jaatinen, Honkatukia. *Design of Fan Geometry for an Anode Gas Circulator*, submitted to Journal of Thermal Science.
44. Jaatinen, Grönman, Backman, Turunen-Saaresti. *Numerical Study of Different Inlet Section Designs in the Performance of a Centrifugal Blower*, submitted to Journal of Thermal Science.
45. T. Riipinen, V. Väisänen, P. Mustonen, M. Kuisma, P. Silventoinen. *Requirements for Power Electronics in Solid Oxide Fuel Cell System*. Fuel Cell Annual Seminar 2008, March 12, 2008. Dipoli, Espoo.
46. T. Riipinen, V. Väisänen, M. Kuisma, L. Seppä, P. Mustonen, P. Silventoinen. *Requirements for Power Electronics in Solid Oxide Fuel Cell System*, Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th pp.1233-1238, 1-3 Sept. 2008.
47. T. Riipinen, O. Laakkonen, L. Lehonkoski, V. Väisänen, P. Silventoinen and O. Pyrhönen. *Design and Analysis of FPGA Based Control of Fuel Cell Line Converter*, 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009. IECON '09, pp.363-366, 3-5 Nov. 2009.
48. V. Väisänen, T. Riipinen and P. Silventoinen. *Effects of Switching Asymmetry on an Isolated Full-Bridge Boost Converter*, IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 2033 – 2044, Aug. 2010.
49. V. Väisänen, T. Riipinen, J. Hiltunen, M. Ruohonen and P. Silventoinen. *DC/DC converters in SOFC applications*, Finnish Fuel Cell Programme Annual Seminar, 2010.
50. T. Riipinen, V. Väisänen and P. Silventoinen. *Demands for SOFC power conversion units control system in stationary power generation*. Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011, pp.133-141, 6-11 March 2011.
51. J. Hiltunen, T. Riipinen, V. Väisänen, M. Ruohonen, P. Silventoinen. *Sliding Mode Control of Fuel Cell DC/DC Converter*. Finnish Fuel Cell Programme Annual Seminar 2011.
52. V. Väisänen, T. Riipinen, J. Hiltunen, P. Silventoinen. *Design of 10 kW resonant push-pull DC-DC converter for solid oxide fuel cell applications*, Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), pp.1-10, Aug. 30 2011-Sept. 1 2011.