



Älykäs Valmistus Ekosysteemissä

Tulosraportti 2019



Sisällys

1. Alkusanat.....	3
2. Älykäs valmistus ekosysteemissä	5
2.1 Taustaa.....	5
2.2 Konsortio	5
3. Materiaalit	7
3.1 Materiaalien vaatimuspohjainen määrittely	8
3.2 Mekaanisten ominaisuuksien manipulointiprosessit	11
3.3 Älykäs materiaalien testaus	12
4. Valmistus	14
4.1 Suunnittelun ja valmistuksen integrointi	14
4.2 Digitaalisen valmistuksen tutkimusympäristöt	16
4.3 Tunnistusmenetelmät toimitusketjussa	21
5. Toimitusketju.....	24
5.1 Kannattavuuden johtaminen ja ohjaaminen	24
5.2 Toimitusketjun digitaalinen kaksonen.....	29
6. Tulevaisuuden haasteet.....	32
ÄVE-projektin julkaisut (tilanne 31.3.2020).....	33

1. Alkusanat

Älykäs Valmistus Ekosysteemissä (ÄVE) -hanke sai juurensa akuutista ja pitkällä aikajänteellä syntyneestä osaavien ammattilaisten vajeesta teollisuudessa. Teknologiateollisuuden selvityksen mukaan alalta poistuu 1700 ammattikoulutason ja 1700 AMK/DI-henkilöä vuodessa nettohäviönä. Merkittävä havainto oli koko ammattikunnan vanhimman osan dokumentoimaton hiljainen tieto, joka on häviämässä eläköitymisen myötä. Toisaalta sama ilmiö on havaittavissa tutkimuksessa. Perinteistä koneenrakennuksen tutkimusalaa pidetään joissain hallinnon ja politiikan piireissä jopa “epätieteenä”, vaikka muualla Euroopassa se nähdään kriittisenä menestystekijänä. ÄVE- tutkimushanke on ensimmäinen askel koneenrakennuksen syvän tiedon jälleenrakennuksessa. ÄVE samanaikaisesti hakee maailmanluokan uudistumista koneenrakennuksen digitalisaatiossa ja paluuta sen mahdollistaviin perustieteisiin.

ÄVE ei ole yksittäinen hanke, vaan se on osa teollisuuden ja tutkimuksen yhteistä liikettä, jolla haetaan vaikuttavuutta todelliseen kilpailukykyyn. Tämän perustaksi teollisuus muodosti ekosysteemin, johon kuului 7 isompaa yritystä ja 7 pk-yritystä sekä tutkimusosapuolet. Työ johti hankkeen kehittäessä MEX Finland ry:n perustamiseen. Isompien yritysten rooli ekosysteemissä on näkyvyys tarvittavaan muutokseen, omat tutkimusresurssit työpaketien ajurina. Pk-yritysten linkittyminen saumatomaksi ja aktiiviseksi osaksi hanketta omilla projekteillaan voimisti koko ketjun lujuutta ja toisaalta varmisti tutkimusosapuolelle merkittävän rahoituksen. Voimme olla erityisen ylpeitä tutkimuspuolen yhteistyöhengestä, jossa eri osaamisalueet ovat yhdistäneet voimansa toimien myös usean yrityksen muodostamissa projekteissa. Tämä yhteistyö on ulottunut myös tiedonsiirtoon kansainvälisistä huippututkimusyksiköistä yhteistyöprojektien kautta ja elävöittänyt valmistuksen ja tuotantotieteiden juuria. Uusissa avauksissa on myös uskallettu uudistua ja siinä on tullut myös takaiskuja, jotka ovat entisestään lujittaneet yhteisön oppimista. Tiedämme kuitenkin, että uudistuva digitaalisen valmistuksen konsepti leikkaa läpi eri tiedealojen ja yritysten toimitusverkostojen. Tämä työ vaatii pitkäjänteistä tieteellistä panostusta ja toisaalta saumatonta yritys yhteistyötä, jossa tiedeyhteisön rooli on tuottaa jatkuvasti myös käytännön tuloksia haastavan matkan varrelta.

18.4.2020

Pasi Julkunen, MEXFinland ry hallituksen puheenjohtaja / ÄVE hankkeen perustaja

Älykäs valmistus ekosysteemissä – tutkimushanke – tuttavallisemmin **ÄVE-hanke** – on pitkään aikaan keskimääräistä isompi yhteinen ponnistus viedä eteenpäin valmistavan teollisuuden tutkimustoimintaa Suomessa. Hankkeen kokonaisbudjetti on lähes 3 milj. euroa ja hankkeet rahoittaa Business Finland, osallistuvat yritykset ja tutkimuslaitokset. Valmistaminen ja siihen liittyvät teknologiat ovat tutkimusrahoitusta ajatellen viime vuosina jääneet mm. digitalisaatioon liittyvän pohinan jalkoihin ja perusteknologioiden ja -kompetenssien kehittäminen on koettu joissain piireissä vanhoiliseksi. Totuus kuitenkin on, että niin kauan kuin joitain fyysisiä tuotteita tarvitaan ja halutaan, tarvitaan myös niiden tuottamiseen liittyvää teknologiaa. Ja digitaalisuus on valmistuksen ja älykkäiden tuotteiden merkittävä edistäjäteknologia, mutta ilman perustaa se ei toimi yksin. ÄVE-hankkeen agendalla onkin näiden osa-alueiden tutkimus toisensa huomioiden. Suomen kannalta oma riittävä eri tuotteiden valmistusosaaminen ja -kapasiteetti on myös merkittävä huoltovarmuuskysymys, kuten olemme tätä kirjoitettaessa näinä korona-aikoina mediasta huomata.

ÄVE-hankkeessa merkittävää on yritysten ja tutkimuslaitosten kiinteä yhteistyö. Erityinen panos on tietysti Sandvik Mining and Construction Oy:llä joka veturiyrityksenä on ollut aktiivisesti edistämässä koko yritysjoukon yhteistyötä. Ja merkittävä määrä yrityksistähän on pk-yrityksiä. Näin laaja yhteiskehittäminen ekosysteemitasolla on meidän tutkijoiden kannalta todella hienoa. ÄVE-hankkeessa on mukana laaja kattaus tutkimustoimijoita edustaen hyvinkin erilaista osaamista. Tampereen yliopiston (TAU), VTT:n ja Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) tutkijat toimivat yhteisissä tiimeissä organisaatorajat ylittäen ja näin löydetään paras osaaminen aina kuhunkin haasteeseen. Tutkijoiden osaamiset täydentävät myös toisiaan käsittäen mm. materiaalitekniikan, suunnittelun, valmistustekniikan, teollisuustalouden ja tekoälyn tutkimusryhmiä. Kokonaisuudessaan tutkijoita mukana on n. 40.

Tämä raportti tarjoaa pienen pintaraapaisun tuloksista, joita olemme tähän saakka tuottaneet. Kaikista aiheista on mahdollista saada lisätietoa ko. aihealueen yhteishenkilöiltä. Lisäksi kutsumme avoimesti mukaan kaikki kiinnostuneet yritykset ja tahot viemään eteenpäin ÄVE-hankkeen aloittamaa yhteistä tekemistä, jotta Suomen valmistava teollisuus voisi hyvin vielä 2030-luvullakin.

Lopuksi vielä Business Finlandille suuri kiitos tuesta ÄVE-hankkeelle.

18.04.2020

Prof. Kari T. Koskinen, ÄVE-hankkeen vastuullinen johtaja, Tampereen yliopisto

Mika Sirén, projektipäällikkö VTT

Lasse Hillman, projektipäällikkö TAMK

2. Älykäs valmistus ekosysteemissä

Smart Machines and Manufacturing Competence Centre (SMACC) on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n sekä Tampereen yliopiston muodostama osaamiskeskittymä, joka tarjoaa tutkimusosaamista valmistavan teollisuuden yrityksille. Älykäs valmistus ekosysteemissä (ÄVE) –tutkimushanke (jatkossa *ÄVE-hanke*) muodostettiin SMACCin koordinoimana. Hankkeen taustalla on laaja keskustelu eri toimijoiden välillä, joissa on todettu suomalaisen kone- ja laitevalmistuksen keskeiset ominaispiirteet: Suomalaisten koneenrakentajien kärkituotteet, älykkäät koneet ovat globaalistikin pisimmälle kehitettyjä ja valmistuksellisesti vaativimpia tuotteita, jotka edellyttävät kiinteää vuorovaikutusta suunnittelun, valmistuksen ja kokoonpanon välillä. Ne ovat myös yksi nopeimmin digitalisoituvista kohteista sekä tuoteominaisuuksien että suunnittelu- ja valmistusteknologioiden ja tuotteen elinkaar-hallintavaatimusten osalta.

Ekosysteemimäinen toimintatapa tarjoaa tehokkaan kehittämisalustan uusien materiaalien soveltamiseksi, uusien suunnittelu- ja valmistusmenetelmien toiminnallistamiseksi sekä tuotteiden elinkaarihallinnan digitalisoimiseksi. Tämä on myös perusta kokonaisuuden kannattavuuden johtamiselle. Ekosysteemin tavoitteiden saavuttaminen edellyttää kyvykkyyttä suunnitella ja valmistaa älykkäitä laitteita, älykkäistä osista, älykkäin menetelmin. Tämän perusteella päätettiin käynnistää Älykäs valmistus ekosysteemeissä (ÄVE) t&k -hankekokonaisuus. Käynnistettävät kokonaisuuden projektit ovat vahvasti synergisiä, ja sen osa-alueet toisistaan riippuvaisia. Kokonaisuus voidaan toteuttaa onnistuneesti vain ekosysteemisellä ajattelumallilla ja yhdistämällä pilottipohjaisesti valmistavien ja tietotekniikkayritysten osaaminen sekä johtava teoreettinen ja soveltava tutkimus. Tutkimushankkeen tehtävänä on tukea monitieteisesti ÄVE -yritysekosysteemin kehittymistä ja vahvistumista ja samalla tuottaa uutta tietoa laajemmin hyödynnettäväksi keskittyen materiaalien, valmistuksen ja toimitusketjujen tutkimukseen.

2.1 Taustaa

Suomalaiseen kone- ja valmistustekniikan alaan kohdistuu useita haasteita. Väestön ikääntyessä ammattiosaajien määrä teollisuudessa vähenee, sillä eläköityminen on nopeampaa kuin uusien osaajien tulo alalle. Lisäksi kone- ja valmistustekniikan korkeatasoista koulutusta on vähennetty voimakkaasti viimeisen vuosikymmenen aikana ja uudet osaajat ovat teknisesti heikompia kuin edelliset, johtuen koulutuksen painopisteen muutoksista. Alalta poistuu hiljaista tietoa – ammattiin liittyvää tietoa, joka on hankala kuvata ja tunnistaa – ja yleinen tietotaidon taso alenee.

Edellä mainittuihin haasteisiin voidaan vastata hyödyntämällä digitalisaation ja automatisoinnin menetelmiä valmistavassa teollisuudessa sekä kehittämällä korkeakoulujen tutkimusympäristöjä uusien tutkimushankkeiden avulla. Lisäksi erityisen tärkeää on yritysten sekä tutkimusorganisaatioiden välinen yhteistyö, jonka avulla saadaan entistä parempia tutkimuksellisia avauksia ja nopeutetaan uuden tiedon siirtymistä organisaatioiden välillä. Älykäs valmistus ekosysteemissä –tutkimushanke vastaa juuri näihin haasteisiin

2.2 Konsortio

ÄVE- projektikokonaisuus toteutetaan tiiviissä yhteistyössä koko hankekonsortion toimijoiden kanssa kuitenkin niin, että kaikilla osapuolilla on selkeästi yhdessä sovitut roolit, painopistealueet ja tavoitteet. Vaikka projektin suunnittelutyö tehtiin pääasiassa yhteistyössä Sandvik Mining and Construction Oy:n kanssa, sen toteutuksen aikana on pyritty aktiivisesti yhteistyöhön ekosysteemin muiden yritysten kanssa. Tätä työtä jatketaan projektin toisen vuoden aikana, ja sen rooli nousee koros-

tetusti esiin ÄVE-ekosysteemin seuraavan vaiheen tutkimustyötä suunniteltaessa: etenkin pk-yritykset halutaan kiinteästi mukaan valmistelutyöhön heti sen alkaessa ÄVE-tutkimuswebinaarissa 23.4.2020.

Tampereen yliopiston (TAU) tärkeimmät projektitason tavoitteet ovat syvälinen materiaali- ja valmistustekniikan tutkimus, joita aktiivisesti tukee kannattavuuden johtamisen tutkimus sekä tekoälytutkimus. TAU:n tavoitteena on pitkäjänteisten tutkimushankkeiden toteuttaminen kone- ja materiaali-tekniikan alueella yhdessä yritysten kanssa, ja näin valittujen teknologia-alueiden vahvistaminen kansallisesti. Hankkeeseen liittyy oleellisesti myös kansainvälinen yhteistyö alan huippuyliopistojen kanssa, esimerkkinä RWTH Aachen Saksasta. Tavoitteena on myös lisätä alan tutkimuksen ja ope- tuksen houkuttelevuutta huippututkimukseen pyrkivien tutkimuskohteiden myötä. Kannattavuustut- kimuksen tavoitteena hankkeessa on tutkia kannattavuuden johtamisen vaikuttavuutta ekosyste- meissä ja digitaalisuuden lisääntymisen myötä muuttuvassa teollisuuden toimintaympäristössä.

VTT tavoittelee koko ÄVE-hankkeen osalta kokonaisvaltaista ja systeemistä, samalla neutraalia lä- hestymistapaa. Toteutuksessa otetaan huomioon koko tuotteen elinkaaren aikaiset näkökulmat sekä mallipohjaisuuden ja digitaalisten kaksosten kokonaisvaikutuksen prosesseihin, tuotemalleihin, tie- torakenteisiin, organisaatioihin/verkostoihin, osaamiseen jne. Neutraalia lähestymistapaa tukevat sekä metodit että viimeisimmän tieteellisen tutkimustiedon hyödyntäminen. Tutkimus tuottaa yleis- tettävää tietoa, joka hyödyttää laajasti kotimaista valmistavaa teollisuutta, erityisesti toimitusketjuja ja pk-yrityksiä. VTT:n projektityö keskittyy

- koneoppimismallien kehittämiseen älykkään valmistuksen laadunvalvontaan, prosessien au- tomatisointiin ja tuotteiden elinkaareen hallintaan
- kappaleiden ja komponenttien tuotannon- ja käytönaikaisten mittaus- ja tunnistusteknologi- oiden kehittämiseen kulloisenkin käyttöympäristön vaatimusten mukaisiksi
- koko tuotantoketjun mallintamiseen ja sen toiminnan kehittämiseen
- VTT:n projektiin sisältyy myös merkittävästi kansainvälistä tutkimusyhteistyötä materiaali- suunnittelun, tunnistusmenetelmien ja tekoälyteknologioiden alueilla

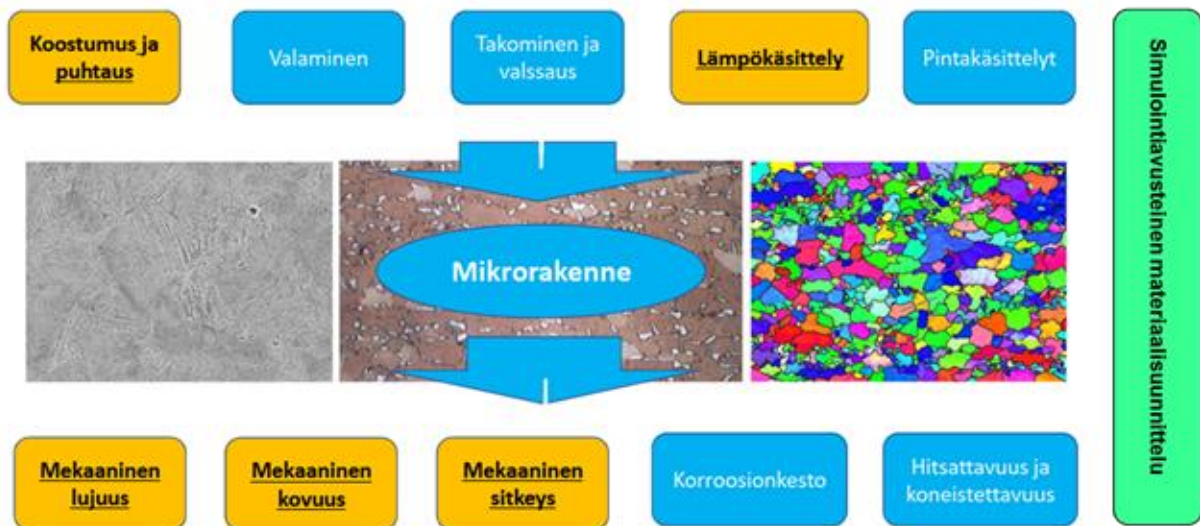
Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) osaprojekti ja sen tavoitteet liittyvät mallipohjaisen suunnitteluun ja siellä osaamisen nopeaan kasvattamiseen ja käyttöönottoon valmistavan teollisuu- den yrityksissä. Erityisesti TAMK demonstroi ja jalkauttaa pääprojektin mallipohjaisen suunnittelun tutkimustulokset yritysten käyttöön ja hyödynnettäväksi. TAMK toteuttaa mallipohjaiseen suunnitte- luun perustuvan demonstraatio- ja oppimisympäristön sekä demonstraatioita yrityksille mallipohjai- seen suunnitteluun pohjautuvan prosessin toiminnasta ekosysteemeissä.

3. Materiaalit

Projektin Materiaalit-osa-alueen tavoitteena on ohjata materiaalivalintoja kunkin valmistettavan osan omien, tarkoin määritettyjen loppukäyttövaatimusten pohjalta. Tutkimustyössä keskitytään esimerkiksi

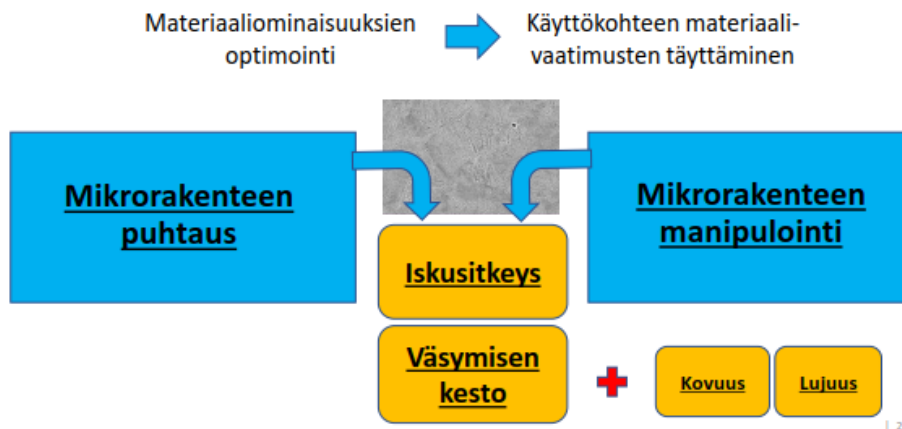
- valmistusmenetelmien ja koostumuksen jäännöspitoisuuksien vaikutukseen lopputuotteen ominaisuuksiin
- metallien mikrorakenteille asetettavien vaatimusten määrittelyyn väsymisen ja iskumaisten kuormitusten kestävyuden parantamiseksi
- lämpökäsittelyjen optimointiin
- älykkääseen materiaalien suorituskyvyn testaukseen ja todentamiseen

Metalleista valmistettujen koneenosien ominaisuudet määräytyvät suurelta osin komponentin geometriasta ja pintojen topografiasta, joita rajoittavat osaltaan käytettävissä olevat valmistusmenetelmät. Toinen merkittävä ominaisuuksiin vaikuttava tekijä ovat materiaalit ja niiden mikrorakenteet. Pienet muutokset mikrorakenteessa muuttavat materiaalin ominaisuuksia merkittävästi. Hyvä esimerkki tästä on ferriittisten terästen iskusitkeys: yksittäiset isot rakeet nostavat transitiolämpötilaa voimakkaasti ja materiaali saattaa sen vuoksi murtua hauraasti jo hyvinkin korkeissa lämpötiloissa. Vastaavasti hyvinkin pienet jäännöspitoisuudet haitallisia alkuaineita voivat tuhota muuten hyvät ominaisuudet, klassisena esimerkkinä rikin ja fosforin vaikutukset teräksen iskusitkeyteen. Loppujen lopuksi vaadittavat ominaisuudet muodostuvat valmistusmenetelmien tuottaman mikrorakenteen perusteella (kuva 1 ja kuva 2), eli vaatimusperusteisessa suunnittelussa pitäisi tunnistaa materiaalin rakenne, joka on käyttökohteen vaatimusten mukainen.



Kuva 1. Materiaalin valmistusmenetelmien vaikutus rakenteeseen ja sitä kautta lopullisiin ominaisuuksiin.

Materiaaliominaisuuksien valmistus



Kuva 2. Materiaaliominaisuuksien valmistus.

3.1 Materiaalien vaatimus pohjainen määrittely

Työ keskittyy materiaalien valmistusmenetelmien vaikutukseen vaativien komponenttien suorituskykyyn. Motiiveina ovat eri metalliseoksista valmistettujen kriittisten komponenttien vaurioitumisen syiden selvittäminen ja käyttöiän pidentäminen. Projektityö sisältää sekä kokeellista materiaalmäärittelyä ja -optimointia että laskennallisiin menetelmiin perustuvaa materiaalmallinnusta ja -simulointia, jolla kokeellisen työn vaatimaa aikaa ja kustannuksia voidaan pienentää huomattavasti. Kuten projektissakin, todellisessa teollisessa tuotantoympäristössä parhaaseen lopputulokseen sekä laadun, ajan että kustannusten osalta päästään useimmiten yhdistämällä kokeellinen ja laskennallinen lähestymistapa.

Yhteyshenkilöt: Pasi Peura, TAU, pasi.peura@tuni.fi
Tomi Suhonen, VTT, tomi.suhonen@vtt.fi

Tavoite

TAU:n osalta tutkimuksen tavoitteena on yhdistää valmistustavasta ja koostumuksen vaihteluista johtuva ominaisuuksien hajonta lopputuotteen suorituskykyyn ja sitä kautta määritellä/optimoida käyttökohteen vaatimusten perusteella käytettävä materiaali ja sen rakenne kuvan 1 mukaisesti. Valmistusprosessista saatavat parametrit, materiaalien sisäinen rakenne (mikrorakenteet ja epäpuhtaudet) yhdistetään valmiin komponentin suorituskykyyn. Tulosten perusteella kehitetään kuormituksen suhteen paremmin optimoituja mikrorakenteita iskusitkeyden ja väsymiskestävyyden suhteen haastavaan sovelluskohteeseen. Tarkoituksena on tarkastella kriittisesti koko valmistusketjua raaka-aineen valmistuksesta (materiaalista) aina loppukäyttäjälle asti.

VTT:n työn tavoitteena on käynnistää mikrorakennepohjaisen vaatimusmäärittelyn suunnittelu kulu- tusta ja iskumaisia kuormituksia kestäville materiaaleille. Suunnittelun pohjalta käynnistetään ko- materiaalien varsinainen suunnittelu ja optimointi materiaalmallinnuksen ja -simuloinnin avulla käyt- täen VTT:n ProperTune® laskenta-alustaa.

Simulointiavusteinen materiaalisuunnittelu tarjoaa täysin uusia ja ennenäkemättömiä mahdollisuuksia tarkastella ja optimoida materiaalin käyttöominaisuuksia sen todellisissa käyttöympäristöissä ja -

kuormituksissa. VTT:n kehittämällä ProperTune® laskenta-alustalla voidaan testata erilaisia materiaalivaihtoehtoja todellisenkaltaisissa simuloituissa ympäristöissä, tai vaihtoehtoisesti kehittää kokonaan uusi materiaali juuri tiettyyn käyttökohteeseen ja -ympäristöön - ja kaikki tämä ilman ensimmäistäkään fysikaalista koetta! Simulointitulosten perusteella voidaan valita rajallinen määrä materiaalivaihtoehtoja varsinaiseen testausohjelmaan ja näin säästää huomattavasti sekä aikaa että rahaa pelkästään testaukseen perustuvaan optimointiin verrattuna.

ÄVE-projektissa materiaalisimuloinnin tavoitteena on mallintaa pronssilaakerin vauriomekanismit, esimerkiksi kuluminen tai väsymissäron ydintyminen ja kasvaminen Johnson Metallin jatkuvavale-tussa alumiinipronssissa. Mallinnustyön perusteella kehitetään parannettuja ja käyttökuormituksen suhteen optimoituja mikrorakenteita kallionporaussovellukseen eli Sandvikin porakoneen liukulaakerihin.

Materiaalisimuloinnin nopeuttamiseksi ja tehostamiseksi käytetään koneoppimistekniikoita (Machine Learning, ML), joilla approksimoidaan monimutkaisia fysikaalisia materiaali- ja rakennemalleja. ProperTune®-simulaattoria käytetään tuottamaan opetusdataa koneoppimismallille, ja opetetun ML-mallin tuloksia puolestaan verrataan ProperTune®-tuloksiin. Tätä iterointikierrosta toistamalla ML-malli kehittyy jatkuvasti siten, että ProperTune®:lla simuloitavien tapausten lukumäärää voidaan pienentää kierros kierrokselta. Näin simuloinnin tuottavuutta eli laskentatapausten määrää ja niiden vaatimaa laskenta-aikaa voidaan parantaa radikaalisti.

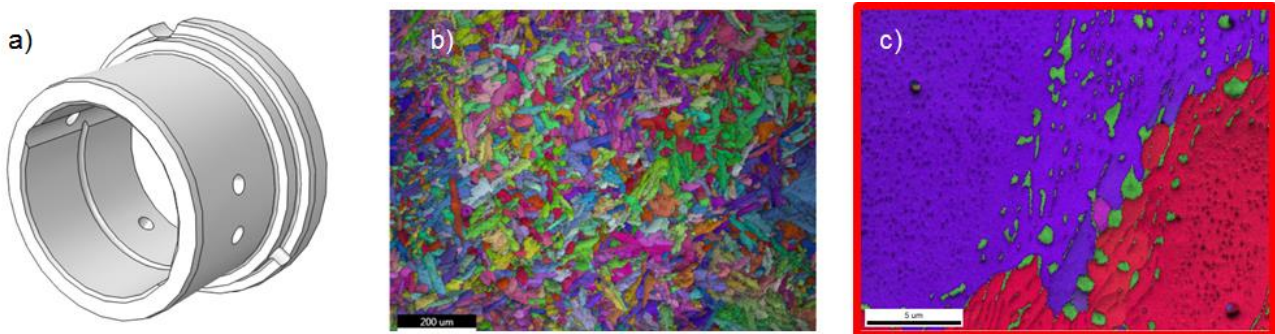
Toimenpiteet

TAUn projektityön alussa valittiin tutkimuskohteeksi komponentti, jonka käyttöolosuhteet ovat väsymisen ja iskusitekeyden suhteen erittäin kriittisiä. Valinnan jälkeen komponentista koottiin kaikki saatavilla oleva tieto. Käytännössä tutkimusaineisto käsitti ainestodistukset, valmistusparametrit ja tuotepalautukset/reklamaatiot. Lisäksi määritettiin nykyisin käytössä olevan komponentin tyypilliset ominaisuudet ja mikrorakenteet nykyaikaisilla analyysimenetelmillä, sekä tehtiin vaurioanalyysit vaurioituneista komponenteista.

Tulosten perusteella on projektin ensimmäisen vuoden aikana pystytty identifioimaan väsymisen ja iskusitekeyden kannalta kriittiset valmistusprosessin vaiheet, samaten, kuinka mikrorakenne voidaan entistä paremmin optimoida. Tulosten perusteella on suunniteltu uusi vaihtoehtoinen valmistusmenetelmä ja tehty ensimmäiset valmistuskokeet.

Projektin ensimmäisen vuoden tehtävänä VTT:ssä oli aloittaa Johnson Metallin valetun alumiinipronssin mikrorakenteen optimointi Sandvikin porakoneen liukulaakeriin. Nykyisestä mikrorakenteesta luotiin mallit 3D-mikrorakennetarkastelun pohjalta käyttäen esimerkiksi SEM-elektronimikroskopiaa ja siihen liittyviä mikroanalyysityökaluja sekä nanokovuusmittauksia. Koska tarkasteltavat yksityiskohdat eli materiaalin rakeet ovat kooltaan mikrometriluokassa, myös kuvaus-, mittaus- ja analyysityökalujen erotuskyvyyn pitää olla riittävä.

Aiempien simulointiprojektien käyttöön luotu porakoneen dynaaminen malli on yhdistetty komponentti-, meso- eli mikrorakenne- ja kidetasojen malleihin. Dynaaminen malli määrittää mikrorakennemalleihin tarvittavat käyttötilanteista aiheutuvat kuormitukset. Laakereiden vaurioitumismekanismien selvittämiseksi Sandvikilta saatiin tarkasteltavaksi käytettyjä ja vaurioituneita komponentteja.



Kuva 3. Laakerimateriaalin mikrorakenteen moniskaalamallinnus, joka ottaa huomioon a) komponentti- (makro-), b) meso- (mikrorakenne-) ja c) kidetason.

Materiaalimallinnuksen ja -simuloinnin valmiuksia kehitettiin myös ÄVE-projektin tutkijavierailuilla. Keskeisimpinä kohteina olivat kideplastisuusgradienttiteoria, faasikenttämallien ja kideplastisuusmallien yhdistäminen FE-laskennassa, kokeellisen työn suunnitteleminen laskentatulosten validoimiseksi ja monitasomallien jatkotutkimus- ja kehitystarpeiden tunnistaminen. Vaikka aiheet ovat hyvinkin tutkimuksellisia ja ”akateemisia”, niiden tutkimus on välttämätöntä kehitettäessä laskennallista materiaalitiedettä kohti käytännön teollisesti hyödynnettäviä sovelluksia: ProperTune®-alusta on itsessään tästä erinomainen esimerkki.

Jatkotoimenpiteet 2020

Ensimmäisen vuoden osalta haasteena on ollut vaikuttavimpien prosessiparametrien tunnistaminen ja niiden yhdistäminen lopputuotteen ominaisuuksiin. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi datan suuresta määrästä, mutta toisaalta kaikkia tarpeellisia parametreja on ollut hankalaa tunnistaa. Toisaalta datan suuri määrä on mahdollistanut monipuolisten ja luotettavien analyysien tekemisen.

Projektin viimeisen vuoden aikana suunnitellut valmistuskokeet tullaan tekemään vuoden ensimmäisen puolikkaan aikana. Ensimmäisen vuoden tulosten perusteella valittiin kaksi potentiaalista valmistusreittiä. Näistä toinen nykyisin harvoin käytetty menetelmä on hyvinkin nopeasti toteutettavissa ja jopa kohtuullisen kustannustehokas käsittely teräksestä valmistetun komponentin iskutkeyden ja väsymiskestävyyden parantamiseksi. Valmistuskokeiden jälkeen määritetään koekappaleiden ominaisuudet ja karakterisoidaan muodostuneet mikrorakenteet. Näitä verrataan nykyisellä valmistustavalla tehtyjen ominaisuuksiin ja simulaatioihin. Jos valmistuskokeen tulokset ovat positiivisia, valmistetaan koekappaleet kolmannessa työpaketissa tapahtuvaa väsytysoetta varten.

Materiaalien vaatimuslähtöinen suunnittelu ja siihen liittyvät ProperTune®-alustalla tehdyt simuloinnit Johnson Metallin laakeripronssin mikrorakenteen optimoimiseksi jatkuvat toisen projektivuoden aikana. Koneoppimisovelluksia (ML) kehitetään approksimoimaan ProperTunen fysikaalisia malleja. Työ on aloitettu käyttäen aiemmissa projekteissa tehtyjä simuloiteja, joista generoidaan opetusdataa koneoppimismallille. Mallin tuloksia puolestaan verrataan ProperTune®-tuloksiin ja tarkennetaan iteratiivisesti. Tätä geneeristä prosessia voidaan jatkossa hyödyntää laajalti laskennallisen materiaalisuunnittelun nopeuttamiseksi ja tehostamiseksi.

ÄVE-projektin seuraavassa vaiheessa koneoppimisen hyödyntämistä laskennan nopeuttamiseen sovelletaan todelliseen materiaalisuunnittelutapaukseen, esimerkiksi Johnson Metallin alumiini-pronssin mikrorakenteenoptimoinnissa tai porakoneen kriittisten teräsosien väsymiskestävyyden parantamisessa.

3.2 Mekaanisten ominaisuuksien manipulointiprosessit

Mekaanisten ominaisuuksien manipulointi nivoutuu tiiviisti yhteen materiaalien vaatimus pohjainen määrittelyn ja uusien testausmenetelmien kanssa. Työpaketissa valittiin tutkimuksen kohteeksi putkimateriaali, jonka ominaisuuksissa esiintyy poikkeuksellisen paljon hajontaa.

Yhteyshenkilö: Pasi Peura, TAU, pasi.peura@tuni.fi

Tavoite

Tavoitteena on kehittää prosessit teräsmateriaalin suorituskyvyn parantamiseen valmistusmenetelmien optimoimisen kautta. Karkaistavasta, niukkaseosteisesta teräksestä valmistettujen putkien on raportoitu kuluvan nopeasti sekä usein yhtäkkisesti hajoavan käytössä. Todennäköisenä syynä vaurioitumisille pidetään valmistusprosessiin liittyviä ongelmia. Valitun komponentin osalta tavoitteena on parantaa samanaikaisesti komponentin kulumisen- ja väsymisenkestoa sekä iskusitkeyttä optimoimalla valmistusprosessi tai materiaalin valinta.

Toimenpiteet

Putken ja siinä käytetyn teräksen mikrorakenteen ja ominaisuuksien muodostumista valmistusprosessin aikana on selvitetty kokoamalla saatavilla olevat tiedot sekä valmistusprosessista että käytetyistä prosessiparametreista. Koostumuksen normaalin hajonnan lisäksi valmistusprosessin muuttujina ovat lämpötila, putken asento ja sijainti uunissa, jäähtymiseen liittyvät parametrit ja odotukset eri valmistusvaiheiden välillä. Valmistusprosessia on simuloitu laboratoriossa ja teollisessa mittakaavassa. Käsittelyjen jälkeen on tehty ominaisuus- ja mikrorakennemääritykset. Rakenteet on analysoitu seuraavilla menetelmillä: SEM, ESD, XRD ja EBSD. Tulokset on koottu ”mikrorakennekirjasto” johon on liitetty näytteiden valmistuksessa käytetyt parametrit ja määritetyt ominaisuudet. Tarkoituksena on ollut tallentaa vertailtavaa tietoa materiaalista ja sen käyttäytymisestä. Lisäksi on simuloitu testattujen materiaalien rakenteen ja ominaisuuksien muodostuminen lämpökäsittelyn seurauksena. Simulointituloksia verrattiin mittausdataan ja materiaalispektiin. Tähän mennessä lämpökäsittelyprosessista on löydetty useita käytäntöjä, jotka mahdollisesti lisäävät ominaisuuksien hajontaa. Pahimmillaan nämä käytännöt saattavat aiheuttaa jopa hylkäyksiä.

Jatkotoimenpiteet 2020

Ensimmäisen vuoden osalta haasteena on ollut vaikuttavimpien prosessiparametrien identifioiminen ja niiden yhdistäminen lopputuotteeseen. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi pitkästä valmistusketjusta ja datan suuresta määrästä, mutta toisaalta kaikkia tarpeellisia parametreja ei ole ollut aina edes saatavilla. Kuitenkin datan suuri määrä on myös mahdollistanut monipuolisten ja luotettavien analyysien tekemisen.

Tulosten tarkemman analyysin jälkeen tullaan esittämään ehdotukset komponentin suorituskyvyn parantamiseksi sekä tärkeät jatkotutkimuskohteet. Lämpökäsittelytestejä jatketaan laboratoriossa samalla kun testaukseen otetaan mukaan käyttökohteen vaatimusten mukaisesti suunniteltu vaihtoehtoinen materiaali.

3.3 Älykäs materiaalien testaus

Työtehtävät tehtiin kiinteässä yhteistyössä useiden Tampereen Yliopiston (TAU) tutkimusryhmien kesken. Avainteknologioita ovat laadunvalvonta Barkhausen-menetelmällä, sekä väsyminen, väsytyksen menetelmien kehitys ja väsytestaus. Tutkimusteemat integroituvat toisiinsa muodostaen kokonaiskuvan, jossa materiaalien perusominaisuudet koostumus, mikrorakenne, ym.) ja prosessointi (lämpökäsittely ja koneistukset) linkittyvät komponenttien laatuun, suorituskykyyn ja elinikään.

Yhteyshenkilö: Arto Lehtovaara, TAU, arto.lehtovaara@tuni.fi

Tavoite

Työpaketin tavoitteena on kehittää ja rakentaa ÄVE-ekosysteemin yhteistä materiaalitestaustakeskittymää, joka hyödyntää pitkälle kehitettyjä ainetta rikkomattomia menetelmiä laadunvalvonnassa ja jolla on kattavat komponenttitaso väsymistestausvalmiudet.

Toimenpiteet

Barkhausen kohina (BN): Työssä on edetty suunnitelman mukaan tehden yrityskumppanien toimitamien kriittisten komponenttien karakterisointia eri mittaustavoilla (BN, jäännösjännitysmittaukset). Tätä mittaustietoa käytetään signaalinkäsittelyyn sekä materiaalikarakterisoinnin tutkimusryhmän yhteisessä diplomityössä, jossa koneoppimisen avulla pyritään analysoimaan komponentteja ja yhdistämään laadunvarmistuksesta saatu tieto materiaaliominaisuuksiin. Työpaketin toisessa osassa on kehitetty syvällistä teoreettista osaamista valitun huippuosaamiskeskittymän RWTH Aachenin (Saksa) kanssa. Tämän yhteistyön tuloksilla on myös viritetty ”hionnan digitaalinen kaksonen” -työpaketin hiljaisen tiedon ja teorian tallennusta digitaaliseen kaksoseen, jota ekosysteemin pk-partneri Creanex kehittää.

Väsytestaus: Työpaketin ensimmäisessä osassa on suunniteltu vuoden komponenttikokoluokan kiertotaivutusväsytyskoelaitte (kuva 4) ja suunnitteluprosessista on tehty diplomityö, joka valmistuu vuoden 2020 alkupuolella. Koelaitte on tällä hetkellä käyttöönottovalihevassa. Työpaketin toisessa osassa on keskitytty suuren kuormitustiheyden pilottikappaleen käytönaikaisten kuormitusten tarkkaan määrittämiseen laboratorio-olosuhteissa. Pilottikappaleen vaste yksittäisissä kuormitustapah-tumissa on onnistuneesti mitattu ja työssä on siirrytty tutkimaan syklistä iskevää kuormitusta modifi-oimalla koelaitteistoa. Iskukoelaitteen suunnittelusta on valmisteilla konferenssijulkaisu. Työt ovat edenneet suunnitelman mukaisesti.

Jatkotoimenpiteet 2020

Barkhausen kohinan osalta projektin aikana on luotu edellytykset menetelmän hyödyntämiseen lie-riömäisten komponenttien hionnan laadunvarmistuksessa. Älykkäiden menetelmien käyttöä osana laadunvarmistusta päästään tutkimaan diplomityössä, jonka tulosten pohjalta voidaan tehdä jatko-suunnitelma Barkhausenin kohinan käytännön hyödyntämisestä tuotannossa. Tavoitteena on sovel-taa koneoppimista teollisen valmistuksen prosesseihin (laadunvarmistukseen), ts. toteuttaa ”digitaal-ista laadunhallintaa”.

Väsytestauksen osalta työpaketissa viimeistellään kiertotaivutusväsytyskoelaitteen käyttöönotto ja aloitetaan koesarjojen ajaminen. Vuoden 2020 aikana mitataan ja analysoidaan valittujen perus-materiaalien sekä TAU:n Metalliteknologia-tutkimusryhmän (kappaleet 3.1 ja 3.2) kehittämien ja toi-mittamien näytteiden väsymiskäyttäytyminen. Iskukuormitusilmiöiden kvantitatiivista mittausta jatke-taan toteuttamalla tutkijavierailu The Ohio State Universityyn (USA) suunnitelman mukaisesti.



Kuva 4. Kiertotaivutusväsytyскоelaitteen CAD-kokoonpanomalli. Laitteiston rungon pituus on 2500 mm.

4. Valmistus

Valmistus-osa-alueen kehittämisen tavoitteena on luoda jokaisesta valmistetusta kappaleesta älykäs yksilö toisaalta (i) haastamalla perinteiset koneenosien rakenneratkaisut ja toisaalta (ii) tuottamalla osille uniikki tietosisältö. Digitaalisen valmistuksen ympäristöt mahdollistavat datapohjaisen suunnittelun ja valmistuksen sekä erityisesti tekoälyteknologioiden hyödyntämisen olennaisena osana älykästä valmistusta. Tutkimus keskittyy mm. suunnittelun ja valmistuksen integrointiin, mallipohjaiseen tuotemäärittelyyn, digitaaliseen valmistukseen ja tunnistusmenetelmiin.

4.1 Suunnittelun ja valmistuksen integrointi

Tuotteen suunnittelu- ja valmistusvaiheiden sekä niiden aikana kerätyn datan - edelleen esimerkiksi tekoälyteknikoilla jatkojalostettuna - kiinteämpi nivominen yhdeksi kokonaisuudeksi on jo pitkään ollut sekä VTT:n että TAU:n ja TAMK:n yhteinen tavoite. Tämän vuoksi valmistus-osa-alueelle laadittiin ja myös toteutettiin suunnitelma kaikkien kolmen organisaation yhteistyönä.

Yhteyshenkilöt: **Asko Ellman, TAU, asko.ellman@tuni.fi**
Jussi Kiljander, VTT, jussi.kiljander@vtt.fi
Lasse Hillman, TAMK, lasse.hillman@tuni.fi

Tavoite

Projektin tavoitteet liittyvät mallipohjaisen suunnitteluun ja osaamisen nopeaan kasvattamiseen ja käyttöönottoon valmistavan teollisuuden yrityksissä. Projektissa demonstroidaan ja jalkautetaan projektin mallipohjaisen suunnittelun tutkimustulokset yritysten käyttöön ja hyödynnettäväksi.

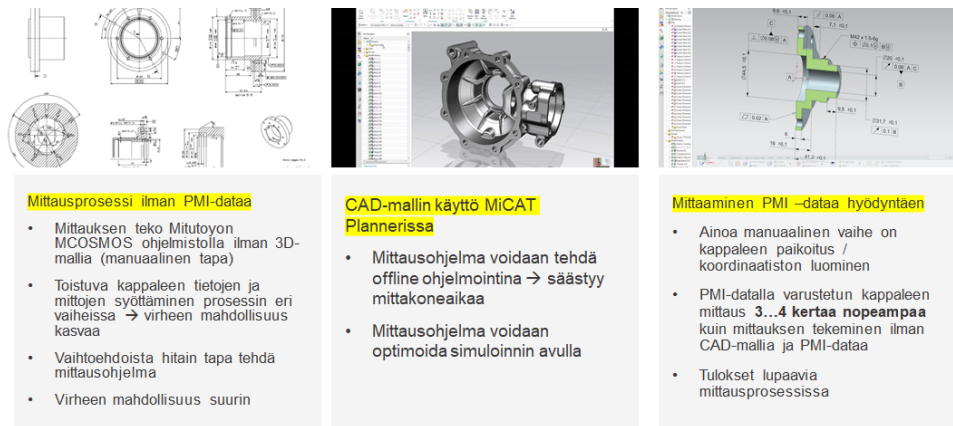
Mallipohjaista tuotemäärityä (Model Based Definition, MBD) on käytetty auto-, ilmailu- ja puolustusvälineteollisuudessa, mutta tiedossa ei ole suomalaisia laajamittaisia hankkeita, joissa malliin perustuva tuotemäärity olisi otettu käyttöön. Mallipohjaisessa tuotemäärityssä tuotteen 3D-kuviin liitetään tuotanto- ja tuotetietoja, esimerkiksi kappaleen toleransseihin liittyviä tietoja (PMI). Tavoitteena on vähentää perinteisten 2D piirustusten käyttöä tuotannossa. Tähän kuitenkin liittyy haasteita, koska suomalaiselle metallituoteollisuudelle on tyypillistä korkea varioituvuus ja pienet eräkoot tai jopa yksittäistuotteet, mikä poikkeaa valtavasti esimerkiksi autoteollisuuden tilanteesta. Lisäksi päämiehen vahva asema auto- ja lentokoneiteollisuuden verkostoissa on erityinen ominaispiirre, joka ei välttämättä toistu suomalaisessa yritys kentässä. Nämä seikat ovat osasyitä sille, että malliperustaiseen tuotemäärityyn ei ole siirrytty suomalaisessa teollisuudessa. Muut syyt liittyvät toimintatapoihin ja -kulttuuriin, jotka vaikuttavat eri osapuolten valmiuksiin tuottaa, ylläpitää, jalostaa ja käyttää MBD:a eli malliperustaista tuotemäärityä varten tarvittavaa dataa eri organisaatioissa ja niiden prosesseissa.

Projektin ensimmäisen vuoden tärkein tavoite oli tuottaa ja jakaa projektikonsortiossa osaamista malliperustaisen tuotemäärityksen mahdollisuuksista. Mallipohjaisuudelle voidaan nähdä selkeitä hyötyjä lähes kaikissa tuote prosessin vaiheissa, esimerkiksi tuotekehityksessä ja -hallinnassa, tuotesuunnittelussa, tuotannossa ja hankinnoissa sekä muutosten hallinnassa. Mielenkiintoinen osa-alue on myös hiljaisen tiedon tallentaminen, jalostaminen ja hyödyntäminen tuotemallin kautta/avulla.

Toisena tavoitteena on tehostaa ekosysteemissä toimivien valmistajien toimintaa malliperustaisella tuotemäärityllä. Tämä vaatii uuden toimintamallin määrittelyn sekä siihen liittyvien elinkaarenhallinnan ratkaisuja (Product Life-cycle Management, PLM).

Toimenpiteet

Alla on esitetty kolme eri tapaa mitata kappale koordinaattimittakoneella, mikä osoittaa mallipohjaisen määrittelyn potentiaalin.



Kuva 5. Kappaleen mittaaminen koordinaattimittakoneella.

- PMI-datalla varustetun kappaleen mittauksen suorittaminen oli noin 3...4 kertaa nopeampaa, kuin vastaavan mittauksen tekeminen ilman CAD-mallia ja PMI-dataa.
- Mitä enemmän mitattavia piirteitä on, sitä suuremmaksi ero metodien välillä kasvaa.
- PMI-datan onnistunut käyttö tuotannossa auttaa poistamaan mahdollisia välikäsien tekemiä virheitä, sekä sillä voidaan myös tehostaa tuotannon läpimenoaikaa.
- Ajallisesti PMI-datan käyttö mittauksissa isoissa tuotantoerissä ei tuo suurta eroa, sillä mittausohjelma luodaan vain ensimmäiselle kappaleelle, jonka avulla voidaan mitata tuotantoerän muut kappaleet automaattisesti.
- Pienissä tuotantoerissä kuitenkin PMI-datan avulla kappaleen mittaohjelman teko on huomattavasti nopeampaa, ja sitä kautta nopeutuu myös itse kappaleen mittaaminen. PMI-dataa käyttäen mittausprosessi on myös yksinkertaisempi, jolloin siihen on helpompi kouluttaa useampi henkilö vähentäen tuotannon riippuvuutta yksittäisistä henkilöistä

Edellä mainittujen tavoitteiden mukaisesti projektissa edistetään mahdollisuuksia ottaa malliperustainen tuotemääritys joustavasti käyttöön älykkäässä valmistusekosysteemissä. Mallipohjaiseen tuotemäärityyn liittyvä työ on edennyt yhteistyökumppaneiden tilanteiden mukaan. Siinä on painotettu teollisuudelle tärkeää tutkimusta Metstan järjestämässä työpajassa ja kartoittamalla yritysten tilanne, haasteet ja tavoitteet mallipohjaisen tuotemäärityksen soveltamisessa. Yrityshaastatteluiden ja kirjallisuuskatsauksen pohjalta VTT ja TAU tuottavat yhteistyönä uutta tietoa, joka julkaistaan tiedeartikkelin muodossa, jossa käsitellään mallipohjaisen tuotemäärityksen käyttöönottoa valmistusekosysteemissä. Samalla voidaan peilata suomalaisen teollisuuden tilannetta eurooppalaisten toimijoiden tasoon ja hahmotella kotimaisia toimenpiteitä ja niiden suuntaamista sekä nykyisen projektin että MEX-ekosysteemin seuraavien vaiheiden aikana. Lisäksi tuloksia hyödynnetään Mets-tan ja FIMAn kanssa siten, että tietoa MBD-käyttöönotosta jaetaan yrityksille käytännönläheisessä muodossa kotimaisissa ammattijulkaisuissa ja raporteissa, koulutustilaisuuksissa ja seminaareissa. Osana projektia on osallistuttu Metstan järjestämään työpajaan ja kartoitettu yritysten tilannetta, haasteita ja tavoitteita mallipohjaisen tuotemäärityksen soveltamisessa.

Projektin ensimmäisen vaiheen tuloksena on tutkielma malliperustaisen tuotemäärittelyn tuomisesta valmistusekosysteemin toimintaan ”Issues on Introducing Model-Based Definition - Case of manufacturing ecosystem”. Siinä esitetään, että mallipohjainen tuotemäärittely on valmistusekosysteemille ominainen asia, koska ekosysteemin eri osapuolet tuottavat lisäarvoa eri keinoilla ja kokonaisuutena saavutettavat hyödyt esim. yksilähteistämisestä ovat ilmeiset.

Julkaisussa käydään läpi kirjallisuudessa havaittuja ongelmakohtia mallipohjaisen tuotemäärittelyn käyttöönotossa, joita verrataan yrityshaastatteluissa havaittuihin kipupisteisiin. Lisäksi tehdään havaintoja TAMKin case-tutkimuksesta, jossa on toteutettu malliperustainen mittausjärjestely. Keskeiseksi haasteeksi todetaan valmistusekosysteemin yhteisöllinen luonne, mikä ilmenee esimerkiksi tarpeena määritellä kattava investointimalli (Business Case). Tämän lisäksi toissijaisena haasteena voidaan pitää MBD-valmistusekosysteemin ohelle tarvittavan MBD-osaamiskosysteemin muodostamista. Kolmantena haasteena on erityisesti tietojärjestelmien hallinta: tähän on olemassa ratkaisuja, mutta ne edellyttävät kuitenkin valmistusekosysteemiin rinnalle siihen liittyvän innovaatio-ekosysteemin.

Jatkotoimenpiteet 2020

Projektin aikana on tehty seuraavia huomioita:

- teknologia ei ole vielä täysin valmis, joten varovaisuutta turhien lupauksen suhteen on syytä käyttää
- PMI-datan käytön hyödyt myös muualla tuotantoprosessissa kuin mittaamisessa
- tuotantoa suunniteltaessa täytyy huomioida ohjelmistoversiot tarkkaan
- kappaleiden geometria voidaan viedä esimerkiksi Parasolid- tai STEP-tiedostomuodossa ohjelmistoversiosta toiseen, mutta tällöin voi kappaleen piirteitä - esimerkiksi kierteet - hävitä, joten kappaleen jatkokehityksen kannalta eri ohjelmistoversiot eivät ole yhteensopivia
- mitattava kappale on asetettava mittakoneen pöydälle erittäin tarkasti, koska pienikin kulma-kierto kappaleen asemassa mittauspöytään nähden hankaloittaa mittausten automaattista suorittamista, vaikka piirteet olisivat manuaalisesti mitattavissa

TAMK:n tavoitteena on toteuttaa mallipohjaiseen suunnitteluun perustuvan demonstraatio- ja oppimisympäristö. Ympäristöllä demonstroidaan yrityksille mallipohjaiseen suunnitteluun pohjautuvan prosessin toimintaa ekosysteemeissä, jonka keskiössä on yritysten sisäiset prosessit sekä kansalliset ja kansainväliset alihankintaketjut. Mallipohjaisen suunnittelun käyttöönotto lisää yritysten digitalisaatioastetta sekä paperitonta ja virheettömämpää suunnittelua ja helpottaa kansainvälistymistä sekä antaa kilpailuetua ja tuo sitä kautta kasvua yrityksille.

4.2 Digitaalisen valmistuksen tutkimusympäristöt

Digitaalisella valmistuksella tarkoitetaan yhteen liitettyä, tietokoneavusteista järjestelmien simulointia, mallipohjaisten 3- ja 4-ulotteisten mallien avulla tehtyä visualisointia, analysointia ja useiden erilaisten yhteistoiminnallisten työkalujen käyttöä tuotteiden ja valmistusprosessien kehittämistä samanaikaisesti. Tätä varten kehitteillä on useita digitaalisen valmistuksen tutkimusympäristöjä, joita käytetään sekä tutkimuksen että opetuksen kehittämiseen.

Yhteyshenkilö: Eric Coatanéa, TAU, eric.coatanea@tuni.fi

Tavoite

Yksi tutkimusympäristö on TAU:n Protopaja, jonka työstökeskus ja mittauskone on varustettu Siemens NX-yhteensopivilla ohjaimilla, jolloin niiden avulla voidaan tehdä kokeita mallipohjaisesti suunniteltujen kappaleiden valmistamisesta.

Toinen kehitteillä oleva tutkimusympäristö on TAU:n tarkkuusvalmistuksen digitaalinen tutkimusympäristö. Tutkimusympäristön keskiössä on hybridisorvi, jolla on kyky työkappaleiden tarkkuushiontaan sekä suorakerrostusmenetelmään, joka on lisäävän valmistuksen prosessi. Tätä tutkimusympäristöä tullaan hyödyntämään tieteellisen tutkimuksen sekä opetuksen kehittämisessä.

Valmistusteollisuudessa tapahtuu voimakasta eläköitymistä, jonka seurauksena osaamista poistuu. Tämän takia on tärkeää tunnistaa ja ymmärtää prosesseihin liittyviä piirteitä, jotka työntekijä oppii kokemukserusteisesti työuransa aikana. Tällaista tietoa kutsutaan hiljaiseksi tiedoksi, jonka keräämistä ja ymmärtämistä voidaan lähestyä tieteellisin menetelmin, mikä onkin yksi projektin tavoitteista.

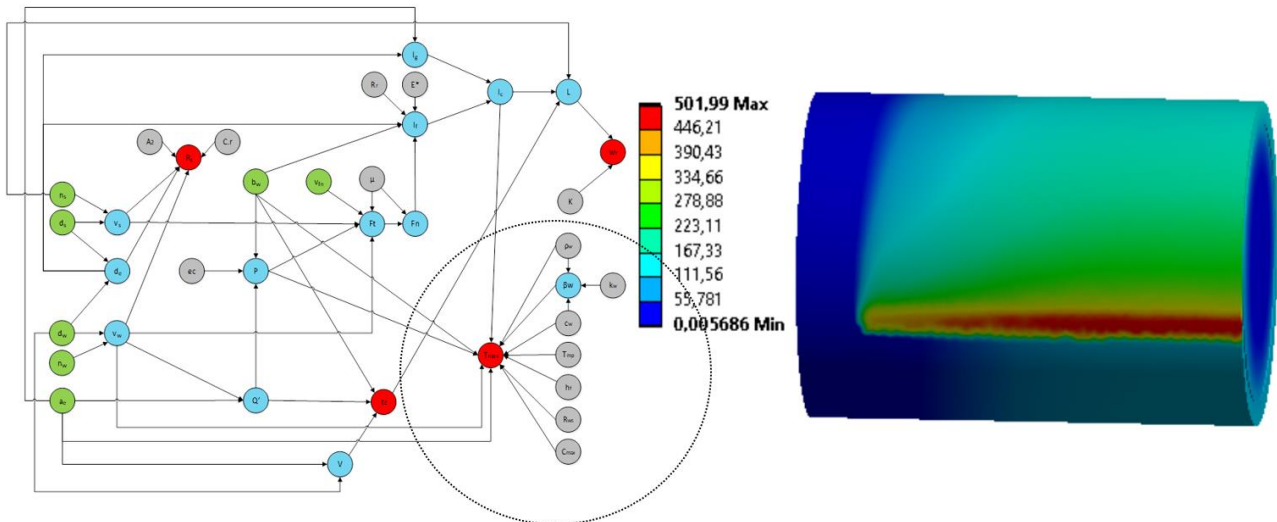
Lisäksi tutkimusympäristöä hyödynnetään hiontaprosessin digitaalisen kaksosen kehittämisessä. Digitaalisella kaksosella tarkoitetaan oikean prosessin, koneen tai asian digitaalista kopioita, joka seuraa, kuvaa ja vaikuttaa alkuperäisen mallin tilaan. Hiontaprosessi mallinnetaan käyttämällä yhdessä graafipohjaista mallinnusmenetelmää sekä elementtimenetelmää yhdistettynä reaaliaikaiseen mitattuun prosessitietoon. Näistä saatavin opein digitaalisen valmistuksen osaamista levitetään ekosysteemin yrityksiin, joista osalla on omat rinnakkaishankkeet.

Toimenpiteet

Tarkkuusvalmistuksen digitaalisen tutkimusympäristön rakentaminen käynnistettiin projektin alussa ja merkittävä osa tarvittavista uusista komponenteista on jo saatu ja asennettu. Tutkimusympäristöä päästään hyödyntämään tutkimuskäytössä syksyllä 2020. Myös mallipohjaiseen suunnitteluun perustuvat oppimis- ja tutkimusympäristöt ovat rakenteilla ja niitäkin päästään hyödyntämään projektin aikana.

Hiontaprosessin digitaalisen kaksosen ytimeksi on luotu prosessia kuvaavista yhtälöistä graafinen malli. Tämä malli on esitetty kuvassa 6. Graafissa on tunnistettu, ryhmitelty ja yhdistetty muuttujat niiden luonteen mukaan. Vihreät esittävät riippumattomia muuttujia, punaiset tavoitemuuttujat, harmaat materiaalmuuttujat ja siniset muista parametreista riippuvia muuttujia.

Graafipohjaisen mallintamisen etuja ovat sen luontinopeus sekä laskennallinen keveys. Lisäksi visuaalinen yksinkertaisuus helpottaa muuttujien yhteyksien ja vaikutusten seurattavuutta. Heikkoutena on mallin pohjautuminen yhtälöihin, jotka pohjautuvat oletuksiin ja yksinkertaistuksiin, jotka eivät välttämättä sovellu kaikkiin tilanteisiin. Esimerkiksi hiontaprosessissa lämmönhallinta ja siihen liittyvät ilmiöt ovat keskeisessä roolissa prosessin onnistumisen suhteen ja geometrisesti monimutkaisen kappaleen tarkastelu yksinkertaisiin yhtälöihin pohjautuen on epätarkkaa. Tämän takia on käyttöön otettava tarkempia mallintamiskeinoja kuten elementtimenetelmä. Elementtimenetelmään perustuva malli (kuvan 6 oikea puoli), korvaa graafista katkoviivalla ympyröidyn osan tuottaen tarkempaa tietoa työkappaleen lämpökäyttäytymisestä.

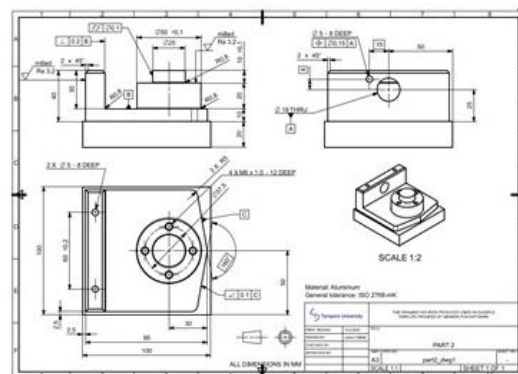
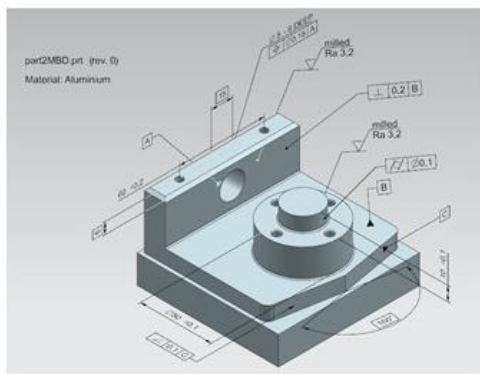
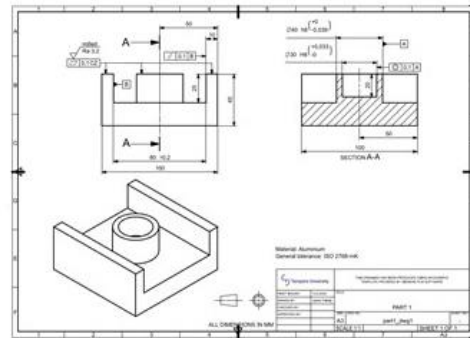
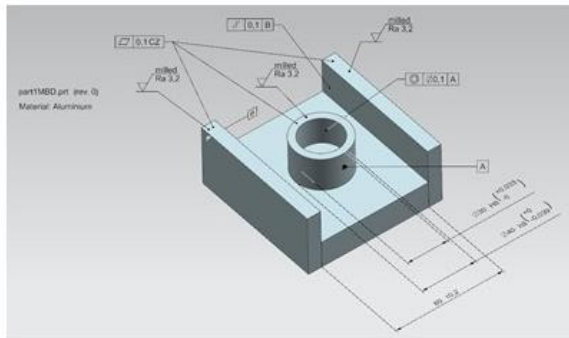


Kuva 6. Hiontaprosessia kuvaava graafinen malli.

Mallipohjaiseen suunnitteluun keskittyvä osaprojekti TAU:n osalta keskittyy selvittämään kokeellisesti mallipohjaisen suunnittelun tarjoamia hyötyjä työstettävien kappaleiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Tässä prosessissa kustannus/aika koostuu kolmesta osatekijästä: suunnittelu, valmistus ja tarkastus.

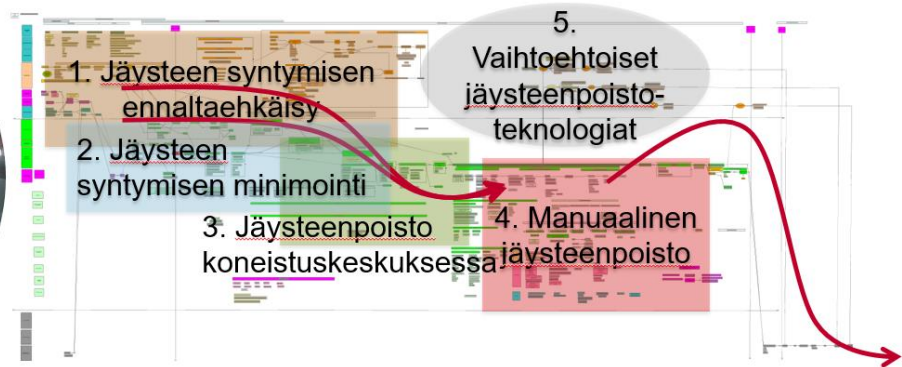
- Mallipohjainen suunnittelu asettaa erityistä painoa suunnittelulle, koska suunnitteluvaiheessa CAD-malliin on osattava liittää kaikki valmistuksessa tarvittava informaatio. Tämän vuoksi on oletettavissa, että suunnitteluvaiheen kustannus ja kesto kasvavat.
- Valmistusvaiheessa työstöradat ohjelmoidaan automaattisesti/puoliautomaattisesti CAD-mallin perusteella. Tämän vuoksi on odotettavissa, että valmistusvaihe nopeutuu.
- Tarkastusvaiheessa mittakoneen tarkastusohjelma luodaan automaattisesti/puoliautomaattisesti CAD-mallin perusteella. Tässäkin tapauksessa lienee selvää, että tämäkin vaihe nopeutuu.

Kokonaisuutena on siis odotettavissa, että suunnitteluvaihe hidastuu ja valmistus sekä tarkastusvaihe nopeutuvat. On kuitenkin epäselvää, riittävätkö positiiviset muutokset valmistus- ja tarkastusvaiheessa kompensoimaan suunnitteluvaiheen hidastumisesta aiheutuvan kustannuksen. Tämän selventämiseksi TAU:n Protopajalla tehdään koe, jossa suunnitellaan, valmistetaan ja tarkastetaan kaksi erilaista koekappaletta, jotka eroavat toisistaan kompleksisuuden osalta. Kappaleen suunnittelu ja valmistus tehdään sekä mallipohjaisesti, että perinteisesti 2D valmistuspiirustuksia käyttäen. Kokeessa mitataan koekappaleiden suunnitteluun, valmistukseen ja tarkastukseen kuluva aika. Koevalmistukseen suunniteltujen koekappaleiden 3D ja 2D piirustukset mittoineen on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Koevalmistukseen suunnitellut koekappaleet.

Hiljaisen tiedon keruumenetelmien tutkimuksessa valittiin kolme yrityksiä eniten kiinnostavaa mallinnuskohdetta. Valitut mallinnuskohteet ovat jäysteenpoisto, prismaattisten kappaleiden koneistus sekä integroitu tuotteen ja tuotannon kehitys. Hiljaisena tietona tutkimuksessa käsitellään valmistuksessa olevien työntekijöiden kokemukseräistä tietoa sekä heidän käyttäytymistensä. Mallinnukset on toteutettu japanilaista tuotannonfilosofiaa noudattaen painottaen kentällä tapahtuvaa tutkimusta sekä hyödyntäen eri asiantuntijoita osallistavia yhteistoimintamenetelmiä. Hiljaisen tiedon mallintamiseen sovellettiin Takahiro Fujimoton konseptoimaa tiedon virtauksen ajatusmallia yhdistäen sitä erilaisiin mallinnustekniikoihin. Hiljaisen tiedon mallien avulla tunnistettiin tutkimuskohteista valmistuksen korkean suorituskyvyn kannalta merkittäviä osaamisalueita. Kuvan 8 vasemmalla tutkija hyödyntää jäysteenpoisto-tutkimuksesta tunnistettua hiljaista tietoa suoraan tutkimuskohteessa verifioiden samalla mallin oikeellisuutta. Kuvassa oikealla on yhteenvedo jäysteenpoisto-tutkimuksessa tunnistetuista merkittävistä osaamisalueista ja niihin liittyvästä hiljaisesta tiedosta. Kuvan taustalla oleva malli pyydystää prosessinomaisesti tunnistettua hiljaista tietoa valmistuksen eri vaiheissa sekä siihen liittyviä keskeisiä syy-seuraussuhteita. Mallia voidaan hyödyntää osana jatkuvaa kehitystoimintaa.



Kuva 8. Valmistuksen hiljaisen tiedon keruumenetelmiä sovellettuna jäysteenhallintaan.

Jatkotoimenpiteet 2020

Valmistus on tällä hetkellä mahdollista toteuttaa ilman piirustuksia kappaleen mittaamisprosessissa. Mutta muissa valmistukseen liittyvissä prosesseissa perinteisten piirustusten puuttuminen tuottaa haasteita. PMI –datan hyödyntäminen CAM –ohjelmoinnissa on vielä alkutekijöissä. Asia vaatii lisätutkimuksia.

Eräs keskeinen ongelma hiontaprosessin digitaalisen kaksosen luomisessa on erilaisten mallien yhdistäminen. Koska prosessi on monimutkainen ja siihen liittyy lukuisia parametreja, mallintaminen on haastavaa. Graafisessa mallissa käytettävät kirjallisuudesta löytyvät yhtälöt perustuvat usein yksinkertaistuksiin, jotka eivät ole aina voimassa. Tämän takia joudutaan turvautumaan tarkempiin mallinnustapoihin kuten elementtimenetelmään. Toisaalta elementtimenetelmän laskennallinen raskeus estää sen käyttämisen reaaliaikaisissa järjestelmissä, jolloin päädytään kompromissiin erilaisten mallinnustapojen käyttämisen sekä yhdistämisen suhteen. Tämä mallien yhdistäminen ja kokonaisuuden luominen on yksi keskeinen jatkotoimenpide projektissa. Osaprojektissa tehdään kansainvälistä yhteistyötä tutkimushankkeen muiden toimijoiden, Aachenin yliopiston (RWTH Aachen) sekä yritysten (esim. Creanex ja Sandvik) kanssa.

Hiljaisen tiedon keruumenetelmien tutkimuksessa kuvattujen mallien pohjalta edetään tutkimuksen seuraavaan vaiheeseen, jossa mallinnusta sekä malleja sovelletaan käytäntöön yrityksen kanssa erikseen valittavien pilottien avulla. Tavoitteena on kerätä tietoa siitä, miten hiljaisen tiedon malleja voidaan jalkauttaa käytäntöön osaksi yrityksen olemassa olevaa tuotantojärjestelmää ja päivätason operaatioita. Vaihtoehtoisina pilottikohteina on esitetty mm. uusien työntekijöiden perehdytystoiminnan tukemista, jatkuvan kehittämistoiminnan Kaizen-tapahtumien järjestämistä, strategisten valmistuksen investointipäätösten tukitoimenpiteitä sekä tuotekehityksen ja tuotannon yhteisiä valmistetavuuden arviointitapahtumia. Jo nyt on nähtävillä, että kuvatut hiljaisen tiedon mallit jäysteenhallinnasta ja prismaattisten kappaleiden koneistuksesta tukevat valmistuksen tulevaisuuden kehitys- ja investointipäätösten tekemistä. Ne myös tehostavat selkeästi tuotekehityksen ja tuotannon yhteistyötä ja siten tuotteen virtausta tilaus-toimitusprosessissa.

4.3 Tunnistusmenetelmät toimitusketjussa

Työssä kehitetään vaativan ympäristön antureita ja digitaalista tunnistusta osien ja komponenttien tunnistamiseksi ja niiden valmistus- ja käyttöolosuhteiden seuraamiseksi. Tunnistuksen tarkoituksena on toisaalta varmistaa osan aitous esimerkiksi piraattivaraosien käytön ja tarjonnan kitkemiseksi, ja toisaalta seurata kappaleiden käytönaikaista kulumista ja ikääntymistä kunnossapidon ajoituksen ja toimenpiteiden optimoimiseksi. Myös anturointiratkaisut voivat tuottaa tietoa kappaleiden valmistusprosessista ja todellisista käyttörasituksista, ja ne palvelevat siten myös käyttövarmuuden ja kunnossapidon tarpeita. Varsinaisten tunnistus- ja anturointitekniologioiden lisäksi toteutetaan tieto- ja tiedonsiirtojärjestelmät sekä analytiikka logistista ja käytön seurantaan varten.

Yhteyshenkilö: Kaarle Jaakkola, VTT, kaarle.jaakkola@vtt.fi

Tavoite

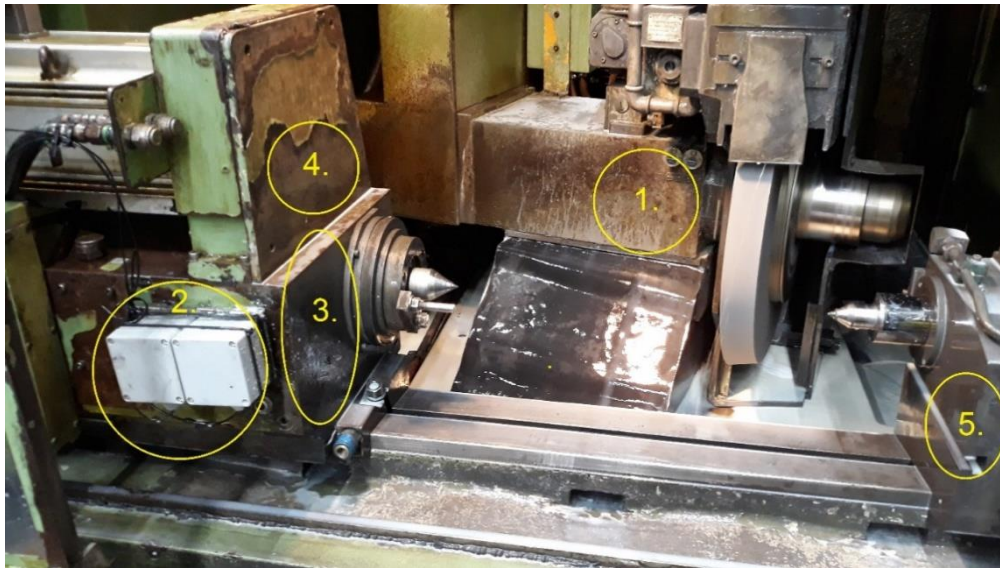
Työpaketin ensimmäisenä päätavoitteena on tutkia työstökoneiden anturointia ja hyödyntää matalan tehonkulutuksen radioteknologioita langattomassa mittauksessa. Toinen päätavoite liittyy tunnistusmenetelmien hyödyntämiseen ja kehitykseen.

Älykkään valmistuksen toteuttaminen suuremmissa mittakaavassa edellyttää tehotaloudellisia ja pienikokoisia anturisoluja useassa prosessin osassa. Kiviporakoneiden mäntien hiontaprosessin valvonnan kehittäminen on ollut työpaketin spesifisen tutkimuksen ja demonstraation kohteena. Nykyinen mäntien ja siten myös hionnan laadun arviointi perustuu valmiille männille tehtyyn dimensioiden lasermittaukseen ja näiden pinnasta tapahtuvaan Barkhausen-kohinan mittaukseen. Näiden perusteella mäntä voidaan hyväksyä tai hylätä, mikä johtaa hävikkiin vailla tietoa hiontavirheen aiheuttajasta. Tavoitteena tutkimustyössä on ollut tehdä havaintoja hiontaprosessin aikana, jotta virheet hionnassa voidaan havaita välittömästi ja liittää ne prosessin ohjaukseen. Hionnan ns. timantointivaiheen onnistumista voidaan myös näin arvioida.

Tekoälymallien kehittämisen ja opettamisen tavoitteena on toteuttaa järjestelmä, joka tunnistaa hiontaprosessin virheet. Alkuvaiheessa on oleellista, että järjestelmä oppii yhdistämään hionnan prosessidatan ja siinä syntyvän tuotteen mitatun laadudatan. Kun malli on opetettu, se osaa päätellä milloin hiontaprosessi on virheellinen ja tarvittaessa esimerkiksi antaa hälytyksen tai keskeyttää prosessin. Mittausdatapankkiin kertyy jatkuvasti lisää dataa, minkä ansiosta malli oppii ja kehittyy koko ajan edelleen.

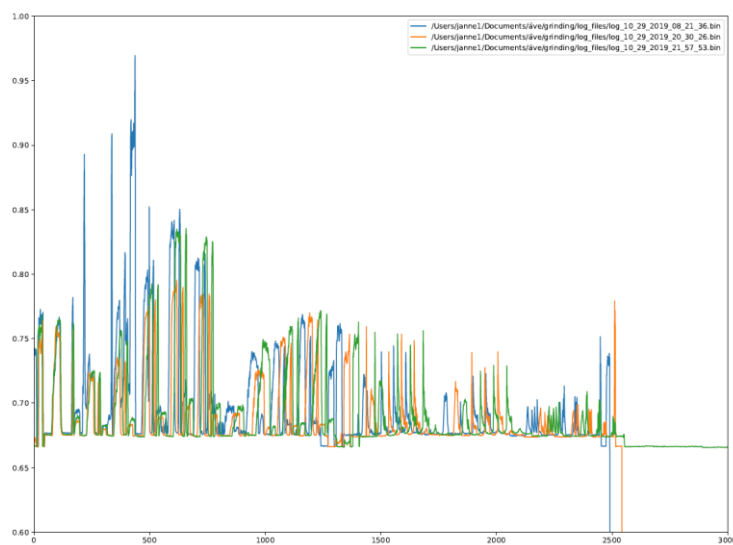
Toimenpiteet

Mittausantureiksi hiomakoneeseen valittiin VTT:n kehittämä laajakaistainen akustisen emission anturi ja kaupallinen kiihtyvyyssanturi. Näiden käytön tavoitteena on kattaa hionnan akustomekaaniset ilmiöt matalista taajuuksista noin 300 kHz:iin asti. Ensimmäisessä vaiheessa anturit asennettiin hiomakoneeseen ja koeajoja suoritettiin langallisen mittausjärjestelmän avulla. Langallisen mittausjärjestelmän näytteistystaajuus oli 20 kHz molemmille antureille ja siinä hyödynnettiin kaupallista datatankkeruokorttia ja VTT:n laatimaa ohjelmistoa. Olosuhteet hiomakoneessa ovat vaativat ja langalliset mittaukset päätyivätkin toisen anturin kaapelin katkeamiseen. Koska mittauksista profiloivaa dataa oli kuitenkin saatu, päätettiin siirtyä langattomaan mittauksen toteutukseen. Kuvassa 9 on esitetty nestetiiviisiin koteloihin sijoitettujen antureiden sijainti hiomakoneessa ja näiden vaihtoehtoisia sijainteja.



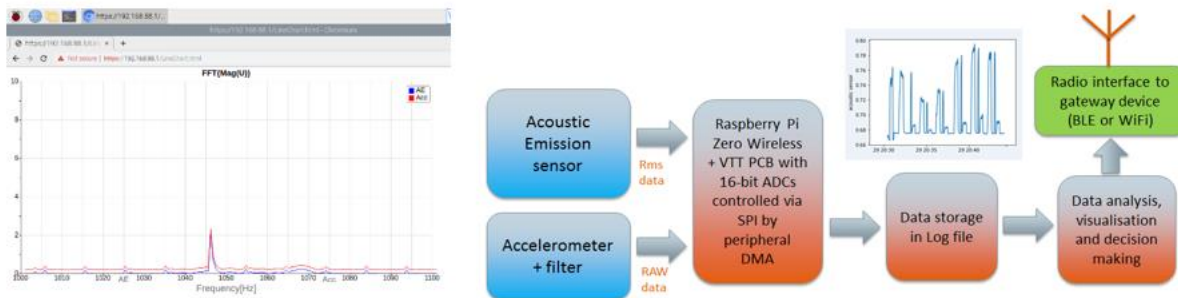
Kuva 9. Akustisen emission ja kiihtyvyyssantureiden sijainti hiomakoneessa.

Aluksi tutkittiin hiomakiven puolen sijaintia (nro 1), mutta päädyttiin hiottavan männän puoleen sijoitukseen (nro 2). Kuvassa 10 on esitetty akustisen emission kokonaisamplitudi (rms) ajan funktiona kolmelle hionnalle. Vasteesta on tunnistettavissa hionnalle ominainen akustinen ”sormenjälki” vaiheiden ollessa vertailukelpoisia hiontojen välillä.



Kuva 10. Kolmen männän hionnan akustisen emission ”sormenjälki”.

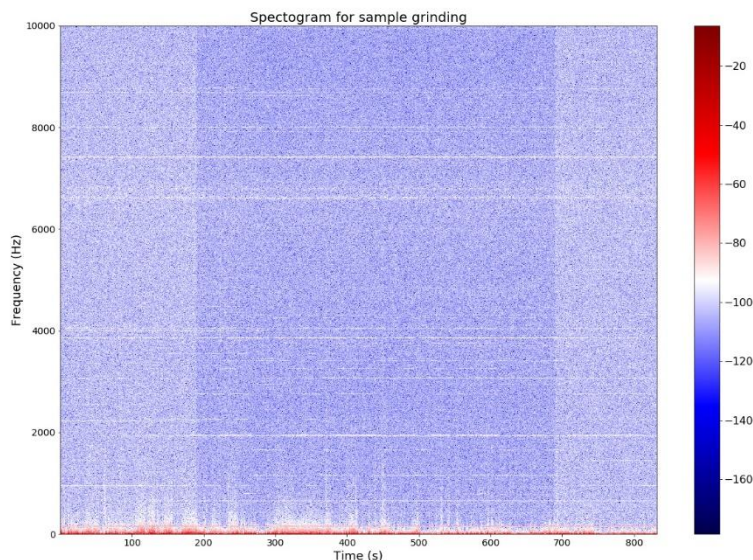
Langattoman mittausjärjestelmän toteutusvaihtoehtoina on tutkittu LoRa-, Bluetooth- ja WiFi-tekniologioita. Langallisten mittauksen ja eri järjestelmien arvioinnin perusteella todettiin, että mittauksen vaatiman signaali- ja nopeusvaatimusten vuoksi ei LoRa-tekniologia tule kysymykseen. LoRa tarjoaa parhaan tehotalouden, mutta tiedonsiirtokapasiteetti on maksimissaan vain noin 50 kbps. Langattoman mittausjärjestelmä päätettiin toteuttaa hyödyntäen Raspberry Pi Zero -alustaa, mikä mahdollistaa sekä Bluetooth- että WiFi-tiedonsiirtoyhteyden käytön. Lisäksi siinä suoritetaan kiihtyvyyssantureiden FFT-prosessointi, mikä vähentää datan siirtotarvetta langattoman yhteyden yli. Data siirretään VTT:n serverille, mikä mahdollistaa sen reaaliaikaisen visualisoinnin. Toteutettavan järjestelmän lohkokkaavio on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Hiomakoneen langattoman mittausjärjestelmän lohkoakaavio ja kiihtyvyyssignaali taajuustasossa (reaaliaikainen fft-muunnos).

Anturoinnin data-analyysi aloitettu ja datapankissa on n. 80 männän hiontadata, tämän lisäksi järjestelmässä kerätään mittauksen jälkeen tuotetut lokitiedostot. Datat tallennetaan VTT:n serverille mittauksittain, joissa yksittäinen hionta tuottaa yhden mittauksittain tiedoston. Tämän lisäksi reaaliaikaisista analytiikkaa ja visualisointia varten on kehitetty Apache Kafkaa hyödyntävä taustajärjestelmä, mikä mahdollistaa virtapohjaisen tiedon käsittelyn reaaliajassa.

Lokitiedostojen pohjalta on kehitetty analytiikkaa: aikataason analyysit on aloitettu sekä akustisen emission sensorille että kiihtyvyyssanturille. Kiihtyvyyssanturin dataa on myös analysoitu taajuus- ja aikataason esityksen (spektogrammi) avulla. Data-analyysillä pyritään löytämään vialliset kappaleet tunnistamalla poikkeukset taajuustason ominaisuuksissa. Järjestelmän kehittämiseksi jatkossa tarvitaan lisää näyttöjä viallisesta männän hionnasta, jotta se voidaan opettaa tunnistamaan em. poikkeamat, kuva 12. Tähänastisten kokemusten perusteella akustisen emission RMS-signaalista voidaan löytää selvä ja edustava sormenjälki männän hionnalle.



Kuva 12. Kuvassa signaali visualisoidaan sekä aika- että taajuustasossa. Väri kuvaa signaalin voimakkuuden eri taajuus- ja aikapisteissä. Kuvan avulla voidaan visualisoida eri signaalilähteiden vaikutusta, jolloin poikkeamat signaalissa voidaan havainnoida.

Sandvikin hiomakoneeseen asennettavat anturointiratkaisut ja datan analysointiin kehitettävät tekoälysovellukset ovat sovellettavissa laajemmaltikin valmistavassa teollisuudessa ja järjestelmästä tiedotetaan aktiivisesti osallistuviin yrityksiin, kun siitä kertyy käyttökokemuksia.

Jatkotoimenpiteet 2020

Langattoman, reaaliaikaisen ja tehotaloudellisen mittausjärjestelmän toteuttaminen on osoittautunut haastavaksi, koska matalalle tehonkulutukselle optimoitujen komponenttien tiedonsiirtokapasiteetti on rajallinen. Ongelmiin on kuitenkin komponenttioptimoinnin kautta löytynyt ratkaisuja ja langaton mittausjärjestelmä tullaan asentamaan hiontakoneeseen kevään 2020 aikana. Lisäksi osien RFID-tunnistukseen tullaan etsimään ratkaisuja. Haastavassa ympäristössä valmistettavien ja käytettävien metallisten koneenosien luotettava merkintä edellyttää uudenlaisia tunnisteita. Tähän pyritään löytämään ratkaisuja additiivisen valmistuksen kautta, johon liittyvää osaamista pyritään kehittämään tutkijavierailun kautta.

5. Toimitusketju

Toimitusketju-osa-alueen tavoitteena on rakentaa läpinäkyvä, oppiva toimitusketju Sandvikin porakonetuotannon ympärille. Sen olennainen osa on koneoppimismallien kehittäminen ennakoivan ja ennaltaehkäisevän huollon ja elinkaaren hallinnan tueksi. Tutkimuksessa keskitytään kannattavuuden johtamiseen sekä toimitusketjun digitaalisten kaksosten kehittämiseen.

5.1 Kannattavuuden johtaminen ja ohjaaminen

Kannattavuuden johtamisen ja ohjauksen alueella Tampereen yliopistossa tehdään sekä aiheeseen liittyvää perustutkimusta että soveltavaa tutkimusta. Perustutkimus sisältää mm. käsiteanalyysiä johtamisen, ohjauksen sekä kannattavuuden perusolemuksesta.

Yhteyshenkilö: Jari Paranko, TAU, jari.paranko@tuni.fi

Tavoite

Tavoitteena on pystyä määrittelemään nykyistä yksiselitteisemmin se, mitä kannattavuuden johtaminen ja ohjaaminen ovat. Ilmiöiden perinpohjaisen ymmärryksen jälkeen uskomme pystyvämme muodostamaan hyvin perustellun näkemyksen siitä, miten kyseisiä toimintoja tulisi mielekkäällä tavalla hoitaa erilaisissa liiketoimintaympäristöissä.

Toimenpiteet

Toistaiseksi olemme tehneet ÄVE-hankeessa konkreettista yhteistyötä sekä pk-yritysten että suur-yritysten kanssa.

Kannattavuuden johtaminen ja ohjaus pk-yrityksissä

Pk-yrityksille on tarjottu mahdollisuutta osallistua nykytila-analyysiin, jossa on kartoitettu yrityksen nykytila kannattavuuden johtamisen ja ohjaamisen alueella. Kyseinen analyysi on tehty neljässä yrityksessä tähän mennessä. Analyysi toteutettiin haastattelemalla yrityksen johtoryhmän jäsenet yksitellen. Yhteensä haastatteluja on tehty tähän mennessä 13 kappaletta. Aikaa yksittäiseen haastatteluun kului kahdesta viiteen tuntiin. Ennen haastattelua yrityksestä oli tehty tilinpäätösanalyysi kymmenen vuoden aikajaksolta. Raportti kyseisestä analyysistä lähetettiin yritykseen ennen haastatteluja. Samoin raportin havainnoista käytiin toimitusjohtajan kanssa keskustelu ennen haastatteluja.

Näin haluttiin varmistaa se, että haastattelijalla on riittävän hyvä ymmärrys yrityksen taloudellisesta tilanteesta. Haastattelujen jälkeen yrityksessä pidettiin kaikille vastaajille yhteinen palautetilaisuus. Kyseisessä tilaisuudessa esitettiin analyysin keskeiset löydökset. Kyseistä yritystä verrattiin muista yrityksistä laskettuihin keskimääräisiin lukuarvoihin. Tilaisuuden loppupuolella käytiin keskustelua mahdollisista kehitystoimenpiteistä, joihin analyysin pohjalta tulisi ryhtyä. Yliopisto tarjosi yrityksille mahdollisuutta saada apua kehitystoimiin projektin puitteissa. Kaksi yritystä on tarttunut tähän mahdollisuuteen. CMC:n toimesta yhdessä yrityksessä tullaan laskemaan kahden keskeisen asiakkaan kannattavuus heti, kun koronatilanne antaa siihen mahdollisuuden. Toisessa yrityksessä CMC on lupautunut toimimaan tsempparina yrityksen sisäisessä kehitystyössä, jonka tavoitteena on kohdata tulevaisuus nykyistä selkeästi kannattavuustietoisempänä. Kyseinen yritys ei ole varsinaisesti mukana ÄVE-hankkeessa, mutta toimii alihankkijana samoille asiakkaille kuin ÄVE-toimittajakin olematta kuitenkaan heidän kilpailijansa.

Analyysin keskeiset löydökset

Analyysissä käytettiin kuusiasteista Likert-asteikkoa. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä korkeamman numeroarvon vastaaja antoi, niin sitä tyytyväisempi hän oli vallitsevaan tilanteeseen, sitä selkeämmin hoidettuna hän asiaa piti tai sitä tärkeämmäksi hän asian koki.

Ohjauksen perusedellytykset hyvässä kunnossa

Ohjauksen perusedellytykset koostuvat seuraavista seikoista (keskiarvo suluissa):

- tavoitteiden selkeys (tiedetäänkö mihin ollaan menossa; 4,30)
- tavoitteiden prioriteetit (tiedetäänkö tavoiteltavien asioiden tärkeysjärjestys; 3,80)
- kulloinenkin sijainti tavoitteisiin nähden (tiedetäänkö nykyinen sijainti; 4,67)
- halukkuus edetä tavoitteeseen (motivaatio saavuttaa tavoitteet; 5,13)
- päätöksenteon aitous (onko meillä vaihtoehtoja, joista valitaan; 3,50)

Parhaimmaksi tilanne arvioitiin vallitsevan motivaatitason kohdalla. Suurin osa vastaajista oli sitä mieltä, että henkilöstön halukkuus päästä tavoitteisiin, on paras mahdollinen. Myös kulloiseenkin tilannetietoisuuteen oltiin tyytyväisiä. Päätöksenteossa vallitsevien vaihtoehtojen määrä pidettiin yleisesti vähäisenä. Asiaa selitettiin alihankkijan asemalla, mikä vähentää vapausasteiden määrää. Selkeästi yrityksen omissa käsissä olevista asioista tavoitteiden prioriteetit saivat heikoimman arvosanan. Niiden kohdalla erityisesti kritisoitiin tärkeysjärjestyksen vaihtelevuutta. Henkilöstöllä ei aina ollut riittävää selvyyttä esimerkiksi siitä, kumpi, kasvu vai kannattavuus, on tärkeämpää.

Eri ”instituutioiden” rooli

Eri henkilöiden tai henkilöryhmien tärkeyttä kannattavuuden johtamisen ja ohjaamisen näkökulmasta arvioitiin seuraavaan tapaan:

- omistajat (3,75)
- hallitus (2,20)
- johtoryhmä (4,86)
- toimitusjohtaja (5,83)
- tilintarkastaja (3,20)
- tilitoimisto
- talousosasto (5,50)
- esimiehet

Ryhmistä tilitoimistoon ja esimiehiin kohdistuvat vastausmäärät jäivät niin pieniksi, ettei tulosten esittämiseksi ole luotettavaa pohjaa. Haastattelun perusteella on selvää, että toimitusjohtaja on se henkilö, joka koetaan tärkeimmäksi kannattavuuteen vaikuttavaksi henkilöksi. Asiasta ollaan yksimielisiä. Myös talousosaston rooli koetaan tärkeäksi. Hallitusta ei koeta tärkeäksi kannattavuuden johtamiseen vaikuttavaksi elimeksi. Tämän kysymyksen kohdalla esiintyi paljon hajontaa. Osa yrityksistä on panostanut hallitustyöskentelyyn paljon ja kokee saavansa panokselle myös vastinetta. Omistajien roolin melko alhaista tärkeyttä selittää heidän passiivinen suhtautuminen omistamaansa yritykseen kahden yrityksen kohdalla.

Parhaimmat tyytyväisyysarviot saivat hallitus ja tilintarkastajat eli ne ryhmät, joita ei koettu tärkeäksi. Yritykset ovat näin ollen oppineet elämään ilman näiden ryhmien voimakasta vaikutusta, ja ovat tilanteeseen jopa tyytyväisiä. Tyytyväisyys toimitusjohtajan tai talousosaston toimintaan kannattavuuden johtamisen saralla on noin yhden arvosanan verran alhaisempi kuin heidän koettu tärkeys. Yleisin selitys tähän poikkeamaan kuului seuraavasti: ” Täytyy jättää vielä pieni parannusvara” (tyytyväisyydelle). Myös tärkeäksi koetun johtoryhmään tyytyväisyys oli puolentoista arvosanan verran alhaisempi kuin sen koettu tärkeys. Asiaa selittää osittain toimitusjohtajan tyytymättömyys siihen, kuinka paljon johtoryhmästä saadaan irti. Myös johtoryhmäläiset itse kokivat, ettei heitä onnistuttu hyödyntämään parhaalla mahdollisella tavalla.

Eri prosessien tärkeys

Kannattavuuden johtamisessa ja ohjaamisessa hyödynnetään erilaisia prosesseja. Tässä haastattelussa tiedusteltiin seuraavien prosessien tärkeyttä johtamisen ja ohjaamisen näkökulmasta:

- budjetin laadinta (4,8)
- budjetin seuranta (4,8)
- vuositilinpäätös (4,1)
- osavuositarkastus (3,8)
- kuukausittainen ”tilinpäätös” (5,5)
- investointilaskelmat (3,7)
- yritystason kustannustietous (5,1)
- asiakastason kustannustietous (6,0)
- tuotetaso kustannustietous (6,0)
- hinnoittelu (5,9)
- kassavirta-analyysi (5,0)
- KPI:t (5,8)
- muu raportointi (5,5)
- tulospalkkiot (4,0)
- kehityskeskustelut (4,4)
- strategia (5,0).

Yleisellä tasolla tulosta voidaan pitää positiivisena; mitään käytetyistä prosesseista ei koeta täysin turhaksi, vaan kaikki koetaan vähintäänkin jossain määrin hyödyllisiksi. Erittäin tärkeiksi nousevat kustannustietous niin asiakas- kuin tuotetasolla. Tätä tietoa tarvitaan hinnoittelun tueksi, mikä myöskin on erittäin keskeinen toiminto kannattavuuden näkökulmasta. KPI:t, kuukausittainen ”tilinpäätös” sekä muu raportointi kuuluvat kannattavuuden johtamisen tärkeisiin prosesseihin. Tärkeiden prosessien kohdalla tyytyväisyys jää 1-2 yksikköä alhaisemmaksi kuin asian koettu tärkeys. Ilmiö kertoo siitä, että tärkeissäkin asioissa olisi parantamisen tarvetta. Kuukausiraportin ja hinnoittelun kohdalla poikkeama (tärkeys-tyytyväisyys) jää pienimmäksi. Kustannustietous ja KPI:t sijoittuvat poikkeaman koossa keskivaiheille. Muussa raportoinnissa poikkeama oli tärkeiden ryhmässä suurin.

Merkitykseltään vähäisemmiksi jäävät investointilaskelmat, osavuositarkastukset sekä tulospalkkiot. Näiden kohdalla tyytyväisyyden saama arvosana on lähellä samaa kuin tärkeydelle annettu arvosana. Ilmiöstä ei kuitenkaan pysty vetämään sellaista johtopäätöstä, että näiden asioiden suhteen oltaisiin erittäin tyytymättömiä. Enemmänkin ilmiö kertonee siitä, että asiaa ei ole koettu tärkeäksi eikä tyytyväisyyttä ole tämän vuoksi kovinkaan syvällisesti mietitty. Tyytyväisyydelle on annettu sama arvosana kuin tärkeydelle ja on kuviteltu, että se tarkoittaa samaa kuin ”asia on ihan ok”. Kyseiseltä osin kysymysten asetantaa tulee muuttaa tulevaisuuden kyselyihin.

Edellä esitettyjen prosessien lisäksi vastaajille esitettiin joukko väittämiä, ja heiltä tiedusteltiin yksimielisyyttä väitteen kanssa. Arvosana 6 tarkoittaa sitä, että vastaaja on täysin samaa mieltä väitteen kanssa. Yksi mielenkiintoisimmista väitteistä koski yrityksen kykyä selittää aukottomasti kannattavuudessa tapahtuneita muutoksia. Vastausten keskiarvoksi muodostui 4. Yksi yritys poikkesi muista selkeästi alhaisemmilla arvosanoilla. Kyseisen yrityksen antamat heikot arvot veivät keskiarvon melko alhaiseksi. Myöskin väitteiden ”asiakaskohtainen kannattavuus tunnetaan tarkasti” sekä ”tuotekohtainen kannattavuus tunnetaan tarkasti” keskiarvot (4,25) jäivät melko alhaisiksi (suhteellisesti). Missään yrityksessä tietoa kannattavuuksista (tuote- tai asiakastasolla) ei saatu suoraan ERP-järjestelmästä. Kaikissa yrityksissä laskelmat tehtiin järjestelmien ulkopuolisina laskelmina. ERP-järjestelmiä pidettiin tältä osin erittäin epäluotettavina. Kaksi neljästä yrityksestä oli näihin erillislaskelmiinsa erittäin tyytyväisiä. Kyseisissä yrityksissä tärkeiksi koetuille tuotteille ja asiakkaille tehtiin erilliset kannattavuuslaskelmat aina tarpeen tullen. Kahdessa yrityksessä kyseisiin erillislaskelmiin ei oltu panostettu riittävästi.

Kaikilta vastaajilta tiedusteltiin myös heidän tapaansa vaikuttaa asioihin (johtaa ja ohjata). Taulukko 1. Yhteenveto kannattavuuden johtamistavoista. on vastauksien yhteenveto.

Taulukko 1. Yhteenveto kannattavuuden johtamistavoista.

Menetelmä	Osuus vastaajista
epäviralliset keskustelut	45 %
säännölliset palaverit	36 %
järeämmät keinot	18 %

Haastatelluissa yrityksissä selkeästi yleisin tapa vaikuttaa asioihin ovat epäviralliset keskustelut. Myös säännöllisillä palavereilla (viikko- ja kuukausipalaverit) on keskeinen merkitys. Järeämmät keinot (henkilöiden vaihtaminen, irtisanominen yms.) jäävät yleensä pelkästään toimitusjohtajan harjoituksille.

Kaksi mainitsemisen arvoista vaikuttamistapaa ovat myös seuraavat: ”hyvin suunniteltu on puoliksi tehty” ja ”tieto on valtaa”. Hyvällä suunnittelulla asian toteuttamista voidaan helpottaa useassa tapauksessa. Panostamalla tiettyjen vaihtoehtojen muita parempaan suunnitteluun voi parantaa kyseisten vaihtoehtojen todennäköisyyttä tulla valituiksi. Myös omaamalla muita paremmat taidot päästä tietoihin käsiksi saattaa pystyä vaikuttamaan päätöksentekoon siten, että päätökset perustuvat mielipiteiden sijaan esitettyihin faktoihin. Kyseisten menetelmien mainitseminen tässä yhteydessä perustuu niiden hyödyntäjien kokemaan menetelmien tehokkuuteen. Maininnat eivät siis perustu menetelmien yleisyyteen, vaan niiden käyttäjien kokemaan tehokkuuteen.

Kyselyllä ei pyritty selvittämään kannattavuuden ja sen johtamiseen ja ohjaamiseen käytettyjen menetelmien yhteyttä. Asiaa ei siksi kommentoida tässä yhteydessä juurikaan. Yksi asia on kuitenkin

pakko mainita johtamiseen liittyen: Koko aineiston selkeästi kannattavin yritys ei ollut kyennyt tekemään investointeja uuteen teknologiaan, sillä ei ollut selkeää strategiaa ja siltä puuttui rakentava omistajaohjaus. Merkittävistä puutteista huolimatta yritys oli koko kymmenen vuoden tarkastelujakson ajan aivan omassa luokassaan kannattavuuden suhteen.

Keskeinen haaste sekä pk-sektorilla että suuryrityksissä on riittävän osallistujamäärän aikaansaaminen. Pk-yrityksissä haastattelut ovat olleet erittäin antoisia sekä yrityksille että tutkijoille. Pk-yritysten määrä on kuitenkin jäämässä melko pieneksi. Suuryrityksille suunnatussa kyselyssä luonnollisesti huolettua tuleva vastausprosentti. Vallitseva koronatilanne ei tee asiasta yhtään helpommaksi, vaan edelleen vähentää todennäköisten vastaajien määrää.

Jatkotoimenpiteet 2020

Suuryrityksille suunnatuissa toimissa olemme kiinnostuneita samasta aiheesta kuin pk-yritystenkin kohdalla. Suuryrityksissä meitä kiinnostaa tytäryhtiöiden asema konsernissa. Tytäryhtiöt ovat sikäli merkittävä tutkimuksen kohde, että ne kerryttävät valtaosan globaalista liikevaihdosta. Kannattavuuden johtamisen ja ohjaamisen saralla meitä kiinnostaa kysymys siitä, miten tytäryritykset kyseisiä tehtäviä toteuttavat. Yksi aiheeseen liittyvä mielenkiintoinen kysymys on seuraava: Ovatko tytäryritykset konserneissa kustannuspaikan vain tulosityksikön asemassa? Tavoitteenamme on arvioida nykyisin käytössä olevia kannattavuuden johtamiskäytäntöjä sekä ohjausmekanismeja nykyaikaisen motivaatioteorian näkökulmasta. Erityinen mielenkiinto tutkimuksessamme kohdistuu motivaatioteoriasta autonomiaan. Koska tutkimuskysymys on laaja, lähestymme sitä askel kerrallaan. Askeliksi olemme valinneet yrityksen funktiot. Yksi keskeinen kannattavuuteen vaikuttava funktio suurissa konserneissa on hankintatoimi. Lisäksi hankintatoimi on se suuryrityksen funktio, joka on ÄVE:ssä mukana olevien toimittajien kanssa jatkuvassa vuorovaikutuksessa. Em. seikoista johtuen olemme valinneet strategisen hankintatoimen funktioksi, johon tässä hankkeessa tehtävä analyysi kohdistuu.

Analyyysin välineeksi on valikoitunut kyselytutkimus. Ensimmäiset viralliset kyselyt lähetettiin yhdelle tutkimuksemme kohdekonsernille 8.4.2020. Kyselyn valmistelutyö on kestänyt pitkään ja se on syönyt paljon CMC:n resursseja. Työskentely kyselyn parissa alkoi syksyllä 2019. Matkan aikana kyselyn sisältö on muuttunut paljon. Kyselyä on pilotoitu yhteensä viiden henkilön kanssa ja kyseiset henkilöt ovat olleet kolmesta eri yhtiöstä. Viimeisin pilotointi tehtiin englanninkielisellä kyselyllä. Jokaisella pilotoinnilla oli suurehko vaikutus lopulliseen kyselyyn. Erityisesti kysymysten ymmärrettävyys lisääntyi kerta kerralta yksiselitteisten käsitteiden korvautessa epämääräisempiä ilmaisuja.

Koronatilanne tulee vaikuttamaan suurelta osin siihen, milloin kyselystä voidaan odottaa tuloksia. Valmiudestamme huolimatta emme lähetä kyselyä yrityksiin varmistumatta ensin siitä, että yrityksillä on otollinen tilanne vastaamiseen. Olemme päättäneet lähettää tässä vaiheessa kyselyitä ainoastaan niihin yrityksiin, joista saamme hankintajohtajalta suoran signaalin siitä, että hankinnan henkilöstö on kykenevä vastaamaan kyselyyn tässä hetkessä. Suurelta osin jääme odottamaan sitä, että elämä palaa ensin normaaleille raiteille.

Kohteenamme ovat Suomessa toimivat suuret koneenrakennusyritysten hankintaorganisaatiot. Tavoitteleme kokonaisuudessaan vastauksia noin 15 eri yksiköstä. Osasta konserneista pyrkimyksenämme on saada vastauksia useammasta yksiköstä. Useamman yksikön osallistuminen samasta konsernista mahdollistaisi toimialabenchmarkingin lisäksi konsernin sisäisen vertailun. Olemme käyneet alustavia keskusteluja siitä, että sama kysely toteutettaisiin myös sekä Italiassa että Puolassa. Yhteistyökumppanimme kyseisissä maissa ovat ilmaisseet halukkuutensa kyselyn toteutukseen. Meillä olisi valmius toteutukseen välittömästi, mutta emme katso ajankohtaa siihen oikeaksi. Ajoituksen vaikuttaa koronatilanne sekä se, että haluamme saada ensin omat tuloksemme julkaistua. Lisäksi asiaan vaikuttaa vielä se, että haluaisimme maista kyselyyn mukaan ainakin Saksan ja Itävaltan.

5.2 Toimitusketjun digitaalinen kaksonen

Työpaketin kantavana periaatteena on toimitusketjun neutraali tarkastelu ja mallintaminen sekä digitalisaatioon liittyvän transformaation kokonaisvaltainen tutkimusote.

Työssä on hyödynnetty tutkimusorganisaation ja yritysten kokemusta ja näkemystä keskeisistä tuote- ja prosessitietoa käsittelevistä järjestelmistä, kuten PLM, ERP ja MES. Lisäksi tausta-aineistona on tietämys digitaalisesti verkottuneesta tuotannosta, josta on muodostettu aiemmin kypsyyss-malleja, esimerkiksi VTT Digimaturity, Dexter (Digital Extended Enterprise).

Tuotteen tai komponenttien sekä tuotantojärjestelmän ja logistiikan digitaalisen kaksohen konseptointi ja määrittely perustuvat mm. CPS-periaatteeseen sekä tuotantoketjun materiaali- ja tietovirtoihin. Erityishuomio on ekosysteemin läpinäkyvyyden kasvattamisessa, mihin sisältyy takaisinkytkennän mallintaminen sekä tietorakenteet (tuotemallit, tuoterakenteet) ja liiketoimintanäkökulma: liiketoimintamallit, ansaintalogiikat, data value chain, palvelumallit, palvelumuotoilu jne.

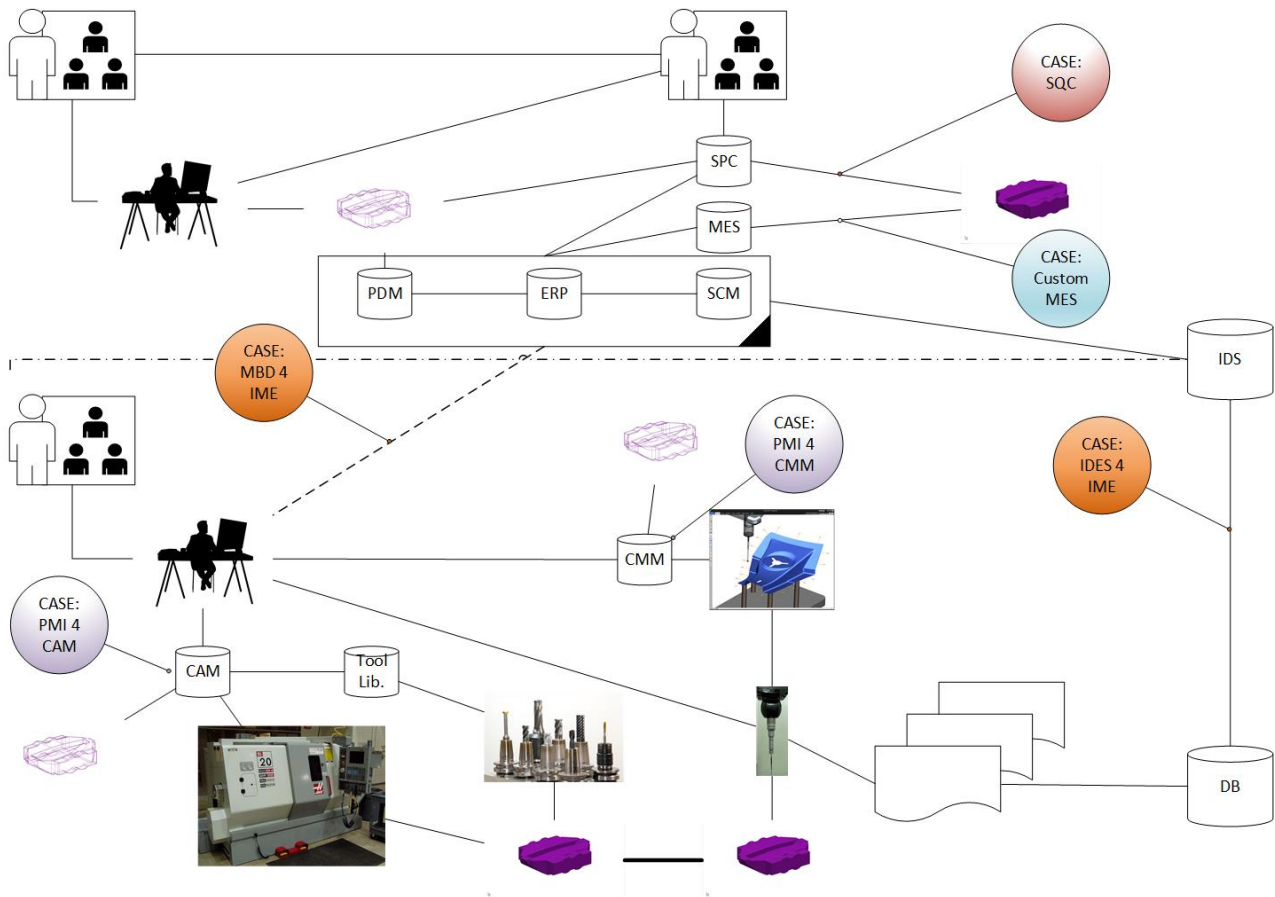
Yhteyshenkilö: Antti Pulkkinen, VTT, antti.pulkkinen@vtt.fi

Tavoite

Tämän tutkimuksen tarkoitus on ollut muodostaa malli digitaalisen läpinäkyvyyden kasvattamiseksi; kuvaus toimitusketjun digitaalisen kaksohen. Tämä kaksonen voi tarkoittaa sekä tuotteen että prosessin digitaalista kaksohen älykkään valmistusekosysteemin yli siten, että

- a) tuotteeseen liittyvä tunnistetieto kytetään kytkemään valmistettuun dataan
- b) tuotannon prosessitiedot kytetään kytkemään tuotteen tunnistetietoon (ja siten määrittelytietoon)

Älykkään valmistusekosysteemin kattavan digitaalisen kaksohen määrittelytyö on varsin suuri työ, jos sitä vertaa esimerkiksi em. tietojärjestelmien tietomalliin. Siksi projektissa on edetty askeleittain siten, että ensivaiheessa on määritetty kokonaiskuva digitaalisesta kaksohen (ks. kuva 13).



Kuva 13. Kokonaiskuva Toimitusketjun digitaalisen kaksosen elementeistä ja niihin liittyvistä tapaustutkimuksista.

Yllä esitetyssä kuvassa viitataan myös muuhun tässä dokumentissa tehtyyn työhön, erityisesti työpakettiin 4, josta on toimitettu artikkeli PLM 2020 –konferenssiin. Artikkelissa tutkitaan malliperustaisen tuotemäärittelyn haasteita valmistusekosysteemissä (ks. CASE MBD 4 IME, kuva 13). Lisäksi artikkelissa sivuttiin malliperustaisen tuotemäärittelyn hyödyntämistä koordinaattimittauksessa (ks. CASE PMI 4 CMM, kuva 13). Yritykset tutkivat myös tuotteen valmistusinformaation käyttämistä työstöratojen määrittelyyn (ks. CASE PMI 4 CAM, kuva 13).

Toimenpiteet

Toimitusketjuihin liittyvä työ alkoi suunnitellusti reilut ½ vuotta muuta projektia myöhemmin kesällä 2019 yhteisen tavoiteasetannan määrittelyllä. Työ on tähän asti ollut lähinnä määrittelytyötä VTT:n, Fastemsin ja Roiman kesken. Työtapoja on jouduttu radikaalisti muuttamaan kevään 2020 aikana Covid-19 vuoksi, mikä on hidastanut työpaketin etenemistä. Lisäksi projektiryhmässä on ollut henkilöstömuutoksia, mutta ne eivät ole vaikuttaneet työtapaan tai sen etenemiseen.

Jatkotoimenpiteet 2020

ÄVE-projektin loppuvaiheen aikana tavoitteena on tutkia laatu-tiedon jakamista formaalilla EU-tason tiedonsiirtoarkkitehtuurilla ja siihen liittyvillä ratkaisulla (IDS, ks. www.internationaldataspaces.org). Tämä työpaketin yksi tapaustutkimus (CASE IDS 4 IME, kuva 13). Tarkoitus on demonstroida formaalilla menettelyllä tehtävää tiedonsiirtoa valmistusekosysteemin osapuolten välillä.

Lisäksi tavoittelemme sitä, että projektin loppuun mennessä voidaan tehdä vähintään toinen tapaus-tutkimus, jossa toimittajayrityksen laatutietoa voidaan tarkastella tilastollisin menetelmin asiakasyrityksen toimesta (CASE SQC 4 IME, kuva 13). Tärkeää näiden tapaus-tutkimusten osalta on kyetä säilyttämään dataan liittyvä metatieto, erityisesti tunnistetieto siten, että kaikissa järjestelmissä tähän tietoon voidaan yksilähteisesti viitata. Lisäksi projektin loppua kohden selvitetään sitä, voivatko yritykset jakaa tuotannon tilannetietoa IDS:n ja lohkoketjujen avulla.

Työ tehdään kiinteässä yhteistyössä ÄVE-hankkeen WP7 Toimintamalli ja tietoarkkitehtuuri kanssa. Simulointien lähtötietoina käytetään ÄVE-yritysten laatudataa ja vastaavasti mallien validointimitaukset tehdään ÄVEssä.

6. Tulevaisuuden haasteet

Vaikka ÄVE-tutkimusprojekti on edelleen täydessä vauhdissa, tutkimuslaitokset ovat jo yhdessä MEX Finlandin kanssa aloittaneet ekosysteemin seuraavan vaiheen tutkimusagendan hahmottelun. Tavoitteena on saada mahdollisimman saumaton jatkumo nykyisen projektin ja tulevan tutkimustyön välille. Tämä on erityisen oleellista sellaisten aiheiden osalta, jotka jatkuvat ÄVEN työn pohjalta, mutta erityisesti uusien avausten käynnistämiseksi mahdollisimman tehokkaasti. Valmistelutyö etenee rinnakkain yritysprojektien osalta MEX Finlandin johdolla ja koordinoimana, ja tutkimusprojektin osalta TAU:n, VTT:n ja TAMK:n voimin. Yritysten tavoitteet ja tutkimusaiheet otetaan huomioon tutkimusprojektissa sitä mukaa kuin niitä esitetään, joko MEXin kautta tai suoraan tutkimuslaitoksille. Haastammekin nyt yrityksiä aktiivisuuteen omien tarpeiden määrittelyssä ja niiden viestimässä tutkijoille!

Tutkimusprojektin rakennetta ja osakokonaisuuksia - työpaketteja - on hahmoteltu alkuvuoden aikana yhteistyössä MEXin kanssa. Vaikka tämänhetkisessä luonnoksessa on edelleen otsikkotasolla samoja teemoja kuin nykyisessäkin projektissa, työn sisältö poikkeaa huomattavastikin nykyisestä: osa nykyisen ÄVEN tutkimusaiheista lopetetaan tai suunnataan uudelleen, osa pitkäjänteisemmistä teemoista jatkuu siitä mihin ÄVEssä jäätiin, ja iso osa tutkimusaiheista on täysin uusia - ja näistä toivottavasti valtaosa on peräisin suoraan yrityksistä!

Tällä hetkellä tutkimusprojektiin on kaavailtu viittä temaattista tai teknologiapohjaista työpakettia, jotka siis keskittyvät tiettyyn teknologiaan tai teknologiseen osa-alueeseen. Alustavasti tällaisiksi teemoiksi on suunniteltu:

- Materiaalit
- Robotiikka ja kobottiikka
- Integroitu suunnittelu ja valmistus
- Digitaalinen valmistus
- Toimitusketju

Näiden teknologioihin keskittyvien työpakettien sisältö on vasta hahmottumassa ja otsikotkin elävät vielä, joten nyt on yrityksillä erinomainen tilaisuus esittää omia toiveitaan ja painotuksiaan työn aiheiksi ja sisällöksi!

Teknologiapohjaisten (vertikaalisten) työpakettien lisäksi jo nykyisen ÄVEN puitteissa on tunnistettu useita läpileikkaavia aiheita, jotka liittyvä suurimpaan osaan tai kaikkiin viiteen edellä mainittuun työpakettiin. Tällaisia horisontaalisia teemoja ovat työnimiltään

- Digitaalinen sormenjälki ekosysteemin yli / ekosysteemissä
 - Data- ja kyberturvallisuus
 - Tekoäly- ja Big Data -sovellukset valmistavassa teollisuudessa
 - Digitaalinen laadunhallinta, Quality 4.0
- Elinkaaren hallinta
 - Älykäs ja ennakoiva kunnossapito ja varaosahallinta
 - Tuotteen ympäristöystävällisyys ja hiilikädenjäljen vahvistaminen
 - Kestävän verkottuneen tuotannon demonstraatioympäristö

Kuten aiemmin on jo mainittu, nämä ajatukset ovat syntyneet tutkijoiden kesken eri yhteyksissä käydyissä keskusteluissa. Nyt on yritysten vuoro määritellä omat tavoitteensa ja suunnitella toimenpiteitä niiden saavuttamiseksi. Nämä kaksi näkökulmaa yhdistämällä voimme yhdessä rakentaa projektin, joka palvelee yhtäläisesti kaikkien osapuolten tarpeita.

ÄVE-projektin julkaisut (tilanne 31.3.2020)

Chakraborti, A., Heininen, A., Koskinen, K., Lämsä, V. (2020). *Digital twin: a dimension reduction method for performance optimization of the virtual entity*. CIRP Conference on Manufacturing Systems, Chicago, United States.

Clotet Matamala, J. (2019): PMI/MBD data in robust design. Thesis work 5/2019 (Tampere University of Applied Sciences)

Lindroos, M, Laukkanen, A, Andersson, T, Vaara, J, Mäntylä, A, Frondelius, T, Forest, S. 2019. Micromechanical modelling of plasticity and damage of martensitic steels in high-cycle fatigue conditions.

Lindroos, M, Pinomaa, T., Andersson, T., Yaschuk, I., Laukkanen, A., Forest, S. 2019. On the linking performance evaluation toolset to process-structure-properties mapping of selective laser melting 316L stainless steel using micromechanical approach with a length-scale dependent crystal plasticity. In Euro PM2019 Congress and Exhibition, European Powder Metallurgy Association. 6 p.

Isakov, M, Terho, S, Kuokkala, V-T. 2020. Low-Cycle Impact Fatigue Testing Based on an Automated Split Hopkinson Bar Device, accepted for publication in 19th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (14.-17.9.2020, Mallorca, Espanja).

Rantalainen, O. Väsytyскоelaitteen suunnittelu, Tampereen Yliopisto, Diplomityö, 2020

TAMK tutkii koneenvalmistuspiirustusten korvaamista digitaalisella mallilla (2020). Tampereen korkeakoulu yhteisö. Eurometalli 3/2020

Uski, P, Pulkkinen, A, Hillman, L, Ellman, A. Issues on Introducing Model-Based Definition - Case of Manufacturing Ecosystem. Lähetetty arvioitavaksi IFIP 17th International Conference on Product Lifecycle konferenssiin.

Weper, S. 2019. Analysis and Implementation of Product Manufacturing Information at TAMK. Thesis work 5/2019 (Tampere University of Applied Sciences)