



VTT-tiimi 15.1.2009
ed. Torsti Loikkanen ja Annele Eerola

Teknologia- ja innovaatiomegatrendit

Johdanto

Yritysten kilpailukyky ja kansakuntien hyvinvointi globaalissa toimintaympäristössä perustuvat kykyyn hyödyntää osaamista ja sen perustana olevaa tieteellisteknillistä kehitystä. Innovaatioiden syntyyn, kehitykseen ja koko innovaatioprosessiin vaikuttavat sekä tieteen ja teknologian työntö (*S&T push*) että innovaatioihin kohdistuva markkinakysyntä (*market pull*). Tässä selvityksessä painopiste on tieteen ja teknologian tarjonnassa ja siihen liittyvien teknologioiden ennakoinnissa. Teknillinen ja tieteellinen kehitys tarjoaa ihmiskunnalle kiihtyvästi yhä uusia mahdollisuuksia.

Keskeisiksi tulevaisuuttamme muuttaviksi teknologia-alueiksi yksilöidään *elämän teknologiat* (bioteknologia, genetiikka, lääketiede, kognitiotieteet), *tietämyksen ja kanssakäymisen teknologiat* (tieto- ja viestintäteknologiat, internet), *elinympäristön teknologiat* (energia, ympäristö, kuljetus) sekä *tuotannon ja käytön teknologiat* (materiaalitekniikka, valmistus, robotiikka).

Artikkeli kuvaa lisäksi teknillisen ja tieteellisen muutoksen dynamiikkaa, erityisesti teknologioita ja tieteenaloja yhdistäviä konsepteja sekä uusien teknologioiden erilaisia ominaisuuksia. Lopuksi kuvataan lyhyesti teknologian kehityksen paradigmoja ja innovaatioiden pitkiä aaltoja sekä käsitellään teknologian arvioinnin ja teknologista muutosta koskevan moniulotteisen tarkastelukehityksen tarpeita.

Teknologioiden ja innovaatioiden megatrendit

Elämän teknologiat

Elämän teknologiat, bioteknologia, genetiikka ja lääketiede kehittyvät voimakkaasti. Kantasolututkimukselta odotetaan parannuskeinoja muun muassa syöpiin ja Alzheimerin ja Parkinsonin tauteihin ja yhä laajempia sovelluksia parin vuosikymmenen sisällä. Yhä tehokkaamman GPS-järjestelmän tukema täsmäviljely (kylvö, lannoitus, torjunta-aineet, jne.) antaa mahdollisuuksia yhä kestävämmälle maanviljelylle jo nyt, mutta kasvavasti lähivuosikymmeninä.

Geenimuuntelu tuo osaltaan uusia mahdollisuuksia elintarvikehaasteiden ratkaisemiselle tulevina vuosikymmeninä. Geenitekniikan laajemman soveltamisen edellytyksenä ja haasteena on sen eettis-yhteiskunnallinen hyväksyttävyyden ja sen mukainen sääntely ja politiikka. Täsmähoidot ja -lääkitys, geeniterapiat, telelääketiede, kasvatetut elimet sekä jopa lasten ominaisuuksiin ennalta vaikuttamista koskevat valinnat ovat laajenevasti käytössä vuoteen 2030 mennessä. Suurten ikäluokkien hoivapalvelut ovat tärkeä haaste, jossa kuitenkin tukea tullaan saamaan mm. älykkäiltä roboteilta.

Tietämyksen ja kanssakäymisen teknologiat

Tieto- ja kommunikaatioteknologiaan, internetiin, tietokoneisiin ja käsipuhelimiin perustuvan tietoteknologian kehitys jatkuu ja nopeutuu. Optisia tietokoneita, jotka ovat nykyisiä tietokoneita 1000-

kertaa nopeampia, otetaan käyttöön noin 10 vuoden kuluessa. Niitä seuraavat biotietokoneet, jotka tallentavat tietoa atomien välisiin sidoksiin.

Kehityksen alkuvaiheessa olevia kvanttietokoneita käytetään 15 vuoden kuluttua. Ne suorittavat sekunneissa tehtävän, johon nykytekniikalla kuluisi miljardeja vuosia. Kehitys tiedonsiirrossa, tekoälyssä ja virtuaalimaailman sovelluksissa on johtamassa siihen, että ihminen on kasvavasti "online". Tietojenkäsittely on halpaa, entistä älykkäämpää ja sitä sovelletaan ubiikkiyhdeiskunnassa kaikkialla.

Viihde, kulutus, opetus ja talouden toiminnot siirtyvät internet-ratkaisuihin ja virtuaalisiin ympäristöihin. Kymmenen vuoden vuodessa voidaan puhua suurelle seinämonitorille työskennellessä, ostoksilla tai hoidettaessa erilaisia hallinnollisia tms. asioita. Biotunnistusta sovelletaan laajassa mittakaavassa parinkymmenen vuoden sisällä.

Elinympäristön teknologiat

Energia- ja ympäristökysymysten ratkaiseminen kestäväällä tavalla muodostaa olennaisen reunaehdon inhimilliselle hyvinvoinnille. Globaalit ympäristöongelmat syvenevät ja ilmastomuutoksen hillintä muodostaa haasteen energian tuotannon ja kulutuksen teknologioille.

Kiina ja muut kehitysmaat teollistuvat minkä takia energian ja muiden niukkojen resurssien tarve voi jopa viisinkertaistua ja ilmastomuutokseen liittyvät ongelmat kaksin- tai kolminkertaistuvat. Vaihtoehtoisten energialähteiden osuuden ennakoitaan kasvavan alle 20 %:sta noin 30 %:iin 2020 mennessä. Energian tuotannossa mahdollisuuksia antaa suuntautuminen yhä monipuolisemmin uusiutuviin energialähteisiin (biopolttoaineet, vesivoima, aurinko, tuuli, ilmapumpputekniikka, maalämpö, jne.) sekä hajautettuihin energiantuotantotekniikoihin. Energian kulutuksessa kestävät ratkaisut voivat perustua kierrätysteknologioihin eli uusiutumattomien raaka-aineiden käytön hallintaan laajamittaisen kierrätyksen avulla.

Liikenteen ja kuljetusten kestäviä energiaratkaisuja antavat mm. hybridautojen kehitys, polttokennotekniikka ja vetyteknologian kehittyminen. Kivihiileen perustuvasta energian tuotantoparadigmasta luopuminen on usean vuosikymmenen haaste. Yksi hiilidioksidipäästöjen vaikutusta helpottava ratkaisu on hiilenpoltosta syntyvän hiilidioksidin erottaminen, nesteytys ja varastointi maan alle (CCS-teknologia). Kansainvälisellä ITER-hankkeella tähdätään puhtaaseen ydinenergiaan, jonka ennakoitaan toteutuvan kuitenkin vasta 2050 jälkeen.

Puhtaan veden saamiseen liittyvät globaalit haasteet ovat kärjistymässä mm. ilmaston lämpenemisen jouduttamana, jolloin meriveden suolanpoistotekniikan kehittäminen on yhä tärkeämpi kysymys. Tämän tekniikan odotetaan toteutuvan laajemmassa mittakaavassa noin parin kymmenen vuoden kuluessa.

Tuotannon ja käytön teknologiat

Materiaali ja valmistusteknologioissa sekä robotiikassa älykkyyden lisääminen kuuluu keskeisiin kehittämiskohteisiin. Materiaalien älykkyyttä lisätään mm. niiden ominaisuuksien paremmalla hallinnalla (mm. älymagneetit) ja uudenlaisten materiaalikomposiittien avulla. Tekstiili- ja vaateteollisuus ovat tärkeä uusien älykkäiden ratkaisujen alue ja tässä hyödynnetään sekä älymateriaaleja että ICT-pohjaisia ratkaisuja.

Materiaali ja valmistusteknologian ja robotiikan tulevaisuuden teknologioita ovat mikroelektroniset laitteet (MEMS) ja yhä älykkäämmät robotit, joita tulee laajempaan käyttöön kasvavasti parinkymmenen vuoden kuluessa. Asuntotuotannon teknologioissa siirrytään muutaman vuosikymmenen kuluessa kohti modulaarisia asuntoratkaisuja, jotka sallivat joustavimmat ja räätälöidymmät muutokset ja uudistukset rakennuksissa. Nanoradio on yksi esimerkki nanoteknologian myötä nousevista uusista tuotteista. Yhä älykkäämmät anturit mahdollistavat mm. tuotantoprosessien yhä tarkemman toiminnan. Uudet materiaalit yhdistelmiseen mahdollistavat yhä kevyempiä, kierrätettävämpiä, kestävämpiä ja materia- ja energiataloudellisempia tuote- ja prosessiratkaisuja, joiden kehittämistä tuetaan systemaattisilla materiaalien hallinta- ja elinkaaritarkasteluilla.

Teknologioiden muutosdynamikka

Teknologioita yhdistävät konseptit

Tieteellisen ja teknillisen työn luonne on muuttunut olennaisesti viimeisten vuosikymmenten kuluessa. Tieteellinen työ ja perustutkimus ovat muuttuneet yksittäisten keksijöiden ja keksintöjen perinteisistä yksilökeskeisistä malleista laajojen tutkijayhteisöjen yhteistyöhön ja kriittisten massojen hyödyntämiseen. Avoimen innovaatiotoiminnan myötä yritysten ja muiden tahojen yhteistyö on siirtynyt yhä *systeemisempään* yksityisiä ja yhteiskunnallisia hyötyjä tuottavaan innovaatiotoimintaan. Tämän on osaltaan mahdollistanut tieteentekijöiden määrän valtava kasvu. Systemaattiseen innovaatiotoimintaan siirryttäessä yhä keskeisemmäksi kilpailutekijäksi ja rajoitukseksi muodostuvat käytettävissä olevat tutkimusvoimavarat, mikä osaltaan vauhdittaa kansallista ja globaalia tutkimusyhteistyötä. Kyky hallita, hankkia ja hyödyntää globaalisti tuotettua teknillistieteellistä tietoa ja osaamista nousee keskeiseksi haasteeksi.

Tieteen ja teknologioiden nykykehitystä luonnehtivat *geneeristen* eli laaja-alaisia sovelluksia omaavien teknologioiden merkityksen kasvu. Tällaisia ovat esimerkiksi tieto- ja viestintäteknologiat yhä monipuolistuvine mahdollisuuksineen sekä yhä syvemmälle niin orgaanisen kuin epäorgaanisten aineiden mikromaailmaan tunkeutuvat nano-, bio- ja geeniteknologiat. Perinteisen perustutkimuksen ja teknologisen kehityksen rajapinnat ovat paljolti murtumassa. Siinä missä aiemmin tehtiin uteliaisuussuuntautunutta perustutkimusta, on nykyisin syntyneiden ideoiden ja keksintöjen omistusoikeus ja hallinta kasvavasti varmistettava patentoimalla sekä selvitettävä keksintöjen kaupallisia sovelluksia perustutkimuksen varhaisissakin vaiheissa.

Paljolti geneeristen teknologioiden välityksellä perinteiset tieteen ja teknologian alat *konvergoituvat ja integroituvat* eli lähentyvät monin erilaisin tavoin, täydentävät toisiaan sekä mahdollistavat kokonaan uudenlaisten teknillistieteellisten mahdollisuuksien syntymisen. Teknillinen kehitys on osaltaan itsekin merkittävästi mahdollistanut uudenlaisen tieteellisteknillisen kehityksen vaiheen tuottamalla kasvavasti sellaisia uusia laitteistoja, menetelmiä ja datahallintaa, joiden takia perinteiset tieteenalat ovat joutuneet uudenlaisiin murroksiin ja joissa aiemmat tieteenalat voivat yhdistyä uusilla tavoilla. Näin on syntynyt ja syntymässä aivan uusia tieteen-, teknologian- ja koulutuksenaloja (esim. bioinformatiikka), jotka ylittävät ja murtavat perinteisiä tieteenaloja ja integroivat niitä kokonaan uusilla tavoilla.

Geneeristen teknologioiden läpitunkeva soveltaminen yhdessä teknologioiden monisäikeisen konvergoitumisen kanssa antaa uusia mahdollisuuksia eri tieteiden ja teknologioiden rajapinnoilla syntyville uusille keksinnöille, innovaatioille sekä kokonaan uudentyypisille, aiemmat teknologiat korvaaville *disruptiivisille* teknologioille, jotka voivat tuoda hyvin radikaalejakin muutoksia koko teknologiseen kehitykseen. Teknologioiden muutosdynamikka luo jatkuvan haasteen koulutus- ja

tiedeyhteisölle: miten koulutus ja tutkimus kyettäisiin parhaiten organisoimaan perinteiset rajat kyseenalaistavia muutostarpeita vastaavasti.

Teknillisen ja tieteellisen kehityksen uusilla konsepteilla on merkittäviä implikaatioita niin yritysten innovaatiotoiminnalle kuin innovaatiopolitiikalle. Perinteiset teknologiakohtaiset tarkastelut eivät enää ole riittäviä. Tulevaisuuden kilpailu käydään kasvavasti ennakkoluulottomasta kyvystä analysoida ja hyödyntää yksittäisten teknologioiden hallinnan lisäksi ja sijasta tieteenalojen yhteisiä ja välisiä, niiden rajapintoihin liittyviä ja niitä ylittäviä geneerisiä, disruptiivisia sekä perinteisiä tieteenaloja konvergoivia luonteenpiirteitä. Näiltä rajapinnoilta on todennäköisimmin löydettävissä niin uudet tieteelliset löydökset, kokonaiset uudet tieteenalat, kuin kilpailukykyisimmät innovaatiotkin.

Uusien teknologioiden ominaisuudet

Uusien teknologioiden kehitystä luonnehtivat *älykkyys, langattomuus, liikkuvuus, etäperiaate, interaktiivisuus, saavutettavuus, online, ubiikkisuus, virtuaalisuus, tietointensiivisyys, täsmällisyys, manipulointi, sekä kestävyys* monessakin mielessä.

Älykkyyttä lisätään tuotteisiin, tuotantojärjestelmiin, liikennevälineisiin jne. mikrosirujen avulla. Materiaalien älykkyyttä lisätään mm. niiden ominaisuuksien paremmalla hallinnalla (mm. älymagneetit) ja uudenlaisten materiaalikomposiittien avulla. Älykkyys lisääntyy myös teollisissa prosesseissa ja infrastruktuureissa (älykkäät moottoritiet, lämpö- ja energiahuoltoverkot). Kaupan hyllyllä olevien tuotteiden äly- ja tietosisältö on suurempi kuin koskaan ja se kasvaa jatkuvasti, mikä mahdollistaa uudentyyppisten yritysten (esim. WIPRO) ja liiketoimintakonseptien syntymisen. Yhä paremmin toimiva ja laaja-alaisempi langattomuus koskee kaiken tyyppisiä viestintämuotoja. Ne kehittyvät yhä etäpohjaisemmaksi ja interaktiivisemmaksi helpottaen on-line yhteydenpitoa, valvontaa ja uudentyyppisiä etätoimia (telelääketiede).

Henkilökohtaisten etäyhteyksien ohella tuotantojärjestelmien älykäs etäohjaus, -huolto ja -valvonta tehostuvat. RFID- tyyppiset tekniikat helpottavat tavaroiden seuranta ja valvontaa kuljetuksissa, kaupoissa, tulleissa, jne. Jatkuvasti kehittyvä interaktiivinen kommunikaatio- ja mediatekniikka mahdollistaa viihde-elämyksiä ja kokemuksia, mutta uusia medioita voidaan hyödyntää myös opetuksessa. Täsmäperiaate toteutuu mm. terveydenhuollossa ja lääkityksessä, mutta myös asiakkaiden tarpeiden mukaan yhä räätälöidyissä tuotteissa. Yhä parempi kasvi-, eläin- ja ihmisgeenien tuntemus antaa yhä suuremmat muuntelumahdollisuudet mm. elintarvike- ja terveydenhuollossa. Uusien materiaalien kehittämisen kriteereinä korostuvat keveys, kierrätettävyys, kestävyys, taloudellisuus ja kehdosta hautaan -elinkaariajattelu.

Kuten yllä kuvatut piirteet osoittavat, uusien teknologioiden soveltamiseen liittyy varsin monitahoisia vaikutuksia niin yksilöiden, yritysten kuin koko yhteiskunnan ja elinympäristömme osalta. Vaikutukset ovat taloudellisia, sosiaalisia sekä paljolti eettisiäkin, ja niiden tuntemus ja monipuolinen arviointi ovat tärkeä osa ennakoivaa innovaatiotoimintaa elinkeinoelämässä ja yhteiskunnan innovaatiopolitiikassa ja muissa teknologioiden soveltamiseen vaikuttavissa toimissa.

Teknologiaparadigmat ja pitkät aallot

Teknologisen muutoksen ja yhteiskunnallis-taloudellisen kehityksen välisiä kytkentöjä kuvataan *teknologiaparadigmojen* sekä teknillisen muutoksen ja innovaatioiden *pitkien aaltojen* avulla. Pitkien aaltojen analyysi kuvaa tieteellisteknologisten kumouksen ja muutoksen syvällisiä

vaikutuksia yhteiskunnan perusrakenteisiin ja infrastruktuuriin (energia-, asumis-, liikenne- ja tietoliikenne- ja yhdyskuntainfrastruktuurit, tuotanto, teollisuus, kauppa, kaupungistuminen, ammatti- ja koulutusrakenteet).

Tieteellisteknillinen kumous perustui alkuvaiheessa vesivoiman keksimiseen ja käyttöönottoon (\approx 1780 - 1840 lukujen aikana), jota hyödynnettiin erityisesti tekstiilituotannon kehittämisessä. Toisen innovaatioaallon keskiössä oli hiilen polttoon perustuvan höyryvoiman hyödyntäminen (\approx 1840 - 1890), mikä mahdollisti liikenteen siirtymisen rautateille sekä rautametalliin perustuvan tuotannon kehityksen. Kolmas keksintö- ja innovaatioaalto perustui sähköön (\approx 1890 - 1940) mikä loi edellytykset yhdyskuntien valaistukselle sekä mm. terästeollisuuden kehittymiselle. Neljännessä innovaatioaallossa (\approx 1940 - 1990) kehittyivät öljypohjaiset muovit sekä synteettiset materiaalit ja ”fordistisen” massatuotannon soveltaminen laajeni. Viides meneillään oleva innovaatioaalto perustuu paljolti mikroelektroniikkaan, mikä on mahdollistanut tieto- ja kommunikaatioteknologian mullistuksen ja yhä laaja-alaisemman ”ubiikin” soveltamisen.

Nykyvaihetta ja jatkoa luonnehtivat uusien materiaaliteknologioiden, geeni- ja biotekniikan sekä näihin liittyvän nanotekniikan keksinnöt ja niihin perustuvien innovaatioiden nopea kehitys ja kasvava soveltaminen. Ympäristöteknologinen paradigma, ehkä kietoutuneena monin tavoin bio- ja geeniteknologiaan, näyttää jatkossa ilmeiseltä erityisesti fossiilisten energialähteiden vähittäisen ehtymisen ja ilmastomuutoksen hyvin monitahoisten ja vakavien vaikutusten hillitsemispyrkimysten takia.

Teknologiaparadigmojen myötä kehittyneet järjestelmät tai yksittäiset teknologiatkin saattavat johtaa teknologialukkiutumisiin, jolloin teknillisestä ratkaisusta tulee vallitseva, vaikkei se välttämättä ole vaihtoehtoista eri näkökulmista optimaalinen. Esimerkkejä tällaisista ovat kirjoitus- ja tietokoneen QWERTY-kirjainjärjestelmä tai myös keskitetty energia- ja liikenneinfrastruktuuri. Teknologiajärjestelmien lukkiutumisen syyt eivät kuitenkaan ole luonteeltaan vain teknillisiä, vaan ne voivat olla myös taloudellisyhteiskunnallisia tai asenteellisiakin. Lukkiutuminen tai teknologinen determinismi voi estää tai hidastaa uusien sinänsä toimivuutensa osoittaneidenkin teknologioiden soveltamista.

Yhteenveto

Elinkeinoelämän ja kansakuntien kilpailukyky ja hyvinvointi globaalissa toimintaympäristössä perustuvat keskeisesti osaamiseen ja teknologiseen kehitykseen. Nousevien tieteen ja teknologiaalojen ennakoinnit ja niistä tehtävät päätelmät innovaatiotoiminnan ja sen voimavarojen suuntaamiselle ja priorisoinneille ovat välttämätön osa yritystason ja valtioiden kilpailukykyä ja hyvinvointia tukevaa toimintaa.

Uusien teknologioiden soveltamisella on taloudellisia, yhteiskunnallisia ja eettisiä vaikutuksia sekä vaikutuksia rakennettuun ja luonnonympäristöön. Vaikutusten tuntemus ja monipuolinen arviointi ovat tärkeä osa ennakoivaa innovaatiotoimintaa elinkeinoelämässä ja yhteiskunnankin innovaatiopolitiikassa. Teknologisen systeemin suunnittelua ja teknologioiden monitahoisten ja pidempiaikaisten vaikutusten arviointia voidaan tukea hyödyntämällä systeemimuutosten monitasoista tarkastelukehystä. Siinä pidempiaikaisia teknologioiden siirtymiä (transitioita) ja innovaatioiden edistämistä ja hyödyntämistä tarkastellaan moniulotteisessa tieteellisteknilliset, taloudelliset, poliittiset ja kulttuuriset instituutiot sekä teknologioiden käyttäjät sisältävässä kehityksessä.



Kilpailukykyä ja hyvinvointia tuottavat innovaatiot eivät ole vain tieteellisiä ja teknologisia, vaan tarvitaan myös innovatiivisia liiketoimintakonsepteja samoin kuin yksilöiden ja organisaatioiden toimintaan ja käyttäytymiseen liittyviä sosiaalisia innovaatioita. Kaikkia tieteitä teknologioita ei pienessä avoimessa taloudessa voida eikä tarvitse tuottaa itse. Verkostoitumalla yhä paremmin globaaliin yhteistyöhön voidaan muualla tuotettuja tieteen ja teknologian saavutuksia hyödyntää oman kilpailukyvyn ja hyvinvoinnin hyväksi.