

# KÄYTTÖVARMUUS HALLINTAAN *simuloinnin avulla*

Tampereen teknillisessä yliopistossa on tutkittu ja kehitetty todennäköisyypohjaista suunnittelumetodiikkaa sekä simulointi- ja laskentamalleja koneiden, laitteiden ja prosessien käyttövarmuuden elinikäistä hallintaa varten vuodesta 1996 alkaen yhteistyössä Suomen johtavien teollisuusyritysten kanssa. Tässä artikkelissa esitellään tuotanto- ja valmistusprosessien tehokkuuden hallintaan kehitetyn dynaamisen simuloinnin perusteita (kuva 1), joita on tullut esiin teollisuuden case-projektien yhteydessä.

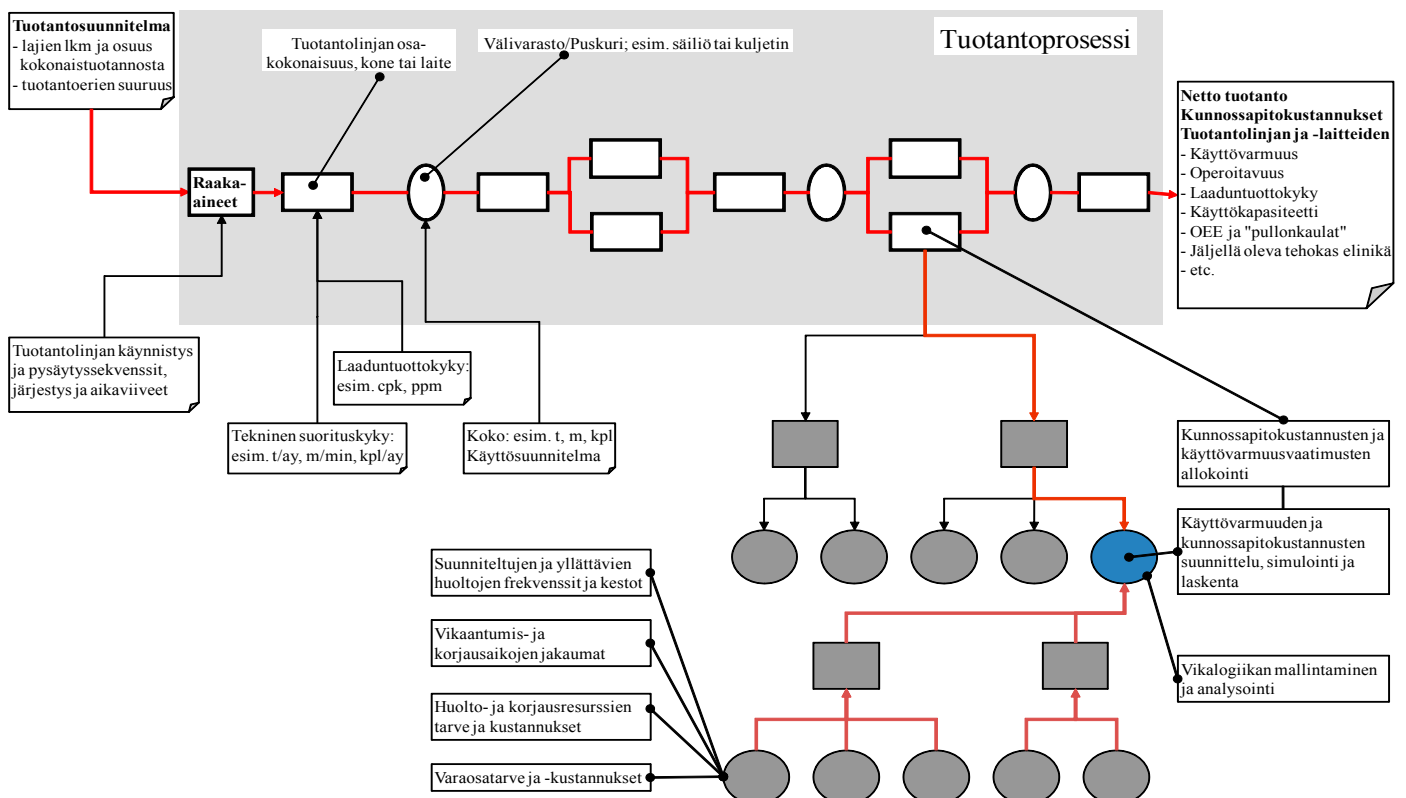
## VEIJO IKONEN

luotettavuus-  
matemaatikko  
Tampereen teknillinen  
yliopisto  
veijo.ikonen@tut.fi

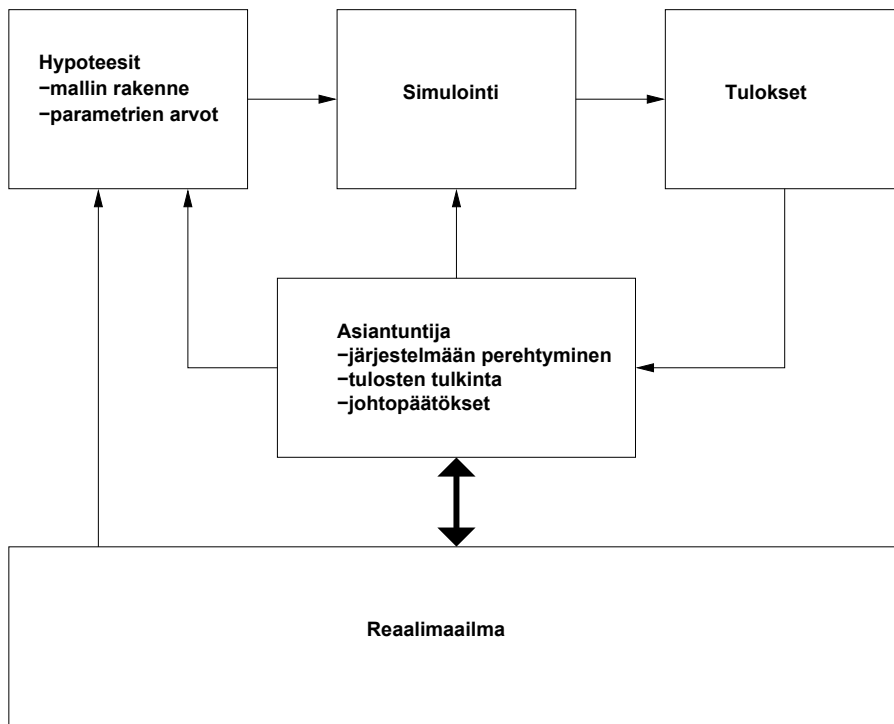
Simulaatiolla tarkoitetaan yleisesti prosessia, jossa jostakin systeemistä tehdään matemaattinen tai looginen malli, jolla voidaan tehdä systeemiä kuvaavia, selittäviä ja systeemin käyttäytymistä ennustavia kokeita. Simulointimallit voidaan jaotella mallinnustekniikan pe-

rusteella diskreetteihin ja jatkuviin, staattisiin ja dynaamisiin sekä deterministisiin ja stokastisiin malleihin.

Diskreettien ja jatkuvien mallien erona on niiden tapa kuvata ilmiöitä. Diskreetti malli pohjautuu yksittäisiin, erotettaviin tapahtumiin, jotka muuttavat mallin tilan. Ta-



KUVA 1. Käyttövarmuuden ja kunnossapidon tutkimus- ja opetuskonsepti.



KUVA 2. Asiantuntija simulointiprosessissa.

pahtumien väliaikana mallin tila pysyy vakiona. Jatkuvia malleja käytetään jatkuvassa muutoksessa olevien prosessien kuvaamiseen. Tällöin mallit joudutaan usein rakentamaan differentiaaliyhtälöiden avulla.

Koska reaalimaailman ilmiöt muodostuvat usein diskreetteistä ja jatkuvista tapahtumista, pyritään myös jatkuvat ilmiöt mallintamaan diskreetteinä käyttäen pieniä aika-askeleita. Staattisessa simuloinnissa systeemin tilat eivät muutu ajan funktiona, kun taas dynamisessa simuloinnissa näin tapahtuu.

Jos simulointimalli ei sisällä satunnais-tekijöitä, kutsutaan mallia deterministiseksi. Deterministisessä mallissa tapahtumat ja niiden lopputulokset voidaan määrittellä varmuudella alkuarvojen perusteella.

Usein simuloitavaan tapahtumaan liittyy joukko satunnaisilmiöitä, joiden todennäköisyysjakaumat erikseen tunnetaan, tai niitä voidaan luotettavasti arvioida. Tällöin puhutaan stokastisesta simuloinnista.

### Miksi käytetään?

Oikealla järjestelmällä tehtävät kokeilut vaativat, että järjestelmä on valmis ja asennettu. Simuloinnilla järjestelmää voi testata jo suunnitteluvaiheessa, ja mallintaa kokonaisuuksia, joita ei ole olemassa. Simuloinnilla voi myös kokeilla asioita, joita ei ole järkevää tai edes mahdollista kokeilla oikealla järjestelmällä. Kokeeseen voi liittyä riskejä, siihen liittyviä resursseja on vaikea irrottaa toiminnasta tai koe on niin laaja, että sen järjestäminen on kohtuuttoman vaivalloista.

Simulointimallissa tehdyt kokeet ovat yleisesti oikean järjestelmän kokeiluja halvempia. Simuloinnissa voidaan tietyllä tarkkuudella hallita myös sellaisia muuttujia, joihin ei todellisessa järjestelmässä voida vaikuttaa, ja ottaa huomioon järjestelmän dynaamisuus ja stokastisuus, joiden huomiointi on muilla menetelmillä vaikeaa tai joskus mahdotonta.

Stokastisen simuloinnin tulokset ovat satunnaismuuttujia, joten luotettavien tulosten saamiseksi on yleensä tehtävä paljon toistoja. Laajojen ja kompleksisten mallien simulointi, joissa järjestelmän tilaa tarkastellaan lyhyen aika-askelen välein, vaatii suurta laskentakapasiteettia tietokoneelta. Simulointiohjelmiston soveltajan pitää osata jakaa tarpeen mukaan järjestelmä laskentakapasiteetin kannalta järkeviin osiin ja ymmärtää perustiedot tulosten analysoinnista.

Mallin validointi on kuitenkin ongelma: vastaako malli lopultakaan halutulla tarkkuudella todellisuutta? Tulokset saattavat olla herkkiä lähtötietojen virheille. Simulointimalli sinällään ei kerro mitään siitä, mitä muuttujia pitäisi varioida ja miten, jotta tuloksissa saavutettaisiin parannuksia.

Vielä vaikeampi kysymys vastattavaksi on, millä varioitavien muuttujien arvoilla tulokset saisivat parhaat mahdolliset arvot. Tässä on kuitenkin mahdollisuus hyödyntää erilaisia optimoinnin ja koesuunnittelun menetelmiä. Tärkeintä mallin validoinnissa on, että se vastaa ainakin asiantuntijoiden parasta ymmärrystä todellisen järjestelmän toiminta-

taan vaikuttavista tekijöistä ja niiden syys-auraussuhteista.

Tässä yhteydessä on syytä mainita, että simulointimallin luominen ja validointi ohjaavat tehokkaasti asiantuntijoita yhteistyöhön, koska se paljastaa, kuinka pienen osan tekijöistä ja niiden vaikutuksista järjestelmän toimintaan, vikaantumiseen ja kunnossapitoon yksittäinen henkilö ymmärtää. KUVASSA 2 esitetään vielä asiantuntijan osuus simulointiprosessissa.

### Tuotanto- ja valmistusprosessin simulointi käyttövarmuuden ja kunnossapidon kannalta

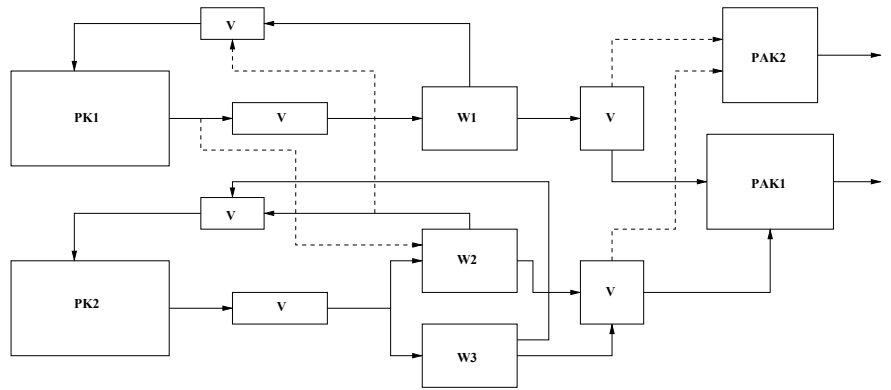
Laitteen kokonaistehokkuus (OEE) muodostuu sen teknisestä suorituskyvystä, laadun- tuottokyvystä ja käyttövarmuudesta. Kokonaistehokkuuden parantamista vaikeuttavat usein eri tekijöiden ristikkäisvaikutukset, jolloin esimerkiksi teknisen suorituskyvyn kasvattaminen voi alentaa käyttövarmuutta.

Erilaisten laitehankintojen yhteydessä joudutaan usein vertailemaan tarjolla olevia laiteratkaisuja ja valitsemaan niistä sopivin omien tarpeiden mukaan. Tällöin on oleellista, että tarpeet selvitetään ja laiteratkaisulta tarvittavat teknisen suorituskyvyn ja käyttövarmuuden vaatimukset todenneetaan. Lisäksi laitevalmistajan kannalta asiakkaan tarpeiden selvitys auttaa suunnittelun kohdistamista oikeisiin asioihin.

Usein edellä kuvatuissa tilanteissa laitteiden käyttövarmuuden suunnitteluun ja tavoitteiden määrittämiseen liittyvät tekijät ovat hyvin monimutkaisia, joten niiden ratkaiseminen edellyttää erilaisten suunnittelutekniikoiden ja laskentamallien käyttöä. Käyttövarmuusanalyysit voidaan jaotella kvalitatiivisiin ja kvantitatiivisiin menetelmiin. Kvalitatiivisilla eli tunnistusmenetelmillä selvitetään potentiaalisia komponenttien vaurioita/häiriöitä, käyttö- ja kunnossapitovirheitä sekä arvioidaan vaurioon johtaneita syitä. Lisäksi kvalitatiivisia menetelmiä ovat erilaiset tapahtumaketjujen mallintamiset lohkokaaavioiden tai tapahtumapuiden avulla. Kvantitatiiviset menetelmät ovat erilaisia matemaattisia malleja kuten simulointimalleja.

Käyttövarmuustarkastelu simulointimallien avulla perustuu tarkasteltavasta kohteesta saataviin käyttövarmuustietoihin, kuten vika- ja korjausaikahistoriatietoihin sekä laitevalmistajien ja asiantuntijoiden arvioihin kohteen käyttäytymisestä. Tietojen perusteella tarkasteltavasta kohteesta konstruo-

daan stokastisia vikaantumisia ja korjausai-koja kuvaavat jakaumat, joiden avulla koh-teen häiriökäyttäytymistä voidaan matkia siinä järjestyksessä kuin se todellisuudessa tapahtuu vikaantuminen – korjaus – vi-kaantuminen jne. Lisäksi simulointimalleihin tulee sisällyttää keskeiset tiedot tarkas-teltavan kohteen deterministisistä piirteistä, jotta kohteen koko toimintaperiaate tulee mallinnetuksi.



KUVA 3. Käyttövarmuuden simulointimallin lohkokaavio.

### Tuotantolinjan simulointi

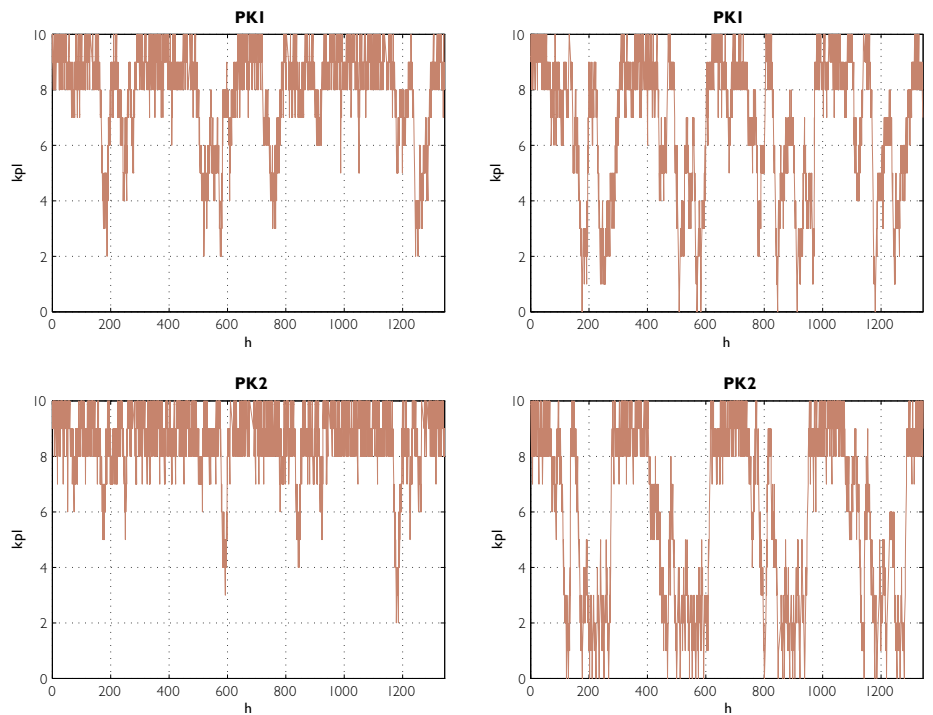
Käyttövarmuusanalyysejä avulla saadut tu-loskset ohjaavat laitteiden suunnittelua, va-lintaa, käyttöä ja kunnossapitoa tukevaa toi-mintaa. Lisäksi tuloksia voidaan hyödyntää käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunta-viivoista päätettäessä mutta myös yksittäisen laitteen kunnossapidon optimoinnissa. Yk-sittäisen koneen tai laitteen käyttövarmuu-den suunnittelussa voidaan usein saavuttaa hyviä tuloksia pelkästään staattisella käyt-tövarmuusmallilla, mutta dynaamiset simu-lointimallit tarjoavat mahdollisuuden käsi-tellä monimutkaisiakin kokonaisuuksia, joi-den tarkastelu muilla menetelmillä voisi ol-la vaikeaa.

Varsinainen tuotantoprosessi sisältää usein kompleksisia fysikaalisia ja kemialli-sia ilmiöitä, joiden yksityiskohtainen mallin-taminen ja simulointi saattaa edellyttää ky-seessä olevan tieteenalan erikoisosaamista ja vaativien matemaattisten menetelmien hal-lintaa. Käyttövarmuuden kannalta voidaan tyytyä huomattavasti yksinkertaisempaan si-mulointimalliin: ei pyritä simuloimaan itse prosessia, vaan tuotantoa (valmistettuja kap-palemääriä, tonneja, kuutiometrejä).

Kun tuotantolinjalle tehdään simuloin-timalli, jossa käyttövarmuus on keskeisel-lä sijalla, on linjan laitteiden satunnaiset vi-kaantumiset ja vikojen korjaukset otettava huomioon. Tuotannon seuraaminen vaatii luonnollisesti aikariippuvuuden. Näin ollen simulointimallin on oltava sekä dynaaminen että stokastinen.

Tuotantolinjan yksittäinen osa (lohko) voidaan käyttövarmuusmallissa kuvata mustana laatikkona (black box), jossa sisäänme-noista lasketaan ulostulojen arvot käyttä-en joskus rajustikin yksinkertaistettuja me-netelmiä. Lohkon toimintaa voidaan ohjata lohkoparametreillä, jotka eivät riipu sisään-menoista.

Koko tuotantolinja voidaan luontevasti kuvata lohkokaaeviona, jossa linjan eri kom-ponenttien black box -mallit yhdistetään toi-



KUVA 4. Toisen rullapakkaamon poiston vaikutus.

siinsa. Tässä yhteydessä on erityisesti huomi-oitava mahdolliset takaisinkytkennät. Loh-kokaaviota voidaan sitten käyttää varsinaisen simulointimallin pohjana. Osalohkojen toimintaa arvioidessa on myös mahdollista käyttää kvalitatiivisia menetelmiä.

Puskurivarastot mahdollistavat tuotan-tolinjan toiminnan jatkumisen jonkin aikaa osalohkon vioittumisen jälkeen. Niiden vai-kutuksen ottaminen huomioon edellyttää dynaamista simulointia. KUVASSA 3 on esimerk-ki paperin valmistuslinjan lohkokaaevioista.

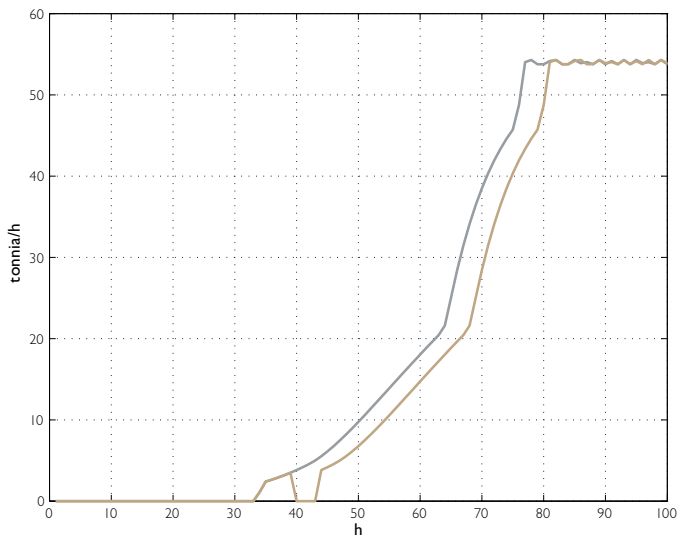
Yksittäisen osaprosessin parametrejä:

- kapasiteetti (tuotantonopeus, väli-varastojen koko)
- osaprosessin toiminta- ja vikalo-giikka (vikapuu)
- stokastiset vikaantumiset sekä kor-jausaikatieidot
- mahdolliset aikaviiveet

- laatuparametrit.
- Koko tuotantolinjan parametrejä
- materiaalivirrat ja tuotantosuunni-telma
- välivarastojen käyttö
- tuotantolinjan käynnistys ja pysäy-tysselvitys, järjestys, aikaviiveet
- tuotantolinjan vikatilanteiden lo-giikka

Dynaamisella simuloinnilla voidaan ottaa huomioon kokonaistehokkuuteen vaikut-tavia tekijöitä

- laitteiden käytettävyyden, vikaantu-miset, korjaukset ja huollot
- kunnossapidon resurssitarpeet ja kustannukset
- lajinvaihtojen ja asetusten vaatima aika
- tyhjäkäynti ja seisokit
- alentunut tuotantonopeus



KUVA 5. Sellutehtaan starttikäyrät.

- laatuongelmat.

Tässä artikkelissa esitellyt mallit on ohjelmoitu Matlabilla.

#### Paperin valmistuslinja

Tarve dynaamiseen simulointiin syntyi alun perin projektissa, jossa piti arvioida uudelta pituusleikkurilta vaadittavia teknisen suorituskyvyn ja käyttövarmuuden vaatimuksia, kun muut valmistuslinjan osaprosessit pysyvät muuttumattomina.

Paperin valmistuslinja sisältää useita osaprosesseja, kuten massanvalmistus, paperikone ja paperin jälkikäsitteilylaitteet. Osaprosessien toimintavarmuuden vaikutus koko linjan toimintaan on ajasta riippuvaa. Osaprosessien välissä olevat väli-varastot, kuten massatornit ja konerullavarastot sallivat osaprosesseille stokastisia vikaantumisia ja häiriötilanteita pysäyttämättä koko linjaa heti vikaantumisen tapahduttua.

Pituusleikkurille on mahdollista tehdä korjaustoimenpiteitä paperikoneen ollessa yhä tuotantoajossa. Leikkurille määritettävien käyttövarmuuden ja teknisen suorituskyvyn vaatimusten hyväksymisen ehdoksi asetetaan tavoitetaso, jolla leikkurin toimintavarmuus ei vaikuta muiden osaprosessien käytettävyyteen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että leikkuri pystyy palauttamaan paperikoneelle paperin

rullaukseen tarvittavia rullaustelarautoja riittävän nopeasti, jolloin paperikoneen pysäyttäviä rautapulatilanteita syntyy harvoin.

Simuloinnin tuloksena saadaan numeeriset vaatimukset leikkurin tekniselle suorituskyvylle ja käyttövarmuudelle. Vaatimusten määrittämisen jälkeen laiteratkaisun valinta on huomattavasti helpompaa, kun vaatimuksia voidaan vertailla laitevalmistajien antamiin arvoihin sekä käytössä olevista laitteista saataviin käyttövarmuustietoihin.

Aluksi mallissa oli mukana vain yksi paperikone ja pituusleikkuri, mutta myöhemmin mallia laajennettiin koskemaan koko paperitehdasta, kun haluttiin selvittää rullapakkaamon vaikutusta valmistuslinjan kokonaistehokkuuteen.

KUVASSA 4 on esimerkksimulointi kahden paperikoneen linjasta, jonka lohkokaaavioesitys on KUVASSA 3. Linjalla on kaksi paperikonetta (PK1, PK2) ja kolme pituusleikkuria (WI-3). Väli-varastoja on merkitty V:llä. Katkoviivalla on merkitty vaihtoehtoiset reitit, joita voidaan käyttää ruuhkatilanteessa.

Linjan lopussa on kaksi rullapakkaamaa (PAK1, PAK2), joista toisen nopeus on 80 rullaa tunnissa ja toisen 10 rullaa tunnissa. Pakkaamaa 2 käytetään

vain tarpeen mukaan. Vasemmanpuoleisissa kuvissa molemmat pakkaamot ovat käytettävissä ja oikeanpuoleisissa kuvissa vain nopeampaa pakkaamaa käytetään.

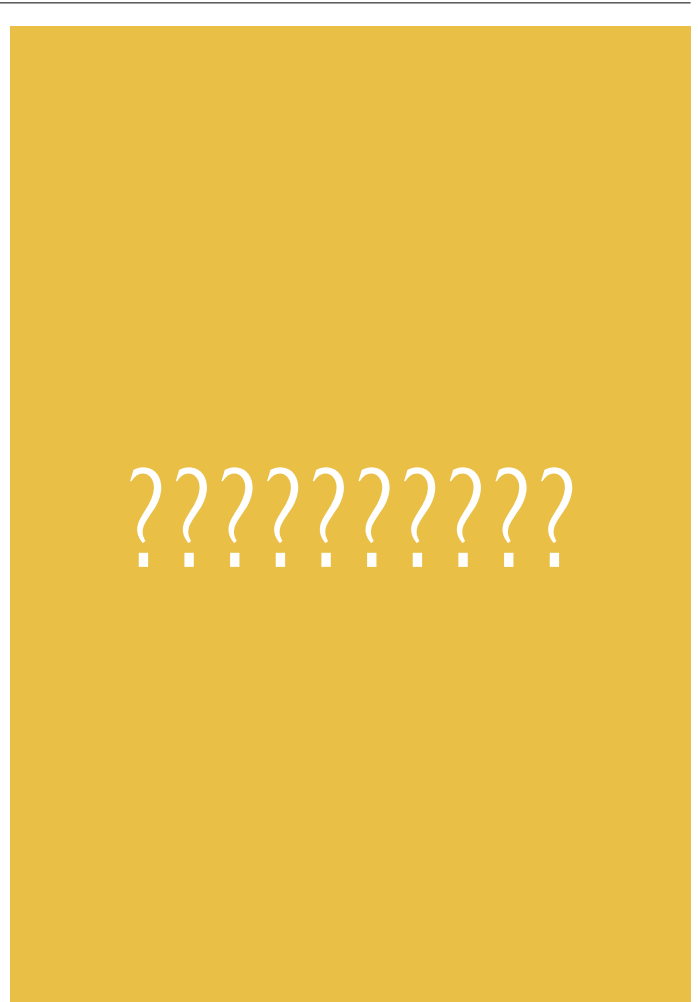
Kuvaajista näkyy vapaiden rullaustelojen lukumäärä paperikoneilla 1 ja 2. Mikäli vapaita rullausteloja ei ole käytettävissä (kuvaaja menee nolleen), paperikone pysähtyy rautapulan takia. Kuvista näkyy, miten ratkaiseva merkitys näennäisen hitaalla toisella pakkaamolla on kokonaistilanteeseen. Ilman sitä paperikoneet pysähtyisivät aivan liian usein.

#### Sellutehdas

Koska paperitehtaan simuloinnissa ei keskitytty massanvalmistukseen, toisessa projektissa kehitettiin dynaaminen käyttö-

varmuuden simulointimalli kokonaisen sellutehtaan tuotantoprosessista. Mallissa sellun tuotanto oli jaettu osaprosesseihin aina hakekentältä kuivaamoon, kemikaalikierto mukaan luetuna.

Simulointitulosten avulla esitettiin tuotannon pullonkauloja ja arvioitiin tuotantoprosessin kokonaistehokkuutta. Hyödyllisimmäksi sovellukseksi osoittautui seisokkien yhteydessä tapahtuvan tuotantoprosessin ylös-/alajasjon simulointi, mikä antoi mahdollisuuden arvioida aiempaa tarkemmin erilaisten häiriötilanteiden aiheuttamaa tuotannon menetystä varsinkin käynnistyksen yhteydessä. KUVASSA 5 on esimerkki tapauksesta, missä käynnistyksen aikana tapahtuu vikaantuminen verrattuna optimaaliseen käynnistykseen.



## Elektroniikkateollisuuden kokoonpanolinja

Tarkastelun kohteena oli nopea kappaletavaratuotantolinja, jossa oli vain pieniä välivarastoja. Yleisen kapasiteettitarkastelun lisäksi mallin avulla pystyttiin arvioimaan monipuolisesti koneiden ja laitteiden operoitavuuden, luotettavuuden ja kunnossapidon vaikutusta tuotantotehokkuuteen.

Erityispiirteensä mallin kehityksessä oli ns. Renewal-mallin integrointi tuotantolinjan simulointimalliin. Mallissa korjaus- ja huoltoaikojen keston jakauma muuttui koneiden/laitteiden eliniän funktiona. Kehitetyn simulointimallin avulla pystyttiin määrittämään koneiden ja laitteiden taloudellinen poistohetki, kun vaihtoehtona oli myös kustannuksiltaan ja kestoiltaan suuren ns. overhaul -tyyppisen huollon tekeminen.

## Käyttöprofiilin määrittäminen

Erilaiset käyttöolosuhteet, käyttäjät ja käyttötarkoitukset vaikuttavat usein laitteen käyttövarmuuteen. Selvittämällä laitteen käyttöprofiili käyttövarmuuden suunnittelu helpottuu huomattavasti. Kun tiedetään, miten laitetta käytetään, on esimerkiksi mahdollista suunnitella huollot käyttöprofiilia vastaavaksi.

On osoittautunut, että erilaisten koneiden ja laitteiden käyttöprofiili tunnetaan varsin huonosti. Tästä syystä eräissä projekteissa keskityttiin käyttöprofiilin määrittämiseen. Simulointi mahdollisti erilaisten käyttöprofiilien vaikutusten arvioinnin mm. huoltojen tarpeen ja vikojen esiintymisen suhteen.

## Logistiikkasovellus: kuljetuskaluston teknisen eliniän hallinta

Projektin kohteena oli kuljetusajoneuvokalusto, joka on sijoitettuna useisiin asemapaikkoihin. Dynaamisen simuloinnin

avulla arvioitiin teknisten, varastointi- ja kunnossapitoratkaisujen vaikutusta käyttövarmuuteen ja kunnossapitokustannuksiin kaluston eliniän eri vaiheissa.

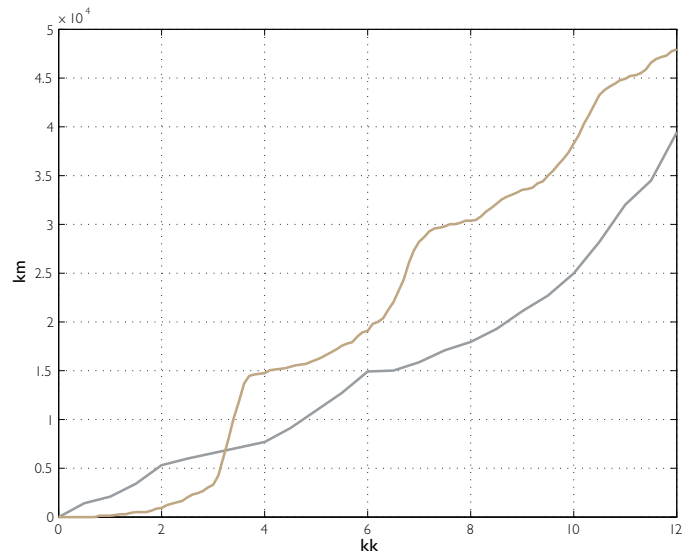
Ajoneuvoille määriteltiin erilaisia tehtävyytyyppejä kuljetettavan lastin ja ajomatkan mukaan. Kaikille tehtävyytyypeille määritettiin käyttöprofiilit. Kaluston tarve vaihteli kalenterikuukausittain, joten osaa kalustosta pidettiin ajoittain varastoituna.

Vaikka saattaa tuntua siltä, että kyseisellä tilanteella ei ole juuri mitään yhteistä tuotantolinjan tai -prosessin toiminnan kanssa, osoittautui, että tuotantolinjalle kehitettyä simulointimallia voitiin pienin muutoksin hyödyntää myös tässä tapauksessa.

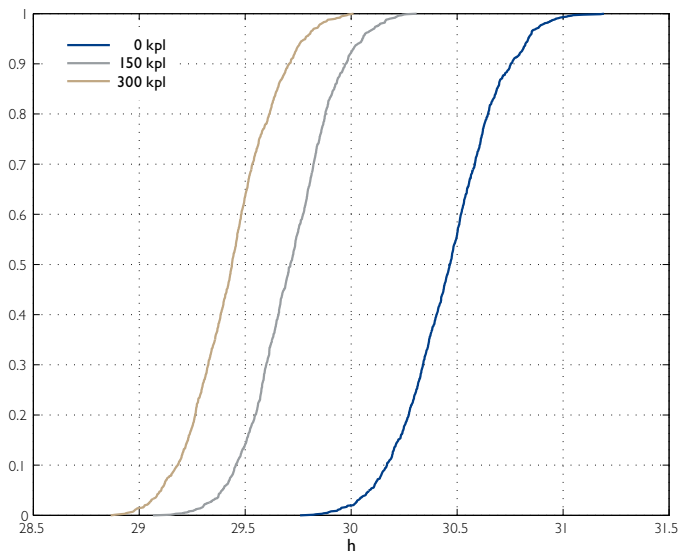
Mallissa koko ajoneuvokalusto ja sen toiminta muodostaa prosessin, jossa perusyksikkönä on yksi ajoneuvo. Jokaisen yksittäisen ajoneuvon käyttöä seurataan koko simulointijakson ajan. Huomioon otetaan ajoneuvojen suunnitellut käyttömäärät ja tehtävyytyypit, mahdolliset siirtymät, huollot ja varastointi. Tästä muodostuu ajoneuvojen ajomalli, jolla voidaan määrittää kaluston käyttöprofiili koko elinkaaren ajalle.

Kun tähän malliin liitetään erilaisia lisäparametreja, kuten vikaantumis- sekä korjaus-, kustannus- ja henkilöresurssitietoja, sitä voidaan hyödyntää kaluston elinjakson hallinnassa. Kalustovaje aiheutuu, kun kaluston sijoittelun, huoltojen tai vikaantumisten takia syntyy tilanne, jossa tarvittavaa kalustoa ei ole kaikissa asemapaikoissa riittävästi.

Simuloinnista saatiin tuloksena mm. kalustovajeiden todennäköisyys ja aiheuttajat, huolto-, korjaus- ja varastointikustannukset sekä huolto- ja korjausresurssien tarve. **KUVASSA 6** nähdään ajoneuvoille keskimäärin kumuloituvat vuosittai-



KUVA 6. Kumuloituvat ajomäärät eri asemapaikoissa.



KUVA 7. Pakkauslinjalle lisätyn välipuskurin vaikutus. Ajoajan kertymäfunktiot.

nen ajomatka kahdessa eri asemapaikassa.

## Pakkauslinja

Viimeksi sovelluskohteena on ollut kappaletavaran pakkauslinja, jossa bulkkituotteita pakataan kuluttajapakkausiksi. Linjalla on laitteita, joilla suoritetaan tuotteiden annostelu ja mittaus kuluttajapakkausiksi, erilaisten etikettien ja käyttöohjeiden lisäys sekä kuluttajapakkausien pakkaus suurempiin tukkupakkausiksi.

Linjan ominaisuuksiin kuuluu se, että kunkin laitteen nopeutta voidaan säätää erikseen ja laitteiden välillä on kuljettimia,

jotka toimivat puskureina, joiden avulla voidaan hallita lyhytaikaisia vika- ja häiriötilanteita. Lisäksi linjalla voidaan pakata useita erilaisia tuotteita, jolloin lajinvaihto tuotteesta toiseen muodostaa merkittävän osan kokonaistyöajasta, sillä laitteet joudutaan säätämään pakattavan tuotteen mukaan.

Simuloinnilla on selvitetty linjan kokonaistehokkuutta, tuotannon pullonkauloja sekä laitekohtaisten nopeuksien ja laitteiden välisten puskurien vaikutusta tuotantonopeuteen. Lisäksi tavoitteena on ollut lajinvaihtojen tehostaminen. Simuloinnin lähtötietojen määrittämisessä on

hyödynnetty linjalla olevaa automaattista tiedonkeruuta, joka mahdollistaa myös simuloititulosten perusteella tehtyjen muutosten vaikutusten nopean todentamisen. **KUVASSA 7** nähdään, mikä vaikutus tietyn tuotantoerän ajoikaan on sillä, kun linjalle lisätään kahden lait-

teen väliin 150 tai 300 kappa-  
leen välipuskuri. Kuvaajat esit-  
tävät tuotantoerän kokonaisajo-  
ajan kertymäfunktioita.

#### **Lopuksi**

Kuten edellä esitellyistä esimer-  
keistä nähdään, dynaaminen si-  
mulointi soveltuu varsin mo-

nipuolisesti käyttövarmuuden,  
kunnossapidon ja kokonaiste-  
hokkuuden käsittelyyn. Tässä  
esiteltyjä ideoita ja menetelmiä  
on sovellettu kaupallisesti Ra-  
mentor Oy:n ELMAS-ohjelmis-  
tossa, jonka uusissa versioissa  
on mahdollisuus myös dynaa-  
miseen mallinnukseen ja simu-

lointiin. Artikkelin on laatinut  
prof. Seppo Virtasen tutkimus-  
ryhmästä luotettavuusmatemaa-  
tikko Veijo Ikonen. ■

#### **» LISÄTIETOJA**

veijo.ikonen@tut.fi ja  
seppo.virtanen@tut.fi