

Joona Ruutiainen

JATKUVATOIMISTEN TUOTANTOPRO- SESSIEN LAADUNVARMISTUS JÄLJI- TETTÄVYYSOHJELMISTON AVULLA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Joona Ruutiainen: Jatkuvatoimisten tuotantoprosessien laadunvarmistus jäljitettävyysohjelmiston avulla
Kandidaattitutkielma
Tampereen yliopisto
Tietotekniikka
Tammikuu 2021

Jäljitettävyyden saavuttaminen tuotantoprosesseille on keskeinen tekijä prosessiteollisuudessa muun muassa laadunvarmistuksen tukena. Jäljitettävyydellä tarkoitetaan tuote-erien kulun seuranta tai jäljittämistä tuotantoprosessin läpi, siihen käytettyjen raakamateriaalien selvittämistä sekä tuotannon olosuhteiden selvittämistä kyseisen tuote-erän prosessoinnin ajalta. Tuotantoprosessit voidaan karkeasti jakaa epäjatkuviin prosesseihin (engl. *batch production*) ja jatkuvatoimisiin prosesseihin (engl. *continuous production*). Epäjatkuvissa prosesseissa tuote-erät ovat helposti eroteltavista toisistaan, ja niiden välillä saattaa olla suuriakin eroja tuotantoprosessin asetusten suhteen sekä lopputuotteen ominaisuuksien suhteen. Jatkuvatoimisissa prosesseissa sen sijaan tuote-erillä ei prosessoinnin aikana ole selkeitä rajoja, sillä prosessin sisäinen materiaalivirta on katkeamatonta ja tuotannon tavoitteena on lopputuotteen tasalaatuisuus.

Tässä työssä esitetään kuvaus ohjelmistomallista, jonka tavoitteena on tarjota sopivanlaiset rajapinnat prosessiteollisuuden käyttöön jatkuvatoimisilla tuotantoprosesseilla tuotettujen tuoteerien jäljittämiseksi sekä niiden laadunvarmistamiseksi saavutetun jäljitettävyyden avulla. Jatkuvatoimisten prosessien jäljittämiseen liittyy tiettyjä ongelmakohtia, joihin tutkimuksessa perehdytään jäljitettävyyteen ja jatkuvatoimisiin prosesseihin kohdistuvien tieteellisten julkaisujen avulla. Kehitetyistä jäljitettävyyden menetelmistä ja järjestelmistä esitetään kooste osana tehdyn kirjallisuuskatsauksen tuloksia ja niihin pohjautuen tehdään tarkennuksia esitettyyn ohjelmistomalliin sekä pohditaan sen jatkokehitystä.

Tutkimuksessa tehdyn kirjallisuuskatsauksen avulla saavutettiin tutkimuksen tekijälle uutta tietoa jatkuvatoimisten tuotantoprosessien jäljittämiseen kehitettyihin menetelmiin liittyen, sekä saatiin tarkasteltua jäljitettävyyttä eri teollisuudenalojen näkökulmista. Tutkimuksessa saatiin kirjallisuuskatsauksen tulosten perusteella tarkennettua esitetyn ohjelmistomallin määrittelyä toiminnallisella ja rakenteellisella tasolla niiltä osin, missä ongelmakohtia ja puutteita oli havaittu. Lisäksi jäljitettävyysohjelmiston jatkokehitystä saatiin suunnattua uusien jatkokysymysten ja esitettyjen parannusehdotusten avulla.

Avainsanat: prosessiteollisuus, jatkuvatoiminen prosessi, jäljitettävyyys, laadunvarmistus, digitaalinen kaksonen, simulointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Prosessin määrittely ohjelmistossa	3
3	Ohjelmiston toimintaperiaate ja alustavat vaatimukset	5
3.1	Digitaalisen kaksosen muodostaminen prosessista	6
3.2	Tuotantoprosessin simulointi halutulle tuote-erälle	7
3.3	Tulosten muodostaminen ja käsittely	7
4	Ohjelmistomallin ongelmakohdat ja puutteet	8
5	Kirjallisuuskatsaus ja tulokset	9
5.1	Tiedonhaku ja lähteiden valitseminen	9
5.2	Kooste tuloksista	9
5.2.1	Kaivosteollisuuden esimerkki jatkuvatoimisesta prosessista	9
5.2.2	Jäljitettävyyttä ja laadunvarmistusta elintarviketeollisuudessa	11
5.2.3	RTD-mallinnusta lääketeollisuuden tuotantoprosesseissa	12
6	Tarkennukset ohjelmistomalliin	14
6.1	Prosessin konfigurointi	14
6.2	Prosessin simulointi	15
6.3	Tuote-erän laadunvarmistus	16
7	Keskustelu ja yhteenveto	17
	Lähteet	18

1 Johdanto

Jäljitettävyydellä on keskeinen rooli prosessiteollisuudessa laadunvarmistuksen, tuotannon tehostamisen ja materiaalihukan minimoimisen tukena. Prosessiteollisuus on yhdistävä termi eri teollisuuden haaroille, joiden tuotantoprosesseissa raaka-aineilla on useita eri käsittelyvaiheita [1]. Näihin lukeutuvat esimerkiksi metsäteollisuus, kemianteollisuus sekä elintarviketeollisuus.

Kaikissa tuotantoprosesseissa on mahdollisuus virheellisten tuote-erien tuottamiseen erilaisten häiriötilanteiden seurauksena prosessin aikana. Häiriöitä ei aina ole mahdollista huomata heti niiden tapahtuessa, vaan usein virhe huomataan vasta jälkikäteen esimerkiksi lopputuotteen laadun tarkistamisen yhteydessä. Tällöin on tärkeää pystyä jäljittämään tuotteen alkuperä ja ajankohta, jolloin se on kulkenut tuotantoprosessin läpi, jotta voidaan paikantaa virheen aiheuttanut häiriö prosessissa. [2]

Prosessiteollisuuden tuotantoprosessit voidaan jaotella karkeasti kahteen osaan: epäjatkuviin prosesseihin, joissa raaka-aine- tai tuote-erä on helposti määriteltävissä (engl. *discrete* tai *batch production*) ja jatkuvatoimisiin prosesseihin, joissa prosessin sisäinen materiaalivirta on katkeamatonta (engl. *continuous process*). Epäjatkuviissa prosesseissa korkean tason jäljitettävyyden on usein melko helposti saavutettavissa, sillä tuote-erien kulua prosessin osien läpi voidaan seurata erilaisten merkintöjen, kuten sarjanumeroiden tai viivakooditunnisteiden avulla. Jatkuvatoimisille prosesseille vastaavanlaiset menetelmät eivät ole mahdollisia, sillä jatkuvan materiaalivirran takia yksittäisen tuote-erän erottaminen virrasta ja sen seuranta prosessin läpi on huomattavasti haastavampaa. [3]

Jatkuvatoimisia prosesseja, joilta vaaditaan korkean tason jäljitettävyyttä, on paljon muun muassa metsä-, elintarvike- ja lääketeollisuuden tuotantoketjuissa. Laadukkaiden tuotteiden valmistus vaatii myös virheettömiä raaka-aine-eriä, ja monissa tapauksissa laadunvarmistuksen pettäessä voi lopputuote olla jopa haitallinen ihmiselle (esimerkiksi elintarvike- ja lääketeollisuudessa) tai muuten kelvoton sen käyttötarkoitukseen. Tällaisten tuotteiden päästessä jakeluun on tärkeää, että voidaan jäljittää mahdollisimman tarkasti kyseisen tuote-erän alkuperä sen pois vetämiseksi markkinoilta ilman ylimääräistä hukkaa. Myös tilanteissa, joissa puutteet huomataan ennen tuotteen päätymistä jakeluun, on korkean tason jäljitettävyydestä hyötyä virheen alkuperän löytämisen ja kyseisen virhe-erän tunnistamisen kannalta.

Tässä työssä esitetään yleiskuvaus ohjelmistomallista, jonka avulla voidaan jäljittää jatkuvatoimisia tuotantoprosesseja ja hyödyntää saavutettua jäljitettävyyttä tuote-erien laadunvarmistuksessa. Kyseisen mallin määrittely pohjautuu Elomatic Oy:n vuonna 2020 kehittämään ohjelmistoprototyyppiin, joka toteutettiin osana SEED-tutkimusprojektia [4]. Tutkimuksen lähtökohtana oli määrittellä malliin liittyvät keskeisimmät ongelmakohdat ja puutteet sekä pohtia näihin mahdollisia ratkaisuja hyödyntäen aiheeseen liittyvää

kirjallisuutta ja aiempia vastaavanlaista jäljitettävyyttä koskevia tutkimuksia. Tutkimuksen tavoitteisiin kuului tehdä suoritettun kirjallisuuskatsauksen pohjalta tarkennuksia ohjelmistomallin määrittelyyn rakenteellisella tasolla ja toiminnallisten vaatimusten suhteen sekä pohtia esiin tulleita aiheita jäljitettävyysohjelmiston jatkokehityksen kannalta. Lisäksi pyrittiin keräämään yleistietoa jatkuvatoimisten prosessien jäljittämistä sekä muissa tutkimuksissa kehitetyistä jäljitettävyyden menetelmistä ja järjestelmistä.

Tutkimus jakautuu ohjelmistomallin esittelyosaan (luvut 2 ja 3) sekä varsinaiseen tutkimusosaan (luvut 4–6). Alkuun luvussa 2 määritellään keskeisimmät tuotantoprosesseihin liittyvät käsitteet ohjelmiston tasolla. Tämän jälkeen luvussa 3 käydään yleisellä tasolla läpi jäljitettävyysohjelmiston toimintaperiaatteet sekä esitetyn ohjelmistomallin perusrakenne. Luvussa 4 esitetään ohjelmistomallin ongelmakohtiin ja puutteisiin liittyen apukysymyksiä tutkimuksessa suoritettavan kirjallisuuskatsauksen tueksi ja luvussa 5 käydään läpi tähän liittyvän tiedonhaun suorittaminen sekä esitetään kooste sen tuloksista. Saatujen tulosten perusteella esitetään kappaleessa 6 tarkentavia parannusehdotuksia ohjelmistomallin määrittelyyn sekä pohditaan uusia tutkimuksessa ilmenneitä kysymyksiä aiheeseen liittyen. Lopuksi luvussa 7 arvioidaan tutkimuksen tuloksia ja luvussa 8 esitetään yhteenveto suoritetusta tutkimuksesta.

2 Prosessin määrittely ohjelmistossa

Ohjelmistomallin toteutuksen kannalta on olennaista määritellä tutkimuksen keskeisimmät tarkasteltaviin tuotantoprosesseihin liittyvät käsitteet riittävän kattavasti ja yksiselitteisesti. Käsitteiden määrittelyssä on käytetty apuna muun muassa ISA:n (*The Instrumentation, Systems and Automation Society of America*) vuonna 1995 määrittämiä standardeja [5]. Koska tutkimus painottuu tarkastelemaan jatkuvatoimisia tuotantoprosesseja ja niiden jäljittämistä, määritellään seuraavat käsitteet prosessien mallintamiseksi ohjelmistossa:

- **Prosessilla** tarkoitetaan yksittäistä tarkasteltavaa tuotantoprosessia tai sen osaa, jossa yhdestä tai useammasta raaka-aineesta jalostetaan usean operaation seurauksena lopputuote. Prosessin sisäisellä materiaalivirralla on yksi tai useampi alkupiste ja yksi loppupiste, joka toimii lopputuotteen ulosvirtauksen tarkastelupisteinä. Prosessi on jatkuvatoiminen, eli lopputuotteen ulosvirtaus on jäljitettävän aikaikkunan sisällä katkeamatonta. Prosessi koostuu operaatioketjusta, jonka ensimmäiset operaatiot ovat materiaalivirran alkupisteitä ja viimeinen operaatio on materiaalivirran loppupiste. Ketju voi haarautua prosessin sisällä ja sen sisällä voi olla osittaisia silmukoita, mutta eri haarojen on lopulta yhdistyttävä ennen lopputuotteen ulosvirtausta.
- **Operaatio** on yksittäinen prosessin osa, jonka sisäistä materiaalivirtaa voidaan mallintaa jollain matemaattisella funktiolla. Operaatiolla on aikaviive, joka kuvastaa yksittäisen materiaalipartikkelin kulkemisaikaa operaation alkupisteestä loppupisteeseen. Operaatio voi aiheuttaa sen läpi kulkevalle materiaalille fyysisiä tai kemikaalisia muutoksia, tai se voi toimia materiaalin kuljettajana kahden muun operaation välillä aiheuttamatta sille mitään muutoksia. Operaatioiksi voidaan lukea esimerkiksi säiliöt ja putket.
- **Kontrolleri** on komponentti, jonka avulla ohjataan prosessin sisäistä materiaalivirtaa. Yksittäisen kontrollerin tila vaikuttaa yhden tai useamman operaation tilaan. Kontrollerien arvot määrittävät materiaalin kulkeman reitin operaatioketjussa, ja ne vaikuttavat muun muassa operaatioiden aikaviiveisiin. Kontrolleiksi luetaan ne prosessin osat, jotka eivät itsessään aiheuta niiden läpi kulkevalle materiaalille muutoksia tai aikaviivettä, mutta niiden arvot kuitenkin vaikuttavat materiaalivirran kulkuun. Venttiili on yleinen kontrollerityyppi.
- **Mitta-arvo** on yksittäiseen operaatioon tai kontrolleriin liittyvä suure, jolle voidaan piirtää kuvaaja ajan funktiona. Mittaustietojen saaminen prosessista vaatii tuotantolaitoksen sisäisen seurantajärjestelmän, jossa operaatioihin ja kontrolleihin on liitetty sensoreita haluttujen suureiden lukemiseksi. Sensoreista saatu

tieto tallennetaan joko suoraan tai johdettuna prosessitietokantaan aikasarjadata-
tana. Mitta-arvojen tuominen ohjelmiston käyttöön vaatii yhteyden prosessitieto-
kantaan.

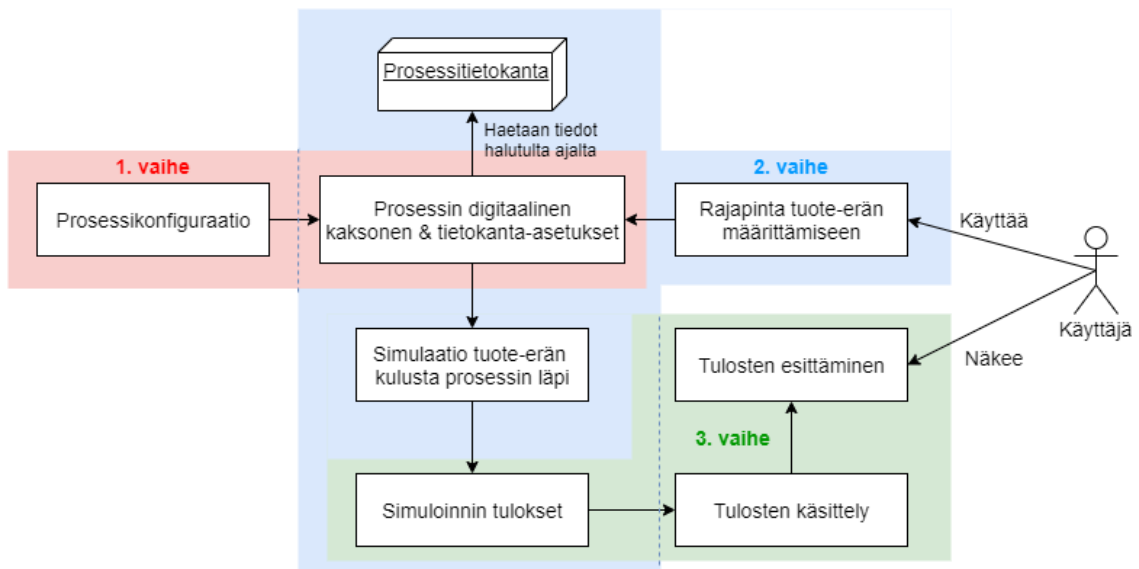
Näiden käsitteiden avulla voidaan mallintaa ohjelmistotasolla suuri osa oikeista prosessi-
teollisuuden jatkuvatoimisista prosesseista valitsemalla sopiva tarkastelutaso. Tapaus-
kohtainen tarve määrittelyn tarkentamiseen tai korjaamiseen on kuitenkin mahdollista.

3 Ohjelmiston toimintaperiaate ja alustavat vaatimukset

Jäljitettävyyden saavuttaminen missä tahansa tuotannonseurausjärjestelmässä vaatii yksiselitteisen ja identifioivan määritelmän jäljityksen kohteena olevalle tuote-erälle [6]. Tässä työssä käsiteltävässä ohjelmistomallissa tuote-erä identifioidaan aikaleiman ja massan perusteella. Koska jatkuvatoimisen prosessin sisällä on haastavaa erotella tuote-eriä toisistaan, tapahtuu eriin jako käytännössä materiaalin poistuessa prosessista ja sen jakautuessa osiin jatkokäsittelyä tai kuljetusta varten.

Tuote-erän aikaleimaksi määritetään ajankohta, jolloin se poistuu prosessista. Masaltaan pienin jäljitettävissä oleva tuote-erä on yksittäinen aikaleimalla varustettu pakkaus tai säiliö lopputuotetta. Tuote-erän massaa voidaan kasvattaa valitsemalla sarja prosessista peräkkäin poistuneita aikaleimalla varustettuja pakkauksia, jolloin koko erän aikaleimaksi voidaan valita pakkausten aikaleimoista joko suurin, pienin tai keskimmäisin arvo riippuen ohjelmistototeutuksesta.

Ohjelmiston tavoitteena on tarjota toiminnallisuus, jolla voidaan jäljittää tuotantoprosessin olosuhteet sillä ajanhetkellä, kun haluttu tuote-erä on kulkenut sen läpi. Lisäksi tavoitteena on jäljittää tuote-erään käytettyjen raaka-aineiden alkuperä ja kulku prosessin sisällä. Ohjelmiston prosessisimulaation perusteella saatuja tuloksia voidaan tavoitteen mukaan hyödyntää jäljitetyn tuote-erän laadunvarmistuksessa.

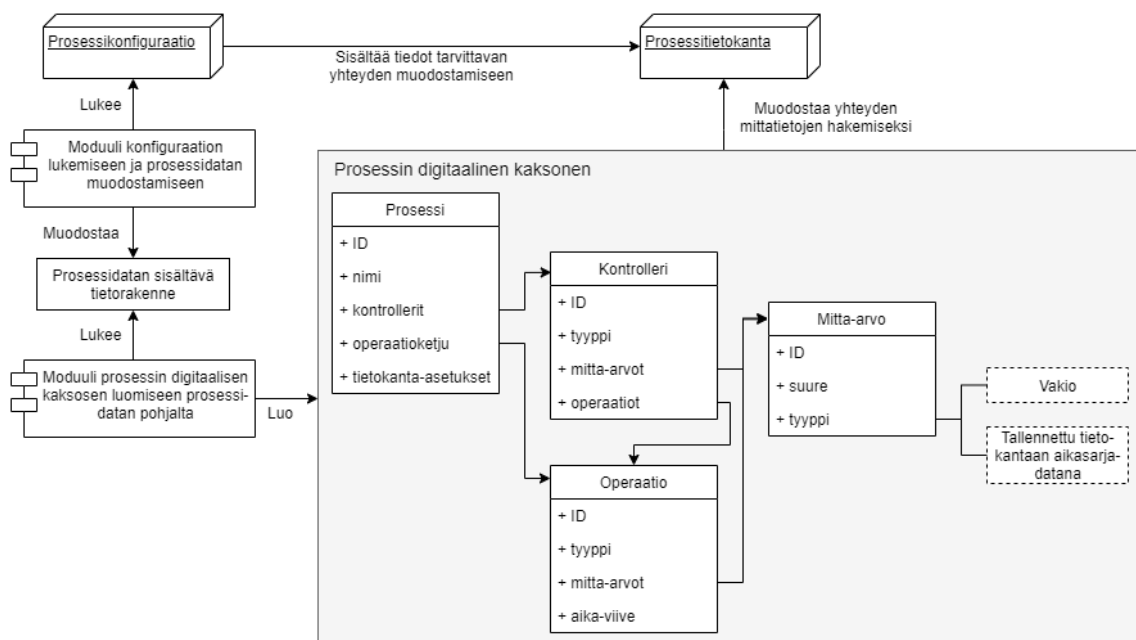


Kuva 1. Kaavio ohjelman toimintaperiaatteesta ja toiminnallisista vaiheista

Ohjelmisto jakautuu toiminnallisesti kolmeen vaiheeseen: digitaalisen kaksosen muodostamiseen prosessista prosessikonfiguraation perusteella, tuotantoprosessin simuloimiseen jäljitettävän tuote-erän aikaleiman ja massan perusteella sekä simulaation tulosten tallentamiseen ja muokkaamiseen käyttökelpoiseen esitysmuotoon. Ohjelman toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 1.

3.1 Digitaalisen kaksosen muodostaminen prosessista

Teollisuuden digitalisaation myötä (engl. *Industry 4.0*, *Industrial Internet*) kyberfyysisten järjestelmien, kuten digitaalisten kaksosten (engl. *Digital Twin*), käyttö on tulevaisuudessa yhä keskeisemmässä roolissa muun muassa tuotannon seurannassa ja tuotteiden elinkaaren hallinnassa. Useimmiten digitaalisella kaksosella tarkoitetaan fyysisestä tuotantolinjasta tai sen osasta muodostettavaa tarkkaa virtuaalista kopiota, joka on kytketty tietoliikenneyhteydellä varsinaiseen käynnissä olevaan prosessiin. [7] Tässä työssä käsiteltävässä ohjelmistomallissa digitaalisella kaksosella tarkoitetaan kuitenkin ohjelmiston sisälle muodostettavaa prosessikonfiguraatioon perustuvaa tietorakennetta ja operaatioita mallintavia funktioita, joiden avulla voidaan suorittaa simulaatio halutun tuote-erän kulmisesta prosessin läpi.



Kuva 2. Kaavio digitaalisen kaksosen muodostamisesta prosessikonfiguraation perusteella, sekä hahmotelma sen sisäisestä rakenteesta esimerkkiluokkien avulla

Digitaalisen kaksosen muodostaminen ohjelmiston avulla perustuu sen konfigurointiin erillisen rajapinnan kautta. Mahdollisia rajapintoja konfiguraation tekemiseen ovat esimerkiksi Microsoft Excel, yleisesti prosessiteollisuudessa käytössä olevat mallinnustyökalut tai itse toteutettu rajapinta käyttöliittymän kanssa. Ohjelmistomallin näkökulmasta olennaista on kuitenkin toteuttaa moduuli, joka lukee prosessikonfiguraation ja muodostaa siitä ohjelman sisäisen tietorakenteen. Tämän lisäksi tarvitaan moduuli varsinaisen digitaalisen kaksosen luomiseksi saadusta prosessidatasta. Kuvassa 2 havainnollistetaan näiden moduulien toimintaa ja vastuualueita, sekä digitaalisen kaksosen mahdollista rakennetta esimerkkiluokkien avulla.

3.2 Tuotantoprosessin simulointi halutulle tuote-erälle

Ohjelmiston keskeisin tehtävä on suorittaa prosessista muodostetun digitaalisen kaksosen avulla simulaatio jäljityksen kohteena olevan tuote-erän kulusta prosessin läpi. Simulaation tavoitteena on määrittää mahdollisimman tarkasti, millä ajanhetkellä tuote-erään käytetyt raaka-aineet ovat kulkeneet kunkin prosessiin kuuluvan osan läpi. Olennaista on siis selvittää materiaalivirran käyttäytyminen jokaisessa operaatiossa sekä jäljittää kyseisen tuote-erän eri raaka-aineiden alkupisteet.

Simulaation lähtöpisteeksi määritetään prosessin loppupiste, johon tarkasteltava materiaalivirta päättyy. Alkuparametreinä simulaatiolle annetaan tuote-erän aikaleima ja massa. Tuote-erän kulku prosessin sisäisen operaatioketjun läpi määritetään käänteisessä järjestyksessä käyden läpi kaikki raaka-aineiden kulkemat polut ketjun sisällä niiden alkupisteisiin asti. Kunkin operaation aikaviiveiden määrittäminen vaatii niiden sen hetkisten virtausnopeuksien selvittämisen prosessitietokannan historiatiedoista.

Simulaation suorittavien ohjelmanosien toteutus vaatii käytettyyn tietorakenteeseen ja digitaalisen kaksosen toteutustapaan nähden sopivien algoritmien suunnittelua ja käyttöä. Ohjelmistomallissa ei oteta kantaa siihen, tulisiko simulaation suorittamiseen vaaditut toiminnallisuudet toteuttaa omana moduulinaan vai osana digitaalisen kaksosen toiminnallisuutta. Jatkuvatoimisen prosessin simulointiin liittyy tiettyjä ongelmakohtia ja kysymyksiä, joita käsitellään tarkemmin luvussa 4.

3.3 Tulosten muodostaminen ja käsittely

Vaatimukset täyttävän simulaation perusteella saadaan tulos, josta ilmenee jäljitettävän tuote-erän ja sen raaka-aineiden elinkaari prosessin sisällä. Tuloksessa tulee näkyä kunkin raaka-aineen lähtöaika prosessin alkupisteistä, prosessin kokonaiskesto sekä ajanhetket, jolloin operaatiot ovat käsitelleet kyseistä tuote-erää.

Kun tuote-erän elinkaari prosessin sisällä ja siihen liittyvät ajanhetket ovat selvillä, voidaan konfiguroidun tietokantayhteyden avulla hakea prosessitietokannan historiatiedoista tarvittavat tiedot tältä ajalta. Haettujen tietojen avulla voidaan yhdistää simulaation tulokseen kunkin operaation mitta-arvot eri ajanhetkinä. Simulaation tulos ja siihen yhdistetty tietokantadata havainnollistavat sillä ajanhetkellä vallinneita tuotannon olosuhteita, kun jäljityksen kohteena oleva tuote-erä on kulkenut prosessin läpi.

Saatujen tulosten käsittelyyn on ohjelmiston näkökulmasta eri vaihtoehtoja. Niistä voidaan koostaa erillinen raportti käyttäjän tarkasteltavaksi tai ladattavaksi, niiden avulla voidaan jatkaa jäljitysketjua pidemmälle tai ne voidaan tallentaa ohjelmiston omaan tietokantaan myöhempää käyttöä varten. Tässä työssä pyritään selvittämään jäljitettävyyden hyödyntämistä tuote-erän laadunvarmistuksessa, joten erillisen raportin koostaminen otetaan tarkasteluun tutkimuksessa.

4 Ohjelmistomallin ongelmakohdat ja puutteet

Lukujen 2 ja 3 perusteella voidaan toteuttaa pohja ohjelmiston digitaalisen kaksosen muodostaviin ja simuloinnin suorittaviin osiin. Varsinaiseen toteutukseen ei ohjelmistomallissa oteta kantaa ohjelmointikielien, tietorakenteiden, kirjastojen ja rajapintojen käytön suhteen. Tarvittavan toiminnallisuuden toteuttamiseen ja mallin yleiskäyttöisyyteen jatkuvatoimisten tuotantoprosessien jäljittämiseksi liittyy kuitenkin joitain ongelmakohtia ja puutteita. Jäljitettävyysohjelmiston kehityksen tukemiseksi on taulukossa 1 johdettu näiden avulla apukysymyksiä, joihin pyritään etsimään vastauksia ja aiheeseen liittyvää tietoa vastaavanlaista jäljitettävyyttä käsittelevän kirjallisuuden avulla. Saavutettujen tutkimustulosten perusteella pyritään tekemään parannuksia ohjelmistomallin toiminnallisuuden ja rakenteen määrittelyyn, sekä etsimään vaihtoehtoja aiemmin esitettyihin ratkaisuperiaatteisiin.

Taulukko 1. Jäljitettävyysohjelmiston kehityksen kannalta keskeiset ongelmakohdat ja puutteet ohjelmistomallissa, sekä niiden pohjalta muodostetut apukysymykset, joihin haetaan vastauksia kirjallisuuskatsauksen avulla

nro	Tutkittava alue	Kuvaus ongelmakohdista ja puutteista	Johdettu apukysymys
1	Prosessin konfigurointi	Jokainen tuotantoprosessi on erilainen. Ohjelmiston näkökulmasta on haastavaa toteuttaa yleispätevä rajapinta prosessin konfiguroinnille, jonka avulla muodostettu digitaalinen kaksonen mallintaa prosessin toimintaa riittävällä tarkkuudella.	Mitä mahdollisimman tarkkojen simulaatiotulosten saavuttaminen vaatii prosessikonfiguraatiolta?
2	Prosessin simulointi halutulle tuote-erälle	Jatkuvatoimisissa prosesseissa niiden sisällä kulkeva materiaalivirta on katkeamatonta, ja siitä on vaikeaa erottaa yksittäisiä tuote-eriä. Lisäksi on olemassa monenlaisia operaatioita, joiden sisäistä materiaalivirran kulkua ei ole mahdollista simuloida 100 % tarkkuudella.	Millaisia ratkaisuja on kehitetty jatkuvatoimisten prosessien jäljitettävyyden ja niiden simuloinnin parantamiseksi?
3	Tuote-erän laadunvarmistus simulaatiotulosten perusteella	Ohjelmistomallin avulla saavutetun jäljitettävyyden tarkkuudesta on asetettava vähittäisvaatimukset, jotta sitä voidaan todellisuudessa hyödyntää tuotannon laadunvarmistuksessa. Eri tuotantoprosesseihin liittyy erilaisia laadunvarmistuksen kriteerejä.	Millaisia vaatimuksia ja rajoituksia on asetettava jäljitettävyysohjelmiston käyttönotolle, ennen kuin sitä voidaan hyödyntää tuotannon laadunvarmistuksessa?

5 Kirjallisuuskatsaus ja tulokset

5.1 Tiedonhaku ja lähteiden valitseminen

Taulukossa 1 esitettyjä ongelmakohtia koskevaa tietoa haettiin ensisijaisesti aiheeseen liittyvistä vertaisarvioituista tieteellisistä julkaisuista. Tiedonhakuja suoritettiin Tampereen yliopiston kirjaston Andor-palvelulla sekä Google Scholar-palvelulla. Keskeisimmät hakusanat olivat ”*traceability*” sekä ”*continuous process*”, joita käytettiin vaihtelevasti eri hakuoperaattoreita ja apusanoja hyödyntäen. Lisäksi tiedonhaussa hyödynnettiin helmenkasvatusmenetelmää. Sopivien lähteiden valitsemisessa otettiin huomioon niiden yhteensopivuus tutkimuksen kanssa erityisesti jatkuvatoimisten prosessien jäljittämisen käsitteilyn kannalta. Lisäksi huomioitiin julkaisuajankohdat. Tutkimukseen valitut lähteet on esitetty taulukossa 2.

Kirjallisuuskatsaus suoritettiin sillä olettamuksella, että taulukon 1 kysymyksiin ei voida löytää täysin yksiselitteisiä vastauksia pelkästään tämän tutkimuksen perusteella. Sen sijaan kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli selvittää, onko vastaavanlaisia ongelmakohtia käsitelty muissakin tutkimuksissa, ja millaisia keinoja niiden ratkaisemiseksi on kehitetty. Lisäksi pyrittiin selvittämään muuta mahdollisesti suuntaa antavaa tietoa ohjelmistomallin parantamiseksi ja määrittelyn tarkentamiseksi.

5.2 Kooste tuloksista

Kirjallisuuskatsaukseen valikoitui tietolähteitä kaivos-, elintarvike- ja lääketeollisuuden tuotantoprosessien tutkimiseen kohdistuneista julkaisuista. Lähdetutkimuksista muodostui kokonaisuus, joka käsittelee kattavasti ja useasta eri näkökulmasta jatkuvatoimisten tuotantoprosessien mallinnusta, simulointia, laadunvarmistusta ja jäljittämistä, sekä yleisemmällä tasolla jäljitettävyyttä eri teollisuuden aloilla.

5.2.1 Kaivosteollisuuden esimerkki jatkuvatoimisesta prosessista

Luleån teknillisen yliopiston tutkijat tutkivat 2010-luvun vaihteessa jäljitettävyyden parantamista jatkuvatoimisille tuotantoprosesseille yhteistyössä ruotsalaisen kaivosyhtiön LKAB:n kanssa. Esimerkkiprosessina käytettiin rautamalmin pelletointiprosessia Malmbergetin kaivoksessa, jossa rautamalmi jalostetaan useassa eri vaiheessa kompressoituksi rakeenomaisiksi pelleteiksi rauta- ja terästeollisuuden käyttöön. Tutkimuksissa keskityttiin määrittämään erilaisia metodeja jäljitettävyyden saavuttamiselle sekä soveltamaan näitä esimerkkiprosessiin. [2, 3, 8]

Kvarnström et al. [2] mukaan prosessille saavutettavan jäljitettävyyden tarkkuus riippuu mallien, joita jäljitettävyydsjärjestelmässä käytetään kuvaamaan materiaalivirran kulua eri prosessinosissa, toteutuksesta sekä niihin käytettävistä metodeista. Jäljitettävyyden metodit jaettiin tutkimuksessa kahteen osaan:

1. *Off-line*-metodeihin, jotka perustuvat matemaattisen mallin muodostamiseen materiaalivirran kulusta prosessin osan sisällä kokeellisesti kerätyn datan perusteella.
2. *On-line*-metodeihin, jotka perustuvat aktiivisen järjestelmän toteuttamiseen tarvittavan prosessidatan keräämiseksi, jonka perusteella materiaalivirran matemaattinen mallinnus tehdään.

Keskeisenä yhdistävänä tekijänä eri metodeille on RTD-mallin (*Residence Time Distribution*) määrittäminen tutkittavalle prosessin osalle, jonka tarkoituksena on matemaattisesti kuvata käsiteltävän materiaalin viipymisaikaa ja kulkemista prosessin osan sisällä. Sopivan metodin valitseminen kullekin prosessin osalle on keskeinen tekijä mahdollisimman tarkan RTD-mallinnuksen saavuttamiseksi. [2] RTD:n tarkempaan määritelmään palataan myöhemmin.

Osana pelletointiprosessin jäljitettävyyden parantamiseen kohdistuvassa tutkimuksessa toteutettiin MATLAB-simulaatiomalli, jonka avulla pyrittiin tutkimaan ja kontrolloimaan häiriötekijöiden vaikutusta prosessiin. Simuloinnin toteutukseen käytettiin ideaalitapauksiin perustuvaa approksimointia materiaalivirran käyttäytymisessä prosessin sisällä. Ideaalitapauksiksi materiaalin kulkemiseen yksittäisen operaation läpi on tutkimuksessa määritetty kaksi ääripäätä:

1. Materiaali säilyy operaation läpi täysin sekoittumattomana ja noudattaa FIFO-periaatetta (engl. *plug flow*).
2. Materiaali sekoittuu välittömästi ja täydellisesti jo valmiiksi operaation sisällä olevan materiaalin kanssa siihen saapuessaan (engl. *perfectly mixed flow*).

Tutkimuksessa todettiin approksimointia hyödyntävän simulaation tuottaneen odotettua paremmat tulokset, kun niitä verrattiin oikeaan prosessidataan. Tarkempia tuloksia voitaisiin saavuttaa hyödyntämällä eri metodeja suurimpiin poikkeamakohtiin prosessisimulaatioissa. [3]

Jatkona aiemmin määriteltyihin metodeihin keskittyneelle tutkimukselle Kvarnström et al. tutkivat vuonna 2012 RFID-tekniikan (*Radio Frequency Identification*) soveltamista osana pelletointiprosessin jäljitettävyyden järjestelmää. RFID:n todettiin soveltuvan hyvin pelletointiprosessin ”rakeisen” materiaalivirran (engl. *granular flow*) käyttäytymisen määrittämiseen. Tutkimuksessa toteutettiin järjestelmä, jossa prosessivirran sekaan laitettiin fyysisiltä ominaisuuksiltaan käsiteltävän materiaalin kanssa samankaltaisia RFID-lähettimeitä, joiden kulkemista prosessin läpi mitattiin vastaanotin antennien avulla. Järjestelmällä suoritettiin useampi koe erilaisilla lähettimillä ja vastaanotin antennien säätöjä vaihdellen, ja saatuja viiveaikoja eri prosessin osissa vertailtiin kokeiden välillä. [8]

5.2.2 Jäljitettävyyttä ja laadunvarmistusta elintarviketeollisuudessa

Kirjallisuuskatsausta tehdessä ilmeni, että elintarviketeollisuudessa on tehty lukuisia tutkimuksia jäljitettävyydestä ja sen merkityksestä alan tuotannossa. Erilaisia raaka-ainesten ja tuote-erien jäljittämiseen tarkoitettuja järjestelmiä ja metodeja on kehitetty monenlaisia. Lisäksi elintarvikkeiden tuotannossa hyödynnetään usein jatkuvatoimisia prosesseja. Tutkimukseen valikoituneissa tietolähteissä käsitellään jatkuvatoimisten tuotantoprosessien jäljittämistä ja mallintamista sekä erilaisia metodeja elintarviketuotannon jäljitettävyyden saavuttamiseen [9–11].

Skoglund ja Dejmek esittivät vuoden 2007 tutkimuksessaan ”sumean jäljitettävyyden” (engl. *fuzzy traceability*) konseptin, jota tarkoitus oli täydentää erään jatkuvatoimisen tuotantoprosessin, jonka sisäinen materiaalivirta oli nestemäistä, jäljitettävyydsjärjestelmää. Menetelmä perustuu todennäköisyyden määrittämiseen sille, kuinka paljon jäljityksen kohteena oleva lopputuote sisältää mitäkin prosessoitua raaka-aine-erää. [9]

Nesteen sekoittumisominaisuuksien takia jatkuvatoimiseen prosessiin syötettävien raaka-aine-erien erottaminen toisistaan jäljitettävyyden näkökulmasta on hankalaa. Perinteisesti erotus voidaan tehdä vain silloin, kun prosessissa esiintyy katkos, kuten esimerkiksi sekoitussäiliön tyhjennys ja puhdistus. Lähdetutkimuksessa esitettyssä menetelmässä prosessin materiaalivirrasta erotettiin virtuaalisia eriä, jotka perustuivat raaka-aineerien syöttöaikojen tarkasteluun (syöttöventtiilien avaamis- ja sulkemishetket) ja sekoittumisvaiheen (engl. *mixing phase*) määrittämiseen kahden raaka-aine-erän välillä. Esimerkkinä tästä käytettiin tapausta, jossa prosessiin syötetään ensin nestettä säiliöstä 1, ja tämän tyhjentyessä avataan syöttö samaa nestettä sisältävästä säiliöstä 2. Lopputuloksena tällaisessa tapauksessa saadaan kaksi virtuaalista tuote-erää, jotka sisältävät joko raaka-aine-erää 1 tai 2, ja yksi sekoittumisvaiheen määrittämä erä, joka sisältää molempia. [9]

Comba et al. tutkivat vuonna 2011 elintarviketuotannon prosessien ja niiden sisäisten materiaali- ja energiavirtojen mallintamista. Tutkimuksen taustalla oli tavoite laadun optimoinnin suhteen perustuen olettamukseen, että prosessoidun materiaalin kemialliset, mikrobiologiset sekä aistein havaittavat ominaisuudet vaihtelevat sen prosessin aikaisen aika-lämpötilaprofiilin mukaan. Aika-lämpötilaprofiilin määrittämiseksi on tutkimuksessa esitetty kehys prosessinosien välisten lämpö- ja massavirtausten sekä materiaalin siirtymisaikojen mallintamiseksi matemaattisesti. Lisäksi siinä käsitellään ikäänymisfunktioita (engl. *ageing functions*), joilla kuvataan tapauskohtaisesti aika-lämpötilaprofiilin vaikutusta prosessoidun tuotteen laatuun ajan funktiona. [10] Vaikka Comba et al. eivät käsitelleetkään tuotantoprosessien jäljittämistä omassa tutkimuksessaan, on siinä silti esitetty tämänkin tutkimuksen näkökulmasta hyödyllistä tietoa liittyen jatkuvatoimisten prosessien mallintamiseen, simuloimiseen ja laadunvarmistukseen liittyen. Mallinuskemyksen hyödyntäminen jäljitettävyysohjelmistomallissa vaatisi kuitenkin tarkempaa selvitystyötä, ja se jätetään tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Viimeinen valituista elintarviketeollisuuden keskittyvistä lähdetutkimuksista käsittelee ja arvioi tuotannonalan jäljitettävyyttä parantamaan kehitettyjä menetelmiä ja järjestelmiä. Qian et al. käyvät läpi vuoden 2020 tutkimuksessaan osittain samoja aiheita ja lähdetutkimuksia, kuin tässäkin työssä tehty kirjallisuuskatsaus. Lisäksi siinä on esitelty tämän tutkimuksen näkökulmasta uusia jäljittämismenetelmiä, kuten ruoka-aineiden isotooppi- ja DNA-analyysiin perustuva menetelmä, sekä tilastodataan perustavan tuoteerien määrittelymalli. Myös uusien teknologien, kuten tekoälyn, big datan ja blockchainin hyödyntämisestä osana tulevaisuuden jäljitettävyyssjärjestelmiä on kommentoitu. [11]

5.2.3 RTD-mallinnusta lääketeollisuuden tuotantoprosesseissa

RTD-mallinnusta on käytetty monissa tutkimuksissa erilaisten tuotantoprosessien materiaalin virtaus- ja sekoittumisominaisuuksien määrittämisen tukena. RTD kuvastaa todennäköisyysjakaumaa kiinteän (yleensä jauhemaisen) tai nestemäisen materiaalin viipymisajalle yhden tai useamman yksikköoperaation sisällä jatkuvan materiaalivirran systeemissä. Bhaskar ja Singh hyödynsivät vuonna 2018 RTD-mallinnusta jatkuvatoimisen lääkkeidenvalmistusprosessin kontrollijärjestelmän kehittämisessä, jossa tavoitteena oli automatisoida materiaalin uudelleenohjausta prosessissa tilanteissa, jossa tietyt laatuksiteerit eivät täyty. RTD:tä käytettiin ennustamaan reaaliaikaisesti lopputuotteen sisältämät lääkepitoisuudet käynnissä olevan prosessin antamaan dataan perustuen. [12] Käänteisesti tähän verrattuna RTD-mallinnusta voidaan myös hyödyntää jäljitettävyyden saavuttamisessa vastaavanlaisissa prosesseissa.

Vuonna 2020 Singh et al. jatkoivat tutkimustaan kehittämällä RTD-mallinnusta hyödyntävän systemaattisen kehyksen materiaalien jäljittämiseen jatkuvatoimisissa tuotantoprosesseissa. Kehystä varten he ovat määritelleet jäljitettävän tuote-erän kahdessa osassa:

1. Yhtäjaksoisesti ja vakio-olosuhteissa (määritettyjen rajojen sisällä) jatkuvatoimisella prosessilla tuotettu ja yhtenäiset laatuominaisuudet omaava erä tuotetta (engl. *batch*)
2. Erillinen osa määritelmän 1 tuote-erää, jossa myös yksittäisiin tuotteisiin käytetyt raaka-aineet ovat yhteneviä, eli jotka on tuotettu samoja raaka-aine-eriä käyttämällä (engl. *lot*).

Esitetyn kehyksen avulla tutkimuksessa kehitettiin myös MATLAB-ohjelmistomalli jatkuvatoimisen tuotantoprosessin läpi kulkevan materiaalin jäljittämisen automatisointiin. Ohjelmiston toiminnallisuus jaettiin alustaviin toimiin ennen tuotannon käynnistämistä, pitäen sisällään prosessin konfiguroinnin ja RTD-mallien määrittämisen, sekä tuotannon-aikaisiin toimiin, pitäen sisällään materiaalin seurannan ja erien tallentamisen lokitietoihin reaaliaikaisesti. [13]

Systemaattisen kehyksen ja siihen pohjautuvan ohjelmistomallin toimintaa demonstroiitiin lähdetutkimuksessa ohjelmistoprototyypin avulla integroimalla se lääkekapselien tuotantoprosessin seurantajärjestelmään. Singh et. al uskovat, että kehyksen avulla voidaan toteuttaa jäljitettävyyjärjestelmä mihin tahansa jatkuvatoimiseen prosessiin. [13]

Myös Engisch ja Muzzio esittivät vuonna 2015 tutkimuksen RTD-mallinnuksen käyttämisestä materiaalien jäljittämässä jatkuvatoimisissa tuotantoprosesseissa. Lisäksi he käsittelivät riskien määrittelyä ja arviointia lääkkeidenvalmistusprosesseissa sekä niiden tunnistamista ja hallintaa niissä osissa, joihin materiaalien jäljittäminen kohdistui. [14]

Taulukko 2. Tutkimukseen valitut lähteet läpikäyntijärjestyksessä

Viitenro.	Otsikko	Tutkittu teollisuudenala	Julkaisu-vuosi
2	Methods for Traceability in Continuous Processes—Experience from an Iron Ore Refinement Process	Kaivos-teollisuus	2008
3	Improving traceability in continuous processes using flow simulations	Kaivos-teollisuus	2012
8	RFID to Improve Traceability in Continuous Granular Flows—An Experimental Case Study	Kaivos-teollisuus	2011
9	Fuzzy traceability: a process simulation derived extension of the traceability concept in continuous food processing	Elintarvike-teollisuus	2007
10	Modelling Techniques for the Control of Thermal Exchanges in Mixed Continuous–discontinuous Flow Food Plants	Elintarvike-teollisuus	2011
11	Traceability in food processing: problems, methods, and performance evaluations—a review	Elintarvike-teollisuus	2020
12	Residence Time Distribution (RTD)-Based Control System for Continuous Pharmaceutical Manufacturing Process	Lääketeollisuus	2018
13	Systematic Framework for Implementation of Material Traceability into Continuous Pharmaceutical Tablet Manufacturing Process	Lääketeollisuus	2020
14	Using Residence Time Distributions (RTDs) to Address the Traceability of Raw Materials in Continuous Pharmaceutical Manufacturing	Lääketeollisuus	2015

6 Tarkennukset ohjelmistomalliin

Lähtöasetelmaksi kirjallisuuskatsaukselle muodostettiin taulukossa 1 esitetyt apukysymykset keskittyen prosessin konfigurointiin ja simulointiin sekä tuote-erien laadunvarmistukseen. Kaikkiin aihealueisiin kohdistuvaa tietoa käsiteltiin tutkimukseen valituissa kirjallisuuslähteissä, ja kirjallisuuskatsauksen pohjalta voidaan esittää joitain tarkennuksia ja jatkokysymyksiä aiemmin esitetyn ohjelmistomallin määrittelyn ja toiminnallisuuden suhteen.

6.1 Prosessin konfigurointi

Yleisenä teemana useissa lähdetutkimuksissa prosessien sisäisen materiaalivirran mallintamista käsiteltäessä esiintyi RTD-menetelmä. RTD-mallin määrittäminen eri prosessinosille on jossain määrin yhteneväinen ohjelmistomallissa esitetyn operaatioiden aikaviive-attribuutin kanssa. Keskeisenä erona on kuitenkin se, että aikaviiveiden lisäksi RTD-mallien avulla saadaan kuvattua todennäköisyysjakaumia materiaalivirran käyttäytymiselle eri operaatioiden sisällä. Lisäksi useimmissa tapauksissa RTD-mallinnuksen hyödyntäminen materiaalin virtaus- ja sekoittumisominaisuuksien määrittämiseksi operaatioiden sisällä perustuu ennen prosessin simulointia tehtyihin matemaattiseen malleihin jokaisesta operaatiosta. RTD-mallinnuksesta voidaan esittää seuraavat jatkokysymykset prosessin konfigurointiin liittyen:

- Voidaanko RTD-mallinnuksen avulla määrittää materiaalivirran käyttäytymisen prosessin sisällä jo konfiguraation tasolla, jolloin varsinainen prosessin simulointi olisi todennäköisesti helpompi toteuttaa ja ajonaikaisena toimenpiteenä nopeampi?
- Voidaanko operaatioiden aikaviive-attribuutti korvata kokonaan operaatiokohtaisten RTD-mallien avulla, ja onko mahdollista rakentaa erillinen yleispätevä RTD-mallikirjasto, josta sopivien parametrien avulla voidaan haakea aina tarvittavat arvot prosessin simuloimista varten?

Kokonaisuudessaan RTD-mallinnuksen matemaattinen puoli vaatii vielä lisää tutkimustyötä, jotta sitä voitaisiin suoraan hyödyntää jäljitettävyysohjelmistossa. Lisähuomiona RTD:n käyttämisestä konfiguraatiotasolla mainittakoon se, että useimmissa tutkimuksissa mallien määrittäminen vaati operaatiokohtaisia kokeellisia virtausmittauksia, mikä lisää vaadittua asiantuntemuksen tasoa prosessikonfiguraation tekemiseen.

Kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi eri teollisuudenalojen tuotantoprosesseihin kohdistuneita tutkimuksia. Esimerkkeinä käytettyjä jatkuvatoimisia prosesseja oli virtausominaisuuksiltaan erilaisia, ja niiden jäljitettävyyden parantamiseksi esiteltiin tapauskoh-

taisesti erilaisia metodeja. Lisäksi lähdetutkimuksissa nousi esille eroavaisuudet prosessien kriittisyydessä vaaditun jäljitettävyyden ja laatu kontrollin suhteen. Näistä syistä voidaan prosessin konfigurointiin liittää seuraavat lisävaatimukset:

- Prosessin sisäisen materiaalivirran tyyppin määrittäminen operaatiokohtaisesti (neste, jauhe, rae, muu), minkä avulla voidaan mahdollistaa simulaatioon käytettävien menetelmien valitsemisen ohjelmistotasolla ja lisätä joustavuutta simuloivien osien toteutuksessa.
- Rajatapauksen määrittäminen prosessikohtaisesti jäljitettävissä olevien tuoteerien massan suhteen, jolloin käyttäjälle voidaan esittää helpommin valittavissa olevat vaihtoehdot jäljitettävän tuote-erän määrityksen yhteydessä.
- Vähittäisvaatimukset suoritettavan simulaation tarkkuudelle (mittarina esimerkiksi todennäköisyys) joko kokonaisprosessin tasolla tai operaatiokohtaisesti, jolloin voidaan prosessikohtaisesti varmentaa simulaatiotulosten käyttö osana laadunvarmistusta.

6.2 Prosessin simulointi

Tutkimuksessa tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että erilaisten tuotantoprosessien simuloimiseen käytettävät menetelmät on valittava tapauskohtaisesti operaatiotasolla. Lisäksi monissa tapauksissa simulointiin tai mallintamiseen kehitetyt järjestelmät perustuivat kyseisten metodien avulla ennalta määritettyihin RTD-malleihin prosessin eri osista sen sijaan, että materiaalivirran kulku yksittäisen operaation läpi laskettaisiin ajonaikaisesti. Tutkimuksen perusteella voidaan esittää seuraavat tarkennukset simulaation suorittavien ohjelmanosien määrittelyyn rakenteellisesti ja toiminnallisesti:

- Prosessien simuloimisen suorittavat ohjelmanosat voidaan toteuttaa omana kirjastonaan tai moduulinaan, jolloin voidaan tyypeittäin erotella erilaisia simulaatiomalleja yksittäisille operaatioille.
- Simulointiin käytetään lähtöarvoina prosessin digitaalisen kaksosmuodostavaa tietorakennetta sekä jäljitettävän tuote-erän aikaa ja massaa.
- Digitaalisen kaksosmuodostavan avulla määritetään ensin tuote-erän kulkema polku prosessin läpi, jonka jälkeen suoritetaan prosessin simulointi tuote-erälle käänteisessä järjestyksessä.
- Materiaalin kulkeminen eri operaatioiden läpi simuloidaan hyödyntäen kyseiselle operaatiotyypille määriteltyä metodologiaa, joka hyödyntää joko kyseiselle operaatiolle konfiguroitua tai erillisestä kirjastosta saatavaa RTD-mallia kyseisestä operaatiosta.

Simulaation tavoitteeksi määriteltiin luvussa 3 tuottaa tulos, josta näkyy kunkin raaka-aineen lähtöaika prosessin alkupisteistä, prosessin kokonaiskesto sekä ajanhetket, jolloin operaatiot ovat käsitelleet kyseistä tuote-erää. Osaksi tätä voidaan liittää myös todennäköisyyskaavio yksittäisten operaatioiden simuloinnin tarkkuudesta, jota voidaan käyttää mittarina simuloinnin todenmukaisuudesta.

Kokonaisuudessaan yleispätevän prosessisimulaatiokirjaston tai -moduulin toteuttaminen vaatii yhä tarkempaa tutkimusta liittyen erityisesti RTD-mallinnukseen sekä yleisesti jatkuvatoimisten prosessien simulointiin ja mallintamiseen. Lisäksi kyseisten osien toteutuksessa tulee ottaa huomioon ohjelmiston käytettävyyteen liittyvät tekijät, kuten kesto tulosten saamiseen yksittäisessä simulaatiossa ja ajonaikaisen laskentatehon tarve. Näiden optimointi vaatii ohjelmistoteknisesti sopivien menetelmien hyödyntämistä, kuten rinnakkaislaskentaa ja sopivaa algoritmien suunnittelua.

6.3 Tuote-erän laadunvarmistus

Mahdollisesti suurimmat erot eri teollisuudenalojen välillä tutkimuksen aihealueen sisällä löytyvät laadunvarmistuksen kriteereihin liittyen. Vaadittuun jäljitettävyyden tarkkuuteen vaikuttavat jäljitettävien tuote-erien koko, vaatimukset tuote-erien raaka-ainekoostumusten ja käytettyjen raaka-aine-erien jäljittämisen suhteen sekä prosessin mittakaava tuotannon ja kustannusten suhteen. Aiemmin määriteltiin jo todennäköisyyden käyttäminen saavutetun jäljitettävyyden mittarina, jonka avulla voidaan varmentaa simulaation tuottamien tulosten käyttökelpoisuus tuote-erän laadunvarmistuksessa. Lisäksi on tehty kirjallisuuskatsauksen perusteella selvää, että tuotantoprosessien laadunvarmistukseen tarvitaan aina tapauskohtaisesti erilaista dataa prosessista ja tuotannon olosuhteista. Voidaan siis esittää ohjelmistomalliin toteutettavaksi erillinen rajapinta laadunvarmistuksen konfiguroinnille prosessikohtaisesti:

- Ohjelmistoon jo konfiguroidulle prosessille tulee käyttäjän voida määrittää erillisen rajapinnan kautta raja-arvot tuote-erien laadunvarmistuksen suhteen. Raja-arvot voidaan asettaa halutuille prosessitietokannasta saataville mitta-arvoille, tai niistä johdetuille tuote-erän ominaisuuksille.
- Ohjelmiston tavoitteena on tarjota käyttäjälle näytettävistä simulaation tuloksista suoraan nähtävää informaatiota tuote-erän laadusta erilaisten kaavioiden ja värikoodien avulla.
- Käyttäjän on mahdollista konfiguroida erilaisia raporttipohjia prosessille, jolloin simulaation avulla saaduista tuloksista näytetään konfiguraatiossa määritetyt asiat. Konfigurointiin voidaan liittää myös lähtötietoja simulaation suorittamiseen.

7 Keskustelu ja yhteenveto

Työssä esitettiin konseptitasolla ohjelmistomalli, jonka avulla voidaan jäljittää sille konfiguroitujen tuotantoprosessien tuottamia tuote-eriä prosessissa taaksepäin sekä hyödyn-tää saavutettua jäljitettävyyttä tuotannon olosuhteiden selvittämisessä ja tuote-erien laadunvarmistuksessa. Tutkimuksessa keskityttiin määrittämään esitettyyn ohjelmistomal-liin liittyvät keskeisimmät ongelmakohdat ja puutteet, sekä hakemaan näihin vastauksia ja yleisesti aiheeseen liittyvää tietoa kirjallisuuskatsauksen avulla. Kirjallisuuskatsauksen tuloksia ja sen avulla saatua uutta tietoa hyödynnettiin ohjelmistomallin määrittelyn tar-kentamiseen sekä sen jatkokehityksen suuntaamiseen, mikä kuului tutkimuksen pääta-voitteisiin. Tulosten muodostamisessa hyödynnettiin osittain omaa tietämystä ja koke-musta jäljitettävyysohjelmiston kehittämisen parissa, mutta kirjallisuuskatsauksen avulla saavutettiin hyvä yleiskuva jatkuvatoimisten prosessien jäljitettävyyteen liittyvistä ongel-mista sekä kehitetyistä ratkaisumenetelmistä ja järjestelmistä. Tutkimuksen avulla voi-daan jatkaa jäljitettävyysohjelmiston kehittämistä uudet näkökulmat huomioiden.

Tutkimuksen osana suoritettu kirjallisuuskatsaus on melko suppea, eikä sen perus-teella voida vielä vastata kaikkiin esitetyn ohjelmistomallin puutteisiin ja ongelmakohtiin sillä tasolla, että mallin avulla saavutettaisiin täysin toimiva ja käyttökelpoinen jäljitettä-vyysjärjestelmä. Tehdyn tutkimuksen perusteella havaittiin kuitenkin, että eri teollisuu-den aloilla on huomattava määrä erilaisia vaatimuksia ja rajoitteita jäljitettävyyden suh-teen, joten yleispätevän järjestelmän kehittäminen prosessiteollisuuden käyttöön lyhyessä ajassa ja tämän tutkimuksen mittakaavassa olisikin epärealistinen tavoite. Lähdetutki-muksissa esitettiin menetelmiin ja järjestelmiin vertaamalla voidaan todeta, että esitel-lyssä ohjelmistomallissa on hyvä pohja tällaisen järjestelmän tuottamiseksi pidempiaikai-sen tutkimus- ja kehitystyön avulla.

Kirjallisuuskatsauksen avulla saatiin tarpeellinen määrä uutta tietoa jatkuvatoimisten prosessien jäljittämisestä ja laadunvarmistuksesta, jotta ohjelmistomalliin saatiin tehtyä tarkennuksia toiminnallisen ja rakenteellisen määrittelyn tasolla. Esitetyt uudet ratkaisut eri osa-alueiden ongelmakohtiin vastaamiseksi eivät ole täysin yksiselitteisiä, mutta ne antavat suuntaa ohjelmiston jatkokehitykselle ja mahdollistavat ohjelmistoprototyypin kehittämisen sille tasolle, että sen toimintaa voidaan lähteä testaamaan monipuolisemmin. Jäljitettävyysohjelmiston kehityksessä seuraavat vaiheet ovat simulaation testaaminen yhden tai useamman esimerkkiprosessin kanssa, sen avulla tuotettujen tulosten varmen-taminen yhdessä prosessiasiantuntijoiden kanssa sekä iterointi simulaatiokehityksen to-teutuksessa tähän perustuen.

Lähteet

- [1] Kielitoimiston sanakirja. 2018. Helsinki: Kotimaisten kielten keskus. URN:NBN:fi:kotus-201434. Verkkojulkaisu HTML. Päivitettävä julkaisu. Päivitetty 6.6.2018. Hakusana: prosessiteollisuus. (viitattu 15.11.2020)
- [2] Kvarnström, B. & Oghazi, P. Methods for Traceability in Continuous processes—Experience from an Iron Ore Refinement Process. *Minerals engineering*, 21(10), 2008, pp.720–730.
- [3] Kvarnström, B. & Bergquist, B. Improving traceability in continuous processes using flow simulations. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 23(5), 2012, pp.396–404.
- [4] Elomatic Oy, *Uutiset – Jäljitettävyyttä ja tuotantoprosessien tehokkuutta*, 2020, <https://www.elomatic.com/fi/elomatic/uutiset/2019/12/20/jäljitettävyyttä-ja-tuotantoprosessien-tehokkuutta/> (Haettu 15.11.2020)
- [5] Batch control part 1: Models and terminology, *ANSI/ISA-88.01-1995, Instrument Society of America*, Durham 1995, pp.17–52.
- [6] Moe, T. Perspectives on Traceability in Food Manufacture. *Trends in food science & technology*, 9(5), 1998, pp.211–214.
- [7] Bécue, A. & Maia, E. A New Concept of Digital Twin Supporting Optimization and Resilience of Factories of the Future. *Applied sciences*, 10(13), 2020, pp.4482–.
- [8] Kvarnström, B., Bergquist, B. & Vännman, K. RFID to Improve Traceability in Continuous Granular Flows—An Experimental Case Study. *Quality Engineering*, 23(4), 2011, pp.343–357.
- [9] Skoglund, T. & Dejmek, P. Fuzzy traceability: a process simulation derived extension of the traceability concept in continuous food processing. *Food and Bioprocess Technology*, 85(4), 2007, pp.354–359.
- [10] Comba, L., Belforte, G., Gay, P. Modelling Techniques for the Control of Thermal Exchanges in Mixed Continuous–discontinuous Flow Food Plants. *Journal of food engineering*, 106(3), 2011, pp.177–187.
- [11] Jianping Qian, Bingye Dai, Baogang Wang, Yan Zha & Qian Song. Traceability in food processing: problems, methods, and performance evaluations—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, pp.1–14.
- [12] Bhaskar, A. & Singh, R. Residence Time Distribution (RTD)-Based Control System for Continuous Pharmaceutical Manufacturing Process. *Journal of pharmaceutical innovation*, 14(4), 2018, pp.316–331.
- [13] Billups, M. & Singh, R. Systematic Framework for Implementation of Material Traceability into Continuous Pharmaceutical Tablet Manufacturing Process. *Journal of pharmaceutical innovation*, 15(1), 2020, pp.51–65.
- [14] Engisch, W. & Muzzio, F. Using Residence Time Distributions (RTDs) to Address the Traceability of Raw Materials in Continuous Pharmaceutical Manufacturing. *Journal of pharmaceutical innovation*, 11(1), 2015, pp.64–81.