

Petri Huhta

# MALLIPREDIKTIIVISEN SÄÄTIMEN SO- VELTAMINEN PROSESSIN SÄÄTÖÖN

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Projektipäällikkö Yrjö Majanne  
Huhtikuu 2022

Huhtikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Petri Huhta: Malliprediktiivisen säätimen soveltaminen prosessin säätöön  
kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikka  
Huhtikuu 2022

---

Kehittyneet säätömenetelmät ja niistä erityisesti malliprediktiivinen säätö (MPC, Model predictive control) on noussut säätöinsinöörien suosioon mikroprosessoritekniikan kehityksen myötä. Prediktiivinen säätö on suosittu erityisesti prosessiteollisuudessa, jonka tarpeista se on saanut alkunsa 1970-luvulla. Tutkielman tarkoitus on selvittää, millaisen prosessin säätöön malliprediktiivinen säädin soveltuu, ottaen huomioon vertailukohtina myös muita yleisiä säätöstrategioita. Soveltuvuutta tarkastellaan säätimen ja säädettävän prosessin ominaisuuksien yhteensopivuuden kannalta.

Kirjallisuuskatsauksessa käytetään lähteinä kyselyitä, katsauksia, vertailututkimuksia sekä opimateriaalia. Näiden avulla pyritään luomaan kuva siitä, millaisten prosessien säädössä malliprediktiivistä säädintä kannattaa harkita. Työssä käydään läpi MPC:n teoriaa siltä osin, kuin se on tarpeellista pohdinnan tueksi ja vertailujen sisällön selventämiseksi. Tämän jälkeen kerätään yhteen teorian pohjalta soveltamista puoltavia ja hankaloittavia tekijöitä. Lopuksi vertailututkimusten avulla pohditaan, aiempaan tekstiin nojaten, tutkimuskysymykseen vastauksia. Tutkielma on viimeisen osionsa sisällön osalta kevyt kirjallisuuskatsaus MPC:n sovelluksen vertailututkimuksiin.

Malliprediktiivinen säädin perustuu nimensä mukaisesti malliin ja sen avulla ennustamiseen. Mallin avulla voidaan optimointialgoritmeilla ratkaista optimaaliset ohjausmuutokset, joilla säädettävät suureet saadaan niiden tavoiteltuihin arvoihin. Optimointialgoritmin käyttö mahdollistaa rajoitteiden ja painotusten määrittämisen säädettäville suureille ja ohjausmuuttujille. Muihin yleisiin kehittyneisiin säätömenetelmiin, kuten LQR:ään (Linear quadratic regulator) verrattuna, prediktiivinen säätö mahdollistaa ennustamisen, monenlaisen dynamiikan huomioon otamisen sekä mainitun kyvyn määrätä rajoitteita. Klassisen säädön menetelmiin verrattuna MPC:n selkein etu aiemmin mainittujen lisäksi on sen suoraviivainen sovellus monimuuttujasäätöön. Myös mitattavien häiriöiden mallinnus ja painotukset ovat selkeitä etuja, mikäli ne ovat hyödynnettävissä.

Suurimmat hankaluudet jotka rajoittavat malliprediktiivisen säädön käyttöä ovat sen monimutkaisuus klassisen säädön menetelmiin verrattuna, sekä epävarmuus sen vaatiman investoinnin kannattavuudesta. Suuri systeemi ja sen vasteen ennustaminen voivat kasvattaa optimoinnissa ratkaistavan kustannusfunktion kokoa huomattavasti. Tämä asettaa vaatimuksia käytettävälle laskentateholle, riippuen säädön nopeusvaatimuksista. Prosessin liiallinen poikkeavuus lineaarisen aikainvariantin systeemin oletuksista voi huomattavasti vähentää tai poistaa tavallisen lineaarisen malliprediktiivisen säätöstrategian tuomia aiemmin mainittuja etuja. Näissä tapauksissa vaihtoehtoiset malliprediktiiviset säädinrakenteet voivat kuitenkin olla toimiva ratkaisu.

Avainsanat: malliprediktiivinen säätö, ennustava säätö, sovellus, soveltuvuus, vertailu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Malliprediktiivinen säätö kuulosti ensikuulemalta aiheena mielenkiintoiselta, mutta vasta myöhemmin selvisi, kuinka monimutkaisesta aiheesta on oikeasti kyse. Osittain tästä syystä tutkielman kirjoittamisesta tuli kohtuullisen kova haaste. Aluksi työ lähti pitkälle väärään suuntaan, jolloin se suunnattiin oikeille raiteille. Täyden uudelleenkirjoituksen ja kuluneiden vuosien kautta se on vihdoin saatu jotakuinkin haluttuun muotoon. Haluankin kiittää työni ohjaajaa Yrjö Majannetta vuosien mittaisesta kärsivällisyydestä.

Tutkielman kirjoitus on kokemuksena ollut erittäin opettavainen. Erityisesti mieleen on jäänyt kuinka paikkaansa pitäviä varoitukset sen luonteesta ovat olleet ja kuinka hyödyllisiä annettujen materiaalien ohjeet olisivat olleet. On myös luonnollisesti kirjoittajan vastuulla kommunikoida riittävästi, sekä selvittää ja ymmärtää, millaisia odotuksia työn sisällölle on.

Tampereella, 24.4.2022

Petri Huhta

# SISÄLLYSLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| 1. JOHDANTO .....   | 1  |
| 2. MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ .....                        | 3  |
| 2.1 Periaate .....  | 3  |
| 2.2 Optimointi.....                                       | 5  |
| 2.3 Viritysparametrit ja niiden merkitys.....             | 7  |
| 2.4 Vaihtoehtoiset MPC-rakenteet .....                    | 8  |
| 2.5 Mallin identifiointi.....                             | 9  |
| 3. MALLIPREDIKTIIVISEN SÄÄTÖSTRATEGIAN SOVELTAMINEN ..... | 10 |
| 3.1 Sovellusta puoltavat tekijät.....                     | 10 |
| 3.2 Sovellusta hankaloittavat tekijät .....               | 11 |
| 4. PREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ MUIDEN MENETELMIEN RINNALLA ..... | 13 |
| 4.1 MPC ja PID-säädin kitkatappihitsauksen säädössä.....  | 13 |
| 4.2 RMPC ja PID-säädin lämmönvaihtimen säädössä .....     | 15 |
| 4.3 MPC ja LQR vastavirtausreaktorin säädössä .....       | 17 |
| 5. YHTEENVETO.....  | 19 |
| LÄHTEET .....   | 20 |

# 1. JOHDANTO

Frost ja Sullivanin (2019) markkinatutkimuksen mukaan vuonna 2018 teollisuusautomaation globaalien markkinoiden vuosittainen liikevaihto on noin 220 miljardia dollaria. Näillä markkinoilla tekninen muutos ja kehitys on nopeaa ja vuosittainen liikevaihdon kasvu on vakaata (Frost & Sullivan 2019). Osa tätä muutosta ja kasvua prosessien ohjauksen osalta on kehittyneiden säätömenetelmien käytön lisääntyminen. (Dotoli, et al. 2017) Näiden menetelmien käyttöä rajoittaa kuitenkin edelleen epävarmuus niiden vaatiman investoinnin kannattavuudessa. (Bauer & Craig 2008) Varsinkin kun vaihtoehtona on vuosikymmeniä rutiininomaisesti teollisuudessa käytetyt klassisen säädön menetelmät. Kuitenkin sovelluksissa, joissa korostuu klassiselle säädölle ominaiset heikkoudet, sovelletaan jo laajasti myös kehittyneitä menetelmiä. (Qin & Badgwell 2003)

Qin ja Badgwell (1997) ovat kuvanneet MPC:n historiaa lyhyesti. Se on akateemisen tutkimuksen ja sitä kautta syntyneen prosesseihin soveltamisen kannalta saanut alkunsa, kun Richalet et al. (1976) esittivät konferenssiartikkelinsa Algorithmic control of industrial processes. Artikkelissa kuvataan säätöalgoritmi, joka hyödyntää jo aiemminkin säädössä käytettyä siirtyvän horisontin menetelmää prosessin ohjaamisessa. Pian tämän jälkeen Richalet et al. (1978) julkaisivat artikkelin Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes, jota pidetään ensimmäisenä julkaisuna nykymuotoisesta malliprediktiivisestä säädöstä ja sen soveltamisesta. (Richalet, et al. 1978) Toisaalta jossain määrin saman aikaisesti Cutler ja Ramaker (1980) kehittivät Dynamic Matrix Control (DMC) MPC-algoritmiaan. Tätä ennen Shell Oil oli kehittänyt omaa MPC-tekniologiaansa, jota yrityksessä sovellettiin prosessin säätöön ensimmäisen kerran jo 1973. Käytettyä algoritmia ei kuitenkaan koskaan tuotu julkisuuteen tai kaupallisesti saatavaksi (Qin & Badgwell, 1997). Moderni akateeminen tutkimus kehittyneiden säätömenetelmien ympärillä on edistynyt optimointialgoritmien kehityksen myötä, joka puolestaan on seurannut mikroprosessoritekniikan kehitystä (Bauer & Craig 2008).

Tutkielman keskeinen tutkittava kysymys on millaisen prosessin säätöön malliprediktiivinen säädin on hyvä valinta. Kysymystä lähdetään tarkastelemaan sekä malliprediktiivisen säätimen että prosessin ominaisuuksien kannalta. Säätimen toiminta riippuu näiden yhteensopivuudesta, joten lopulta johtopäätöksiä tehdään tarkastellen niitä yhdessä.

Aiempiä katsauksia tehtyihin MPC:tä koskeviin säädinten vertailututkimuksiin ei vaikuttanut löytyvän, joten tutkielma täyttäneenä alustavasti myös tätä roolia alan kirjallisuuden osana.

Opinnäytetyössä tarkastellaan malliprediktivistä säätöä sen soveltamisen kannalta. Tästä syystä työn sisältöön on valittu aiheita, jotka kirjallisuuden ja tämän tutkielman kirjoittajan näistä tekemien tulkintojen perusteella ovat kontekstissa oleellisia. Työn tutkimus suoritetaan kirjallisuuskatsauksena ja teoriaosuudessa luvussa 2 esitellään kirjallisuudesta löytyviä tuloksia ja MPC:n ominaisuuksia. Teoriaa käydään läpi siten, jotta se tukee tulososiossa tehtyjä johtopäätöksiä ja auttaa ymmärtämään vertailututkimusten sisältöä. Kolmannessa luvussa tuodaan konkreettisemmalle tasolle malliprediktivisen säädön ominaisuuksia sen soveltamisen näkökulmasta viitatus teorian ja tutkimuksen perusteella. Neljännessä luvussa käydään läpi joitain tutkimuksia, joissa on vertailtu malliprediktivistä säätöä muihin säätömenetelmiin erilaisten prosessien säädössä. Tutkimusten ohella kappaleessa myös pohditaan vastauksia opinnäytetyön tutkimuskysymyksiin.

Lähteenä tutkimuksessa on käytetty Tampereen yliopiston Andor-tietokannasta löytyvää kirjallisuutta, joitain erillisiä hakukoneita kuten Taylor & Francis Onlinea sekä joitain fyysisiä painoksia. Pääasiassa lähteenä on käytetty muita katsauksia, kyselyitä sekä vertailututkimuksia. Teoriaa on lisäksi avattu oppikirjalähteistä, joista osa on sähköisessä muodossa ja löytyy Andor-tietokannasta. Tehokkaammaksi tavaksi suoraan Andorista etsimisen sijaan paljastui lähteiden etsiminen Google-hakukoneen avulla. Näin saatujen hakutulosten julkaisun, vertaisarvioinnin ja saatavuuden tilat kuitenkin varmistettiin aina Andorista. Lähteiden haku perustui hakujen ”Model Predictive Control”, ”Advanced Control”, ”survey” ja ”comparison” erilaisille yhdistelmille.

## 2. MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

Camacho ja Bordons (2007) kuvaavat malliprediktiivisessä säädössä ohjattavan prosessia sen dynamiikkaa kuvaavan mallin avulla. Sen perusteella muotoillaan kustannusfunktio, josta lasketaan optimaaliset ohjausmuutokset, joilla systeemin säädettävät suureet saadaan haluttuihin arvoihin säätimen virityksessä tehtyjä valintoja noudattaen. Optimaaliset ohjaukset lasketaan jokaisella säätökierroksella uudelleen siirtäen säädössä huomioitavaa ajanjaksoa eteenpäin. Ajanjaksosta, jonka sisällä ohjausmuutoksia on ratkaistu, vain ensimmäisen tulevan askeleen ohjaus käytetään, kunnes optimointi suoritetaan uudelleen seuraavaa askeletta varten. Ohjausmuutoksia ratkaistaessa prosessin käytöksen ennustamisessa käytetty prosessin malli voidaan saada identifioimalla se prosessista testeillä tai luomalla matemaattinen kuvaus prosessin toimintaa kuvaavan fyysisen tuntemuksen perusteella. Kuten monien muidenkin säätötapojen kanssa, malli voi olla lineaarinen tai epälineaarinen (Camacho & Bordons 2007). Tässä tutkielmassa tarkastellaan lähinnä vain lineaariseen tilamalliin perustuvaa säädinrakennetta.

### 2.1 Periaate

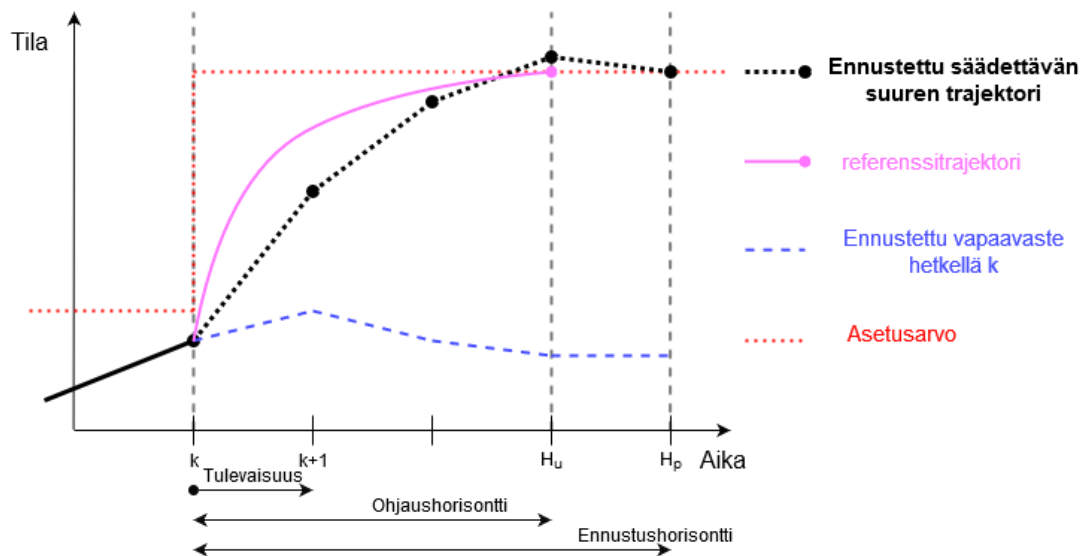
Camachon ja Bordonsin (2007, s. 1–5) mukaan prediktiivinen eli ennustava säätö tarkoittaa tietynlaisia ominaisuuksia omaavia säätöstrategioita eikä yksittäistä tapaa toteuttaa säädin. Näihin ominaisuuksiin kuuluu säädettävien suureiden arvojen ennustaminen jonkinlaisen mallin perusteella jonkin äärellisen ajanjakson, eli horisontin yli. Ohjausmuuttujien ratkaisu voidaan suorittaa optimointialgoritmin avulla, mutta joissain MPC-algoritmeissa se saadaan analyttisesti. Jokaisella säätökierroksella eteenpäin siirtyvän tutkittavan aikaikkunan käyttöä kutsutaan siirtyvän horisontin (receding horizon) menetelmäksi. (Camacho & Bordons 2007, s. 1–5) Lisäksi usein strategian osana käytetään asetusrvojen sijasta referenssitrajektoria ja tilojen takaisinkytkennässä tilatarkkailijaa (Maciejowski 2002, s. 7–8).

Malliprediktiivisessä säätöstrategiassa voi käyttää sekä aikajatkuvaa että diskreettiä mallia systeemistä. Jos mallissa otetaan huomioon rajoitteita tai ratkaisu suoritetaan usean tavoitepisteen yli, ohjausmuutosten ratkaisu rajoittuu iteratiivisiin menetelmiin. (Maciejowski, 2002 s. 28–30) Tällöin ongelma muotoillaan siten, että sen ratkaisuun voidaan käyttää tunnettuja numeerisia optimointialgoritmeja. Iteratiivinen optimointi tapahtuu aina digitaalisesti, jolloin mallin lopulta on hyödyllistä olla diskreetissä muodossa, jotta se kuvaa säätimen toimintaa todellisuudessa. Historiallisesti prosessointinopeus on ollut rajoittava tekijä MPC:n käytölle, mallien koolle ja saavutettaville laskenta-ajoille,



mutta mikroprosessorien kehitys on mahdollistanut nykyään suurten ja nopeadynamiikkaisten prosessienkin säädön prediktiiivisillä säätöalgoritmeilla. (Maciejowski 2002, s. 2)

Maciejowski (2002, s. 7–8) kuvaa referenssitrajektorin olevan valinnainen osa prediktiiivistä säädintä, jolla voidaan muokata säätimen käyttäytymistä antamalla kustannusfunktiole suoraan asetusarvojen sijasta haluttu kehitysrate, jota tilojen halutaan seuraavan. Trajektoriin lasketaan aina jokaiselle säätösuureelle jokaiselle ohjaushorisontissa olevalle ajanhetkelle oma arvonsa, jotka asetetaan lähestymään ajan kuluessa kohti asetusarvoja. Trajektori voidaan asettaa lähestymään tilan asetusarvoa esimerkiksi valitun eksponenttifunktion mukaisesti (Maciejowski 2002, s. 7–8). Kuvassa 1 on esimerkki yhden säädettävän suureen referenssitrajektorista, joka on laskettu hetkellä  $k$  lähestymään leikkauspistettä (coincidence point), joka on kuvan tapauksessa ohjaushorisontin  $H_u$  loppussa.



**Kuva 1** Yhden säädettävän suureen systeemin malliprediktiiivisen säädön periaate.

Maciejowskin (2002, s. 7–8) mukaisesti ennustavassa säädössä eri suureisiin liittyviä tulevaisuudessa olevia aikavälejä, joissa niiden arvoja ratkaistaan tai optimoidaan, kutsutaan horisonteiksi. Ennustushorisontti on ajanjakso, jonka sisällä mallin avulla ennustetaan ratkaistaan säädettävien suureiden arvoja (Maciejowski 2002, s. 7–8). Ohjaushorisontti on ajanjakso, jonka sisällä ohjausmuuttujille tai ohjausmuutoksille ratkaistaan optimaalisia arvoja tuottamaan tavoiteltuja arvoja säädettäville suureille ennustushorisontissa (Maciejowski 2002, s. 41–42). Horisonttien ei tarvitse alkaa seuraavalla aika-askeleella  $k$ , kuten kuvassa 2, vaan sekä alku- että loppuajat voi määrittää halutulla tavalla,

eli horisontit voivat olla mielivaltaisen pitkiä. Joissain MPC-sovelluksissa horisontit ovatkin äärettömän pitkiä.

Prediktiivisen säätimen mallissa on helppo ottaa huomioon systeemiin kohdistuvat mitattavat häiriöt (Camacho & Bordons 2007, s. 2). Maciejowskin (2007, s. 146–7) mukaan mitatut häiriöt voidaan ottaa huomioon säätimessä lisäämällä tilamalliin toinen ohjausmuuttujien kaltainen vektori ja sen häiriömatriisi. Tämä häiriötermi kulkee tilamallin mukana kustannusfunktioon, mutta sitä ei oteta optimoinnissa vapaaksi muuttujaksi, kuten ohjaustermiä. Edes mitatun häiriön malli ei ole koskaan täydellinen, joten täysi häiriön korjaus vaatii takaisinkytkentää ja integroivaa säätöä (Maciejowski 2002, s. 146–7). Mittaamattomien häiriöiden huomioiminen vaatii oletusta sen rakenteesta ja tämän rakenteen mukaisen matemaattisen kuvauksen käyttöä säädössä. Maciejowskin (2002, s. 17–20, 57–61) mukaan tärkeä ominaisuus mittaamattomalla häiriömallilla on sen toiminta integraattorin tavoin. Esimerkki tästä syntyy tekemällä oletus aika-askeleiden välillä vakiona pysyvistä häiriöistä, jonka suuruutta korjataan jokaisella laskentahetkellä. Tämä oletus tehdään myös kaupallisissa sovelluksissa erittäin laajasti käytössä olevassa DMC strategiassa. Tällöin ohjauksessa otetaan huomioon myös korjaustermi, joka on todellisen prosessin ja sen mallin ulostulojen erotuksen suuruinen. Kun tällä termillä korjataan ohjauksen suuruutta, syntyy perusmuotoisen prediktiivisen säätimen takaisinkytkentä, joka mahdollistaa häiriöiden ja mallinnusvirheen korjaamisen. Toinen mahdollinen tapa eliminoida häiriöitä takaisinkytkennässä on tilatarkkailija (Maciejowski 2002, s. 17–20, 57–61).

Systeemin säätö perustuu tietoon sen tilojen arvoista. Usein nämä tilat eivät ole suoraan mitattavissa järjestelmästä, jolloin ne täytyy selvittää laskennallisesti saatavilla olevasta mittaustiedosta. Nise (2011, s. 682) mukaan tilatarkkailija on systeemin osa, joka mitausten ja ohjausten avulla tuottaa laskennallisen arvion systeemin tiloista. Jos säädettävä systeemi on havaittavissa, sille voidaan määritellä tilatarkkailija, jonka tuottamat arviot tilasta lähestyvät ajan myötä tilojen todellisia arvoja. (Nise 2011, s. 682) Edes tarkka tieto systeemin tiloista ei kuitenkaan itsessään mahdollista loppuvirheetöntä säätötuosta, koska systeemin dynamiikkaa kuvaava malli ei ikinä ole täysin tarkka kuvaus systeemistä.

## 2.2 Optimointi

Malliprediktiivinen säätö on yksi tapa soveltaa optimisäätöä. Vinter (2000) määrittelee optimisäädön säätöstrategiaksi, jossa käsitellään suureita funktioissa, joilla on ratkai-

suja, jotka minimoivat halutun kustannuksen. Strategiassa käytetyt funktiot kuvaavat ohjattavan systeemin dynaamisen vasteen. Nämä funktiot voivat olla esimerkiksi differentiaaliyhtälöitä, differenssiyhtälöitä, tai epäyhtälöitä. (Vinter 2000)

Optimointiongelmia luokitellaan monin eri tavoin, näistä tärkeimpinä erotellaan toisistaan konveksit ja epäkonveksit ongelmat. Maciejowskin (2002 s. 84) mukaan konveksin optimointiongelman määrittelee konvekssi kustannusfunktio. Konveksiset optimointiongelmat ovat oleellisia optimoinnin sovelluksissa siksi, että niille löytyy aina globaali kustannuksen minimoiva piste tai taso. (Maciejowski 2002, s. 84)

Perusmuotoisen malliprediktiivisen säätimen käyttämä malli muodostuu lineaarisista differentiaali-, tai differenssiyhtälöistä, jotka muodostavat lineaarisen tilamallin. Maciejowskin (2002, s. 12) mukaan lineaariset tilamallit voidaan saattaa neliölliseen muotoon (quadratic form), jonka avulla voidaan määritellä neliöllinen optimointiongelma, eli QP-ongelma (Quadratic Programming). Näin muotoiltu optimointiongelma on konvekssi. (Maciejowski 2002, s. 12)

Malliprediktiivisessä säädössä usein halutaan huomioida systeemin suureisiin kohdistuvia rajoitteita. Lineaariset yhtäsuuruuksina ja epäyhtälöinä ilmaistut rajoitteet säilyttävät kustannusfunktion konveksiuden. (Maciejowski 2002, s. 12) Monissa optimointialgoritmeissa on mahdollisuus ottaa huomioon vapaaseen muuttujaan kohdistuvat rajoitteet. Prediktiivisen säädön kannalta tämä tarkoittaa ohjausmuutoksia koskevia rajoitteita. Koska myös ohjausmuuttujien ja säädettävien suureiden rajoitteet voidaan aina antaa ohjausmuutosten avulla lausuttuna, voidaan kaikille näille ilmaista rajoitteita optimoinnissa. (Maciejowski 2002, s. 81–82) Optimointialgoritmi etsii aina ratkaisua sallittujen rajoitteiden määrittämän avaruuden sisältä, jolloin rajoitteet ovat ratkaisussa aina etusijalla kustannuksiin verrattuna. (Maciejowski 2002, s. 47)

Maciejowski (2002, s. 89–97) esittää kirjassaan lineaarisen malliprediktiivisen säädön toteutukseen kaksi optimointialgoritmia, tai algoritmityyppiä. Nämä ovat aktiivisen joukon- (active-set) ja sisäpistemenetelmä (interior-point) (Maciejowski 2002, s. 89–97). Mayne (2014) jossain määrin subjektiivisessa katsauksessaan MPC:n nykytilaan puoltaa näiden menetelmien oleellisuutta prediktiivisessä säädössä, lisäten listaan vielä gradienttiprojektio -menetelmät. (Mayne 2014) Toistaiseksi vaikuttaisi avoimelta kysymykseltä, mikä optimointialgoritmi tarjoaa parhaan suorituskyvyn prediktiiviseen säätöön sovellettuna ja on siten mahdollista, että parhaan algoritmin valinta on sovelluskohtainen ongelma. Maciejowski (2002, s. 91), sekä Mayne (2014) ovat yhtä mieltä siitä, että suurin osa suorituskyvyn parannuksista on saavutettavissa hyödyntämällä prediktiivisessä sää-

dössä usein ilmeneviä sen matriisiesitykselle ominaisia rakenteita, eikä tietyn optimointialgoritmin käytöllä. (Maciejowski 2002, s. 91) (Mayne 2014) Esimerkiksi Active-set menetelmä on siksi hyvin soveltuva on-line säätöön, että sen ratkaisu pysyy aina iteroinnissa validina, jolloin mikäli ratkaisua ei ole keretty suorittaa loppuun, voi yleensä riittävän hyvän ratkaisun syöttää ohjaukseksi prosessiin. (Maciejowski, 2002, s. 90)

### 2.3 Viritysparametrit ja niiden merkitys

Maciejowski (2002, s. 7–8) kertoo kirjassaan referenssitrajektorilla voitavan määritellä, miten säätimen halutaan ohjaavan säädettävät suureet niiden tavoitteeksi asetettuihin tiloihin. Se siis mahdollistaa viritysvalinnan, jolla voidaan määrätä, kuinka aggressiivisesti säätimen halutaan korjaavan säädettävien suureiden poikkeama niiden asetusarvoista (Maciejowski 2002, s. 7–8). Luvussa 2.1 mainittiin mahdollisuus asettaa referenssitrajektori esimerkiksi lähestymään eksponentiaalisesti säädettävän suuren asetusarvoa  $n$  aika-askelen päähän. Jokaiselle säädettävälle suurelle voidaan määritellä oma trajektorinsa, omine parametreineen, tai trajektori voidaan määritellä vain osalle suureista.

Malliprediktivisessä säädössä horisonttien valinnassa tulee huomioida, että systeemin stabiilius vaatii systeemin dynamiikasta riippuvan riittävän pitkän ennustushorisontin, sillä horisontin jälkeinen dynamiikka voi johtaa tilaan, joka on mahdotonta stabiloida. (Maciejowski, 2002, pp. 167–168) Garriga ja Soroush (2010) ovat keränneet horisonttien valinnalle kirjallisuudessa annettuja ohjeita yhteen. Lähtökohtaisesti heidän katsauksessaan viritukseen annetaan ohje valita jonkun säännön mukaan alkuarvot ja sen jälkeen hakea parempaa tulosta simuloimalla ja testaamalla. (Garriga & Soroush 2010)

Monet optimointialgoritmit mahdollistavat tavoitteiden painottamisen kustannusfunktion rakenteessa. Optimoivassa säädössä tämä mahdollistaa säätötavoitteiden painotuksen halutulla tavalla. Kappaleen 2.2 mukaan lineaarinen yhtälöryhmä voidaan saattaa konveksin optimointiongelman muotoon saattamalla se neliömuotoon symmetrisen (painotus) matriisin avulla. Tällöin, mikäli ne esiintyvät kustannusfunktiossa, voidaan painotusmatriisin avulla esimerkiksi ennustetut säätövirheet sisältävän vektorin alkioille antaa haluttuja painotuksia kustannusten optimoinnissa.

Garriga ja Soroush (2010) ovat keränneet yhteen monia tapoja ja ohjeita painotusmatriisien valintaan. Säädettäviä suureita voidaan painottaa esimerkiksi laskevasti ajassa eteenpäin, jolloin säätövirhe aiempien ajanhetkien säädössä tuottaa suuremman kustannuksen. Säädettävien suureiden painotus voidaan myös asettaa ennustushorisontin alussa nolleen, jos tiedetään suureen askelvasteen alun suhteen olevan epävarmuutta.

Ohjausmuutosten painotusten valintaan löytyy joitain stabiiliuden takaamiseen liittyviä teoreemoja, mutta usein valintaan suositellaan arvausta, kokeilua ja simulointia, tai yksösellä painottamista. Tällaiset annetut suositukset usein ovat ehdollisia joidenkin systeemin ja mallin ominaisuuksien suhteen (Garriga & Soroush, 2010).

## 2.4 Vaihtoehtoiset MPC-rakenteet

Camacho ja Bordons (2007, s. 31) kertovat DMC eli Dynamic Matrix Control:in olevan yksi teollisuudessa laajasti käytetty malliprediktiivisen säätimen rakenne. Osittain sen takia, että se on tuoteistettu onnistuneesti muiden soveltamiseen vaadittavien ohjelmistojen ja prosessien kanssa. Se perustuu siirtofunktiomuotoiseen askelvastemalliin prosessista, jossa oletetaan vakio prosessiin kohdistuva häiriö (Camacho & Bordons 2007, s. 31). Luvussa 2.1 on mainittu, että tällä häiriöoletuksella saadaan säädin toimimaan integroivasti ja eliminoitua häiriö loppuarvosta.

Camachon ja Bordonsin (2007, s. 217) mukaan todellisuudessa monia systeemeitä ei voida kuvata säädön kannalta riittävällä tarkkuudella lineaarisella aikainvariantilla mallilla ja ottamatta mallinnusvirhettä huomioon. Häiriöt voivat myös olla luonteeltaan sellaisia, että niitä ei voida mallintaa (Camacho & Bordons 2007, s. 217). Vaikka lineaariseen malliin perustuvalla ennustavalla säätimellä voidaan jopa stabiloida epästabiili prosessi (Maciejowski 2002, s. 22–23), käytökseltään muuttuvan prosessin säätö ja sen stabiiliudesta varmistuminen vaatii erilaisen prediktiivisen säätimen rakenteen. (Camacho & Bordons 2007, s. 217) Perusmuotoisella ennustavalla säätimellä viitataan tässä LTI tilamalliin ja sen perusteella ohjausmuutoksia ratkaisevaan konveksioptimointialgoritmiin.

Camachon ja Bordonsin (2007, s. 217) mukaan RMPC (Robust Model Predictive Control) on mallin epävarmuuteen ratkaisuksi kehitetty joukko prediktiivisen säädön menetelmiä. Tällaisessa prediktiivisen säätimen formuloinnissa nimensä mukaisesti käytetään myös optimointia ja siirtyvää horisonttia, mutta systeemin mallista ei tehdä tiukkaa aikainvarianttisuuden oletusta, vaan oletetaan prosessin mallin pysyvän tiettyjen rajojen sisällä (Camacho & Bordons 2007, s. 217).

Maciejowski (2002, s. 220–221, 223) kertoo kirjassaan, että robusti malliprediktiivinen säädin voidaan muidenkin ennustavien säädinten tapaan luoda monella tapaa. Epävarmuuden mallista voi ilmaista esimerkiksi määrittämällä mallin arvojen, eli tila- ja ohjausmatriisin arvojen, sijaitsevan polytoopin sisällä. Robusti säädin suunnitellaan stabiiliksi tämän avaruuden osan sisällä ja näin päästään matemaattiseen varmuuteen säätimen toiminnasta. Tapa formuloida säädin tällaisen mallin avulla, on muodostaa tästä tilatakkaisinkytketystä systeemistä ns. LMI-ongelma, eli lineaarisen matriisiepäyhtälön (Linear

Matrix Inequality) muodossa oleva ongelma, joka on neliömuotoisen tapaan myös muo-  
toitavissa konveksiksi optimointiongelmaksiksi (Maciejowski 2002, s. 220–221, 223).

## 2.5 Mallin identifiointi

Ennustava prosessin säätö perustuu matemaattiseen kuvaukseen sen syötteiden ja nii-  
den tuottamien vasteiden suhteista, eli malliin systeemistä. Malli voidaan tuottaa proses-  
sista olevan fysikaalisen tietämyksen perusteella mallintamalla, tai se voidaan identifi-  
oida prosessista suorittamalla testejä, jotka paljastavat prosessille ominaisen dynami-  
ikan. Systeemien identifiointi on matemaattisten mallien kehittämistä dynaamisista sys-  
teemeistä, näistä kerätyn datan avulla. (Ljung 1987)

Keesman (2011, s. 10–12) mukaan systeemien mallit ovat käytännössä aina yksinker-  
taistettuja kuvauksia systeemin dynamiikasta. Yksinkertaistettuja ensinnäkin siksi, että  
systeemin käyttäytymisen kuvaaminen tarkalleen vaatisi suuren määrän dataa ja hyvän  
etukäteisen ymmärryksen systeemistä, mutta toisaalta malli voi olla myös liian monimut-  
kainen käytettäväksi sen suunnitellussa sovelluksessa. Ohjattava prosessin malli voi-  
daan luoda fysiikan lakien tuntemusten perusteella ja testeillä varmistaa, että se riittä-  
vällä tasolla oikeellinen. Jos malli ei kuvaa prosessia riittävän tarkasti, voidaan mallin  
parametreja muuttaa testidatan avulla kuvaamaan paremmin todellisen prosessin dyna-  
miikkaa (Keesman 2011, s. 10–12).

Keesmanin (2011, s. 6, 11) mukaan identifioidut ns. black-box mallit ovat yleensä diffe-  
renssiyhtälöiden muodossa, sillä saatavilla oleva testidata perustuu digitaalisesti tallen-  
nettuun dataan, jolla on oma näytteenottovälinsä. Black-box malli viittaa siihen, että sen  
toiminta ei välttämättä ole yhdistettävissä mitenkään tunnettuihin fysikaalisiin lakeihin.  
Differenssiyhtälöt ovat myös käytännöllisiä, kun malli halutaan käyttää tietokoneella ta-  
pahtuvassa simuloinnissa (Keesman 2011, s. 6, 11). Kuten aiemmin on mainittu, esimer-  
kiksi DMC perustuu askelvastemalliin prosessista. Se voidaan tuottaa joko testaamalla,  
tai laskemalla askelvasteet systeemin fysikaalisesta mallista.

## 3. MALLIPREDIKTIIVISEN SÄÄTÖSTRATEGIAN SOVELTAMINEN

Malliprediktiivinen säätö on tehokas ja hyödyllinen työkalu, koska sillä on monia ominaisuuksia, joita muut vastaavalla tasolla teoreettisesti tunnetut säätömenetelmät eivät tarjoa. Tästä syystä sen ymmärrys laajentaa säädettävien systeemien kokoelmaa, joille voidaan luoda toimivia ratkaisuja, klassisen ja muun kehittyneen säätöteorian rinnalla.

### 3.1 Sovellusta puoltavat tekijät

Malliprediktiivistä säätöstrategiaa voi käyttää niin SISO (Single-Input, Single-Output), kuin MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) systeemin säätöön. Vastaavan säätimen formulointi mallin perusteella ei ole käytännössä MIMO-systeemille merkittävästi hankalampaa, kuin SISO-systeemille. SISO-systeemien säätöön tosin on jo kattavasti teoriaa klassisen säätöteorian parissa, mutta alla kuvatuissa tapauksissa voidaan saavuttaa ennustavalla säädöllä hyötyjä myös yksinkertaisempien systeemien säädössä. MIMO-systeemien säätöön on hyvin tunnettuja ja luotettavia säätömenetelmiä rajallisemmin. Tämä on tehnyt MPC:stä sen konseptuaalisen yksinkertaisuuden ja suhteellisen suuren sovellusten määrän tuoman kokemuksen myötä yhden merkittävimmistä kehittyneistä säätömenetelmistä.

Luvussa 2.1 on selitetty, miten tilamallin rakenteessa on yksinkertaista ottaa huomioon mallinnettavat häiriöt ja miten ne voidaan ottaa mukaan optimoitavaan ongelmaan. Mallinnettavat häiriöt mahdollistavat häiriöiden vaikutuksen ennakoinnin säädössä, eikä vain niihin reagointia, kuten PID-säädössä.

Systeemin säädettävien suureiden vasteen ennustaminen mallin avulla mahdollistaa pitkienkin viiveiden huomioimisen säädössä. Prediktiivinen säätö onkin saanut alkunsa petrokemianteollisuudesta, jossa vasteet prosessin osien välillä voivat vaihdella minuuteista jopa tunteihin. Prediktiivinen säätö onkin laajasti sovelletuista säätöstrategioista ainoa, joka tarjoaa monimuuttujasäädössä tavan pitkien ja monenlaisten viiveiden huomioimiseen. Yleisesti laajastikin vaihteleva dynamiikka säädettävässä prosessissa on huomioitavissa, kun riittävästi laskentatehoa on saatavilla. Dynamiikka nopeasta hitaaseen voidaan aina ilmaista mallissa lisäämällä siihen sopiva määrä tulevaisuutta ennustavia tiiloja.

Kustannusfunktion muodossa olevan säätöongelman optimointiin perustuva säätöstrategia voi mahdollistaa energian kulutuksen kannalta tehokkaan systeemin käytön. Tämä

on yleensä aina prosessiteollisuuden parissa tavoiteltu ominaisuus. Jos kyetään tuottamaan sama lopputuote vähemmällä hukatulla energialla ja raaka-ainemäärällä, saadaan aikaiseksi kustannussäästöjä. Yksi tapa saada säästöjä on määrittelemällä energian kulutukseen liittyviä kustannuksia, jolloin niitä voidaan painottaa halutulla tavalla. Luvussa 2.2 käydään läpi, miten säätöongelman QP-ongelman muotoon saattamisessa käytetään rakennetta, joka mahdollistaa painotusten määrittämisen. Painotuksilla voi tapauksesta riippuen suoraan vaikuttaa esimerkiksi ohjauksen aggressiivisuuden ja energiatehokkuuden väliseen kompromissiin. Säätimen toteutuksessa voidaan tehokkuus ottaa huomioon myös valitsemalla energian kulutukseen suoraan liittyvä muuttuja säädettäväksi suureeksi, vaikkei se olisi itse prosessin säädön kannalta tarpeellista. Tällöin voi olla mahdollista suoraan luoda kustannus korkealle energian ja raaka-aineen käytölle.

Ennustavassa säädössä optimointialgoritmin käyttäminen tarkoittaa mahdollisuutta huomioida prosessille ominaisia rajoitteita. Usein toiminnalla lähempänä prosessin rajoitteita voidaan saavuttaa parempi tuottavuus ja tehokkuus. Prosessia voidaan optimoinnin rajoitteiden takia pitää turvallisesti lähempänä näitä rajoitteita siksi, että esimerkiksi MIMO-systeemissä rajoitusta potentiaalisesti rikkovan säädettävän suureen regulointi saa käytännössä muita suureita korkeamman prioriteetin. Kuten luvussa 2.2 on kerrottu, voidaan optimoinnin rajoitteilla taata, ettei niitä rikota, jos säätimellä on riittävästi vapausasteita estämään se.

### **3.2 Sovellusta hankaloittavat tekijät**

Minkä tahansa teollisuuden säätöön liittyvän projektin on hyvä huomioida eri säätöstrategioiden ominaisuuksien lisäksi näihin liittyvät taloudelliset ja organisatoriset tekijät. Varsinkin jo käytössä olevan prosessin säätöön MPC soveltamista harkittaessa on hyvä arvioida teoreettisesti, saavutetaanko sillä jotain taloudellista hyötyä jo käytössä olevaan säätöstrategiaan verrattuna. Seuraavassa luvussa käydäänkin läpi tutkimus, jossa klassisen säädön menetelmät antavat vastaavan tuloksen, vaikka prediktiivisen säätimen kehitys oli huomattavasti monimutkaisempaa.

Historiallisesti prosessiteollisuudessa esiintyvien monien ohjausmuuttujien ja säädettävien suureiden prosessien prediktiivinen säätö on voinut olla toteutuksen vaatimusten kannalta mahdotonta. Optimointiongelman ratkaisu on voinut kestää minuiteista tunteihin, joka usein on on-line käyttöön liian kauan. Tai jos ratkaisu riittävässä ajassa on ollut mahdollista, on laskentatehon hankintakustannukset nousseet liikaa suhteessa tehokkuuden parannukseen. Nykyaikana laskentatehoa on mahdollista hankkia käytännössä aina tarvittu määrä isojenkin prosessien säätöön. Kuitenkin MPC:n vaatiman tietotekni-



kan hankintakustannukset ovat edelleen merkittäviä ja ne ovat tärkeitä huomioida säästöstrategian valinnassa. Kustannuksia lisää esimerkiksi prosessin säädön luotettavuusvaatimukset, jolloin laskentatehoa voi normaalitilanteessa olla huomattavasti enemmän reservissä, kuin on jatkuvassa käytössä tarpeellista. Myös käytetyt ihmisresurssit voivat nousta merkittäviksi, kun sovellus vaatii mallin luonnin, säätimen luonnin, simuloinnin ja todellisen prosessin testaamisen.

Jos systeemin mallissa on epävarmuutta, ei perusmuotoisella lineaarisella prediktiivisellä säätimellä välttämättä saavuteta hyvää suorituskykyä. Pelkän mallin epävarmuus voidaan kuitenkin huomioida esimerkiksi luvussa 2.4 esitellyllä robustin malliprediktiivisen säädön menetelmillä. Epälineaarisuudet voivat kasvaa niin suuriksi, ettei niitä saa mallin epävarmuuteen kuvattua, jolloin epälineaarinen MPC voi olla ainut ratkaisu. Epälineaarisen sovelluksen kehitys on kuitenkin hyvin kertaluontoista ja työläämpää lineaarisen mallin käyttöön verrattuna.

Jos systeemin viiverakenteet eivät ole tunnettuja, tai viiveet eivät ole aikainvariantteja, ei MPC:llä välttämättä saavuteta hyvää suorituskykyä. On selvää, että mallin avulla ennustava säädin ei voi tuottaa tyydyttävää suorituskykyä, jos systeemin vaste ei vastaa mallin avulla laskettua ennustetta systeemin käyttäytymisestä. Jos epävarmuus on kohtuullisen vähäistä ja systeemin muutos on dynamiikaltaan hidasta verrattuna itse systeemin dynamiikkaan, voidaan esimerkiksi robustin säädön menetelmillä saavuttaa tyydyttävä suorituskyky.

## 4. PREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ MUIDEN MENETELMIEN RINNALLA

Vaikka malliprediktiivinen säätö on kehittyneeksi säätömenetelmäksi suhteellisen paljon sovellettu säätöstrategia (Bauer & Craig, 2008), ei sen toiminnan taustalla olevan teorian perusteella voida olettaa sen olevan kannattava ratkaisu kaikkeen säätöön. Seuraavaksi käydään läpi tutkimuksia, joissa MPC:tä vertaillaan muihin säätöstrategioihin, erilaisten prosessien säädössä. Näissä tutkimuksissakin ilmenee, että MPC ei ole aina kannattavin ratkaisu, mutta se voi myös tarjota joissain tapauksissa selvästi paremman tuloksen vertailtuun säätimeen nähden. Tässä luvussa käydään läpi teorian ja näiden vertailututkimusten avulla, milloin malliprediktiivinen säätöstrategia voi olla kannattava valinta halutun prosessin säätöön.

### 4.1 MPC ja PID-säädin kitkatappihitsauksen säädössä

Tässä alaluvussa käydään läpi Taysom et al. (2017) tutkimusta, jossa vertaillaan FSW (Friction Stir Welding, kitkatappihitsaus) hitsauspään lämpötilan säätöä sekä PID, että malliprediktiivisellä säädöllä. PID-säätimen soveltuvuus FSW prosessin säätöön on jo todettu aiemmissa tutkimuksissa, joten kyseisen tutkimuksen on tarkoitus selvittää MPC:n mahdollisesti tuomia hyötyjä, erityisesti kun lämpötilan mittaukseen liittyy säätötulokseen selkeästi vaikuttava viive. PID-säätimelle määriteltiin malli yhdessä toimintapisteessä ja sen perusteella sille määritettiin neljät eri viritysparametrit. Ensiksi määritettiin sekä servo-, että reguloitiviritys Ziegler-Nichols menetelmällä. Toiseksi määritettiin 0% ylityksen servoviritys ja ITAE (Integral time-weighted absolute error) kriteerin minimoiva reguloitiviritys (Taysom et al. 2017; O'Dwyer, 2006 mukaan). Neljällä erilaisella tunnettuun menetelmään perustuvalla vertailuvirityksellä pyrittiin saamaan objektiivinen vertailukohta malliprediktiiviselle säädölle.

Kitkatappihitsauksessa pyörivä hitsauspää upotetaan yhteen painettujen hitsattavien kappaleiden väliseen saumaan. Tästä syntyvä kitka sulattaa kappaleet ja tapin pyöriminen sekoittaa materiaalit yhteen, jolloin kappaleet hitsautuvat yhteen. Prosessin ohjaimiseen on aiemmin todettu sopivaksi ensimmäisen kertaluvun viiveellinen malli (First-Order Plus Dead Time, FOPDT), sekä hybridi lämmönlähde -malli (Hybrid Heat Source, HHS). MPC:n odotetaan toimivan prosessin säädössä hyvin, sillä näillä malleilla on riittävä ("acceptable") kyky ennustaa hitsin lämpötilaa liikkeen nopeuden ja tapin pyöritystehon perusteella sen alkuvaiheen jälkeen. Näiden mallien parametrit sovitettiin prosessiin testidatan ja regression avulla.

Prediktiivistä säädintä varten luotiin mallit näiden kahden erilaisen prosessia kuvaava fysikaalisen mallin perusteella. Säädin käytti ohjausten laskennassa vaihtelevaa pitoaika, joka oli tiheämpi aluksi ja nousi tasaisesti horisontin loppuun 25 s kohdalle. Kahdella ensimmäisellä kierroksella pitoaika oli 0,5 s, jonka jälkeen se nousi seuraavilla väleillä tasaisesti 8 s mittaiseksi. Siirtyvän horisontin menetelmän mukaisesti kuitenkin vain ensimmäisellä aika-askeleella ratkaistut ohjausmuuttujien arvot syötetään prosessiin.

Tutkijat olivat ennen tutkimuksen suorittamista testanneet monia erilaisia kustannusfunktion muotoja. Näistä ilmeisesti jonkin subjektiivisen kriteerin tai oletuksen perusteella valittiin sopivimmaksi kustannus, joka muodostuu ajalla painotettujen ennustettujen säätövirheiden neliösummista. Näin muodostettuna se kirjoittajien mukaan vaikutti antavan hyvän tasapainon säädön stabiiliuden ja aggressiivisuuden välillä. Säätimen ainoaksi säädettäväksi suureeksi asetettiin hitsauspään syöttöteho ja tälle asetettiin rajoitteet sekä sallitun tehon, että suurimman sallitun ohjausmuutoksen itseisarvon suhteen.

Testissä suoritettiin sama liikerata, jossa ensin upotetaan hitsaustappi materiaaliin, liikutaan eteenpäin kiihdyttäen tavoitenopeuteen ja sen jälkeen jatketaan hitsausta askeleittain vaihtelevalla paloittain vakioilla nopeudella eteenpäin. Tämän liikkeen aikana säädin pyrkii pitämään lämpötilan vaihtelevassa paloittain vakiossa asetusarvossa tehoa säätämällä. Hitsauspään liikenopeuden muutoksia pidettiin prediktiiviselle säätimelle mallinnettuina häiriöinä. Mallintamaton häiriö oli hitsattavassa materiaalissa esiintyvä vaihtelu, kuten siinä entuudestaan esiintyvät hitsaussaumut, joiden yli hitsattiin.

Säätimiä vertailtiin monen suorituskyvyn mittarin perusteella. Huomioon otettiin asettumisaika, ylitys tai poikkeama, säätövirheen neliöllinen keskiarvo ja värähtelyiden määrä. Tulosten perusteella prosessin säätöön suositellaan PID-säädintä, kun on pääasiassa tarve reguloida lämpötilaa, prosessi pysyy lähellä säätimen stationaaritilaa ja kun häiriöt ovat tuntemattomia tai mallintamattomia. Prediktiivistä säädintä suositellaan käytettäväksi FSW prosessin säädössä, kun prosessin häiriöitä voidaan ennakoida niitä mittaamalla ja ottamalla ne mallissa huomioon, tai kun mittausten viiveet ovat suuruudeltaan epätriviaaleja. Näistä vaihtoehdoista PID-säädintä suositellaan yleisemmin FSW säätöön, sillä se tarjoaa tutkitussa prosessissa ja olosuhteissa yleensä yhtä hyvän säätötuloksen MPC nähden, on yleensä helpompi toteuttaa ja yksinkertaisempi virittää (Taysom, et al. 2017).

Tutkimuksen lähtökohta oli selvittää, onko malliprediktiivinen säätöstrategia kannattava valinta kitkatappihitsauksessa, jossa esiintyy MPC:n hyödynnettävissä olevia ominaisuuksia. Lukujen 2.1 ja 3.1 mukaan viiveen ja mitattavien häiriöiden huomioniti prediktiivisessä säädössä on suhteellisen suoraviivaista. Viiveen huomiointista on mahdollista

ja kannattavaa, mikäli sen suuruus ei vaihtelee. Liikenopeuden vaihtelun huomiointi mitattavana häiriönä on hyödyllistä, jos sopivan häiriömallin valinta on mahdollinen. Näiden prediktivisen säädön vahvuuksien huomiointi ei kuitenkaan testitapauksessa tuottanut selvää etua. Tämän lisäksi kitkatappihitsauksen yhteydessä voisi esimerkiksi mitata myös edellä olevan hitsattavan alueen lämpötilan ja paksuuden, jolloin säätöstrategian vahvuudet voisivat tulla selkeämmin näkyville. Tämä voisi olla esimerkiksi pidemmälle automatisoidussa hitsausjärjestelmässä tarpeellista. Yleisesti kuitenkin monissa hitsauksen sovelluksissa, esimerkiksi materiaalin tai rakenteen erikoisvaatimusten takia, hitsin lämpötilan tarkka hallinta voi olla tarpeellista ja tällöin prediktivinen säädin voisi tarjota paremman tuloksen, esimerkiksi PID-säätimeen verrattuna.

## 4.2 RMPC ja PID-säädin lämmönvaihtimen säädössä

Tässä alaluvussa käydään läpi Oravec et al. (2018) tutkimusta, jonka aiheena oli lämmönvaihtimen säätö osana laajempaa teollisuudessa käytössä olevaa lämmönvaihdinverkkoa. Säätöä varten vertailtiin robustia integroivaa malliprediktivistä säädintä (RiMPC, Robust integrating Model Predictive Control) ja PID-säädintä. Malliprediktivisen säätimen toimintaa halutaan tutkia mahdollisten energiasäästöjen, sekä paremman säätötuloksen toivossa.

Säädettävän lämmönvaihdinsysteemin muodostaa kaksi sarjaan kytkettyä putkinippulämmönvaihdinta. Vaihtimen putkissa virtaa raakaöljyä ja kuoren puolella virtaa tislauskolonnin takaisinvirtaava väliuote, eli refluksi, joka syötetään takaisin kolonniin. Takaisinvirtaus on vain prosessin lämmönsäätelyä varten. Systemin säädettävä suure on putkiston raakaöljyn ulosvirtauksen lämpötila. Ohjaussuurena toimii kuoresta virtaavan refluksin massavirran suuruus, joka voi vaihdella määrättyllä välillä häiritsemättä tislausprosessia. Tarkoitus on siis ottaa lämpöä tislauskolonnista virtaavan raakaöljyn lämmitystä varten.

Tutkitulla lämmönvaihdinsysteemillä on monia ominaisuuksia, jotka tekevät sen toiminnasta hankalasti säädettävän. Lämpöä tuovat ja vievät virtausputkistot sakkaantuvat ajan myötä, joka aiheuttaa hitaan prosessin käyttäytymisen muutoksen ajan myötä. Lisäksi prosessin vaste on epälineaarinen ja epäsymmetrinen ja se on prosessiin sekä mittauksiin kohdistuvilla häiriöillä altis.

Simuloinnissa käytettävät mallit saatiin sovittamalla jo tunnettuun vastaavan prosessin fysikaaliseen malliin siirtimistä mitattua testidataa. Tutkimuksessa testejä suoritettiin simuloimalla neljällä erilaisella lämmönsiirtimellä ja jokaiselle näistä neljässä erilaisessa

liikaantumisen tilassa. Siirtimien kolmen vuoden testidatasta valittiin neljä pistettä, aloitettaessa puhtaalla lämmönsiirtimeillä ja tästä eteenpäin aina vuoden välein, joissa mallit määritettiin. Jokaisen prosessin säätimen arvioinnissa suoritettiin sekä servo-, että reguloititehtävien suorituskyvyn arviointia. Arviota tehtiin integroidun säätövirheen, asetusarvon ylityksen, kulutetun energian ja taloudellisuuden suhteen.

Systeemin mallit säätimille määriteltiin myös kolmen vuoden aikana prosessista kerätyn datan avulla. Systeemin kuvaamiseen kokonaisuudessaan, neljän syötteen ja kahden ulostulon osalta, tarvittiin kahdeksan siirtofunktiota. PID-säädintä varten luotiin testidataan sovitettu siirtofunktio systeemistä, jokaiselle siirtimelle omansa, neljässä eri liikaantumisen vaiheessa. RMPC:tä varten siirtofunktioista muodostettiin tilamallit mainituissa neljässä pisteessä, joissa säätimen halutaan olevan stabiili. RMPC mahdollistaa tämän 2.4 kuvatulla tavalla. Säätöön lisättiin integrointi laajentamalla mallin tilaa, jotta saadaan poistettua mahdollinen mallinnusvirheen tuottama virhe tasapainotilassa.

32 simulaation tuloksena todettiin, että RMPC suoriutui valtaosassa testeistä PID säädintä paremmin. Asetusarvon ylityksen suhteen malliprediktiivinen säätö suoriutui jokaisessa servotestissä hyvin, yleensä PID-säätimeen verrattuna pienellä ylityksellä, ja melkein kaikissa reguloititesteissä malliprediktiivisen säätimen ylitys oli pienempi. Säätövirheen integraalin perusteella MPC suoriutui suurimmassa osassa testeistä paremmin, PID-säätimen virhe oli vähän pienempi vain osassa puhtaita, tai vähän sakkaantuneita siirtimiä. Tärkein ero suorituskyvyssä ilmeni energian säästössä ja taloudellisuudessa. **RMPC puolitti jokaisessa testissä kulutetun energian PID-säätimeen nähden**, tuottaen huomattavat taloudelliset säästöt prosessin käytössä. (Oravec, et al. 2018)

Lämmönsiirtimeen säädössä käytetty RiMPC tuotti simulaatioissa erittäin hyvän tuloksen, verrattuna perinteisiin PID-säätimiin. Erityisen mielenkiintoisen tuloksesta tekee se, että PID-säätimiä luotiin 16 kappaletta, neljälle lämmönvaihtimelle neljässä eri sakkaantumisen tilassa, eikä vain yhteen toimintapisteeseen. Tästä syystä jatkovertailutapaus esimerkiksi adaptiiviseen PID-säätimeen olisi luultavasti merkityksetön. Mielenkiintoinen vertailutapaus voisikin olla esimerkiksi LQR (Linear Quadratic Regulator) vastaan, jolloin esille nousisi jatkuvan optimoinnin ja referenssitrajektorin tuottamat erot verrattuna optimaaliseen tilatakaisinkytkentään. Tärkeä huomio on myös, että tämän tyyppinen säädin, joka on luvussa 2.4 esitelty lyhyesti, on teoreettisesti monimutkaisempi, kuin muoto mihin tässä tutkielmassa viitataan perusmuotoisena MPC:nä. Robustin säätimen selkeä etu on kuitenkin matemaattinen varmuus säätimen toiminnasta. Perusmuotoinen säädin on yleensä yhteen toimintapisteeseen linearisoidun mallin perusteella muodostettu. Tällöin on turvallisuuden kannalta oleellista jollain tapaa ottaa huomioon säätimen toiminta, kun prosessin tila poikkeaa toimintapisteestä.

### 4.3 MPC ja LQR vastavirtausreaktorin säädössä

Tässä aluvuussa käydään läpi Edouard, Dufour ja Hammouri (2005) tutkimus, jossa vertailtiin MPC ja LQR (Linear Quadratic Regulator) käyttöä simuloidun RF-Reaktorin (RFR, Reverse Flow Reactor, vastavirtausreaktori) säädössä. Reaktorissa poltetaan normaalisti jätteeksi päätyviä orgaanisia yhdisteitä kulumattoman katalyytin avulla. Prosessin malli on pseudo-homogeenisten osittaisdifferentiaaliyhtälöiden muodossa, joista muodostetaan tasapainotilassa sopiva lineaarinen malli säätöä varten. Systeemin säädettävät suureet, eli tulokonsentraatio ja kennon sisäinen lämpötilaprofiili, eivät ole suoraan mitattavissa, joten molemmissa säätötavoissa käytetään tilaestimaattoria. Säätötaivoite on pitää reaktorin hot-spot, eli kuumin piste tietyllä lämpötilavälillä. Prosessilla on säädössä lineaarisen mallin käytön toimivuuden kannalta mielenkiintoinen ominaisuus, jossa alkuperäinen epälineaarinen malli on epälineaarinen ohjausmuuttujien suhteen, mutta lineaarinen systeemin tilojen suhteen. On myös aiemmin tutkittu, että kyseisessä prosessissa tasapainotilan läheisyydessä linearisoinnin aiheuttama mallinnusvirhe ei ole säädön kannalta merkittävä. Lopulta tutkimus näyttää ajautuneen pitkälti erilaisten MPC viritysten testaukseen simuloimalla. (Edouard, et al. 2005)

Budhi (2007) on kuvannut vastakkaisvirtausreaktorin toimivan siten, että sen siinä vaihdellaan energiaa tuottavan, eli eksotermisen vaiheen, ja energiaa sitovan, eli endotermisen, vaiheen välillä. Vaiheissa samaan katalyyttirakenteeseen virtaa vastakkaisista suunnista reagoivaa ainetta. Ensin eksotermisessä vaiheessa katalyyttirakennetta lämmitetään, jolloin katalyytissa virtaava aine saa aikaan eksotermisen reaktion, jolloin se lämpenee edelleen. Endotermisessä toisessa vaiheessa vastakkaisesta suunnasta virtaa heikommin reagoivaa seosta, joka sitoo lämpöä katalyyttirakenteesta, hyödyntäen tämän hukkalämmön. Tutkittavassa prosessissa molemmissa vaiheissa virtaa sama orgaanisten yhdisteiden kaasumainen seos eri konsentraatioilla (Edouard, et al. 2005), mutta yleisesti vastakkaiset virtaukset voivat olla sisällöltään myös epäsymmetrisiä. (Budhi 2007)

LQR suunnitellaan käyttämään kahta kustannusfunktiota siten, että niistä aina vain toinen on tietyllä ajanhetkellä käytössä. Molemmat prosessin vaiheet saavat siis oman säätimen ja ne eivät ole koskaan samaan aikaan käytössä. Endotermistä vaihetta säädetään siten, että siinä käytetään lämmitystä hidastamaan katalyyttirakenteen jäähtymistä. Eksotermistä vaihetta säädetään syöttämällä reagoivan konsentraatiota laimentavaa ilmaa reaktorin tuloon. LQ-säädöllä säätötulos on hyvä; se saa pidettyä prosessin jatkuvasti tavoitellulla lämpötilavälillä, käyttämättä turhaan lämmitystehoa silloin kun se ei ole tarpeellista, säästäten energiaa.

MPC:tä varten kokeillaan useita säätimen vityksessä käytettäviä muuttujia. Tässä tapauksessa horisonttien pituuksia ja alkuketkiä, jotta saavutetaan tavoiteltu säätötulos. Ongelmaksi nousee ristiriita säätötavoitteiden välillä, joka johtuu horisonttien valintavasta. Ohjatun lämpötilan ei-minimivaiheisen käytöksen takia ennustushorisontin alun ei haluta dominoivan säätöä, mikä voi tapahtua, koska uusi seuraavan aika-askeleen ohjaus lasketaan joka säätökierröksellä aina uudelleen. Toisaalta ohjauksen alkuun häiriötä aiheuttava kaasuseoksen adiabaattinen lämpötilan nousu olisi tarpeellista ottaa huomioon heti ennustushorisontin alussa. Tästä syystä säätimelle ei löydetty LQR verrattuna tyydyttävää vitystä. Aikaisella ennustushorisontin valinnalla saatiin pidettyä prosessi sen rajoitteiden sisäpuolella, mutta tällöin säädin käytti samaan aikaan lämmitystä ja laimean konsentraation seoksen virtausta, joka hukkaa energiaa. Myöhemmällä ennustushorisontin valinnalla, jolla ristiriitaisia ohjauksia ei käytetty samaan aikaan, säädin ei saanut pidettyä prosessia sen pehmeiden säädettävien suureiden rajoitteiden sisällä. (Edouard, et al. 2005)

Vastavirtausreaktorissa vaikuttaa olevan epäsopimattomia ominaisuuksia malliprediktii-visen säädön kannalta. Ristiriita horisontin valinnassa on mielenkiintoinen ongelma, joka ei itsestään selvänä tule teoriasta esille. Tästä johtuen simulaatio esittäytyy tärkeänä osana MPC:n soveltamisen prosessia. Tästä nousee kuitenkin useampia kysymyksiä. Tutkimuksessa ohjaushorisontin valinta asetettiin yhden askeleen mittaiseksi, laskenta-ajan lyhentämiseksi (Edouard, et al. 2005). Olisikohan ristiriitaisen horisontin valinnan ongelma voitu korjata pidentämällä horisonttia ja painottamalla ohjaustavoitteita ohjaushorisontissa eri lailla, kuten luvussa 4.1 on kerrottu mahdolliseksi. Tässä tapauksessa siis painottamalla epäoleelliseksi ei-minimivaiheinen alkuvaste ja tärkeäksi kaasuseoksen adiabaattinen lämpötilan nousu. Tutkimus on julkaistu vuonna 2005, jolloin on mahdollista, että kyseinen laskentatehon puute ei tuottaisi enää ongelmaa pidempien horisonttien kanssa.

Yksinkertaista tapaa ottaa optimoinnissa huomioon se, että ohjausten ei ole kannattavaa olla samaan aikaan päällä, ei vaikuta olevan. Ohjelmallisesti tämän toteuttaminen olisi varmastikin mahdollista, kuten käytännössä on tehty LQR:n kanssa. Luomalla siis kaksi eri säädintä, molemmille virtauksen vaiheille omansa. Avoimeksi kysymykseksi jääkin, miten MPC pärjää yksittäisen vaiheen säädössä ilman molempien ohjausten käyttöä.

## 5. YHTEENVETO

Teollisuuden näkökulmasta jokaisen päätöksen taustalla on sen taloudellinen kannattavuus. Säättöteorian avulla voidaan korvata ihminen prosessia ohjaavana päätöksen tekijänä, usein säästään pitkällä aikavälillä rahaa ja tuoden tarkkuutta. Perinteisten säättömenetelmien rinnalla joidenkin prosessien ohjauksessa edistyneet säättömenetelmät tarjoavat monella tapaa paremman tuloksen. Monimutkaisten prosessien ohjaaminen klassisen säädön menetelmin ei välttämättä ole mahdollista, jolloin edistyneemmät menetelmät ovat edellytys järjestelmän ohjaamiselle.

Malliprediktiivinen säätö on eniten käytetty edistynyt säättöstrategia monesta syystä. Se mahdollistaa monivasteisen prosessin optimaalisen ennustavan ohjaamisen monen syötteen avulla. Se mahdollistaa myös rajoitteiden, painotusten ja horisonttien valinnan. Nämä ominaisuudet voivat tarkoittaa parempaa raaka-aine ja energiatehokkuutta ja turvallisempaa toimintaa prosessille. Näiden hyötyjen saavuttaminen on kuitenkin yleensä pitkällisen mallinnuksen, simuloinnin ja testauksen takana, erityisesti toimivan virityksen hakemisen suhteen. Toisaalta ominaisuudet, jotka tekevät virityksestä hankalaa ja heuristista, mahdollistavat monenlaisten prosessien säädön. Monenlainen dynamiikka ja viiveet, mallinnetut häiriöt ja suuret MIMO-systeemit, jonka kaikki säätötavoitteet eivät ole yhtä tärkeitä, ovat malliprediktiivisellä säädöllä suoraviivaista ottaa huomioon.

Malliprediktiivinen säätö ei silti ole aina selvä valinta prosessin säätöön. Muiden kehittyneiden säättömenetelmien tapaan sen käyttöön voi liittyä suuria hankinta- ja elinkaari-kustannuksia. Nämä kustannukset eivät aina ole perusteltavissa ohjaustuloksen tai taloudellisuuden kannalta yksinkertaisempiin menetelmiin verrattuna. Onkin tärkeää tuntea prosessin ja erilaisten malliprediktiivisten säädinten ominaisuudet hyvin, jotta voidaan saada riittävä varmuus siitä, soveltuuko MPC muita menetelmiä paremmin prosessin säätöön. Simulointi vaikuttaa usein olevan riittävä tapa havaita näitä ongelmia, mutta senkin toteuttamisella on omat kustannuksensa mallinnuksessa ja ohjelmoinnissa.

MPC sovelluksen kannattavuuden vertailututkimusten kirjallisuuskatsaukselle olisi varmasti kattavampanakin työnä tarvetta. Malliprediktiivisestä säädöstä löytyy katsauksia soveltamisen erilaisista näkökulmista, kuten kyselyitä teollisuudesta, toimivuuden ja kannattavuuden arvioinnista sekä säätöparametrien valinnasta. Testien ja vertailujen tulosten kerääminen yhteen tuo ilmi yllättäviä kompromisseja, joiden tekemisen tarvetta teoreettiset näkökulmat eivät helposti tuo esille.



# LÄHTEET

- Bauer, M. & Craig, I. K. (2008). Economic assessment of advanced process control – A survey and framework. *Journal of Process Control*, Issue 18, pp. 2-18.
- Budhi, Y. W. (2007). *European Roadmap For Process Intensification; Technology Report; Reverse Flow Reactor Operation*, s.l.: Creative Energy.
- Camacho, E. F. & Bordons, C. (2007). *Preface. In: Model Predictive Control*. 2nd ed. London: Springer-Verlag London
- Dotoli, M., Fay, A., Miśkiewicz, M. & Seatzu, C. (2017). Advanced control in factory automation: a survey. *International Journal of Production Research*, Issue 55, pp. 1243-1259.
- Edouard, D., Dufour, P. & Hammouri, H. (2005). Observer based multivariable control of a catalytic reverse flow reactor: comparison between LQR and MPC approaches. *Computers and Chemical Engineering, Elsevier*, pp. 851-865.
- Fletcher, R. (2000). *Practical methods of optimization, second edition*. 2nd ed. s.l.: John Wiley & Sons Ltd..
- Frost & Sullivan (2019). *Global Industrial Automation Market Outlook, 2019*, s.l.: s.n.
- Garriga, J. L. & Soroush, M. (2010). Model Predictive Control Tuning Methods: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, IIX(49), pp. 3505-3515.
- Keesman, K. J. (2011). *System Identification An Introduction*, Wageningen: Springer-Verlag London.
- Lee, J. H. (2011). Model predictive control: Review of the three decades of development. *International Journal of Control, Automation and Systems*, pp. x-x.
- Ljung, L., (1987). *System Identification: Theory for the User, Preface (??)*, New Jersey: PTR Prentice Hall.
- Maciejowski, J. M. (2002). *Predictive control with constraints*. s.l.: Pearson Education Ltd.
- Mayne, D. Q., (2014). Model predictive control: Recent developments and future promise. *Automatica*, pp. 2967-2986.
- Nise, N. S. (2011). *Control Systems Engineering, Sixth Edition*. s.l.: John Wiley & Sons, Inc..

Oravec, J. et al. (2018). Robust model predictive control and PID control of shell-and-tube heat exchanger. *Energy*, pp. 1-10.

Qin, J. S. & Badgwell, T. A. (1997). An Overview Of Industrial Model Predictive Control Technology. *AIChE Symposium Series*, pp. x-x.

Qin, S. J. & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, pp. 733-764.

Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L. & Papont, J. (1978). Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes. *Automatica*.

Taysom, B. S., Sorensen, C. D. & Hedengren, J. D. (2017). A comparison of model predictive control and PID temperature control in friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 232-241.

Vinter, R. (2000). *Optimal control, Preface*. Lontoo: Birkhäuser.