

Toni Sundström

FCC-malli pätevyyden osana

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinööriytyö

27.4.2018

Tekijä(t) Otsikko	Toni Sundström FCC-malli pätevyyden osana
Sivumäärä Aika	23 sivua 27.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	DI Esa Tamminen Lehtori Timo Seuranen
<p>Neste Oyj. on kehittänyt jalostamon prosessiyksiköiden koulutusrakennetta useamman vuoden ajan ja myös dynaaminen simulointi on ollut osana yksikkökoulutusta vuosikymmenen ajan. Työn aiheena oli selvittää, kuinka tasepisteeseen viritetty simulointimalli soveltuu operaattorikoulutukseen.</p> <p>Työssä keskityttiin FCC-yksikön simulointimalliin, joka on viritetty tehdasmittauksiin perustuvaan tasepisteeseen. FCC-yksikkö on katalyyttinen krakkausyksikkö, jonka päälaitteina ovat reaktori ja regeneraattori. FCC-yksikön syöttö on tyypillisesti raskaan kaasuöljyluokan hiilivetyseosta. FCC-yksikön tehtävänä on tuottaa raskaasta syöttöaineesta tiheydeltään kevyempiä tuotteita. Kirjallisuusosassa selvitettiin syötön mukana tulevien epäpuhtauksien vaikutusta katalyytin aktiivisuuteen sekä reaktori- ja regeneraattori-osan lämpötasapainoon.</p> <p>Työssä selvitettiin Nesteen nykyisen yksikkökoulutuksen rakenne sekä pätevyyksiin perustuvan koulutusmallin sisältö.</p> <p>Työssä havaittiin simulointimallin avulla olevan mahdollista nähdä yhden operointimuuttujan vaikutus muuhun prosessiin. Simulointimallin operaattorikoulutukseen soveltuvuuden testaamiseksi työssä esiteltiin syötön lämpötilan muuttumisen vaikutukset muuhun krakkausosan toimintaan. Syötön lämpötilan muuttamisella havaittiin olevan vaikutusta katalyyttikierron määrään, yksikön konversioon ja savukaasujen happipitoisuuteen. Nämä ovat tärkeitä muuttujia kouluttamisessa ja yksikön operoinnissa.</p> <p>Johtopäätöksissä ehdotettiin käyttöliittymän kehittämistä enemmän operaattorikoulutukseen soveltuvaksi. Simulointimallin osalta havaittiin merkittävää koulutuksellista hyötyä mahdollisten myöhemmin tehtävien harjoitteiden kautta. Työn lopputulemana voidaankin todeta simulointimallin sopivuus operaattorikoulutukseen.</p>	
Avainsanat	FCC, leijukatalyyttinen krakkaus, pätevyys, simulointi

Author(s) Title	Toni Sundström FCC-model as part of operator competence
Number of Pages Date	23 pages 27 April 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Esa Tamminen, M.Sc. (Tech.) Timo Seuranen, Senior Lecturer
<p>Neste Corporation has been developing a training structure for process units for several years. Dynamic simulation has also been part of unit training for a decade. The subject for the thesis was to study how the steady state simulation model can be used for operator training.</p> <p>The steady state simulation model of the FCC unit was used as an example. The FCC unit is a catalytic cracking process, whose main equipment is a reactor and a regenerator. The FCC unit's feed is typically heavy-gasoil-class hydrocarbon compounds. The aim of the FCC unit is to produce lighter density products than the feed is. The target of the literature study was to find out how the feed's impurities affect the activity of the catalyst and the heat balance of the reactor and the regenerator.</p> <p>This thesis examined Neste's unit training structure and the content of the operator competence training model.</p> <p>It was discovered that by using a simulation model, it is possible to see the effect in the surrounding process by changing one operating parameter only. In order to test the simulation model for the operator training, one example is presented on how changing the feed temperature affects to the surrounding process. By changing the feed temperature, there is a change in catalyst circulation, unit conversion and the oxygen levels in the flue gas. These are important variables in the operation of the unit and the training.</p> <p>As a conclusion, it is suggested that the user interface should be developed to improve its user friendliness for the operator training. The simulation model was found to give significant benefit if used by future training tasks. The conclusion of the thesis is that the simulation model is well suited for the operator training.</p>	
Keywords	FCC, Fluid Catalytic Cracking, Competence, Simulation

Esipuhe

Haluan kiittää Neste Oyj:tä tästä ainutlaatuisesta mahdollisuudesta, tehdä insinöörityö mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitos Esa Tammiselle, työ ei olisi onnistunut ilman hänen asiantuntevaa ohjausta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia, jotka ovat minua tukeneet insinöörityön tekemisessä, erityiskiitos äidilleni, joka on jaksanut uskoa valmistumiseeni koko opiskeluajan.

Porvoossa 27.4.2018

Toni Sundström

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	FCC-yksikkö	2
2.1	Yksikön esittely	2
2.2	Yksikön syötöt ja tuotteet	5
2.3	Rajoitteet	8
2.4	Energiatase	9
2.5	Toimintaperiaate	10
3	Operaattoripätevyys (lupa operoida)	11
4	FCC monitorointimalli	16
4.1	Petro-SIM-simulointimalli	16
4.2	Operointimuuttujat	17
4.3	Ajotavoitteet mallille	18
4.4	Ajotavoitteiden toimivuus	18
5	Johtopäätökset	21
	Lähteet	23

Lyhenteet

BEK	Kevyt bensa
BER	Raskas bensa
C3	Propeeni
C4	Buteeni
DO	Decanted oil, slurry oil, Pohjaöljy
E-Kat	Tasapainokatalyytti
FCC	Fluid Catalytic Cracking = Leijukatalyyttinen krakkaus
KA	Kaasuöljy
KAK	Kevyt kaasuöljy
KAR	Raskas kaasuöljy
KAT	Tuorekatalyytti
KAKE	Tyhjötislattu kevytkaasuöljy
KARE	Tyhjötislattu raskaskaasuöljy
KK	Kevytkaasu
KUF	Kuumasyöttö
KYF	Kylmäsyöttö
LCF-KART	Krakattu tyhjötislattu raskas kaasuöljy
PE	Petroli

TT2 KART Tyhjötislattu raskas kaasuöljy

ÖP Pohjaöljy

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä on tarkoitus paneutua FCC-yksikön monitorointimalliin koulutuksellisesta näkökulmasta. Monitorointimallia käytetään FCC-yksikön ajoparametrien tutkimiseen, ja Neste Oyj, jolle opinnäytetyö tehdään, on halunnut myös tutkia koulutuksellisen hyödyn monitorointimallista. Tässä työssä tutkitaan koulutuksellisia hyötyjä juuri nimenomaan operaattorin työtehtäviä silmälläpitäen. Neste ei ole aikaisemmin käyttänyt operaattorikoulutuksessa tasesimulointia apuna. Tasemalli on ollut enemmän käyttöinsinöörin työkalu. Nesteellä on jo aloitettu operaattorien koulutusten kehittäminen systemaattisesti. Tällä työllä on tarkoitus saada selvyys siihen, onko tasesimuloinnin ottaminen koulutuskäyttöön oikea suunta kehittää operaattorikoulutusta.

FCC-yksikössä on käytetty monitorointia vuodesta 2014 asti. Vuonna 2017 valmistuvan dynaamisen koulutussimulaattorin pohjalla käytetään reaktiomallia. Hyötynä tästä on, että monimutkainen reaktiokemia saadaan hyödynnettyä mallista eikä sitä tarvitse mallintaa uudestaan.

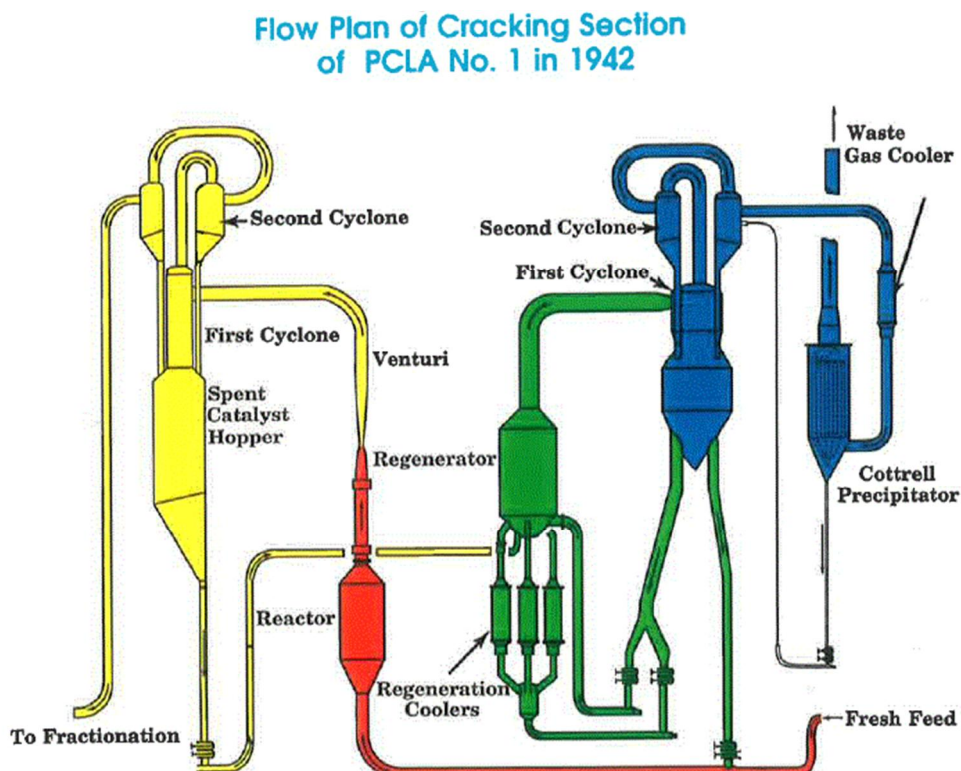
Kirjallisuusosassa perehdytään FCC-yksikön katalyyttikierron toimintaperiaatteeseen ja teoriaan. Soveltavassa osassa esitellään FCC-yksikön tärkeimmät operointimuuttujat ja tarkoitus on saada koulutuksellinen hyöty näkyviin tasesimulointimallista. Tavoitteena on saada operointiparametria muuttamalla havainnollistettua prosessissa tapahtuvat muutokset.

2 FCC-yksikkö

Lyhenne FCC tulee sanoista fluid catalytic cracking eli leijukatalyyttinen krakkaus (1, s. 1). FCC-yksikkö sijaitsee Nesteen Porvoon tuotantolaitoksilla tuotantolinja 2:lla (TL2). FCC-yksikkö on käynnistetty vuonna 1972 (2, s. 38).

2.1 Yksikön esittely

Standard Oil of New Jersey's Baton Rouge käynnisti ensimmäisen FCC-yksikön 25. toukokuuta vuonna 1942 Los Angelesin jalostamolle (kuva 1) (3, s.10). Yksikön tarkoitus on käsitellä korkean kiehumispisteen ja matalan arvon (330 – 550 °C) hiilivetyseoksia (1, s. 1). Katalyyttisen krakkauksen avulla vähemmän arvokkaat syöttöaineet muutetaan eli pitkät hiilivetyketjut pilkotaan lyhemmiksi arvokkaimmiksi jakeiksi kuten bensaksi, lentopetroliksi ja dieseliksi (1, s. 1). Maailmanlaajuisesti on käyttöönotettu noin 350 katalyyttistä krakkeria, niistä noin 102 sijaitsee Yhdysvalloissa. Kokonaisjalostuskapasiteetti näillä on yli 14,7 miljoonaa barrelia eli noin 2 337 miljoonaa litraa päivässä. (1, s. 1.)



Kuva 1. Ensimmäisen FCC-yksikön krakkaus-osan virtauskaavio (3, s. 10).

FCC-yksikössä tyypillisesti ensimmäisenä laitteena on syöttösäiliö, johon kerätään FCC:n syöttöaineet. Syöttösäiliön tehtävänä on poistaa mahdolliset vedet syötöstä sekä kaasumaiset ainesosat. Syöttösäiliö takaa myös tasaisemman syötön nousuputkeen. (1, s. 14–15.) Syöttö esilämmitetään tyypillisesti käyttäen hyödyksi päätislauskolonnin lämpöä, eli hyödynnetään kiertopalautuksissa ja tuotteissa olevaa lämpöenergiaa. Tislauskolonnista saatavan lämpöenergian riittämättömyys voidaan korvata prosessiuunilla. Tämä takaa riittävän korkean syöttölämpötilan nousuputkeen, joka tyypillisesti on 205 – 400 °C välillä. (1, s. 15.)

Nestemäinen syöttöaine syötetään nousuputkeen. Syöttö höyrystyy välittömästi kun pääsee kosketuksiin kuumen katalyytin (677 – 732 °C) kanssa. Krakkausreaktiot alkavat heti kun syöttöaine on kaasumaisessa muodossa. (1, s. 15–17.) Nousuputken jälkeen katalyytti kulkeutuu reaktoriin, jossa tapahtuu katalyytin ja kaasumaisten hiilivetyjen erottus. On tärkeää erottaa kaasumaiset hiilivedyt katalyytistä heti, kun ne päätyvät reaktoriin. Tällä voidaan estää ei-toivotut reaktiot, kuten lämpökrakkautuminen. Tyypillisesti käytetään sykloneita erottamaan katalyytti kaasumaisista hiilivedyistä. Sykloni erottaa katalyytin ja hiilivedyt toisistaan tyypillinen erotusaste on noin 75 - 99,9 %. (1, s. 17.)

Käytetty katalyytti etenee katalyytin strippausosaan, jossa katalyytistä on tarkoitus erottaa hiilivetyjämmät. Hiilivedyt ovat adsorboituneet katalyytin huokosiin ja ne erotetaan toisistaan hyödyntäen höyrystrippausta. (1, s. 20–21.) Strippausosasta käytetty katalyytti etenee regeneraattoriin, jossa käytetystä katalyytistä poistetaan siihen kertynyt koksi. Regeneraattorin tarkoituksena on palauttaa katalyytin aktiivisuus ja tuottaa lämpöenergiaa krakkausreaktiota varten. Koksi tukkii katalyytin huokokset ja näin vähentää sen aktiivisuutta. Käytetyssä katalyytissä on tyypillisesti koksia 0,5 – 1,5 painoprosenttia. Käytetty katalyytti regeneroidaan ilman avulla. Happi saa aikaan koksen palamisen pois katalyytin pinnalta.

On olemassa kahta erityyppistä regenerointitapaa. Osittaisessa palamisessa koksi palaa vain osittain katalyytin pinnalta, ja tätä kutsutaan alhaisen lämpötilan regeneroinniksi. Kokonais palamisessa regenerointi lämpötila on korkea noin 730 °C ja palaminen on täydellistä. Täydellisen palamisen etuna on matala koksiaste ja palamisen kautta syntyvä suuri lämpöenergia. (1, s. 24–25.) Regeneroitu katalyytti kiertää takaisin nousuputkeen. Katalyyttikierron nopeutta säädetään luistiventtiilillä (POV) (1, s. 26).

Palamisessa syntyneet savukaasut sisältävät pieniä jäämiä katalyyttihiukkasia ja ne poistetaan savukaasuista primääri- ja sekundäärisykloneiden avulla. Savukaasut sisältävät suuren määrän energiaa. Savukaasujen lämpöenergiaa hyödynnetään höyrytuotantoon. (1, s. 26.)

Katalyytin aktiivisuus vähenee ajan kanssa. Tämä johtuu tyypillisesti syötön mukana tulevista epäpuhtauksista. Katalyyttikierron aktiivisuutta ylläpidetään lisäämällä tasaisin väliajoin tuoretta katalyyttiä kiertoön. (1, s. 28.)

Reaktiotuote virtaa päätislauskolonniin, jossa on tarkoitus erottaa tuotteet tislausalueidensa mukaan. Päätislauskolonnin tehtävänä on lauhduttaa ja saada talteen nestemäiset tuotteet reaktorin kaasufaasista. Päätislauskolonnissa on tärkeää saada sisään tuleva reaktiotuote jäähtymään johtuen sen korkeasta lämpötilasta. Ennen jäähtymistä ei kolonnissa lauhtumista tapahdu. Jäähdytys toteutetaan useammalla kiertopalautuksella. Suurin osa reaktiotuotteesta menee kolonnin ylimenoon kaasumaisena tuotteena. Tämä lauhdutetaan osittainen ylimenojäähdyttimellä ja siirretään jatkojalostukseen. Reaktiotuotteista osa jää kaasumaiseen olomuotoon, ja tätä tuotetta kutsutaan märkäkaasuksi. Märkäkaasut sisältävät propaani- ja butaaniluokan hiilivetyjä. Kolonnin sisäisellä palautuksella on myös se tarkoitus, että sillä pestään kaasufaasiin jääneitä katalyyttijäämiä. (4.)

Reaktiotuotteessa oleva katalyytti jää kolonnin pohjatuotteeseen ja se johdetaan varastosäiliöihin, missä sen tyypillisesti annetaan laskeutua tietyn ajan verran. Pohjatuote sisältää suuren määrän lämpöenergiaa ja sitä täytyy jäähdyttää, jotta kolonnin pohjalla ei tapahdu ei toivottavaa lämpökrakkausta. Tämä tapahtuu suurella pohjan jäähdytyskierrolla. Kolonnin pohjatuotteen lämpöenergiaa hyödynnetään lämmittäessä tuoresyöttöä yksikköön. (1, s. 28–31.)

2.2 Yksikön syötöt ja tuotteet

FCC-yksikön syöttö on tyypillisesti rikitöntä raskaan kaasuöljyluokan hiilivetyseosta. Syötössä olevat hiilivedyt voidaan luokitella neljään osaan. Suurin osa syötöstä, eli noin 50–65 massa-% on parafiineja. Parafiinit ovat suoraketjuisia hiilivetyjä, ja niitä on helppo käsitellä krakkausyksikössä. (1, s. 52–53.) Olefiinit taas eivät ole toivottava hiilivetyryhmä FCC:n syötössä. Olefiinit ovat kaksoissidoksella olevia hiilivetyketjuja. Olefiinit ovat epästabiileja, ja ne voivat reagoida itsensä kanssa tai jonkun muun aineen kanssa. Olefiineja on tyypillisesti FCC:n syötössä alle 5 massa-%. (1, s. 52–53.)

Kolmantena luokkana on naftteenit, naftteenit ovat toivottavaa FCC:n syötössä, niiden korkean oktaaniluvun ansiosta. Naftteenit ovat yksoissidoksellisia rengas muotoisia hiilivetyketjuja. (1, s. 53–54.) Viimeisenä luokkana tulee aromaattit. Aromaattit ovat kaksoissidoksellisia rengasmuotoisia hiilivetyjä, ne ovat hyvin stabiileja. Aromaattit eivät ole toivottavia yhdisteitä FCC:n syötössä, koska ne eivät krakkaudu, vaan päätyvät katalyytin pinnalle, niin kutsutuksi koksiksi tai sitten pohjatuotteen sekaan. Aromaattien lisääntyminen syötössä johtaa matalampaan konversioon FCC-yksikössä. (1, s. 54.) Käytännössä FCC-yksikön konversio lasketaan virtausten perusteella seuraavalla kaavalla:

$$\text{Konversio } \% = \frac{\text{Tuoresyöttö} - (\text{KAK} + \text{KAR} + \text{Slurry})}{\text{Syöttö}} * 100 \quad (1)$$

Virtausten perusteella laskettu konversio ei ole tarkka arvo, koska tuotevirrat saadaan mitattua vasta pääkolonnin jälkeen. Pääkolonnin operointi vaikuttaa myös virtausten perusteella laskettuun konversioon.

Tarkka konversio voidaan saada tasemallista, kun se on viritetty tasepisteessä otetuilla analyyseillä. Tarkka konversio pystytään määrittelemään mallissa suoraan reaktiotuotteesta. Tarkka konversio on alle 221,1 asteessa kiehuvien hiilivetyjen suhde syöttöön. Alla olevasta kuvaajasta nähdään tarkan konversion määrittys (Kuva 2). Kuvaajasta määritetty konversio on noin 79 %.



Kuva 2. Tarkka konversio (y-akseli lämpötila (°C) ja x-akseli konversio-%)

Tyypillisesti FCC:n syötöstä suurin osa on vetykäsiteltyä syöttöä ja kiehuma-alue syötöaineilla on yli 565 °C (1, s. 57). Epäpuhtaudet syötössä johtuvat tyypillisesti raakaöljyn laadusta tai syötön vetykäsittelystä. Epäpuhtauksia FCC:n syötössä ovat typpi, rikki, natrium ja metallit (nikkeli, vanadium, kalium, rauta, kalsium ja kupari). Epäpuhtaudet vaikuttavat katalyytin aktiivisuuteen madaltaen sitä ja näin ollen sitä kautta huonompaan tuotusaantoon.

Rikki on ainoa näistä epäpuhtauksista, joka ei vaikuta katalyytin aktiivisuuteen, mutta rikillisten tuotteiden rikinpoisto lisää jalostuskustannuksia. (1, s. 63.) Rikki esiintyy syötöaineissa orgaanisena rikkinä. Vetykäsittelystä syötössä jäljelle jäänyt rikki päätty pohjatuotteeseen ja koksiin. Vetykäsittämättömän syötön rikistä suurin osa päätty keskisteleisiin. (1, s. 66–67.)

Typpi vaikuttaa katalyytin aktiivisuuteen väliaikaisesti, typen aiheuttama katalyytin aktiivisuuden lasku saadaan korjattua katalyytin regeneroinnissa, jossa typpi poistuu katalyytista typpenä ja typpioksideina. Typellä on suuri vaikutus yksikön konversioon jokainen 125 ppm. typpeä syötössä madaltaa yksikön konversiota yhdellä massa %:lla. (1, s. 63–64.)

Natrium vaikuttaa negatiivisesti katalyytin aktiivisuuteen, koska se neutraloi katalyytin happopuolen. Regeneraattorissa natrium romahduttaa zeoliitin, varsinkin jos vanadiumia on läsnä. Natrium tulee joko syötön mukana tai tuorekatalyytin mukana. Katalyytin valmistusprosessissa katalyyttiin jää natriumia. (1, s. 72–73.)

Yksikön tuotteet voidaan jakaa seitsemään eri tuotteeseen. Seuraavana on esitelty nämä aloittaen kevyimmästä päätyen raskaimpaan (1, s. 169–170). Kaasut, jotka sisältävät vetyä, metaania ja etaania, päätyvät muoviteollisuuden käyttöön. Nestekaasut, kuten propaani ja butaanit jatkojalostetaan bensiinikomponenteiksi. Bensiini toimitetaan tislauksolonniin kautta merkaptaanien hapetusyksikköön ja siitä edelleen bensiinituotteeksi. Bensiiniä käytetään myös kolonnin huipunpalautukseen, sekä bensiinin kiertopalautukseen jäähdyttämään kolonnin yläosaa. (1, s. 171–174.) Kevyt ja raskas -kaasuöljy toimitetaan jatkojalostukseen rikinpoistoon. Nämä jakeet toimivat myös FCC-päätislausolonnin kiertopalautuksina jäähdyttäen kolonnia. Kiertopalautusten tehtävänä on jäähdyttää kolonnissa ylöspäin virtaavaa kaasuvirtaa. Näin saadaan kolonnin halkaisijaa pienennettyä verrattuna, että koko kolonnin kaasuvirta tulisi jäähdyttää ylimenojäähdyttimessä. Kiertopalautus käy luovuttamassa energiaa kolonnin ulkopuolella esimerkiksi toisen kolonnin syöttöön ja näin ollen palautuu takaisin kolonniin jäähtyneenä virtana. (1, s. 180–182.) Pohjatuotetta eli slurryä käytetään laimennusöljynä raskaimpien tuotteiden seassa (1, s. 183). Koksi poltetaan regeneroinnissa ilman hapen avulla (1, s. 185–186).

2.3 Rajoitteet

FCC-yksikössä on joitain rajoitteita, joita ei saa ylittää tai alittaa prosessin ohjauksessa. Rajoitteet on mainittu alla olevassa taulukossa 1.

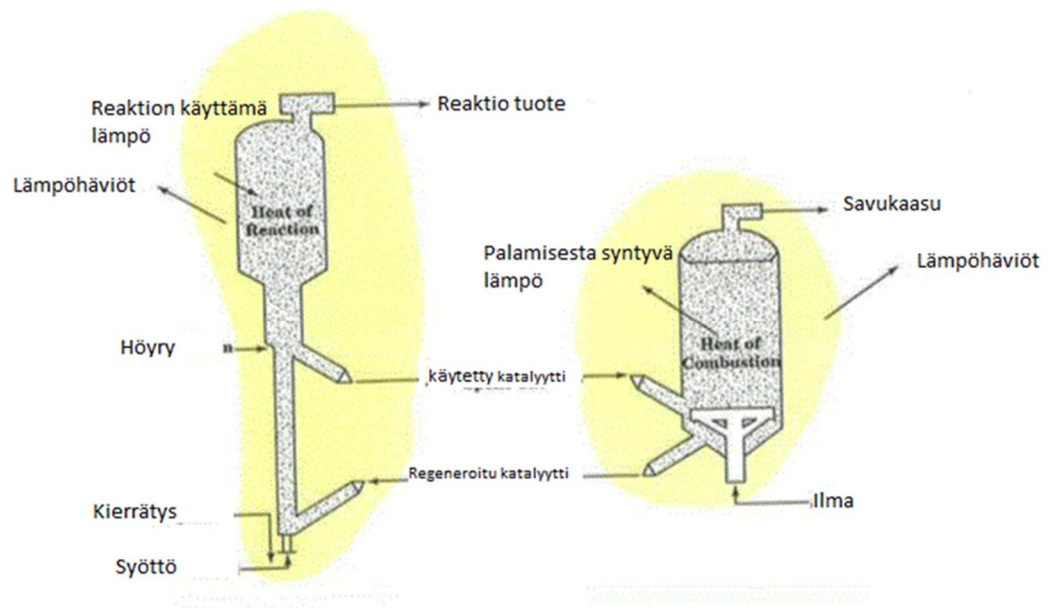
Taulukko 1. Operointirajoitteet

Rajoitteet	t/h	°C	til-%
Kylmä syöttö	90-132,5	75-320	-
Kuuma syöttö	90-132,5	190-320	-
Ilma	130-188	-	-
Höyry suuttimille	2,1-6,0	-	-
Höyry nousuputken pohjaan	2,0-3,0	-	-
Nousuputken ulostulo lämpötila	-	510-550	-
Stripperin höyry	1,8-4,8	-	-
Reaktorin bensiinikvenssi	0-30,4	-	-
Savukaasun happi	-	-	> 0,7

Regeneraattorissa koksen palamiseen tarvitaan happea. Jos savukaasujen happipitoisuus laskee liian alas, ei voida varmistua koksen täydellisestä palamisesta. Ylimäärä ilmaa syötettäessä voidaan myös varmistua siitä, että palaminen tapahtuu halutussa paikassa, eli regeneraattorissa, eikä esimerkiksi regeneraattorin ylimenossa. Stripperiin syötettävän höyryn tehtävänä on poistaa katalyytin hiilivetyjämmät. Liian vähäinen höyryn syöttö ei poista tarpeeksi tehokkaasti katalyyttiin tarttuneita hiilivetyjämiä, kun taas liian suuri höyrynsyöttö saattaa estää katalyytin kulkeutumisen regeneraattoriin. Suuttimien tehtävänä on pisaroida öljy mahdollisimman pieniksi pisaroiksi, jotta hiilivetyjen kontaktipinta-ala olisi mahdollisimman suuri. Liiallisen höyryn syöttämisestä voi seurata paineeron kasvu liian suureksi, mikä voi pahimmassa tapauksessa rajoittaa öljysyötön määrää. Liian vähäinen höyrysyöttö suuttimille ei pisaroi öljysyöttöä tarpeeksi pieniksi pisaroiksi. (5.)

2.4 Energiatase

Yksikössä tapahtuvat reaktiot ovat kokonaisuudeltaan endotermisia eli lämpöä kuluttavia reaktioita. Koksien palamisesta syntynyt lämpöenergia kulkeutuu katalyytin mukana nousuputkea pitkin reaktoriin ja näin ollen luovuttaa lämpöä esilämmitettyyn syöttöön höyrystäen sen kokonaisuudessaan. Reaktori regeneraattoriyhdistelmä pyrkii aina pääsemään lämpötasapainoon. (1, s. 152–153.) Kuvassa 3 on esitetty lämpötasapaino reaktorin ja regeneraattorin välillä.

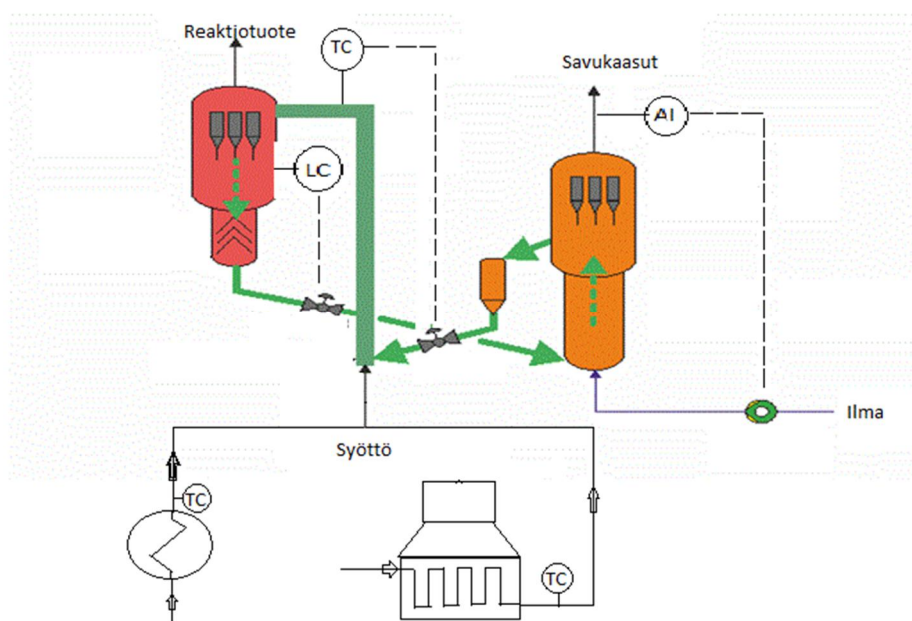


Kuva 3. Lämpötasapaino reaktorin ja regeneraattorin välillä (3, s. 67.)

2.5 Toimintaperiaate

FCC-reaktorin ja regeneraattorin säätöjen toimintaperiaate on seuraavanlainen. Kylmän ja kuuman syötön lämpötilaa säädetään lämmönvaihdinten ja prosessiuinin avulla. Kuuma syöttö lämpenee lämmönvaihdinten avulla ja kylmä syöttö lämpenee lämmönvaihdinten sekä prosessiuinin avulla. Nousuputken ulostulolämpötilaa säädetään regeneraattorista tulevan katalyyttikierron avulla. Nousuputken virtaavan katalyytin lämpötila on korkeampi kuin kuuman ja kylmän -syötön yhteislämpötila ja näin mahdollistaa reaktioiden tapahtumisen pääasiassa jo nousuputkessa. Syötön lämpötilan ollessa vakio nousuputken ulostulolämpötilan nosto suurentaa katalyyttikierron määrää ja päinvastoin (kuva 4) (6, s. 11–16).

Reaktorin katalyyttipintaa säädetään reaktorista regeneraattoriin menevän katalyytin määrällä. Regeneraattorissa tapahtuvaan palamiseen tarvittavan polttoilman määrää säädetään polttoilmapuhaltimella. Tarvittavaa palamisilman määrää voidaan arvioida regeneraattorin ulostulossa olevan happianalysaattorin avulla. Savukaasuissa tulisi olla pieni määrä happea, jotta voidaan sen osalta todeta palamisen olevan täydellistä (6, s. 18–19).



Kuva 4. Reaktio-osan säätöjen periaatekuva (7, s. 4).

3 Operaattoripätevyys (lupa operoida)

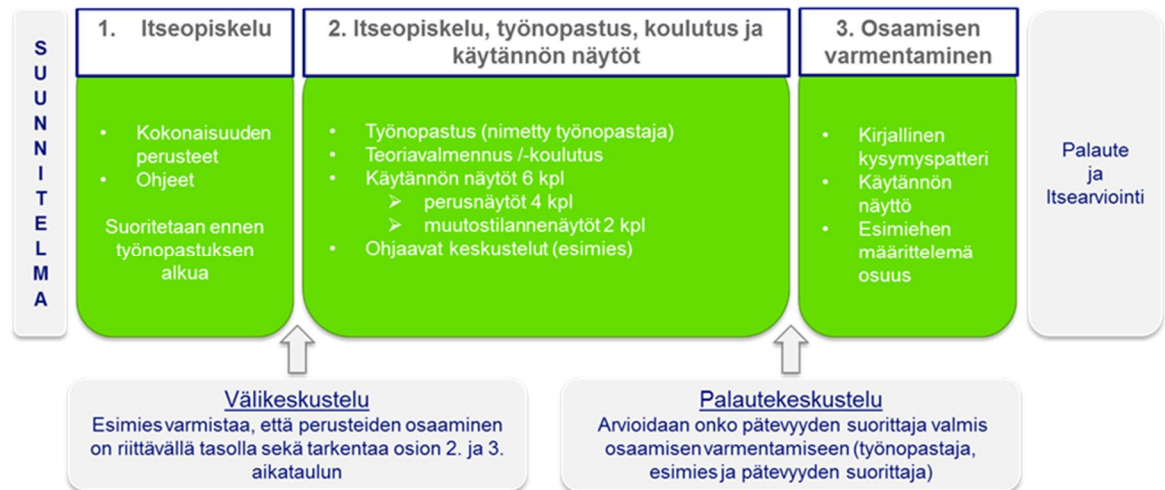
Nesteen jalostamoilla on siirrytty pätevyysmalliseen koulutus ja ylläpito -järjestelmään. Operaattorin pätevyys koostuu monesta eri asiasta. Kun uusi operaattori rekrytoidaan Nesteelle, ensimmäinen puoli vuotta opiskellaan operaattorityön perusteita. Tätä ajanjaksoa kutsutaan perehdyttämisjaksoksi.

Perehdytysjaksolla opiskellaan paljon asioita, joita operaattori tarvitsee jokapäiväisessä työssään. Suoraan öljynjalostukseen liittyviä kemiallisia ja fysikaalisia perusteita opiskellaan seuraavien pääaiheiden kautta tislauksen, lämmönsiirron ja virtauksen perusteet.

Perehdytysjakson jälkeen siirrytään opiskelemaan yksiköitä syvällisemmin. Tässä syvällisemmässä perehdytysjaksossa yksikköä opiskellaan suunnitellun järjestyksen mukaan aloittaen yksikön perusteista päätyen vaativaan häiriötilanneharjoitteluun. Prosessiyksikön opiskelu on esitetty kuvassa 5. Opiskelu päättyy osaamisen varmentamistilaisuuteen, jossa varmennetaan operaattorin valmiudet operoida yksikkö itsenäisesti. Kun operaattori on saanut pätevyyden operoida yksikköä, hän siirtyy ylläpitämään pätevyyttä.

Ylläpito-ohjelmaan sisältyy yksikköopiskelussa käytyjen asioiden kertaamista. Dynaamiset simulaattorit ovat isossa roolissa osaamisen ylläpidossa kuten yksikköopiskelussa. Simulaattorit nopeuttavat yksikön opiskelua, ja niiden kautta voidaan harjoitella erilaisia häiriötilanteita. Dynaamisten simulaattoreiden huonoina puolina mainittakoon niiden kallis hinta ja haastava ylläpito. Tasesimulaation avulla pystytään helposti havainnollistamaan yhden parametrin muutoksesta aiheutuva muutos prosessiin. Tasesimulaattorissa säädöt eivät ole vaikuttamassa muutoksessa, kun taas dynaamisessa simulaattorissa tehdyt muutokset saattavat jäädä havaitsematta säätöpiirien tekemien korjausten vuoksi. Tästä voidaankin tehdä johtopäätös, että häiriötilanneharjoitteluun dynaaminen simulaattori on parempi, mutta prosessimuutosten havainnollistamiseen taas tasesimulointi.

Geneerinen pätevyyden suoritusmalli - työntekijät



Kuva 5. Nesteen pätevyyden saavuttamismalli

Pätevyyden suorittaminen aloitetaan yksikköopiskelusuunnitelmalla. Suunnitelma tehdään yhtiön osaamisen ylläpitojärjestelmään (myöhemmin L2O). Esimies on vastuussa suunnitelman tekemisestä. Suunnitelma sisältää kaikki operaattorin yksikköopiskeluun osallistuvat henkilöt, esimerkiksi kuka on vastuussa perehdyttämisestä. Pätevyyden saavuttaminen sisältää kolme eri vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa perehdytään yksikön perusteisiin ohjeiden avulla. Operaattori itseopiskelee yksikön perusteita ja kuittaa L2O:hon ohjeet luetuiksi ja ymmärretyiksi. Esimies arvioi operaattorin uuden yksikön osaamistason ennen vaiheeseen kaksi siirtymistä. Esimies toteaa arvioinnin perusteella perusteiden osaamisen olevan sillä tasolla, että vaiheeseen kaksi voidaan siirtyä.

Vaiheessa kaksi alkaa käytännön harjoittelu ja myös itseopiskelu jatkuu. Kaikkiin pätevyysin on valmiiksi määritelty tärkeimmät yksikköoperoinnit, ja näitä kutsutaan käytännön näytöiksi. Työnopastajan avulla ja itseopiskeluna operaattori harjoittelee yksikön linjausta sekä ennalta määriteltyjä käytännön näyttöjä. Työnopastaja ottaa vastaan operaattorin antamat käytännön näytöt ja määrittelee, onko suoritus hänen mielestään riittävällä tasolla.

Käyttöinsinöörin yksikkökoulutuksessa (kuva 6) käydään läpi operaattorin kanssa yksikön teoriaa. Ennen tätä vaihetta ohjaamo-operaattorin olisi hyvä käydä tasesimuloinnin avulla läpi yksikön operointiparametreja. Tasesimuloinnissa voi tulla esille asioita, joita olisi hyvä käydä läpi yhdessä käyttöinsinöörin kanssa teoriakoulutuksessa. Kaikkien suoritusten tulee olla tehtynä ennen vaiheeseen kolme siirtymistä.

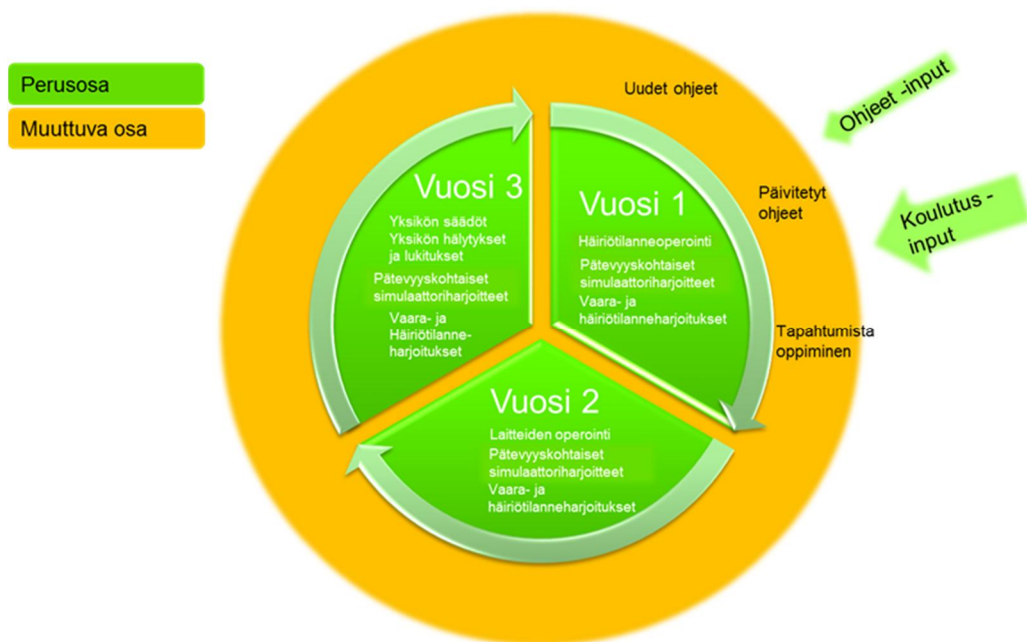
Vaihe kolme on osaamisen varmennustilaisuus. Osaamisen varmennustilaisuudessa esimies varmistaa operaattorin osaamisen yksikköpätevyyteen. Osaamisen varmennustilaisuudessa operaattorin tulee osoittaa osaaminen yhteen esimiehen määrittelemään käytännönnäyttöön. Yksiköissä joissa käytetään dynaamista simulaattoria, käytännön näytöt toteutetaan koulutussimulaattorin avulla ja näin ollen myös osaaminen varmistetaan koulutussimulaattorilla. Osaamisen varmennustilaisuudessa käytetään myös kysymyspatteristoja osoittamaan operaattorin osaamista.



Kuva 6. Nesteen yksikköopiskelun rakenne

Pätevyyden voimaantumisen jälkeen operaattori siirtyy automaattisesti ylläpitämään osaamistaan kyseiseen pätevyysasteeseen. Operaattori siirtyy pätevyystason jälkeen seuraavan lähimmän alkavan vuoden alusta ylläpito-ohjelman pariin. Ylläpito-ohjelma sisältää osaamisen kertausta yksikköohjeisiin. Niiden yksiköiden osalta, joissa on käytössä koulutus-simulaattori, ylläpito-ohjelma sisältää koulutussimulaattoriharjoitteita. Ylläpito-ohjelmassa olevat koulutussimulaattoriharjoitteet koostuvat, esimerkiksi uunin sytytyksestä ja kompressorin käynnistyksestä. Koulutuksellisesta näkökulmasta on nähty tarpeelliseksi kerrata myös harvoin tapahtuvia operointeja.

Ylläpito-ohjelma (kuva 7) sisältää kaksi osaa, perusosan ja muuttuvan osan. Perusosa on suunniteltu kolmeksi vuodeksi eteenpäin, ja se sisältää ohjeiden kertausta. Perusosa pysyy muuttumattomana koko vuoden ajan, ja näin ollen se voidaan suunnitella jo etukäteen. Ensimmäisen vuoden kertaus kohdistuu häiriötilanneoperointiin, toisen vuoden kertaus kohdistuu laiteoperointiin ja kolmantena vuonna kerrataan säätöjen ja suojausten toimintakuvauksia. Simulaattoriharjoitteet määritellään aina syksyllä, seuraavaa vuotta ajatellen.



Kuva 7. Nesteen pätevyysylläpito-ohjelmien sisältö

Muuttuva osa sisältää tilannetietoisuuteen liittyviä asioita, ja tähän osioon saattaa kesken ylläpitojakson tulla lisää kerrattavia asioita. Muuttuvaa osaa käytetään tilannetietoisuuden ylläpitämiseen, ja tässä osassa julkaistaan mahdollisia julkaistavia tilapäisohjeita ja tapahtumista oppimisen materiaaleja. Ylläpito-ohjelma tulee olla suoritettuna vuoden loppuun mennessä. Jos ylläpito-ohjelma ei ole suoritettuna pätevyuden taso putoaa vihreästä oranssiksi. Pätevyuden tason pudotessa vihreältä oranssille operaattorin tulisi ensisijassa suorittaa erääntynyt ylläpito-ohjelma ennen yksikön operointia. Operaattorilla saattaa olla useampia ylläpito-ohjelmia käynnissä samanaikaisesti, ja hän suorittaa niitä kaikkia yhtä aikaa.

4 FCC monitorointimalli

4.1 Petro-SIM-simulointimalli

Petro-SIM on KBC:n valmistama simulointimalli. Tässä työssä käytettävä simulointiohjelmisto on nimeltään FCC-SIM. (8, s. 1–2.) FCC-simulointimalli on malli, joka viritetään tehdasmittauksiin perustuvaan tasepisteeseen. Simulointiohjelmisto sisältää useita kiinteisiä malleja. Tässä kyseisessä simulaattorissa mallinnettuja alueita on nousuputki, reaktori, regeneraattori, päätislauskolonni, nestekaasujen talteenottokolonni ja bensiinin jakotislauskolonni. Simulointimalli viritetään tasehetkellä prosessista otettuihin arvoihin ja analyysituloksiin. Alla olevasta taulukosta 2 selviää taseeseen vaikuttavat mittaukset.

Taulukko 2. Taseeseen vaikuttavat mittaukset

Aine	Virtaus	Lämpötila	Paine	Koostumus
KYF	X	X		X
KUF	X	X		X
KK	X	X	X	X
C3	X	X		X
C4	X	X		X
BEK	X	X		X
BER	X	X		X
PE	X	X		X
KAK	X	X		X
KA	X	X		X
ÖP	X	X		X
Katalyytti				X
E-Kat				X

4.2 Operointimuuttujat

Seuraavia operointimuuttujia pystytään muuttamaan simuloinnissa:

1. nousuputken ulostulolämpötila (°C)
2. regeneraattorin syötettävän palamisilman määrä (t/h)
3. kylmän ja kuumen syötön lämpötilat (°C)
4. nousuputkeen syötettävän höyryn määrä (kg/h) sekä pohjaan, että suuttimille
5. stripperiin syötettävän höyryn määrä (kg/h)
6. kylmän ja kuumen syötön määrä (t/h)
7. bensiinikvenssin määrä (t/h).

Mallissa on myös useita riippuvia muuttujia, joiden arvot riippuvat joko näistä ennalta mainituista operointimuuttujista tai sitten ulkoisista tekijöistä. Näistä mainittakoon palamisilman lämpötila ja kosteus, jotka ovat riippuvaisia ulkoilman olosuhteista. Regeneraattorin lämpötilan riippuvuus on jo monimutkaisempi. Se riippuu useasta eri tekijästä, ja näistä mainittakoon palamisilman määrä, käytetyn katalyytin sisältävän koksen ja mahdollisten hiilivetyjen määrät.

4.3 Ajotavoitteet mallille

Tavoitteena on havainnollistaa FCC-reaktorin ja regeneroinnin energiatasapainoa ja sitä kuinka energia tuodaan reaktoriin. Reaktio itsessään on endoterminen, joten se tarvitsee ulkopuolista energiaa. Reaktioiden energia tulee regeneraattorista tulevan regeneroidun katalyytin mukana, syötön mukana ja nousuputkeen syötettävän höyryn mukana. Regeneroidun katalyytin energia syntyy regeneraattorissa palavan koksen myötä. Syöttömäärä sekä kylmän, että kuumen -syötön osalta pidetään vakiona koko simuloinnissa. Tarkoituksena on esimerkiksi muuttaa nousuputkeen syötettävän öljyn lämpötilaa ja tarkastella, kuinka se vaikuttaa katalyyttikierron määrään sekä konversioon. Simuloinnissa muutetaan vain yhtä parametria kerralla havainnollistamisen parantamiseksi. Usean parametrin muuttaminen kerralla ei tuo toivottua näkyvyyttä muutokseen.

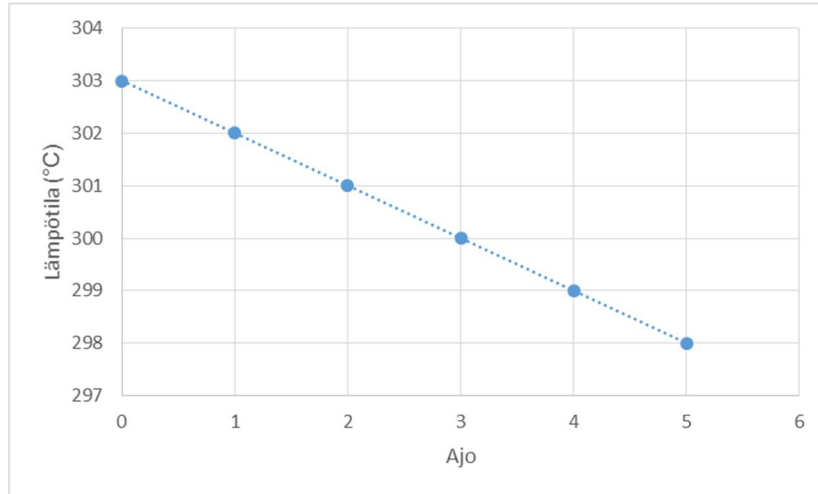
4.4 Ajotavoitteiden toimivuus

Tavoitteena oli löytää ajoparametrit, joilla tasesimulaattorilla pystytään havainnollistamaan käyttäjälle reaktorin ja regeneraattorin lämpötilan muuttamisesta aiheutuvat muutokset. Simuloinnissa muutettiin portaittain syötön lämpötilaa alaspäin yksi aste kerrallaan. Muutoksia syötön lämpötilaan tehtiin viisi kertaa (taulukko 3). Syötön lämpötilaa alennettiin 303 °C:sta 298 °C:seen. Ilmamäärä ja syöttömäärä pysyivät vakoina ajojen aikana.

Taulukko 3. Ajoparametrit ja muutokset

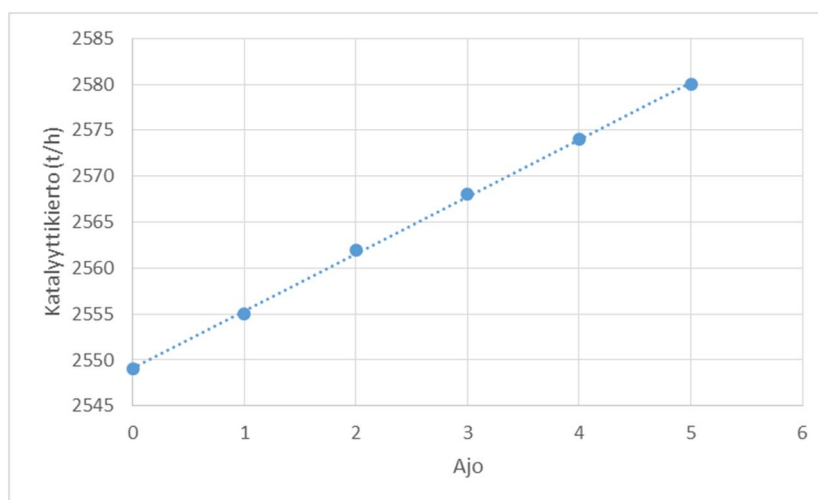
Ajo	Syötön lämpötila (°C)	Katalyyttikierto (t/h)	Konversio (%)	Happi (%)
0	303	2549	80,51	0,87
1	302	2555	80,55	0,83
2	301	2562	80,59	0,79
3	300	2568	80,63	0,76
4	299	2574	80,67	0,72
5	298	2580	80,71	0,69

Syötön lämpötilan askelmuutokset näkyvät alla olevasta kuvaajasta (kuva 8).



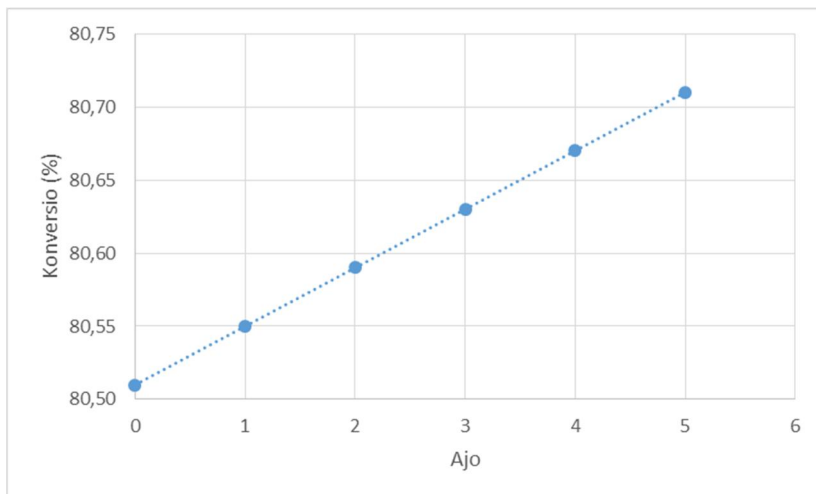
Kuva 8. Syötön lämpötilan muutos

Katalyyttikierron määrän muutos näkyy alla olevasta kuvaajasta (Kuva 9). Katalyyttikierron muutos ensimmäisestä ajosta viimeiseen ajoon oli 31 t/h. Voidaan havaita syötön lämpötilan laskiessa katalyyttikierto kasvaa. Tämä johtuu energiatarpeen lisäyksestä nousuputken ulostulolämpötilan ollessa vakio. Nousuputken sisäänmenon ja ulostulon lämpötilaeron ollessa vakio tuoresyötön kautta tuleva lämpöenergia korvaantuu regeneroidun katalyytin tuomalla lämpöenergialla.



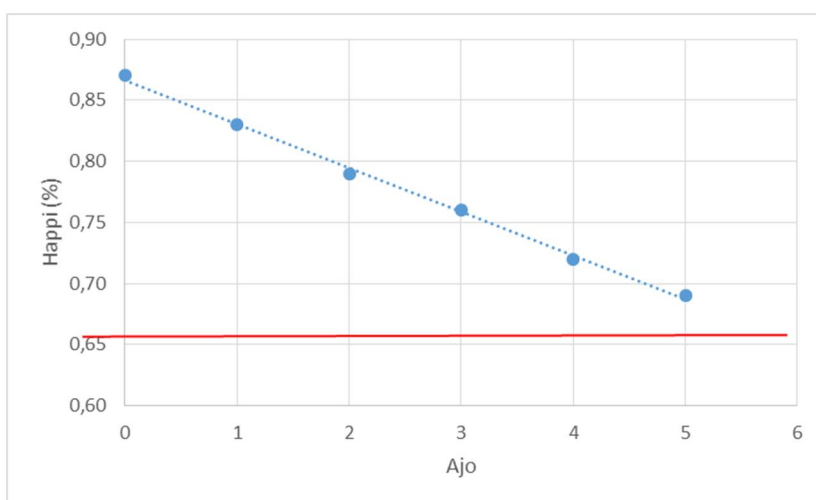
Kuva 9. Katalyyttikierron muutos

Konversion kokonaismuutos ajojen alusta loppuun oli 0,2 prosenttiyksikköä. Alla olevasta kuvaajasta (kuva 10) näkyy konversion muutos. Konversion parantuminen selittyi katalyytin määrän lisääntymisellä suhteessa öljyyn.



Kuva 10. Konversion muutos

Viimeisenä muuttujana käsiteltiin happea. Alla olevasta kuvaajasta (kuva 11) näkyy hapen muutos ajojen välillä. Konversion kasvu lisää kaksin määrää käytetyssä katalyytissä, jolloin regeneraattorissa lisääntyneen kaksin palaminen vaatii enemmän happea. Polttoilman ollessa vakio savukaasujen happiprosentti laskee konversion noustessa. Savukaasujen happi on yksi rajoite FCC-yksikössä. Simuloinnin viimeisen ajon päätteeksi happi oli 0,69 % eli 0,01 prosenttiyksikköä alle rajoitteen.



Kuva 11. Hapen muutos

5 Johtopäätökset

Tässä insinööriyössä tutkittiin tasesimulointimallin toimivuutta operaattorikoulutuksessa. Nesteellä on ollut käytössä dynaaminen simulaattori jo useita vuosia, mutta tasepisteessä olevaa simulointimallia ei ole käytetty operaattorikoulutukseen. Kirjallisuusosassa syvennyttiin FCC-yksikön toimintaan, rajoitteisiin sekä reaktorin ja regeneraattorin lämpötasapainoon. Reaktio-osan operointiin vaikuttavat operointimuuttujat listattiin ja käsiteltiin lyhyesti riippuvia muuttujia.

Simulointimallin käyttöliittymäksi tehty Excel-pohja sisältää erittäin kattavan määrän tietoa. Työn perusteella on havaittavissa tarve kehittää käyttöliittymää, jonka kautta simulointimallia operoidaan. Käyttöliittymässä tulisi olla mahdollisuus valita, mitä tietoa kussakin koulutusvaiheessa oleva henkilö näkee. Tämä tekisi käyttöliittymästä enemmän havainnollistavan. Syväosaamista kehitettäessä tulee olla tarpeen saada kattavasti tietoa käyttöliittymän kautta. Käyttöliittymässä tulee olla mahdollisuus valita sen käyttö koulustarpeisiin tai prosessin optimointia varten.

Simulointiohjelmiston asennus on tietokonekohtainen. Simulointiohjelmiston tulee olla asennettuna samalle tietokoneelle, kuin nykyisen Excel-käyttöliittymän. Käyttö ja ylläpito olisivat helpompaa ja kustannustehokkaampaa, jos serverillä olevaa mallia pystyisi operoimaan käyttöliittymän avulla. Tällöin mahdollistetaan simulointimallin operointi useammalta tietokoneelta.

Tasesimuloinnin avulla on mahdollista osoittaa yhden operointimuuttujan vaikutus muihin prosessiin. Simulointiharjoitteiden avulla tulisi ohjata operaattorin oppimista helpoimmasta operointimuuttujasta monimutkaisempiin operointimuuttujiin. Luvussa 4.2 on esitetty operointimuuttujien järjestys, jota olisi hyvä hyödyntää simulointiharjoituksia suunniteltaessa. Hyvin laadittujen harjoitteiden avulla mahdollistetaan laadukas oppiminen ilman simulaattorikouluttajan tukea.

Prosessiin vaikuttavien muuttujien ymmärtäminen on iso osa operaattorin työtä. Nesteen yksikköopiskelurakennekaavion mukaan osaaminen tulisi varmistaa ennen pätevyyden saavuttamista, jotta pystytään todentamaan riittävä osaaminen yksikön operointiin. Harjoitteisiin perustuvien laadukkaiden kysymyspattereiden avulla on mahdollista kartoittaa riittävä osaaminen operointimuuttujien vaikutuksista prosessiin.

Tasepisteeseen viritetyn simulointimallin muutosvaste on nopea, verrattuna dynaamiseen simulointiin. Simulointimallin avulla on mahdollista nähdä yhden operointimuuttujan vaikutus muuhun prosessiin. Tasepisteeseen viritettyä simulointimallia tulisikin hyödyntää operaattorikoulutuksessa, jotta saataisiin parempi näkyvyys yksittäisten operointimuuttujien vaikutuksista.

Lähteet

1. Sadeghbeigi, Reza. 2012. Fluid catalytic cracking handbook. USA: Elsevier inc.
2. Vennonen, Pekka. 2006. Sköldvik viikinkisatamasta öljysammoksi. Helsinki: Libris Oy
3. Montgomery, Jim 1993. Guide to Fluid Catalytic Cracking Part one. Baltimore, Maryland: W.R. Grace & Co.
4. Neste Oyj. FCC automaatiojärjestelmä. 2018.
5. Tamminen, Esa. 2018. Vanhempi prosessiasiantuntija, Neste Oyj, Porvoo. Suullinen tiedonanto. 27.4.2018.
6. FCC-yksikkösäätöjen toimintakuvaus. Porvoo: Neste Oyj. 2017.
7. Paappanen, Jukka. 2017. FCC teoriavalmennus. Porvoo: Neste Oyj.
8. FCC-SIM technical datasheet. 2016. Verkkodokumentti. KBC. <<http://www.kbc.com/sim-suite-models/fcc-sim>>. päivitetty 2.5.2016. Luettu 6.11.2017.