



Tatu Rautiainen

# Kiertokaasukompressorin rikkoutumissyöt

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Kemiantekniikan koulutusohjelma  
Insinööriyö  
10.10.2010

Tekijä Otsikko	Tatu Rautiainen Kiertokaasukompressorin rikkoutumissyyt
Sivumäärä Aika	75 sivua + 1 liite 10.10.2010
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Prosessitekniikka
Ohjaajat	Tuotantopäällikkö Jari Hätönen Lehtori Timo Meros
<p>Insinöörityön tarkoituksena oli selvittää Borealisen Porvoon polypropeenilaitoksen kaksivaiheisen, mäntätoimisen kiertokaasukompressorin venttiilirikkojen syyt vuonna 2010 tapahtuneissa alasajoissa sekä kehittää parannusehdotuksia, joilla tulevat rikkoutumiset estettäisiin. Työssä määritettiin myös asetuslämpötila kompressorin välijäähdyttimen jälkeiselle kaasulle syksyllä 2010 tehdyn prosessimuutoksen vuoksi.</p> <p>Rikkoutumisia analysoitiin tutustumalla automaatiojärjestelmästä löytyneisiin rikkoutumisia edeltäviin tietoihin. Vaurioitumissyiden ymmärtämiseksi työssä perehdyttiin prosessiin ja sen ominaisuuksiin. Komprimointia mallinnettiin tietokonesimulaatioiden avulla. Lisäksi tietoa kerättiin tehtaan automaatiojärjestelmästä, haastatteluista, raporteista, kaasuanalyseistä, laitevalmistajien materiaaleista sekä tutkimuksista.</p> <p>Kiertokaasukompressorin alasajon aiheuttivat kullakin kerralla nesteiskun hajottamat pakoventtiilit. Sylintereihin päätyneet neste oli pääosin kondensoitunutta haittatuotetta, oligomeeria. Rikkoutumistyyppinä löydettiin kaksi, ja ne eroavat toisistaan rikkoutumiskohdan perusteella. Ensimmäisellä kerralla hajosivat ensimmäisen vaiheen ja toisella toisen vaiheen pakoventtiilit. Ensimmäiseen vaiheeseen neste kulkeutui todennäköisesti kaasuseoksen mukana kapasiteetiltaan riittämättömän pisaranerotin ohi. Toisen vaiheen rikkoutuessa neste syntyi kompressorin sisällä, mutta epäselväksi jäi, oliko neste kondensoitunut välijäähdyttimessä ja kulkeutunut sylinteriin vai syntykö se paineen kasvaessa sylinterin sisällä. Tiettyjen tuotteiden ja niiden ominaisuuksien huomattiin lisäävän toisen vaiheen rikkoutumisriskiä.</p> <p>Uusien rikkoutumisten välttämiseksi työssä tehtiin useita ehdotuksia prosessin parantamiseksi. Nesteiden pääsyn estämiseksi ensimmäiseen vaiheeseen on syytä käynnistää selvitys pisaranerotin kapasiteetin kasvattamiseksi. Kompressorin ympäröivien säiliöiden tyhjennyskäytäntöjä päivitettiin. Muutoksia tuli myös automaatiojärjestelmän lukituslämpötiloihin sekä toisen vaiheen imulämpötilaan.</p>	
Avainsanat	kompressorin, rikkoutuminen, venttiili, nesteisku, kondensaatio, oligomeeri

Author Title	Tatu Rautiainen Reasons for the breakdowns of the recycle gas compressor
Number of Pages Date	75 pages + 1 appendix 10 October 2010
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation	Design and Operation of Processes
Instructors	Jari Hätönen, Production Manager Timo Meros, Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to explain the reasons for the valve breakdowns in a two-stage reciprocating compressor at Borealis polypropylene factory in Porvoo during the year 2010 and to develop improvements that would prevent any future breakdowns. Due to a process change in autumn 2010, this thesis also defined a setting temperature for the gas after the compressor intercooler.</p> <p>The breakdowns were analyzed by exploring the pre-breakdown data found in the automation system. In order to understand the breakdowns, the process and its properties had to be examined. The compressing was modeled using computer simulations. Data was also gathered from the plant automation system, interviews, reports, gas analyses, vendor materials and researches.</p> <p>The recycle gas compressor breakdown was each time caused by liquid impact breaking the discharge valves. The liquid that ended up into the cylinders was mainly a condensed, harmful product, an oligomer. Two different breakdown types were found, and they differed from each other by location. In the first case the first stage discharge valves probably broke down because some liquid ran along with the gas through an insufficient demister. In the second case, the second stage discharge valves broke down because liquid was condensed inside the compressor. However, it was unclear whether the liquid was condensed in the intercooler and then ran into the cylinder or whether it was condensed in the cylinder as the pressure started to rise. Certain products and their properties were found to increase the risk of the second stage breakdown.</p> <p>To avoid new breakdowns, several proposals were made in order to improve the process. A research about increasing the capacity of the demister must be launched to prevent liquids from entering the first stage of the compressor. The emptying policies of the surrounding containers were updated. Changes were also made to locking temperatures and the second stage suction temperature in the automation system.</p>	
Keywords	compressor, breakdown, valve, liquid impact, condensation, oligomer

## Sisälllys

1	Johdanto .....	7
2	Borealis Polymers Oy .....	8
3	Prosessikuvaus .....	9
3.1	Johdanto .....	9
3.2	Katalyytti ja raaka-aineet .....	10
3.3	Reaktorit .....	11
3.4	Kaasunerotus .....	12
3.5	Pelletointi .....	13
3.6	Tuotteet .....	14
3.7	Käsitteitä .....	15
3.7.1	Sulaindeksi (MFR) .....	15
3.7.2	Oligomeerit.....	15
4	Matalapaineokaasunerotus .....	18
4.1	Johdanto .....	18
4.2	Matalapaineokaasunerotussuodatin.....	19
4.3	Matalapainekiertoakaasun jälkisuodatin.....	20
4.4	Matalapainepesuri .....	20
4.5	Kiertokaasukompressorin pisaranerotin.....	21
4.6	Kiertokaasukompressorin imusuodattimet.....	22
4.7	Kiertokaasukompressorin .....	23
4.7.1	Yleistä.....	23
4.7.2	Rakenne.....	25
4.7.3	Venttiilit .....	26
4.7.4	Toiminta.....	27
4.7.5	Säädöt .....	27
4.8	Korkeapainepesuri ja eteenistripperi.....	28
5	Rikkoutumiset .....	29
5.1	Johdanto .....	29
5.2	Rikkoutuminen 18.3.2009.....	29
5.3	Rikkoutuminen 8.4.2010 .....	31
5.4	Rikkoutuminen 22.5.2010.....	33

5.5	Huolto 27.7.2010.....	35
6	Kaasuanalyysit .....	37
6.1	Johdanto .....	37
6.2	Mittaustulokset 17.4.2009 .....	37
6.3	Mittaustulokset 8.5.2009 .....	40
7	Osaprosessin simulointi .....	44
7.1	Johdanto .....	44
7.2	Tulokset .....	45
8	Rikkoutumissyiden analysointi.....	49
8.1	Tuotteiden vaikutukset.....	49
8.2	Prosessisuunnittelu .....	50
8.2.1	Pisaranerotin .....	50
8.2.2	Imusuotimet.....	51
8.2.3	Venttiilit .....	51
8.3	Prosessiparametrit.....	52
8.4	Vesityskäytännöt.....	53
8.5	Rikkoutumishistorian tutkiminen .....	55
8.6	Nesteiden alkuperä.....	56
8.6.1	Ensimmäisen vaiheen rikkoutumiset.....	56
8.6.2	Toisen vaiheen rikkoutumiset .....	57
8.7	Käytännön ongelmia .....	58
9	Parannusehdotukset .....	60
9.1	Johdanto .....	60
9.2	Haittatuotteiden syntymisen estäminen .....	60
9.3	Haittatuotteiden poistaminen prosessista.....	61
9.3.1	Jatkuvatoiminen poistaminen .....	61
9.3.2	Vesityskäytännöt.....	63
9.3.3	Prosessisuunnittelu.....	64
9.4	Ajoparametrit.....	64
9.5	Nesteiskuista aiheutuneiden vahinkojen estäminen.....	66
9.6	Muut ennaltaehkäisevät toimet .....	66
10	Yhteenveto .....	68
10.1	Rikkoutumisten syyt .....	68
10.2	Parannusehdotukset .....	69

10.3	Lopuksi.....	70
	Lähteet.....	71
	Liitteet.....	75

## 1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena oli paneutua Borealiksen Porvooon polypropeenilaitoksen kiertokaasukompressorin kahden rikkoutumisen syihin ja kehittää parannusehdotuksia uusien rikkoutumisten ja sitä kautta rahallisten tappioiden välttämiseksi. Työssä määritettiin myös asetuslämpötila kompressorin välijäähdyttimen jälkeiselle kaasulle syksyllä 2010 tehdyn prosessimuutoksen vuoksi. Tavoitteiden saavuttamiseksi vaadittiin laaja-alaista perehtymistä polypropeenintuotantoprosessiin, sen toimintaan, luonteeseen sekä erikoisilmiöihin.

Kiertokaasukompressorin tehtävänä on palauttaa reaktoreihin ylimäärin syötetty polymerointireaktion lähtöaine puhdistuksen jälkeen takaisin syöttöön. Komprimoitu kaasuseos koostuu pääosin propeenista  $C_3H_6$ , joissain tuotteissa mukana on myös eteeniä  $C_2H_4$ . Seoksesta löytyy myös pieniä määriä prosessin kannalta tarpeettomia ja jopa haitallisia komponentteja.

Kompressorin rikkoutumiset keväällä 2010 liittyvät nesteiskujen vaurioittamiin venttiileihin. Työssä tutkittiin rikkoutumisten mahdollisia aiheuttajia niin operoinnin, ajo-olosuhteiden kuin prosessisuunnittelunkin kannalta. Parannusehdotuksia listattaessa käytiin monipuolisesti läpi keinoja, joilla voidaan eri tavoin estää haitallisten aineiden pääsy kompressorin sylintereihin.

Työ on tilaajalle tärkeä, sillä kiertokaasukompressorin kustakin rikkoutumisesta aiheutuu laitokselle tuotannollisesti suuret, yli sadan tuhannen euron tappiot kaasuseoksen kulkeutuessa kompressorin ohi turvasoihtuun poltettavaksi uudelleenkäytön sijasta.

## 2 Borealis Polymers Oy

Kansainväliseen Borealis-konserniin kuuluva, Suomessa toimiva Borealis Polymers Oy on sijoittanut toimintansa Pohjoismaiden suurimpaan kemianteollisuuden keskittymään Porvoon Kilpilahteen, Neste Oilin öljynjalostamon välittömään läheisyyteen. Borealiksen Suomen tuotantolaitokset ovat konsernin pohjoisimmat ja tuottavat hyödykkeitä pääosin Pohjoismaiden, Venäjän ja Itä-Euroopan markkinoille. [1.]

Borealiksen tuotantoyksiköt Porvoossa koostuvat viidestä eri laitoksesta. Muun muassa Neste Oilin öljynjalostamolta raaka-aineensa saava krakkeri tuottaa eteeniä ja propeenii paikkakunnan muiden laitosten käyttöön sekä butadieeniä myyntiin muulle teollisuudelle. Fenoli- ja aromaattilaitos tuottavat Euroopan ainoana konserniin kuuluvana yksikkönä fenolia, asetonia, bentseeniä ja kumeenia eri kemianteollisuuden tarpeisiin.

Edellä mainittujen laitosten lisäksi Porvoossa on kolme muovitehdasta, joissa tuotetaan korkeatiheyksistä polyeteeniä, matalatiheyksistä polyeteeniä sekä polypropeenia muoviteollisuuden monipuoliseen käyttöön niin kotimaahan kuin ulkomaillekin. [1.]

Borealiksella työskentelee Porvoossa vajaa tuhat työntekijää, jotka jakautuvat tuotantoyksiköiden lisäksi hallinnon, innovaatiokeskuksen sekä kahden koetehtaan kesken. Taulukossa 1 on esitetty Porvoon tuotantopaikkakunnan vuosittaisia tuotantomääriä viiden eri tuotteen kesken. [1.]

*Taulukko 1. Porvoon tuotantolaitosten vuosituotantoa. [1.]*

<b>Tuote</b>	<b>Kapasiteetti (kt/a)</b>
Eteeni	380
Propeeni	220
Fenoli	185
Polyeteeni	390
Polypropeeni	220

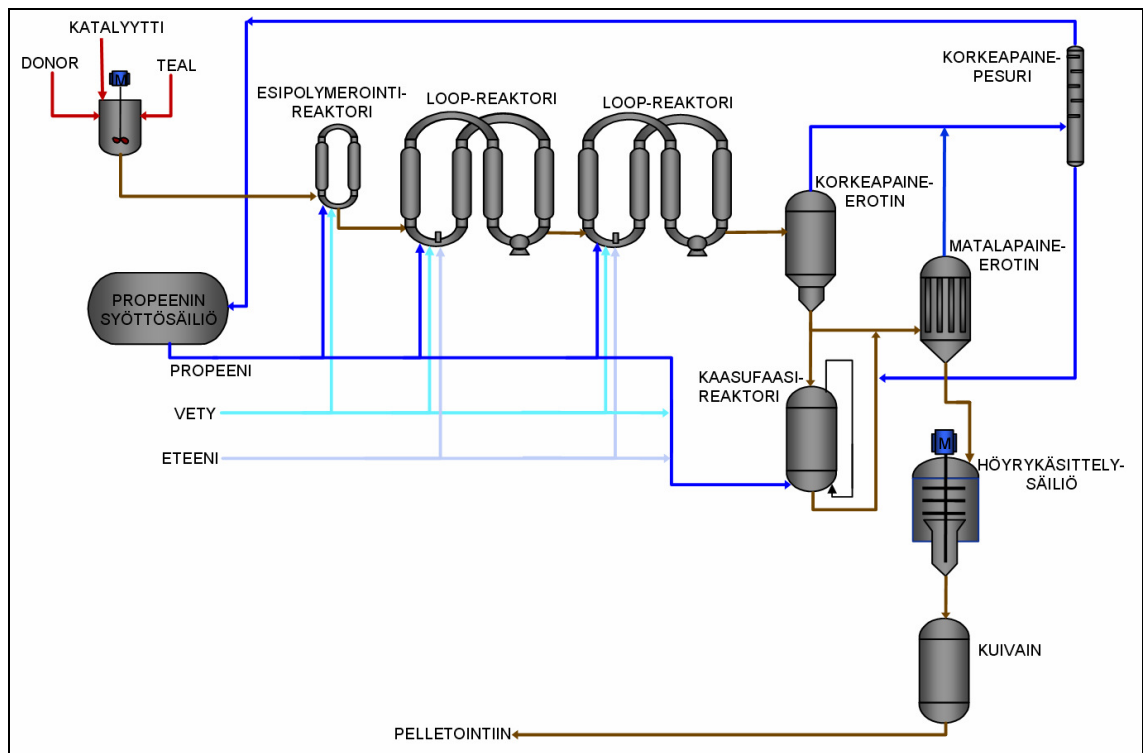


### 3 Prosessikuvaus

#### 3.1 Johdanto

Porvooon polypropeenilaitos koostuu kahdesta eri osasta. Laitoksella käytettävä Spheripol-prosessi alkaa polymeroinnista, joka käsittää sisäänsä raaka-aineet ja katalyyttisyötön, reaktorit sekä kaasunerotuksen. Prosessin toinen osa on pelletointilaitos, jossa polypropeenipulverin sekaan lisätään halutut lisäaineet, jonka jälkeen seos ekstrudoidaan pelleteiksi. Tämän jälkeen tuote on valmis varastoitavaksi ja toimitettavaksi asiakkaalle. [2.]

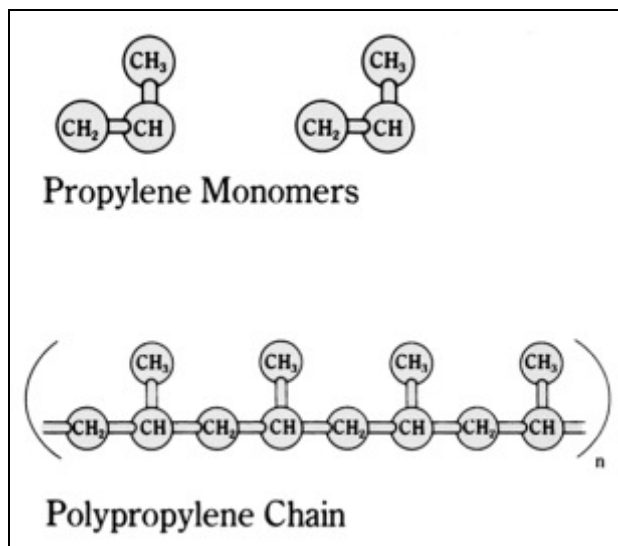
Polypropeenilaitoksen polymeroinnin yksinkertaistettu prosessikaavio on esitetty kuvassa 1. Kaaviossa ruskea väri kuvaa prosessin päävirtaa, sinisen sävyt puolestaan sivuvirtoja ja raaka-ainesyöttöjä. Punaiset nuolet edustavat katalyytti- ja kokatalyyttisyöttöjä. Seuraavissa luvuissa käydään pääpiirteittäin läpi PP-laitoksen rakenne ja toiminta.



Kuva 1. Polymeroinnin yksinkertaistettu prosessikaavio [3].

### 3.2 Katalyytti ja raaka-aineet

Polypropeenilaitoksella valmistetaan polypropeenia liittämällä propeenimolekyyliä toisiinsa kemiallisessa polymerointireaktiossa. Reaktion kiihdyttämiseen käytetään Ziegler-Natta-katalyyttiä. Yleisesti polypropeenin moolimassan keskiarvo liikkuu välillä 220 000–700 000 g/mol. Propeeni kuuluu alkeeneihin, joten sen hiiliatomien välillä on yksi yksinkertainen ja yksi kaksinkertainen kovalenttinen sidos. Ketjuuntuessaan lähtöaineen kaksoissidokset muuttuvat yksinkertaisiksi. Kuvassa 2 on esitettyä polypropeenimolekyylin rakenneosat ja homopolymeerin ketjurakenne yksinkertaistetussa muodossa. [4.]



Kuva 2. Polypropeeniketjun perusrakenne. [4.]

Laitoksella käytetty katalyytti on kiinteää ainetta, joka on dispergoitu öljyrasvaseokseen. Katalyyttiä täydentää kaksi kokatalyyteiksi kutsuttua ainetta, jotka lisätään katalyytin sekaan ennen esipolymerointireaktoria. Kuvan 1 vasemmassa ylänurkassa lisättävät kokatalyytit ovat trietyylialumiini (TEAL) ja donor. Polypropeenin valmistuksessa on Porvoon tehtaalla käytössä kaksi eri katalyyttivaihtoehtoa (standard, new) ja kolme donor-laatua (1, 2, 3). [2; 3.]

Katalyyttiä syötetään prosessiin jatkuvatoimisesti, sillä se muurautuu reaktiossa polymeeripartikkelin sisälle. Katalyyttiä kulkeutuu jatkuvasti pulverin mukana pois reaktoreista, ja sen vuoksi sitä pumpataan esipolymerointireaktoriin korvaava määrä reaktion ylläpitämiseksi. [2.]

Polypropeenin tuotannossa kolme raaka-ainetta ovat syöttöpaikasta riippuen nestemäinen tai kaasumainen propeeni, eteenikaasu sekä vetykaasu. Propeeni on polymeeriketjun perusrakenneyksikkö, eteeniä syötetään prosessiin joissain tuotteissa muokkaamaan sen ominaisuuksia haluttuun suuntaan. [2; 3.]

Vedyn avulla katkaistaan polymeeriketjun muodostus ja sen määrällä säädetään ketjujen pituutta. Mitä enemmän vetyä reaktoreihin syötetään, sitä lyhyempiä ketjuja niissä muodostuu. [2.]

Propeenin syöttösäiliö näkyy kuvan 1 vasemmassa alanurkassa, eteeni ja vety tulevat tehtaalle suoraan putkilinjoja pitkin. Polymeroinnissa reaktioon tarvittavia kemikaaleja on melko vähän, mutta niiden tärkeys on sitäkin suurempi. [2; 3.]

### 3.3 Reaktorit

Reaktoreja on Spheripol-prosessissa neljä. Sarjassa olevista reaktoreista kolme ensimmäistä ovat putkireaktoreja ja viimeinen on leijupetireaktori, joka ei ole käytössä kaikkia tuotteita tehtäessä. Polymerointireaktio on eksoterminen ja vaatii siksi jäähdytystä kaikissa reaktoreissa. [2; 3.]

Laitoksen polymeerintuotanto alkaa esipolymerointireaktorista, joka on pienikokoinen putkireaktori. Reaktoriin syötetään pääreaktoreja maltillisemmassa lämpötilassa nestemäistä propeenaa, joka alkaa ketjuuntua sinne syötetyn katalyytin ja kokatalyyttien avustuksella. Esipolymerointireaktori, kuten kaksi seuraavaa loop-reaktoria, on aina täynnä nestettä, mutta sen kiintoainepitoisuus ja viipymäaika ovat vielä hyvin pieniä. Reaktoriin syötetään myös vetykaasua polymeeriketjun pituuden säätämiseksi. [2; 3.]

Esipolymerointireaktoria seuraa kaksi nk. loop-reaktoria, jotka ovat edelliseen verrattuna valtavia, keskenään samankokoisia, sarjassa olevia putkireaktoreita. Loop-reaktoreihin syötetään propeenin ja vedyn lisäksi myös eteeniä tuotteesta riippuen. Kolmen ensimmäisen reaktorin jäähdytys on toteutettu vaipoissa virtaavan jäähdytysveden avulla. [2; 3.]

Prosessissa on lisäksi reaktori, joka eroaa toiminnaltaan ja rakenteeltaan edellisistä. Tätä kutsutaan kaasufaasireaktoriksi, joka on leijupetireaktori, jossa kierrätetään alakautta polypropeenipatjan läpi kaasumaista propeenia, eteeniä ja vetyä. Reaktiolämmön aiheuttaman lämpöenergian poisto on kaasufaasireaktorissa toteutettu jäähdyttämällä patjan läpi virtaavaa kiertokaasua. Reaktoria käytetään tuotettaessa heterofaasisia kopolymeeriä eli nk. block-kopolymeeriä, josta kerrotaan lisää luvussa 3.6. [2; 3.]

#### 3.4 Kaasunerotus

Jälkimmäisestä loop-reaktorista tulevan slurryn polypropeenipitoisuus on n. 55 massa-prosentin luokkaa. Tämä tarkoittaa, että reaktorista lähtevästä virtauksesta vielä lähes puolet koostuu lähtöaineesta, nestemäisestä propeenista, joka tulee erottaa polymeeristä. Nestemäinen propeeni höyrytetään pitkässä flash-höyryvaippaputkessa, minkä jälkeen kaasu ja pulveri saapuvat korkeapaine kaasunerotussäiliöön. Säiliö käyttäytyy syklonin tavoin erottaen suurimman osan propeenikaasusta ja poistaen sen säiliön yläkautta pulverin jäätyä säiliön pohjalle. [2; 3.]

Korkeapaine kaasunerotussäiliön jälkeen pulveri ohjataan matalapaine kaasunerotus-suodattimeen joko suoraan tai kaasufaasireaktorin kautta. Matalapaine kaasunerotus-suodatin on säiliö, jossa lähes kaikki pulverin mukana tulleesta nestemäisestä monomeerista haihtuu pois tuotteen joukosta. Matalapaine kaasunerotusta käsitellään tarkemmin luvussa 4, sillä se on avainasemassa tässä insinööriyössä. [2; 3.]

Kuvan 1 oikeassa ylänurkassa oleva kolonni on korkeapainepesuri, jonne kaasumainen propeeni korkeapainekaasunerotussäiliöstä kulkeutuu. Siinä kaasu pestään ylhäältä alas virtaavan nestemäisen propeenin avulla, jonka jälkeen pesty kaasu kulkeutuu lämmönvaihtimeen, nesteytyy ja pumpataan propeenin syöttösäiliöön uudelleensyöttöä varten. Kolonnin pohjalta pois valuva pesupropeeni höyrytetään ja palautetaan matalapainekaasunerotussuodattimelle. [2; 3.]

Matalapainekaasunerotussuodattimen pohjalta polypropeenipulveri valuu höyrykäsittelysäiliöön, jossa sen pohjasta syötettävän höyryn avulla pulverista stripataan pois viimeiset hiilivedyt ja deaktivoidaan jäljellä oleva katalyytti. Höyrykäsittelysäiliön päältä lähtee putkilinja hiilivetytypitoisten kaasujen palauttamiseksi Borealiksen krakkerille uudelleenkäyttöä varten. [2; 3.]

Höyrykäsittelysäiliön jälkeen on prosessissa jäljellä enää yksi säiliö, polymeerikuivain, jossa nimensä mukaisesti polypropeenipulverista kuivataan siihen höyrystä sitoutunut kosteus kuuman typpikaasun avulla. Kuivaimen pohjalle kasaantuva pulveri siirretään typpipuhaltimella pelletointilaitokseen. [2; 3.]

### 3.5 Pelletointi

Pelletointilaitos on korkea rakennus, jossa välisiilojen kautta yläsiiloon siirretty polypropeenipulveri kulkeutuu asteittain alas painovoiman vaikutuksesta välivaiheiden kautta. Pelletoinnissa on kaksi rinnakkaista tuotantolinjaa, joissa pulverin joukkoon lisätään erilaisia lisäaineita, kuten ultraviolettisäteilyltä suojaavia aineita, hapettumisenestoaineita tai vaikka väriaineita. [2; 5.]

Sekoituksen jälkeen pulveriseos kulkeutuu kummallakin linjalla ekstruuderiin eli pursottimeen. Ekstruuderissa seos sulatetaan, homogenisoidaan ja pursotetaan reikälevyn läpi ruuvikuljettimen ja sulapumpun avulla. Levyä vasten pyörivä puukkopakka katkaisee spagettimaisen muovin pelleteiksi, jotka kulkevat levyille pumpatun, pelletit jäähdyttävän veden mukana keskipakoerottimeen. Tämä linkoaa veden pois ja siirtää pelletit täryseulalle. Seulalla pelleteistä seulotaan pois liian suuret ja liian pienet yksilöt. [2.]

Täryseulan jälkeen pelletit siirtyvät lokerosyöttimen kautta pneumaattisesti sekoitus-sii-  
loon, jossa tuote-erä homogenisoidaan kierrättämällä pellettejä siilon sisällä kompres-  
sorin voimalla. Kierrätyksen jälkeen pelletit siirretään varastosiiloalueelle ja sieltä jonain  
päivänä kohti asiakasta joko bulk-tavarana tai pakattuna. [2.]

### 3.6 Tuotteet

Laitoksella tuotetaan kolmea erilaista polymeeriä. Yksinkertaisinta tuotetta kutsutaan  
homopolymeeriksi, jonka ketju sisältää nimensä mukaisesti vain yhtä monomeeria,  
propeenia. Kyseisessä tuotteessa ei käytetä lainkaan kaasufaasireaktoria, vaan poly-  
meerivirta kulkee korkeapaineakaasunerotussäiliöstä suoraan matalapaineakaasunerotus-  
suodattimelle. Homopolymeeri on erittäin jäykkää, lämmönkestävää ja helposti työstet-  
tävää, mutta sillä on huonot iskunkestävyys- ja kylmänkesto-ominaisuudet. [2; 6.]

Toinen tuote, random-kopolymeeri, valmistetaan samalla tavalla kuin homopolymeeri,  
mutta ero siihen on loop-reaktoreihin syötettävä eteenikaasu. Eteeni polymeroituu ket-  
juun propeenin sekaan alentaen tuotteen sulamispistettä. Muovi on kiiltävää sekä lä-  
pinäkyvää, ja sitä käytetään mm. ruiskupuristuksessa sekä muottiinpuhalluksessa. [2;  
7.]

Kaasufaasireaktoria käytetään heterofaasista block-kopolymeeriä tuottaessa. Loop-  
reaktoreissa syntynyt homopolymeeri ohjataan tällöin korkeapaineakaasunerotussäiliön  
kautta reaktoriin, jossa kaasumaiset monomeerit propeeni ja eteeni polymeroituvat  
polymeeripartikkelin huokosiin. Heterofaasista kopolymeeriä käytetään hyvin monipuo-  
lisissa sovelluksissa. Sillä on erinomainen jäykkyys, kylmänkesto ja iskunkestävyys,  
jotka soveltuvat varsinkin putkituotteisiin. [2; 8.]

### 3.7 Käsitteitä

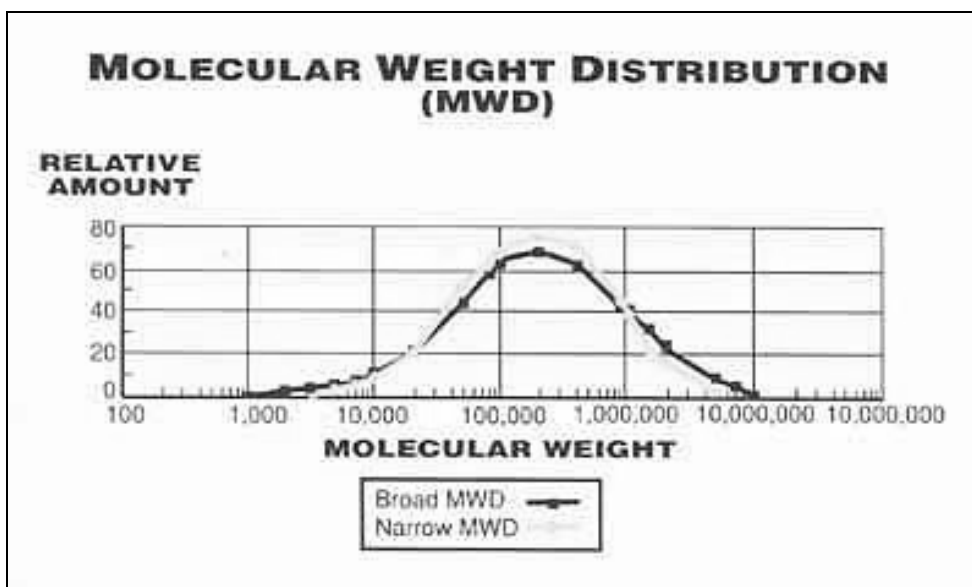
#### 3.7.1 Sulaindeksi (MFR)

Oleellinen tunnusluku muovinvalmistuksessa ja sen laadunvalvonnassa on käsite sulaindeksi (Melt Flow Rate). Indeksillä kuvataan muovin moolimassaan verrannollisen sisäisen viskositeetin (intrinsic viscosity) vaikutusta muovin juoksevuuteen tietynkokoisien reiän läpi aikayksikköä kohden. [2; 9.]

Mittalaitteessa, jolla indeksi määritetään, on lämmitetyssä sylinterissä mäntä, joka työntää sulaa muovia reiän läpi vakiopaineella. Suureen yksikkö ilmaistaan grammoina kymmentä minuuttia kohden. Sulaindeksi on suoraan verrannollinen reaktoreihin syötetyn vedyn määrään nähden. Suurilla vetysyötöillä saavutettavat korkean sulaindeksin tuotteet ovat lyhytketjuisia sekä juoksevia. [2; 9.]

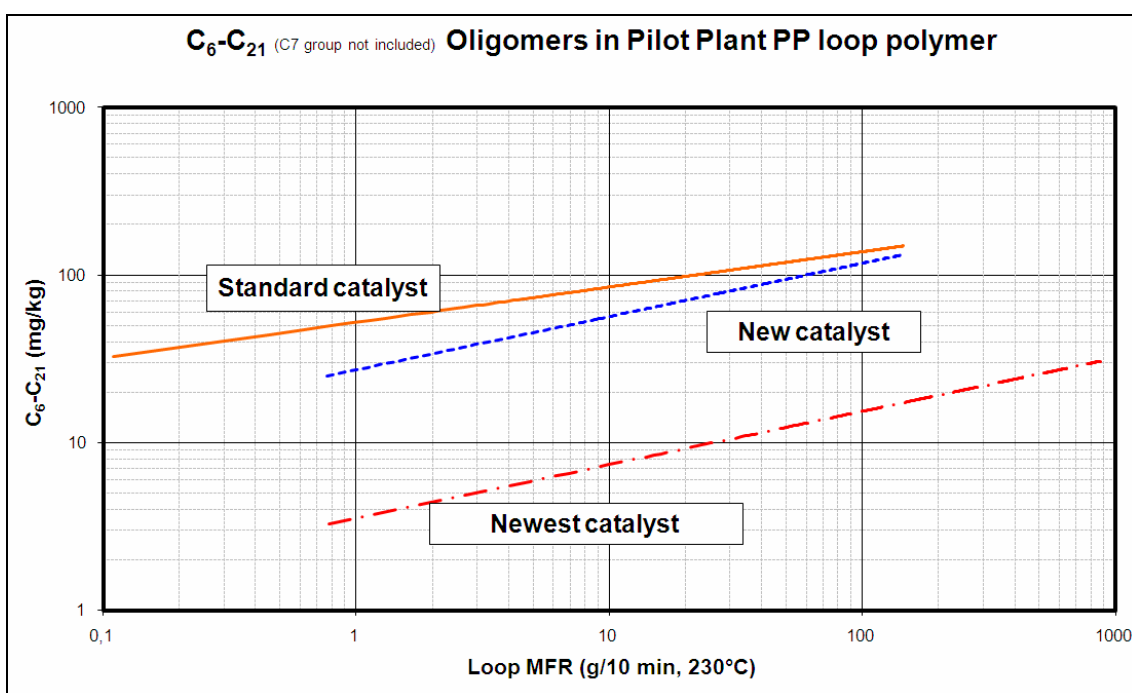
#### 3.7.2 Oligomeerit

Polypropeenilaitoksella käytettävälle katalyytille on ominaista, että reaktoreissa syntyvän polymeerin moolimassa on jakaumaltaan hyvin laaja, kuten seuraavalla sivulla olevasta kuvasta 2 nähdään. Tämä tarkoittaa sitä, että keskiarvon ympärille muodostuu huomattavasti pidempiä sekä lyhempiä hiilivetyketjuja. Ne ovat muovin rakenteen ja ominaisuuksien kannalta tärkeitä, mutta varsinkin kaikkein pienimmät molekyylit aiheuttavat prosessissa päänvaivaa. Näitä polymeeriin verrattuna äärimmäisen lyhyitä, kymmenen hiilen luokkaa olevia ketjuja kutsutaan oligomeereiksi. [4; 10.]



Kuva 2. Polypropeenin moolimassajakauma. [4.]

Oligomeerien synnystä tiedetään niiden riippuvuus vetyyn ja sitä kautta sulaindeksiin: mitä enemmän tuotteessa on vetyä, sitä enemmän oligomeereja prosessissa syntyy, kuten kuvan 3 diagrammista tulee ilmi. Korrelaatio on täysin samankaltainen polymeerointiin käytettävästä katalyytistä riippumatta. Laajojen koetehtaalla tehtyjen tutkimusten perusteella on todettu ainoastaan vetymäärillä olevan merkitsevä vaikutus oligomeerien määrään prosessissa. [10; 11.]



Kuva 3. Sulaindeksin vaikutus eripituisten oligomeerien syntyyn. [11.]



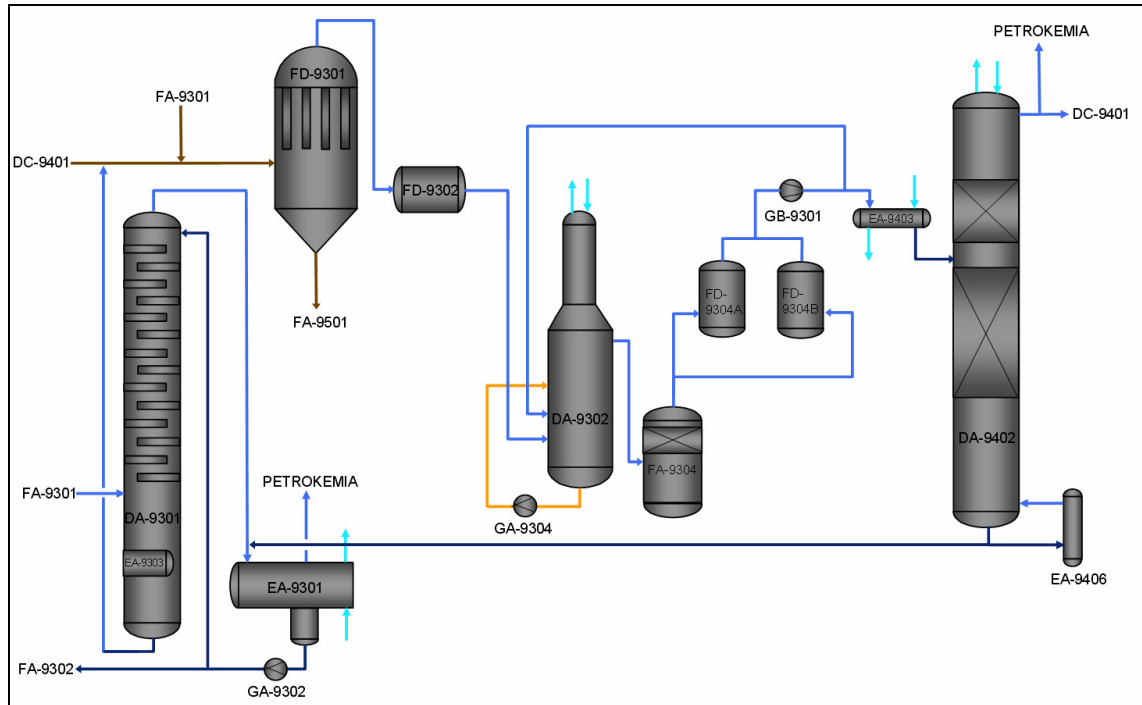
Oligomeerien poistoon tarkoitetuista tyhjennyspaikoista huolimatta niitä jää prosessiin. Oligomeerien mahdollisia yhteyksiä kiertokaasukompressorin hajoamisiin käydään läpi tässä työssä.

## 4 Matalapaineikaasunerotus

### 4.1 Johdanto

Tässä pääluvussa käsitellään tarkemmin matalapaineikaasunerotusta, johon työssä pääosaa näyttelevä kiertokaasukompressori ympäristöineen kuuluu. Osaprosessin ymmärtäminen on välttämätöntä ongelman luonteen käsittämiseksi ja ansaitsee siksi lähemmän tarkastelun.

Luvussa on kappaleittain käsitelty matalapaineikaasunerotuksen yksikköprosessien tehtävät sekä ominaisuudet. Matalapaineikaasunerotuksen yksinkertaistettu prosessikaavio tunnuksineen on esitetty alla kuvassa 4 ja taulukossa 2. Kuvassa ruskea väri kuvaa pääpolymeerivirtaa, vaaleansininen kaasuvirtauksia ja tummansininen nestevirtauksia. Keltaisella värillä on esitetty öljy-rasvakierto ja turkoosilla jäähdytysvesi.



Kuva 4. Matalapaineikaasunerotuksen prosessikaavio. [3.]

Taulukko 2. Matalapaine kaasunerotukseen liittyviä laitetunnuksia. [12.]

<b>Laitetunnus</b>	<b>Laite</b>
DA-9301	Korkeapainepesuri
DA-9302	Matalapainepesuri
DA-9402	Eteenistripperi
DC-9401	Kaasufaasireaktori
EA-9301	Korkeapainepesurin lauhdutin
EA-9303	Korkeapainepesurin pohjankiehutin
EA-9403	Eteenistripperin syötön jäähdytin
EA-9406	Eteenistripperin pohjankiehutin
FA-9301	Korkeapaine kaasunerotussäiliö
FA-9302	Propeenin syöttösäiliö
FA-9304	Kiertokaasukompressorin pisaranerotin
FA-9501	Höyrykäsittelysäiliö
FD-9301	Matalapaine kaasunerotussuodatin
FD-9302	Matalapainekierto kaasun jälkisuodatin
FD-9304A/B	Kiertokaasukompressorin imusuodattimet
GA-9302	Korkeapainepesurin pumppu
GA-9304	Matalapainepesurin kiertopumppu
GB-9301	Kiertokaasukompressorin

#### 4.2 Matalapaine kaasunerotussuodatin

Matalapaine kaasunerotussuodattimelle tuleva syöte koostuu pääosin kaasuseoksesta ja polymeeripulverista. Mukana on kuitenkin pieni osa nestemäistä lähtöainetta, joka pitää erottimessa höyrystä ja poistaa. Tämän mahdollistaa suhteellisen matala 1,7 bar paine, jossa lähes kaikki nestemäiset komponentit höyrystyvät ja poistuvat muiden kaasujen mukana säiliön yläosasta kulkiessaan ensin pussisuotimien läpi. Suotimien tarkoitus on estää pulverin ja pölyn pääseminen kaasulinjaan. [2; 13.]

Matalapaineikaasunerotussuodattimen pohjalla on jatkuvasti polymeerikerros, jonka pinnankorkeutta säädetään pohjaventtiilin avulla. Säiliö ei saa päästä tyhjäksi. Pussisuotimia pulssitetaan automaattisesti säännöllisin väliajoin korkeapainepesurin päältä tulevasta sivulinjasta propeenikaasulla, jotta pussit eivät tukkeudu pölystä. [2.]

#### 4.3 Matalapainekierto kaasun jälkisuodatin

Matalapaineikaasunerotussuodattimen jälkisuodatin toimii lähinnä varotoimenpiteenä varmistuen, etteivät esimerkiksi pussisuotimien rikkouduttua linjaan päässeet kiinteät partikkelit etene kohti matalapainepesuria ja kierto kaasukompressoria. [2.]

#### 4.4 Matalapainepesuri

Jälkisuodattimelta kaasut etenevät kohti matalapainepesuria, kolonnia, jossa kokatalyysi TEAL poistetaan kaasusta vastavirtaperiaatteella. Kaasu saapuu kolonnin alaosaan, josta se paine-eron vaikutuksesta nousee ylöspäin. Kolonnissa imeyttävänä elementtinä toimii öljy-rasvaseos, jota kierrätetään kolonnin vieressä olevan pumpun avulla. Seos pumpataan kolonnin yläosaan, josta se valuu alaspäin välipohjia pitkin joutuen kontaktiin kaasun kanssa. Trietyylialumiini siirtyy näin kaasusta öljy-rasvaseokseen. [2.]

Ennen kaasun poistumista matalapainepesurin huipulta prosessin seuraavaan vaiheeseen jäähtyy se vielä kolonnin yläosassa olevan lämmönvaihtimen avulla. Vaihtimen tarkoituksena on jäähdyttää kaasua ja kondensoida siitä helposti nesteytyviä komponentteja sekä saada ne jäämään öljy-rasvaseokseen tai kolonnin jälkeiseen pisaranerottimeen. Jäähdyttävänä elementtinä toimii jäähdytysvesi. [2; 3.]

#### 4.5 Kiertokaasukompressorin pisaranerotin

Matalapainepesurilta poistuva kaasu kulkeutuu kolonnin vieressä olevan pisaranerotin läpi, jonka tarkoituksena on poistaa kaasusta sen mukana kulkeutuvat nesteet. Kaasu saapuu pisaranerotin alaosaan ja läpäisee ylös kulkiessaan metalliverkon (kuva 5), johon kaasun mukaan päässyt öljy-rasvaseos sekä nestemäiset oligomeerit pysähtyvät ja valuvat säiliön pohjalle. [2.]



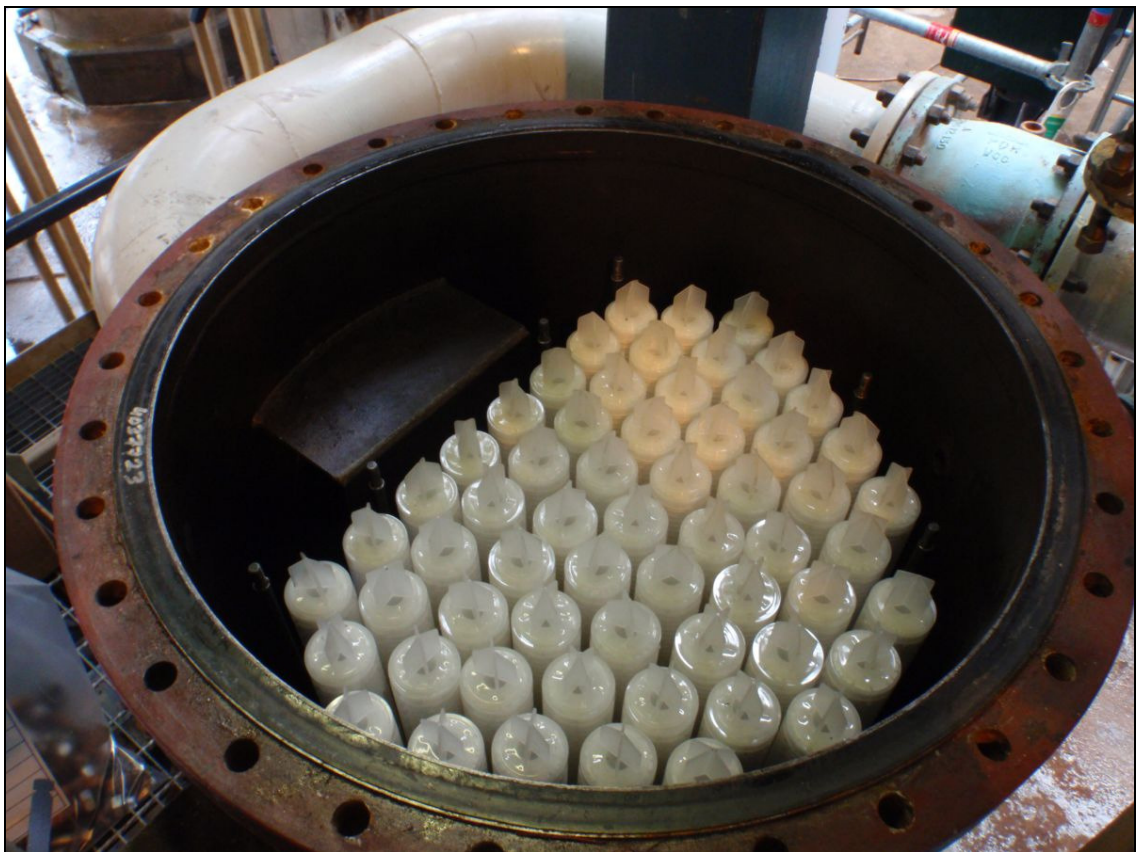
*Kuva 5. Pisaranerotin metalliverkko.*

Öljy-rasvaseos pumpataan pisaranerotimesta takaisin matalapainepesuriin paikallisesti kerran vuorossa tai huomattaessa matalapainepesurin näkölasista pinnankorkeuden laskeneen riittävästi. [2.]

#### 4.6 Kiertokaasukompressorin imusuodattimet

Pisaranerottimelta poistunut kaasu ohjataan kahdesta identtisestä imusuodattimesta toisen läpi kiertokaasukompressorille. Toinen polypropeenikasettitäytteisistä säiliöistä on käytössä ja toinen varalla. Suotimien tarkoitus on estää kiinteiden partikkelien pääsy kompressorille. [2.]

Avattu imusuodatin on esillä kuvassa 6. Kaasu saapuu säiliöön kuvan vasemmassa yläreunassa olevaa putkea pitkin törmäten levyyn, joka levittää kaasuvirtauksen tasaisesti koko kasettipinta-alalle. Säiliössä on reiällinen välipohja, jonka alapuolelta kasettien läpi virrannut kaasu kulkeutuu putkea pitkin kiertokaasukompressorille.

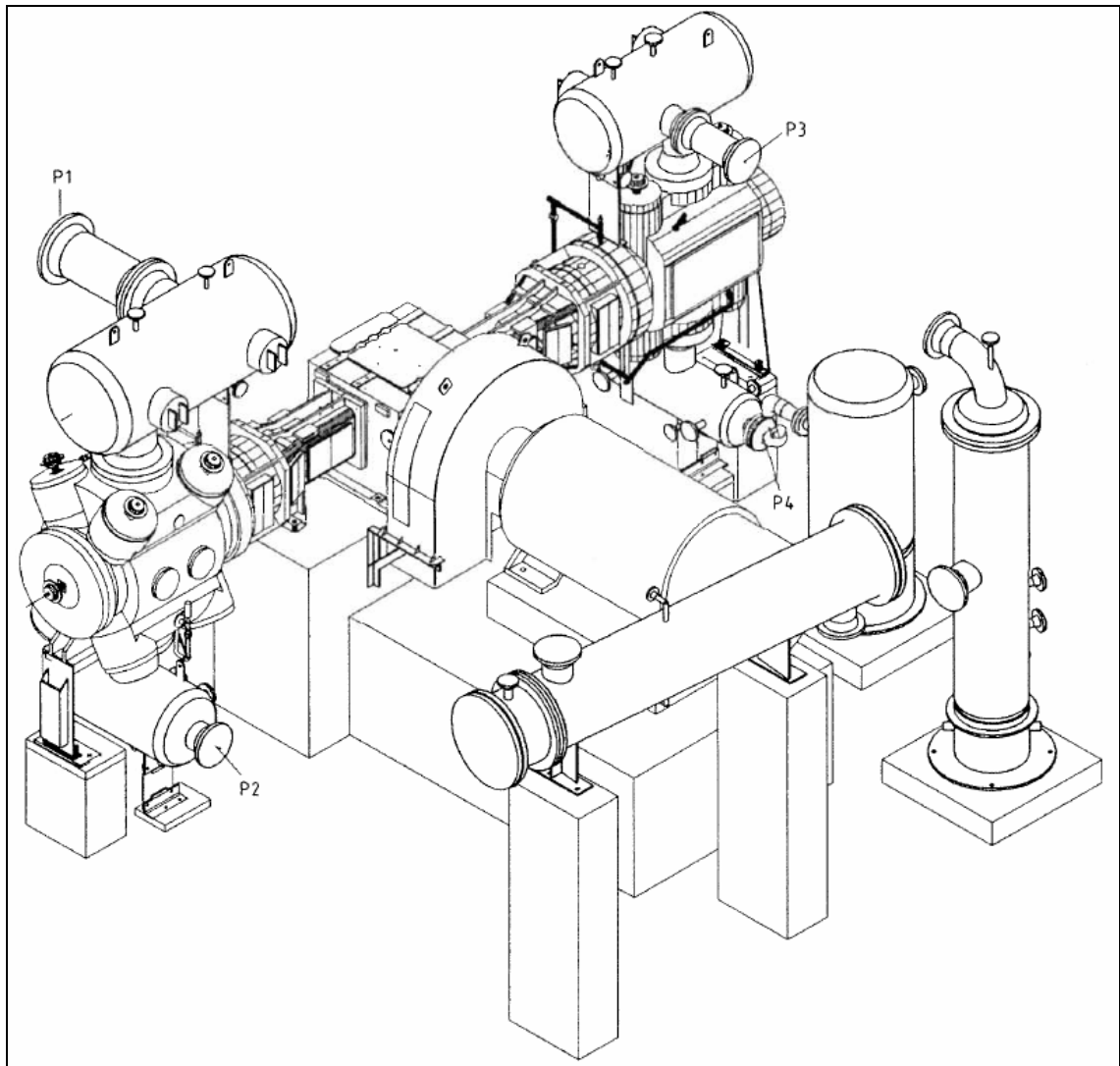


*Kuva 6. Kiertokaasukompressorin imusuodatin avattuna.*

## 4.7 Kiertokaasukompressorit

### 4.7.1 Yleistä

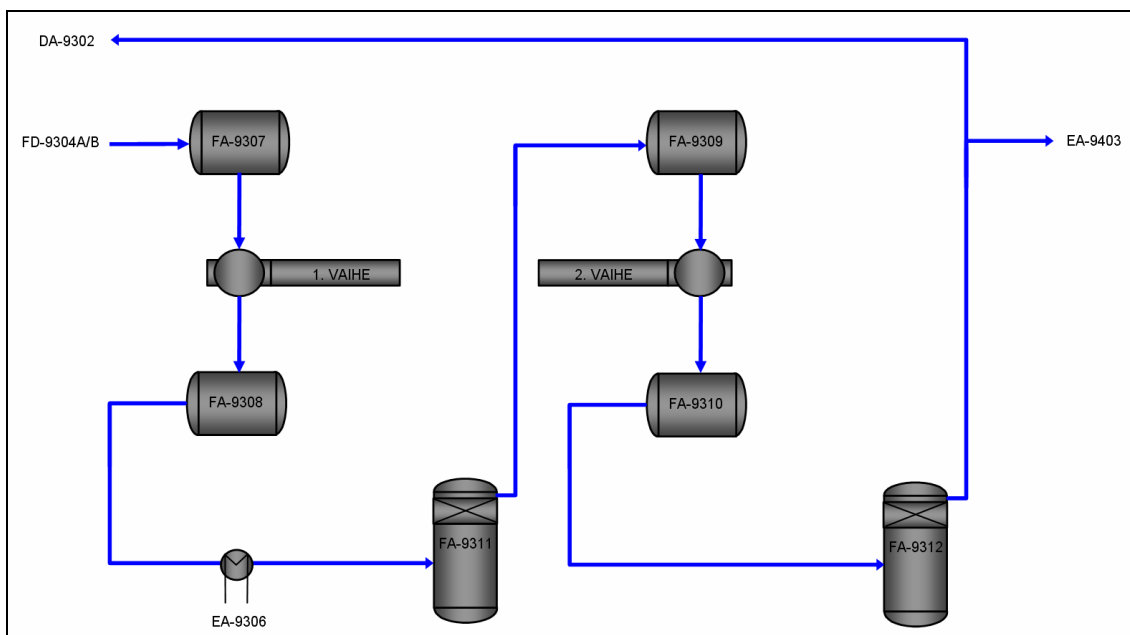
Polypropeenilaitoksen kiertokaasukompressorit on Thomassenin valmistama kaksivaiheinen mäntäkompressorit, joka on ollut laitoksella alusta lähtien. Sitä on tosin päivitetty muutama vuosi takaperin tehtaan kapasiteetinnoston yhteydessä. Kompressorin yleisnäkymä on esitetty kuvassa 7. Kuvassa näkyy kompressorin osat ja sitä ympäröivät säiliöt. Putkilinjat sen sijaan kuvasta puuttuvat. [14.]



Kuva 7. Thomassen-kiertokaasukompressorit. [14.]

Kuvassa 6 näkyy keskellä kompressorin moottori. Sen päästä lähtevät poikittain vasemmalle ensimmäinen ja oikealle toinen vaihe. Vaiheiden ylä- ja alapuolella näkyvät poikittain olevat säiliöt ovat sykäyksenvaimentimia. Etualalla oleva poikittainen säiliö on lämmönvaihdin ja oikealla pystyssä olevat kaksi säiliötä ovat kummankin vaiheen pisanerotussäiliöt.

Kompressorin ja sen lähiympäristön rakenne on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 8. Laitetunnukset ovat listattuna prosessikaavion alle taulukkoon 3. Kompressorin rakenteeseen ja toimintaan perehdytään tarkemmin seuraavissa luvuissa.



Kuva 8. Kiertokaasukompressorin prosessikaavio. [3.]

Taulukko 3. Kiertokaasukompressorin laitetunnukset. [12.]

Laitetunnus	Laite
EA-9306	Kiertokaasukompressorin välijäähdytin
FA-9307	Sykäyksenvaimennin
FA-9308	Sykäyksenvaimennin
FA-9309	Sykäyksenvaimennin
FA-9310	Sykäyksenvaimennin
FA-9311	1. vaiheen pisanerotussäiliö
FA-9312	2. vaiheen pisanerotussäiliö



#### 4.7.2 Rakenne

Kompressorin sähkömoottori liikuttaa kahta mäntää kampiakselin välityksellä. Männät ovat samassa tasossa toisiinsa nähden ja iskevät toisistaan poispäin samanaikaisesti. Kompressorin ensimmäisen vaiheen puolella on neljä imuventtiiliä ja neljä pakoventtiiliä. Toisessa vaiheessa kumpaakin venttiilityyppiä on kaksi. Imu- ja pakoventtiilit toimivat jousikuormitteisesti. Toisen venttiilityypin ollessa kiinni on toinen auki. [14.]

Kaasuseoksen komprimoinnin ollessa pulssimaista tarvitaan kummankin vaiheen molemmille puolille sykäyksenvaimentimet, jotka tasoittavat kompressorin toimintaa estäen sykäysten aiheuttamia paineenheilahteluja. Säiliöiden pohjille kerääntyy myös nesteitä, jotka muuten kulkeutuisivat sylintereihin.

Komprimointi on prosessissa adiabaattista, eli lämpöenergiaksi muuttunut työ varastoituu poistokaasuun molemmissa vaiheissa. Tästä syystä lämmennyt kaasu tarvitsee vaiheiden välille lämmönvaihtimen, jossa kaasua jäähdytetään ennen sen kulkeutumista toiseen vaiheeseen.

Kaasuseosta jäähdytettäessä ensimmäisen vaiheen jälkeen on olemassa mahdollisuus, jossa lämpötilan lasku aiheuttaa varsinkin kaasun raskaimpien komponenttien kondensoitumista. Syntyneet pisarat on saatava erotetuksi pois kaasusta ennen toisen vaiheen sylinteriä, sillä kompressorit eivät tunnetusti kestä nesteitä. Kondensaation mahdollisuus on olemassa myös toisen vaiheen sylinterissä, jolloin kaasun paine nousee niin suureksi, että kaasua saattaa nesteytyä virtaukseen.

Kyseisiin ongelmiin on luotu ratkaisu asettamalla pisanerotussäiliö kompressorin kummankin vaiheen jälkeen. Säiliöissä on metalliverkot, ja ne toimivat samalla periaatteella kuin matalapainepesurin jälkeinen pisanerotin.

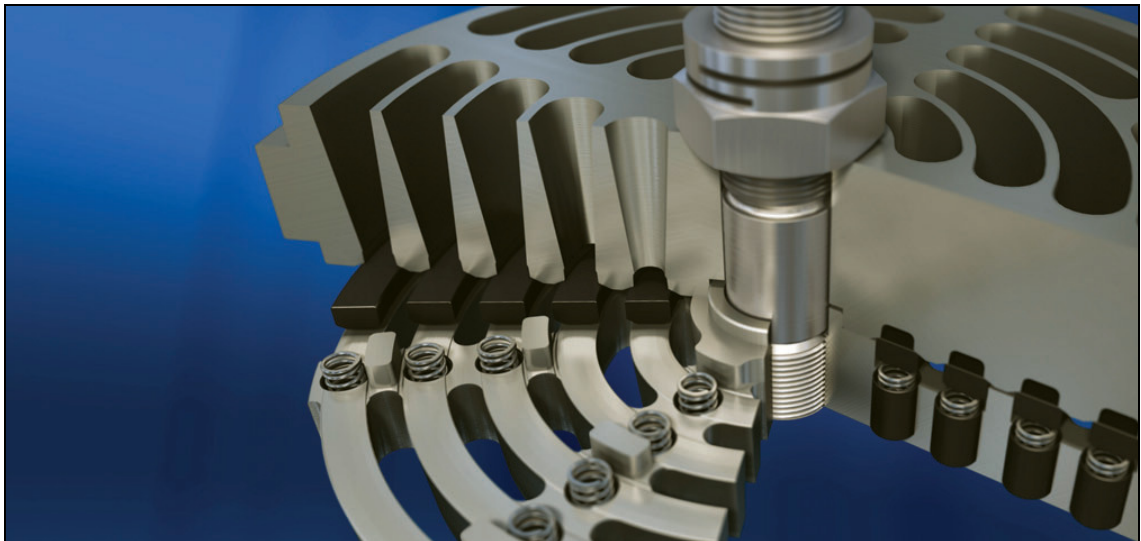
### 4.7.3 Venttiilit

Kiertokaasukompressorin molempien vaiheiden imu- ja pakupuolilla on Hoerbiger Compressionin CE-sarjan venttiilit. Ensimmäisen ja toisen vaiheen venttiilien materiaalit eroavat hieman toisistaan. Lisätietoa venttiileistä löytyy taulukosta 4. [15.]

*Taulukko 4. Lisätietoa kompressorin venttiileistä. [16.]*

<b>Vaihe</b>	1	2
<b>Tyyppi</b>	PC	HP
<b>Materiaali</b>	Hiilikuitu	Hiilikuitu
<b>Minimilämpötila</b>	-50 °C	-200 °C
<b>Maksimilämpötila</b>	250 °C	230 °C

Venttiileissä on takaisinpäin virtauksen estävinä elementteinä lautaset, joita jouset painavat venttiilin runkoa vasten tukkien virtauskanavat paineen ollessa haluttu. Venttiilin rakenne näkyy selkeästi kuvassa 9, jossa lautanen näkyy mustalla värillä jousien päällä. [15.]



*Kuva 9. Hoerbiger Compressionin CE-venttiili. [15.]*

#### 4.7.4 Toiminta

Kaasuseos saapuu kompressorille imusuotimien kautta ja kohtaa sitten ensimmäisen vaiheen imupuolen sykäyksenvaimentimen. Ensimmäisen vaiheen männän liikkuessa sylinterissä taaksepäin vetää alipaine imuventtiilien renkaat jousia vasten, jolloin kaasua virtaa sylinteritilaan. Samanaikaisesti pakoventtiilien lautaset sulkevat tiukasti yhteyden painepuolen putkilinjaan. [3; 14.]

Pian mäntä alkaa liikkua eteenpäin puristaen kaasua yhä pienempään tilaan, jolloin imuventtiilien virtauskanavat sulkeutuvat. Saavuttaessaan pisteen, jossa paine on kasvanut sylinteritilassa kyllin suureksi, painuvat lautaset pakopuolen venttiileissä jousia vasten. Kaasu pakenee sylinteristä painepuolen sykäyksenvaimentimen kautta kohti välijäähdytintä, minkä jälkeen jäähtynyt kaasu kulkeutuu pisaranerotussäiliöön. Säiliöstä kaasu päätyy toisen vaiheen imupuolen sykäyksenvaimentimeen, josta se jatkaa matkaansa jälkimmäiseen sylinteriin puristusta varten. [3; 14.]

Toisen vaiheen männän liikkuessa eteenpäin tapahtuu samalla tavalla kuin ensimmäisessä vaiheessa. Imuventtiilien ollessa kiinni ja pakoventtiilien virtauskanavien auettua poistuu lämmennyt kaasu sylinteristä painepuolen sykäyksenvaimentimelle suurella paineella. Ennen poistumistaan kompressorin ympäristöstä läpäisee kaasu vielä jälkimmäisen pisaranerotussäiliön, jonka päältä se siirtyy pitkää putkilinjaa pitkin eteenistripperille jatkotoimenpiteitä varten. Osa kaasusta palautetaan matalapainepesurille paineensäätöä varten. [3; 14.]

#### 4.7.5 Säädöt

Kompressorin kapasiteettia säädetään automaatiojärjestelmästä kahdella eri tavalla. Ohjaamosta käsin voidaan valita laitteen kuormitus arvoista 0 %, 50 %, 80 % ja 100 %. Tämän lisäksi järjestelmä pitää kompressorin imupaineen asetusarvossa muuttamalla matalapainepesurille palautettavan kaasun määrää automaattiventtiilin aukiolo-prosenttia säätämällä. Paineen kasvaessa yli asetusarvon (1,7 bar) avaa järjestelmä palautuslinjan venttiiliä ja päinvastoin. [13.]

Kaasun palauttaminen kompressorin imupuolelle ei ole tärkeää pelkästään kiertokaasukompressorin toiminnan kannalta, vaan vakioi samalla matalapaine kaasunerottimen toimintapaineen vakauttaen prosessia. Normaaliajossa käytetään kompressorilla 80 % kuormitusastetta, sillä se on optimaalisin ajatellen tasaista paineensäätöä ja sopivaa palautuskiertoa. [13.]

#### 4.8 Korkeapainepesuri ja eteenistripperi

Kompressorilta lähtevä kaasu on mahdollista kierrättää takaisin prosessiin useita mahdollisia reittejä pitkin. Homopolymeeriä ajettaessa propeenikaasun on suunniteltu kulkeutuvan kiertokaasukompressorilta korkeapainepesuriin, jonka yläosasta se poistuu jäädytykseen lämmönvaihtimelle, josta se nesteydyttyään päätyy takaisin propeenin syöttösäiliöön. [2; 3; 13.]

Korkeapainepesurissa valuu ylhäältä alas välipohjia pitkin syöttösäiliöön palaavasta linjasta tuleva nestemäisen propeenin sivuvirta, joka pesee propeenikaasusta pois pölyn. Neste ja pöly poistuvat kolonnin alaosaan kohti matalapaine kaasunerotussuodatinta. Matkalla neste höyrystetään, joten se palaa matalapaine kaasunerotussuodattimelle kaasumaisena. [2; 3.]

Eteenistripperi on eteenin ja propeenin toisistaan erottamiseksi tarkoitettu täytekappalekolonni. Random- ja block-kopolymeereillä kiertokaasu sisältää reagoimatonta eteeniä, joka täytyy erottaa propeenin seasta. Tästä syystä kompressorilta lähtenyt kaasu nesteytetään lämmönvaihtimella ja ohjataan stripperille, jossa komponenteista matalamman kiehumispisteen omaava eteeni poistuu kolonnin huipulta joko takaisin kaasufaasireaktoriin tai palautuksena Borealiksi krakkerille (PETROKEMIA). [3.]

Eteenistripperin pohjatuote, nestemäinen propeeni, siirtyy kolonnin pohjalta korkeapainepesurin lauhduttimelle ja edelleen propeenin syöttösäiliöön. Nykyään kiertokaasu ajetaan aina eteenistripperille tuotteesta riippumatta eli homopolymeeriä tuotettaessa ei korkeapainepesuria nykyään käytetä tässä prosessin osassa. [2; 3.]

## 5 Rikkoutumiset

### 5.1 Johdanto

Kiertokaasukompressorin hajottua kahdesti kevään 2010 aikana tuli tarve käydä analyttisesti läpi rikkoutumisiin johtaneita tapahtumia ja yrittää tehdä niiden pohjalta johtopäätöksiä, jotta rikkoutumisista voitaisiin oppia ja niistä aiheutuvat rahalliset tappiot jatkossa ennaltaehkäistä.

Kumpikin rikkoutumistilanne on erillinen tapahtumansa, mutta niistä löytyy myös joitain yhtäläisyyksiä. Molemmissa tapauksissa nimittäin yhdistäväksi tekijäksi muodostuivat nesteiskun hajottamat pakuventtiilit. Rikkoutumisten lisäksi kompressori jouduttiin ajamaan alas myös kesällä 2010 huoltoa varten, syynä jälleen venttiilivika.

Seuraavissa luvuissa käydään läpi yksityiskohtaisesti rikkoutumisia sekä huoltoa edeltävät tapahtumat. Kiertokaasukompressori ajettiin alas myös keväällä 2009 tapahtuneen rikkoutumisen vuoksi. Tapahtuma käydään lyhyesti läpi siihen liittyvän The Borealis Way -raportin [17] pohjalta.

### 5.2 Rikkoutuminen 18.3.2009

Ensimmäinen työssä käsiteltävä hajoaminen on puolentoista vuoden takainen pysäytys. Rikkoutumiseen liittyvä data on kerätty jo tehdystä dokumentoinnista sekä Metson automaatiojärjestelmän historiasta. Tapahtumaketju kokonaisuudessaan on koottu seuraavalle sivulle taulukkoon 5.

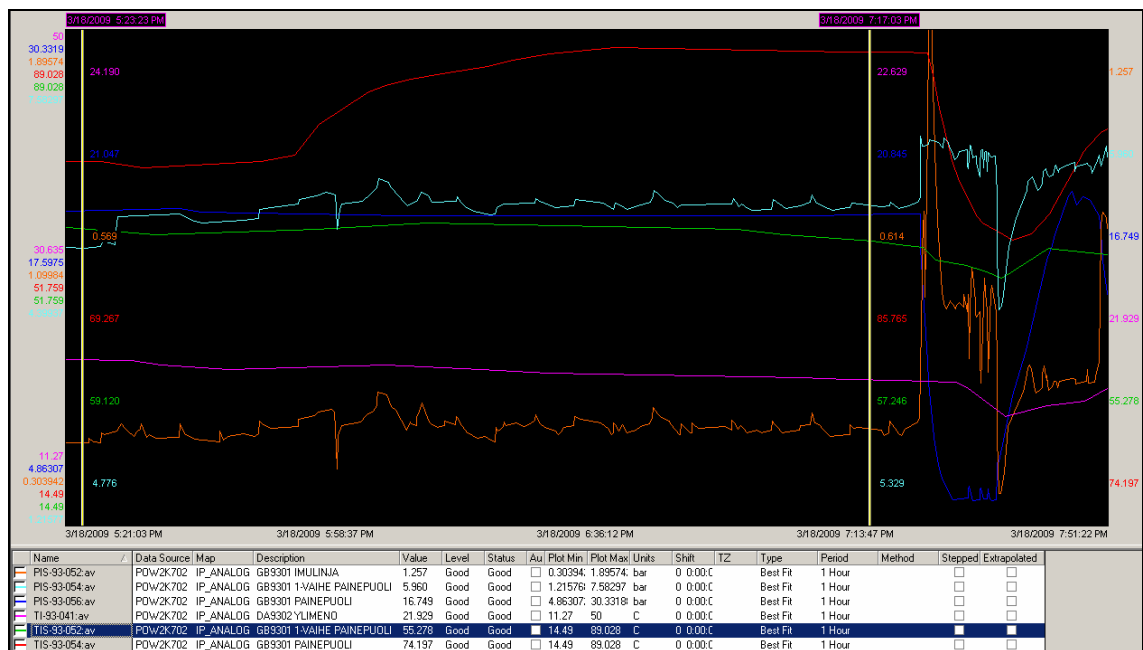
*Taulukko 5. Rikkoutuminen 18.3.2009, tapahtumaketju. [17.]*

#	Pvm, kellonaika	Tapahtuma
1	18.3.2009, 19:25	Pisaranerotussäiliön FA-9312 korkean pinnan lukitus
2	18.3.2009, 19:25	Kompressori pysähtyy
3	18.3.2009, 20:00	Kompressori käynnistetään säiliön tyhjentämisen jälkeen
4	18.3.2009, 21:00	1. vaiheen poistopaineen ylärajan lukitus
5	18.3.2009, 21:00	Kompressori pysähtyy
6	18.3.2009, 21:00	Kaasufaasireaktori otetaan pois käytöstä
7	18.3.2009, 22:00	Kompressori käynnistetään
8	19.3.2009, 05:30	Kompressori ajetaan hallitusti alas tarkastusta varten

Kone pysähtyi ensimmäisen kerran automaattisesti lukituksesta pisaranerotussäiliön tultua täyteen nestettä. Operaattorin tyhjennettyä säiliön käynnistettiin kompressori uudelleen, mutta tunti käynnistyksestä nousi ensimmäisen vaiheen poistopaine liian korkeaksi aiheuttaen seuraavan lukituksen ja sen seurauksena pysähtymisen. [17.]

Ajomuutosten jälkeen kompressori ja tuotanto saatiin pidettyä päällä seuraavaan aamuun asti, jolloin kone ajettiin alas hallitusti huoltoa varten. Huollossa todettiin toisen vaiheen pakovoimien vahingoittuneen. Tuotannossa oli ennen rikkoutumista laadunvaihto korkean sulaindeksin block-tuoteeksi BF330MO-08, jossa vetylisäysten ja eteenin vähentämisen lisäksi vaihtui myös donor-laatu 1:stä 3:een. [17.]

Seuraavalla sivulla on kuvassa 10 automaatiojärjestelmään tallentunutta paine- ja lämpötilatietoa rikkoutumista edeltäviltä tunneilta. Alkuhetken arvot ovat ilmaistuna pystyviivalla kuvan vasemmassa reunan läheisyydessä. Ensimmäinen epänormaali havainto on ensimmäisen vaiheen painepuolen painemittausta kuvaavan vaaleansinisen trendin äkillinen hyppy ylöspäin aivan kuvan alussa. Hetkeä myöhemmin punainen käyrä, eli toisen vaiheen poistokaasun lämpötila kasvaa alkuarvostaan puolessa tunnissa n. 15 °C. Hetkeä ennen pysähdystä tulee 1. vaiheen jälkeisessä painemittauksessa huomattava piikki. Pysähdystä edeltävät ajoarvot näkyvät pystyviivana kuvan oikean reunan tuntumassa. Kuvan loppuvaiheilla näkyy myös uudelleenkäynnistyksen aiheuttamat heilahdukset. [13.]



Kuva 10. Lämpötila- ja painetrendit ennen rikkoutumista 18.3.2009. [13.]

### 5.3 Rikkoutuminen 8.4.2010

Huhtikuussa 2010 tapahtunut rikkoutuminen on tapauksista hieman epäselvempi, sillä selkeää tapahtumaketjua sille ei ole ja kompressorin lopulliseen rikkoutumiseen meni useita päiviä ensimmäisten poikkeavien havaintojen jälkeen. [13.]

Rikkoutuminen osattiin jossain määrin ennakoida 2.4. tapahtuneen ensimmäisen vaiheen jälkeisen lämpötilamittauksen pompattua oleellisesti ylöspäin. Paikalle tilattiin esivalmistelut venttiilien vaihtoa varten ja kompressorille suunniteltiin hallittu alasajo. [18; 19.]

Lämpötilan jatkettua hidasta nousuaan kone kuitenkin pysähtyi 8.4. ensimmäisen vaiheen jälkeisen lämpötilan saavuttaessa lukitusrajan, ennen kuin samalle illalle suunniteltu huolto ehdittiin aloittaa. Taulukkoon 6 on koottu oleellimmat tapahtumat keskittyen 1. vaiheen lämpötilahistoriaan viikkoa ennen rikkoutumista rikkoutumisajankohden saakka. [13; 18; 19.]

Taulukko 6. Rikkoutuminen 8.4.2010, tapahtumaketju. [13.]

#	Pvm, kellonaika	Tapahtuma
1	2.4.2010, 03:22:00	1. vaiheen painepuolen lämpötila alkaa nousta 103 °C:sta
2	2.4.2010, 05:06:00	1. vaiheen painepuolen lämpötila on noussut arvoon 110 °C
3	8.4.2010, 07:11:00	1. vaiheen painepuolen lämpötila alkaa hitaasti nousta
4	8.4.2010, 07:23:10	1. vaiheen painepuolen lämpötilan hälytys
5	8.4.2010, 08:27:40	1. vaiheen painepuolen lämpötila huipussaan, 119 °C
6	8.4.2010, 08:27:40	1. vaiheen painepuolen lämpötilan lukitus
7	8.4.2010, 08:27:40	Kompressorin pysähtyy

Kuvassa 11 on graafinen esitys tapahtumaketjusta huomioiden kompressorin kaikki lämpötila- ja painemittaukset. Kuvan aikajanasta huomataan tapahtuman pitkä kesto. Tilanne alkoi ensimmäisen vaiheen painepuolen lämpötilaa kuvaavan vihreän viivan äkillisenä nousuna. Kuvan keskellä huomataan merkittäviä heilahduksia ensimmäisen vaiheen painemittauksissa (vaaleansininen poistopaine ja oranssi imupaine) sekä hetkellinen, tosin pieni lämpötilan nousu punaisessa toisen vaiheen painepuolen lämpötilassa. Kuva päättyy vihreän lämpötilakäyrän lukitusarvon saavuttamiseen ja siitä johtuneeseen koneen pysähtymiseen. Diagrammien arvot eivät ole verrannollisia toisiinsa, jokainen niistä on skaalattu yksilöllisesti parhaan mahdollisen selkeyden vuoksi. [13.]



Kuva 11. Lämpötila- ja painetrendit ennen rikkoutumista 8.4.2010. [13.]



Korjaus- ja tarkastustoimenpiteitä tehdessään huoltomiehet totesivat 1. vaiheen painepuolen uloimpien venttiilien rikkoutuneen. Toisesta venttiilistä olivat menneet rikki myös tiivisterenkaat. Ensimmäisen lämpötilaheilahduksen tapahtuessa oli ajossa block-laatu BA212E, jossa peruspolymeerinä on BAB55BV. Rikkoutumiseen asti tuotannossa oli lukuisia block-tuotteita, jotka on listattu taulukkoon 7. [19; 20; 21.]

*Taulukko 7. Rikkoutuminen 8.4.2010, tuotannossa olleet tuotteet. [20; 21.]*

<b>Pvm, kellonaika</b>	<b>Polymerointi</b>	<b>Pelletointi</b>
1.4.2010, 08:00	BAB55BV	BA212E
4.4.2010, 20:00	BAB90BV	BA390E
5.4.2010, 08:00	BAB80B	BA202E
6.4.2010, 20:00	BAB80BO	BEC5012

#### 5.4 Rikkoutuminen 22.5.2010

Jälkimmäinen rikkoutuminen keväällä 2010 erosi ensimmäisestä salamannopean tapahtumaketjuna vuoksi sekä vaurioitumiskohteen sijoituttua toiseen vaiheeseen. Kierto-kaasukompressori tuli varoittamatta alas toisen vaiheen poistolämpötilan ylärajan lukituksesta. Taulukossa 8 on kuvattu tarkasti rikkoutumishetken tapahtumat käyttäen hyväksi automaatiojärjestelmän hälytyksiä, lukituksia ja trendejä. [13.]

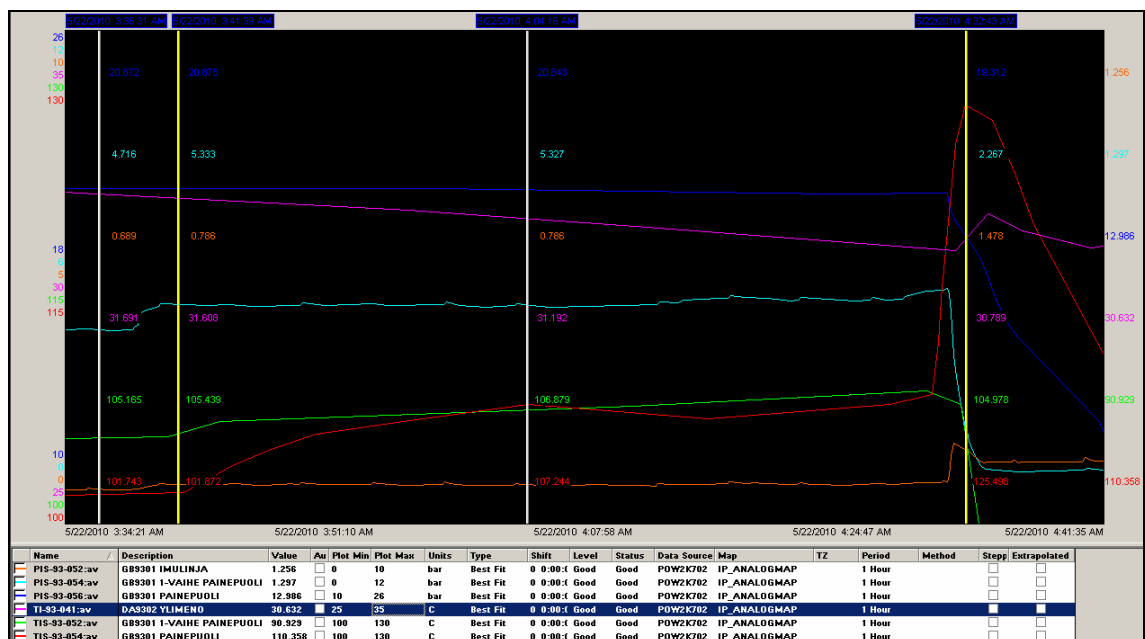
*Taulukko 8. Rikkoutuminen 22.5.2010, tapahtumaketju. [13.]*

<b>#</b>	<b>Pvm, kellonaika</b>	<b>Tapahtuma</b>
1	22.5.2010, 03:38:00	1. vaiheen painepuolen paine nousee nopeasti ylöspäin
2	22.5.2010, 03:41:39	2. vaiheen poistolämpötila alkaa nousta arvosta 102 °C
3	22.5.2010, 04:29:11	Hälytys: 1-vaihe, paine-ero, mittaus > yläraja
4	22.5.2010, 04:04:16	2. vaiheen poistolämpötila on noussut arvoon 107 °C
5	22.5.2010, 04:30:54	2. vaiheen poistolämpötilan hälytys, 112 °C
7	22.5.2010, 04:31:37	2. vaiheen poistolämpötilan lukitus, 120 °C
8	22.5.2010, 04:31:27	Kompressori pysähtyy

Ensimmäinen huomiota herättävä tapahtuma on normaalisti sadan asteen tienoilla olevan lämpötilan hidas nousu aamuyöllä. Ennen äkillistä lämpötilan nousua, toisen vaiheen painepuolen lämpötilan luitusta ja siitä johtunutta kiertokaasukompressorin suojausta hälytti automaatiojärjestelmä ensimmäisen vaiheen paine-eron ylärajan ylittyneen. [13.]

Taulukossa esitettyjen tapahtumien lisäksi prosessista oli 21.5. alkaen tullut matalapaine-kaasunerotussuodattimen ja höyrynkäsittelysäiliön välistä paine-eroa mittaavalta anturilta matalia hälytyksiä. [13.]

Taulukkoa selkeämmin rikkoutumiseen johtaneet tapahtumat näkyvät kuvasta 12, jossa edellisten esitysten lailla on kuvattu kompressoria edeltävä, seuraava ja ensimmäisen vaiheen jälkeinen lämpötila sekä painelukemat vastaavista kohdista. Tilanne alkaa vaaleansinisen 1. vaiheen poistopaineen äkillisestä kasvusta. Välittömästi tämän jälkeen alkaa nousta punaisen käyrän osoittama toisen vaiheen poistolämpötila. Muuta mainitsemisen arvoista ei kuvassa tapahdu ennen valtavaa, 2. vaiheen poistolämpötilan lähes kahdenkymmenen asteen salamannopeaa nousua ja siitä aiheutunutta kompressorin pysähtymistä. [13.]



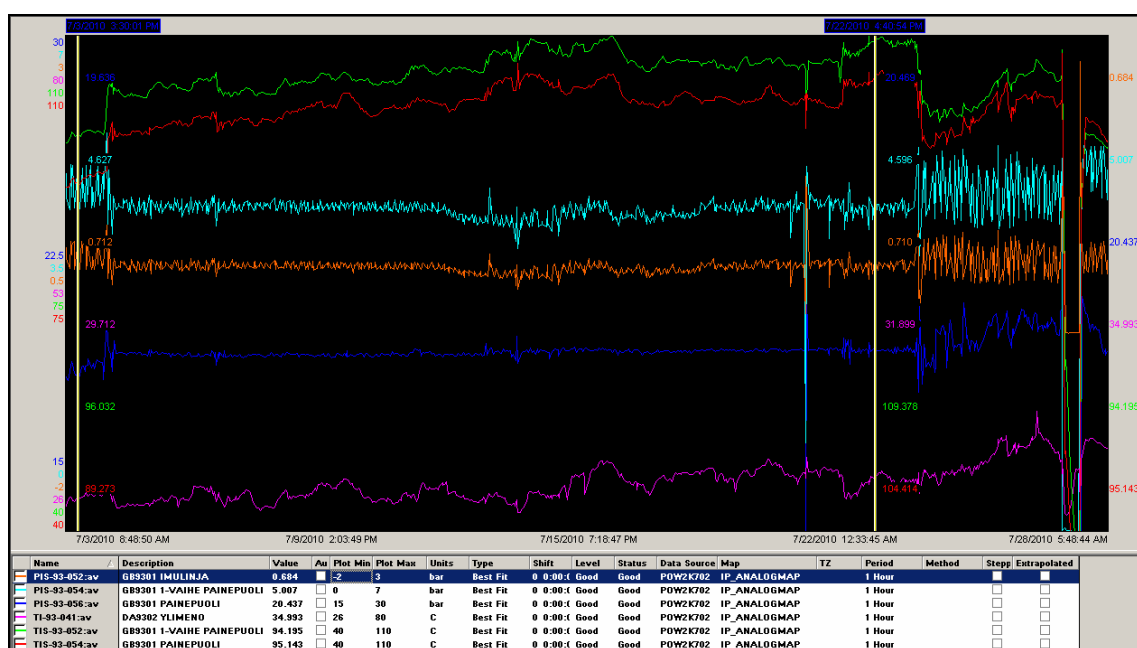
Kuva 12. Lämpötila- ja painetrendit ennen rikkoutumista 22.5.2010. [13.]

Kompressorin tultua alas yritettiin sitä saada käyntiin uudestaan useita kertoja tuloksetta. Jälkimmäisiä käynnistysyrityksiä ja siihen liittyviä hälytyksiä ei taulukossa eikä kuvassa käsitellä. Epäonnistuneiden yritysten jälkeen todettiin jonkin olevan rikki ja tapauksesta tehtiin korjauspyyntö. Paikalle päästyään huoltomiehet totesivat 2. vaiheen painepuolen venttiilien vaurioituneen. Koneen tullessa alas ajettiin polymeroinnissa 17.5. aloitettua block-laatua BHB90B. [13; 20; 22.]

## 5.5 Huolto 27.7.2010

Viimeiseksi käsiteltävä tapahtuma koskee kompressorin rikkoutumisen ennaltaehkäisevää huoltoa ja sitä edeltävän lämpötila- ja painehistorian käsittelyä graafisesti. Kuvan 13 vasemmassa yläreunassa esillä olevat vihreä 1. vaiheen ja punainen 2. vaiheen poistolämpötila pomppaavat kumpikin hitaaseen nousuun. Aikajanasta nähdään lämpötilojen kasvun kestäneen lähes kuukauden. [13.]

Lähtöhetkellä ensimmäisen vaiheen poistolämpötila on 96 °C ja toisen vaiheen 89 °C. Loppua kohden nousevat vastaavat lämpötilat suurimmillaan arvoihin 109 °C ja 104 °C. Ennen pysäyttämistä alkavat painemittaukset huojua ja lämpötilat laskevat hieman. [13.]



Kuva 13. Lämpötila- ja painetrendit ennen huoltoa 27.7.2010. [13.]

Huollon päätyttyä olivat korjaajat vaihtaneet kompressorin ensimmäiseen vaiheeseen kaksi pakuventtiiliä, joista toisen havaittiin vaurioituneen. Lämpötilanousun ollessa jälle pitkäkestoinen tapahtuma on tärkein hetki tapahtumaan johtanut pomppaus 3. heinäkuuta. Tällöin ajossa ollut homopolymeerituote oli polymeroinnissa HBI97 ja peltoinnissa HB306MO. [13; 20; 21; 23.]

## 6 Kaasuanalyysit

### 6.1 Johdanto

Työssä analysoitiin matalapaine kaasunerotuksen eri kohdista otettuja kaasunäytteitä, joiden pohjalta oli tarkoitus saada lisätietoa ja ymmärrystä ilmiöistä, jotka ovat aiheuttaneet kiertokaasukompressorin häiriöpysähtymiset. Keväällä 2009 otetut prosessinäytteet on analysoitu kaasukromatografilla Borealiksen omassa laboratoriossa.

### 6.2 Mittaustulokset 17.4.2009

Ensimmäiset työssä käsiteltävät mittaustulokset koostuvat neljästä prosessin eri kohdasta otetuista kaasunäytteistä (taulukot 9–12). Näytteet on otettu block-ajon BA212E aikana, joka on sama kuin ensimmäisen rikkoutumisen yhteydessä ajettu tuote. Näytteenotto paikat ovat matalapainepesurin syöttö, kiertokaasukompressorin 1. vaiheen imu- ja painepuoli sekä 2. vaiheen painepuoli.

*Taulukko 9. Kaasuanalyysi 17.4.2009, syöte matalapainepesuriin. [24.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	1,38
N <sub>2</sub>	0,03
CH <sub>4</sub>	0,01
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,41
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	26,95
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4,25
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	66,67
N-C <sub>5</sub>	0,002
C <sub>6</sub> +	0,3

*Taulukko 10. Kaasuanalyysi 17.4.2009, kompressorin 1. vaiheen imupuoli. [24.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	1,45
N <sub>2</sub>	0,23
CH <sub>4</sub>	0,007
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,42
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	27,68
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4,15
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	65,82
N-C <sub>5</sub>	0,001
C <sub>6</sub> +	0,242

*Taulukko 11. Kaasuanalyysi 17.4.2009, kompressorin 1. vaiheen painepuoli. [24.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	1,28
N <sub>2</sub>	8,74
CH <sub>4</sub>	0,008
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,37
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	24,84
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3,82
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	60,53
N-C <sub>5</sub>	0,001
C <sub>6</sub> +	0,41

*Taulukko 12. Kaasuanalyysi 17.4.2009, kompressorin 2. vaiheen painepuoli. [24.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	1,29
N <sub>2</sub>	0,09
CH <sub>4</sub>	0,01
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,44
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,2
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4,08
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	65,82
N-C <sub>5</sub>	0
C <sub>6</sub> +	0,07

Kaasuanalyyseiden tuloksia tarkastellessa tutkittiin seoksesta kaikkia siihen kuulumattomia molekyylejä. Ideaalisessa tilanteessa kaasuseoksessa olisi vain propeeni- ja eteenikaasua. Reaalitilanne poikkeaa tässäkin tapauksessa teoriasta, kuten tuloksista nähdään. Mukana on myös vetyä, typpeä, metaania sekä enemmän kuin kolme hiiltä sisältäviä hiilivetyjä. Ylimääräisissä komponenteissa katseet kohdistuvat raskaisiin komponentteihin eli vähintään kuuden hiilen molekyyleihin niiden ollessa nesteytymistäipuisia suhteellisen suuren moolimassansa vuoksi. [24.]

Ongelma analyysimenetelmässä on se, ettei edellä mainittujen molekyyliden suhteita tai molekyylikaavoja voida määrittää. Kaasuanalyyseiden tuloksista nähdään, että oligomeeria on kaasussa läpi kompressorin, vaikka suurin osa siitä onkin saatu poistetuksi välijäähdytyksen jälkeen. Hälyttävintä on huomata yli kuuden hiilen yhdisteiden pitoisuuden olevan suurimmillaan ensimmäisen vaiheen imupuolella, eikä niinkään ennen kolonnin syöttöä tai pisaranerotinta. Ensimmäisen vaiheen painepuolen monikymmenkertainen typpimäärä hämmästyttää myös kovasti. [24.]

## 6.3 Mittaustulokset 8.5.2009

Toisten mittaustulosten käsittelyssä on näytteitä kerätty kuudesta eri prosessin kohdasta (taulukot 13–18). Näytteet on otettu homopolymeeriajon HG455FB aikana. Näytteenottoaikat ovat matalapainepesurin syöttö, pisaranerotimen syöttö, imusuotimien syöttö, kiertokaasukompressorin 1. vaiheen imu- ja painepuoli sekä 2. vaiheen painepuoli. Analysoidut komponentit ovat tässä mittauksessa hieman erilaiset verrattuna ensimmäiseen.

*Taulukko 13. Kaasuanalyysi 8.5.2009, syöte matalapainepesuriin. [25.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	0,02
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,16
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,37
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12,55
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	86,84
N-C <sub>4</sub>	0,002
C <sub>4</sub> =	0,001
N-C <sub>5</sub>	0,005
C <sub>6</sub> +	0,05

*Taulukko 14. Kaasuanalyysi 8.5.2009, syöte pisaranerottimeen. [25.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	0,02
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,15
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,35
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12,71
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	86,66
N-C <sub>4</sub>	0,002
C <sub>4</sub> =	0,001
N-C <sub>5</sub>	0,005
C <sub>6</sub> +	0,1



Taulukko 15. Kaasuanalyysi 8.5.2009, syöte imusuotimiin. [25.]

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	0,02
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,15
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,36
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12,68
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	86,43
N-C <sub>4</sub>	0,002
C <sub>4</sub> =	0,001
N-C <sub>5</sub>	0,005
C <sub>6</sub> +	0,35

Taulukko 16. Kaasuanalyysi 8.5.2009, kompressorin 1. vaiheen imupuoli. [25.]

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	0,02
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,15
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,35
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12,81
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	86,6
N-C <sub>4</sub>	0,001
C <sub>4</sub> =	0,001
N-C <sub>5</sub>	0,005
C <sub>6</sub> +	0,06

*Taulukko 17. Kaasuanalyysi 8.5.2009, kompressorin 1. vaiheen painepuoli. [25.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	0,02
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,15
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,37
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12,54
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	86,84
N-C <sub>4</sub>	0,002
C <sub>4</sub> =	0,001
N-C <sub>5</sub>	0,005
C <sub>6</sub> +	0,07

*Taulukko 18. Kaasuanalyysi 8.5.2009, kompressorin 2. vaiheen painepuoli. [25.]*

<b>Komponentti</b>	<b>Tilavuus-%</b>
H <sub>2</sub>	0,006
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,14
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,33
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12,45
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	87,04
N-C <sub>4</sub>	0,002
C <sub>4</sub> =	0,001
N-C <sub>5</sub>	0,004
C <sub>6</sub> +	0,03

Tulosten analysoinnissa kiinnitetään jälleen huomio kolmea hiiltä suurempiin hiilivetyihin ja tarkemmin ottaen niistä kaikkein raskaimpiin. Tuloksia tarkastellessa huomataan neljän ja viiden hiilen molekyylien määrän pysyvän lähes vakiona kuljettaessa prosessissa eteenpäin, joka osoittaa niiden pysymistä kaasuna virtauksen mukana. [25.]

Suuren mielenkiinnon aiheuttavat kuutta hiiliatomia suuremmat hiilivedyt, sillä niiden määrä on moninkertaistunut kolonnin syötteen ja imusuotimien syötteen välillä. Dramaattinen ero ei voi johtua mittausepävarmuudesta, ja onkin siksi aiheellista olettaa kaasuvirtauksen ottaneen mukaansa oligomeereja kompressorin pisaranerottimelta. [25.]

Kompressorin toisen vaiheen painepuolen mittauspisteessä vähintään kuusihilisten molekyylien määrä on pudonnut noin kymmenesosaan pisaranerottimen jälkeisen kaasuun verrattuna, mikä osoittaa pisaranerotussäiliöiden erottavan suurimman osan kaasuun mukana kulkeutuvista raskaista komponenteista. [25.]

## 7 Osaprosessin simulointi

### 7.1 Johdanto

Kaasumaisen komponentin altistaa nesteytymiselle lämpötilan lasku ja paineen nousu. Koska komprimoinnissa pelataan suurien paineiden ja sitä kautta kondensaatioilmiön kanssa, on kaasun lämpötilojen oltava tarkasti optimoidut. Simulointien avulla oli tarkoitus selvittää, tapahtuuko kiertokaasukompressorin eri osissa kondensaatiota, ja tutkia välijäähdyttimen jälkeisen kaasun lämpötilan ja oligomeerikoostumuksen vaikutusta kondensaatioon. Mielenkiinnon kohteena oli myös, kuinka suuri osa kompressorin syötteessä olevista raskaista komponenteista pysyy kaasumaisena kompressorin läpi kuljettaen.

Kiertokaasukompressorissa on lämpötilan säätöön yksi suunnittelumuuttuja, vaiheiden välillä olevan lämmönvaihtimen jäähdytysvesivirtaus, jonka avulla kontrolloidaan toisen vaiheen imulämpötilaa. Kompressorin ensimmäisen vaiheen imupainetta säädetään takaisinvirtausventtiilin avulla, kuten jo aiemmin mainittiin.

Simulointien avulla oli myös tarkoitus saada apua kaasun lämpötilan asetusarvon määrittämisessä. Paineastiasoskissa 2010 asennettiin jäähdytysvesilinjaan automaattiventtiili, jolloin toisen vaiheen imukaasun lämpötila voidaan vakioda TIC-piirin avulla ja siten asettaa tavoitelämpötila suoraan automaatiojärjestelmään, käyttäen hyväksi PID-säädintä.

Ongelmaa lähestyttiin mallintamalla kompressorin ensimmäinen ja toinen vaihe sekä niiden välinen lämmönvaihdin Aspenilla. Kompressorin syötetyn kaasun koostumuksena käytettiin block-kopolymeerille tyypillisiä arvoja. Simuloinneissa käytetty oligomeerikompositio sisälsi yhtä suuren osuuden kolmea eri hiilimäärän sisältävää komponenttia, jotka olivat nonaani  $C_9H_{20}$ , dodekaani  $C_{12}H_{26}$  sekä pentadekaani  $C_{15}H_{32}$ . Työssä käytetyt oligomeerimäärät olivat normaaleihin arvoihin verrattuna hyvin suuret. [26.]

Simuloinneissa käytettiin taulukon 19 mukaisia prosessiolosuhteita. Kompressorille saapuvan kaasun lämpötilaksi ja komprimointipaineiksi valittiin prosessille tavanomaiset ajoarvot. Kaasuvirtauksen arvona käytettiin toukokuun rikkoutumista edeltävän ajon aikaista virtausta.

*Taulukko 19. Simuloinneissa käytetyt prosessiolosuhteet.*

<b>Kaasuvirtaus</b>	4500 kg/h
<b>Kompressorin imulämpötila</b>	30 °C
<b>1. vaiheen imupaine</b>	1,7 bar
<b>1. vaiheen poistopaine</b>	5,9 bar
<b>2. vaiheen poistopaine</b>	22,0 bar

## 7.2 Tulokset

Ensimmäisen vaiheen sylinterissä huomattiin kondensaatiota oligomeerien mooliosuuden ollessa 0,06 mol-% ja prosessiolosuhteiden ollessa taulukon 19 mukaiset. Tämä on oligomeereille epätavanomaisen suuri määrä, minkä vuoksi voidaan kondensaation mahdollisuus ensimmäisessä vaiheessa lukea pois erittäin suurella todennäköisyydellä ainakin kyseisellä oligomeeriseoksella.

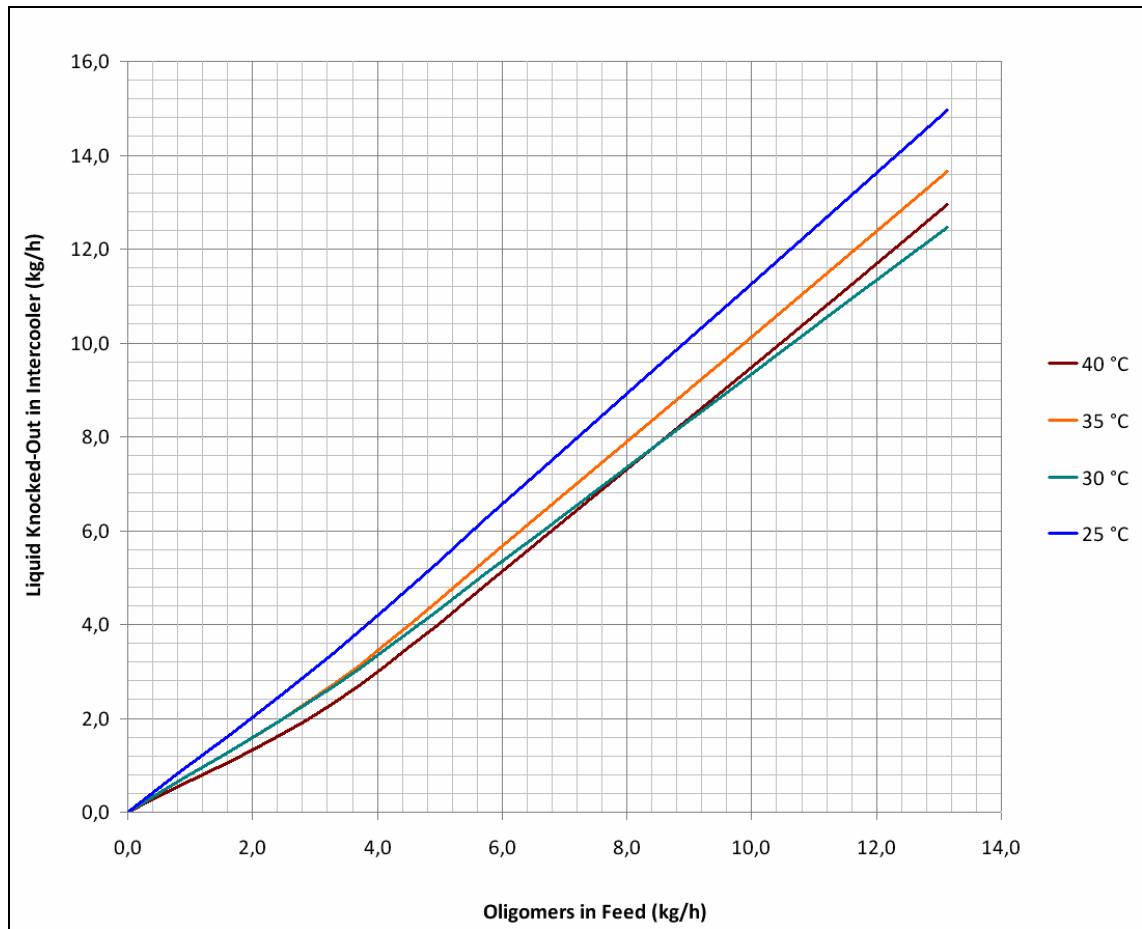
Ensimmäisen vaiheen komprimoinnissa lämmennyttä kaasua jäähdytettiin lämmönvaihtimessa neljään eri lämpötilaan käyttäen erilaisia oligomeerien mooliosuuksia. Kaasun lämpötilan laskiessa huomattiin kondensaatioasteen nousevan oligomeerien mooliosuuden ollessa vakio. Oligomeerien mooliosuuden kasvaessa ja lämpötilan ollessa vakio näkyi kondensaatioasteessa myös selkeä nousu. Taulukkoon 20 on koottu välijäähdyttimessä kondensoituneiden oligomeerien osuus kaasun kokonaisoligomeerimääriin verrattuna eri lämpötiloissa.

Taulukko 20. Kondensaatioasteet välijäähdyttimessä eri lämpötiloilla ja määrillä.

Oligomeeria (mol-%)	Oligomeeria (kg/h)	Jäähdytetyn kaasun lämpötila (°C)	Kondensaatioaste
0,015	3,3	40	0,64
0,030	6,6	40	0,79
0,045	9,9	40	0,85
0,060	13,1	40	0,89
0,015	3,3	35	0,73
0,030	6,6	35	0,85
0,045	9,9	35	0,90
0,060	13,1	35	0,92
0,015	3,3	30	0,81
0,030	6,6	30	0,90
0,045	9,9	30	0,93
0,060	13,1	30	0,95
0,015	3,3	25	0,88
0,030	6,6	25	0,94
0,045	9,9	25	0,96
0,060	13,1	25	0,97

Kaasun läpäistessä ensimmäisen vaiheen ja kulkeutuessa lämmönvaihtimelle osoittavat simuloinnit runsasta kondensaatiota oligomeerien mooliosuudesta ja jäähdytyslämpötilasta riippumatta. Suurimmalla mooliosuudella (0,06 mol-%) simuloinneissa tuli virheilmoitus kondensaatiosta, joten kyseinen kaasuseos olisi jo hajottanut kompressorin ensimmäisen vaiheen ennen lämmönvaihtimelle pääsyä.

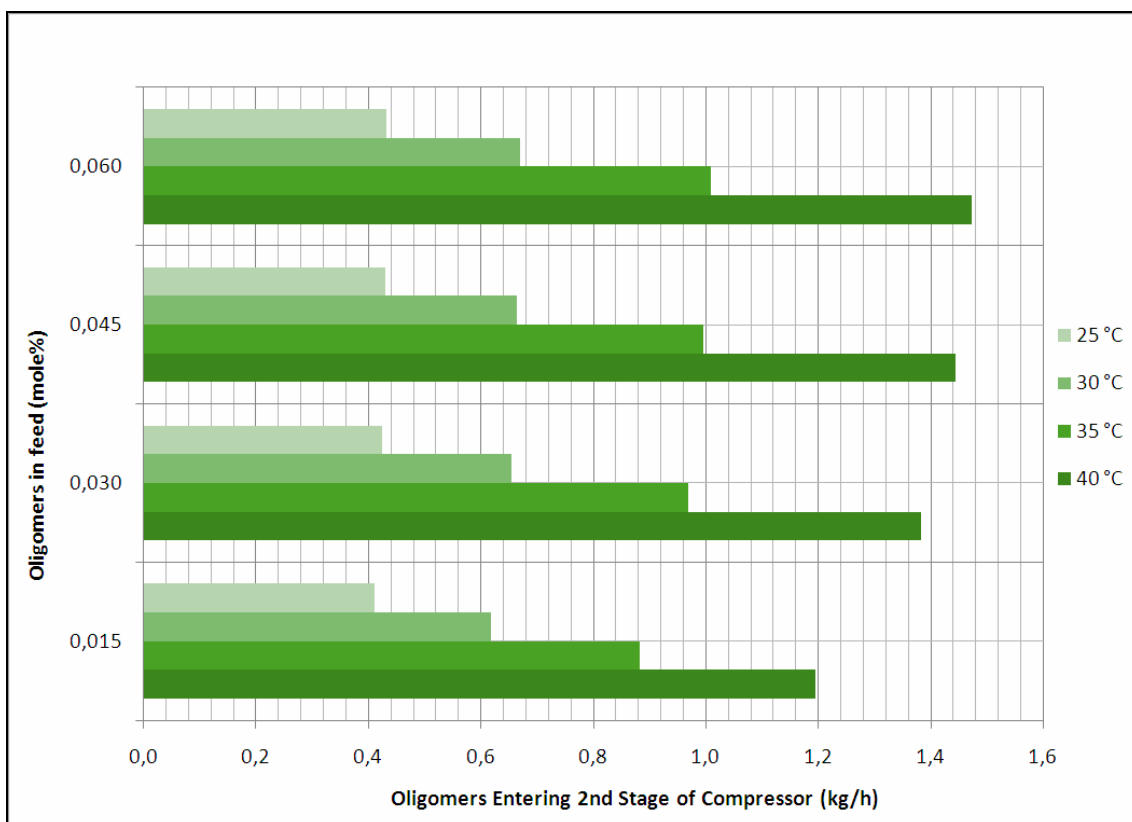
Oligomeerien lisäksi kaasusta nesteytyi myös pieniä määriä kevyitä komponentteja. Välijäähdyttimessä nesteytyneiden aineiden määrä on esitetty kokonaisoligomeerimäärän funktiona eri jäähdytyslämpötiloilla kuvassa 14. Kuvasta nähdään, että kylmempi lämpötila ei aina takaa suurinta kokonaiskondensaatiota.



Kuva 14. Kondensoituneiden nesteiden määrä kokonaisoligomeerimäärän funktiona.

Kaasuvirtauksen mukaan jäävien kaasumaisten oligomeerien määrät näkyvät selkeiten kuvasta 15, jossa eriväriset palkit edustavat kaasun eri lämpötiloja lämmönvaihtimen jälkeen. Pystyakselilla on esillä syötekaasun oligomeerien mooliosuudet, kun vaakakselilla näkyy toisen vaiheen sylinteriin kulkeutuvien kaasumaisten oligomeerien massavirta.

Kuvasta huomataan, että korkeimmalla toisen vaiheen imulämpötilalla erot kaasumaisten oligomeerien määristä näkyvät selkeimmin. Lämpötilan ollessa 25 °C on kaasumaisten oligomeerien määrä lähes vakio syöttökaasun mooliosuuksista riippumatta.



Kuva 15. Kaasuseokseen jäävien kaasumaisten oligomeerien määrät eri lämpötiloissa.

Simulointia jatkettiin vielä toiseen vaiheeseen olettaen, että kaikki välijäähdyttimessä syntynyt neste poistuu kaasuvirtauksesta pisaranerotussäiliöllä. Tarkoituksena oli varmistaa, ettei millään työssä käytetyllä kompositiolla tapahdu kondensaatiota toisen vaiheen sylinterissä missään lämpötilassa. Kaasuseoksen kaasumaiset oligomeerit pysyvät olomuodossaan läpi toisen vaiheen komprimoinnin oligomeerien konsentraatiosta ja imulämpötilasta huolimatta. [26.]

Männän lähtiessä liikkeelle taka-asennosta alkaa paine sylinterissä kasvaa venttiilien virtauskanavien ollessa kiinni. Lämpötila ei kuitenkaan välittömästi reagoi paineen nousuun, vaan se kasvaa paineen nousun suhteen hieman jälkijunassa. Tämä tarkoittaa sitä, että paineen lähtiessä kasvuun on kaasun lämpötila vielä välijäähdytyksen jäljiltä hyvin matala ja on olemassa mahdollisuus, että juuri työn alettua voi nestettä kondensoitua sylinteriin kasvavasta paineesta ja matalasta lämpötilasta johtuen. Tätä voidaan kutsua komprimoinnin kriittisimmäksi vaiheeksi. [26.]



## 8 Rikkoutumissyiden analysointi

### 8.1 Tuotteiden vaikutukset

Luvussa tutkitaan rikkoutumisten aikana ajossa olleiden tuotteiden ominaisuuksia yrittäen samalla löytää tuotteista yhtäläisyyksiä ja sitä kautta alttiutta edesauttaa rikkoutumisia. Työssä käsitellyjä rikkoutumistilanteita analysoitaessa löytyi yhtäläisyyksiä prosessissa ajettujen tuotteiden välillä. Kullakin kerralla ajossa oli ollut block-tuote, joille ominaista ovat huomattavasti suuremmat kaasuvirtaukset muihin tuotteisiin nähden. [13; 20.]

Tuotteista löytyi myös eroavaisuuksia, joita käsitellään taulukossa 21. Maaliskuun rikkoutumisessa oli polymeroinnissa käynnissä laadunvaihto, ja taulukkoon on kerätty vaihtoa seuranneen tuotteen tiedot. Huhtikuussa ajossa olleiden tuotteiden ajoparametrit eivät eroa toisistaan paljoa, joten vertailussa käytetään ensimmäisen lämpötilanousun aikana ajossa ollutta reseptiä. Toukokuun rikkoutumista ennen oli ajossa pitkään sama tuote. [13; 20.]

*Taulukko 21. Rikkoutumisten aikana ajossa olevien tuotteiden vertailu. [27; 28; 29.]*

<b>Polymeroinnin resepti</b>	<b>BDB67B</b>	<b>BAB55BV</b>	<b>BHB90B</b>
Rikkoutumispäivämäärä	18.3.2009	8.4.2010	22.5.2010
Rikkoutumiskohde	2. vaihe	1. vaihe	2. vaihe
Katalyytti	standard	new	standard
Donor	3	2	3
MFR2, 2-loop (g/10 min)	-	0,35	90
MFR2, GPR (g/10 min)	7,5	0,25	42
Vety, 1-loop (ppm)	3300	80	3800
Vety, 2-loop (ppm)	3350	2200	3800

Taulukossa vertailuista polymeroinnin tuotteista huomataan välittömästi yhtäläisyyksiä ensimmäisen ja viimeisen rikkoutumisen yhteydessä ajettujen tuotteiden välillä. Reseptejä yhdistävät rikkoutumiskohde, katalyytti, donor sekä suuret sulaindeksit ja vetymäärät. Varsinkin jälkimmäisessä BHB90B-laadussa sekä sulaindeksi että vetymäärät ovat tähtitieteelliset. [27; 28; 29.]

Mikäli edellä mainittuja tuotteita verrataan huhtikuun aikana ajettuun BAB55BV-polymeeriin, huomataan suuri ero sulaindekseissä ja vetypitoisuuksissa. Reseptissä erona muihin on käytössä myös eri katalyytti ja donor. [27; 28; 29.]

## 8.2 Prosessisuunnittelu

### 8.2.1 Pisanerotin

Matalapainepesurin jälkeisen pisanerotin FA-9304 on huomattu päästävän lävitseen kaasun mukana kulkeutuvia nesteitä. Tämä on todettu useasti kiertokaasukompressorin imusuodattimien FD-9304A/B vaihdon jälkeen, kun ajossa ollut suodatin on purettu. Säiliön pohjalta on toistuvasti löydetty runsaasti nesteitä, kuten kävi myös elokuussa 2010 avattua imusuodinta tutkailtaessa. [30.]

Seuraavalla sivulla kuvassa 16 näkyy säiliön välipohjalla useiden senttimetrien kirkas nestekerros. Nestettä löydettiin välipohjan lisäksi säiliön pohjalta sekä suodatinkasettien sisältä. Tämä todistaa kiistattomasti pisanerotin olevan riittämätön nykyisillä kaasuvirtauksilla. Työn yhteydessä tutkittiin pisanerotin sisätilaa ja huomattiin metalliverkon olevan melko ohut.



*Kuva 16. Kiertokaasukompressorin imusuodatin avattuna paineastiaseisokissa 2010.*

### 8.2.2 Imusuotimet

Kiertokaasukompressorin imusuotimet on suunniteltu suodattamaan kiinteää polypropeenipulveria hiilivetykaasun joukosta. Suunnitteluvirtaus kaasulle on 3800 kg/h, joka on siis selvästi nykyisiä arvoja pienempi. Vaikka suotimista ei kiinteitä aineita ole löytynyt, on nesteen löytyminen niistä kerta toisensa jälkeen vieläkin vakavampi asia. [31.]

### 8.2.3 Venttiilit

Venttiilien rakenteita ja ominaisuuksia tutkittaessa huomataan, ettei rajoittavana tekijänä venttiilien kestävyydelle ole prosessilämpötilat (taulukko 4). Venttiilit ovat materiaaliltaan mallistonsa huippuluokkaa, joten parantamisen varaa siinäkään mielessä ei ole. [15; 16.]

Thomassenin edustajan mukaan turvallinen lämpötila toisen vaiheen poistokaasulle sykäyksenvaihtimen poistolaipasta mitattuna on 160 °C. Edellä mainittujen faktojen pohjalta voidaan todeta, että materiaalikestävyydet ovat kompressorissa kunnossa eivätkä rikkoutumisia ole aiheuttaneet kohonneet lämpötilat, sillä pelivaraa niissä on vielä huomattavasti. Lämpötilojen kohoamisen täytyykin siten olla seuraus rikkoutumisesta, ei syy niille. [32.]

### 8.3 Prosessiparametrit

Kiertokaasukompressorin ensimmäisen ja toisen vaiheen välisen lämmönvaihtimessa jäädytetyn kaasun lämpötila on polymeroinnin kenttäoperaattorien havaintojen mukaan ollut 25–30 °C. Kaasun lämpötila ei näy automaatiojärjestelmässä eikä sitä merkitä kenttäraportteihin, joten ainoat tiedot lämpötilahistoriasta ovat suullisia ja perustuvat paikalliseen lämpötilamittariin.

Näin viileä lämmönvaihtimen jälkeinen lämpötila on kaasulle hyvin matala ja aiheuttaa huomattavaa kondensaatiota ennen ensimmäisen vaiheen pisaranerotussäiliötä, mikäli kaasussa raskaita komponentteja ilmenee. Vaikka pisaranerotussäiliön erotuskapasiteettiin luotettaisiin täydellisesti, etenee toisen vaiheen sylinteriin aina joitain määriä kaasumaista oligomeeria, kuten simuloinneissa todettiin. Oligomeereilla on sitä suurempi taipumus kondensoitua, mitä kylmempää sylinteriin saapuva kaasu on.

Teoriassa paras vaihtoehto on kondensoida kaasusta mahdollisimman paljon nesteitä, jolloin ne päästään erottamaan siitä pisaranerotussäiliössä. Ongelmia tässä tapauksessa saattaa kuitenkin ilmetä kahta tyyppiä: pisaranerotussäiliö voi päästää lävitseen liian suuria määriä kaasun mukana virtaavia nesteitä tai kaasun lämpötilan ollessa sylinterissä liian matala aiheutuu kondensoitumista paineen kasvaessa männän puristaessa kaasua. Taulukossa 22 on esitetty valmistajan laatimat suunnittelulämpötilat ja -paineet kiertokaasukompressorille. Tyypilliset ajoarvot eroavat näistä usein suuresti. [13.]

*Taulukko 22. Kiertokaasukompressorin suunnittelulämpötiloja ja -paineita. [17.]*

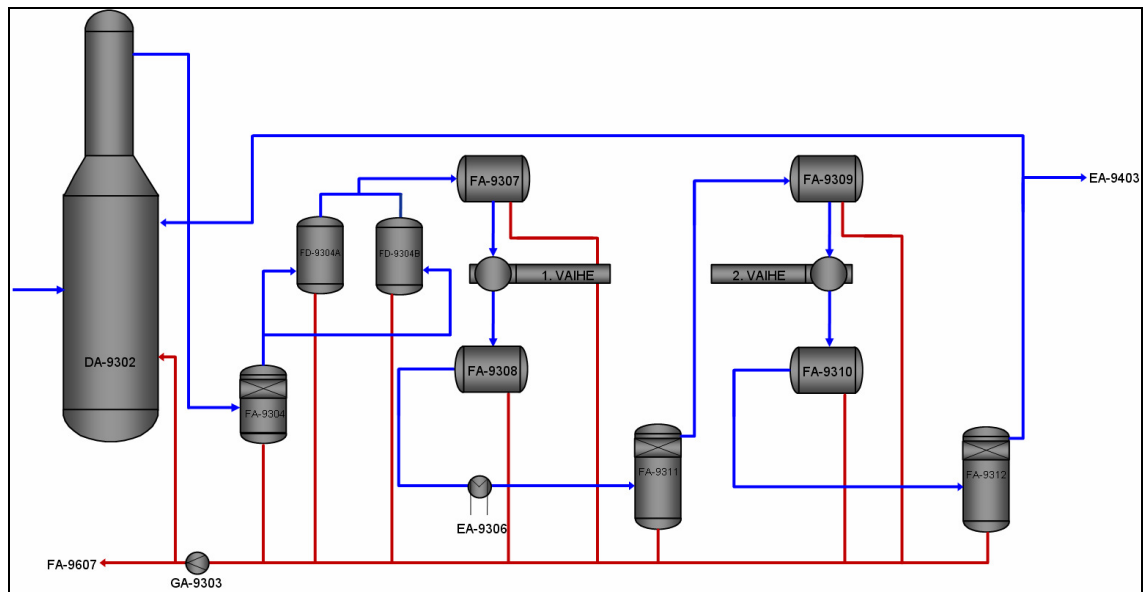
<b>Sijainti</b>	<b>Suunnittelulämpötila</b>	<b>Suunnittelupaine</b>
Imupuoli, 1. vaihe	40 °C	1,5 bar
Painepuoli, 1. vaihe	104 °C	5,6 bar
Imupuoli, 2. vaihe	40 °C	5,3 bar
Painepuoli, 2. vaihe	119 °C	22,0 bar

Taulukosta nähdään, että kompressoria on suunniteltu käytettäväksi huomattavasti korkeammissa lämpötiloissa. Suunniteltu imupaine ennen ensimmäistä vaihetta on matalampi, paine ajon aikana on yleensä 1,7 bar. [13; 17.]

#### 8.4 Vesityskäytännöt

Prosessissa kondensoituneen nesteen pääsyn riskiä kompressorin sylintereihin voidaan vähentää poistamalla nesteitä systemaattisesti ja säännöllisesti paikoista, joihin sitä kerääntyy. Kiertokaasukompressorin yhteydessä on useita säiliöitä, joihin niitä mahdollisesti kerääntyy. Etteivät nämä keruunesteet pääse karkaamaan niiden talteenottoa varten suunnitelluista säiliöistä, on niitä syytä tyhjentää säännöllisesti ja säännönmukaisesti. Näin suosittelee myös kompressorin valmistaja.

Seuraavalla sivulla on kuvassa 17 esitetty yksinkertaistetusti punaisin viivoin kiertokaasukompressorin läheisyydessä olevien säiliöiden tyhjennyslinjat sekä kohteet, joihin nesteet voidaan pumpata. [3.]



Kuva 17. Kiertokaasukompressorin tyhjennyslinjat ja pumppausmahdollisuudet. [3.]

Pumpulla GA-9303 voidaan kentältä käsin pumpata nesteitä pisaranerottimen, sykky-senvaimentimien, pisaranerotussäiliöiden sekä imusuotimien pohjalta. Pumpun painepuolelta tehtävät linjausvaihtoehdot ovat palautukset kolonniin DA-9302 tai käytetyn öljyn keruusäiliöön FA-9607. Jälkimmäiseen on suositeltavaa palauttaa kaikki oligomeeripitoinen jäte, sillä keruusäiliöstä neste pumpataan hapetusäiliöön FA-9608 ja sieltä edelleen talteenottosäiliöön FA-9612, josta se poistetaan prosessista ja toimitetaan Ekokemille. [3; 12; 35, s. 6–7.]

Työssä haastateltiin polypropeenilaitoksen vuoro-operaattoreita tarkoituksena muodostaa kuva nykyisistä vesityskäytänteistä ja niiden riittävydestä nesteen optimaalisen poiston kannalta. Haastatteluissa kiinnitettiin huomioita myös siihen, mihin nesteet säiliöistä pumpataan. Taulukkoon 23 on kerätty PP-laitoksen eri vuorojen vesityksiin liittyviä kohdesäiliöitä.

*Taulukko 23. Polypropeenilaitosten eri vuorojen vesityskäytäntöjä.*

<b>Vuoro</b>	<b>Kolonnein DA-9302</b>	<b>Keruusäiliöön FA-9607</b>
1	FA-9304	FA-9311, FA-9312
2	FA-9304	FA-9311, FA-9312
3	FA-9304	FA-9311, FA-9312
4	FA-9304	FA-9311, FA-9312
5	FA-9304	FA-9311, FA-9312

### 8.5 Rikkoutumishistorian tutkiminen

Rikkoutumisia tutkittaessa oli selvittävä, voidaanko tapahtumat linkittää toisiinsa lämpötila- ja painemuutosten avulla vai ovatko ne kaikki erillisiä, toisistaan riippumattomia tapahtumia. Lisäksi oli mietittävä, onko kullakin alasajolla sama aiheuttaja vai onko rikkoutumissyitä useampia.

Neljään työssä käsiteltyyn tapahtumaan liittyviä automaatiojärjestelmän paine- ja lämpötilatrendejä analysoitaessa huomattiin yhteneväisyydet maaliskuun 2009 ja toukokuun 2010 rikkoutumisten sekä huhtikuun 2010 ja heinäkuun 2010 rikkoutumisten välillä. Ensiksi mainitut tapaukset olivat nopeita sekä äkillisiä tilanteita ja tulivat operattoreille täydellisinä yllätyksinä. Näissä kahdessa rikkoutumisessa häiriö sijoittui kompressorin toiseen vaiheeseen ja sen pakoventtiileihin. [13.]

Jälkimmäiset tapahtumat, rikkoutuminen ja huolto, olivat pitkäkestoisia ja ennalta arvatavissa olevia tilanteita, joissa lämpötilannousu oli maltillista ja jatkuvaa pienen ensihypähdyksen jälkeen. Kummallakin kerralla ehdittiin ennakoida kompressorin tuleva hajoaminen ja jälkimmäisellä ehdittiin asialle tehdäkin jotain. Näissä rikkoutumistyypeissä häiriö sijoittui kompressorin ensimmäiseen vaiheeseen ja sen pakoventtiileihin. [13.]

Tapahtumaparien yhtäläisyyksistä sekä vuoden 2009 rikkoutumisen tietoja hyödyntäen saatiin kaivetuksi esille kriittiset johtolangat rikkoutumisten pohjimmaisten aiheuttajien taustoihin. Kiertokaasukompressorin venttiilit eri kerroilla hajottaneiden nesteiden alkuperiin liittyvät hypoteesit käsitellään seuraavassa luvussa jakaen ne eri rikkoutuneen vaiheen perusteella.

## 8.6 Nesteiden alkuperä

### 8.6.1 Ensimmäisen vaiheen rikkoutumiset

Simulointien pohjalta voidaan todeta, ettei kondensaatio sylinterissä kuulu ensimmäisiin epäilyksen aiheisiin kompressorin ensimmäisen vaiheen venttiilien rikkoutumistapauksissa. Tämä tarkoittaa sitä, että venttiilit rikkonut neste on tullut sylinteriin kaasuseoksen mukana. Kiertokaasukompressorin pisaranerotin ei tätä todistetusti riitä estämään, mikä tukee hypoteesia. Neste koostui luultavimmin pääosin oligomeereista ja pienistä määristä öljy-rasvaseosta.

Imusuotimia ei ole suunniteltu nesteitä varten, vaan blokkamaan kiinteät partikkelit kaasuseoksesta. Toki suotimet keräävät myös nesteitä, mutta pinnan noustessa imusuotimien pohjilla kasvaa myös todennäköisyys nesteiden läpipääsulle. Vesityskäytäntöjä tutkittaessa huomattiin, ettei sykäksenvaimentimia vesitetä ollenkaan. Tämä tarkoittaa, ettei takeita niiden nesteettömyydestä ole ja mikäli nestepinta vaimentimessa nousee riittävästi, valuvat nesteet suoraan ensimmäisen vaiheen sylinterille. Myöskään imusuotimia ei ole ajon aikana tyhjennetty, joten heikkoja lenkkejä on ketjussa jo kaksi.

Nykyään matalapainepesurin öljykierron massavirrat ovat huomattavasti suurempia kuin ennen, joten kolonnilta lähtevän kaasun mukaan lähtee enemmän öljyrasvaseosta kuin matalammilla virtauksilla. Tämä lisää entisestään kiertokaasukompressorin pisaranerotin rasiitusta.



Hypoteesia tukee rikkoutumisen aikana ja sitä ennen ajossa olleet tuotteet ja niiden ajoparametrit, sillä huhtikuun ja heinäkuun venttiilirikkojen aikana ajossa olleet tuotteet ovat maltillisia tuotteita, eikä niihin yleensä liity ongelmia, kuten oligomeerien huomattavaa kondensoitumista välijäähdyttimessä.

Diagrammeissa esillä ollut ensimmäisen vaiheen ylöspäin hypännyt poistokaasun lämpötila vaikuttaisi johtuneen nesteiskun vaurioittaman pakiventtiilin vuodosta, jolloin lämmennyttä kaasua virtaa takaisin sylinterikammioon. Tämä voi lämmittää kaasua toisen vaiheen komprimoinnissa, kuten heinäkuun diagrammista tulee selkeästi ilmi.

#### 8.6.2 Toisen vaiheen rikkoutumiset

Toisen vaiheen rikkoutumisissa reaktoreihin syötettävät suuret vetypitoisuudet ja niistä aiheutuvat suuret oligomeerimäärät ovat suurella todennäköisyydellä aiheuttaneet venttiilien vaurioitumiset. Tähän liittyviä vaihtoehtoja on kaksi: joko kaasun välijäähdytyksessä kondensoituneita oligomeereja pääsee karkaamaan sylinteriin ensimmäisen vaiheen pisaranerotussäiliön FA-9311 ohi tai kaasumaisia oligomeereja kondensoituu sylinteriin komprimoinnin aikana paineen noustessa.

Muihin tuotteisiin suhteutettuna oligomeerien hyvin runsas kerääntyminen säiliöön FA-9311 heinäkuun 2010 aikana tehdyssä BHB90-ajossa on merkittävä huomio. Se tukee vahvasti oligomeerien kondensaatihypoteesia. 3-donorilla, joka oli käytössä molempien toisen vaiheen rikkoutumisten aikana, uskon olevan myös vaikutusta asiaan. [13.]

Vuorokirjauksia tutkittaessa huomataan yhtäläisyyksiä toukokuun rikkoutumista edeltäviltä päiviltä. Kirjauksista tuli esiin poikkeuksellisen suuret oligomeerimäärät, joita pumpattiin pois useita kertoja vuoron aikana ensimmäisen vaiheen pisaranerotussäiliöstä. Eräs huomionarvoinen seikka on 21.5. aamuvuorossa kirjattu merkintä, jossa kerrotaan ongelmista petrokemian päässä ja mainitaan myös metanolista prosessissa. [13.]

Simuloinnit osoittavat, että kaasuseokseen jää aina kaasumaisia oligomeereja välijäähdytyksen jälkeen. Nämä saattavat teoriassa kondensoitua sylinterissä, vaikka kyseisillä simulointiparametreilla ei sitä saatu aikaan. Suuri kondensaattimäärä voi asettaa myös liiallista rasitetta pisaranerotussäiliön metalliverkolle.

Toisen vaiheen rikkoutumiset ovat olleet nopeita tapahtumia, joissa poistolämpötilat ovat alkaneet nousta ensimmäisen vaiheen poistopaineen hypähdyksen jälkeen. Syitä voi olla kaksi: joko paineen nousu ensimmäisessä vaiheessa johtuu toisen vaiheen pakkoventtiilin vaurioitumisesta nesteiskun vaikutuksesta, jolloin ensimmäinen vaihe joutuu tekemään enemmän työtä komprimoinnin eteen, tai toisen vaiheen imuventtiilivias-ta, jolloin imulinjaan vuotaa lämmennyt kaasua, joka implikoituu poistolämpötilan kasvuna.

Korjausten yhteydessä ei imupuolen venttiileistä kuitenkaan löytynyt mitään vikaa, joten voidaan todeta jälkimmäinen vaihtoehto pois luetuksi. Painepuolen venttiilin mennessä rikki kohoo sen myötä kaasun lämpötila. Ensimmäisen vaiheen tehdessä enemmän työtä kasvaa myös lämpötila ennen lämmönvaihdinta.

Tapahtumajanan lyhyiden vuoksi voi olla myös syytä epäillä heilahdusta prosessissa, joka on äkillisesti päästänyt sylinterille nesteitä, jotka ovat poikkeuksellisen suuren määränsä vuoksi lentäneet toiseen vaiheeseen kaasun mukana tai syntyneet siellä paineen noustessa. Tämä ei kuitenkaan vaikuta yhtä todennäköiseltä vaihtoehdolta. Viimeinen epäily rikkoutumisten mahdollistamiseksi saattaisi olla oligomeerien jatkuva akkumuloituminen prosessiin ja sen myötä tulleet erotusongelmat.

## 8.7 Käytännön ongelmia

Diagrammien analysointi ja niiden avulla rikkoutumistilanteiden ymmärtäminen on ollut haasteellista lämpötilamittauksen puuttuttua välijäähdyttimen jälkeisen kaasun lämpötilasta eli toisen vaiheen imulämpötilasta. Tämä mittaus olisi antanut kullan arvoista lisäymmärrystä ilmiöihin, joita työssä on tutkittu, sekä apua imulämpötilan asetusarvon määrittämiseksi.

Kaasuanalyysit peilaavat tiettyä, yhdellä hetkellä kaasusta otettua mittaustulosta. Se ei ota kantaa prosessin heilahteluihin eikä anna takuita mittausten luotettavuudesta, sillä toistomittauksia ei ole tehty. Eri tuotteilla kaasuseosten koostumukset ovat erilaisia. Suurin huomio on kuitenkin se, ettei mittaus ole jatkuvaa eivätkä tulokset ole missään nimessä minkäänlaisia keskiarvoja. Siksi niihin ei voida liikaa nojautua tilanteen analysoimisessa tai simuloinnissa, sillä prosessin heilahduksesta tai erilaisesta ajoreseptistä johtuen voi oligomeerien määrä moninkertaistua analyysimääriin nähden.

Simulointi ei koskaan peilaa täysin tosielämää tai reaaliprosesseja, vaan antaa lähinnä suuruusluokkatarkastelua ja suuntaa antavia tuloksia. Lisäksi kaasuanalyyseissä mielenkiintoa herättävien oligomeerien koostumukset eivät ole kyllin tarkasti määriteltyjä. Simuloinnissa on erityisen tärkeää, onko kyseessä oikeasti esimerkiksi dodekaani  $C_{12}H_{26}$  vai pentadekaani  $C_{15}H_{32}$ , sillä kyseisten molekyylien kondensoitumistaipumuksilla on suuret erot. Lisäymmärryksen saavuttamiseksi olisi ensiarvoisen tärkeää saada näyte nesteytyneestä aineesta esimerkiksi imusuotimilta.

Kompressoreita ei voi tarkasti simuloida mm. erilaisten mekaanisten ratkaisujen vuoksi. Laitteiden kapasiteetti on valmistajien mukaan riittävä, mutta asiasta ei voida varmuudella olla samaa mieltä, ottaen huomioon esimerkiksi kompressorin pisaranerotimen läpivuodot. Laitteiden mitoituksen tarkistamiselle ei ole aina olemassa selkeitä kaavoja tai menetelmiä.

Kiertokaasukompressorin suunnitteluarvot eroavat päivittäisessä ajossa käytetyistä. Laitteelle suunnitellun kaasun koostumus kuitenkin eroaa oleellisesti prosessissa olevasta, sillä siinä ei ole otettu huomioon raskaita komponentteja. Tämä tarkoittaa sitä, ettei kondensaatiota ole tarvinnut suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon yhtä laajalaisesti, kuin se nyt prosessissa esiintyy oligomeereista ja nykyisistä tuotteista johtuen.

## 9 Parannusehdotukset

### 9.1 Johdanto

Parannusehdotuksia luokitellessa voidaan jakaa ne eri kategorioihin, joista ensimmäinen on rikkoutumisia aiheuttavien, haitallisten aineiden syntymisen estäminen prosessissa. Haitallisilla aineilla tarkoitetaan tässä tapauksessa oligomeereja, jotka nesteydyttyään ovat aiheuttaneet kierto kaasukompressorin pakovoventtiilien rikkoutumiset.

Seuraava askel olisi jo syntyneiden oligomeerien tehokas poistaminen prosessista ennen kompressorille pääsyä tai kompressorin läheisyydessä rikkoutumisvaaraa aiheuttamatta. Kolmanneksi jää jäljelle kysymys, voidaanko prosessi- tai materiaaliteknisillä muutoksilla estää vahingot, jotka nesteiskuista aiheutuvat.

Seuraavat luvut käsittelevät työssä saatujen tulosten, tutkimusten ja johtopäätösten pohjalta tehtyjä parannusehdotuksia ja niiden toteuttamiskelpoisuuksia edellä esitettyihin näkökulmiin pureutuen.

### 9.2 Haittatuotteiden syntymisen estäminen

Prosessin haittatuotteina esiintyvät oligomeerit syntyvät reaktoreissa polymerointireaktion sivutuotteena. Luvussa 3.7.2 esitettyyn diagrammiin vedoten voidaan todeta katalyyttityypin vaikuttavan oligomeerien syntyyn. Polypropeenilaitoksella käytettävien katalyyttien (standard catalyst, new catalyst) synnyttämien lyhyiden hiilivetyketjujen määrä on lähes kymmenkertainen ohessa esiteltyyn katalyyttiin (newest catalyst) verrattuna. [10; 11.]

Polypropeenilaitoksella käytettävät katalyytit ovat ominaisuuksiltaan ideaaleja laitoksella tuotettavaa polymeeriä ajatellen. Tästä syystä haittatuotteiden syntymiseen reaktoreissa ei valitettavasti voida nykytilassa vaikuttaa. Kiertokaasukompressorin suojelemiseksi on siis keskityttävä suoraan oligomeerien tehokkaaseen poistamiseen. [10.]

### 9.3 Haittatuotteiden poistaminen prosessista

#### 9.3.1 Jatkuvatoiminen poistaminen

Oligomeerien poistamiseksi on tehty tutkimus, joka epäsuorasti liittyy työssä vallitsevaan ongelmaan. Tuotteen hajun ja maun parantamiseksi tähtäävä työryhmä oli koeajossa vuonna 1998 ajanut Porvoon polypropeenilaitoksella korkeapainepesurin pohjatuotetta pois prosessista turvasoihtuun selvittääkseen, vaikuttaako kyseisen virran prosessista poistaminen positiivisesti tuotteen hajuun ja makuun.

Ajon aikana otettiin pelletoinnissa pellettinäytteitä, jotka raati luokitteli maultaan ja hajultaan miellyttävämmäksi verrattuna normaalissa ajotilanteessa arvioituihin näytteisiin. Oligomeereilla tiedetään olevan selkeä yhteys aistinvaraisen arvioinnin tuloksiin, joten tuloksista voidaan todeta oligomeerien osittaisen poistamisen onnistuneen. [10; 33, s. 29–32.]

Vuonna 2004 polypropeenin puhtauteen liittyvässä projektissa tutkittiin virtausten oligomeerikonsentraatioita Spheripol-prosessin eri vaiheissa. Pitoisuudet eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, sillä osa mittauksista on otettu eri ajojen aikana eri tuoteresepteillä. Tulosten suuruusluokat antavat kuitenkin selkeän suunnan, mistä oligomeereja löytyy ja mihin ne prosessissa akkumuloituvat. [34.]

Suurimmat konsentraatiot löytyivät höyrynkäsittelysäiliön päältä kerätystä näytteestä, jopa 6250 ppm. Tämä ei kuitenkaan aiheuta ongelmia, sillä kaasu päätyy pois prosessista Borealikesen krakkerille. Kuivaimen suljetusta typpikierrosta puolestaan löytyi oligomeereja n. 4000 ppm. [10; 34.]

Varteenotettava tulos tutkimuksessa oli korkeapainepesurin pohjalta kerätty näyte, jossa oligomeeripitoisuus matalasulaindeksisessä BA202E-laadussa oli n. 4000 ppm. Kolonnin pohjalta lähtevä virtaus palaa matalapainekaasunerotussuodattimen tulolinjaan, josta kaasut etenevät pussisuotimien läpi kiertokaasukompressorille. Oligomeerit siis kiertävät prosessissa ja liittyvät siksi läheisesti matalapainekaasunerotukseen ja kiertokaasukompressorin toimintaan. [34.]

Vuoden 1998 tulokset tarkoittavat, että kierrossa olevien oligomeerien määrää on saatu vähennettyä prosessimuutoksen avulla. Tämä tarkoittaa myös sitä, että niiden kondensoitumisriskiä ja päätymistä kiertokaasukompressoriiin voidaan ainakin jossain määrin välttää ajamalla korkeapainepesurin pohjatuotetta pois kierrosta, kuten tässä tapauksessa soihtuun.

Korkeapainepesurin pohjalta tuleva virtaus on kuitenkin melko suuri ja sieltä tuleva nesteseos on käyttökelpoista raaka-ainetta. Mikäli linjan sisältö ajettaisiin poltettavaksi turvasoihtuun, tarkoittaisi se raaka-ainemenetyksiä ja siitä johtuen menetettyä pääomaa. Kyseessä ei missään tapauksessa ole varteenotettava vaihtoehto oligomeerien jatkuvatoimiseksi poistamiseksi.

Tällä hetkellä on polypropeenilaitoksella tekeillä selvitys, voidaanko kolonnin pohjatuotetta palauttaa krakkerille uudelleenkäytettäväksi. Tällä tavalla päästäisiin ainakin osittain eroon prosessin epäpuhtauksista haaskaamatta käyttökelpoista raaka-ainetta. Ongelmaksi muodostuukin korkeapainepesurin pohjatuotteen joukossa oleva pöly. Pölyn suodattaminen virtauksesta on välttämätöntä palautuksen mahdollistamiseksi, mutta se on teknisesti hankalaa ja kallista.

### 9.3.2 Vesityskäytännöt

Yhteenvedona polypropeenilaitoksella tehdyistä haastatteluista voidaan todeta olemassa olevien vesityskäytäntöjen olevan selkeät ja kaikkien tiedossa. Kiertokaasukompressorin pisaranerotimen pohjalle kerääntyvä öljy-rasvaseos pumpataan takaisin kolonniin pinnankorkeuden takaamiseksi. Kompressorin ensimmäisen ja toisen vaiheen painepuolilla olevat pisaranerotussäiliöt pumpataan käytetyn öljyn keruusäiliöön prosessista poistoa varten.

Yhdeltäkään vuorolta ei kuitenkaan tullut kommentteja sykäyksenvaimentimien tai imusuotimien vesityksiin liittyen. Edellä mainittujen säiliöiden pohjille kerääntyvien nesteiden määrästä ei voida sanoa mitään, sillä seuranta on mahdotonta pinnanmittausten puuttuttua säiliöistä. Sekä pisaranerotussäiliöiden että pisaranerotimen kyljessä on näkölasit, jotka helpottavat nesteiden kerääntymisen seuranta.

Kuitenkin nesteitä on todistettu kulkeutuneen imusuotimille ja siksi on jo lähes todennäköistä, että niitä päätyy myös kompressorin sykäyksenvaimentimille. Tästä syystä on ehdottomasti lisättävä vesityskäytäntöihin kohdat, joissa edellä mainitut säiliöt kuuluvat myös normaalin, jokapäiväisten vesitystoimenpiteiden piiriin. Taulukkoon 24 on koottu ehdotus uusista vesityskäytännöistä parantamaan kompressorin toimintavarmuutta.

*Taulukko 24. Ehdotus uusista vesityskäytännöistä.*

<b>Tunnus</b>	<b>Vesitysohjeet</b>	<b>Pumppauskohde</b>
FA-9304	Kolonnin pinnan laskiessa	DA-9302
FD-9304A/B	Kerran vuorossa	FA-9607
FA-9307	Kerran vuorossa	FA-9607
FA-9308	Kerran vuorossa	FA-9607
FA-9309	Kerran vuorossa	FA-9607
FA-9310	Kerran vuorossa	FA-9607
FA-9311	Nestettä havaittaessa	FA-9607
FA-9312	Nestettä havaittaessa	FA-9607

Tarkoituksena on vesittää pisaranerotussäiliöt sekä pisaranerotin samalla tavalla kuin ennenkin eli silloin, kun näkölasissa näkyy nestettä tai jälkimmäisen tapauksessa, kun matalapainepesurin pinnankorkeus on laskenut normaalista korkeudesta riittävästi. Näkölasittomat säiliöt vesitetään kerran vuorossa, sillä niiden tilasta ei voida ulospäin arvella mitään, eikä toimenpiteeseen kulu kohtuuttomasti aikaa.

### 9.3.3 Prosessisuunnittelu

Paineastiaseisokissa syyskuussa 2010 tutkittiin kiertokaasukompressorin pisaranerotinmen kunto ja mahdollisuudet verkkopinta-alan kasvattamisesta erotustehon parantamiseksi. Verkon havaittiin olevan hyvässä kunnossa, mutta sitä oli säiliössä melko vähän. Teoriassa säiliössä on tilaa lisäverkolle. Asian suhteen on ehdottomasti syytä käynnistää selvitys, jossa käydään läpi erilaiset ratkaisut pisaranerotinmen kapasiteetin lisäämiseksi.

### 9.4 Ajoparametrit

Ajoparametrien muutoksilla voidaan vaikuttaa kaasuseoksessa olevien raskaimpien komponenttien kondenssaatioon, kuten simuloinneissakin todettiin. Taulukkoon 25 on kerätty prosessin suunnittelu- ja lukituslämpötilat lähempää tarkastelua varten.

*Taulukko 25. Prosessin suunnittelu- ja lukituslämpötiloja. [13; 17.]*

<b>Lämpötilan mittaus</b>	<b>Suunnittelulämpötila</b>	<b>Lukituslämpötila</b>
Imupuoli, 1. vaihe	40 °C	-
Painepuoli, 1. vaihe	104 °C	119 °C
Imupuoli, 2. vaihe	40 °C	-
Painepuoli, 2. vaihe	119 °C	119 °C



Taulukosta huomataan heti suuri ristiriita toisen vaiheen poistokaasun suunnittelulämpötilasta, joka on sama kuin käytössä oleva lukituslämpötila. Taulukossa 4 venttiileille esitetyt maksimilämpötilat osoittavat, ettei raja ole tulossa vastaan venttiilimateriaalien kannalta, joten lukituksia on mahdollista nostaa tarvittaessa ylöspäin. Asiantuntijan mukaan toisen vaiheen jälkeisen lämpötilan ollessa alle 160 °C toimitaan turvallisella alueella. [13; 32.]

Välijäähdetyksen optimilämpötilaa määrittäessä ei päästy eksplisiittiseen ratkaisuun simuloinneissa ilmenneiden ristiriitojen vuoksi. Kaasumaisessa olomuodossa olevien oligomeerien määrän minimointi vaatii mahdollisimman matalan vaiheiden välisen lämpötilan, mutta nestemäärien kasvaessa on riskinä läpivuoto sylinterille sekä sylinterissä oligomeerien kondensoituminen kaasun ollessa liian kylmää. Kaasun liian kuuma lämpötila välijäähdetyksen jälkeen puolestaan päästää enemmän kaasumaisia oligomeereja toisen vaiheen sylinteriin ja alkaa konsentroida haitta-aineita prosessiin.

Toisen vaiheen imulämpötilaksi automaatiojärjestelmään määritettiin 35 °C. Tämän uskotaan olevan kylliksi korkea lämpötila, jolla estetään liian kylmän kaasun raskaimpien kondensoituminen sylinterissä. Myös simuloinneissa (kuva 14) todettiin, että suurin kokonaisnestekondensaatio saavutetaan kyseisellä lämpötilalla heti 25 °C:n jälkeen oligomeerivirtausten kasvaessa hieman suuremmiksi. Suuret oligomeerivirtaukset ovat nimenomaan ongelmana, kun puhutaan toisen vaiheen rikkoutumisista.

Paineastiasoisokin yhteydessä nostettiin automaatiojärjestelmään ensimmäisen vaiheen lukituslämpötila arvoon 125 °C ja toisen vaiheen lukituslämpötila arvoon 140 °C. Var-sinkin aluksi on kompressorin toimintaan syytä kiinnittää erityistä huomiota uusien asetusten vuoksi.

Matalapainepesurin pesunestekierron määrällistä vähentämistä kannattaa tutkia, sillä siten saadaan vähennetyksi kiertokaasukompressorin pisaranerotimen nestekuormaa. Virtauksen vähentäminen voisi olla perusteltua pelkästään entistä pienempien TEAL-syöttöjen puolesta.

## 9.5 Nesteiskuista aiheutuneiden vahinkojen estäminen

Dresser-Randin selvityksen mukaan suurin osa (36 %) teollisuuden mäntäkompressorien suunnittelemattomista alasajoista johtuu venttiilirikoista. Tästä syystä venttiilien suunnittelu ja kehittäminen on erityisen tärkeässä roolissa eri sovelluksia ajatellessa. Venttiilien suunnitteluun liittyviä muuttujia on runsaasti aivan erilaisista rakenteellisista ratkaisuista eri osien materiaalivalintoihin ja jousien jäykkyyteen. [36.]

Venttiilien toistuvien rikkoutumisten estämiseksi on mietittävä, voidaanko venttiilit korvata rakenteeltaan paremmilla tai kestävämmillä venttiileillä, sekä käytävä läpi, onko eri suunnittelumuuttujat optimoitu kyseistä prosessia ajatellen. Tämän suhteen ei nähdä asiassa olevan epäilystä. Kiertokaasukompressorin kaikki venttiilit vaihdettiin kuitenkin uusiin paineastiaseisokissa 2010.

## 9.6 Muut ennaltaehkäisevät toimet

Kompressorin venttiilien kuntoa voidaan tarkkailla kuormituksen aikana infrapunamittareilla. Menetelmällä ei voida vähentää todellisen ongelman riskiä, mutta ennakoivalla tiedolla voidaan ehkäistä hallitsemattomia alasajoja, kun mahdollisesta rikkoutumisesta tiedetään etukäteen. Imu- ja painepuolen venttiilien lämpötiloja tutkittaessa tulee keskittyä erikseen kunkin puolen venttiilien välisiin lämpötilaeroihin, sillä jo n. 10 asteen ero saman puolen venttiilien välillä saattaa paljastaa vaurioituneen ja vuotavan venttiilin. [26.]

Toinen tärkeä toimenpide on poistolämpötilojen ja niiden trendien ajoittainen seuraminen. Tunnettaessa edellisten tapausten rikkoutumisprofiilit eli lämpötilojen ja paineiden käyttäytymistä venttiilirikon lähestyessä voidaan myös puhalttaa pilliin kylliksi ajoissa hallitsemattoman alasajon ehkäisemiseksi. Tosin kummallakaan kerralla toisen vaiheen rikkouduttua ei itse tapahtumasarja ole kestänyt kauan, joten ennaltaehkäisevät toimet sijoittuvat luultavasti enemmän ensimmäiseen vaiheeseen.

Rahallisia tappioita ei yllä olevilla menetelmillä voida välttää, eivätkä ne siksi ole suoranaisia ratkaisuja tai parannusehdotuksia, mutta silti ne ovat asioita, joiden avulla tilanteita osataan ennakoida entistä paremmin ja tehokkaammin.

Toisen vaiheen rikkoutumisten yhteydessä ajetuista tuotteista olisi hyvä saada kaasunäytteet kaasun koostumuksen analysointia varten. Tällöin saadaan tarkempaa tietoa, poikkeako koostumus jollain tavalla muista tuotteista. Suosittelen myös nestenäytteen keräämistä esimerkiksi seuraavan imusuotimen vaihdon yhteyteen. Tarkempi tieto oligomeerien koostumuksista ja ylipäätään nesteen sisällöstä auttaa tekemään lisätutkimuksia ja -johtopäätöksiä ongelman suhteen.

## 10 Yhteenveto

### 10.1 Rikkoutumisten syyt

Kiertokaasukompressorin venttiilit ovat rikkoutuneet joka kerta nesteiskun vaikutuksesta. Kumpikin kevään 2010 rikkoutumiskerroista on oma, yksittäinen, tapahtumansa, ja ne eroavat toisistaan rikkoutuneiden venttiilien sijainnin kannalta ja aiheuttajiensa perusteella. Heinäkuussa 2010 tapahtunut huoltoon johtanut venttiilirikko muistuttaa ominaisuuksiltaan läheisesti huhtikuun tapausta.

Ensimmäisen vaiheen venttiilien rikkoutumiset huhtikuussa ja heinäkuussa aiheuttivat suurella todennäköisyydellä kompressorille karanneet nesteet, joita kapasiteetiltaan liian pieni pisaranerotin ei pystynyt pysäyttämään imusuotimista puhumattakaan. Epäilyksien puolesta puhuvat imusuotimien ja sykäyksenvaimentimien puutteelliset vesityskäytännöt. Tapahtumat olivat hitaita ja implikoituvat selkeimmin ensimmäisen vaiheen poistolämpötilan hitaasta, mutta jatkuvasta noususta. Rikkoutumisia edeltävistä tuotteista ei löytynyt samankaltaisuuksia.

Toisen vaiheen rikkoutumisen syynä olivat oligomeerit, jotka pääsivät sylinteriin joko nesteydyttyään välijäädyttimellä ja karkaamalla ensimmäisen vaiheen pisaranerotussäiliöstä FA-9311 tai kondensoitumalla paineen nousun myötä paikan päällä. Rikkoutuminen oli äkillinen tapahtuma, joka sattui varoittamatta ja reagointiaikaa antamatta. Verrattaessa rikkoutumista vanhaan, maaliskuun 2009 rikkoutumiseen huomattiin yhtäläisyyksiä alasajoja edeltävistä tuotteista, tärkeimpinä peruspolymeeri (block), erittäin korkeat vetisyötöt, katalyytti (standard) sekä donor (3). Venttiilien rakenteen ja ominaisuuksien ei todettu liittyneen rikkoutumisiin missään rikkoutumistapahtumassa.

## 10.2 Parannusehdotukset

Haittatuotteiden syntyyn ei voida prosessissa vaikuttaa millään tavoin. Oligomeerien syntyä varsinkin tietyillä tuotteilla voidaan oikeastaan kutsua prosessin ominaisuudeksi. Tutkimukset osoittavat, että kiertävien oligomeerien määrää voidaan vähentää poistamalla korkean oligomeerikonsentraation sisältävää korkeapainepesurin pohjatuotetta prosessista. Tämä voi olla varteenotettava vaihtoehto prosessin puhtauden parantamiseksi, mutta vaatii nykytilaan nähden lisätutkimusta erittäin vaikean toteutettavuutensa vuoksi ja vaikuttaakin siksi epätodennäköiseltä investoinnilta.

Operaattorien toiminnalla ja tarkkaavaisuudella on laitoksen optimaalisen toiminnan kannalta merkittävät vaikutukset. Oikeilla, järjestelmällisillä ja rutinoituilla toimilla voidaan ennaltaehkäistä ongelma- ja rikkoutumistilanteita. Tämän vuoksi on tärkeää kiertokaasukompressorin häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi tyhjentää laitetta ympäröivät säiliöt säännöllisesti. Myös lämpötilatrendien ajoittainen tarkkailu on tärkeää, jotta muutokset niissä voidaan ajoissa huomata.

Haastattelujen pohjalta voidaan todeta vesityskäytäntöjen olevan oikealla suunnalla, mutta varsinkin vaikeilla ja oligomeeripitoisilla tuotteilla, kuten toisen vaiheen rikkoutumisten yhteydessä ajettujen tuotteiden tapauksessa, tulee käytäntöjä kiristää ja niitä ehdottomasti noudattaa. Työssä tehtiin uudet vesitysohjeet tarkentaen muutamaa vuorokautta tyhjennyskohdetta lisäämään kompressorin toimintavarmuutta ja estämään inhimillisistä virheistä johtuvat rikkoutumiset.

Paineastiasoisokissa 2010 asennetun jäähdytysveden säätöventtiilin myötä määritettiin välijäähdyttimen jälkeiselle kaasulle lämpötilaksi 35 °C pohjautuen simulointituloksiin sekä valmistajan antamiin suosituksiin. Automaatiojärjestelmän lukituslämpötiloja nostettiin arvoihin 125 °C (1. vaihe) ja 140 °C (2. vaihe) vastaamaan paremmin prosessin nykytilaa.

Pisaranerotin FA-9304 erotustehon kasvattamiseksi suosittelen käynnistettäväksi selvitystä, sillä sen toimintaa parantamalla saataisiin pysäytetyksi jo nesteytyneiden oligomeerien kulku kiertokaasukompressorin imusuodattimille ja niiltä mahdollisesti eteenpäin. Myös matalapainepesurin pesukierron pienentämisen mahdollisuutta kannattaa tutkia, sillä silloin kolonnista karkaavat nestemäärät pienenisivät olennaisesti.

Selvityksissä kävi ilmi kompressorin venttiilien olevan riittävät prosessia sekä sen olosuhteita ajatellen niin materiaali- kun lämpötilakestävyys kannalta, joten niihin ei suositella muutoksia.

Lisäymmärryksen saamiseksi saattaisi olla järkevää ottaa kaasunäyte ongelmallisesta, korkean sulaindeksin ja 3-donorin block-tuotteesta, jotta selviäisi oligomeerien todellinen määrä kiertokaasussa. Oligomeerikoostumuksen ymmärtämiseksi olisi kannattavaa kerätä näyte esimerkiksi imusuotimen pohjalta löytyneestä nesteestä.

### 10.3 Lopuksi

Työssä päästiin tavoitteeseen eri rikkoutumistapahtumien syiden selvittämiseksi. Ilmiöiden ymmärryksen lisääminen on tarpeen tulevaisuuden rikkoutumisia estettäessä. Parannusehdotuksista osa on vielä suunnittelutasolla ja kysymykseksi jää, mitkä ovat päätökset niiden suhteen. Parannusehdotusosio voidaan silti julistaa onnistuneeksi, sillä ehdotuksia esitettiin monipuolisesti ja asetettiin myös voimaan. Toki vasta tulevaisuus tuo tullessaan ehdotusten painoarvon ja kokemukset niiden mahdollisesta onnistumisesta.

## Lähteet

1. Borealis in Finland. (WWW-dokumentti.) Borealis Polymers Oy.  
<<http://www.borealisgroup.com/about/production-sites/borealis-finland>>.  
2009. Luettu 22.6.2010.
2. Koivuniemi, Markku. PP-tuotannon käsikirja: Prosessikuvaus. Borealis Polymers Oy. 1.6.2010.
3. PI-kaaviot. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.
4. Maier, Clive & Calafut, Teresa. Polypropylene – The Definitive User’s Guide and Databook. William Andrew Publishing/Plastic Design Library, 1998.
5. Käyttöturvallisuustiedotteet. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.
6. High Crystallinity Polypropylene. (WWW-dokumentti.) LyondellBasell.  
<<http://www.lyondellbasell.com/Products/ByMarket/PlasticsAndRubber/HighCrystallinityPolypropylene>>. 2010. Luettu 14.9.2010
7. Random Copolymer Polypropylene. (WWW-dokumentti.) LyondellBasell.  
<<http://www.lyondellbasell.com/Products/ByMarket/PlasticsAndRubber/RandomCopolymerPolypropylene>>. 2010. Luettu 14.9.2010
8. Impact Copolymer Polypropylene. (WWW-dokumentti.) LyondellBasell.  
<<http://www.lyondellbasell.com/Products/ByMarket/PlasticsAndRubber/ImpactCopolymerPolypropylene>>. 2010. Luettu 14.9.2010
9. Melt Flow Rate (MFR). (WWW-dokumentti.) Pira International.  
<<http://www.pira-international.com/testing/material-properties/plastic/Melt-flow-rate.aspx>>. 2010. Luettu 4.7.2010.

10. Tuominen, Olli. Senior Research Engineer – R&D, Process Development, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Keskustelu 29.6.2010.
11. Oligomers in Pilot Plant PP loop. Borealis Polymers Oy.
12. Polypropeenitehdas: Laiteluettelo. Neste Oy Chemicals. 15.8.1988.
13. MetsoDNA. Automaatiojärjestelmä, polypropeenitehdas.
14. Reciprocating Compressor – Installation, operation and maintenance manual. Thomassen compression systems. 2008.
15. CE valve: The efficient ring valve. (WWW-dokumentti.) Hoerbiger.  
<[http://www.hoerbiger.com/fileadmin/files/internet/KT/KT-Inter-net/Products\\_Services/Downloadcenter\\_brochures/English/KT\\_CE\\_engl\\_02.pdf](http://www.hoerbiger.com/fileadmin/files/internet/KT/KT-Inter-net/Products_Services/Downloadcenter_brochures/English/KT_CE_engl_02.pdf)>. 2010. Luettu 2.7.2010.
16. The proper material for each application. Hoerbiger. 2010.
17. Naukkarinen, Piia. Recycle gas compressor breakdown. The Borealis Way report. 25.6.2009.
18. Klaavuniemi, Janne. Vuoromestari, PP-tuotanto, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Keskustelu 8.7.2010.
19. PM Notification: Maintenance Request Porvoo. GB-9301 1-vaiheen pakoventtiilien vaihto. SAP-tuotannonohjausjärjestelmä. 6.4.2010.
20. Polymeroinnin ohjaamoraportit, 2010. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.
21. Pelletoinnin ohjaamoraportit, 2010. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.



22. PM Notification: Maintenance Request Porvoo. GB-9301, venttiilien korjaus. SAP-tuotannonohjausjärjestelmä. 22.5.2010.
23. PM Notification: Maintenance Request Porvoo. GB-9301 1-vaiheen pakovoventtiili vaiht. SAP-tuotannonohjausjärjestelmä. 23.7.2010.
24. Kaasuanalyysit. 17.4.2009. Borealis Polymers Oy.
25. Kaasuanalyysit. 8.5.2009. Borealis Polymers Oy.
26. Sattar, Mubashar. Process Design Engineer, PTS Polyolefins Process, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Keskustelu 2.9.2010.
27. Ajoresepti. BDB67B. 25.3.2009. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.
28. Ajoresepti. BAB55BV. 5.7.2010. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.
29. Ajoresepti. BHB90B. 14.5.2010. PP-tuotanto. Borealis Polymers Oy.
30. Peurasaari, Erkki. Prosessioperaattori, PP-tuotanto, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Keskustelu 8.7.2010.
31. Static Filter Data Sheet. Recycle gas guard filters. Technimont.
32. Scivier, Don. Account Manager UK & Scandinavia, Thomassen Compression Systems. Sähköpostikeskustelu 6.4.2010.
33. Nissinen, Olli. Development of organoleptic quality. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, 2007.
34. Karbasi, Amir. Improved Purity in PP. Borealis Polymers Oy.
35. Leinonen, Juha & Peurasaari, Erkki. PP-tuotannon käsikirja: Prosessikuvaus, 600-alue. Borealis Polymers Oy. 13.8.2008.

36. Compressor Valves and Unloaders for Reciprocating Compressors – An OEM's Perspective. (WWW-dokumentti.) Dresser-Rand. <<http://www.dresser-rand.com/techpapers/tp015.pdf>>. Luettu 18.8.2010.

## **Liitteet**

Liite 1. Simulointitulokset

Liite 1. Simulointitulokset

Total Compressor Feed	Total Compressor Feed	Oligomer in Feed Stream to 1st-Stage (C9,C12, C15)	Oligomer in Feed Stream to 1st-Stage (C9,C12, C15)	Compressor Suction Temperature	Compressor Suction Pressure	Compressor Intercooler (EA-9306) Temperature	Intercooler (EA-9306) Pressure	Liquid Condensate Knocked out at EA- 9306	Oligomers Knocked out in EA- 9306	Oligomer Carry over to 2nd - Stage
kmole/h	kg/h	mole%	kg/h	°C	bar(a)	°C	bar(a)	kmole/h	kg/h	kmole/h
119,085	4500	0,000	0,00	30	1,7	40	5,9	0,0000	0,0000	0,000
119,024	4500	0,015	3,29	30	1,7	40	5,9	0,0164	2,3210	1,195
118,950	4500	0,030	6,58	30	1,7	40	5,9	0,0413	5,7621	1,383
118,891	4500	0,045	9,87	30	1,7	40	5,9	0,0674	9,3402	1,445
118,816	4500	0,060	13,14	30	1,7	40	5,9	0,0936	12,9413	1,474
119,085	4500	0,000	0,00	30	1,7	35	5,9	0,0000	0,0000	0,000
119,024	4500	0,015	3,29	30	1,7	35	5,9	0,0200	2,7090	0,883
118,950	4500	0,030	6,58	30	1,7	35	5,9	0,0472	6,3187	0,969
118,891	4500	0,045	9,87	30	1,7	35	5,9	0,0748	9,9905	0,996
118,816	4500	0,060	13,14	30	1,7	35	5,9	0,1026	13,6652	1,008
119,085	4500	0,000	0,00	30	1,7	30	5,9	0,0000	0,0000	0,000
119,024	4500	0,015	3,29	30	1,7	30	5,9	0,0238	3,0672	0,617
118,950	4500	0,030	6,58	30	1,7	30	5,9	0,0531	6,8040	0,653
118,891	4500	0,045	9,87	30	1,7	30	5,9	0,0826	10,5646	0,665
118,816	4500	0,060	13,14	30	1,7	30	5,9	0,1121	14,3186	0,670
119,085	4500	0,000	0,00	30	1,7	25	5,9	0,0000	0,0000	0,000
119,024	4500	0,015	3,29	30	1,7	25	5,9	0,0277	3,3882	0,410
118,950	4500	0,030	6,58	30	1,7	25	5,9	0,0595	7,2439	0,425
118,891	4500	0,045	9,87	30	1,7	25	5,9	0,0914	11,1060	0,429
118,816	4500	0,060	13,14	30	1,7	25	5,9	0,1232	14,9571	0,431

\* Error (condensation in one of the interstages, 1st stage)