



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Kristian Pyykölä

LDPE-tuotteensiirron optimointi nauhan muodostumisen välttämiseksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

5.2.2019

Tekijä Otsikko	Kristian Pyykölä LDPE-tuotteensiirron optimointi nauhan muodostumisen välttämiseksi
Sivumäärä Aika	38 sivua + 1 liite 5.2.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Kemiantekniikka
Ohjaajat	Lehtori Timo Laitinen Tuotantopäällikkö Jussi Runsala Kehitysinsinööri Olli Tuominen
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää Borealis Polymers Oy:n LDPE-tuotteen nauhaantumiseen vaikuttavat asiat vanhojen selvitysten ja kirjallisuuden perusteella, koska tuotteesta on tullut vuonna 2018 poikkeuksellisen paljon asiakasvalituksia. Nauhaa muodostuu aina jonkin verran, kun muovipellettejä kuljetetaan pneumaattisesti. Nauhaantumista tapahtuu, kun pelletti osuu putkiston sisäpintaan sopivissa olosuhteissa ja rauhautuessaan sulaa putkiston pinnalle, minkä jälkeen hiljalleen putkiston pintaan muodostunut kerros irtoaa. Tuotteen mukana asiakkaalle joutuva nauha voi aiheuttaa asiakkaalle turhia alasajoja.</p> <p>Vanhojen ja uusien tietojen pohjalta tavoitteena insinööriyössä oli muodostaa suositus tuotteensiirtoon liittyvistä olosuhteista ja parametreista sekä mahdollisista korjaustoimenpiteistä, joilla nauhaantumista voitaisiin vähentää.</p> <p>Aluksi työssä tehtiin kirjallisuusselvitys aikaisempien nauhaantumiseen liittyvien selvitysten materiaalista. Kirjallisuusselvitys sisälsi tietoa nauhaantumisesta sekä siihen vaikuttavista tekijöistä. Selvityksen jälkeen tutkittiin automaatiojärjestelmästä nauhaantumiseen vaikuttavien tekijöiden tietoja, jotta saatiin dataa analyysijä varten. Analyysit suoritettiin tutkimalla korrelaatioita Excelillä sekä monimuuttuja-analyysijä Unscrambler X-ohjelmalla.</p> <p>Analyyseistä saadut tulokset olivat epävarmoja ja tarkkuus ei ollut suurta, joten johtopäätöksiä siirtoprosessin ongelmakohtista oli vaikeaa tehdä. Siirtoprosessista löytyi kuitenkin kirjallisuuden avulla useita ongelmakohtia, joita parantamalla nauhan muodostumista pystyttäisiin ehkäisemään. Esimerkiksi siirtoilman lämpötilojen hallinta sekä nauhahavaintojen tekeminen havaittiin ongelmiksi. Edellä mainittujen ongelmakohtien korjaukset tullaan suorittamaan tulevaisuudessa, ja tämän lisäksi putkiston käsittelyt tullaan ottamaan aikataulutettuun huolto-ohjelmaan. Korjausten lisäksi työn aikana ajan puutteen takia jääneet siirtokokeet voidaan tehdä myöhemmin. Siirtokokeissa tarkoituksena on paikantaa putkiston ongelmakohdat nauhan muodostumisessa.</p>	
Avainsanat	LDPE, polyeteeni, nauha, nauhaantuminen

Author Title	Kristian Pyykölä Reduction of streamer formation in LDPE product conveying
Number of Pages Date	38 pages + 1 appendix 5 February 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Bio- and chemical engineering
Professional Major	Chemical engineering
Instructors	Timo Laitinen, Lecturer Jussi Runsala, Production Manager Olli Tuominen, TD&E Engineer
<p>The purpose of this thesis was to research reasons for streamer formation in Borealis Polymers Oy's LDPE-product on the basis of old studies and literature because there have been exceptionally many product complaints in the year 2018. Streamers are always formed when the plastic pellets are transported pneumatically. Streamer formation occurs when the pellet hits the inner surface of the piping under suitable conditions and when it is dragged, melts on the surface of the piping, after which the layer is slowly detached. Streamers on the product may cause unnecessary downtime for the customer.</p> <p>Based on old studies and new information, the aim of the thesis was to create a recommendation on the conditions and parameters of product transfer and possible reparation proposals that could reduce the streamer formation.</p> <p>At the start of the thesis, a literature research of the material from older studies was made. The literature research contained information on streamer formation and factors affecting it. After the study, the automation system was examined to find causes for streamer formation for further study. The analyses were done by calculating correlations between the streamers and the parameters that affect it, using Excel and Unscrambler X – software.</p> <p>The results of the analyses were not reliable enough to make precise conclusions of the problems with transfer process. There are still many problems with the transfer process that could be improved to reduce streamer formation. For example, controlling the temperature of the transfer air and making streamer notices were found as problems. The above problems will be solved in the future, as additionally to treatments to the pipeline will be added into the scheduled maintenance program. In addition to the improvements, the transfer tests that were not done during the thesis project, can be performed later. The purpose of the transfer tests are to locate the problematic points of the piping in the formation of streamers.</p>	
Keywords	LDPE, polyethylene, streamers, angel hair

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Borealis AG	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Liiketoiminta	2
2.3	Borealis Polymers Oy	2
3	Tuote ja prosessi	3
3.1	Polyeteeni ja LDPE	3
3.2	Prosessi	4
4	Tuotteensiirto	6
4.1	Pneumaattinen siirto	6
4.2	Nauhaantuminen	8
5	LDPE-laitoksen mahdolliset ongelmakohdat ja korjaukset	12
5.1	Putkiston liitokset	12
5.2	Lokerot ja letkut	13
5.3	Putkiston suunnittelu	14
5.4	Materiaalinkäsittely	16
5.5	Puhaltimet ja venttiilit	17
5.6	Operoinnin ongelmat	18
5.7	Poikkeamat ohjeellisista parametreistä	20
6	Valituserien käsittely	23
6.1	Datan analysoiminen Excelillä	24
6.1.1	B-yksikön datan analysoiminen	24
6.1.2	C-yksikön datan analysoiminen	26
6.2	Monimuuttujakorrelaatiot	27
7	Siirtokokeet	31

7.1	Tuotteen siirron ja siilon sekoituksen testaus	31
7.2	Siirtolinjojen ja parametrien testaus	32
8	Yhteenveto	33
	Lähteet	35
	Liitteet	
	Liite 1. B- ja C-yksikön tuotantodata ja laboratoriotulokset	

Lyhenteet

LDPE Pientiheyspolyeteeni

PPM Parts per million, miljoonasosa

1 Johdanto

Nauhaantumisen on yleinen ongelma muoviteollisuudessa. Pääasiallisesti sitä tapahtuu tuotteen siirtojen yhteydessä muovipelletin liukuessa putkiston mutkakohtien sisäpinnalla. Liian suuren siirtonopeuden ja kitkan synnyttämän lämmön vaikutuksesta pelletti sulaa putken pinnalle ja jäähtyy välittömästi muodostaen muovipinnoitteen. Tämän jälkeen pinnoite kuoriutuu putken sisäpinnalta muodostaen nauhaa tuotevirran mukaan. Nauhan syntymiseen voivat vaikuttaa monet mekaaniset viat laitteistoissa, kuten putkistojen hitsaussaumamat tai laippaliitokset. Tuotteen ominaisuudet, kuten kovuus, sulaindeksi sekä lämpötila, vaikuttavat pelletin herkkyyteen nauhaantumiseen, kuten myös siirtojen aikaiset parametrit. Nauhaantumista voidaan vähentää esimerkiksi muuttamalla siirtonopeuksia, paineita tai lämpötiloja kohti optimiarvoja. [1; 2.]

Ongelmaksi nauhat muodostuvat niiden päätyessä asiakkaan prosessiin, nauhat voivat esimerkiksi tukkia laitteistoa tai putkistoa aiheuttaen turhia alasajoja. Asiakkaan tuotantotehokkuus voi laskea merkittävästi, kun pelleteille suunniteltuihin laitteisiin joutuu nauhamaista muovia. [3.]

Työ tehtiin Borealis Polymers Oy:n pientiheyspolyeteeniä valmistavalle LDPE-laitokselle. Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää nauhaantumiseen vaikuttavat asiat vanhojen selvitysten ja kirjallisuuden perusteella, koska LDPE:n tuotteesta on tullut vuonna 2018 poikkeuksellisen paljon asiakasvalituksia. Vanhojen ja uusien tietojen pohjalta pääasiallisena tavoitteena insinööriyössä oli muodostaa suositus tuotteensiirtoon liittyvistä olosuhteista ja parametreista sekä mahdollisista korjaustoimenpiteistä, joilla nauhaantumista voitaisiin vähentää. Operoivaa henkilökuntaa on vaihtunut paljon edellisten selvitysten jälkeen, joten siirtoihin liittyvä oppi on voinut unohtua. Suosituksien lisäksi tuli verrata nauhaa sisältäneiden erien siirtojen olosuhteita optimiolosuhteisiin ja selvittää, mistä nauhaantuminen on näissä tapauksissa johtunut. Eri olosuhteiden ja parametrien sekä tuotelaatujen vaikutusta ongelmaan oli aluksi tarkoitus tutkia pienimuotoisilla tuotteensiirtokokeilla työn loppuvaiheessa, mutta tämä ei toteutunut.

2 Borealis AG

2.1 Yleistä

Borealis-konserni toimii maailmanlaajuisesti usealla kemian alalla. Borealoksen pääkonttori sijaitsee Itävallan Wienissä, ja konsernin alaisuudessa työskentelee noin 6 600 henkilöä yli 120 maassa. Borealis muodostui vuonna 1994, kun Statoil ja Neste yhdistivät muovoitoimintansa. Statoil sekä Neste myivät osuutensa konsernista nykyisille omistajille Mubadalalle sekä OMV:lle vuosien 2005 ja 2006 aikana. [4.]

2.2 Liiketoiminta

Borealoksen liiketoiminta koostuu kolmesta eri tuoteryhmästä, jotka ovat polyolefiinit, peruskemikaalit sekä lannoitteet. Polyolefiinit eli polyeteeni ja polypropeeni ovat Borealoksen pääasiallisia tuotteita. Polyolefiinituotteet menevät esimerkiksi autoteollisuuden tuotteisiin, putkiin ja kuluttajatuotteisiin. Peruskemikaaleihin kuuluvat hiilivedyt, melamiini ja lannoitteet. Borealis jatkojalostaa öljy- ja kaasuteollisuudesta hankituista raaka-aineista eteeniä ja propeenia. Näiden lisäksi valmistetaan fenolia, kumeenia, asetonia sekä bentseeniä. Lannoitteiden sekä melamiinin valmistajana Borealis on yksi Euroopan merkittävimmistä. [5.]

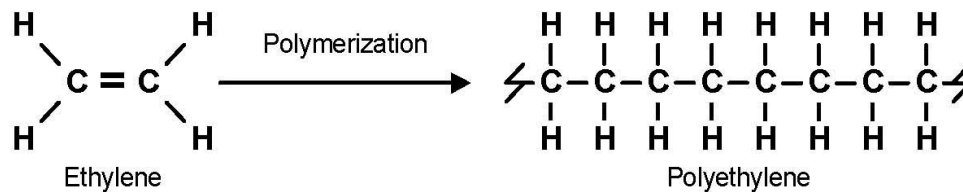
2.3 Borealis Polymers Oy

Borealis Polymers Oy on Porvoon Kilpilahdessa toimiva polyolefiineja sekä peruskemikaaleja valmistava tehdas, joka koostuu kuudesta tuotantolaitoksesta, kahdesta koetehasta ja innovaatiokeskuksesta. Kilpilahden tuotantolaitokset tuottavat polyeteeniä, polypropeenia, Borstar-polyeteeniä, sekoitelaatuja, olefiineja sekä fenoleita ja aromaatteja. Vuonna 1970 perustetun Pekema Oy:n petrokemian tuotanto alkoi vuosina 1971–1977, jonka jälkeen se fuusioitiin Nesteeseen vuonna 1978. Vuonna 1972 käynnistettiin LDPE:n kaksi ensimmäistä reaktoriyksikköä, A ja B ja vuonna 1976 kolmas, C-yksikkö. Nykyään LDPE:llä on käytössä kaksi yksikköä, kun A-yksikkö suljettiin vuonna 1997. [6.]

3 Tuote ja prosessi

3.1 Polyeteeni ja LDPE

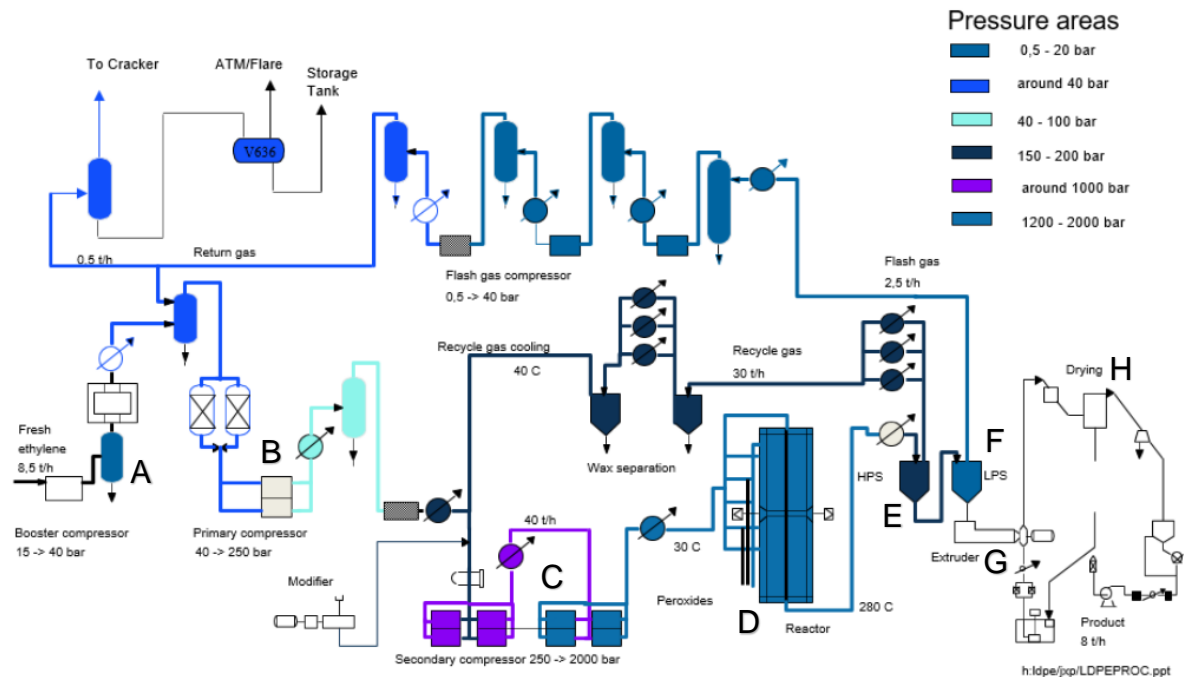
Polyeteenin valmistaminen tapahtuu polymeroimalla eteeniä, kuvan 1 mukaan. Polyeteenin rakenne on hyvin yksinkertainen: hiiliketju, jonka jokaiseen hiileen on sitoutunut kaksi vetyä. [7] Polyeteeni on ohuena kalvona läpinäkyvää, ja se on pinnaltaan vahaista [8, s. 165]. Erilaisilla tavoilla valmistettujen polyeteenien ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Esimerkiksi tiheys vaikuttaa moniin fysikaalisiin sekä mekaanisiin ominaisuuksiin. Myös moolimassa ja sen jakauma vaikuttavat moniin muokattavuuteen vaikuttaviin ominaisuuksiin, kuten viskositeettiin. Yleisesti polyolefiineja on helppo prosessoida ja polyeteeniä voidaan esimerkiksi ekstruudata, ruiskuvalaa ja tyhjiömuovata. [7]



Kuva 1. Eteenin polymerisointi polyeteeniksi. [9]

LDPE eli pientiheyspolyeteeni polymeroidaan vapaaradikaalipolymeraatiolla korkeassa paineessa (1400 - 2500 bar) ja lämpötilassa (180 - 270 °C). Tämä reaktio käynnistetään peroksiedeja käyttäen. Reaktiossa haaroittuu pitkiä ja lyhyitä ketjuja, mikä johtaa siihen, että LDPE:n kiteisyys on pientä. Haaroittumisesta aiheutuu muoville ominaisuuksia, jotka helpottavat sen työstämistä sulana, LDPE on helposti muokkautuvaa ja sen vetolujuus on pientä. Näiden ominaisuuksien takia sen käyttökohteet ovat laajat. LDPE:tä käytetään esimerkiksi lääkepakkauksissa, sähkö- sekä tietoliikennekaapeliin päällisenä, ruokapakkauksien kuorissa ja päällysteenä kartonkitölkeissä. Vuonna 2002 LDPE:n tuotteesta 75 % käytettiin kalvotuotantoon. LDPE kestää kosketusta monien kemikaalien, kuten emästen, happojen, alkoholien ja orgaanisten hiiliyhdisteiden kanssa. Fyysisiin ominaisuuksiin kuuluu myös hyvä kesto yksittäisille iskuille sekä kosteudelle. [7; 8, s. 166, s. 172; 10; 11.]

3.2 Prosessi



Kuva 2. Korkeapainepolyeteenin valmistamisen prosessi. [12]

LDPE:tä valmistetaan kuvan 2 mukaisella korkeapainepolyeteeniprosessilla. Eteeni prosessiin tulee Borealixsen eteenilaitokselta. Yksikölle tullessa eteenin paine on noin 15 baaria, jonka jälkeen se korotetaan booster-kompressorilla (A) noin 40 baarin paineeseen. Sieltä eteeni kulkee yksikölle primäärikompressorille (B), jossa painetta nostetaan kahdessa vaiheessa noin 250 baarin paineeseen ja siitä eteenpäin sekundäärikompressorille (C), jossa se nostetaan kahdessa vaiheessa noin 2000 baarin paineeseen. [13]

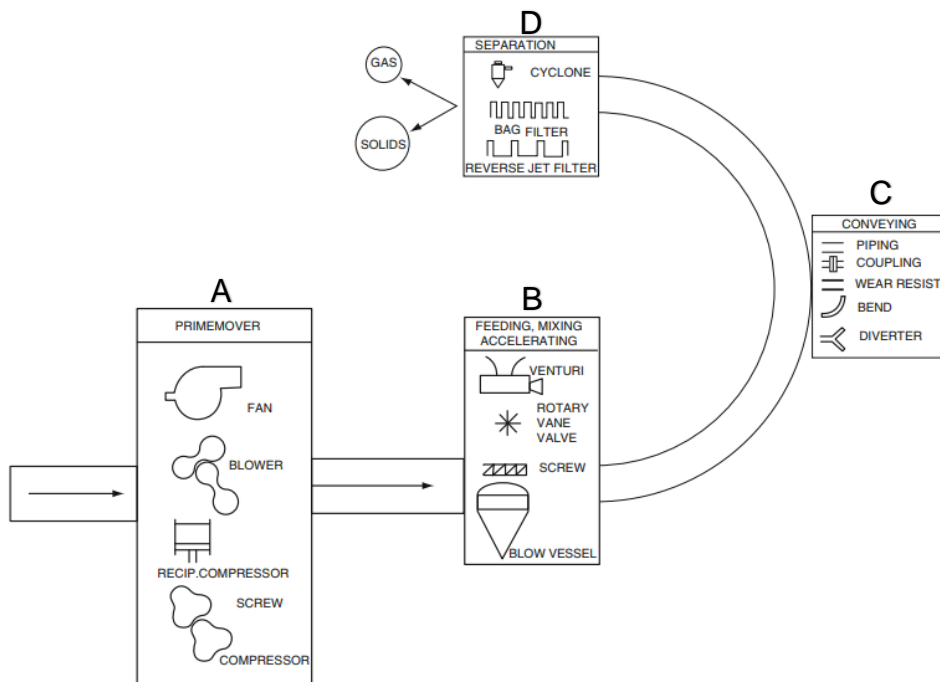
Paineistettu eteeni syötetään reaktoriin (D), johon pumpataan useilla pumpuilla peroksideja, jotka toimivat polymeroinnin initiaattoreina. Reaktorissa virtaa ylimäärä eteeniä, jotta reaktioseoksen lämpötilaa saadaan pidettyä halutulla tasolla, noin 150–300 °C. Reaktiossa noin 15–20 % eteenistä reagoi, joten eteeni tulee erottaa polyeteenistä. Tämä tapahtuu kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäinen erotus tapahtuu korkeapaine-erottimessa (E), josta kaasu palaa jäähdyttimien ja vahanerottimien kautta sekundäärikompressorin imuun. Toinen vaihe tapahtuu matalapaine-erottimessa (F), josta erotettu kaasu palaa primäärikompressorin imuun. Osa erotetusta eteenistä johdetaan takaisin eteenilaitokselle puhdistettavaksi. [13]

Matalapaine-erotin toimii ekstruuderin syöttösäiliönä. Ekstruuderissa (G) polyeteeniin lisätään lisäaineita, jotka antavat sille halutut ominaisuudet. Ekstruuderin läpi kulkenut polyeteeni puristetaan reikälevyn läpi veitsille, jotka leikkaavat muovin pelleteiksi. Pelletit kulkeutuvat veden avulla kuivuriin (H), jonka jälkeen muovi siirretään pneumaattisesti siiloalueelle. Siiloalueella polyeteeniä sekoitetaan ja ilmastetaan haluttu aika, jotta ylijäämäeteeni poistuisi. Tämän jälkeen erästä otetut näytteet analysoidaan, ja niiden ollessa kunnossa on polyeteeni valmista asiakkaalle. [13]

4 Tuotteensiirto

4.1 Pneumaattinen siirto

Tuotteensiirrot suoritetaan laitoksella pneumaattisesti eli paineilmaa hyödyntäen. Tämä on käytetyin siirtotapa muoviteollisuudessa muun muassa puhtauden takia, sillä tuotteen kontaminoituminen siirron aikana on vähäistä. Kuvan 3 mukaisesti pneumaattinen siirto-prosessi koostuu paineentuottajasta (A), syötöstä (B), putkistosta (C) sekä erottelusta (D). Pneumaattinen siirtosysteemi on kohtuullisen helppo yhdistää jo olemassa olevaan tuotantolinjaan, siinä on pienet korjauskulut sekä se on helppo automatisoida ja hallita. Haittapuolina voidaan pitää korkeaa virrankulutusta, rajoitettua siirtomatkaa sekä väärin suunniteltuna partikkelien epämuodostumisia, kuten nauhaantumista. Pneumaattinen siirto voidaan toteuttaa joko painesysteemillä tai vakuumisysteemillä. [14; 15; 16, s. 2.]



Kuva 3. Pneumaattinen siirtosysteemi. [16, s.7]

Pneumaattiset siirrot voidaan jakaa yleisesti kahteen eri luokkaan, lento- ja hidaskuljetukseen kuvan 4 mukaan, riippuen kiintoaine-kaasusuhteesta, joka kulkee putkistoa pitkin. Lentokuljetuksessa kaasun seassa kulkeutuu kiintoainetta harvakseltaan korkealla

nopeudella. Nopeuden tulee olla korkeampi kuin niin sanottu saltaationopeus, joka tarkoittaa sitä kaasun nopeutta, joka pystyy kuljettamaan kaikkia kiintoainepartikkeleja. Jos kaasu ei tähän pysty, alkaa putken pohjalle kerääntymään kiintoainetta. Lentokuljetuksesta on olemassa toinenkin muoto, jossa osa siirrettävästä aineesta kulkeutuu putken pohjalla, pienemmän siirtopaineen ja suuremman kiintoaine-kaasusuhteen takia. [16, s.9, s.14; 17.]



Kuva 4. Oikealla puolella lentokuljetus ja vasemmalla puolella hidaskuljetus. [18]

Hidaskuljetuksen yksi vaihtoehto on tulppakuljetus. Siinä tuotetta siirretään jatkuvasti muodostuvissa tulppissa, kunhan tuotannosta tulee tuotetta tasaiseen tahtiin. Hidaskuljetuksessa kaasun nopeus on alhaisempi kuin saltaationopeus, eli putkeen alkaa kerääntyä kiintoainetta, kunnes sinne muodostunut tulppa alkaa liikkua. Kiintoaine muodostaa normaalisti luonnostaan putkistoon tasaisia tulppia, joiden välillä on paikallaan olevia kiintoainekerroksia. Pelletin sijainti vaihtelee siirron aikana tämän paikallaan olevan kerroksen ja tulpan välillä. Tulpan suuruus riippuu muun muassa siirrossa käytetyn kaasun virtauksen suuruudesta ja putkiston dimensioista. [16, s.10, s.21.]

Siirtotapojen eroavaisuudet löytyvät yleensä kaasu-kiintoainesuhteesta ja kuljetusnopeudesta. Lentokuljetuksessa kiintoaine-kaasusuhte on $0-15 \frac{kg, kiintoaine}{kg, kaasu}$, kun taas hidaskuljetuksella vastaavan arvon tulisi olla välillä 10–50. Siirtonopeus lentokuljetuksessa on huomattavasti korkeampi kuin hidaskuljetuksessa, nopeuden ollessa lentokuljetuksessa $16-35 \frac{m}{s}$ verrattuna hidaskuljetuksen $2-9 \frac{m}{s}$. Hidaskuljetussysteemin asennuskustannukset ovat korkeammat kuin lentokuljetussysteemin, koska hidaskuljetuksessa putkisto ja muut systeemin osat joutuvat kestäämään suurempaa painetta ja mahdollisia sykähdyksittäin tulevia rasituksia. Hidaskuljetuksella yritetään välttää pölyn ja nauhan muodostumista sekä putkiston kulumista. [17.]

4.2 Nauhaantuminen

Pneumaattisten siirtojen aikana muodostuu siirtotyylisiä riippuen 20–150 ppm pölyä ja nauhaa 100 metriä kohti. Nauhaa muodostuu pneumaattisten siirtojen aikana yleensä pellettien pidempiaikaisesta kosketuksesta putken sisäpinnan kanssa. Pelletin ja seinämän välinen kitka lämmittää pellettiä, jolloin se alkaa sulaa seinämän pintaan. Vähitellen putken sisäpintaan muodostuu kerros muovia, joka jäähtyy nopeasti jäaden siihen kiinni. Lopulta muovi kuoriutuu putken sisäpinnasta irti muodostaen nauhaa. Nauhaa kutsutaan välillä myös streameriksi, enkelin kiharaksi tai käärmeen nahaksi. Irrottaen nauha kulkeutuu pellettien mukana esimerkiksi tuotesiiioihin, kuten kuvassa 5 esiintyvistä sihdistä nähdään, ja lopulta asiakkaalle, jossa nauhasta voi syntyä isoja ongelmia. [19.]



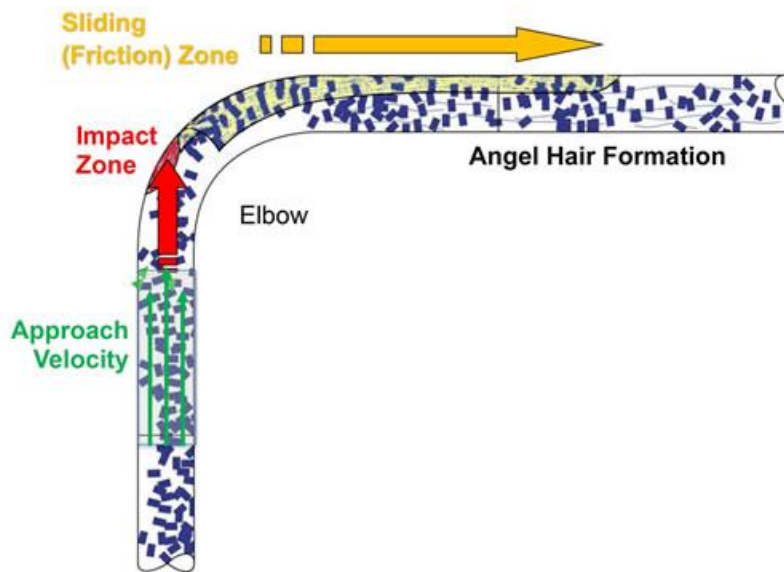
Kuva 5. Nauhaa siilon sihdissä. [20]

Nauhan muodostumiseen vaikuttaa monia eri muuttujia, joitakin niistä pystytään säätämään ja joitakin ei. Siirtonopeus, tuotteen lämpötila ja tuote-ilmasuhde ovat parametreja, joita säätämällä pystytään vähentämään nauhan muodostumisen riskiä. On myös tuotteelle ominaisia tekijöitä, joita ei voida muuttaa, koska muovin laatu muuttuisi. Näitä on esimerkiksi muovilaadun sulaindeksi ja kovuus. [19.]

Siirtonopeutta säätämällä pystytään vaikuttamaan siihen, kuinka paljon pelletit ovat kosketuksissa putken pintojen kanssa. Liian suuri siirtonopeus johtaa siihen, että mutkakohdissa pelletit kulkeutuvat suuremmalla todennäköisyydellä putkea hinkaten. Lisäksi suurempi nopeus tarkoittaa myös suurempaa kitkaa pintojen välillä ja pelletin suurempaa lämpenemistä. Jos siirtonopeutta säädetään liian pieneksi, eli alle saltaationopeuden, alkaa pelletti kulkeutua putken alapintaa mukailleen. Tämä halutaan välttää siksi, jotta pelletit eivät olisi jatkuvasti kontaktissa pinnan kanssa, mikä lisäisi kitkan lämmittävää vaikutusta. Optiminopeus olisi juuri saltaationopeuden yläpuolella, jolloin kaikki pelletit kulkeutuisivat ilman mukana mahdollisimman hitaasti. [19.]

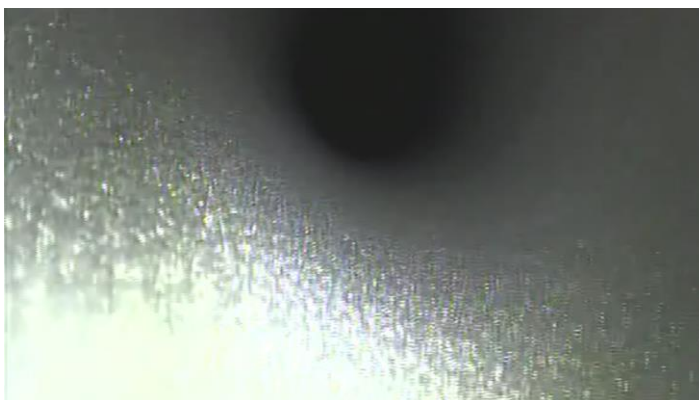
Siirtokaasuna käytetyn ilman lämpötilaa sekä tuotteen lämpötilaa alentamalla pystytään alentamaan kitkan vaikutuksesta lämpenevän pelletin nauhaantumista. Siirtoilman jäädyttäminen onnistuu tietyissä tapauksissa puhaltimien lämmönvaihtimilla, jotka ovat vesijäädytteisiä. [19.]

Tuote-ilmasuhdetta säätämällä pystytään vaikuttamaan paria eri kautta nauhan muodostumiseen. Jos halutaan hidastaa siirtonopeutta, voidaan syöttöä säätää sillä tavalla, että tuotetta menee putkistoon enemmän. Kun tuote-ilma-suhde on suurempi, puhallin joutuu kuljettamaan samalla ilmamäärällä enemmän tuotetta ja nopeus hidastuu. Toisaalta tällä tavalla isompi osa pelleteistä joutuu kosketuksiin seinämien kanssa, mutta nopeuden ollessa hitaampi riski nauhaantumiseen ei ole niin suuri. Kun putkistoon syötetään enemmän tuotetta, pitää ottaa huomioon se, että puhaltimen tehossa voi tulla raja vastaan, joka voi aiheuttaa putkiston tukkeutumista tai muita vastaavia ongelmia. [19.]



Kuva 6. Nauhan muodostuminen putkiston mutkassa. [21]

Nauhaantumiseen eniten vaikuttava asia siirtonopeuden ohella on putkiston suunnittelu. Kuten kuvasta 6 nähdään, mutkakohdat putkistossa ovat suuri riski nauhan muodostumiseen. Mutkia ei saa olla liian usein, ja ennen jokaista mutkaa tulee olla tietty matka suoraa osuutta, jotta siirtonopeus pysyy oikealla alueella. Yleisesti käytetään suurisäteisiä mutkia, koska niistä ei synny suuria painehäviöitä, mutta toisaalta niissä pelletit raahtuvat pitkiäkin matkoja putken pinnalla. Yksi tapa välttää mutkien tuottamia nauhoja on korvata suurisäteiset mutkat erikoismutkillä, joiden tarkoituksena on välttää pelletin kontaktia mutkan kanssa. Putkien sisäpinnat voidaan käsitellä esimerkiksi kuula- tai hiekkapuhaltamalla (Kuva 7), jolloin pinnasta tulee karkeampi. [3, 19.]



Kuva 7. Kuulapuhallettu siirtolinja. [22]

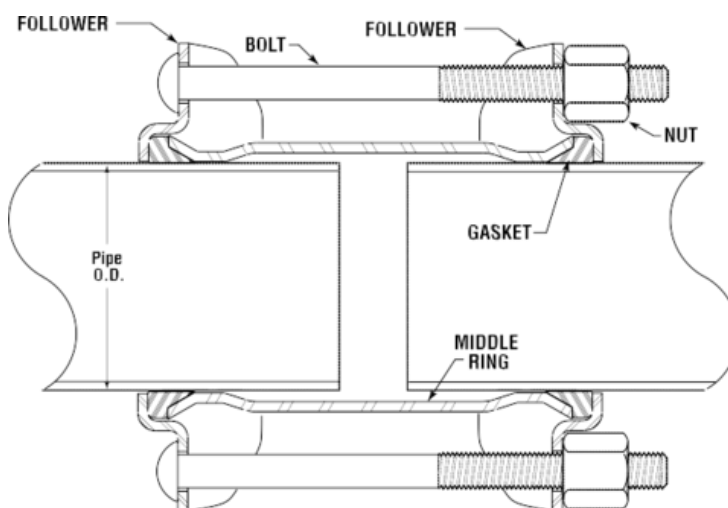
Putkiston suunnittelussa pitää ottaa huomioon myös sopivien laippaliitosten valitseminen. Tällä tavalla ehkäistään mahdolliset laipan muodostamat nauhaa aiheuttavat pykälät putkistossa. Toinen suunnittelussa huomioon otettava asia on putkiston tuenta. Kun putkiston tuenta on mitoitettu oikein siirtotapaan ja olosuhteisiin nähden, putkiston vaurioitumisen riski pienenee. Pelletin epämuodostumista voi aiheuttaa myös sillojen alla olevat lokerosyöttimet, joiden tarkoitus on annostella pellettiä siirtoputkistoon. Jos lokerosyötin on väljä, voivat sen sisällä pyörivät siivet murskata pellettejä kammion seinämään. Epämuodostuneet pelletit lisäävät hienoaineksen muodostumisen riskiä siirron aikana, kun pelletti ei kulje putkessa mahdollisimman sujuvasti. [17; 23.]

5 LDPE-laitoksen mahdolliset ongelmakohdat ja korjaukset

Mahdollisia ongelmakohtia tuotteensiirrossa on monia. Niitä voi aiheuttaa sekä laitteisto että niitä käyttävät ihmiset. Laitos on vanha, eikä kaikkia ratkaisuja tehdessä ole välttämättä mietitty nauhaantumisen ehkäisemistä tai sitä, että siitä voisi olla ongelmaksi. Ope-roiva henkilökunta on edellisten selvitysten jälkeen osin vaihtunut, esimerkiksi eläköity-misten takia. Suuren vaihtuvuuden takia tietyt opit siirtoihin liittyen ovat voineet unohtua edellisten selvitysten jälkeen, jolloin ne suoritetaan mahdollisesti väärällä tavalla ja vää-rillä parametreilla.

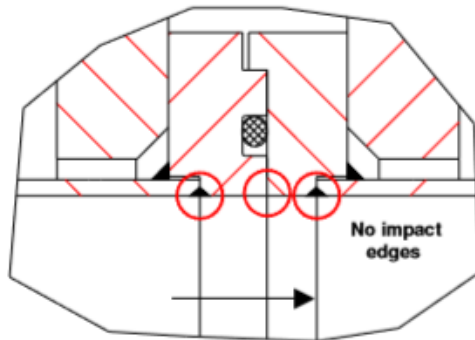
5.1 Putkiston liitokset

LDPE:ltä löytyy useista paikoista kuvan 8 mukaisia dresser-liitoksia, jotka voivat varsinkin huonokuntoisina aiheuttaa ongelmia pellettiä siirtäessä. Näitä liitoksia on esimerkiksi sekoitusputkistossa sekä siilofarmilta suursiiloihin menevissä putkistoissa. Osa operoi-vista henkilöistä usko, että nämä huonossa kunnossa olevat liitokset ovat yksi syy nauhaantumiseen. Dresser-liitoksella kaksi putkea liitetään toisiinsa tietynlaisella puristi-mella, jolloin putket eivät välttämättä kohtaa toisiaan tasaisesti. Tämän kaltainen laippa-liitos voi olla sisäpinnaltaan epätasainen, jolloin seinämään osuessa pelletti voi venähtää nauhaksi. [24.]



Kuva 8. Dresser-liitos. [25]

Dresser-liitokset olisi hyvä korvata esimerkiksi kuvassa 9 esiintyvällä laippaliitoksella, jossa on tietynlaiset ohjurit, joiden avulla laippaliitos menee tasaisesti paikalleen. Ohju-reilla on siis tarkoitus ehkäistä laippaliitoksen porrastuminen ja näin ollen vähentää riskiä nauhaantumiseen. [23.]



Kuva 9. Laippaliitoksen malli. [22]

5.2 Lokerot ja letkut

Siiloalueella siirroissa käytetään taipuisia metalliletkuja. Taipuisia letkuja on helpompaa käyttää liikuteltavien lokeroiden kanssa, koska kytkennät eri linjoille voidaan suorittaa yhdistelemällä letkuja, miten halutaan ja tarvitaan. Letkut ovat kovan kulutuksen kohteena siirtojen aikana, ja usein niitä taivutellaan paljon. Yleinen kuluminen sekä letkujen käsittely aiheuttavat sisäpinnan vaurioitumista, jota esiintyy esimerkiksi tietynlaisten palkeenkielten muodostumisena. Nämä vauriot letkujen sisäpinnassa ovat yksi tekijä, joka lisää nauhaantumisen riskiä sekoituksen sekä siirtojen aikana. Operaattorien olisi hyvä tarkistaa letkut tietyin väliajoin, jotta mahdolliset vioittumiset huomattaisiin ajoissa ja letkut saataisiin mahdollisimman nopeasti korjattua. [24.]

Lokerosyöttimillä on suuri vaikutus ilma-tuotesuhteeseen. Lokeroiden tiiviys vaikuttaa siihen, kuinka hyvin lokeron osiot täyttyvät pelletistä kierrosten aikana. Jos tuotetta ei valu lokeroon kunnolla, sitä ei myöskään päädy siirtoon tarpeeksi paljoa, vaan siirto etenee vajaana, jolloin tuotteen nopeus voi helposti ylittää ohjeelliset arvot. Lokeroiden huonoa

täyttymistä aiheuttaa lokeroiden väljyys sekä keskuspölynpoiston muodostama imu. Lokeroiden väljyyden takia ilma pääsee kulkemaan lokeroiden sisällä estäen tuotteen valumista. Keskuspölynpoiston muodostama imu on välillä liian tehokasta, mikä voi myös vaikuttaa tuotteen valumiseen. Imun suuruus riippuu esimerkiksi siilon sijainnista eli matkasta pölynpoiston puhaltimille. [26] Tuotteen pieni siirtoteho on huomattu myös materiaalikäsittelyn päässä, välillä tehon ollessa jopa alle 10 tonnia tunnissa [30]. Korjaukseksi lokerosyöttimien mahdolliset väljyydet tulisi tarkistaa ja ne tulee säätää, jotta siirtoilman pääseminen lokeron sisään estettäisiin. Keskuspölynpoiston operoinnin tärkeydestä tulisi muistuttaa, jotta imu ei pääse liian suureksi estäen tuotteen valumista lokeroon.

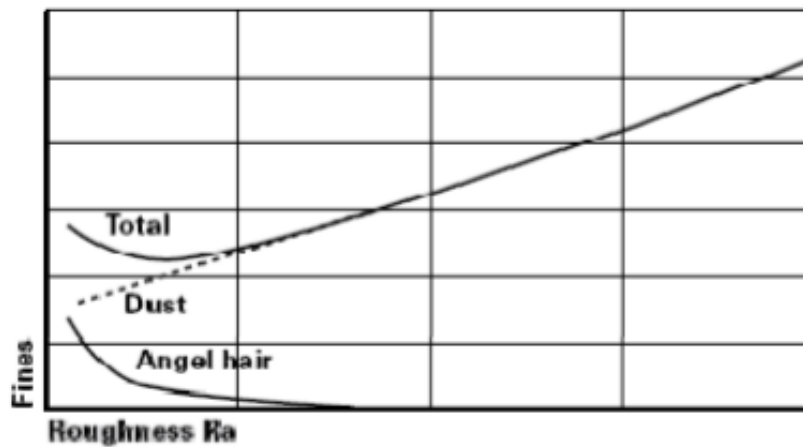
5.3 Putkiston suunnittelu

Siirtolinjojen reitityksien tulisi olla mahdollisimman yksinkertaisia välttämällä turhia mutkia ja kulmia sekä viistoja linjoja. Putkiston tulisi kulkea vain horisontaalisesti ja vertikaalisti, esimerkiksi 30 ja 45 asteen kulmia pitäisi välttää, koska ne aiheuttavat pelletin raahautumista putken pinnalla helpommin. Jokainen ylimääräinen mutka putkistossa lisää nauhan muodostumista. [17.]

Siirtolinjojen tuenta tulisi tarkistaa siltä varalta, että se ei ole riittävä niihin voimiin nähden, joita muovipelletin siirtäminen aiheuttaa. Jos tuenta ei ole riittävä, voi siirtojen aikana putkistoon aiheutua vauriota. Vauriot korjataan yleensä paikkaamalla tai korvaamalla osa putkistosta uudella putkella. Hitsausaumamat aiheuttavat putkiston sisäpinnalle kohoimia, joista nauhaantumisen voi saada alkunsa. [23.]

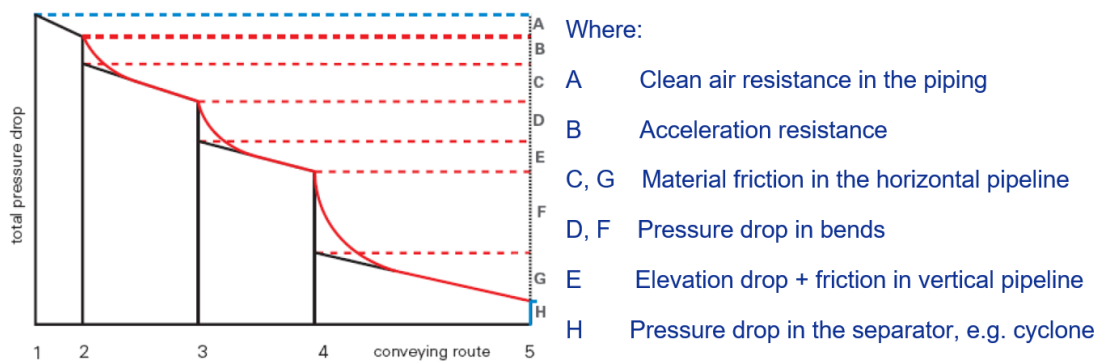
Siirtolinjat, joissa pelletti kuljetetaan lentokuljetuksella, tulisi säännöllisin väliajoin käsitellä kuulapuhaltamalla. Näiden siirtolinjojen sisäpintojen tulisi olla karheita, jotta kovemalla nopeudella kulkeva pelletti ei nauhaantuisi, vaan kimpoilee pinnasta eteenpäin. [17] Kuten kuvasta 10 näkee, mitä karheampi putken pinta on, sitä enemmän syntyy pölyä ja vähemmän nauhaa. Tällä hetkellä ei ole tarkoin määriteltyjä väliaikoja, milloin käsittelyt hoidetaan. Käsittelyt tulisi ottaa aikataulutettuihin huolto-ohjelmiin, sillä siirtolinjojen pintojen käsittely lentokuljetuksia käytettäessä on hyvin tärkeä keino ehkäistä nauhaantumista. Lisäksi B-yksikön tuotteensiirrossa putkiston loppukaarteet on vuonna 2013 tehdyn selvityksen jälkeen käsitelty, koska siirtonopeus nousee linjan loppupäässä.

Näidenkin osuuksien karhennukset tulisi tarkistaa säännöllisin väliajoin, jotta aikaisemman selvityksen aikana huomattu ongelma ei uusiudu. [28.]



Kuva 10. Putken karheuden vaikutus nauhaan ja pölyyn. [14]

Siirtoputkistoissa syntyy aina painehäviötä, johtuen monista eri asioista (kuva 11). Esimerkiksi kaasun ja kiintoaineen kitka putkiston sisäpintaa kohti aiheuttavat painehäviötä, lisäksi tuotteen kiihdyttäminen kuljetusnopeuteen ja kuljettaminen ovat suuria painehäviön aiheuttajia, kuten kuvasta 11 nähdään. Putkiston suunnittelulla on myös oma osansa painehäviön muodostumiseen, esimerkiksi jokainen mutka putkistossa lisää painehäviötä kitkan vaikutuksen takia. [17.]



Kuva 11. Painehäviön muodostuminen siirtolinjassa. [17]

Ongelmakohta liittyen painehäviöön siirtoputkistossa liittyy putkiston halkaisijaan. Putkiston halkaisijan tulisi kasvaa linjan loppupäässä, sillä pelletin nopeudella on tapana kasvaa siirron edetessä. Tämä johtuu siitä, että painehäviön kasvaessa tuotteen siirtoon käytettävän kaasun tilavuus kasvaa putkistossa, jolloin tuotteen nopeus kasvaa suuremmaksi kaasun nopeuden kasvaessa. [17.]

Korjausehdotuksena on se, että putkisto tulisi suunnitella uudelleen, ottaen huomioon erinäisten asioiden vaikutukset nauhaantumiseen. LDPE-laitoksella putkistossa on useita ylimääräisiä mutkakohtia sekä sellaisia osuuksia, jossa putki nousee esimerkiksi 30 tai 45 asteen kulmassa. Nämä viistot osuudet eivät ole suositeltavia putkistossa, jossa siirretään muovipellettiä. Lisäksi LDPE:llä ei ole otettu huomioon painehäviön nousuista siirtolinjoissa, kasvattamalla putkiston halkaisijoita linjojen loppupäissä. Linjojen käsittelyt sekä liitoksien kunto tulisi tarkistaa kuvaamalla putkistot, jotta nähtäisiin, kuinka laajasti niitä pitäisi huoltaa. Putkistojen käsittelyt tulisi ottaa esimerkiksi säännölliseen seisokkiaikatauluun mukaan, jotta käsittelyjen välinen aika ei veny liian pitkäksi. Käsittelyn kesto voidaan lisätä kääntämällä suoria osuuksia esimerkiksi 90 tai 180 astetta, jolloin pelletti osuu kulkeutuessaan vähemmän kuluneeseen osaan putkea [17].

5.4 Materiaalinkäsittely

Materiaalinkäsittelyssä suoritetaan tuotteiden pakkaukset kuljetusta varten. Yksi vuonna 2008 suoritettuna TBW04-selvityksen ehdotuksista on ollut sihtien lisääminen materiaalinkäsittelyn puolelle, ennen oktabiineihin tai bulk-autoihin lastausta. [32] Sihtien lisääminen ei ole mennyt kuitenkaan ehdotusta pidemmälle, eikä materiaalinkäsittelyssä ole siis tällä hetkellä sihtejä käytössä. Vaikka tuote kulkee suurimman osan matkastaan siilofarmin jälkeen, ei tuotesiilojen jälkeen siirtolinjoissa ole enää sihtejä. Siirrot suursiiloihin, lastausiiloihin tai materiaalinkäsittelyyn suoritetaan lentokuljetuksena, jolloin varsinkin putkiston karhennuksien ollessa huonossa kunnossa muodostuu herkästi nauhaa. Sihtaamalla tuote tässä kohti tuotteen siirtoa voitaisiin tuotteen joukosta poistaa ainakin osa asiakkaalle nykyisin päätyvästä nauhasta. Ongelma tulee kuitenkin vastaan tuotteen lastausnopeudessa, jos käytössä olisi sihdit. Ilman sihtiä lastausnopeus bulk-autoon on 2,5–4 t/min, kun taas sihtien kanssa lastausnopeus on jopa alle puolet tästä. Materiaalinkäsittelyssä ennen pakkausta on käytössä elutriaattoreita, joiden tehtävänä on poistaa

tuotteen joukosta pölyä ja pientä nauhaa. Niiden teho ei kuitenkaan riitä poistamaan isoja nauhoja tai nauhakasoja tuotteen joukosta. [27.]

Materiaalinkäsittelyn puolella nauhan poistamiseen ei ole oikein minkäänlaista keinoja tai mahdollisuutta kehittää sellaista, koska lastausnopeus kärsisi siitä niin suuresti. Kommunikaatio LDPE-laitoksen ja materiaalinkäsittelyn välillä tulisi kuitenkin parantaa, jos materiaalinkäsittelyssä havaitaan poikkeuksellisen paljon nauhaa. Kommunikoimalla LDPE-laitokselle tulisi tietoa nauhasta, jotta siirtojen parametrejä voitaisiin säätää paremmiksi.

5.5 Puhaltimet ja venttiilit

Siirtopuhaltimien ongelma nauhaantumisessa on läsnä lähes poikkeuksetta talven aikana. Ongelmaa aiheuttaa liian suuri siirtoilman lämpötila, joka johtuu siitä, kun puhaltimilta joudutaan ottamaan jäähdytys pois pakkasten tullessa. Puhaltimien jäähdytyksessä käytetään pelkästään teollisuusvettä, joka voi pakkasten tullessa jäätyä puhaltimien sisällä. Ongelma ilmenee etenkin pienillä pakkaskaleilla, jolloin ulkoilma ei ole vielä tarpeeksi kylmää jäähdyttääkseen siirtoilmaa, mutta on kumminkin sen verran kylmä, että jäähdytysvedet on otettu jo pois käytöstä. Tuotantojärjestelmän mukaan siirtoilman lämpötilat ovat nousseet hälytysrajalle, eli 65 °C, joka on paljon yli suositellun lämpötilan, eli 50 °C.

Parannukseksi puhaltimien jäähdytys tulisi pitää käynnissä läpi vuoden, eli tulisi kehitellä eristys jäähdyttimien ympärille. Jäähdytysaineen vaihtaminen pelkästä vedestä johonkin toiseen voi olla vaikeaa kontaminaatoriskin takia. Väliaikainen ratkaisu lämmönousuille on siirtopaineen pienentäminen. Tämä ei kuitenkaan aina vaikuta asiaan tarpeeksi suuresti, jotta päästäisiin optimaalisiin lämpötiloihin, koska tilanne vaatisi välillä niin suuria paineenlaskuja, että siirtonopeus kärsii siitä liian paljon.

Siiloalueelta lähtee suur- ja lastaussiiloihin siirtolinjoja, joissa käytetään tietynlaisia jakoventtiilejä, jotka ohjaavat tuotteen oikeasta noususta siirtolinjaan. Siirtolinjoja puhdistessa havaittiin, että niihin on asennettu vääränlaiset venttiilit, jotka voivat olla suuri tekijä nauhan muodostumisessa. Siirtolinjan putket on liitetty venttiileihin kauluksilla, jotka

muuttavat pyöreään putken sopimaan neliskulmaiseen venttiiliin. Tämä kuitenkin aiheuttaa venttiiliin ja kauluksen liitokseen suuren kynnyksen, kaikille neljälle sivulle. (Kuva 12) Pelletin osuessa kynnykseen lisääntyy nauhaantumisen riski suuresti. Siirtoputkistosta löytynyt pöly ja nauha toimii todisteena siitä, että näin on myös tapahtunut. Tämän lisäksi venttiili on päästänyt tuotetta väärään suuntaan siirtolinjaa, joka aiheuttaa kontaminaatioita, jos siirtolinjaa käytetään seuraavan siirron aikana siirtämään jotakin toista laatua kuin aikaisemmin.



Kuva 12.

Kauluksen aiheuttama kynnys. [22]

5.6 Operoinnin ongelmat

Operoinnin suhteen ongelmat keskittyvät osin operaattoreiden toimintaan ja osin järjestelmässä oleviin hälytysrajoihin. Automaatiojärjestelmä, jolla prosesseja kontrolloidaan ja seurataan, on Metso DNA. Metso DNA:han pystytään määrittämään parametreille tarvittavat ala- ja ylärajat, joiden yli parametrin mennessä aiheutuu hälytys erilliselle hälytysnäytölle. [30.]

LDPE-laitoksen pääohjaamosta pystytään operoimaan ja valvomaan siirtoihin liittyen yksiköiden siirtopuhaltimien painetta sekä siirtoilman lämpötilaa yksiköiden ja siilofarmin välillä. Näihin ei puututa kuitenkaan millään tavalla, jos paine tai lämpötila eivät aiheuta hälytyksiä ohjaamoon. Yksiköiden puhaltimien lisäksi pystytään siilofarmin puhaltimia operoimaan siilokopista, jossa siilo-operaattori operoi ja valvoo siirtopuhaltimien paineita ja lämpötiloja. Siirtopuhaltimien operoinnissa ongelmana on se, että siirtoilman lämpötilojen hälytyksien yläraja on asetettu 65 °C:seen. Tämä tulee ongelmaksi aivan liian lämpimän siirtoilman lämpötilan takia, jonka olisi suositeltavaa olla alle 50 °C, jotta tuotteen lämpötila ei nouse liikaa siirron aikana. Yli 50 °C:n lämpötila siirtoilmassa edesauttaa tuotteen nauhaantumista suuresti. [24.]

Siirtopaineisiin liittyy myös siirroissa käytettävien lokerosyöttimien operointi. Siilofarmilla on useita erimallisia lokeroita, jotka toimivat eri tavalla. Lisäksi monet invertterit, jolla säädetään lokeron kierrosnopeutta, toimivat eri tavalla. Tämä vaikeuttaa siirtojen operointia, koska ei ole mitään tiettyjä säätöjä, jotta siirrot menisivät samalla nopeudella eteenpäin. Lisäksi eri siirtolinjoilla siirrettäessä säädöt saattavat poiketa toisistaan, muun muassa siirtolinjan pituuden mukaan. Liian suuret kierrosnopeudet lokeroilla aiheuttavat sen, että tuotetta ei pääse putkeen tarpeeksi paljon, jotta ilma-tuotesuhde pysyisi optimaalisena. Tämän takia siirtojen kestot kasvavat sekä nopeus voi nousta liian suureksi. [24.]

Yksi mahdollinen syy nauhaantumiseen on bulk-autojen kuljettajien toiminta purkutilanteessa. Puutteellinen ohjeistus kuljettajille voi aiheuttaa sen, että he epätietoisina purkavat lastin asiakkaan luona liian suurilla paineilla. Tämän lisäksi asiakkaan päässä saattaa olla vääränlaiset laitteet purkutapahtuman suorituksessa. [31.]

Siiloraporteissa oli havaittavissa pitkiä ajanjaksoja, jolloin siiloissa oli havaittu paljon nauhaa. Esimerkiksi helmi-maaliskuussa 2018 oli noin 3 viikon ajanjakso, jolloin siiloraporteissa oli merkintä 32 erästä, joissa oli ollut huomattava määrä nauhaa. Tämän kaltaisissa tapauksissa tulisi operaattoreiden seurata siiloraportteja myös oman vuoron ulkopuolelta ja ilmoittaa asiasta eteenpäin, jotta pystyttäisiin tutkimaan, mistä nauhan muodostuminen johtuu, ja asiaan pystyttäisiin puuttumaan aikaisemmin. Aikaisemmalla reagoinnilla voitaisiin vähentää tämän kaltaisia pitkiä ajanjaksoja nauhan muodostumisessa.

5.7 Poikkeamat ohjeellisista parametreista

Ohjeelliset arvot on otettu Veli Pelkosen tekemästä koulutuspaketista, joka käsittelee pneumaattisia siirtoprosesseja. Tuote siirretään tulppakuljetuksella B-yksiköltä tuotesii-loihin. Tämä on yksi muoto hidaskuljetukselle, jossa siirtoilman nopeuden tulee olla noin 4–10 metriä sekunnissa. Hitaan nopeuden lisäksi ominaista on suuri tuote-ilma-suhde. Tämän suhteen tulee olla välillä 15–50, jotta tuote kulkeutuu tulppina eikä lähde kulkeutumaan liian suurta nopeutta. Tulppakuljetuksessa painehäviö kasvaa suureksi, jolloin riskinä on nopeuden kasvaminen. Tyypillinen väli siirtopaineelle on 0,5–6 baarin välillä, riippuen putkistosta ja muista painehäviötä aiheuttavista tekijöistä. [17.]

C-yksikön tuotetta siirretään tuotesii-loihin lentokuljetuksella, jolle on ominaista suuri kaasun nopeus sekä pieni tuote-ilma-suhde. Kaasun nopeus tulee olla 15–30 metriä sekunnissa, jonka lisäksi tuote-ilma-suhde tulee olla 5–25. Tällä tavoin putkiston pintaan ei pääse muodostumaan kerrosta pelleteistä, vaan pelletti kuljetusmuodon nimen mukaan lentää putken sisällä. Siirtopaine liikkuu järjestelmästä riippuen 0,1–1,5 baarin välillä, eikä siirrossa aiheudu kamalasti painehäviötä. On kuitenkin tärkeää pitää tuote-ilma-suhde tarpeeksi korkeana, jotta tuotetta on siirrossa tarpeeksi, välttämällä siirtonopeuden kasvamista. [17.]

Molemmilla kuljetusmuodolla siirtoilman lämpötilan ei tule ylittää 50 °C:ta. Tätä korkeampi lämpötila edistää kitkalämmön syntymistä ja pelletin sulamista ja lopulta nauhaantumista. [17.]

Valitetuista eristä valittiin taulukkoon 1 siirtoihin liittyen saatavilla olevat lämpötilat sekä paineet, lisäksi valittiin siirron kesto ja sen kautta laskettu siirtoteho. Yleisesti ongelmat näyttävät olevan tuote-ilma-suhteissa, joka voidaan havaita siirtotehosta, sekä siirtolämpötiloissa. Lisäksi valitetuista eristä kuusi, eli puolet, on siirretty 4-linjaa pitkin pakkaamoon.

Taulukko 1. Siirtoihin liittyvät parametrit.

Erä	Siirto-aika (h)	Siirto-teho (t/h)	Siirto-paine (bar)	Siirto-lämpötila (°C)	Siirto-paine yksiköltä (bar)	Lämpötila yksiköltä (°C)	Lämpötila L-4 booster (°C)	Paine L-4 booster (bar)
N	4,9	13,8	0,50	26,1	0,84	18,7		
O	4,7	14,6	0,52	18,4	0,55	17,8		
R	3,8	17,7	0,30	20,2	0,89	19,3	25,20	0,4
S	3,8	17,7	0,35	34,7	0,76	15,8	35,90	0,5
B	2,3	30,0	0,56	38,7	0,50	-		
C	5,8	12,2	0,59	41,6	0,50	-		
U	3,7	18,5	0,42	19,9	1,01	23,0	20,90	0,4
V	4,4	15,4	0,31	28,9	1,11	24,4	31,60	0,4
E	2,8	24,7	0,41	21,6	0,43	-	46,30	0,46
W	3,3	20,4	0,44	25,1	1,05	17,9		
X	3,7	18,5	0,42	20,7	0,92	16,2		
F	3,2	22,1	0,45	16,7	0,47	-	25,20	0,42

Jokaisesta erästä ei välttämättä löydy mitään ongelmakohtaa näitä parametrejä vertaillessa. Lämpötilat ja paineet ovat keskiarvoja, jolloin ei voida tietää, jos esimerkiksi lämpötila on käynyt yli 50 °C:n lämpötilassa tai paineet ovat nousseet hetkellisesti yli suositeltujen rajojen.

Erät N ja O ovat siirtyneet suursiiloihin, jotka ovat tuotesiilojen vieressä. Siirrot ovat kestäneet yli neljä ja puoli tuntia, joka on näille siirroille melko pitkä aika. Tästä voidaan mahdollisesti päätellä, että tuote-ilmasuhde on ollut liian pieni, jolloin putkistossa liikkuva tuote kulkee herkemmin liian suurta nopeutta. Lämpötilat sekä paineet ovat olleen keskiarvoisesti hyvillä tasoilla.

Erät R ja S ovat siirtyneet edellisiä eriä hiukan tehokkaammin, mutta siirron aikaiset paineet ovat verrattaen pienet, 0,30 bar ja 0,35 bar. Tämä viittaisi siihen, että operoinnissa on tapahtunut virhe tai unohdus. Siirto on suoritettu mahdollisesti sekoituspainetta käyttäen, eli toisin sanoen invertteriä ei ole säädetty sekoituksen jälkeen. Erän S siirtoilman lämpötila on noussut siirron aikana yli 40 °C:seen, joka on koholla verrattuna normaaleihin lämpötiloihin, mutta kuitenkin jäaden alle kriittisen 50 °C. Tällainen lämpötila voi kuitenkin jo alkaa vaikuttamaan nauhaantumiseen.

B- ja C-erät ovat siirtyneet lastaussiilo 74. Erän C siirto on kestänyt melkein kuusi tuntia, eli tuote-ilmasuhde on ollut aivan liian pieni, toisin kuin erän B, jonka siirtoteho on ollut todella suuri. Molempien erän siirrossa siirtoilman lämpötila on ollut keskiarvoisesti noin 40 °C, joka on mahdollisesti edes auttanut nauhaantumista. Lämpötilojen lisäksi keskiarvoiset siirtopaineet ovat olleet korkeat, välillä 0,55–0,6. Erä B on siis kulkeutunut liian pienellä syötöllä ja kohtuullisen lämpimässä ilmassa ja erä C on kulkeutunut todella nopeasti, myös kohtuullisen lämpimässä ilmassa.

Erät U ja V ovat siirtyneet paineiden sekä lämpötilojen suhteen hyvissä arvoissa. Erän V siirto on kuitenkin kestänyt lähes neljä ja puoli tuntia, mikä viittaisi mahdollisesti liian pieneen tuote-ilmasuhteeseen. Erien E, W, X ja F siirrot ovat edenneet hyvin, ilman suurempia parametrien poikkeamia. Erä E on kuitenkin siirtynyt 4-linjan boosterpuhaltimen jälkeen jopa yli 45°C:n lämmössä.

6 Valituserien käsittely

Vuonna 2018 asiakasvalituksia on tullut LDPE:n tuotteista poikkeuksellisen paljon verrattuna aikaisempiin vuosiin. Aikaisempien kolmen vuoden aikana tuotevalituksia on tullut keskimäärin 19, kuluvana vuonna niitä on tullut 26. Asiakasvalituksista noin puolet on tullut tuotteen joukossa olleen nauhan takia. Nauhan takia valitetuista eristä suuri osa on tehty kevättalven aikana, mutta valituksia on tullut ympäri vuotta valmistetuista eristä. [32]

Analyysiä varten kerättiin tuotantodataa Metso DNA:sta sekä jokaisen erän siilonäytteistä analysoidut laboratoriotulokset. Metso DNA on automaatio-ohjelma, jolla pystytään seuraamaan ja operoimaan prosesseja. Jokaiselle laadulle, josta oli tullut valitus, valittiin myös kaksi referenssierää. Referenssierät valittiin sillä perusteella, ettei niistä eikä niiden lähellä valmistetuista saman laadun eristä ollut tehty siiloraportteihin nauhahavainnointia, jolloin valmistusajanjakson voidaan katsoa olleen laadullisesti hyvä. Siiloraporttien nauhahavainnot ovat siilo-operaattorin arvio nauhan määrästä siilon alla olevassa sihdissä, pesun yhteydessä.

Tuotantodatasta valittiin alustavasti mittauspisteitä, joiden ajateltiin olevan jollakin tavalla yhteydessä nauhan muodostumiseen. Tärkeimpinä mittauspisteinä valittiin siirtoon liittyviä lämpötiloja sekä paineita, jotka vaikuttavat siirtonopeuksiin ja tuotteen lämpötilaan suuresti. Tuotantodataa haettiin järjestelmästä 30 minuutin keskiarvolla, jonka oletettiin olevan tarpeeksi tarkka analyysijä tehdessä. Tuotannon eräraporteista katsottiin, minkä ajanjakson välissä erä on tehty, ja näin pystyttiin erän alusta ja lopusta ottamaan noin kahden tunnin jaksot pois. Tällä tavalla datasta saatiin pois esimerkiksi mahdolliset eränvaihdon aiheuttamat pienet epätarkkuudet, jotka olisivat voineet virheellistää keskiarvoja. Tällä tavalla saaduista datapisteistä muodostettiin vielä keskiarvopisteet, jolloin jokaiselle erälle oli vain yksi arvo per verrattavana oleva kohde. Tuotantodatan ja laboratoriotulosten korrelaatioita nauhaantumiseen tutkittiin Excelissä muodostetuilla korrelaatioilla sekä Unscrambler X-ohjelmalla.

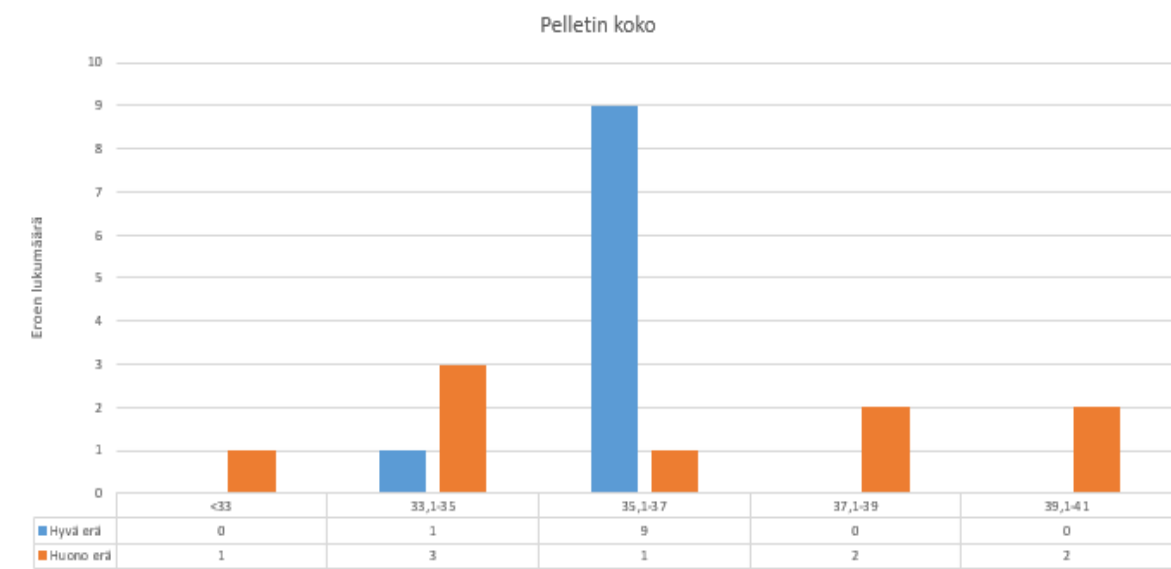
Korrelaatioiden tutkimisen lisäksi saatuja arvoja verrattiin kirjallisuudesta etsittyihin ohjeellisiin arvoihin.

6.1 Datan analysoiminen Excelillä

Excelillä dataa tutkittiin B- ja C-yksiköiden suhteen liitteen 1 mukaisen taulukoiden avulla. Taulukoihin on yhdistetty tiedot laboratorioanalyseistä ja tuotantodatasta. Tätä dataa analysoidessa muodostettiin pylväsdiagrammeja, joista voidaan verrata hyvien ja valitettujen erien määrien jakaumia eri muuttujien välillä. Monien muuttujien kohdalla suuria vaihteluja ei havaittu, jolloin vaikutusta ongelmaan voidaan pitää pienenä. Alla on esitetty vain niiden parametrien vaikutukset, joista ne olivat havaittavissa tällä esitystavalla.

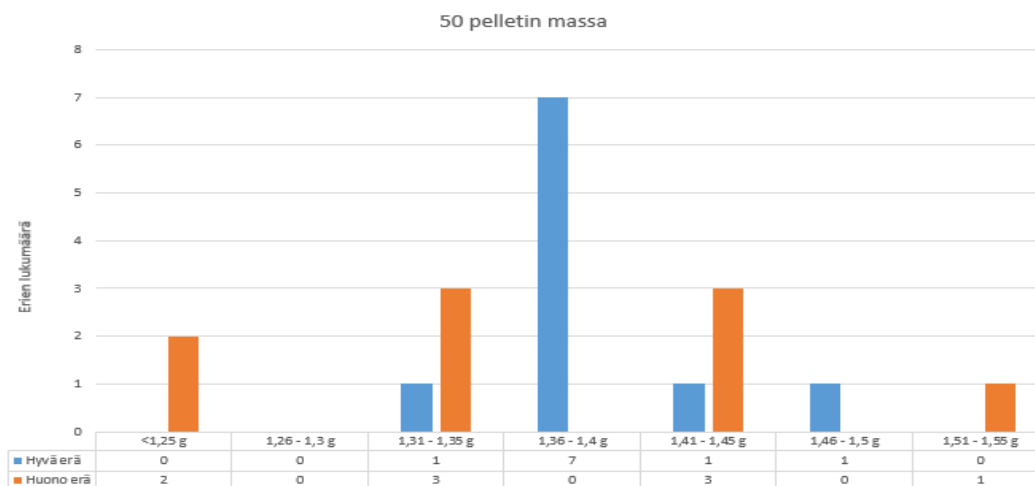
6.1.1 B-yksikön datan analysoiminen

Pelletin koon vaikutus nauhaantumiseen nähdään kuvista 13 ja 14. Valituksen saaneiden erien pelletin koko sekä massa ovat vaihdelleet diagrammien mukaan paljon enemmän kuin hyvien erien. Hyvät erät ovat olleet tästä päätellen tasalaatuisempia kuin huonot.



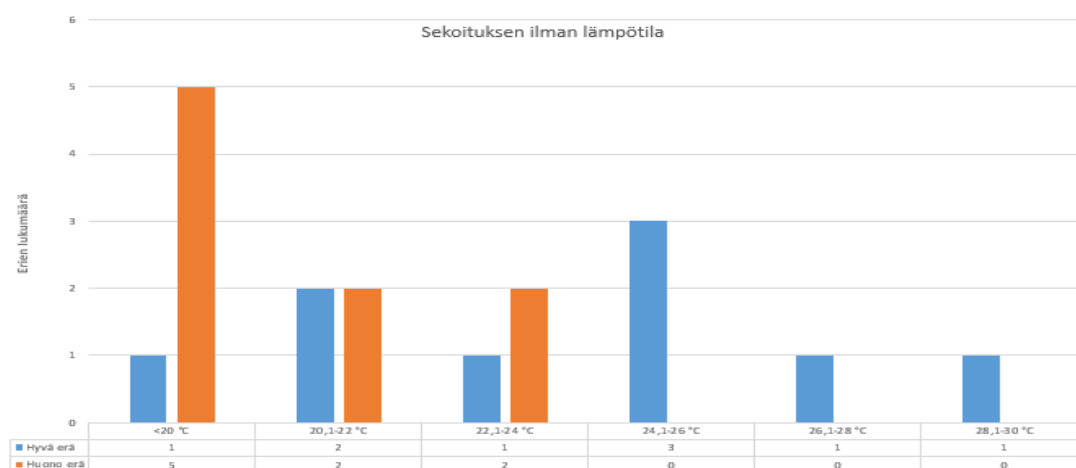
Kuva 13.

Pelletin koon vaikutus nauhaan.



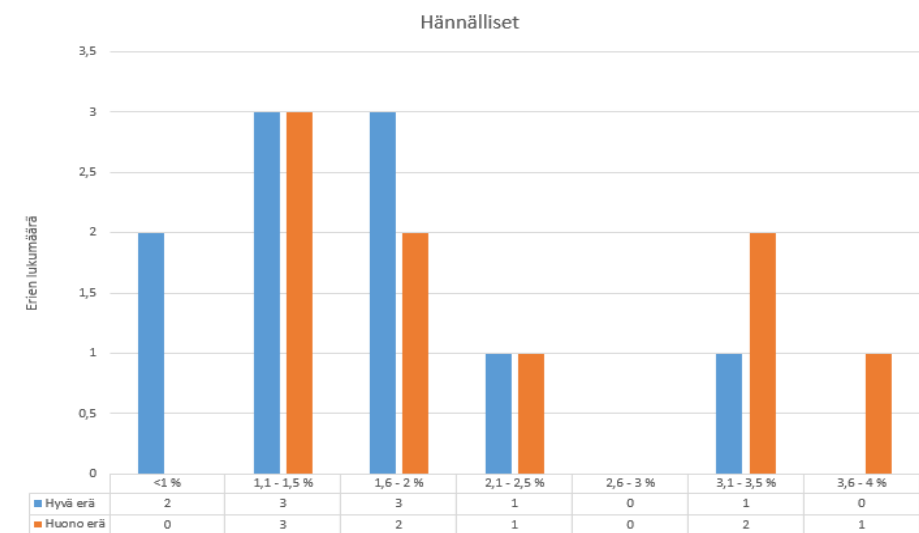
Kuva 14. 50 pelletin massan vaikutus nauhaan.

Sekoituksen ilman lämpötilan diagrammi näyttää kuvan 15 mukaan, että nauhaa on muodostunut, kun ilman lämpötila on ollut pienempi. Sekoituksessa käytettävän ilman paineet ovat pienemmät kuin siirrosta käytettävät, jolloin lämpötila ei nouse helposti liian korkeaksi. Tästä syystä voidaan olettaa, että sekoituksen ilma ollessa kylmempää, myös ulkoilma on kylmempää. Kylmemmän ulkoilman aikaan puhaltimien jäähdytys otetaan pois käytöstä, jolloin siirtoilman lämpötilat nousevat.



Kuva 15. Sekoituksen ilman lämpötilan vaikutus nauhaan.

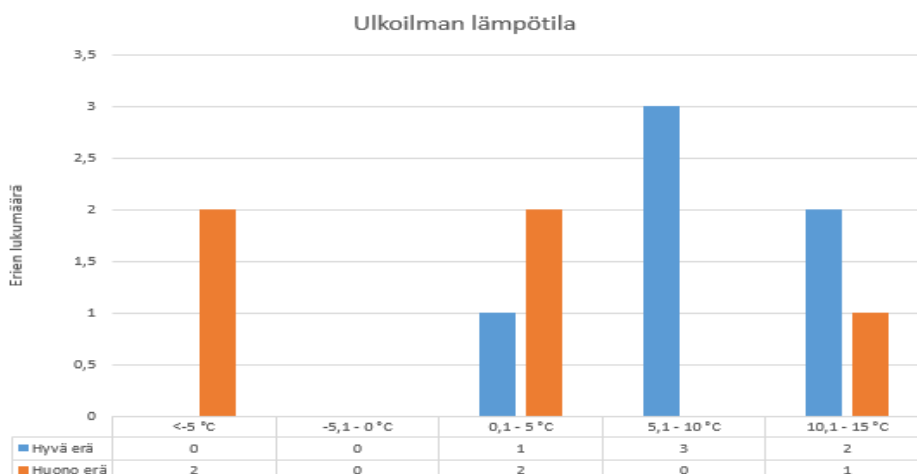
Kuten kuvan 16 diagrammista nähdään, erän sisältäessä enemmän hännällisiä pellettejä nauhaa on syntynyt myös enemmän. Tämä johtuu luultavasti siitä, että virheelliset pelletit ovat helpommin kontaktissa putkiston seinämän kanssa.



Kuva 16. Hännällisten pellettien vaikutus nauhaan.

6.1.2 C-yksikön datan analysoiminen

C-yksikön datasta ei saatu eri muuttujien välillä suurta vaihtelua, jolloin analysointi ei onnistu. Dataa olisi tullut kerätä laajemmalla alueella, jotta mahdollinen vaihtelu olisi huomattu paremmin. Ainut muuttuja, jossa oli tarpeeksi vaihtelua, oli ulkoilman lämpötila. Ulkoilman lämpötilan vaikutus nauhan muodostumiseen nähdään kuvan 17 diagrammista. Huonot erät on valmistettu kylmemmällä ilmalla, mistä johtuen puhaltimien jäähdytys on otettu pois käytöstä, jolloin siirtoilma lämpenee.



Kuva 17. Ulkoilman lämpötilan vaikutus nauhaan.

6.2 Monimuuttujakorrelaatiot

Monimuuttuja-analyysi suoritettiin Unscrambler X-ohjelmalla. Analyysissä käytettiin PLS-regressiota, eli partial least squares-regressiota. [33] Epävarmuutta tuloksissa aiheuttaa muuttujien vähäinen määrä. Jotta parempia korrelaatioita olisi voinut saada, olisi muuttujia pitänyt lisätä. Tätä ei kuitenkaan tajuttu tehdä ennen analyysyä, joten epävarmuus jäi suuremmaksi.

Ensimmäisellä analyysikerralla B-yksikön datasta ei löydetty kunnollisia korrelaatioita. Lisäämällä analyysiin enemmän muuttujia muodostunut korrelaatio olisi kuitenkin todennäköisesti mallintanut kohinaa eli normaalia muuttujien suuruuden vaihtelua. Korrelaatioiden puuttumisesta huolimatta esimerkiksi puhaltimien lämpötilalla sekoituksen aikana, pellettikoolla sekä hännällisten pellettien määrällä oli hieman enemmän merkitystä korrelaatioon. [33.]

C-yksikölle saatiin ensimmäisellä analyysillä kohtuullinen ennustettavuus kahdella laskennallisella muuttujalla. R^2 eli regressiomallin selitysosuus oli 0,83. Jotta olisi päästy parempaan tulokseen, olisi dataa pitänyt olla enemmän. Tärkeimmät muodostuneeseen korrelaatiomalliin vaikuttaneet parametrit on esitetty taulukossa 2. [33.]

Taulukon 2 parametrejä käyttäen muodostetulla mallilla pystytään ennustamaan nauhasta tehtäviä valituksia suuntaa antavasti. Ennuste siis yrittää määrittää, millä todennäköisyydellä analysoidusta erästä tehdään valitus. Mitä lähempänä ennusteen arvo on yhtä, sitä todennäköisemmin mallin mukaan erästä tehdään valitus. Paremmen mallin saisi muodostettua isommalla datalla. Taulukossa 3 on kuvattu valitettujen erien sekä verrokkierien ennustetta valituksesta. [33.]

Taulukko 2. PLS-regressio C-yksikön datasta. [33]

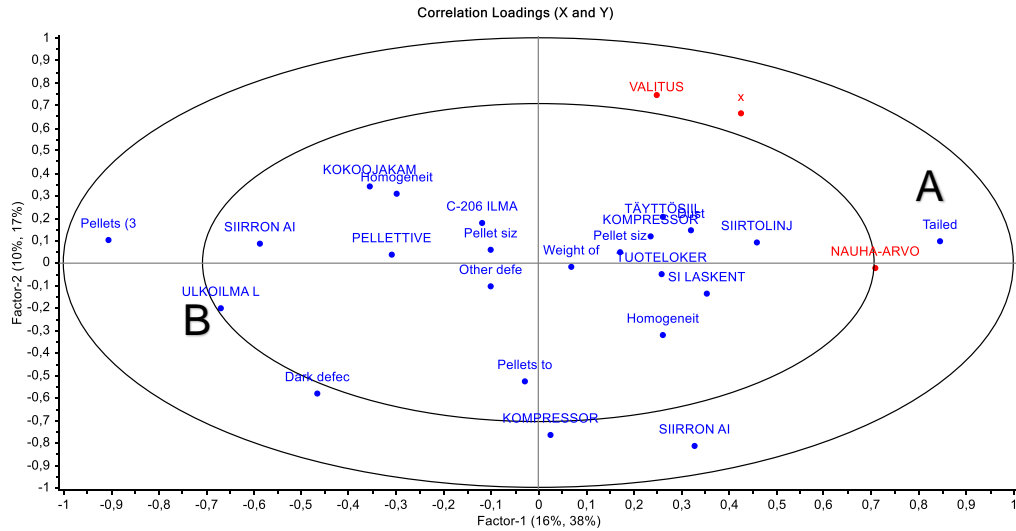
Parametri	Painoarvo	Abs (paino...)
ULKOILMAN SUHT. KOSTEUS	-0.148	0.148
ULKOILMA LÄMPÖTILA	-0.115	0.115
KOKOOJAKAMMION PAINE	0.106	0.106
PELLETTIVESI LPT	0.086	0.086
Homogeneity (3001-5000 μm)	0.066	0.066
SEKOITUKSEN PAINE	0.055	0.055
MFR 190°C 2.16 kg3	0.053	0.053
F+l/kg (Flow marks)	0.051	0.051
F+l/m2 (Flow marks)	0.050	0.050
SEKOITUKSEN LÄMPÖTILA	-0.048	0.048

Taulukko 3. Mallilla muodostettu ennuste nauhavalituksesta. [33]

Erä	Valitus	Ennuste
A	0	0.216952
B	1	0.781367
C	1	1.137845
D	1	1.009842
E	1	0.64336
F	1	1.085328
G	0	-0.07281
H	0	0.256597
I	0	0.044124
J	0	0.03659
K	0	-0.13922

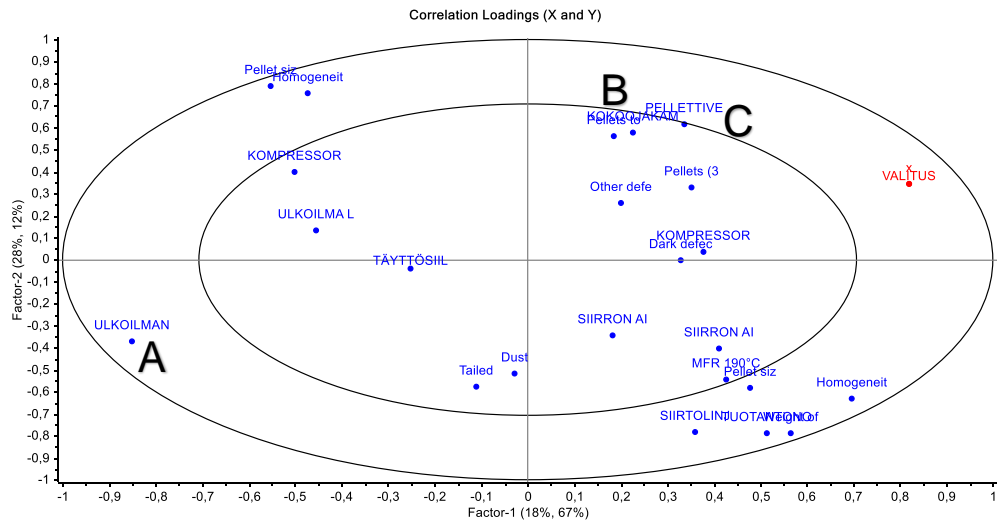
Toisella analyysikerralla datasta poistettiin geelit, kontaminaatiot sekä ”flow markit” eli valumajäljet, jotka näkyvät tuotteesta tehdyssä kalvossa. Lisäksi dataan lisättiin siilofarmilta erää siirrettäessä käytettyjen puhaltimien paineet sekä siirtoilman lämpötilat. Kuvista 18 ja 19 voidaan katsoa, mitkä parametrit vaikuttavat eniten nauhaantumiseen. Parametrit, jotka ovat kauempana ellipsien keskipisteestä, isomman ja pienemmän ellipsin välissä, vaikuttavat enemmän. Kuvista voidaan katsoa myös mihin suuntaan parametri

vaikuttaa nauhaantumiseen. Esimerkkinä kuvasta 18 nähdään, kuinka hännällisten pellettien suurempi määrä (A) sekä pienempi ulkoilman lämpötila (B) nostaa mahdollisuutta nauhaan.



Kuva 18. Parametrien merkitsevyys B-yksikön analyysissä. [26]

B-yksiköllä ei edelleenkään löytynyt vahvoja korrelaatioita. Kuvasta 18 voidaan havaita, kuinka hännällisillä pelleteillä, siirron aikaisella lämpötilalla sekä sekoituksen lämpötilalla oli suurempi merkitys. Kahdella laskennallisella muuttujalla mallin R^2 on vain 0,62, joten mallia ei voida pitää tarkkana. [34.]



Kuva 19. Parametrien merkitsevyys C-yksikön analyysissä. [34]

C-yksiköllä kahden laskennallisen muuttujan malli jäi hiukan ensimmäisen analyysin tasosta R^2 ollessa 0,79. Tärkeimmiksi parametreiksi havaittiin ulkoilman suhteellinen kosteus (A), kokoojakammion paine (B) ja pellettiveden lämpötila (C). Kuvassa 19 olevista parametreista kymmenellä tärkeimmällä parametrilla tehty vertailu korosti edellisten lisäksi ulkoilman lämpötilaa. [34.]

7 Siirtokokeet

Insinööriyön aikana oli aikataulujen salliessa tarkoitus suorittaa siirtokokeita nauhaantumisen tutkimiseksi. Siirtokokeita ei kuitenkaan pystytty suorittamaan työn aikataulun puitteissa. Kokeet olisivat vaatineet paljon suurempaa suunnittelua, ja sitä varten olisi tullut sopia aikataulusta muun muassa materiaalikäsitteilyn ja tuotannosuunnittelun kanssa.

7.1 Tuotteen siirron ja siilon sekoituksen testaus

Siiloraportti on siilo-operaattoreiden laatima dokumentti, johon merkitään kaikki tehdyt täytöt ja siirrot sekä siilojen pesua koskevat pöly- ja nauha-arvostelut. Siiloraporteista voidaan tulkita, että B-yksikön tuotteiden nauhaantumista tapahtuu paljon joko siirron aikana yksiköltä siilofarmille tai sekoituksen aikana. Tämän ongelman paikantaminen voidaan suorittaa tavallisen tuotannon ohessa täyttämällä siilo ilman, että täyttösiiloa sekoitetaan samaa aikaan. Kun erä on valmis ja siilo on täynnä, laitetaan siilon ja lokeron väliin sihti ja siirretään tuote-erä toiseen siiloon, jossa sekoitus ja ilmastus tapahtuvat. Kun alkuperäinen täyttösiilo on tyhjä, siidistä nähdään, onko nauha syntynyt siirron aikana yksiköltä siilofarmille. [35.]

Kun tuote-erä on sekoittunut ja ilmastunut uudessa siilossa ja tulee aika siirtää se esimerkiksi pakkaamoon, nähdään siilon tyhjentyessä siidistä, onko nauhaa syntynyt sekoituksen aikana. Tämän kaltainen koe voitaisiin suorittaa useammalle erälle ja laadulle, riippuen siitä, miten tuotanto ja pakkausohjelmat antavat periksi, jotta tulokset ovat luotettavampia ja kuvaavat laajempaa otantaa. Toki voidaan myös keskittyä laatuihin, joissa on ollut eniten ongelmaa nauhan suhteen, jolloin voidaan olla melko varmoja, että ongelma tulee esille. Kun mahdollinen ongelmakohta on paikannettu kokeiden avulla, voidaan keskittyä joko siirtolinjan tai sekoituslinjan huoltamiseen, jotta ongelma saataisiin kuriin. [35.]

7.2 Siirtolinjojen ja parametrien testaus

Toinen mahdollinen siirtokoe voitaisiin suorittaa jollakin siirtolinjalla esimerkiksi pakkaamoon. Tarkoituksena olisi siirtää esimerkiksi 2-laadun erä kokonaisuudessaan pakkaamoon, kesken siirron vaihdellen siirtopainetta ja lämpötilaa. Koe voitaisiin suorittaa C-yksikön laadulla, koska niissä on ollut vähemmän nauhaongelmia yksikön ja siilofarmin välillä, jolloin voisi sanoa mahdollisen nauhan syntyneen todennäköisemmin siirron aikana pakkaamolle. Pakkaamon päässä mahdollisuuksien mukaan seurattaisiin nauhan muodostumista eri aikajaksoilla, joissa on käytetty erilaisia parametrejä. Pakkaamon puolella tuote pakattaisiin esimerkiksi säkkeihin, joista myöhemmin sihdin avulla selvitetäisiin, kuinka paljon parametrien muuttamiset ovat vaikuttaneet nauhan muodostumiseen. Tällä tavalla voitaisiin saada selville riskirajat paineen ja lämpötilojen suhteen nauhan muodostumiselle. Siirtokokeet voidaan toteuttaa myös useammalla siirtolinjalla, jotta pystytään havaitsemaan, mikä siirtolinja on nauhan suhteen ongelmallisin.

8 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli selvittää Borealis Polymers Oy:lle vanhojen selvitysten ja kirjallisuuden avulla asiat, jotka vaikuttavat nauhaantumiseen. Työ tehtiin, koska LDPE-laitoksen tuotteesta oli tullut vuonna 2018 poikkeuksellisen paljon valituksia ja ongelman lähde haluttiin löytää. Lopputuloksena oli tarkoitus muodostaa ohjeet liittyen tuotteensiirtoon, sekä ehdottaa operointiin ja laitteistoon liittyä muutoksia.

Työssä esiteltiin yritys, tuote sekä prosessi. Prosessista tarkemmin esiteltiin tuotteensiirtoon liittyen pneumaattinen siirto, sekä varsinainen ongelma eli nauhaantuminen. Nauhaantumisen käsitteliin yleisellä tasolla siihen johtavia syitä sekä siitä johtuvia ongelmia. Lisäksi tutkittiin, mitkä ovat LDPE-laitoksen ongelmakohtia, joista nauhaantuminen voisi saada alkunsa tai jotka edesauttavat sen syntyä. Operoinnin sekä laitteiston ongelmakohtiin esitettiin ratkaisuehdotuksia.

Valitettujen erien siirtoihin liittyviä arvoja, kuten siirtoilman lämpötiloja ja paineita, verrattiin kirjallisuudesta löydettyihin ohjeellisiin arvoihin. Vertailun avulla yritettiin päätellä, mistä nauhaantuminen on kyseisten erien kohdalla johtunut. Vertailun lisäksi valitettuja eriä analysoitiin korrelaatioiden kautta. Korrelaatioita varten etsittiin erien laboratoriotulokset sekä automaatiojärjestelmistä tuotantodataa siirtoihin liittyen. Korrelaatioita tutkittiin Excelillä sekä Unscrambler X-ohjelmalla, jossa muodostettiin monimuuttujakorrelaatioita. Näiden korrelaatioiden avulla tulkittiin, mitkä asiat ovat mahdollisesti vaikuttaneet nauhan muodostumiseen.

LDPE-laitoksen tuotteensiirrosta löytyi monia ongelmakohtia, jotka voivat edesauttaa nauhaantumista. Ongelmia löytyi operoinnista sekä siirtojärjestelmästä. Työn aikana havaittiin, että suuri osa valitetuista eristä on valmistettu alkukevään aikana, jolloin siirtoilmapuhaltimien jäähditys on pois käytöstä. Tämä johtaa liian kuumaan siirtoilman lämpötilaan ja mahdollisesti nauhaantumiseen. Havaittiin myös, että nauhan havaitseminen sillojen pesun yhteydessä ei ole johtanut toimenpiteisiin, joilla pyrittäisiin välttämään nauhan päätyminen asiakkaalle. Lisäksi huomattiin, että siirtoputkistojen käsittelyä ei ole tehty niiden vaatimilla aikaväleillä.

Työhön piti alkuperäisen suunnitelman mukaan sisällyttää siirtokokeita. Niitä ei kuitenkaan ehditty tämän työn puitteissa suorittaa aikataulullisista syistä. Työhön sisällytettiin kuitenkin kaksi mahdollista siirtokoetta, jotka voidaan suorittaa myöhemmin. Niiden avulla pystyttäisiin mahdollisesti selvittää tarkemmin ongelman alkuperä. Siirtokokeiden lisäksi korrelaatioiden hyödyntäminen jäi vajaalle tasolle. Dataa olisi tullut olla enemmän, jotta analyyseistä olisi tullut luotettavia. Datan keräämisvaiheessa ei ollut aivan selvää, kuinka analyysit hoidetaan, joten dataa ei kerätty tarpeeksi. Sen lisäksi nauhan ilmeneminen on vaikeaa arvioida, kun operaattorit eivät välttämättä merkitse nauha-arvioita niille kuuluviin paikkoihin. Näistä asioista johtuen korrelaatiot eivät olleet tarpeeksi vahvoja tai luotettavia. Edellä mainituista asioista opittiin se, että analysoitavaa dataa tulisi olla reilusti enemmän, ja lisäksi nauhan määrää tulisi arvioida tämän kaltaisessa analyysissä eri tavalla.

Työtä tullaan hyödyntämään pitämällä operaattoreille koulutustilaisuuksia, joissa kerrotaan nauhaantumiseen vaikuttavista asioista, oikeista siirto-olosuhteista sekä ohjeistetaan toimimaan oikein, jos nauhahavaintoja tulee usein. Lisäksi tullaan luultavasti tekemään huolto-ohjelma siirtoputkistojen käsittelyille ja ehdotetaan siirtoilmapuhaltimien eristäminen, jotta puhaltimia voitaisiin pitää päällä ympäri vuoden.

Työn tavoitteet saavutettiin siltä osin, että vanhoista selvityksistä saatiin poimittua haluttu tieto, jota pystyttiin hyödyntämään tämän hetkisen tilanteen analysoimiseen. Siirtoihin liittyvät ohjeelliset arvot etsittiin vanhojen selvitysten materiaalista, jotta niistä saatiin koostettua ohjeet operaattoreille sekä valitettuja eriä saatiin verrattua niihin. Lisäksi korjaavia toimenpiteitä saatiin esille tarkempaa mietintää varten.

Lähteet

- 1 Technical Publication #16. 2001. Solvay Polymers, Inc.
- 2 10 TIPS FOR AVOIDING OR REDUCING “ANGEL HAIR”/”STREAMERS”/”SNAKE-SKINS” IN PE/PP HANDLING SYSTEMS. 2015. Verkkoaineisto. Zeppelin Systems UK Ltd. <<https://zeppelin-uk.com/10-tips-for-avoiding-or-reducing-angel-hairstreamerssnake-skins-in-pepp-handling-systems/>>. Päivitetty 15.6.2016. Luettu 17.10.2018.
- 3 Pro, Jeff P. & Womack, Andrew G. 2001. Pellet Transfer: Prevention Measures Employed to Reduce Streamer Formation. Verkkoaineisto. Paper, Film & Coil Converter. <<http://www.pffc-online.com/magazine/1007-paper-pellet-transfer-preventative>>. 1.5.2001. Luettu 16.10.2018.
- 4 Borealis-konserni. Verkkoaineisto. Borealis AG. <<https://www.borealis-group.com/porvoo/borealis/borealis-konserni>>. Luettu 16.10.2018.
- 5 Liiketoiminta-alueet. Verkkoaineisto. Borealis AG. <<https://www.borealis-group.com/porvoo/borealis/liiketoiminta-alueet>>. Luettu 16.10.2018.
- 6 Borealis Porvoo. Verkkoaineisto. Borealis AG. <<https://www.borealis-group.com/porvoo>>. Luettu 16.10.2018.
- 7 Kolev, Milena. Polyeteeni (PE). Verkkoaineisto. Valuatlas. <http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf>. Luettu 16.10.2018.
- 8 Seppälä, Jukka. 2008. Polymeeritekniikan perusteet. 6., painos. Helsinki: Otatieto.
- 9 Chemical Resistance of Fluoropolymers. Verkkoaineisto. Davis Instruments. <<http://www.davis.com/TechLibraryArticle/827>>. Luettu 19.10.2018.

- 10 Highlights of Low-Density Polyethylene. 2015. Verkkoaineisto. Plastics Make It Possible. <<https://www.plasticsmakeitpossible.com/about-plastics/faqs/professor-plastics/professor-plastics-highlights-of-low-density-polyethylene/>>. Päivitetty 4.1.2018. Luettu 16.10.2018.
- 11 Celebrating the Differences (and Similarities) of LDPE and HDPE. 2016. Verkkoaineisto. Polymer Solutions Incorporated. <<https://www.polymer-solutions.com/blog/differences-between-ldpe-and-hdpe/>>. 23.6.2016. Luettu 17.10.2018.
- 12 Runsala, Jussi. 2018. LDPE Production Porvoo. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 13 Riistama, Kyösti; Laitinen, Jorma & Vuori, Merja. 2005. Suomen kemiantollisuus. Tampere: Chemas Oy.
- 14 Schroderus, Arto. 2005. Pneumatic Conveying basics. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 15 Pneumatic Conveying Systems. Verkkoaineisto. Coperion GmbH. <<https://www.coperion.com/en/products-services/plants-systems/pneumatic-conveying-systems/>>. Luettu 17.10.2018.
- 16 Klinzing, G.E.; Leung, L.S.; Marcus, R. & Rizk, F. 2010. Pneumatic Conveying of Solids. 3., painos. Springer.
- 17 Pelkonen, Veli. 2013. BBA Course: Basics of Pneumatic Conveying Systems. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 18 Pneumatic Conveying. Verkkoaineisto. IEDCO. <<https://iedco.com/pneumatic-conveying-vacuum-conveying-overview/what-iswhy-pneumatic-conveying/>>. Luettu 19.10.2018.

- 19 Fines, Angel Hair and Streamers: Understanding and Minimizing Their Generation. 2006. Verkkoaineisto. INEOS Olefins and Polymers USA. <https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/angel_hair_and_streamers_tech_pub.pdf>. Luettu 18.10.2018.
- 20 LDPE streamer kuvat. 2007. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 21 Eliminating Hair That's Anything But Angelic. Verkkoaineisto. Plastics Technology. <<https://www.ptonline.com/knowledgecenter/plastics-conveying/system-design/avoid-those-devilish-angel-hairs>>. Luettu 19.10.2018.
- 22 Lassila, Janne. 2018. SS-LS1-3 nousut ja jakoventtiilit. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 23 Hilebrand, Olaf. 2007. Engineering Study, Coperion. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 24 Vuoro 3. 2018. Operaattorit, Porvoo. Keskustelu. 30.11.2018.
- 25 Ehtesham, Asif. 2016. Dresser Coupling. Verkkoaineisto. Trupply. <<https://www.trupply.com/blogs/news/106439558-dresser-coupling>>. Päivitetty 4.5.2016. Luettu 17.12.2018.
- 26 FMEA rankattu. 2007. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 27 Siltala, Jari. 2018. Logistics Asset Development Engineer, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Sähköpostikeskustelu. 28.12.2018
- 28 Runsala, Jussi. 2013. TBWi Por 21 Perusdokumentti. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.

- 29 Por04 LDPE streamer reduction case study. 2008. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 30 Metso DNA. Verkkoaineisto. Rakurs. <<http://www.rakurs.com/eng/system/detail.php?ID=1573>>. Luettu 9.1.2018.
- 31 Malkamäki, Petri. 2018. Cause and Effect analysis – fishbone. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 32 Wiklund, Outi. 2018. PorLD Customer Complaint Dashboard YTD. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 33 Ruskeeniemi, Jari-Jussi. 2018. Lead Engineer, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Sähköpostikeskustelu. 21.12.2018.
- 34 Ruskeeniemi, Jari-Jussi. 2018. LD-streamers_analyysi. Yrityksen sisäinen dokumentti. Borealis Polymers Oy.
- 35 Kuismin, Jari. 2018. Operaattori, Borealis Polymers Oy, Porvoo. Keskustelu. 7.12.2018.

B- ja C-yksikön tuotantodata ja laboratoriotulokset

Alla olevaan taulukkoon valittiin B-yksiköltä tuotantodataa sekä laboratoriotuloksia, joita käytettiin analysoimaan nauhan muodostumista.

ERÄ	VALITUS	NAUHA- ARVOST ELU	x	TÄYTTÖS ILO	ULKOILM A LÄMPÖTI LA	PELLETTI VESI LPT	SI LASKENT A 2	C-206 ILMAN LPT	SIIRTOLIN JA PAINE	TUOTELO KERO RPM	KOKOOJ AKAMMI ON PAINE	KOMPRES SORIN PAINE	KOMPRES SORIN LÄMPÖTI LA
L	0	0	0	19,0	2,1	37,0	15,7	13,2	0,9	27,0	-0,6	0,3	28,4
M	0	0	0	37,0	-1,7	37,0	15,1	13,0	1,0	27,0	-0,7	0,2	21,1
N	1	1	1	19,0	18,3	42,0	1,2	18,7	0,8	26,0	0,0	0,3	21,5
O	1	0	1	31,0	15,4	41,3	1,0	17,8	0,6	26,5	0,0	0,2	16,5
P	0	0	0	31,0	15,7	41,0	2,2	21,2	0,9	26,0	0,0	0,2	20,4
Q	0	0	0	37,0	15,6	41,0	2,1	21,0	1,0	26,0	0,0	0,3	26,6
R	1	0	1	19,0	0,6	37,0	15,1	19,3	0,9	41,0	-0,8	0,3	19,3
S	1	3	1	7,0	-3,3	37,0	15,2	15,8	0,8	38,0	-0,7	0,2	24,0
T	0	2	1	37,0	-4,5	42,0	0,3	16,6	0,9	38,0	-0,7	0,2	19,6
U	1	0	1	25,0	-20,5	39,0	2,1	23,0	1,0	37,0	-0,7	0,3	2,7
V	1	3	1	37,0	-10,2	40,0	2,2	24,4	1,1	37,0	-0,7	0,3	23,4
W	1	0	1	37,0	13,5	40,0	1,2	17,9	1,1	40,0	-0,6	0,2	20,2
X	1	0	1	19,0	16,8	40,0	1,3	16,2	0,9	40,0	-0,7	0,2	16,7
Y	0	0	0	13,0	23,5	39,6	1,2	21,4	0,5	38,0	-0,7	0,2	27,5
Z	0	0	0	37,0	17,2	40,0	2,1	21,4	1,1	38,0	-0,6	0,3	25,9
Ä	0	0	0	13,0	0,6	42,0	0,3	19,9	0,7	38,0	-0,7	0,2	19,0
Å	0	0	0	13,0	11,8	42,0	0,3	22,1	0,8	38,0	-0,6	0,2	23,5
Ö	0	0	0	7,0	10,8	40,0	1,2	21,7	0,8	38,0	-0,6	0,2	24,3
1	0	0	0	13,0	6,1	39,0	1,2	20,6	0,8	38,0	-0,7	0,3	24,7

ERÄ	SIIRRON AIKAINEN PAIN E	SIIRRON AIKAINEN LÄMPÖTI LA	Dark defects	Dust	Homogen eity (1001- 3000 µm)	Homogen eity (3001- 5000 µm)	Other defects	Pellet size	Pellet size µm	Pellets (3001- 5500 µm)	Pellets total	Tailed	Weight of 50 pellets
L	0,4	41,7	1,7	1,2	0,0	99,7	3,3	36,9	3939,0	98,0	98,1	1,7	1,4
M	0,3	31,8	0,0	1,3	0,0	99,6	28,8	36,6	3943,0	97,8	97,8	1,9	1,4
N	0,5	26,1	2,0	1,7	0,1	99,7	4,1	39,9	3816,0	98,4	98,5	1,3	1,3
O	0,5	18,4	0,0	1,4	0,1	99,8	2,2	40,6	3842,0	98,7	98,8	1,1	1,2
P	0,4	21,4	0,0	0,9	0,0	99,8	1,8	36,1	3931,0	99,0	99,0	0,8	1,4
Q	0,4	30,1	0,0	3,1	0,0	99,9	0,0	35,5	3986,0	96,4	96,4	3,4	1,4
R	0,3	20,2	0,0	1,4	0,0	99,7	2,1	37,5	3927,0	97,5	97,5	2,3	1,3
S	0,3	34,7	0,0	1,4	0,0	99,7	0,0	37,5	3926,0	96,2	96,2	3,5	1,3
T	0,4	32,7	0,0	1,6	2,4	97,5	0,0	37,0	3944,0	95,5	97,8	2,0	1,4
U	0,4	19,9	0,0	2,2	0,0	99,7	5,7	32,5	4146,0	98,0	5,7	1,9	1,5
V	0,3	28,9	0,0	3,2	0,2	99,7	0,0	34,9	4050,0	95,7	95,8	4,0	1,4
W	0,4	25,1	0,0	3,2	0,2	99,7	0,0	34,6	4016,0	96,2	96,4	3,4	1,4
X	0,4	20,7	0,0	1,7	0,1	99,7	1,8	34,7	4004,0	98,5	98,5	1,3	1,4
Y	0,4	31,2	3,4	2,2	0,0	99,9	1,7	35,7	3996,0	99,1	99,1	0,9	1,4
Z	0,4	26,9	0,0	1,9	0,0	99,9	0,0	33,9	4060,0	98,8	98,8	1,1	1,5
Ä	0,5	28,9	2,5	0,9	1,3	98,6	0,0	36,9	3941,0	97,4	98,5	1,3	1,4
Å	0,5	31,0	4,1	1,0	1,1	98,8	2,0	35,8	3972,0	97,5	98,5	1,3	1,4
Ö	0,4	25,4	1,7	2,7	0,2	99,7	8,5	35,8	3984,0	97,5	97,7	2,2	1,4
1	0,4	26,0	1,8	2,5	0,2	99,8	1,8	35,8	3984,0	97,9	98,1	1,8	1,4

Alla olevaan taulukkoon valittiin C-yksiköltä tuotantodataa sekä laboratoriotuloksia, joita käytettiin analysoimaan nauhan muodostumista.

ERÄ	VALITUS	NAUHA-ARVOSTELU	x	TÄYTTÖSILO	ULKOILMA LÄMPÖTILA	ULKOILMAN SUHT. KOSTEUS	PELLETTI VESI LPT	TUOTANTO NOPEUS	SIIRTOLINJAN PAINE	KOKOOJAKAMMION PAINE	KOMPRESSORIN PAINE	KOMPRESSORIN LÄMPÖTILA	SIIRRON AIKAINEN PAIN E
A	0	0	0	27	0,6	87,5	42,0	7032,9	0,4	-0,7	0,2	24,8	0,4
B	1	0	1	33	-8,7	86,1	42,0	8600,8	0,5	-0,7	0,2	17,7	0,6
C	1	0	1	27	-7,3	53,6	42,0	8618,7	0,5	-0,7	0,3	21,6	0,6
D	1	0	1	17	4,2	65,8	42,0	8532,6	0,5	-0,6	0,3	29,8	0,4
E	1	0	1	27	4,2	67,5	42,0	7004,1	0,4	-0,7	0,2	27,2	0,4
F	1	0	1	27	13,5	69,3	42,1	8647,8	0,5	-0,7	0,2	14,3	0,4
G	0	0	0	39	11,7	93,7	42,0	8548,7	0,5	-0,8	0,2	22,7	0,3
H	0	0	0	33	5,1	81,3	42,0	8521,0	0,5	-0,8	0,2	20,3	0,4
I	0	0	0	35	11,3	95,3	42,0	7205,6	0,5	-0,7	0,2	33,4	0,4
J	0	0	0	29	6,0	94,1	40,0	8649,2	0,5	-0,6	0,2	29,5	0,5
K	0	0	0	17	5,1	88,9	40,0	8615,8	0,5	-0,8	0,3	21,5	0,5

ERÄ	SIIRRON AIKAINEN LÄMPÖTILA A	Dark defects	Dust	Homogeneity (1001-3000 µm)	Homogeneity (3001-5000 µm)	Other defects	Pellet size	Pellet size µm	Pellets (3001-5500 µm)	Pellets total	Tailed	Weight of 50 pellets	MFR 190°C 2.16 kg3
A	37,6	0,0	1,1	0,5	99,5	4,2	41,0	3892,0	98,6	99,1	0,8	1,2	0,4
B	38,7	0,0	1,4	0,0	100,0	0,0	36,6	3950,0	98,9	98,9	1,0	1,4	4,5
C	41,6	0,0	0,7	0,0	100,0	0,0	36,6	3952,0	99,4	99,4	0,6	1,4	4,4
D	37,8	0,0	0,2	0,1	99,9	0,0	38,7	3931,0	99,8	99,9	0,1	1,3	0,3
E	21,6	0,0	0,4	0,3	99,7	0,0	42,3	3842,0	99,4	99,6	0,3	1,2	0,4
F	16,7	8,1	0,8	0,0	99,9	8,1	38,0	3882,0	99,5	99,5	0,5	1,3	4,5
G	24,5	0,0	0,1	0,0	99,8	0,0	37,0	3975,0	99,8	99,8	0,1	1,4	0,3
H	22,4	1,6	0,4	0,0	99,9	0,0	37,3	3974,0	99,6	99,7	0,3	1,3	0,4
I	18,8	0,0	0,2	0,3	99,6	0,0	44,6	3768,0	99,4	99,7	0,2	1,1	0,4
J	55,5	2,0	1,2	0,0	99,9	0,0	37,8	3890,0	98,8	98,8	1,1	1,3	4,6
K	25,7	0,0	1,7	0,0	99,9	0,0	37,9	3882,0	98,4	98,4	1,5	1,3	4,4