

KUMIEKSTRUUSION OPTIMOINTI

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Muovitekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
Syksy 2008
Joose Aho

Lahden ammattikorkeakoulu

Tekniikan laitos

AHO, JOOSE: Kumiekstruusion optimointi

Muovitekniikan opinnäytetyö, 38 sivua, 15 liitesivua

Syksy 2008

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia kumiekstruuderiin integroidun sulapumpun vaikutuksia kumin tuottoon ja sulalämpöön. Muoviteollisuudessa sulapumppujen käyttö on melko yleistä verrattuna kumiteollisuuteen. Sulapumppujen käyttöä kumiteollisuudessa rajoittaa niiden vaurioitumisherkkyys. Sulapumpun edut perustuvat sen tehokkuuteen tuottaa painetta ja vakiotuottoon. Ekstruusioprosessissa vakiotuotolla taataan mittatarkka ekstrudaatti. Sulapumppua käytettäessä massan paine muodostetaan vasta sulapumpun hammaspyörillä, jolloin ekstruuderin tehontarve pienenee. Näin ollen ekstruuderin tehtäväksi jää kumiseoksen pehmentäminen, homogeenointi ja riittävän syötön takaaminen sulapumpulle. Ekstruuderi pystyy tämän vuoksi prosessoimaan enemmän materiaalia, koska energiaa kuluu vähemmän paineen muodostamiseen.

Sulapumpun vaikutuksien tutkimiseksi tehtiin koevalutuksia, joita ajettiin kahdella eri viskositeetin EPDM-kumilla. Valutuksia suoritettiin eri lämpötilaprofiileilla ja ruuvin kierrosnopeuksilla sekä sulapumpun kanssa että ilman.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että tuotto kasvaa merkittävästi, kun sulapumppu on integroituna. Sen sijaan sulalämmöt olivat samoilla ruuvin pyörimisnopeuksilla kuumempia, kun ajettiin sulapumpun kanssa. Samaa tuottoon päästiin kuitenkin alhaisemmilla sulalämpötiloilla, kun kokeet suoritettiin sulapumpun avulla.

Avainsanat: kumiekstruusio, sulapumppu, kumi, lämpötilan säätö

Lahti University of Applied Sciences

Faculty of Technology

AHO, JOOSE: Optimization of rubber extrusion

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 38 pages, 15 appendices

Fall 2008

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to examine extrusion through a gear pump and its effects on the output and melt temperature of rubber. Gear pumps are commonly used in the plastics industry but because of their failure sensitivity they are not very common in the rubber industry. The benefits of a gear pump are based on its ability to produce pressure and constant output. The constant output ensures dimensional accuracy of extrudates in the extrusion process. The extruder requires less power because the pressure build-up is generated in the gear pump. With less energy wasted for pressure build-up, the extruder can process more material. Processing includes plasticizing, homogenizing and ensuring sufficient feed to the gear pump.

Bleeding tests were made with two different EPDM rubbers with different viscosities to examine the effects of the gear pump. The tests were conducted with different barrel temperature profiles and screw speeds, both with and without the gear pump.

From the bleeding test results it can be clearly seen that the output increases significantly when the extrusion is done through the gear pump. On the other hand, the melt temperatures were higher with the same screw speeds when extruding through the gear pump. However, the same output can be reached with lower melt temperatures by utilizing the extruder-gear pump system.

Key words: rubber extrusion, gear pump, rubber, temperature control

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	KUMIEKSTRUUSION HISTORIA	2
3	KUMILAADUT JA NIIDEN OMINAISUUDET	3
3.1	Luonnonkumi, NR	3
3.2	Styreeni-butadieenikumi, SBR	4
3.3	Kloropreenikumi, CR	5
3.4	Eteeni-propeenikumi, EPM tai EPDM	6
3.5	Kumin viskositeetin määrittäminen	7
3.6	Kumin sekoittaminen	8
4	KUMIEKSTRUUSION TOIMINTAPERIAATE JA JAOTTELU	9
4.1	Kumiekstruudereiden jako	9
4.2	Kylmäsyöttökstruusio	9
5	TEORIAA KUMIEKSTRUUSIOSTA	11
5.1	Puristussuhde	11
5.2	Ruuvien toiminta	11
5.3	Ruuvien terminologiaa	12
5.4	Ruuvien ja sylinterin lämpötilan vaikutukset	13
5.5	Lämpötilan säätö	14
5.6	Syöttörulla	15
6	SULAPUMPUN INTEGROINTI EKSTRUUDERIIN	16
6.1	Sulapumpun edut	16
6.2	Sulapumpun toimintaperiaate	17
6.3	Ekstruusio sulapumpun avulla	19
7	KÄYTÄNNÖN KOKEET	21
7.1	Tavoite	21
7.2	Koelaitteisto	22
7.2.1	Ekstruuderi ja ruuvi	22
7.2.2	Sulapumppu	23
7.2.3	Puristinpää	23

7.3	Kokeiden suoritus	24
8	TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI	26
8.1	Kumin viskositeetin vaikutus	26
8.2	Sulapumpun vaikutukset EPDM-kumin (Mooney 30) ekstruusioon	27
8.3	Sulapumpun vaikutukset EPDM-kumin (Mooney 48) ekstruusioon	28
9	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	36
	LIITTEET	38

1 JOHDANTO

Maillefer Extrusion Oy:llä on tavoitteena kehittää kumiekstruusiossa kumi-kaapelikoneiden kovan kysynnän vuoksi. Kumiekstruusiossa, ja ekstruusiossa yleensä, pyritään stabiiliin tuotantoon, jossa tuotto olisi mahdollisimman tasalaatuista. Kun asennetaan sulapumppu ekstruuderin ja puristinpään väliin ja ajetaan materiaali pumpun läpi, pienenevät massan painevaihtelut, mikä johtaa tasaiseen tuottoon ja edelleen ekstrudaatin hyvään mittatarkkuuteen.

Tärkeää on myös pehmentää kumiseos tehokkaasti, mikä myös vaikuttaa mittatarkkuuteen ja pinnanlaatuun. Tuotto pitäisi olla myös mahdollisimman suuri massalämpötilan pysyessä alle vulkanoitumislämpötilan. Kun ekstruuderin ei tarvitse muodostaa vaadittavaa painetta suolakkeen läpityöstämiseksi, vaan käytetään sulapumppua paineenmuodostamiseen, tarvitaan vähemmän tehontarvetta ekstruuderille. Näin ekstruuderin tehtäväksi jää ainoastaan massan pehmentäminen, homogointi ja syöttäminen sulapumpulle, minkä vuoksi ekstruuderin pystyy prosessoimaan enemmän materiaalia.

Työn tarkoituksena on selvittää, miten sulapumppu vaikuttaa eri kumien tuottoihin ja sulalämpöihin. Testattavana oli EPDM-nauhakumi, josta oli kahta eri viskositeettia: Mooney 30 ja Mooney 48. Tuottoja ja sulalämpötiloja mitattiin eri lämpötilaprofiileilla ja ruuvien pyörimisnopeuksilla sulapumpulla ja ilman.

Testit suoritettiin Maillefer Extrusion Oy:n laboratorioekstruuderilla, joka oli mallia NMR-120-12D. Sulapumppuna käytettiin Maag Pump Systemsin hammaspyöräpumppua extrex[®] 90-5 RB.

Työn teoreettisessa osassa tullaan tarkastelemaan kumiekstruusion historiaa ja jaottelua, ruuvien ja lämpötilan säädön teoriaa, kumilaatuja sekä sulapumpun toimintaa. Kokeellisessa osassa on tarkoitus käydä läpi kokeiden suorittamista ja testauslaitteistoa. Tämän jälkeen tullaan arvioimaan testeistä saatuja tuloksia ja tehdään yhteenveto. Kaikista valutustesteistä tehtävät mittauspöytäkirjat liitetään työn loppuun.

2 KUMIEKSTRUUSION HISTORIA

Kumiekstruusion katsotaan alkaneen noin 150 vuotta sitten, jolloin Charles Hancock kumppaneineen sovelsi perusperiaatteita guttaperkan prosessointiin. Aikaisimmat kumiekstruusion sovellukset olivat kaapelin eristämisessä. Ensimmäiset ruuvikoneet kehitettiin 1870-luvulla ja ensimmäiset kaupalliset koneet oli valmistettu vuoteen 1890 mennessä Yhdysvalloissa. (Crowther 1998, 3.)

Samansuuntaista kehitystä tapahtui myös Euroopassa, jossa Francis Shaw, David Bridge ja Iddonin veljekset kehittivät ensimmäisiä koneita 1880-luvulla sekä Paul Troester vuoden 1900 paikkeilla. Läpi koko 1900-luvun otettiin huomattavia askeleita kehityksessä eteenpäin, lähinnä koneen rakenteessa ja voimansiirtoteknologiassa, jotka johtivat tuotantokyvyn paranemiseen, tarkkuuteen sekä ohjauksen kehittämiseen. (Crowther 1998, 3.)

Kumiekstruusion kehittymisen eräs merkittävä ongelma oli kumiteollisuuden luonne itsessään. Alun kaupalliset paineet johtivat vaihteluun kilpailijoiden välillä. Teknologia kehittyi joskus jopa samanaikaisesti useassa eri yhtiössä eri mantereilla. (Crowther 1998, 3.)

Jos verrataan muovi- ja kumiteollisuutta keskenään, voidaan todeta, että kumiteollisuus on ollut vähemmän tutkimuksen kohteena kuin nuorempi muoviteollisuus. Kuitenkin, muovien tutkimisesta saatuja tuloksia voidaan soveltaa kumeihin, huolimatta niiden olennaisista eroista ominaisuuksissa ja käyttäytymisessä. Merkittävät edistykset laitteissa vuodesta 1980 lähtien heijastavat panostuksesta tutkimukseen ja kehitykseen. (Crowther 1998, 3.)

1900-luvun alussa käyttöönotetut ekstruderit toimivat hyvin samanlaisella konseptilla seuraavat 70 vuotta, eikä niihin tehty paljon muutoksia. Ruuvin L/D-suhde oli suhteellisen pieni ollen 5:1 ja ruuvin nopeuden säätö oli minimaalinen. 1960-luvulla 15 % ekstrudereista oli varustettu nopeussäätöisillä sähkömoottoreilla, minkä ansiosta operaattorit saivat joustavuutta prosessiin sekä extrudoidun tuotteen kontrolloimiseen. (Bhowmick, Hall & Benarey 1994, 269.)

Kumituotteiden edut eri käyttökohteissa ymmärrettiin toisen maailmansodan aikana ja niiden käyttökohteet vaihtelivatkin yksinkertaisista päällysteistä aina vaativiin korkean teknologian kohteisiin sota-aluksissa. Myös radio-, tutka- ja tv-järjestelmät vaativat tietynlaisia kumituotteita ja näin ollen erilaisten kaapeleiden kysyntä kasvoi. (Bhowmick ym. 1994, 269.)

Höyryvulkanointi oli suosituin vulkanointimenetelmä aina 1960-luvulle saakka, jolloin alettiin kehittää uusia vulkanointimenetelmiä. Jatkuvatoimista vulkanointimenetelmää kehitettiin ja tuloksena saatiin suolakylpymenetelmä täyttämään teollisuuden vaatimukset jatkuvatoimiselle tuotannolle. (Bhowmick ym. 1994, 270.)

3 KUMILAADUT JA NIIDEN OMINAISUUDET

Kun puhutaan kumista, voidaan sillä tarkoittaa raakakumia (elastomeeriä), kumisekoitetta tai vulkanoitua tuotetta. Elastomeerit ovat ristosilloitettuja polymeerejä, joilla on kyky palautua muotoonsa jännityksen aiheuttaman muodonmuutoksen ja jännityksestä vapautumisen jälkeen. (Kumiteollisuus ry.)

Kumiraaka-aineet voidaan jakaa kolmeen perustyyppiin: luonnonkumi, synteettinen kumi ja termoplastinen elastomeeri. Luonnonkumia voidaan saada noin kahdesta sadasta eri kasvista, mutta vain kumipuu (*Hevea brasiliensis*) on kaupallisesti merkittävä. Luonnonkumi on cis-1,4-polyisopreeniä. Synteettinen kumi on teollisesti valmistettu, jonka pääraaka-aine on öljy. Termoplastiset elastomeerit käyttäytyvät työstössä kestopuovien tavoin ja siten silloitus on purettavissa lämmityksen avulla. (Kumiteollisuus ry; Tampereen teknillinen yliopisto.)

3.1 Luonnonkumi, NR

Luonnonkumilla on hyvät prosessointiominaisuudet. Vaikka luonnonkumin prosessoitavuutta ei voi ennustaa yhdestä tietystä parametrystä, käytetään viskositeettiä yleisimpänä työstön laadun mittarina. Jotta voidaan taata tasainen käyttö sekoitteen

jatkojalostukselle, kuten ekstruusio, on sekoitteen viskositeetin hallinta kohtuullisen tiukoin rajoin oleellista sekoituksen aikana. Mastisoidun kumin ekstruusio-ominaisuudet ovat paremmat kuin saman viskositeetin mastisoimattoman kumin. (Morton 1995, 197.)

Vulkanoidun luonnonkumin, niin kuin muidenkin kumien, mekaaniset ominaisuudet riippuvat useista eri muuttujista, kuten sekoitteen viskositeetista, täyteaineen tyyppistä ja määrästä sekä silloitusasteesta. Luonnonkumivulkanaatin hyvät lujuusominaisuudet ovat yleisesti tiedossa. Vetolujuus vaihtelee 17 ja 24 MPa:n välillä, kun hiilimustatäytetyillä se vaihtelee välillä 24...32 MPa. Lujuus tippuu nopeasti lämmön noustessa, mutta se on silti omaa luokkaansa muihin kumeihin verrattuna. (Morton 1995, 198.)

Myös kulutuskestävyys on erinomainen etenkin lievissä kulutusolosuhteissa. Kulutusominaisuuksia voidaan edelleen parantaa sekoittamalla joukkoon hieman butadieniä. Luonnonkumivulkanaatin lämpö- ja vanhenemiskestävyys saadaan riittäväksi oikeanlaisella vulkanointimenetelmällä sekä käyttämällä amiini- tai fenoliantioksidantteja. (Morton 1995, 198.)

3.2 Styreeni-butadieenikumi, SBR

Yli puolet maailmalla tuotetusta synteettisestä kumista on styreeni-butadieenikumia ja sen käyttö maailmalla on samaa luokkaa kuin luonnonkumilla (Morton 1995, 209). Styreeni-butadieenikumin prosessoitavuus on muihin synteettisiin kumeihin verrattuna hyvä ja se sekoittuu helposti hiilimustan ja muiden sekoiteaineiden kanssa (Morton 1995, 214).

SBR:n sekoittaminen on vastaava luonnonkumin ja muiden tyydyttymättömien hiilivetykumien kanssa. Suuren mittakaavan käyttökohteissa, kuten auton renkaisissa, tehokkaimmat ja helpoimmin käsiteltävät sekoitteet perustuvat kaikki täyteaineisiin, kuten hiilimustaan, sinkkioksidiin, rikkiin ja katalyytteihin. Näiden kompleksien seosten prosessoiminen homogeenisiksi sekoitteiksi, jotka voidaan edelleen

jatkojalostaa puristamalla, kalanteroimalla tai ekstrudoimalla, on valmistuksen kannalta tärkein vaihe. (Morton 1995, 228.)

Sekoitereseptit, joissa on vain vähän rikkiä tai joissa on vain orgaanisia rikkisidoksia, johtavat vulkanaatteihin, joilla on parempi vanhenemisenkesto, mutta vastavasti hitaampi vulkanoituminen. SBR:n yleisimmät katalyytit ovat sinkki stearaatti tai sinkkioksidi ja steariinihappo. (Morton 1995, 228.)

Luonnonkumiin verrattuna SBR:llä on ylivoimaiset ekstruusio-ominaisuudet ja SBR pyrkii myös esivulkanoitumaan prosessissa vähemmän. Vaikka kylmä SBR-massa on usein parempi kuumaan verrattuna, voi kuuma SBR-massa silti olla parempi vaihtoehto sekä prosessoinnin että tuotteen ominaisuuksien kannalta. Kuuma SBR-massa hajoaa nopeammin haluttuun molekyyliin sekoittimessa, sekä se kehittää vähemmän lämpöä. Vulkanoituakseen SBR tarvitsee vähemmän rikkiä kuin luonnokumi. Toisaalta SBR vaatii vulkanoituakseen enemmän kiihdyttäviä matalamman tyydyttymättömyyden vuoksi. Ilman lujitteita, kuten hiilimusta tai silika, on SBR:n fysikaaliset ominaisuudet paljon alhaisemmat luonnonkumiin verrattuna. (Morton 1995, 232.)

3.3 Kloropreenikumi, CR

Vuonna 1931 käytiin Akron Rubber Groupissa historialliset neuvottelut, joissa kemistit keskustelivat Duprene polykloropreeni polymeerin kehittämisen eri näkökannoista. Hieman myöhemmin tämä 2-kloori-1,3-butadieeni syntetttinen kumi nimettiin neopreeniksi. (Morton 1995, 339.)

Alun perin kloropreeni oli tarkoitettu luonnonkumin korvaajaksi sen hyvän kemiallisen kestävyuden vuoksi. Oikeanlaisella kompaundoinnilla kloropreeni on UV-valon ja otsonin kestävä sekä sään vaikutuksesta aiheutuvan vanhenemisen kestävä. Silti se pysyy jäykkänä ja kestävä. Se on käytännöllinen materiaali kylmissä, aina -25 °C:seen asti, ja kuumissa, aina 93 °C:seen asti, olosuhteissa. (Morton 1995, 344.)

Kloropreenisekoitteet tulisi sekoittaa mahdollisimman nopeasti ja mahdollisimman pienillä lämmöillä. Tämä minimoi esivulkanoitumisen vaaran, varsinkin tietyn tyyppisillä kloropreenisekoitteilla, sekä liikamastisoinnista johtuvan massan pehmenemisen ja tahmenemisen. (Morton 1995, 349.) Useimmat kloropreenisekoitteet voidaan ekstrudoida parhaiten, kun käytetään viileää ruuvia ja sylinteriä, lämmintä puristinpäättä sekä kuumaa suulaketta (Morton 1995, 350).

3.4 Eteeni-propeenikumi, EPM tai EPDM

On olemassa kahden tyyppistä eteeni-propeenikumia, EPM ja EPDM. Nimitys EPM viittaa yksinkertaiseen eteenin ja propeenin kopolymeeriin (E viittaa eteeniin, P propeeniin ja M polymetyyleeniin). EPDM:ssä D viittaa dieeniin. (Morton 1995, 260.)

EPM:n tyydyttyneisyyden takia ei normaalia rikkivulkanoimisainetta voida käyttää vulkanoimiseen. Sen sijaan käytetään peroksidivulkanointia. Koska kyseinen vulkanoimis menetelmä on kallis, pahanhajuinen sekä sitä on hankala käsitellä, kehitettiin EPDM polymeerit, jotka ovat tänä päivänä laajassa käytössä. (Morton 1995, 262.)

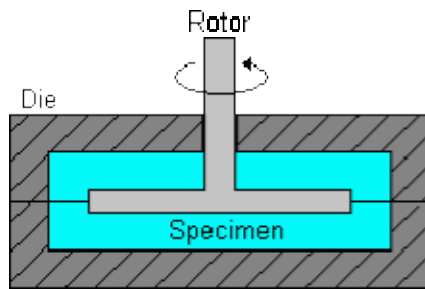
Laajan moolimassan polymeereillä on erinomainen kyky valssautua ja kalanteroitua, sekä niillä on korkeampi raakalujuus. Nämä polymeerit ovat laajasti käytettyjä sovelluksissa, joissa ei sallita täyteaineiden ja öljyjen lisäämistä. Niiden haittoina ovat sekä hitaampi että riittämättömämpi vulkanoituminen. Kapea moolimassajakuma on tyyppillisempää EPDM:lle, koska niiden ansiosta saadaan aikaiseksi nopeampi ja täydellisempi vulkanoituminen sekä tasaisempaa laatua ekstruusiossa. (Morton 1995, 264.)

Ekstruusiossa korkean eteenipitoisuuden EPDM on käyttökelpoisin, koska niillä on hyvä raakalujuus ja edelleen kyky säilyttää muoto. Lisäksi, ekstruuderin riittävän syötön takaamiseksi on tietty raakalujuus välttämätön. Itse asiassa, raakalujuuden puute vulkanoimattomassa sekoitteessa mielletään yleensä huonoihin materiaalisyötön tunnusmerkkeihin. Jos materiaalin syöttö ekstruuderille on heikkoa ja epä-

säännöllistä, johtaa se ekstrudaatin mittavaihteluihin. (Morton 1995, 270.) Yleissääntönä voidaan todeta, että ekstruuderin lämpötilat ovat hieman korkeammat työstettäessä EPDM-kumeja kuin muita kumilaatuja (Morton 1995, 271).

3.5 Kumin viskositeetin määrittäminen

Melvin Mooneyn kehittämästä viskometristä on tullut kumiteollisuuden standardi kumin viskositeetin määrittämisessä. Kyseisessä laitteessa litteä pyöreä kiekko pyörii ontelossa, joka on täytetty kumilla. Vääntömomentti, jolla kiekko pyörii nopeudella 2 rpm määritetyssä lämpötilassa (yleensä 100 °C), on Mooney-viskositeetti. Mooney-vääntömomentti olisi oikeampi termi, mutta viskositeetti termin virheellinen käyttö on kuitenkin standardisoitu. (Morton 1995, 109.) Kuviosta 1 nähdään Mooney-viskositeetin mittauksen periaate.



Kuvio 1. Periaatekuva Mooney-viskositeetin mittauksesta (Ides).

Viskositeettia mitattaessa asetetaan näytteet onteloon roottorin molemmille puolille, minkä jälkeen ylempi muottipuolisko lasketaan kiinni alempaan. Muottipuoliskot lämmitetään sähköisesti. Momentianturi mittaa momenttia, jolla roottori saadaan pyörimään nopeudella 2 rpm. Kuminäytettä saa lämmittää 1 minuutin ajan, sen jälkeen kun muottipuoliskot ovat suljettu. Minuutin jälkeen moottori kytketään päälle ja vaadittu momentti merkataan muistiin ennalta määritetyn ajan jälkeen. (Morton 1995, 109.)

Tyypillisen testin tulos ilmaistaan seuraavassa muodossa:

50-ML 1 + 4 (100 °C),

jossa 50-M on Mooney-viskositeettiarvo ja L viittaa testissä käytettyyn isoon roottoriin. 1 on näytteen esilämmitys aika minuutteina, 4 on aika minuutteina, kun vääntömomentin lukema on kirjattu moottorin käynnistyksen jälkeen. 100 °C on testissä käytetty lämpötila. Testeissä käytetään kahta standardoitua roottoria, joista suurempaa (L) käytetään yleisesti ja pienempää (S) käytetään hyvin jäykille kumeille. (Morton 1995, 110.) Mitä alhaisempi on Mooney-viskositeettiarvo, sitä juoksevampaa kyseinen materiaali on.

3.6 Kumin sekoittaminen

Elastomeerit käyvät läpi monta prosessointivaihetta ennen kuin päätyvät raaka-aste elastomeeristä valmiiseen tuotteeseen. Ensimmäinen vaihe on sekoittaminen, jossa raakan elastomeerin sekaan sekoitetaan ennalta määrätty määrä tiettyjä ainesosia. (Bhowmick ym. 1994, 103.)

Sekä tehdas- että laboratorio-olosuhteissa kaksi yleisintä raaka-elastomeerin ja lisäaineiden sekoitukseen käytettyä konetta ovat sekoitusvalssi ja sisäsekoitin (Morton 1995, 23). Sekoitusvalssissa kaksi telaa pyörii vastakkain hieman eri pyörimisnopeuksilla, jotta sekoittuvaan raaka-aineeseen saadaan aikaiseksi kitkavaikutus. Sisäsekoittimessa puolestaan roottorit pyörivät kammiossa vastakkaisiin suuntiin. Sekoitettavat ainesosat syötetään koneen sivusta, ja mäntä painaa ne roottoreille.

Eri ainesosilla voidaan ohjata muun muassa valmiin vulkanaatin mekaanisia ominaisuuksia tai niillä voidaan säätää vulkanoitumisaikoja. Sekoitereseptien komponentit jaetaan yhdeksään pääryhmään, jotka ovat elastomeerit, prosessin apuaineet, vulkanoinnin lisäaineet, kiihdyttimet, kiihdytinkatalyytit, hajoamisenestoaineet, täyteaineet, pehmittimet sekä sekalaiset ainesosat. (Morton 1995, 22.)

Jos elastomeerin molekyylipaino on suuri, voidaan se mastisoida ja näin helpottaa sen jatkojalostusta. Mastisoinnissa katkotaan pitkät polymeeriketjut lyhyemmiksi tuomalla sekoitusprosessiin happea, joka sitoutuu katkenneiden ketjujen reaktiivisiin päihin estäen ketjujen uudelleenliittymisen.

4 KUMIEKSTRUUSION TOIMINTAPERIAATE JA JAOTTELU

4.1 Kumiekstrudereiden jako

Ekstruusiossa eli suulakepuristuksessa massa puristetaan suulakkeen läpi jatkuvana prosessina halutun muotoiseksi profiiliksi. Yleisimpiä tuotteita, joita ekstruusio- menetelmällä voidaan valmistaa, ovat putket, kalvot, letkut, levyt, tangot sekä kaapelien, kankaan, paperin ja kartongin päällystys.

Ekstruusiolla voidaan työstää niin muoveja kuin kumejakin. Kumiekstruusiolla valmistettavia tuotteita ovat esimerkiksi tiivisteet, nauhat ja kaapelin päällysteet. Jos verrataan kumin ja muovin työstöä ekstruusiolla, on otettava huomioon materiaalien eroavaisuudet ominaisuuksissa.

Kumien työstö tapahtuu huomattavasti alhaisimmilla lämpötiloilla kuin muovien. Kumien prosessointilämpötilat ovat noin 100 °C, kun muoveilla prosessilämpötilat nousevat huomattavasti korkeammiksi. Työstettäessä kumeja liian suurilla lämpötiloilla riskinä on kumin vulkanoituminen.

Kumiekstruusio voidaan jakaa karkeasti kuuma- ja kylmäekstruusioon, joissa materiaali syötetään ekstruderille joko esilämmitettynä tai kylmänä. Kuumasyöttökstruusioon verrattuna kylmäsyöttökstruusiossa ei esilämmitetä massaa, minkä vuoksi ruuvit ovat pidempiä, jotta massa saadaan lämmitettyä sylinterissä. Kuumasyöttökstruusiossa ruuvien L/D- suhteet ovat tavallisesti 3...6, kun kylmäsyötössä ne ovat huomattavasti pidempiä. (Vuori 2006, 24.)

Jako voidaan tehdä myös mäntä-, hammaspyörä- tai ruuvitoimisiin sekä ruuvien lukumäärän mukaan yksi- tai moniruuvisiin ekstrudereihin. Tässä työssä keskityttiin yksiruuviseen kylmäsyöttökstruusioon.

4.2 Kylmäsyöttökstruusio

Alun perin kylmäsyöttökstrudereita sovellettiin kaapeliteollisuudessa, jossa kylmäsyöttötekniikka oli hyvä vaihtoehto kolmen perusseikan vuoksi. Helpommin

pehmenevien johto- ja kaapelikumiseosten reologiset ominaisuudet olivat sopivat. Suhteellisen rajoittavat johdonpäälystämisen puristinpäät aiheuttivat korkeita paineita puristinpäässä ja edelleen kumiseoksen pehmenemistä ekstruuderissa. Tuotantolinjojen höyryvulkanointiputki oli rajoittava tekijä, ja tämän takia alhainen tuottavuus oli hyväksyttävää ensimmäisillä kylmäsyöttökstruudereilla. (Crowther 1998, 11.)

Ensimmäiset kylmäsyöttökstruuderit olivat käytännössä muunneltuja kuumasyöttökstruudereita eivätkä siksi pystyneet käsittelemään laajaa valikoimaa kumiseoksia. Tämän kylmäsyöttötekniikan alkukehityksen puutteen takia alun ponnistelut olivat tuhoontuomittuja. (Crowther 1998, 11.)

Riittävän laadukkaan ekstrudaatin aikaansaamiseksi kylmäsyöttökstruuderin täytyy muuntaa massan lämpötila ympäristön lämpötilasta vaadittuun lämpötilaan, hajottaa mahdolliset täyteaine-polymeerivuorovaikutusrakenteet sekä jäähdyttää mahdolliset liialliset kuumuudet massasta. (Crowther 1998, 11.)

Laadukkaan ekstrudaatin aikaansaamiseksi oli välttämätöntä varustaa ekstruuderit suuremmilla syöttötehoilla, riittävämmillä ja tarkemmin säädeltävissä olevilla jäähdytys-/lämmitysväliaineilla. Jotta tämäntyyppisestä ekstruuderista saatiin äärimmäisen tehokkuus irti, piti ekstruuderin suunnittelussa huomioida myös seoksen palamattomuusvarmuus sen viipyessä sylinterissä ja suulakkeessa. (Crowther 1998, 11.)

Alun perin luultiin, että tasaiset olosuhteet massassa ennen suulaketta saataisiin kasvattamalla L/D-suhdetta lähtien suhteesta 4:1 aina suhteeseen 12:1 saakka. Itse asiassa, nämä pidennetyt sylinteripituudet eivät olleet riittäviä, vaan myöhemmissä koneissa suhteet on kasvatettu jopa suhteeseen 20:1. (Crowther 1998, 11.)

5 TEORIAA KUMIEKSTRUUSIESTA

5.1 Puristussuhde

Kumiseoksen puristaminen tapahtuu, sen kulkiessa sylinterissä eteenpäin, joko pienentämällä ruuvien kierteen nousua ja säilyttämällä vakio tyvihalkaisija tai vaihtoehtoisesti suurentamalla tyvihalkaisijaa ja säilyttämällä vakio kierteen nousu. Ruuvien viimeinen osa ennen suulakkeelle tuloa tulisi säilyttää kierteen nousun ja tyvihalkaisijan suhteen vakiona, jotta massa saadaan stabiilina suulakkeelle. Tällöin massan reologiset ominaisuudet ja lämpötila pysyvät tasaisempina, kun massa puristetaan suulakkeen läpi. (Crowther 1998, 3.)

Puristussuhde on ruuvien yksi keskeinen parametri, jossa verrataan ruuvien alku- ja loppupään välistä kierretilavuuden suhdetta. Tavanomaisten ruuvien puristussuhteet vaihtelevat suhteiden 1.5:1 ja 2.5:1 välillä. (Bhowmick ym. 1994, 286.)

Yleinen käytäntö on käyttää syöttövyöhykkeellä kaksiharjaista kierrettä. Kaksiharjaisen etu yksiharjaiseen ruuviin verrattuna on siinä, että syöttörullien kanssa pyöriessä kaksiharjaiselle ruuville nauhamaisen kumin syöttö on tehokkaampaa. Syöttövyöhykkeen jälkeen ruuvi voi jatkua joko yksi- tai kaksiharjaisena. (Crowther 1998, 3.)

5.2 Ruuvien toiminta

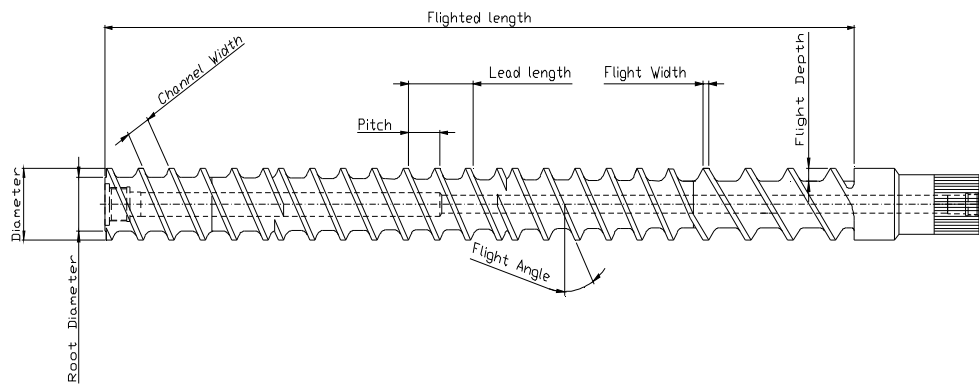
Ruuvien ensisijainen tarkoitus on kuljettaa materiaalia sylinteriä pitkin. Sylinterin tehtävänä on kohdistaa pitoa kumiin ja estää kumia pyörimästä samassa tahdissa kuin ruuvi. Ekstruderin tuottoa minuuttia kohden voidaan arvioida seuraavalla kaavalla:

$$\text{output} = A \cdot L/2 \cdot R \cdot d,$$

jossa A on poikkileikkausala, L kierteen nousun pituus, R kierrokset minuutissa ja d kumin tiheys. (Bhowmick ym. 1994, 281.)

Yllä oleva ekstruuderin tuottoa kuvaava kaava osoittaa, että ekstruuderin halkaisijalla on suurin merkitys tuottoon. Jos geometria pysyy vakiona, kierteen nousun pituus ja uran syvyys kasvavat suhteessa halkaisijaan, joten tuotto yhtä kierrosta kohden on suhteessa halkaisijan kuutioon. Koska ruuvin maksimikierronopeus on suhteessa harjojen pintanopeuteen, on maksimikierronopeus kääntäen verrannollinen suhteessa halkaisijaan. Näin ollen ekstruuderien nimelliset tuotot ovat suhteessa halkaisijoiden neliöön. (Bhowmick ym. 1994, 281.)

Kuviossa 2 on tyypillinen ruuvi nauhamaiselle kumille. Granulaattikumille tarkoitettussa ruuvissa kierteen nousu syöttövyöhykkeellä on pienempi verrattuna nauhamaiselle kumille tarkoitettuun ruuviin.



Kuvio 2. Nauhamaiselle kumille tarkoitettu ruuvi (Maillefer Extrusion Oy 2008).

5.3 Ruuvien terminologiaa

Kuviossa 2 on esitelty ruuvien perusparametrejä. L/D -suhteella tarkoitetaan pituus/halkaisija-suhdetta, jossa ruuvien vaikuttava pituus (flighted length) jaetaan halkaisijalla (diameter). Ruuvien nousu (lead length) on horisontaalinen matka, jonka ruuvien kierre etenee yhdellä ruuvien kierroksella. Kierteen nousulla (pitch) tarkoitetaan kahden vierekkäisen harjan välistä aksiaalista etäisyyttä. Yksiharjaisissa ruuveissa ruuvien nousun pituus (lead) ja kierteen nousu (pitch) ovat yhtä suuret, mutta kaksiharjaisissa ruuveissa kierteen nousu on puolet ruuvien noususta. (Bhowmick ym. 1994, 286.)

L/D -suhde on keskeinen tekijä valittaessa oikeanlaisia ekstruuderia täyttämään prosessin vaatimukset. Ennen valmistajien määrittämistä tavallisille kylmäsyöttöekst-

ruudereille L/D-suhteita välillä 14:1 ja 17:1, mutta tänä päivänä on jo käytössä ruuveja, joiden suhteet ovat välillä 10:1 ja 12:1. (Bhowmick ym. 1994, 291.)

5.4 Ruuvin ja sylinterin lämpötilan vaikutukset

Ekstruuderin tuotto on riippuvainen kumin suhteellisesta tartunnasta ruuvin ja sylinterin välissä - mitä parempi tartunta, sitä korkeampi tuotto. Kitka vaikuttaa tartuntaan syöttövyöhykkeellä, kunnes kumin lämpötila saavuttaa 60...70 °C. Kumin saavutettua kyseisen lämpötilan se voi alkaa virrata metallipintoja vasten täydellä kontaktilla. Kumin viskositeetti putoaa nopeasti, kunnes se saavuttaa lämpötilan 100...110 °C. Tuoton maksimoimiseksi tarvitaan kuumasyöttötaskua tartunnan parantamiseksi. Yleissääntönä voidaan todeta, että ruuvin lämpötila pidetään korkeana ja sylinterin lämpötila alhaisena. (Bhowmick ym. 1994, 283.)

Tuoton tehostamiseksi täytyy polymeerin virtausta ja sekoitusta edistää sen edessä ruuvia pitkin. Jos kumi esivulkanoituu ekstruuderissa, saattaa normaali reaktio olla ekstruuderin jäädyttäminen. Tämä saattaa kuulostaa loogiselta, mutta on itse asiassa juuri päinvastainen toimenpide, mitä tulisi tehdä. Jäähdytys, esivulkanoitumisen estämismenetelmänä, vaikuttaa kumin viskositeettiin nostaen sitä huomattavasti. Tämä puolestaan vaatii suurempaa vääntömomenttia ruuville, mikä puolestaan muuntuu kitkalämmöksi. Lisäksi polymeerin eteneminen hidastuu nostaen sen viipymäaika ja siten se altistuu myös lämmölle. Ruuvin jäähdytys voi nostaa kumin lämpötilaa jopa 10...15 °C. Esivulkanoituminen (scorching) voi siis olla tulos liiallisesta jäädyttämisestä ja ongelma voidaan ratkaista ruuvin oikeanlaisella lämmön-säädöllä. (Bhowmick ym. 1994, 286.)

Suurilla ekstruuderin paineilla työskenneltäessä ruuvin uran syvyyden kasvattamisen rajoittava tekijä on vastapaine. Vastapaineesta tai materiaalin takaisinvirtauksesta tulee merkittävä tekijä siten, että todellinen tuoton kasvu on vähemmän verrannollinen ruuvin uran syvyyden kasvuun. Vaikka syvemmillä uralla on mahdollista saada kylmempää materiaalia, vaikuttaa korkea takaisinvirtaus materiaaliin altistamalla sitä lämmölle pidemmän ajan. Tuotettu lämpö on myös vaikeammin kontrolloitavissa ja poistettavissa syväuraisesta ruuvista. Siksi olosuhteissa, joissa vas-

tapaineet ovat suuria, syvillä urasyvyyksillä saavutetaan vain vähäisiä hyötyjä tuoton kapasiteetissa tai materiaalin lämpötilaominaisuuksissa. (Crowther 1998, 10.)

Pienemmän paineen sovelluksilla vastapaine ja takaisinvirtaus eivät ole niin merkittäviä kuin suuremman paineen sovelluksilla. Sen sijaan, ruuvin uran syvyyttä rajoittavat tekijä ovat materiaalin homogeenisuus ja stabiilisuus. Toinen asia, mikä pitää ottaa huomioon, on syöttövyöhykkeen uransyvyys, jota rajoittaa ruuvin lujuusominaisuudet. Usein juuri lujuusominaisuudet rajoittavat uransyvyttä enemmän kuin prosessiominaisuudet. (Crowther 1998, 10.)

Mitä enemmän ruuvin täytyy kehittää painetta kumisekoituksen prosessoimiseksi, sitä huonommaksi tilanne muodostuu mitä tulee lämmön tuottamiseen. Tuotto vähenee määrättyllä ruuvin pyörimisnopeudella ja materiaali viipyy sylinterissä pidempään, jossa se lämpenee edelleen siten, että ekstrudaatin lämpötilaraja saavutetaan pienemmällä ruuvin pyörimisnopeudella ja pienemmällä tuotolla. (Crowther 1998, 10.)

Mekaanisesta leikkauksesta johtuva lämpö ei muodostu tasaisesti läpi kumisekoitteen, joten, kun ruuvin kierrosnopeutta nostetaan, viipymäajan väheneminen tarkoittaa myös sitä, että lämmönjohtuminen ei ole niin tehokasta lämmön homogeenisuuden saavuttamisessa. Materiaalin virtaus tavallisen ruuvin kanavissa palvelee lämmön sekoittumista ja uudelleenjakoa tiettyyn asteeseen saakka, mutta on tehokkaampaa matalissa ruuveissa kuin syvissä. Näin ollen, jos ruuvin urasyvyyttä lisätään leikkausnopeuden alentamiseksi ja tuoton kasvattamiseksi, kumisekoitteen tuotto kasvaa tietylle lämpötilalle saakka, mutta sekoittuminen ja lämmön homogeenisuus vähenevät. (Crowther 1998, 10.)

5.5 Lämpötilan säätö

Koko ekstruusioprosessin kannattavuuden voi vaarantaa jättämällä huomiotta lämpötilan säädön keskeinen vaikutus ekstruusioon. Oikeanlainen lämpötilan säätö ja ruuvin suunnittelu ovat vaatimukset kannattavalle ekstruusiolle. (Bhowmick ym. 1994, 306.)

Koneen kokonaisteho on suoraan suhteessa käyttömoottorin energiatarpeeseen, joka voidaan pääpiirteissään jakaa seuraavasti:

- Energia, jolla voidaan suoriutua koko ekstruusioyksikön mekaanisen kitkan vaikutuksista.
- Energia, jolla materiaali kuljetetaan sylinterin syöttöaukosta poistumakohtaan saakka.
- Energia, jolla polymeerin lämpötila nostetaan tehokkaasti huoneenlämpötilasta. Tämä lämpötilan nousu on 100...120 °C. Kun ekstruusioprosessi on meneillään ja asetetut prosessiolosuhteet on saavutettu, palautuu lämpötilan säätö lämmittämisestä jäähdyttämiseen. Tästä eteenpäin lämpötilan säätö keskittyy yksinomaan jäähdytyksen määrään. Yleissääntönä voidaan todeta, että prosessinohjaimen tulisi operoida jäähdytystilassa 70 % ajasta, 25 % ajasta neutraalissa tilassa ja vain 5 % ajasta käytetään lämmittämiseen. (Bhowmick ym. 1994, 306.)

5.6 Syöttörulla

Jotta ekstruuderin tuotto saadaan pysymään vakiona, pitää sylinterille syöttää tasaisesti kuminauhaa. Tähän tarkoitukseen on kehitetty sylinterin muotoinen, ekstruuderin syöttöaukon vieressä oleva, syöttörulla. Syöttörulla pyörii vastakaiseen suuntaan ruuviin nähden ja syöttää ruuville kuminauhaa pitäen ruuvin täynnä. Koeajoissa käytetty syöttörulla on kuviossa 3.

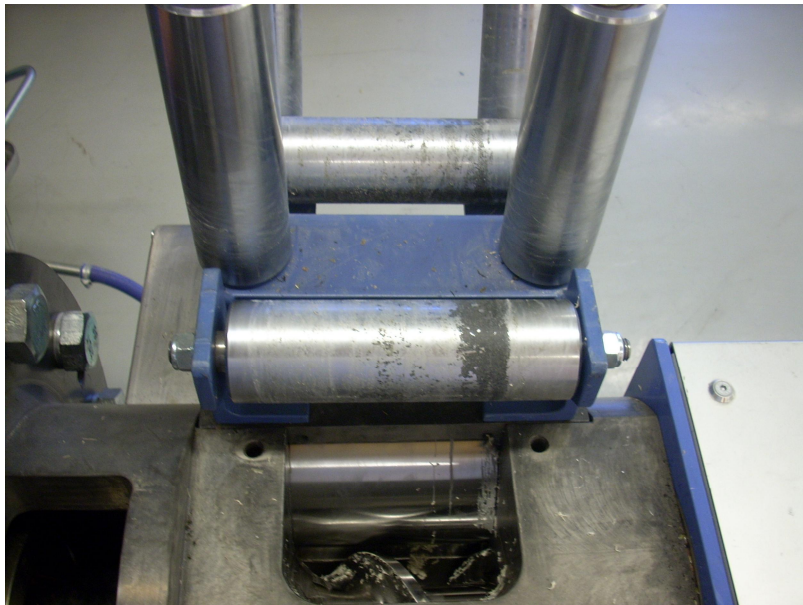
Ensimmäisten kylmäsyöttöekstruudereiden syöttöominaisuudet olivat huonot, mikä johti syöttöyksiköiden kehitykseen. Ensimmäiset kylmäsyöttökoneet olivat tuotoltaan huomattavasti huonompia kuin kuumasyöttöekstruuderit. (Crowther 1998, 11.)

Profiilin valmistukseen tarkoitettujen ekstruudereiden ainut laite, jolla voidaan taata riittävä nauhan syöttö, on syöttörulla. Syöttörullat ovat joko riippumattomia tai riippuvaisia ruuvin pyörimisnopeudesta. Ruuvin pyörimisnopeudesta riippumattoman ja pyörimisnopeuden säädöllä varustetun syöttörullan on sanottu säilyttävän

tasainen syöttö sylinterin syöttöaukolla. Jos kyseiset ajo-olosuhteet pystytään pitämään oikein ja muutumattomina, pysyy paine vakiona koko ruuvin matkalla. (Crowther 1998, 11.)

Kumi voidaan syöttää ruuville myös granulaattimuodossa suppilosta. Oli kumi sitten nauha- tai granulaattimuodossa, tulee sen syöttöä valvoa tarkasti, jotta vältetään ruuvin yli- tai alisyötöltä. (Crowther 1998, 11.)

Ylisyötöllä tarkoitetaan tilannetta, jossa kuminauhaa kertyy liikaa syöttöaukolla tukkien nauhan pääsyn ruuville. Nauhan syöttö on optimaalinen, kun syöttöaukon etupäähän muodostuu tennispallon kokoinen massakeskittymä.



Kuvio 3. Syöttörulla ekstruuderin asennettuna.

6 SULAPUMPUN INTEGROINTI EKSTRUUDERIIN

6.1 Sulapumpun edut

Sulapumpun edut on tunnettu jo kauan muoviteollisuudessa, jossa niistä on hyviä kokemuksia. Erityisesti sulapumppujen suosio ekstruudereiden yhteydessä perus-

tuu niiden tehokkuuteen muodostaa painetta sekä vakiotuottoon. Näiden tekijöiden ansiosta ekstrudaatin mittatarkkuus on hyvä. (Skibba & Thoma, 2.)

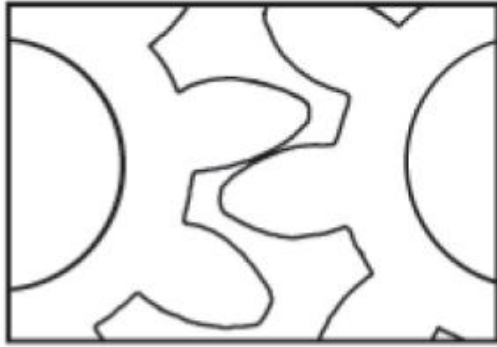
Vasta viime vuosina sulapumppujen käyttö on yleistynyt myös kumiteollisuudessa. Alun ongelmat pumpun käyttöönotossa kumiekstruusiossa johtuivat lähinnä hammaspyöräpumpun vaurioitumisalttiudesta ja kumiseosten korkeista viskositeeteista. Monet sovellukset vaativat siivilöinnin ennen sulapumppua, jotta epäpuhtaudet eivät pääsisi pumpulle ja vahingoittaisi sen roottoreita. (Skibba & Thoma, 2.)

Muoviteollisuudessa käytettävien sulapumppujen voitelu suoritetaan sulan muovin avulla, joka on riittävä siihen tarkoitukseen. Kumiteollisuuden sovelluksissa sulapumpun voitelu ei onnistu kumiseoksen avulla sen kitkan ja viskoottisuuden vuoksi. (Crowther 1998, 19.) Valutustesteissä käytetyn Maag-sulapumpun voitelu suoritettiin kumiseoksen avulla.

6.2 Sulapumpun toimintaperiaate

Sulapumpussa on kaksi pyörivää hammaspyörää, joista toinen eli käytävä pyörä on kytketty käyttömoottorin akselille ja toinen eli käytetty on vapaasti pyörivä. Käytetty hammaspyörä pyörii vastakkaiseen suuntaan käyttävään verrattuna. Imuvaikutus saadaan aikaiseksi, kun hammaslovién tilavuus ryntökohdan jälkeen kasvaa hammaspyörien pyöriessä. Kun hammaslovet ovat täyttyneet materiaalista, materiaali siirtyy hammaslovissa imukammion painekammioon kehää pitkin. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2003, 100.)

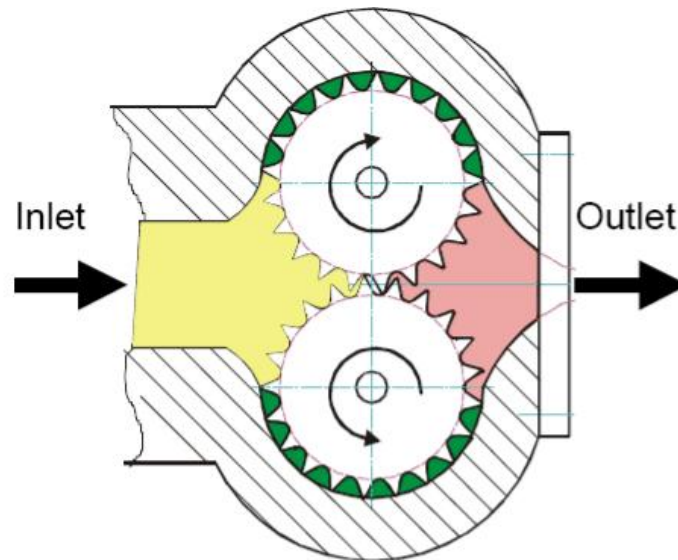
Materiaalin vuotaminen hampaiden yli takaisin imukammioon estetään järjestämällä hampaiden kärjen ja pumppukehän seinämän välilyönti pieneksi. Hammaslovién tilavuus pienenee hampaiden lähestyessä ryntökohtaa, ja hampaiden kosketus toisiinsa ryntökohdassa estää materiaalin takaisinvuotamisen imukammion puolelle. (Kauranne ym. 2003, 100.) Ryntökohta on kuvattuna kuviossa 4.



Kuvio 4. Ulkoryntöisen hammaspyöräpumpun ryntökohta. Ryntökohta toimii tiivisteinä eikä päästä materiaalia valumaan takaisin imupuolelle (Fluid Finland).

Pumpun tuottama tilavuusvirta ei ole täysin tasainen, koska hampaiden tiivistyskohta vaihtelee pitkin ryntöviivaa. Tilavuusvirta on tasaisempaa suuremmilla hammasstiheyksillä. Tilavuusvirtavaihtelua voidaan pienentää käyttämällä vinoja hampaita tai nuolimaisia hampaita. Käytettäessä vinoja hampaita tulee huomioida aksiaaliset voimat laakeroinnissa, nuolimaisilla hampailla vältetään aksiaalivoima, mutta rakenne on kalliimpi. (Kauranne ym. 2003, 101.)

Sulapumpun tuottama materiaalivirta riippuu valitusta roottorin pyörimisnopeudesta sekä materiaalin syrjäytymismäärästä kierrosta kohden. Materiaali siirtyy roottoreiden hammastuksen avulla pumpun ulostulolle. Pehmennetyn homogeenisen materiaalin vakio syöttö hammaspyörän hampaiden pesiin on tärkeää, jotta voidaan taata tuoton tasaisuus ja mittatarkkuus. Täydellisellä pesien täytöllä voidaan vähentää painevaihteluita merkittävästi. (Skibba & Thoma, 6.) Sulapumpun toiminta on havainnollistettu kuviossa 5, jossa materiaali kulkee ruuvilta tulopuolelle, siirtyy hammaspyörien pesissä poistopuolelle ja edelleen puristinpäähän.



Kuvio 5. Sulapumpun toiminta (Skibba & Thoma).

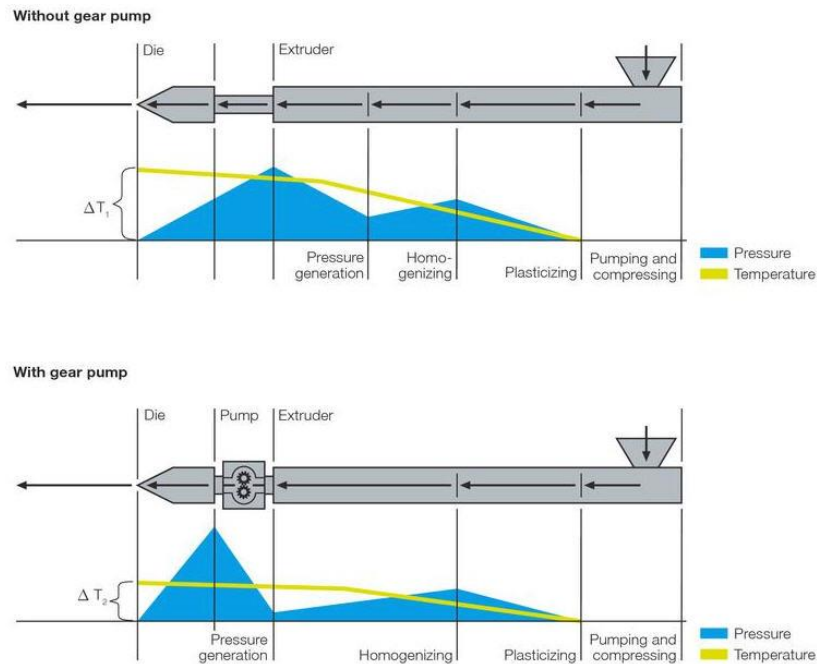
Ekstruuderia ja sulapumppua on myös mahdollista käyttää erikseen. Tällaisessa tapauksessa ekstruuderin toimii sulapumpun oheiskoneena. Pumpun valittu sisäänmenopaine säätelee ruuvien pyörimisnopeutta PID-säädön avulla, joka ohjaa säätösilmukkaa. Kun järjestelmän tuottoa vaihdetaan säätämällä sulapumpun roottoreiden kierrosnopeutta, säädetään ruuvien kierrosnopeutta automaattisesti syöttämään asetettu sisäänmenopaine ja vastaava materiaalivirtaus pumpulle. Sulapumppu on siten riippumaton ekstruuderista ja systeemi voidaan optimoida useille eri puristinpääpaineläpän tarpeille. (Skibba & Thoma, 6.)

Vaadittu pumpun sisäänmenopaine vaihtelee, jos ajetaan ilman rakolevyä, 10...30 baarin välillä mahdollisimman hyvän hammaspyörien pesien täyttämiseksi. Tämä on suhteellisen pieni vastapaine, jota vastaan ekstruuderin täytyy tehdä työtä, kun normaalisti yksiruuviekstruuderin vastapaineet vaihtelevat 50...200 bar:in välillä. Ekstruuderin ei siten tarvitse suoriutua niin suurista paineista ja se on kykenevämpi sekoittamaan ja homogeenisoimaan materiaali paremmin. (Skibba & Thoma, 7.)

6.3 Ekstruusio sulapumpun avulla

Yksi ekstruusion päätarkoituksista on pehmentää kumiseos tehokkaasti, jotta saadaan mittarkka ja pinnanlaadultaan tasainen ekstrudaatti. Lisäksi hyvään lopputulokseen pitäisi päästä mahdollisimman suurella tuotolla materiaalin lämpötilan py-

syessä alle sen vulkanoitumislämpötilan. Jotta tämä saavutetaan, on ekstruuderin prosessin toiminnoilla äärimmäisen tärkeä merkitys. Nämä toiminnot voidaan jakaa seuraaviin pääalueisiin: materiaalin syöttö ja kuljetus, homogeeninen lämmitys ja pehmentäminen vaadittuun lämpötilaan ja vaaditun paineen luonti materiaaliin sen työstämiseksi suulakkeen läpi. (Skibba & Thoma, 2.) Sulapumpun edut paineen ja lämpötilan muodostumisessa näkyvät kuviossa 6.



Kuvio 6. Paineen ja lämpötilan kehitys sulapumpulla ja ilman (Direct Industry).

Kun käytetään sulapumpua paineen muodostamiseen, tarvitaan vähemmän tehontarvetta ekstruuderille. Ekstruuderin tehtäväksi jää kumiseoksen pehmentäminen sekä riittävän syötön varmistaminen sulapumpulle. Näin ollen ekstruuderit pystyvät prosessoimaan enemmän materiaalia, koska energiaa kuluu vähemmän paineen muodostamiseen. Mekaanisen kulumisen vähenemisen myötä myös ekstruuderin käyttöikä pitenee paineen ja massan lämpötilan alenemisen vuoksi. Kokemukset sulapumpun käytöstä kestävämuovien työstämisessä osoittavat, että ruuvien käyttöikä parhaimmassa tapauksessa jopa tuplaantuu. (Skibba & Thoma, 5; 12)

Yksiruuviekstruudereihin integroitujen sulapumpujen kanssa tehdyt testit osoittavat, että ne ovat vastaavia yhden koon isompien ekstruudereiden tuottojen kanssa.

Toisin sanoen ekstruuderisulapumppu yhdistelmä 120 mm:n ruuvilla on tuotoltaan verrattavissa 150 mm:n ekstruuderiiin ilman sulapumppua. (Skibba & Thoma, 5.)

Sulapumppu myös vähentää painevaihteluita järjestelmässä. Vakiona ja toistettavalla tuotolla voidaan taata vakio puristinpään paine, joka puolestaan johtaa erinomaiseen tasaisuuteen ekstruusiossa. Sulapumpun kammiokuljetuksessa pienet määrät materiaalia syrjäytyy minimaalisella kitkalla, ja kuljetustehokkuus paranee huomattavasti. Tämä johtaa tuntuviin lämpötilan alennuksiin paineenmuodostusvyöhykkeellä. Siten riski materiaalin esivulkanoitumiseen vähenee. (Skibba & Thoma, 5.)

Kumiseokseen siirtyvä hukkaenergian määrä on huomattavasti pienempi sulapumpulla kuin ekstruuderilla. Niinpä yhdenvertaisella vastapaineella lämpötilan nousu paineenmuodostumisvyöhykkeellä on pienempi sulapumpulla ja siten järjestelmää voidaan operoida alhaisemmilla lämpötiloilla. Tämä puolestaan mahdollistaa suuremmat tuotot, koska ekstruuderia voidaan ajaa suuremmilla ruuvien kierrosnopeuksilla ennen lämpötilarajoitusten saavuttamista. (Skibba & Thoma, 5.)

7 KÄYTÄNNÖN KOKEET

Koevalutukset suoritettiin Maillefer Extrusion Oy:n Vantaan toimipisteen laboratorio-tiloissa. Valutuksia tehtiin EPDM-kumilla, josta toisen Mooney-arvo oli 48 ja toisen 30.

7.1 Tavoite

Valutusten tavoitteena oli selvittää, kuinka sulapumpun integrointi ekstruuderiiin vaikuttaa kumin tuottoon sekä sulalämpötilaan. Vaikutuksia tutkittiin ajamalla kah- ta eri materiaalia eri lämpötila- ja kierrosnopeusvariaatioilla.

7.2 Koelaitteisto

7.2.1 Ekstruuderit ja ruuvi

Valutuskokeet suoritettiin Mailleferin laboratorioekstruuderilla NMR 120-12D (kuvio 7), jossa luku 120 kertoo käytetyn ruuvin halkaisijan millimetreissä pituuden ollessa $12 \times 120 \text{ mm} = 1440 \text{ mm}$. NMR tulee sanoista Nokia Maillefer Rubber.

Ekstruuderit on suunniteltu termisesti herkkien polymeerien ja elastomeerien prosessoinnille matalilla lämpötiloilla. Tyypillisiä materiaaleja, joita NMR-ekstruuderilla ajetaan, ovat vaippaus- ja eristyskumit. Materiaalit voidaan syöttää joko granuulaatti- tai nauhamuodossa.

Ekstruuderin sylinteri on valmistettu nitratusta teräksestä, jonka miniminitraussyyvyys on 0,4 mm. Sen kovuus on 1000 HV sekä maksimikäyttöpaine 750 bar.

Ekstruuderissa oli kolme lämmitysvyöhykettä, joita kutakin valvottiin termopareilla. Sylinteriä lämmitettiin resistoreilla, jotka olivat valettujen lämpöelementtien sisällä. Jäähdytysputket oli kiedottu sylinterin ympärille. Käyttömootorina ekstruuderissa oli ABB:n tasavirtamootori, jonka teho oli 100 kW.

Paineistettu ja suljettu jäähdytysvesijärjestelmä koostui jäähdytysputkista sekä proportionaaliventtiileistä. Syöttökotelolle oli oma erillinen jäähdytysvesikierto. Lämmön- ja jäähdytyksensäätö tapahtui PID-säätimen avulla. Ruuvien, sulapumpun ja puristinpään lämpötilaa säädettiin temperointilaitteilla.

Työstettävän materiaalin painetta mitattiin sylinterin päässä olevalla paineanturilla. Lisäksi, sulapumpun ollessa integroituna ekstruuderiin, voitiin painetta mitata sulapumpun tulo- ja poistopuolelta.

Valutuskokeissa käytettiin kahta eri ruuvia: syväurainen ruuvi, jossa harjan korkeus ruuvien päässä oli 18 mm, sekä matalaurainen ruuvi, jossa harjan korkeus oli 16,5 mm. Molempien ruuvien puristussuhteet olivat 1,9:1. Ruuvien geometriat oli suunniteltu.

niteltu vaippus- ja eristyskumeille, jotka ovat nauhamuodossa. Ruuvit on valmistettu nitratusta teräksestä, jonka miniminitraussyvyys on 0,5 mm ja kovuus 800 HV.

7.2.2 Sulapumppu

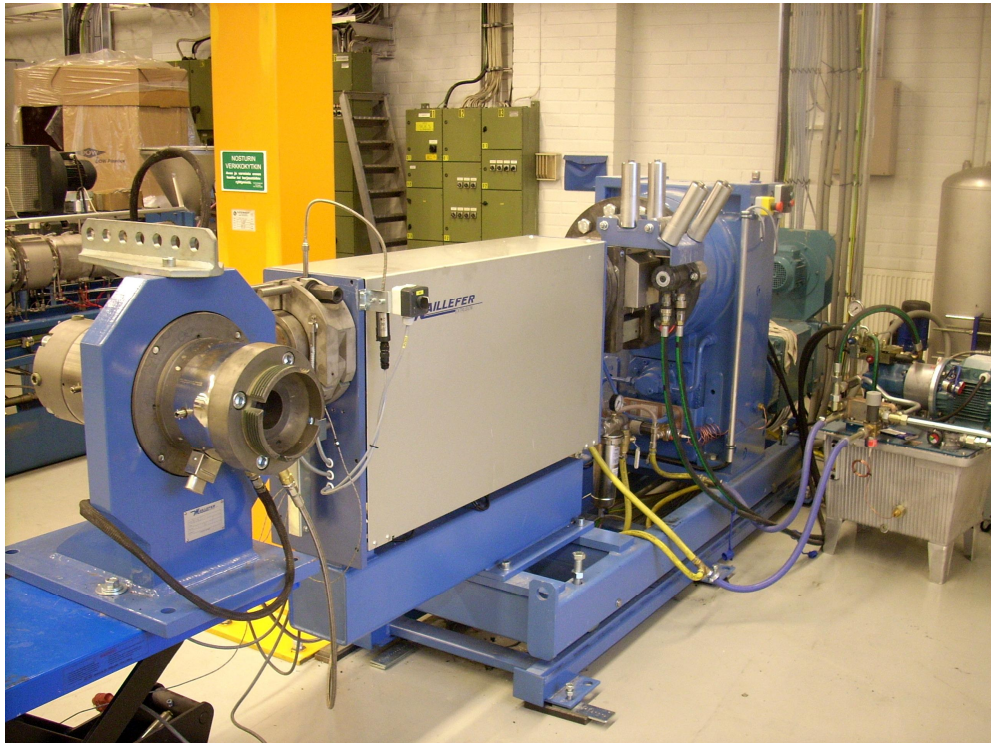
Sulapumppu oli Maag Pump Systemsin valmistama hammaspyöräpumppu extrex[®] 90-5 RB (kuvio 8), jolla voidaan työstää kumimateriaalia, jonka Mooney viskositeetti ML 1+4(100) on suurimmillaan 110. Pumpun jäähdytys toteutettiin vedellä, joka tuotiin temperointilaitteelta hammaspyörien akselille. Pumpun hammaspyöristä ylempi oli kytketty käyttömootorin akselille ja oli niin sanottu käytävä pyörä.

Pumpun tulo- ja poistupuolen paine-ero sai maksimissaan olla 400 bar. Hammaspyörän akselia pyöritti Siemensin vaihtovirtamoottori, jonka teho oli 18,5 kW.

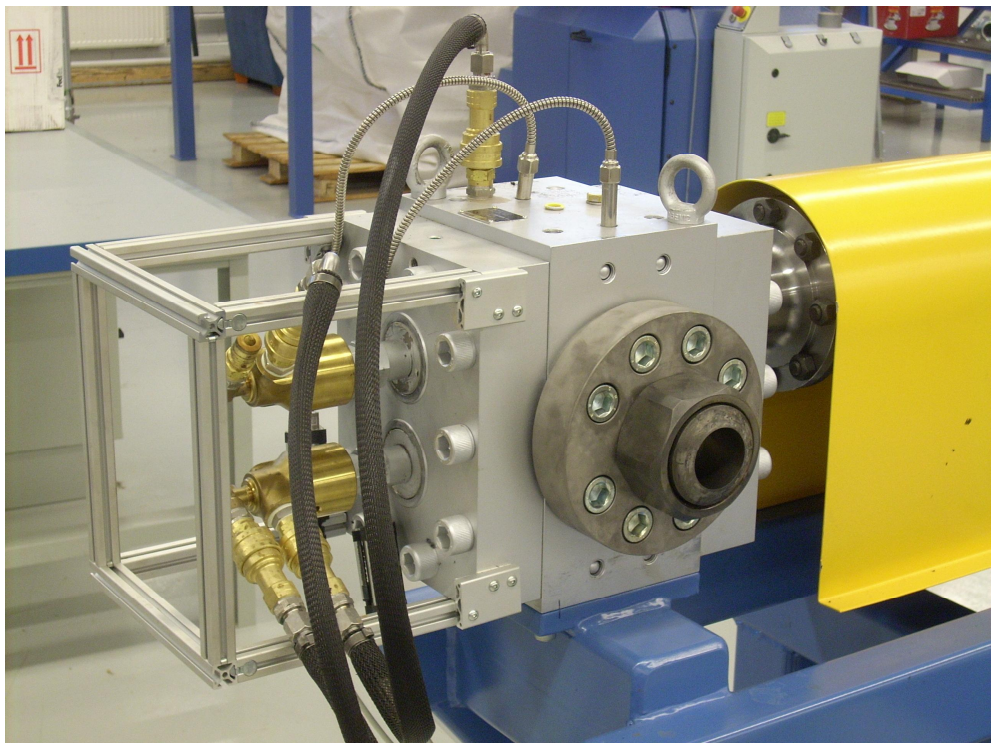
7.2.3 Puristinpää

Testipuristinpäänä käytettiin Mailleferin vakiotestipäätä NHW50. Se oli niin sanottu ristipää, jossa kaapelia valmistettaessa päällystettävä johdin ohjataan ristipään läpi 90° kulmassa ekstruuderiin nähden. Kyseistä puristinpäätä käytetään yksikerrosekstruusiossa LV (low voltage) ja MV (medium voltage) kumikaapeleissa.

Koevalutuksissa ei käytetty sihtipakkaa ja osa valutuksista ajettiin myös ilman rakolevyä. Sihtipakan tarkoituksena on poistaa massasta mahdolliset epäpuhtaudet, mutta kumiekstruusiossa ne eivät ole olleet kovin yleisiä. Rakolevy puolestaan tukee sihtipakkaa, tasoittaa massan pyörteilyä sekä nostaa massan painetta.



Kuvio 7. Ekstruuderit NMR120-12D ja puristinpää NHW50.



Kuvio 8. Sulapumppu extrex® 90-5 RB.

7.3 Kokeiden suoritus

Valutuskokeet suoritettiin valuttamalla EPDM-kumia Mooney-arvoilla 48 ja 30. Materiaalit ajettiin sekä ilman sulapumppua että sulapumpun kanssa. Lisäksi käy-

tettiin kahta erilaista ruuvia. Kokeita ajettiin eri lämpötilavariaatioilla muuttamalla ruuvien ja sylinterin lämpötiloja, mutta myös eri kierrosnopeuksilla.

Kokeet aloitettiin lämmittämällä ruuvia, sylinteriä ja puristinpäätä noin kaksi tuntia ennen koevalutuksen aloittamista. Kun ekstruuderin oli lämmennyt, aloitettiin koevalutukset pyörittämällä ruuvia hyvin hitaasti ja samalla syöttämällä kuminauhaa ruuville. Materiaalin tultua läpi puristinpäädästä ja samalla paineiden noustua voitiin ruuvien pyörimisnopeus nostaa halutulle tasolle.

Ennen näytteenottoa ekstruuderin paineen ja lämpötilan sekä moottorin virransyötön annettiin tasaantua noin 5...10 minuuttia. Tasapainotilaan pyrittiin joka kerta kierrosnopeusmuutoksen jälkeen. Kultakin kierrosnopeudelta otettiin kahdesta kolmeen näytettä 36 sekunnin välein, joka kerrottuna sadalla vastaa tuottoa tunnissa. Näytteet punnittiin ja niistä laskettiin keskiarvo, joka merkittiin valutustestiraporttiin. Tuoton lisäksi raporttiin kirjattiin näytteen lämpötila, paine ruuvien päässä ja moottorin kuormitus.

Sulalämpötila mitattiin työntämällä lämpömittarin mittauspää massaan, kun se tuli ulos puristinpäädästä. Lämpömittari oli Testo AG:n testo 925 k-tyyppin termoelementillä. Mittaustuloksiin vaikutti mittauskohta sekä kitkalämpö, jota syntyi sitä enemmän mitä tiheämpään mittauspäästä työnnettiin massaan.

Sulapumpun ollessa asennettuna ekstruuderiin oli huomioitava muutamia asioita. Vastaavat kierrosnopeudet, jotka asetettiin ekstruuderiin, asetettiin sulapumpulla ajettaessa pumpun nopeudeksi. Tämän jälkeen tuli ruuvien kierrosnopeus asettaa siten, että sulapumpun tulopaine oli 20...30 bar ajettaessa ilman rakolevyä ja rakolevyllä 40...50 bar.

Sulapumpulla ajettaessa merkittiin raporttiin aiemmin mainittujen parametrien lisäksi sulapumpun kierrosnopeus, sulapumpun tulo- ja poistupuolen paine sekä sulapumpun moottorin kuormitus. Osaan liitteistä piirrettiin myös kuvaajat havainnollistamaan tuloksia.

Kuminauhan syöttö ekstruuderille tapahtui käsin ja syöttörullan avulla. Nauhan leveys vaihteli materiaalin mukaan olleen 50...100 mm ja riittävän syötön takaamiseksi riitti 2 - 5 nauhan syöttö samanaikaisesti ekstruuderille. Luotettavimmat mitaustulokset saatiin, kun konetta operoi kaksi henkilöä, joista toinen valvoi nauhan syöttöä ja toinen keskittyi mittausten tekemiseen.

8 TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

8.1 Kumin viskositeetin vaikutus

Kaikki valutustesteistä tehdyt raportit ovat liitteinä työn lopussa. Syvän ja matalan ruuvien tuottoja ja massan lämpötiloja verrattaessa, voidaan liitteiden 4 ja 5 perusteella todeta, ettei 1,5 mm:n erolla ruuvien harjan korkeudessa ole merkittävää vaikutusta tuottoon. Kokeet ajettiin sulapumpun kanssa ja juoksevammalla materiaalilla.

Jäykemmällä materiaalilla ja ilman sulapumppua syväuraisella ruuvilla puolestaan päästään parempaan tuottoon matalauraiseen ruuviin verrattuna. Tulokseen vaikuttaa myös se, että matalauraisen ruuvien kanssa tehty valutustesti ajettiin rakolevyn kanssa, kun syväuraisen ruuvien kanssa tehty testi ajettiin ilman rakolevyä. Tulokset ovat liitteissä 6 ja 10.

Jäykempää ja juoksevampaa materiaalia verrattaessa voidaan liitteiden 2 ja 7 perusteella todeta, että tuotto on suurempi jäykemmällä materiaalilla. Tosin tulosta on vertailtu vain yhdellä kierrosnopeudella eikä ruuvien lämpötilat olleet samat. Kyseiset testit ajettiin ilman sulapumppua.

Sulapumpulla ajettujen kokeiden perusteella voidaan todeta, ettei kumin viskositeetillä ole merkittävää vaikutusta tuottoon. Verrattaessa jäykemmän kumin tuottoa (liitteet 11 ja 12) juoksevamman kumin tuottoon (liite 3) voidaan nähdä, että tuotto ja massan lämpötilat eivät juurikaan eroa toisistaan ruuvien kierrosnopeudella 15 rpm.

8.2 Sulapumpun vaikutukset EPDM-kumin (Mooney 30) ekstruusioon

Alhaisemman viskositeetin kumilla (Mooney 30) voidaan todeta, että sulapumpulla oli huomattava vaikutus tuottoon, parantaen sitä. Kun verrataan samalla lämpötilaprofiililla ajettuja testejä sulapumpulla ja ilman, nähdään taulukosta 1, että sulapumpun ollessa asennettuna tuotto oli 183 kg/h ruuvin kierrosnopeudella 9,8 rpm ja ilman pumppua tuotto oli 108,7 kg/h ruuviin kierrosnopeudella 10 rpm. Tulokset ovat liitteistä 1 ja 3.

Taulukko 1. Tuottojen vertailu sulapumpun ollessa integroituna (ylempi kaavio) ja ilman sulapumppua (alempi kaavio). Mooney 30.

	Output	Spec.outp	Melt temp	Pressure pump in	Pressure pump out	Current pump		Current extruder	Pressure extruder	Remarks
rpm gear pump	[kg/h]	[kg/h/rpm]	T _m [°C]	[bar]	[bar]	[A]	rpm extruder	[A]	[bar]	
5	59.6	11.91	102	20	98	40%	3.2	19%	39	Screw tempering 60 °C
10	122.1	12.21	105	27	144	49%	6.5	27%	51	
15	183.0	← 12.20	106	25	168	53%	9.8 ←	35%	57	

	Output	Spec.outp	Melt temp	Pressure	Current	Remarks
rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	T _m [°C]	[bar]	[A]	rubber temp. 15 °C
10	108.7	← 10.87	97	158	34%	Screw tempering 56 °C
15	167.3	11.15	103	177	36%	Screw tempering 60 °C
10	115	11.50	99	160	31%	Screw tempering 70 °C

Kyseinen tulos on saatu lämpötilaprofiililla 60-70-80-80-95-95-95 °C. Ruuvin temperoinnissa oli neljän asteen ero. Sulapumpun ollessa asennettuna valutus suoritettiin ilman rakolevyä, kun taas ilman sulapumppua rakolevy oli asennettu. Vaikka rakolevy nostaa massan painetta ekstruuderissa ja siten myös lämpötilaa, oli massa yhdeksän astetta viileämpää rakolevyn ollessa asennettuna. On myös huomioitava, että kuminauhan lämpötila oli normaalia alempi (noin 15 °C), kun se normaalisti on noin 20 °C.

Kuten aiemmin on todettu, alentaa sulapumppu huomattavasti ekstruuderissa vallitsevaa massan painetta ja tämä onkin selvästi havaittavissa suoritetuista kokeista.

Kaaviosta nähdään, että ekstruuderin paine sulapumpulla ajettaessa oli vain 57 baaria, kun ilman pumppua ja samoilla kierroksilla ekstruuderin paine oli 158 baaria. Pumpun poistopuolen paine ei kuitenkaan noussut kuin 168 baariin, vaikka tuotto oli yli 70 kg/h enemmän kuin ajettaessa ilman pumppua.

8.3 Sulapumpun vaikutukset EPDM-kumin (Mooney 48) ekstruusioon

Materiaalit EK 1052 ja S769900 ovat Teknikumin samoja EPDM-kumeja eri eränumeroilla. Kyseisellä materiaalilla myös suoritettiin enemmän valutustestejä verrattuna alhaisemman viskositeetin EPDM-kumiin.

Taulukko 2. Tuottojen vertailu sulapumpun ollessa integroituna (ylempi kaavio) ja ilman sulapumppua (alempi kaavio). Mooney 48 ja lämpötilaprofiili 70-80-90-90 °C.

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure pump in	Current pump		Current extruder	Pressure extruder	Remarks
rpm gear pump	[kg/h]	[kg/h/rpm]	T _m [°C]	[bar]	[A]	rpm extruder	[A]	[bar]	
5	57.5	11.49	101	52	51%	3.3	28 %	93	Screw tempering
10	122.3	12.23	106	52	53%	6.6	36 %	105	
15	184.2 ←	12.28	111	49	60%	10.0 ←	40 %	109	60°C
20	246.2	12.31	117	49	64%	13.5	42 %	113	
25	308.0	12.32	122	51	66%	17.1	45 %	122	

	Output	Spec.outp	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks	
rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	T _m [°C]	[bar]	[A]		
5	62.6	12.51	89	224	35%	Screw tempering 60°C, head: 105°C	
10	126.9 ←	12.69	103	262	42%	head: 106°C	
15	188.6	12.57	114	280	46%	head: 111°C	
20	249.6	12.48	122	289	47%	head: 116°C	
30	366.9	12.23	134	302	50%		

Sulapumpulla ajettu valutusprofiili oli 70-80-90-90-95-95-95 °C. Ilman pumppua kokeiltiin normaalilämpötiloista poikkeavia puristiinpään lämpötiloja. Profiili oli sama kuin ajettaessa pumpun kanssa, mutta kolme viimeistä vyöhykettä vaihtelivat, kuten taulukosta 2 voi lukea. Taulukon tulokset ovat liitteistä 8 ja 13.

Aivan kuten alemman viskositeetin kumilla, myös jäykemmän kumin tuotto kasvaa merkittävästi käytettäessä sulapumpua. Taulukosta 2 nähdään, että tuotto on sulapumpulla 184,2 kg/h ja vastaavasti ilman pumpua 126,9 kg/h, kun ajetaan kierrosnopeudella 10 rpm.

Massan lämpötila oli korkeampi 8 °C, kun valutus tehtiin sulapumpun kanssa. Lämpötilaero olisi voinut olla suurempikin, jos puristinpään lämpötila olisi ollut normaali 95 °C. Tulos on ristiriidassa teorioihin sulapumpun eduista saada massa viileämpänä ekstruuderista. Teorian mukaan paine kehitetään vasta sulapumpun hammaspyörillä, jolloin massa ei altistu koville paineille jo sylinterissä ja siten lisää massan viipymäaikaa sylinterissä. Pumpun poistopuolen paineita ei raporttiin ole kirjattu.

Kun valutuskoe suoritettiin kymmenen astetta viileämmällä lämpötilaprofiililla (ilman pumpua: 60-70-80-80-95-95-95 °C ja pumpun kanssa: 60-70-80-80-95-75-95 °C), oli sulapumpulla edelleen parantava vaikutus tuottoon. Kyseisen profiilin tulokset ovat taulukossa 3 ja testiraportit liitteinä 10 ja 15.

Taulukko 3. Tuottojen vertailu sulapumpun ollessa integroituna (ylempi kaavio) ja ilman sulapumpua (alempi kaavio). Mooney 48 ja lämpötilaprofiili 60-70-80-80 °C.

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure pump in	Pressure pump out	Current pump		Current extruder	Pressure extruder	Remarks
rpm gear pump	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[bar]	[A]	rpm extruder	[A]	[bar]	
5	57.0	11.40	95	26	150	56%	2.5	26 %	52	Screw tempering 60°C
10	122.7	← 12.27	97	23	218	59%	5.3	← 34 %	58	
15	184.9	12.33	106	30	250	63%	8.2	38 %	72	
25	309.5	12.38	111	31	286	68%	14.4	42 %	81	

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks
rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[A]	
5	81.4	← 16.27	97	186	37%	Screw tempering 60°C
10	150.0	15.00	104	229	42%	
15	218.0	14.54	113	251	46%	
25	349.9	13.99	126	274	49%	

Tuotto parani sulapumpun kanssa noin 50 % kyseisellä lämpötilaprofiililla, ja se on samaa luokkaa kuin muillakin profiileilla, ajettaessa EPDM-kumia. Massan lämpötiloissa ei ollut eroa, kun ajettiin ruuvin pyörimisnopeudella 5 rpm. Nopeudella 15 rpm massan lämpötila oli 113 °C ilman pumppua ja 111 °C pumpun kanssa. Huomioitavaa oli myös, että sulapumpun temperointilaite ei pystynyt pitämään asetuslämpötilaa 75 °C, vaan se nousi kahdessa viimeisessä kokeessa 81 °C:seen ja 83 °C:seen. Sulapumpun poistupuolen paine oli korkeampi 32 ja 35 baria ruuvin kierrosnopeuksilla 5 ja 15 rpm.

Viimeisenä vertailukohteena oli sama EPDM-kumi, mutta lämpötilaprofiili oli muita viileämpi 40-50-50-50-95-95-95 °C, ja sulapumpulla ajatus testissä pumpun lämpötila (vyöhyke 6) oli asetettu lämpötilaan 75 °C. Tulokset ovat liitteistä 9 ja 14.

Taulukko 4. Tuottojen vertailu sulapumpun ollessa integroituna (ylempi kaavio) ja ilman sulapumppua (alempi kaavio). Mooney 48 ja lämpötilaprofiili 40-50-50-50 °C.

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure pump in	Pressure pump out	Current pump		Current extruder	Pressure extruder	Remarks
rpm gear pump	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[bar]	[A]	rpm extruder	[A]	[bar]	
5	57.5	11.50	92	29	147	55%	2.5	35 %	57	Screw temp. 50°C
10	122.9	← 12.29	98	25	214	58%	5.7	← 40 %	65	
15	185.2	12.35	102	26	245	62%	8.8	42 %	70	
25	310.0	12.40	115	31	283	68%	14.7	45 %	83	New batch number

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks
rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[A]	
5	79.2	← 15.83	94	196	42%	Screw tempering 50°C
10	143.7	14.37	101	234	47%	
15	208.8	13.92	111	251	48%	
25	342.7	13.71	125	274	50%	

Viileämmälläkin profiililla sulapumpun vaikutus tuottoon oli samaa luokkaa kuin aiemmilla, kuumemmilla profiileilla. Massan lämpötilat olivat hieman korkeammat sulapumpulla ajetuissa kokeissa, kuten taulukosta 4 nähdään. Lämpötilojen asetusarvoissa ja todellisissa arvoissa oli paikoin valtavia heittoja. Sulapumpun asetustemperatura oli 75 °C, mutta ruuvin kierrosnopeuksilla 2.5, 5.7 ja 8.8 rpm mitattu arvo oli 81 °C ja kierrosnopeudella 14.7 rpm arvo oli 84 °C. Ilman sulapumppua ajetun kokeen lämpötilaprofiili nousi pannassa (vyöhyke 4) 68 °C:seen ja kierrosnopeudella 25 rpm 72 °C:seen. Pannan lisäksi lämpötilat nousivat ensimmäisissä kolmessa vyöhykkeessä jopa 20 °C yli asetusarvojen, kun ajettiin kierrosnopeudella 25 rpm.

Jos verrataan sulapumpulla ajettujen kokeiden tuloksia keskenään, voidaan todeta, että tuotoissa on maksimissaan 0,5 kg:n heitto viileämmän profiilin hyväksi, kuten taulukosta 5 nähdään. Massan lämpötila on puolestaan pumpun kierrosnopeudella 5 ja 15 rpm viileämmällä profiililla viileämpää ja kierroksilla 10 ja 25 kuumempaa. Noin kahdenkymmenen celsiusasteen erolla lämpötilaprofiilissa ja kymmenen asteen ruuvien lämpötilaerolla ei näin siis ole merkittävää vaikutusta tuottoon, kun ajetaan sulapumppu integroituna. Viileämmän profiilin lämpötilat olivat 40-50-50-50-95-75-95 °C ja kuumemman 60-70-80-80-95-75-95 °C. Tulokset ovat liitteistä 14 ja 15.

Ilman sulapumppua ajettujen kokeiden tulosten vertailussa huomataan parhaimmillaan vajaan kymmenen kg:n ero tuotossa kuumemman profiilin hyväksi. Tulokset ovat taulukossa 6 ja testiraportit liitteissä 9 ja 10. Massan lämpötila pysyi viileämmällä profiililla maksimissaan 3 °C kylmempänä. Ilman sulapumppua ero tuotossa on jo huomattavampi, kun ajetaan eri lämpötilaprofiileilla ja verrataan sulapumpulla ajettuihin kokeisiin. Lämpötilaprofiilit olivat viileämmällä 40-50-50-50-95-95-95 °C ja kuumemmalla 60-70-80-80-95-95-95 °C.

Taulukko 5. Tuottojen ja lämpötilojen vertailu sulapumpulla. Viileä profiili (ylempi kaavio) ja kuuma profiili (alempi kaavio). Mooney 48.

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure pump in	Pressure pump out	Current pump		Current extruder	Pressure extruder	Remarks
rpm gear pump	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[bar]	[A]	rpm extruder	[A]	[bar]	
5	57.5	11.50	92	29	147	55%	2.5	35 %	57	Screw temp. 50°C
10	122.9	12.29	98	25	214	58%	5.7	40 %	65	
15	185.2	12.35	102	26	245	62%	8.8	42 %	70	
25	310.0	12.40	115	31	283	68%	14.7	45 %	83	New batch number

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure pump in	Pressure pump out	Current pump		Current extruder	Pressure extruder	Remarks
rpm gear pump	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[bar]	[A]	rpm extruder	[A]	[bar]	
5	57.0	11.40	95	26	150	56%	2.5	26 %	52	Screw tempering 60°C
10	122.7	12.27	97	23	218	59%	5.3	34 %	58	
15	184.9	12.33	106	30	250	63%	8.2	38 %	72	
25	309.5	12.38	111	31	286	68%	14.4	42 %	81	

Taulukko 6. Tuottojen ja lämpötilojen vertailu ilman sulapumpppua. Viileä profiili (ylempi kaavio) ja kuuma profiili (alempi kaavio). Mooney 48.

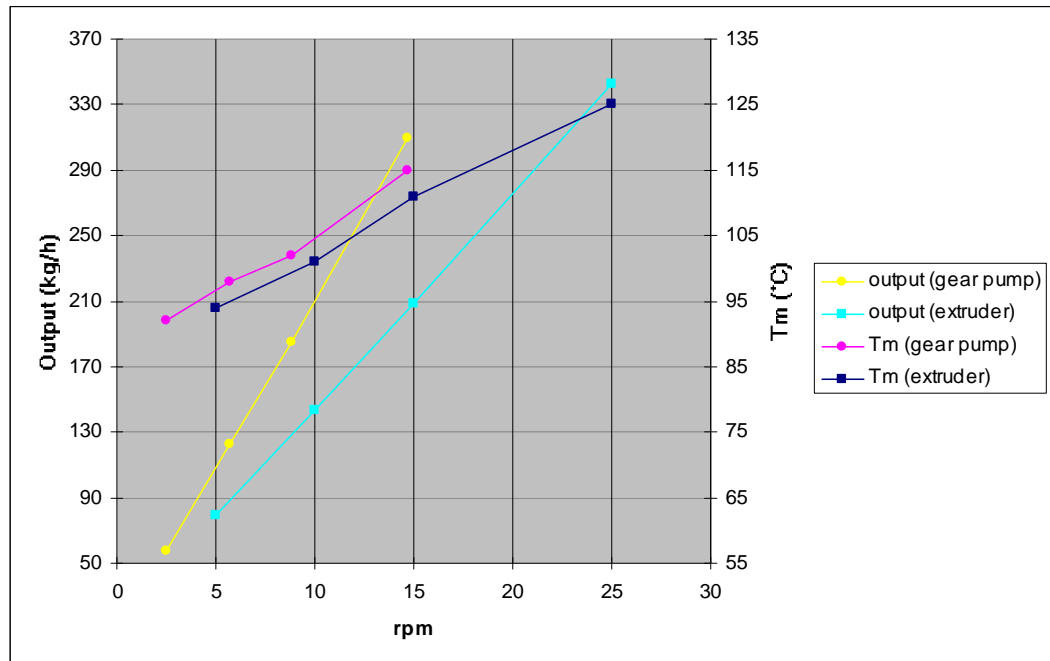
	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks
rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[A]	
5	79.2	15.83	94	196	42%	Screw tempering 50°C
10	143.7	14.37	101	234	47%	
15	208.8	13.92	111	251	48%	
25	342.7	13.71	125	274	50%	

	Output	Spec.outp.	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks
rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[A]	
5	81.4	16.27	97	186	37%	Screw tempering 60°C
10	150.0	15.00	104	229	42%	
15	218.0	14.54	113	251	46%	
25	349.9	13.99	126	274	49%	

9 YHTEENVETO

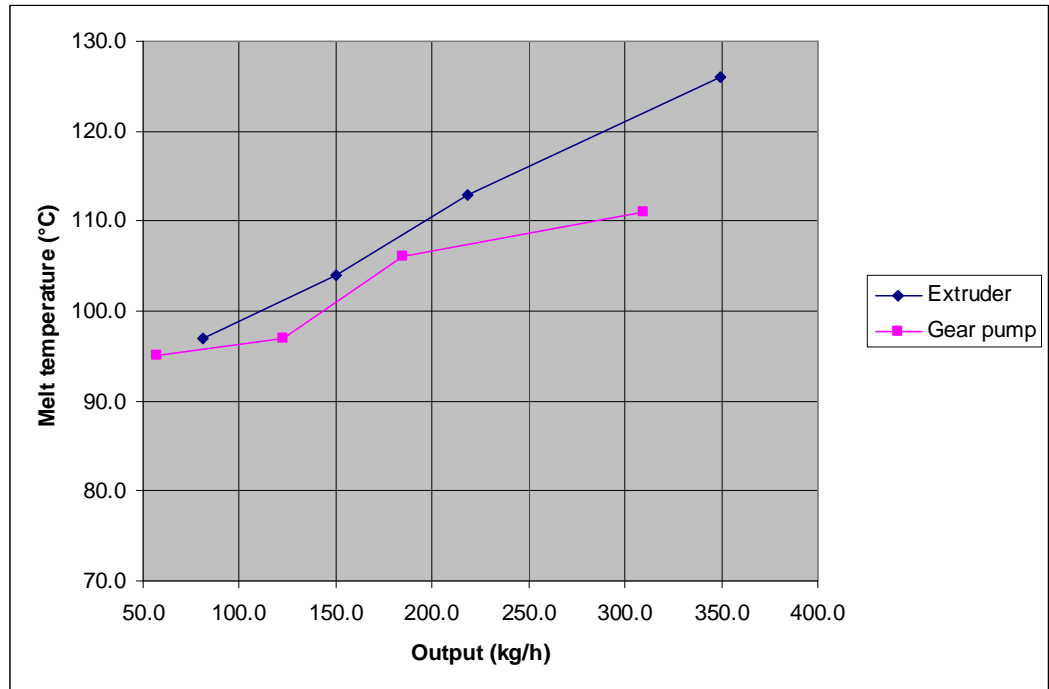
Sulapumpun integrointi ekstruuderiin lisäsi tuottoa huomattavasti, kun verrataan ilman sulapumppua ajettujen kokeiden tuottoihin. Tuotot paranivat molemmilla kumilaaduilla samaa luokkaa ja näin ollen viskositeettien ollessa Mooneyn asteikolla 30 ja 48, ei niillä ollut merkittävää vaikutusta tuottoon.

Tehtyjen kokeiden perusteella voidaan myös todeta, että kumin viskositeetilla ei ollut suurta merkitystä massan lämpötilaan. Samoilla profiileilla ja ajoparametreilla ajettuna lämpötilaerot jäykemmän ja juoksevamman välillä oli muutamia asteita. Sulapumpun vaikutukset massan lämpötilaan olivat päinvastaiset juoksevammalle materiaalille, nostaten sitä useita asteita verrattuna ilman pumppua ajettujen kokeiden massalämpöihin. Jäykemällä materiaalilla massan lämpötila oli myös tietyillä ajoparametreilla kuumempaa kuin ilman pumppua ajetuilla kokeilla. Lämpötilaprofiilin ollessa normaalia viileämpi nosti sulapumpun käyttö massan lämpötilaa, kuten kuvioista 9 voidaan nähdä. Siinä on vertailtu kylmällä profiililla (40-50-50-50-95-95-95 °C) ajettujen kokeiden tuloksia ekstruuderin ja sulapumpun välillä, joiden tulokset ovat liitteissä 9 ja 14. Sulapumpun edut taas on nähtävissä tuoton kasvussa. Ruuvien kierrosnopeuden ollessa 15 rpm on sulapumpun tuotto noin 100 kg/h enemmän kuin ekstruuderilla. Myös kuumemmalla profiililla ajettaessa ja pienemmillä kierrosnopeuksilla sulapumpun käyttö nosti massan lämpötilaa.



Kuvio 9. Tuottojen ja sulalämpötilojen vertailua viileällä lämpötilaprofiililla. Mooney 48.

Toisaalta, kun verrataan ekstruuderin ja sulapumpun lämpötiloja tuoton funktiona (kuvio 10), voidaan todeta, että sulapumpulla päästään samaan tuottoon pienemmillä lämpötiloilla. Lämpötilaerot ovat suurimmillaan kymmenen asteen luokkaa sulapumpun hyväksi. Jos esimerkiksi vaaditaan maksimisulalämpötilaksi 110 °C, kasvaa tuotto noin 50 % sulapumpun avulla nousten 200 kg:sta 300 kg:aan. Näin tarkasteltuna, saadaan sama tuotto viileämpänä sulapumpun avulla. Kuviossa 10 on vertailtu liitteiden 10 ja 15 tuloksia keskenään.



Kuvio 10. Ekstruuderin ja sulapumpun sulalämpötilat tuoton funktiona.

Jatkossa olisi mielenkiintoista tutkia vielä juoksevampia ja jäykempiä kumilaatuja sekä verrata niiden tuottoja ja sulalämpötiloja tässä työssä ajettujen kumien tuloksiin. Tehtyjen kokeiden perusteella saatiin viitteitä siitä, ettei viskositeetilla ole vaikutusta kumin tuottoon ja sulalämpötilaan.

LÄHTEET

Bhowmick, A. K., Hall, M. M. & Benarey, H. A. 1994. Rubber products manufacturing technology. New York: Marcel Dekker Inc.

Crowther, B. G. 1998. Rubber Extrusion Theory and Development. Rapra review reports, report 105. UK: Rapra Technology Ltd.

Direct industry [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa:

http://pdf.directindustry.com/pdf/maag-pump-systems/maag-gear-pumps-screen-changers-and-systems-for-the-extrusion-industry/11815-26455-_3.html

Fluid Finland [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa:

<http://www.fluidfinland.net/Klinikka/hammas-mantapumput.pdf>

Ides [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa:

<http://prospector.ides.com/PropertyHelpPopUp.aspx?PID=82337>

Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. 2003. Hydraulitekniiikan perusteet. 6. painos. Helsinki: WSOY.

Kumiteollisuus ry [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa:

<http://www.kumiteollisuus.fi/fin/kumitietoutta/>

Maillefer Extrusion Oy. 2008. Sisäinen tietokanta.

Morton, M. 1995. Rubber technology. 3rd edition. London: Chapman & Hall.

Skibba, O. & Thoma, O. Direct Extrusion Through a Gear Pump – the Next Logical Step in the Rubber Extrusion Process. A-Z Formen- und Maschinenbau GmbH [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa: http://www.a-zamericas.com/AZ_GearPumpPublicationProspekt.pdf

Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa:

http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_4_4.php

Vuori, J.-P. 2006. Kumin sekoittaminen, ekstruusio ja ekstruusiotuotteiden vulkanointi. Tampereen ammattikorkeakoulu [viitattu 8.8.2008]. Saatavissa:

<https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/4463/TMP.objres.958.pdf?sequence=1>

LIITTEET

LIITE 1	Mooney 30, profiili 1
LIITE 2	Mooney 30, profiili 2
LIITE 3	Mooney 30, profiili 3
LIITE 4	Mooney 30, profiili 4, sulapumppu
LIITE 5	Mooney 30, profiili 5, sulapumppu
LIITE 6	Mooney 48, profiili 1
LIITE 7	Mooney 48, profiili 2
LIITE 8	Mooney 48, profiili 3
LIITE 9	Mooney 48, profiili 4
LIITE 10	Mooney 48, profiili 5
LIITE 11	Mooney 48, profiili 6, sulapumppu
LIITE 12	Mooney 48, profiili 7, sulapumppu
LIITE 13	Mooney 48, profiili 8, sulapumppu
LIITE 14	Mooney 48, profiili 9, sulapumppu
LIITE 15	Mooney 48, profiili 10, sulapumppu

Mooney 30, profiili 1

MAILLEFER EXTRUSION OY													
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT													
EXTRUDER:	NMR 120-12D	SCREENS:	No screens D120 slotted plate	DATE:	18.4.2008								
CROSSHEAD:	NHW50	HEAD TEMPERING:	95 °C	PLACE:	Vantaa								
MATERIAL:	Mooney 30 (Savio) Stripe rubber	REMARKS:	Rubber screw for stripe material DE205262	OPERATOR:	JOAH, ML								
Time Zone temperatures deg. °C													
1	2	3	4	5	6	7	rpm	Output [kg/h]	Spec.outp [kg/h/rpm]	Melt temp. Tm [°C]	Pressure [bar]	Current [A]	Remarks
70	80	90	90	95	95	95	15	160.7	10.71	103	176	35%	rubber temp. 15 °C
							25	259.5	10.38	111	190	37%	Screw tempering 60 °C
							15	159.1	10.61	103	172	35%	Screw tempering 60 °C
	60	70	80	80	95	95	10	108.7	10.87	97	158	34%	Screw tempering 56 °C
							15	167.3	11.15	103	177	36%	Screw tempering 56 °C
							10	115	11.50	99	160	31%	Screw tempering 60 °C
	70	80	90	90	95	95	15	163.3	10.89	105	174	35%	Screw tempering 70 °C
	80	90	100	100	95	95	10	123.7	12.37	105	150	30%	Screw tempering 60 °C

MOONEY 30, PROFILI 3

MAILLEFER EXTRUSION									
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT									
EXTRUDER: NMR 120-12D		SCREENS: No screens		DATE: 14.5.2008		PLACE: Vantaa		OPERATOR: JOAH	
CROSSHEAD: NHW50		HEAD TEMPERING: 95°C		Rubber screw for stripe material		rpm extruder		Current extruder	
MATERIAL: S774100 Mooney 30		REMARKS: DE205262		Pressure pump in		Pressure pump out		Remarks	
Stripe rubber				Spec. outp. [kg/h/rpm]		Melt temp. [°C]		Tm [°C]	
Zone temperatures deg. °C		Output [kg/h]		rpm gear pump		Output [kg/h]		rpm extruder	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	70	80	80	95	95	95	95	95	95
59.6	11.91	102	102	20	98	3.2	19%	39	Screw tempering 60°C
12.21	12.21	105	27	144	48%	6.5	27%	51	
183.0	12.20	106	25	168	53%	9.8	35%	57	
306.0	12.24	113	27	193	58%	17.1	37%	60	

Zone 6 - Gear pump

MOONEY 30, PROFILI 4, SULAPUMPPU

MAILLEFER EXTRUSION											
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT											
EXTRUDER: NMR120-12D		SCREENS: No screens		DATE: 19.5.2008		PLACE: Vantaa		CURRENT EXTRUDER [A]		REMARKS	
CROSSHEAD: NHW50		HEAD TEMPERING: 95°C		OPERATOR: JOAH		rpm extruder		Pressure extruder		Screw tempering 50°C	
MATERIAL: S774100 Mooney 30		REMARKS: Rubber screw for stripe material		Pressure pump in		Current pump		Pressure pump out			
Stripe rubber		DE205262		Melt temp. [°C]		Tm [°C]		rpm extruder			
Zone temperatures deg. °C		Output [kg/h]		Spec. outp. [kg/h/rpm]		Melt temp. [°C]		Pressure pump in [bar]		Current pump [A]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	rpm gear pump	rpm extruder
40	50	50	50	95	75	95	12.29	99	22	199	9.6
							12.14	107	22	225	23.2
							11.99	116	27	229	30.6
											54
											56
											66

rpm	Output kg/h
15	200
30	400
40	500

Output kg/h	Melt temperature °C	Pressure pump out [bar]
200	100	199
300	110	225
400	116	229

Zone 6 = Gear pump

MOONEY 30, PROFILI 5, SULAPUMPPU

MAILLEFER EXTRUSION											
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT											
EXTRUDER: NMP, 120-12D			SCREENS: No screens			DATE: 21.5.2008			Current extruder		
CROSSHEAD: NHW50			HEAD TEMPERING: 95°C			PLACE: Yantaa			Pressure extruder		
MATERIAL: S774100 Mooney 30			REMARKS: Rubber screw for stripe material			OPERATOR: JOAH			Remarks		
Stripe rubber			DE206653								
Zone temperatures deg. °C		Output		Spec. outp.		Melt temp.		Pressure		Current	
		[kg/h]		[kg/h/rpm]		[°C]		[bar]		[A]	
		rpm gear pump		rpm		Tm		pump in		pump out	
		10		9		97		205		55%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	rpm extruder	[bar]
40	50	50	50	95	75	95	15	182.8	19	9.4	26 %
							30	366.4	31	21.5	41 %
											84

Zone 6 = Gear pump

MOONEY 48, PROFILI 2

MAILLEFER EXTRUSION OY

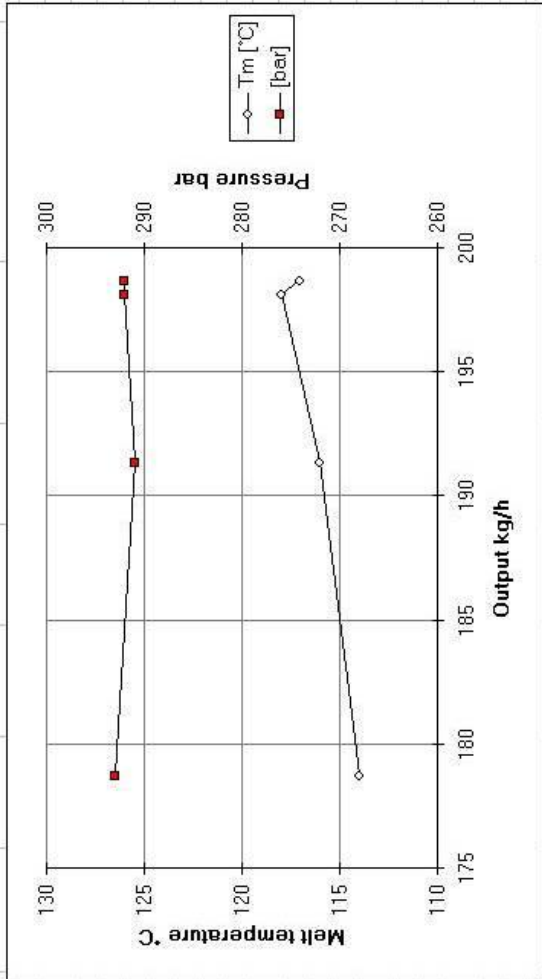
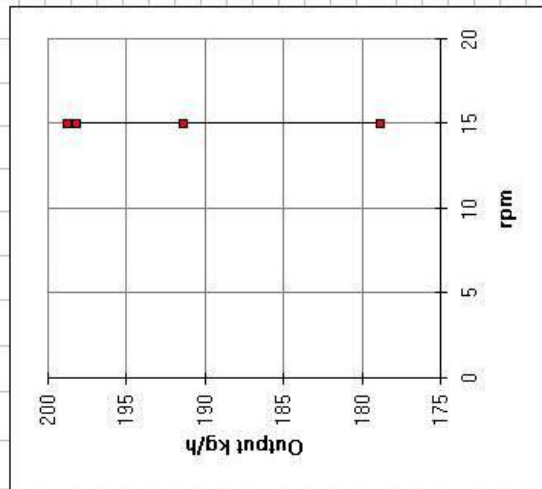
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT

EXTRUDER: NIMR 120-12D
 CROSSHEAD: NHW50
 MATERIAL: EK 1052, Mooney 48
 Stripe rubber

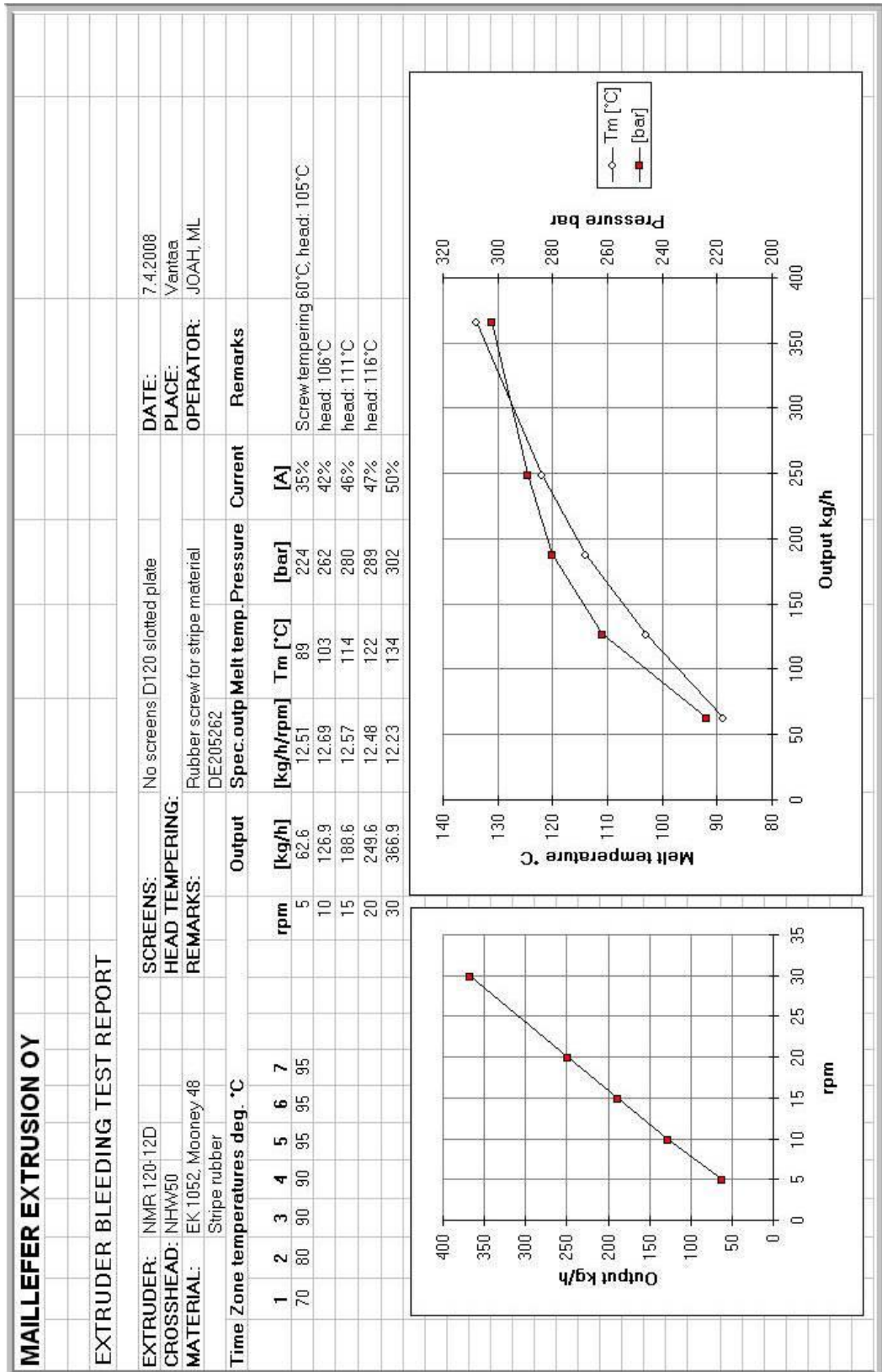
SCREENS: No. screens D120 slotted plate
 HEAD TEMPERING: 95°C
 REMARKS: Rubber screw for stripe material
 DE205262

DATE: 7.4.2008
 PLACE: Vantaa
 OPERATOR: JOAH, ML

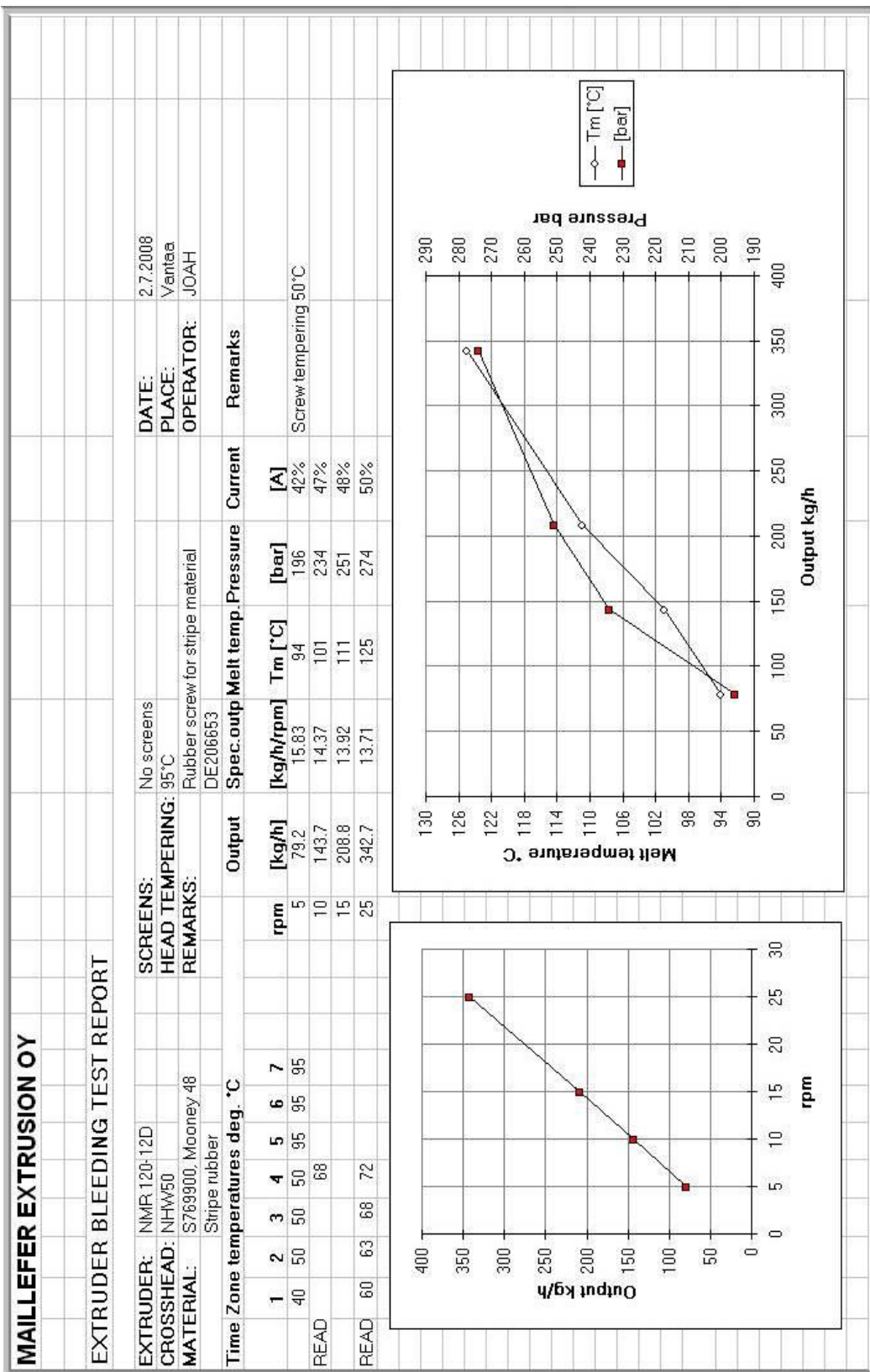
Time Zone temperatures deg. °C		Output	Spec.outp	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks
1	2	3	4	5	6	7	
rpm	rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[A]	
70	80	178.8	11.92	114	293	46%	Screw tempering 54°C
	15	191.4	12.76	116	291	45%	Screw tempering 70°C
	15	198.1	13.21	118	292	45%	Screw tempering 80°C
	15	198.7	13.25	117	292	44%	Screw tempering 90°C



MOONEY 48, PROFILI 3



MOONEY 48, PROFILI 4



MOONEY 48, PROFILI 5

MAILLEFER EXTRUSION OY

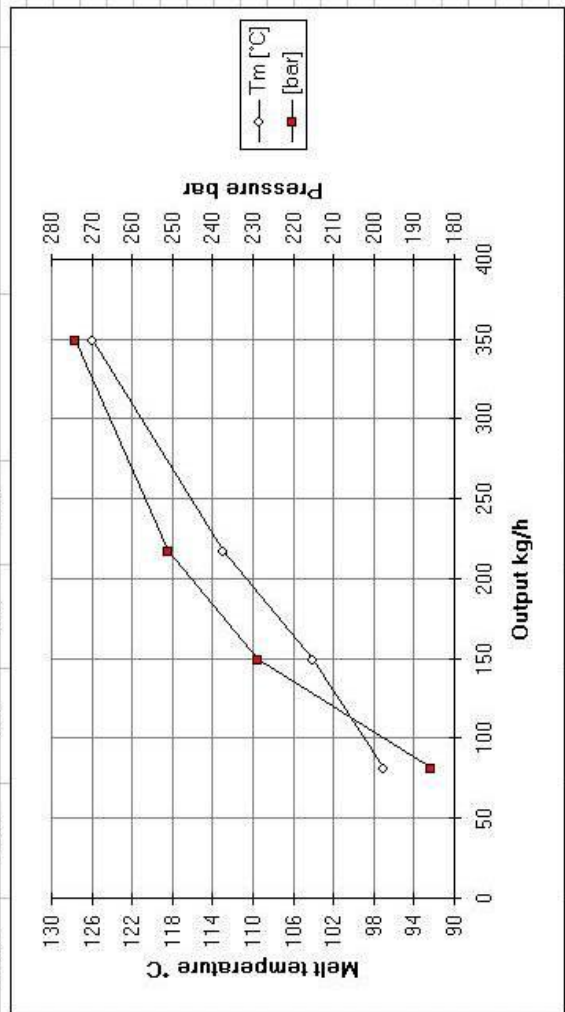
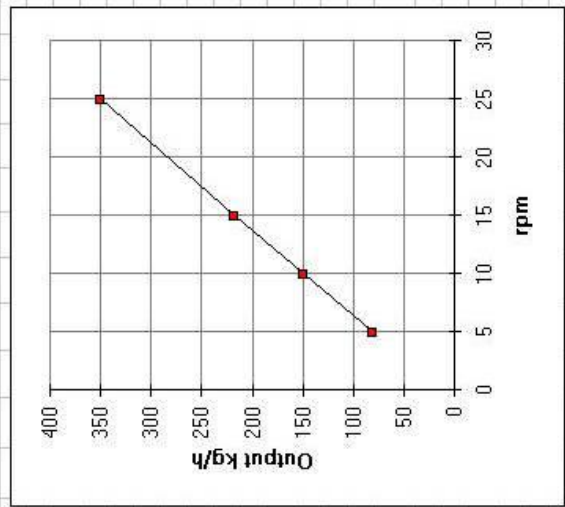
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT

EXTRUDER: NMR 120-12D
 CROSSHEAD: NHW50
 MATERIAL: S769900, Mooney 48
 Stripe rubber

SCREENS: No screens
 HEAD TEMPERING: 95°C
 REMARKS: Rubber screw for stripe material
 DIE206653

DATE: 2.7.2008
 PLACE: Vantaa
 OPERATOR: JOAH

Time Zone		temperatures deg. °C	Output		Spec. outp	Melt temp.	Pressure	Current	Remarks			
1	2	3	4	5	6	7	rpm	[kg/h]	[kg/h/rpm]	Tm [°C]	[bar]	[A]
60	70	80	80	95	95	95	5	81.4	16.27	97	186	37%
							10	150.0	15.00	104	229	42%
							15	218.0	14.54	113	251	46%
							25	349.9	13.99	126	274	49%



Remarks: Screw tempering 60°C

MOONEY 48, PROFILI 8, SULAPUMPPU

EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT											
EXTRUDER: NMR 120-12D		SCREENS: No screens D120 slotted plate		DATE: 7.4.2008							
CROSSHEAD: NHW50		HEAD TEMPERING: 95°C		PLACE: Vantaa							
MATERIAL: EK 1062 Mooney 48		REMARKS: Rubber screw for stripe material		OPERATOR: JOAH							
Stripe rubber		DE205262									
Zone temperatures deg. °C		Output		Pressure pump in		Current pump		Pressure extruder		Remarks	
	rpm	gear pump	10 pump	8	9	5	10	[bar]	[A]	[bar]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
70	80	90	90	95	95	95	95	52	3.3	93	Screw tempering 60°C
								52	51%	105	
								52	53%	109	
								49	60%	113	
								49	64%	113	
								51	66%	122	
								51	66%	122	

rpm	Output [kg/h]	Melt temperature °C	Pressure extruder [bar]
5	57.5	101	93
10	122.3	106	105
15	184.2	111	109
20	246.2	117	113
25	308.0	122	122

Zone 6 = Gear pump

MOONEY 48, PROFILI 10, SULAPUMPPU

MAILLEFER EXTRUSION											
EXTRUDER BLEEDING TEST REPORT											
EXTRUDER: NMR 120-12D		SCREENS: No screens		DATE: 2.7.2008		PLACE: Vantaa		OPERATOR: JOAH		Pressure extruder	
CROSSHEAD: NHW50		HEAD TEMPERING: 95°C		Melt temp. [°C]		rpm extruder [A]		Current extruder		Remarks	
MATERIAL: S769900, Mooney 48		REMARKS: Rubber screw for stripe material		Spec. outp. [kg/h/rpm]		Tm [°C]		rpm extruder [A]		Screw tempering 60°C	
Stripe rubber		DE206653		[kg/h]		[bar]		[A]			
Zone temperatures deg. °C											
		rpm gear pump		Output		Pressure pump in		Current pump			
		5 10		[kg/h]		[bar]		[A]			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
60	70	80	80	95	75	95					
READ					81						
READ					83						

rpm	Output kg/h	Melt temperature °C	Pressure pump out [bar]
5	50	94	160
10	100	98	180
15	150	106	200
25	250	110	220
30	300	118	280

Zone 6 = Gear pump