

SULJETUN JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU EKSTRUUDERIIN

Tiivistelmä

Tekijä Piiparinen, Juuso	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 26	Valmistumisaika Syksy 2020
Työn nimi Suljetun jäähdytysjärjestelmän suunnittelu ekstruuderiin		
Tutkinto Konetekniikan koulutusohjelma		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön aiheena on suunnitella olosuhteisiin nähden mahdollisimman pieni, tehokas ja taloudellinen suljettu jäähdytysjärjestelmä italialaiseen A.S.T. -yhtiön 80-luvulla valmistamaan ekstruuderiin.</p> <p>Ekstruuderin muokkaa ruuvimaisten akselien ja suuren lämpötilan avulla termoplastisesta polymeeristä halutun muotoista profiilia uusia käyttökohteita varten. Suuren lämpötilan avulla muovi sulaa ekstruuderin sisällä ja työntyy suuttimesta lävitse, joten jäähdytys on olennainen osa prosessia.</p> <p>Tällä hetkellä kyseisessä ekstruuderissa on käytössä suora avonainen vesijohtoverkon kiertämätön vesi, joten veden kulutus on runsasta.</p> <p>Työssä pyritään siis tutkimaan mahdollisia ratkaisuja korvaamaan vesijohtoveden käyttö mahdollisimman pienellä tilan tarpeella.</p>		
Asiasanat Ekstruusio, Ekstruuderin, Jäähdytys		

Abstract

Author(s) Piiparinen, Juuso	Type of publication Bachelor's thesis	Published Autumn 2020
	Number of pages 26	
Title of publication Desinging of a closed cooling system for an extruder		
Name of Degree Bachelor`s degree in Mechanical engineering		
Abstract <p>The abstract of this thesis is designing of a closed cooling system for an extruder. The extruder is manufactured by A.S.T. -company in the 80's. The cooling system need to be smaller and more economic.</p> <p>The extruder uses screws and a high temperature to shape the thermoplastic polymers for the new applications. Due to the high temperature the plastics melts inside the extruder and pushed through the die. So cooling is an essential part of the process.</p> <p>Currently, this extruder uses a once-through water cooling system. That means the cooling water from the water tap just go through an extruder to the sewer system. So, the water consumption and waste are abundant.</p> <p>The purpose of this thesis is study possible solutions to replace the once-through water cooling system with the smaller possible space requirement.</p>		
Keywords Extrusion, Extruder, Cooling		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	TUTKIMUS TAVOITE	2
3	EKSTRUUSIO	3
3.1	Ekstruusiosprosessi vaiheittain	4
3.2	Ekstruuderin toimintaperiaate ja rakenne	5
3.2.1	Voimansiirtojärjestelmä	6
3.2.2	Syöttöjärjestelmä	7
3.2.3	Sylinteri	8
3.2.4	Ruuvi	9
3.2.5	Suutin	10
3.3	Säätölaitteet ja monitorointi	11
4	ERILAISET EKSTRUUDERIT	12
4.1	Yksiruuviekstruuderit	12
4.2	Kaksoisruuviekstruuderit	13
4.3	Lieriökstruuderit	15
5	LISÄLAITTEET JA MENETELMÄT	16
5.1	Koekstruusio	16
5.2	Kalvoekstruusio	18
5.3	Puhalluskalvoekstruusio	19
5.4	Ekstruusio-päälystys	20
5.5	Granulointi	20
5.5.1	A.S.T. -yhtiön granulaattori	21
6	EKSTRUUDERIN JÄÄHDYTTÄMINEN	22
6.1	Säiliöratkaisu	23
6.1.1	Säiliön tilavuuden laskeminen polyeteenille	24
6.2	Jäähdytinratkaisu	25
	LÄHTEET	26

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on korvata ekstruuderin kiertämättömällä vesijohtovedellä toimiva jäähdytysjärjestelmä mahdollisimman pienellä suljetulla jäähdytysjärjestelmällä siten, että kyseinen laite mahtuisi siirrettävään konttiin. Ekstruuderin täytyy saada helpommin liikuteltavaksi ja taloudellisemmaksi, koska tällä hetkellä veden kulutus on todella runsasta. Vesijohtovesi vain siirtää lämpöä ekstruuderista viemäriin, joten koneen ylläpito ja käyttö on vesijohtopisteestä riippuvaista ja todella kallista pitämällä aikavälillä.

Toimeksiantajana toimii LAB-ammattikorkeakoulu ja työ suoritetaan M19-kampuksen tiloissa. LAB-ammattikorkeakoulu aloitti toimintansa, kun Lahden ja Saimaan ammattikorkeakoulut yhdistyivät vuoden 2020 alussa. LAB-ammattikorkeakoulu on myös osa LUT-yliopistoa. Ekstruuderin sijaitsee tällä hetkellä M19-kampuksen muovimallilaboratoriossa, jossa se on ohjauskeskuksensa vieressä. Opinnäytetyön ohjaajana toimii yliopettaja Reijo Heikkinen.

Tutkimusongelmana on jäähdytysjärjestelmän valinta tilan puutteeseen ja jäähdytystehoon nähden. Ongelmaa olen yrittänyt ratkaista vertailemalla erilaisia jäähdytysratkaisuja, etsien parhaiten soveltuvaa sekä taloudellisinta järjestelmää. Vaihtoehtoja on monia perinteisestä ilmajäähdytyksestä lämmönvaihduttamiseen. Lämmönvaihdin puhaltimella olisi monipuolinen ratkaisu, koska siihen pystyisi soveltamaan mahdollisen liitettävyyden työtilan ilmastointiin tarvittaessa.

Tässä opinnäytetyössä käytetty aineisto perustuu termodynamiikkaan ja lämpöoppia käsitteleviin kirjoihin, aiheeseen liittyviin internet-julkaisuihin ja ekstruudereista kertovaan kirjallisuuteen. Suurin osa käyttämistäni lähteistä oli englanninkielisiä sisältäen paljon niin sanottua ammattisanastoa, mikä tuotti ajoittain hankaluuksia etsiessä tietoa ja käännettäessä. Kirjallisuudesta tärkeimmät teoriaan liittyvät kirjat olivat: *Extrusion: The definitive processing guide and handbook* ja *Polymer Extrusion*.

2 TUTKIMUS TAVOITE

Ekstruuderissa on tällä hetkellä suora kiertämätön vesijäähdytys, jossa vesi menee koneeseen ja poistuu koneesta viemäriin. Vesi siirtää konvenktiona lämpöä pois koneesta, joten veden kulutus on todella runsasta, riippuen tietenkin kuinka paljon sitä käytetään. Veden hinta taas riippuu vesiyhtiön kylmän veden tai huleveden eli jäähdytykseen tarkoitettun veden hinnasta.

A.S.T. -yhtiön ekstruuderilinjasto on yhdessä granulaattorin ja granulaattien kuivaimen kanssa mitoiltaan noin 6,5 metriä pitkä ja 2 metriä korkea eli se vie paljon tilaa, joten sen ihanteellinen käyttötila on suuri pelkästään sen käyttämisen ja huoltamisen takia (kuva 1).

Ekstruuderin käyttötilassa pitää huomioida vesipisteen ja viemärin sijainti. Suuret sähköliittännät myös rajoittavat laitteen käyttämistä missä vain sekä ilmanvaihto pitää olla kunnossa, jotta koneen ajamisesta syntyvät lämmöt ja hajuhaitat saataisiin pois tilasta. Edellä mainitut asiat vaikuttavat myös koneen turvalliseen sekä tehokkaaseen ajamiseen.

Tämän opinnäytetyön käsittelemä ekstruuderilinja kuului muovien kierrätys projektiin, jossa se asennettaisiin siirrettävään konttiin, jonka avulla sitä siirrettäisiin sinne missä sitä tarvitaan. Eli jäähdytys pitäisi suorittaa suljetusti ja siten, että koneen ajaminen olisi mahdollista turvallisesti.



Kuva 1. A.S.T. -yhtiön 80-luvulla valmistama ekstruuderilinjasto

3 EKSTRUUSIO

Ekstruusio eli suulakepuristus on vanhimpiin ja yleisimpiin kuuluva muovien työstömenetelmä. Siinä termoplastinen muovi työntyy yhden tai useamman paikallaan pyörivän ruuvi-maisen akselin mukana suuttimeen, josta se puristuu läpi halutun muotoiseksi. Toki monia muitakin materiaaleja pystyy muokkaamaan ekstruusiosprosessilla, kuten esimerkiksi metallalle, savea, keramiikkaa ja ruokaa, mutta tässä työssä perehdytään vain muoveihin liittyvään ekstruusioon. (Lafleur & Vergnes 2014, xi.)

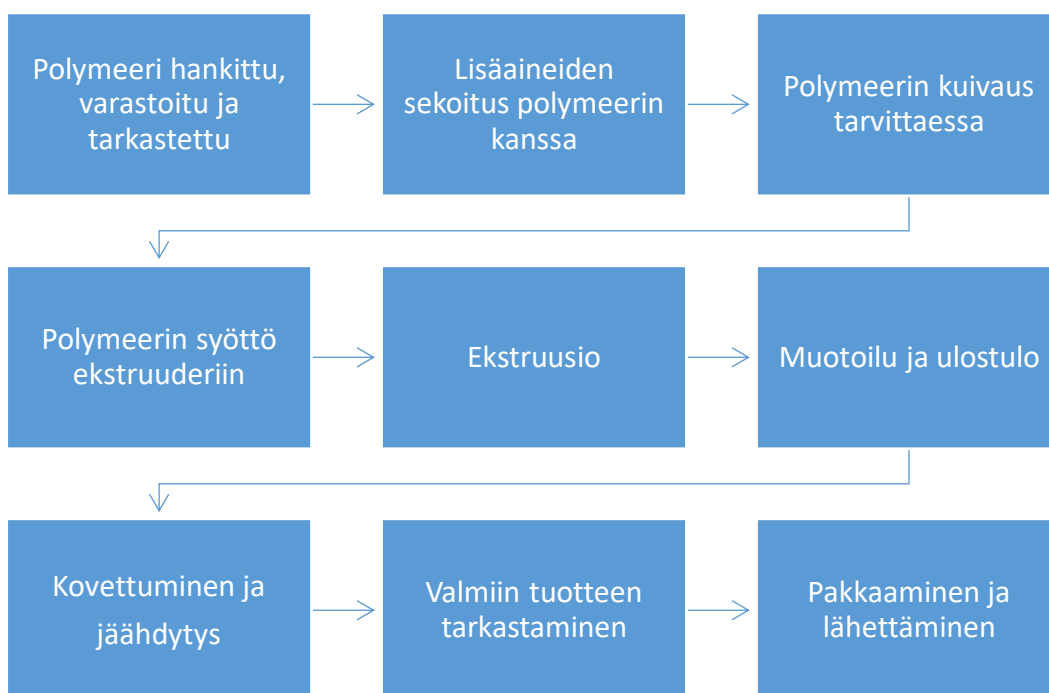
Muoviraaka-aine siis plastisoidaan eli muovi muutetaan muovattavaan tilaan, jonka jälkeen homogenoidaan eli valmistetaan halutun muotoista tuotetta. Ekstruusiosprosessissa käytettäviä materiaaleja ovat valtamuovit esimerkiksi polyeteeni (PE), polypropeeni (PP), polyvinyylikloridi (PVC) ja myös teknisiä muoveja, kuten akrylibutadieenistyreeni (ABS), polykarbonaatti (PC) ja polyoksimetyleeni tai polyasetaali (POM) käytetään. Lopputuotteen muodon ratkaisee ekstruuderin suuttimen muoto ja pinta-ala, mutta lopputuotteen leikkauspinta on aina suuttimen muotoinen. Laatuun vaikuttavat enimmäkseen polymeeri ja sen lisäaineet. (Lafleur & Vergnes 2014, ix – xi.)

Ekstruusiosprosessilla valmistetaan esimerkiksi erilaisia putkia, letkuja, kaapeleita, tankoja, nauhoja ja profiileja sekä elintarvike- ja rehuteollisuudessa paljon erilaisia tuotteita. Ekstruusiosprosessilla ei voida työstää kaikkia polymeerejä, koska liian pienellä sulalajuudella olevat muovit eivät pysty säilyttämään muotoansa jähmettymiseen saakka. Ekstruusiosprosessia on käytetty elintarvikkeissa jo vuosikymmeniä samalla periaatteella, mutta työstömassa on vain eri. Ekstruusiosprosessilla on paljon yhtäläisyyksiä 3D-tulostuksen kanssa, vaikka 3D-tulostuksella pystyy tulostamaan paljon monimutkaisempia ja moniulotteisempia tuotteita kuin ekstruusiosprosessilla. (Muoviteollisuus ry 2020.)

3.1 Ekstruusioprosessi vaiheittain

Ekstruusioprosessi voidaan esittää päävaiheittain (kuvio 1). Alussa tarvitaan siis polymeeriä, mikä täytyy tarkastaa ja todeta käyttökelpoiseksi. Seuraavaksi polymeeriin täytyy sekoittaa tarvittavat lisäaineet, joiden tehtävänä on muun muassa tasata lämpöä ja estää hapettumista sekä ultraviolettisäteilyä, mitkä vaikuttavat muun muassa muovin käyttökään ja pintaominaisuuksiin. Polymeerimassa ja lisäaineet sitten kuivataan tarvittaessa, koska kostea massa tekee valmiista tuotteesta heikkolaatuista prosessin aikana, mutta muuten se siirretään suoraan ekstruusiovaiheeseen. Massaan voi siis kehittyä kosteutta esimerkiksi kylmässä ja kosteassa varastotilassa, koska monet muovit keräävät ilmasta kosteutta nopeasti. (Wagner, Mount & Giles 2013, 3.)

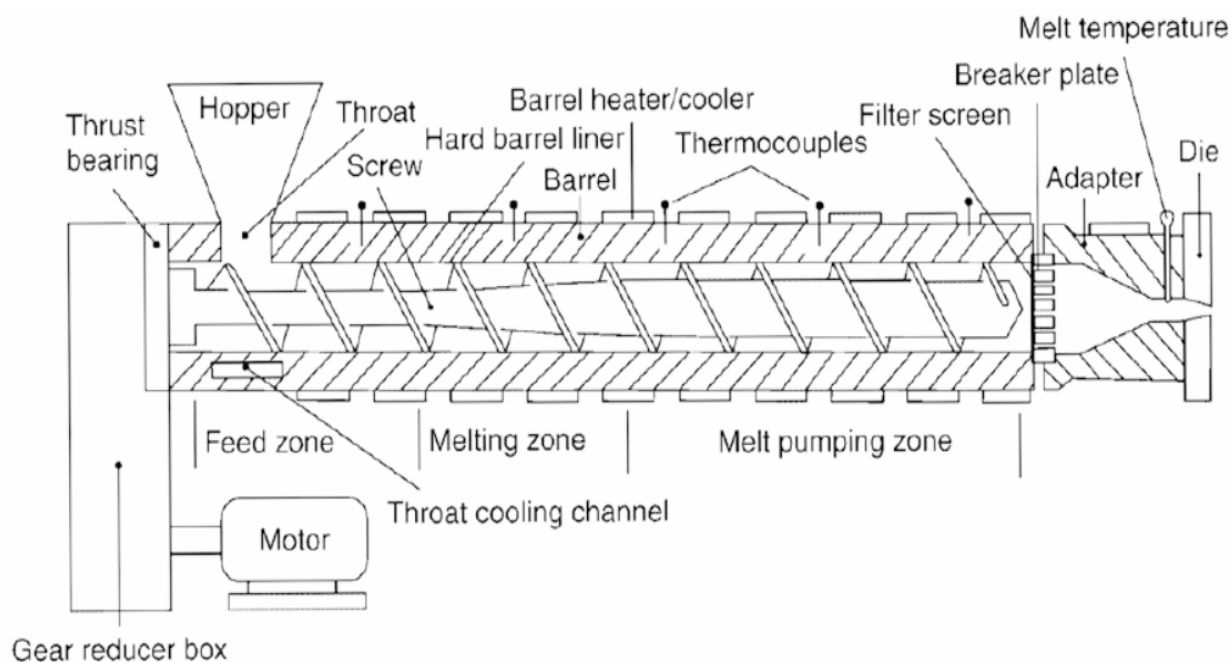
Ekstruusiovaiheessa massasta tulee tasalaatuista sulamisen, sekoituksen ja kuljettamisen avulla suulakkeeseen. Suulakkeen läpi tultuaan jäädytysvaiheessa muovi jäädytetään sen takia, että halutut mitat ja muodot saataisiin pidettyä. Loppuvaiheessa tuote täytyy tarkistaa, että se on tarpeeksi laadukasta ja oikeissa mitoissaan, jonka jälkeen sen voi pakata ja lähettää. (Wagner ym. 2013, 3.)



Kuvio 1. Perinteisen ekstruusioprosessin päävaiheet (Wagner ym. 2013, 3.)

3.2 Ekstruuderin toimintaperiaate ja rakenne

Ekstruuderin varsinainen toimintaperiaate on helpointa havainnollistaa tietämällä sen eri osien tarkoituksen (kuva 2). Aluksi on ehkä paras ymmärtää voimansiirtojärjestelmästä, mikä koostuu vaihteistosta ja moottorista, joiden tehtävänä on pyörittää ruuvia oikealla nopeudella ja vääntömomentilla. Suppilomainen syöttökaukalo toimii nimensä mukaisesti eli sitä kautta syötetään polymeeri/työstettävä massa itse ekstruuderiin. Sylinteri toimii taas kanavana ja sen sisällä oleva ruuvi on keskeisin osa koko prosessia, koska nimenomaan ruuvia pitkin työstettävä massa sulaa, sekoittuu, puristuu ja kulkeutuu tasalaatuisena suuttimelle. Suutin luo valmista jatkuvaa ja teoriassa loputonta tuotetta ruuvin tekemän paineen avulla sitä vasten. Lämmitysyksiköt sylinterissä pitävät massan oikeissa lämpötiloissa eri vaiheiden läpi. Jäähdytysjärjestelmä estää ekstruuderin liiallisen kuumenemisen vesipumpun kierrättämän jäähdytysveden avulla, jota tässä työssä käsitellään eniten. Ekstruuderissa on myös useita erilaisia säätölaitteita ja mittareita. (Kutz 2011, 227-228.)



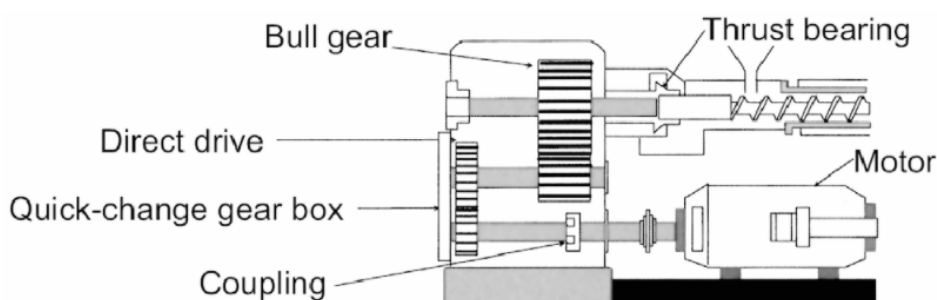
Kuva 2. Ekstruuderin poikkileikkaus (Kutz 2011, 228.)

3.2.1 Voimansiirtojärjestelmä

Voimansiirtojärjestelmä pyörittää ruuvia tasaisella nopeudella akselinsa ympäri tarkan nopeudensäädön ansiosta ja myös tuottaa tarvittavan väännön käytettävän polymeerin muokkaukseen. Ruuvien nopeus on myös suoraan verrannollinen ekstruuderin tuotantopeuteen. (Wagner ym. 2013, 19.)

Eniten käytettyjä moottoreita suurimmissa ekstruudereissa ovat tasavirtamoottorit eli DC-moottorit. DC-moottorin on pyörittävä täysillä kierroksilla, jotta se tuottaisi suurimman väännön. Moottori on kiinni vaihteistossa, mikä eri kokoisten rattaiden ja niiden välitysten avulla pienentää/säätää oikeanlaisen nopeuden ruuville. Vaihteiston voi jakaa suoraksi sekä epäsuoraksi järjestelmäksi. Suora järjestelmä pyörittää ruuvia suoraan vaihteiston rattaiden avulla (kuva 3) ja epäsuorassa järjestelmässä on myös rattaiden lisäksi yksi tai useampi hihna. (Wagner ym. 2013, 19 - 20.)

On myös käytetty hydraulimoottoreita ja vaihtosähkömoottoreita eli AC-moottoreita. Nopeudensäätö tekee AC-moottoreista ylivoimaisimman. AC-moottorin ei myöskään tarvitse pyöriä täydellä nopeudella tuottaakseen suurimman väännön. Nämä asiat tekevät AC-moottoreista myös taloudellisemman ratkaisun kuin DC-moottoreista. (Wagner ym. 2013, 19.)



Kuva 3. Suora järjestelmä (Wagner ym. 2013, 19.)

3.2.2 Syöttöjärjestelmä

Syöttöjärjestelmän oleellisin osa on syöttökaukalo, joka toimii ja muistuttaa hyvin paljon suppiloa. Yksiruuviekstruuderissa käytetään neljää eri tapaa syöttää polymeeri ekstruuderiin. Yleisin on tavallaan ylisyöttö eli syöttökaukalo voidaan täyttää polymeerillä, jolloin painovoima valuttaa sen ruuville. Ylisyötössä tuotantonopeus on suoraan verrannollinen ruuvinopeuteen. Auttavaa syöttöä käytetään alhaisen tiheyden omaavilla ja hankalasti syötettävien materiaalien kanssa. Auttavassa syötössä on käytetty ruuvia syöttökaukalon sisällä, mikä pakottaa materiaalin kulkeutumisen ekstruuderiin ja sen avulla nostattaa tuotantonopeutta. Sulasyötöllä sulatetaan materiaali ensin jollain muulla laitteella tai toisella ekstruuderilla, jolloin itse syötettävän ekstruuderin ei tarvitse olla niin suuri, koska sulatus-työ on jo tehty. (Wagner ym. 2013, 7 - 8.)

Sitten neljäs eli annosteleva syöttöjärjestelmä, jota täytyy käyttää kaksoisruuviekstruuderissa. Annostelevassa syöttöjärjestelmässä on jokin säädettävä ja annosteleva laite, joka annostelee polymeeriä oikealla nopeudella ruuvin nopeuteen nähden. Annostelijoisakin hyödynnetään erilaisia ruuvin avulla toimivia ratkaisuja säädeltävyyden takia. Syötön nopeus siis määrää tässä tapauksessa tuotantonopeuden eikä ruuvin nopeus. Ruuvin nopeus pitää aina tasapainottaa syötön nopeuden kanssa, jotta ruuvi ei hajoaisi liian suuren väännön takia. (Wagner ym. 2013, 136.)

Tämän työn ekstruuderissa on nykyään kolme syöttöjärjestelmää, joista kaksi on eri materiaaleille ja yksi lisäaineille esimerkiksi liukaste aineelle (kuva 4). Syöttökaukaloissa on ruuveilla toimivat annostelijat, joiden nopeutta säätämällä säätyy syötön nopeus sekä seos-suhde materiaalien ja lisäaineiden välillä. (Asikainen & Koivula 2020, 17.)



Kuva 4. A.S.T. -yhtiön valmistaman ekstruderin annosteleva syöttöjärjestelmä (Heikkinen 2020.)

3.2.3 Sylinteri

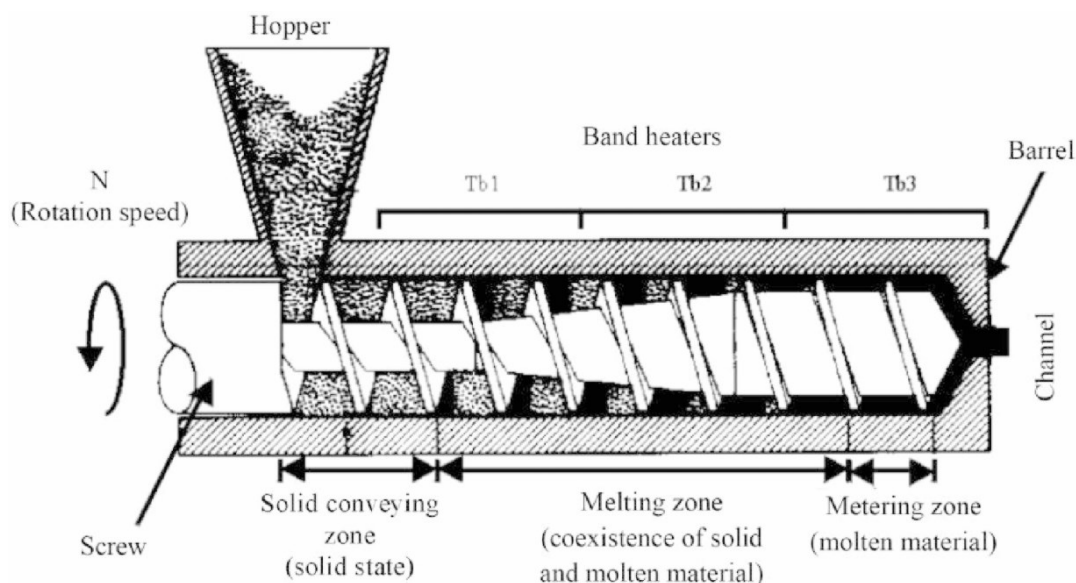
Sylinterin sisällä koko prosessi käytännössä tapahtuu. Sylinteri on isossa osassa prosessia siinä, että yhdessä ruuvin kanssa se määrittää ekstruderin suorituskyvyn. Polymeerin kosketus sylinterin sisäseinämään ja ruuvin kierteet määrittävät materiaalivirtauksen. Polymeerin juutuessa sylinterin sisäseinämään ei ole niin paha kuin sen juuttuminen ruuviin. Sylinterit voidaan jakaa sileäpintaisiin ja kaiverrettuihin sylintereihin. Sileäpintaiset ovat yleisempiä yksinkertaisemman geometrian takia. Kaiverretuilla sylintereillä on tarkoitettu kasvattaa polymeerin kulkeutumismäärää, kitkaa ja sulautumista sylinterin sisäseinämää vasten. (Lafleur & Vergnes 2014, 38 - 39.)

Sylinterissä on myös lämmitysyksiköitä ja jäähdytyskanavia. Lämmitysyksiköiden eli lämpösähköparien (lämpötila-antureiden) avulla ja säädettävien lämpövastusten tehtävä on auttaa ekstruderia pitämään massaa oikean lämpöisenä, koska pelkkä ruuvin kitka ei aina riitä. Niiden avulla saadaan säädettyä lämpötilaa sylinterin pituudelta alueittain ja ne myös ehkäisevät kylmiä ja kuumia yksittäisiä kohtia. Jäähdytyskanavat estävät sylinterin liiallista lämpenemistä, jotta se ei ylikuumenisi. Jäähdytyksestä tulee enemmän ja tarkempaa tietoa myöhemmin. (Wagner ym. 2013, 22 - 23.)

3.2.4 Ruuvi

Ruuvien tai ruuvien ympärillä koko ekstruusio tapahtuu. Suurin osa lämmöstä syntyy leikkauksen aiheuttamasta kitkasta, minkä taas ruuvien kierteet aiheuttavat sylinteriä vasten työntäessä materiaalia eteenpäin. Siinä samalla koko massa valmistuu suutinta varten ja lämpöhän on koko ekstruusiossa tärkeintä polymeerin muokkauksen ja uuden koostumuksen luomisen kannalta. (Wagner ym. 2013, 50 - 51.)

Ekstruuderin ruuvilla tai ruuveilla ei ole vakio geometriaa vaan se on yleensä muuttuva siten, että ruuvien sisähalkaisija kasvaa ja ruuvien kierteiden korkeus laskee prosessin etene-
misen mukaan. Ruuvien voi jakaa pituudeltaan toiminnallisiin alueisiin (kuva 5). Syöttökaukalon alapuolelta lähtevän alueen alussa materiaali on vielä samassa muodossa kuin syötettäessä eli kiinteässä muodossa. Tässä syöttövyöhykkeeksi kutsutussa vaiheessa polymeeri alkaa sulamaan ja työntymään eteenpäin seuraavalle alueelle. Kuten kuvasta näkyy, ruuvien geometria muuttuu pidemmälle mentäessä. Se on tässä vaiheessa vielä muuttumaton. Seuraavassa eli sulatus- tai kompressiovyöhykkeessä ruuvien geometria muuttuu suuresti. Tässä vaiheessa myös ylimääräinen ilma poistuu syöttökaukalon suuntaan, jotta lopputuotteesta ei tule vaahtomuovimaista. Polymeeri on tämän vaiheen lopulla jo sulanut kunnolla, jonka jälkeen se siirtyy viimeiselle vyöhykkeelle. Viimeisellä eli kuljetusvyöhykkeellä ruuvien kierteiden korkeus on matalimmillaan ja ruuvien sisähalkaisija korkeimmillaan verrattuna syöttövyöhykkeeseen, mutta se pysyy samana loppuun asti. Tämän vyöhykkeen tarkoitus on homogenisoida massa suutinta varten. (Lafleur & Vergnes 2014, 40 – 45.)



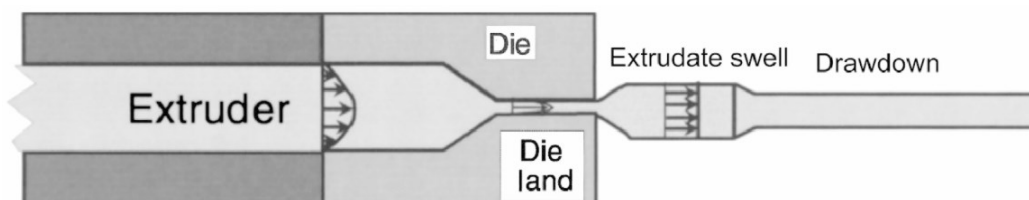
Kuva 5. Ruuvien toiminnalliset alueet (Lafleur & Vergnes 2014, 40.)

Ruuvimittana käytetään L/D-suhdetta (flighted length of screw/outside diameter of screw) eli ruuvimittana käytetään sen halkaisijaa, jonka mukaan pystyy muun muassa havainnollistamaan ekstruuderin pituuden hankinta vaiheessa. Yleisimpiä ruuvien L/D-suhteita ovat: 18:1, 20:1, 24:1, 30:1, 36:1 ja 40:1. Mitä suurempi L/D-suhteella ruuvilla on sitä paremmin se sekoittaa ja sulattaa polymeeriä, joka taas nostaa ekstruuderin tuotantokapasiteettia. Pienemmällä L/D-suhteella olevat ekstruuderit ovat kevyempiä ja lyhyempiä. (Wagner ym. 2013, 18 – 19.)

3.2.5 Suutin

Ekstruusion viimeisessä vaiheessa muovattava tiivistetty massa menee suuttimen reiän tai reikien läpi. Reiän muoto määrittää suoraan lopputuotteen poikkileikkauspinnan. Suuttimella on myös vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin ja pinnanlaatuun, koska se ohjaa molekyylien pyörimistä polymeereissä. Suuttimen yhteydessä voi olla myös reikälevy ja soviteosa. Reikälevyn ja siinä kiinni olevan sihtikiekon tarkoitus on tasata ja suoristaa sulan polymeerimassan virtaamista suuttimessa. Se myös toimii tiivisteinä soviteosan ja ekstruuderin välillä sekä poistaa epäpuhtauksia polymeerimassasta sihtikiekon kalvomaisen metalliverkon avulla. Soviteosaa täytyy käyttää, jos suutin ei ole suunniteltu juuri tiettyä ekstruuderia varten esimerkiksi ekstruuderit ja suutin ovat eri valmistajilta. (Wagner ym. 2013, 8.)

Suuttimessa oleva suuremman paineen ero ulkona olevaan pienempään paineeseen ja polymeerin ominaisuudet, kuten muodon muistiominaisuus ja normaali-jännitys aiheuttavat pientä suutinpaisumaa. Suutinpaisumassa poikkileikkaus levenee suuttimen jälkeen (kuva 6). Tätä voidaan ehkäistä säätämällä ekstruuderin ulostulon ja vetokoneen nopeudet yhtä suuriksi sekä suuttimen pituus vaikuttaa siihen myös. Varsinaisen suuttimen kanavan tarpeeksi pitkä pituus vaikuttaa lopulliseen laatuun vähentämällä tätä paine-eroa. Suuttimesta on myös mahdollista mitata lämpötilaa. (Wagner ym. 2013, 9.)



Kuva 6. Suutinpaisuma (Wagner ym. 2013, 9.)

3.3 Säätolaitteet ja monitorointi

Ekstruudereissa on myös säätimiä ja monenlaisia mittauslaitteita. Niiden kaikkien oikein säädettyjen parametrien avulla on tarkoitus saada mahdollisimman laadukasta lopputuotetta eri polymeereistä. Erilaiset muovit ja lisäaineet käyttäytyvät erilaisesti, kuten sulavat eri lämpötiloissa ja kulkeutuvat sekä sekoittuvat erilaisesti ekstruuderissa, joten säätömahdollisuudet ovat oltava mahdollisimman laajat etenkin, kun käsitellään useampia materiaaleja. (Wagner ym. 2013, 144.)

Monitoroinnissa voidaan mitata monenlaisia arvoja. Tärkeimpiin niistä kuuluu sylinterin lämpötila. Tätä lämpötilaa voidaan mitata koko putken pituudelta tai sitten alueittain. Toinen hyvin tärkeä on ekstruuderin moottorin ottaman virran mittaus, pyörimisnopeus ja vääntömomentti. Muita mitattavia arvoja ovat ruuvin nopeus, sulaneen massan lämpötila ja paine, raan materiaalin lämpötila sekä syöttökurkun ja sylinterin yksittäisten alueiden jäähdytysveden lämpötila. (Wagner ym. 2013, 145.)

Varsinaisia säätimiä on ekstruudereissa mittareita vähemmän. Alueittaisia lämpötiloja voidaan säätää lämpövastusten avulla nostamalla lämpötilaa säätimellä mitä lämpösähköpari mittaa, jolloin vastus menee päälle ja taas vähentämällä sitä vastus lopettaa lämmittämisen. Lämmitysvastuksia käytetään myös ekstruuderin esilämmitykseen. Ruuvin nopeutta voidaan myös säätää tuotantomäärään ja syöttönopeuteen soveltuvaksi. Tietenkin esimerkiksi annostelevan syöttökaukalon annostelun ja muiden lisälaitteiden, kuten esimerkiksi vetäjän parametrit ovat säädettävissä. (Wagner ym. 2013, 145 -146.)

4 ERILAISET EKSTRUUDERIT

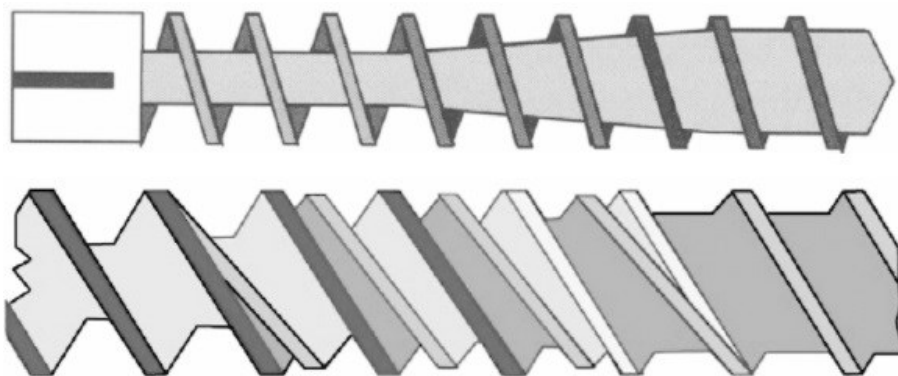
Kaikki ekstruuderit toimivat samalla periaatteella toteuttaen ekstruusion. Erilaisissa ekstruudereissa on kuitenkin eroja rakenteellisesti ja toiminnallisesti. Suurimmat rakenteelliset erot ovat ruuvissa tai ruuveissa.

Sylinterit ovat myös erilaisia esimerkiksi kaksoisruuviekstruuderin sylinteri on kaksikanavainen eli kumpikin ruuvi on asetettu omaan kanavaansa, mutta niiden väli on kuitenkin avonainen, jotta polymeeri liikkuisi kanavien välillä. Yksiruuviekstruuderin sylinteri on vain putkimainen yhtä ruuvia varten. Nämä erot vaikuttavat siihen mitä materiaalia sillä voidaan työstää ja kuinka tehokkaasti.

4.1 Yksiruuviekstruuderit

Yksiruuviekstruuderit ovat yleisin ekstruuderit sen yksinkertaisimman rakenteen, toimintamallin ja myös halvimman hinnan takia, vaikka eroavaisuus kaksoisruuviekstruuderin kanssa ei ole mikään iso. Tämä tarkoittaa myös, että yksiruuviekstruuderia on helpompi korjata sekä huoltaa. Yksiruuviekstruuderia voidaan ajaa korkeilla kierroksilla, mutta tuotanto on silti alhaisempi kuin kaksoisruuviekstruuderilla. (Wagner ym. 2013, 74 - 76.)

Monikierteisellä barrier-ruuvilla saa aikaan suuremman sulatuskapasiteetin verraten perinteiseen yhden kierteen ruuviin. Kuvassa 7 näkyy ylempänä perinteinen yhden kierteen ruuvi ja alempana barrier-ruuvien kaksoiskierre, minkä toinen kierre päättyy yhdistymällä ensisijaiseen kierteeseen. Yhdistyminen tapahtuu keskellä olevan sulatusvyöhykkeen lopussa. Kierteet siis jakavat sulan ja vielä kiinteän massan helpottaen homogenointia. Polymeereissä yleensä menee niin, että jollei yksiruuviekstruuderilla voida prosessoida tai saada hyvää lopputulosta niin silloin käytetään kaksoisruuviekstruuderia, koska kaikki polymeerit eivät liiku yhden ruuvien avulla niin hyvin prosessissa. (Wagner ym. 2013, 74 - 76.)

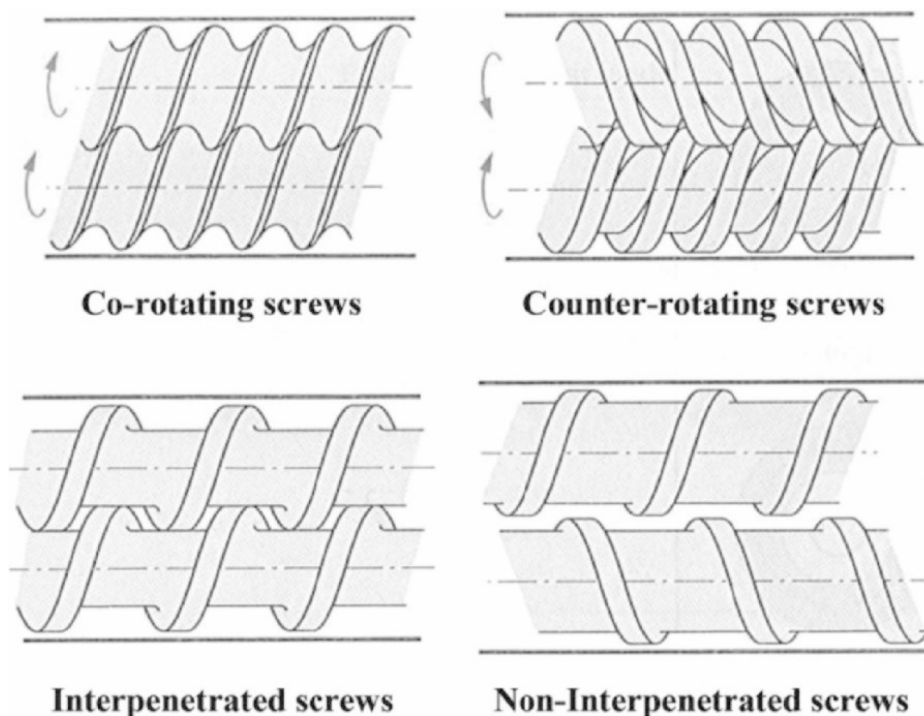


Kuva 7. Ylempänä perinteinen yksiruuviekstruuderin ruuvi ja alempana barrier-ruuvien kierteistä havainnointikuva (Wagner ym. 2013, 75.)

4.2 Kaksoisruuviekstruuderit

Kaikki ekstruuderit ovat toimintaperiaatteeltaan hyvin samalaisia, mutta kaksoisruuviekstruuderit on tuotantokapasiteetiltaan ja työstämisessä aiheutuissa kuluissa eli kilowatti jaettuna kilogrammalla paras vaihtoehto eri ekstruudereihin verrattuna. Myös työstettävien materiaalien määrä on todella laaja, joten yleensä valitaan kaksoisruuviekstruuderin tehokkuuden takia erilaisissa muovinjalostamoissa, vaikka se onkin suhteellisen hintava vaihtoehto. (Lafleur & Vergnes 2014, 109.)

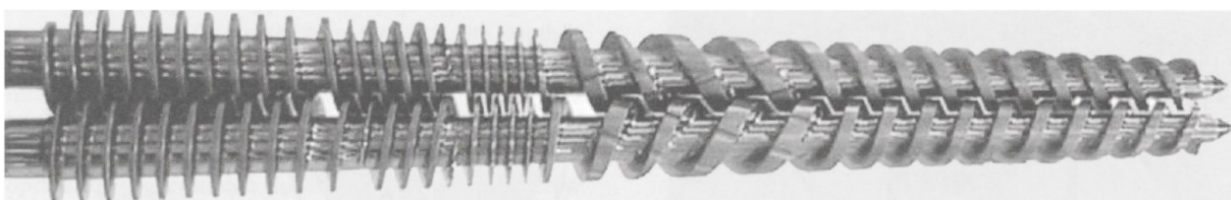
Kaksoisruuviekstruuderissa on nimensä mukaan kaksi ruuvia ja ne yleensä luokitellaan kahdella valintaperusteella lopullisen käyttötarkoituksen takia. Ruuvit joko pyörivät samaan suuntaan tai erisuuntaan ja niiden kierteiden harjat voivat mennä toistensa välissä tai tavallaan erillään, riippuen onko ruuvien halkaisija suurempi kuin ruuvien etäisyys toisistaan (kuva 8). Nämä asiat vaikuttavat siihen, mitä materiaalia niillä voidaan ajaa, joka taas vaikuttaa siihen mihin niitä käytetään. Vastakkaisiin suuntiin pyörivät ruuvit, jossa ruuvien harjat menevät ihan kunnolla toistensa välissä ovat yleisimpiä kaksoisruuviekstruudereissa, koska niissä on todella hyvä virtausnopeus massalle ja lisäaineiden sekoitettavuus, joten niillä pystyy valmistamaan hyvinkin monimutkaisia materiaaleja. Samaan suuntaan pyöriviä ruuveja käytetään taas hauraammille materiaaleille, jotka tarvitsevat hellävaraisempaa työstöä. (Wagner ym. 2013, 125 – 129.)



Kuva 8. Ruuveista käytetyt jaotteluperusteet (Lafleur & Vergnes 2014, 110.)

Kaksoisruuviekstruuderin ruuvit voivat olla myös geometrialtaan kartiomaisen tai ihan vain tasaisen suoran muotoisia. Kartiomaisten ruuvien omaavassa kaksoisruuviekstruuderissa ruuvien ja sylinterin halkaisija on suurimmillaan syöttöaukon kohdalla ja pienenee eteenpäin mentäessä suuttimelle (kuva 9). Suorien ruuvien omaava kaksoisruuviekstruuderin on taas ruuviltaan ja sylinteriltään tasapaksuinen. (Wagner ym. 2013, 125.)

Kartiomaisissa kaksoisruuveissa on 40% suurempi kierteen seinämän pinta-ala verraten suoriin kaksoisruuveihin, minkä takia kartiomaiset kaksoisruuvit siirtävät lämpöä paremmin materiaaliin. Tämän takia myös kartiomaiset kaksoisruuvit tuottavat vähemmän leikkuun aiheuttamaa kitkalämpöä, mutta taas tuottavat paljon enemmän johtuvaa lämpöä kuin suorat kaksoisruuvit. Valtamuovi PVC:n työstö on siis huomattavasti tehokkaampaa kartiomaisilla kaksoisruuveilla, koska PVC on herkkää leikkuusta aiheutuvalla kitkalla. (Wagner ym. 2013, 143 - 144.)



Kuva 9. Vastakkaiseen suuntiin pyörivät kartiomaiset ruuvit (Wagner ym. 2013, 125.)

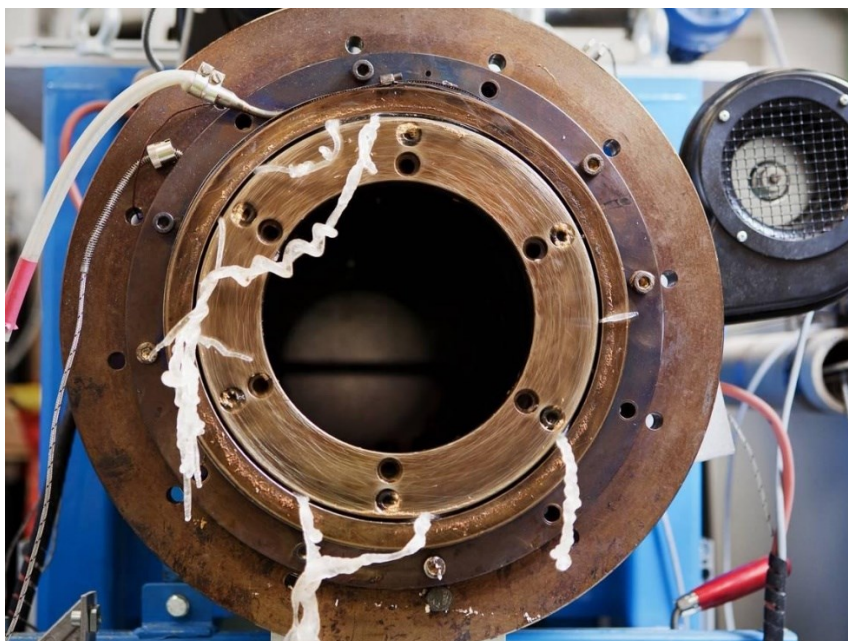
Kaksoisruuviekstruuderilla onnistuu kompaundointi erittäin hyvin ja se on yksi sen pääasiallisista käyttötarkoituksista profiilieksruusion ja muutaman muun menetelmän lisäksi. Kompaundointi terminä tarkoittaa sekoittamista useiden polymeerien ja lisäaineiden kesken ekstruuderin sisällä. Kompaundointi myös yhdistää kiinteän ja sulan aineen, joten lisäaineita voidaan syöttää eri kohdista. Lisäaineet ovat usein pulvereina, mutta voivat olla jopa nestemäisessä muodossa. Lisäaineilla pyritään parantamaan tai muokkaamaan lopputuotteen ominaisuuksia, kuten mekaanisia ominaisuuksia, iskun- ja tulenkestävyyttä, väriä ja UV-suojaa. Suutin on kompaundoinnissa moni reikäinen, josta leikataan pellettejä valmiiksi seuraavia käyttökohteita varten. (Wagner ym. 2013, 193 – 195.)

4.3 Lieriökstruuder

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy on kehittänyt uudentyyppisen ekstruuderin nimeltään lieriökstruuder viimevuosien aikana. Tässä ekstruuderissa ekstruusioprosessi tapahtuu niin, että ruuvi työntää materiaalimassaa pyöriessään onton sylinterin päällä (kuva 10). Ruuvien halkaisija on tässä ekstruuderissa tai ainakin prototyypissä 30 senttimetriä eli se on todella iso verraten perinteisiin ekstruudereihin. (Virtanen 2019.)

Lieriökstruuderilla voidaan käsitellä ja sekoittaa hankalia materiaaleja, kuten tekstiili- ja muovijätteitä, hävikkiruokaa ja komposiittimateriaaleja sekä muita kevyitä ja alhaisen tiheyden omaavia materiaaleja suuren ruuvien halkaisijan ja matalan ruuvisolun ansiosta. (Virtanen 2019.)

Ekstruuderina lieriökstruuder on myös suhteellisen lyhyt pituudeltaan, mikä helpottaa sen siirtämistä sinne missä sitä tarvitaan ja se on muutenkin halvempi investointi kuin kaksoisruviekstruuder. Ontto sisänsylinteri auttaa lämpötilojen säätelyssä, koska sitä voidaan myös jäähdyttää tai lämmittää sisältäpäin suurella kosketuspinta-alalla, joka taas mahdollistaa koneen pidempiä käyttöaikoja. Lieriökstruuderin suulake on ympäri pyöreä, mikä myös edesauttaa katkeamattoman/määrämittaisen kuidun ulos tulemisen ekstruusion jälkeen, vaikka sekoitettuna toisen materiaalin kanssa. (Virtanen 2019.)



Kuva 10. Lieriökstruuderin pyörsuulake (Virtanen 2019.)

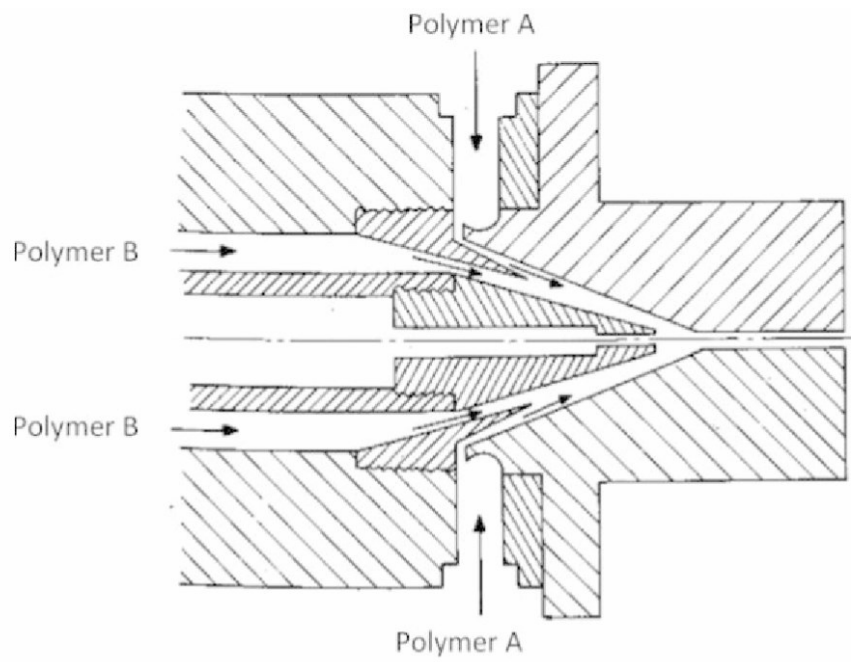
5 LISÄLAITTEET JA MENETELMÄT

Ekstruuderi on yleensä aina osana suurempaa kokonaisuutta. Ekstruuderilinjoissa liitettyistä lisälaitteista vetäjä yhdessä leikkurin tai kelaajan kanssa on yleisin lisälaitteisto. Siinä saattaa olla myös jäähdytysallas välissä, mikä jäähdyttää lopputuotetta ekstruusion jälkeen. Tätä kutsutaan suoraksi ekstruusioksi ja se on käytetyin kaikista menetelmistä. Suoralla ekstruusiomenetelmällä valmistetaan erilaisia profiileja ja putkia. On myös paljon muitakin monimutkaisempia menetelmiä. Lisälaitteiden tarkoitus on käsitellä lopputuotetta ekstruusion jälkeen. Lisälaitteet toimivat työkaluina tehden ekstruudereista monikäyttöisempiä, mikä taas mahdollistaa monien erilaisten tuotteiden valmistamisen. (Wagner ym. 2013, 118 – 119.)

5.1 Koekstruusio

Koekstruusiossa syötetään kahden tai useamman ekstruuderin avulla erilliseen suuttiin eri polymeerejä kerrosmaisesti. Erilaisia polymeerejä sekoitetaan sen takia, että niistä saadaan yhdistettyä parhaimpia ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa kosteuden ja lämmön sekä hapensietokyky. Koekstruusiossa myös yhdistellään eri värejä ja nostetaan lopputuotteen pinnan kovuutta sekä laatua. (Wagner ym. 2013, 449.)

Tätä menetelmää käytetään esimerkiksi kaapelien eristämisessä (kuva 11). Kuvassa näkyy kanava varsinaiselle johtimelle keskellä ja eristeeksi syötettävät polymeerit. Koekstruusiossa käytetään myös taloudellisista syistä. Laittamalla pinnalle vahvempaa ja laadukkaampaa polymeeriä ja sisälle heikompaa esimerkiksi kierrätysmateriaalia tekee koekstruusiossa taloudellisen vaihtoehdon, mutta kaikki polymeerit eivät sekoitu keskenään. Keskenään sekoittumattomia polymeerejä voidaan kuitenkin yhdistellä lisäämällä sidosaineita. (Wagner ym. 2013, 449 – 450.)

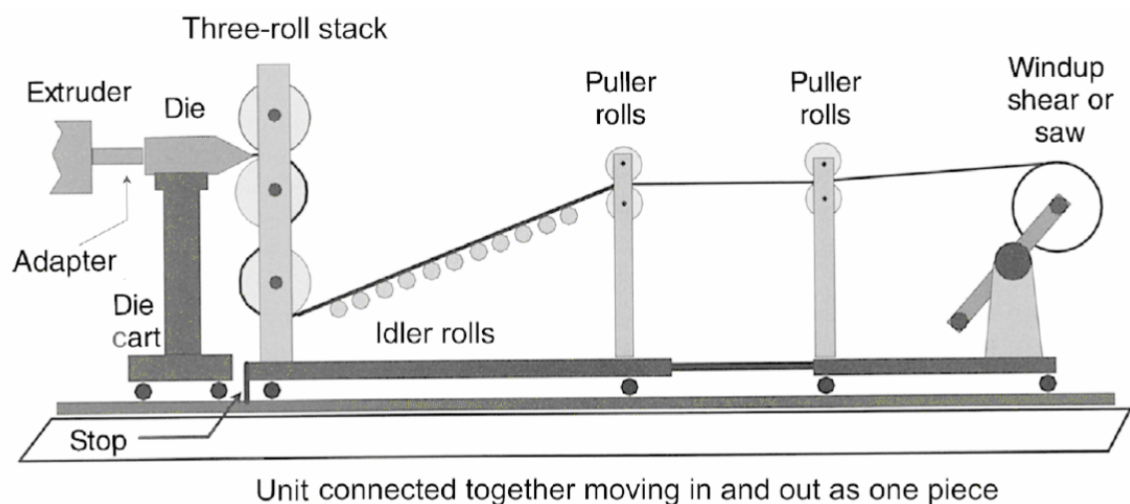


Kuva 11. Koekstruusiossa käytettävä painesuutin kaapelin eristämiseen (Lafleur & Vergnes 2014, 309.)

5.2 Kalvoekstruusio

Kalvoekstruusioilla valmistetaan muovisia tasaisia kalvoja tai levyjä. Tässä menetelmässä kalvoksi luokitellaan ohuempat kuin 0.254 millimetriä ja tätä suuremmat levyiksi. Kalvot kelautuvat rullalle ja levyt leikkaantuvat mittoihinsa sekä asettuvat pinnoon tämän menetelmän loppuvaiheessa. (Wagner ym. 2013, 517.)

Tämä lisälaitte koostuu erilaisista rullista, jotka ovat joko vetäviä tai vaan kuljettamiseen ja ohjaukseen tarkoitettuja (Kuva 12). Kalvoa valmistettaessa on myös yksi tai useampi jäähdytysrulla suuttimen jälkeen. Tämän työkalun suutin täytyy olla hyvinkin erilainen. Useimmiten suuttimen leveys on välillä 0.6 – 3 metriä, eli se voi olla todella leveä. Sulan polymeerin täytyy levittäytyä tasaisesti koko suuttimen pituudelta, joten suuttimen lämpötilan kontrollointi koko alueelta on tärkeää. Suutin yhdistetään siirtoputkella ekstruuderiin ja siihen on asetettu lämpövastukset lämmittämään putkea tasaisesti. Kalvoekstruusio menetelmää voidaan käyttää yksiruuviekstruuderilla tai kaksoisruuviekstruuderilla. (Wagner ym. 2013, 517 – 519.)

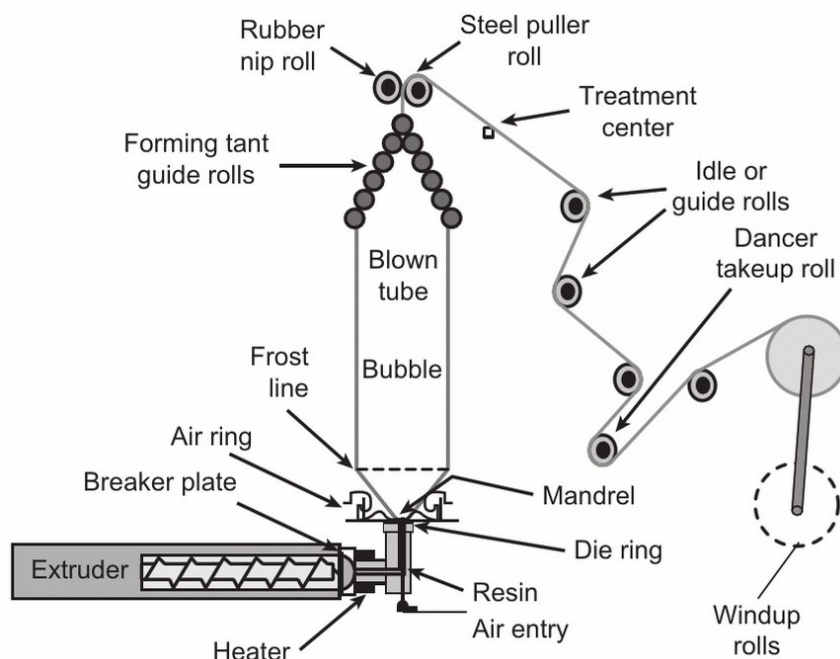


Kuva 12. Kalvoekstruusiolinjasto levyn valmistuksessa (Wagner ym. 2013, 518.)

5.3 Puhalluskalvoekstruusio

Tällä menetelmällä valmistetaan kalvoa isommalla mittakaavalla määrällisesti kuin kalvoekstruusioilla. Suutin on puhalluskalvoekstruusiossa rengasmaisen toisin kuin kalvoekstruusioissa, joka on tasaisen suoran viivan muotoinen. Rengasmaisen muodon takia kalvosta tulee kupla, joka puhalletun ilman avulla muuttuu kalvon paksuiksi putkiloksi. Tämän jälkeen kalvo jäähdytetään ilmalla sisäisesti tai ulkoisesti ja vedetään vetävällä rullalla (kuva 13). Vetäminen yleensä tehdään pystysuunnassa ylöspäin, mutta sen voi myös vaihtoehtoisesti vetää vaakasuorasti tai alaspäin. Rullilla kalvo myös valssataan yhteen, jonka jälkeen kalvo kelataan valmiina yleensä rullalle. Vedettävän putkilon paksuutta on mahdollista säätää samalla suuttimella, mikä tekee siitä hyvin käytännöllisen. Puhalluskalvoekstruusiossa käytetään yksiruuviextruderia, koska se on pienempi ja yksinkertaisempi. (Wagner ym. 2013, 539.)

Tällä menetelmällä saadaan tehtyä myös leveämpää kalvoa halkaisemalla putkilo työkalun kanssa pystysuuntaisesti kerran, jolloin koko putkilon kehä muuttuu kalvon leveydeksi. Kaksi kertaa halkaistaessa kummaltakin puolelta putkiloa saadaan siis kahta kalvoa samaan aikaan. Muovipussit ovat hyvä esimerkki, mitä tällä menetelmällä muun muassa voidaan valmistaa. (Wagner ym. 2013, 540.)

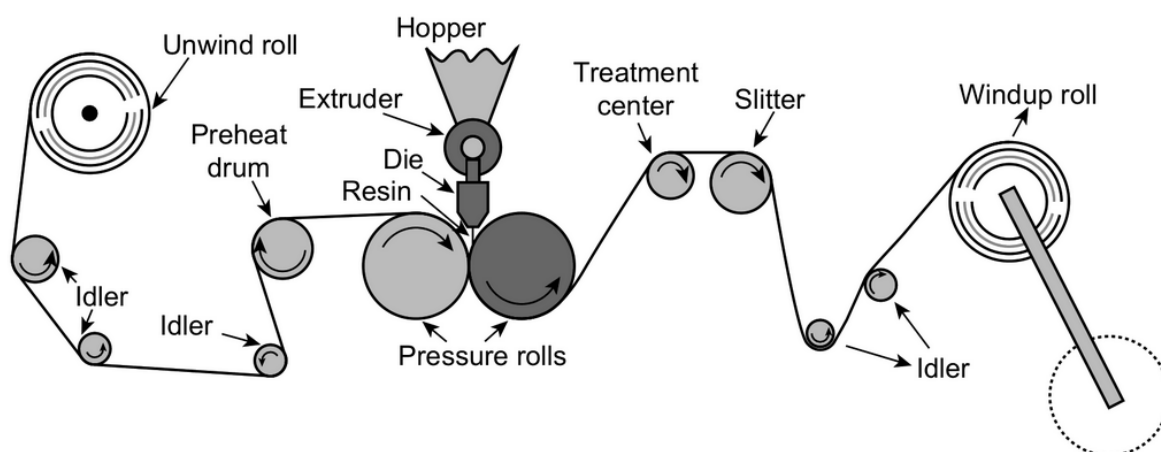


Kuva 13. Puhalluskalvoekstruusio (Wagner ym. 2013, 540.)

5.4 Ekstruusiopäällystys

Päällystys- tai laminointimenetelmää käytetään nimensä mukaisesti eli sen avulla päällystetään ekstrudoitulla muovilla erilaisia materiaaleja. Tätä menetelmää kutsutaan myös kulmaekstruusioksi, koska se on yleensä asetettu keskelle ja vaakatasoon linjastoa syöttämään muovia kulmassa olevan suuttimen avulla päällystettävän materiaalin päälle. Päällystettävä materiaali suoristetaan ja esilämmitetään, jotta ekstrudoitu muovi tarttuu siihen paremmin (kuva 14). (Wagner ym. 2013, 551.)

Päällystysmenetelmän tärkeimpänä tavoitteena on yhdistää eri materiaalien parhaimmat ominaisuudet siitä syntyvään tuotteeseen, jotta päällystyksen jälkeistä tuotetta voidaan käyttää sovellutuksiin mihin prosessissa yhdistettävät materiaalit eivät muuten kykenisi. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi suoja vedelle tai kemikaaleille. Muovilla päällystettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi paperi, pahvi, metallit, kankaat ja muut muovit. (Wagner ym. 2013, 551 - 552.)



Kuva 14. Ekstruusiopäällystyksen kokoonpanokuva (Wagner ym. 2013, 552.)

5.5 Granulointi

Lähes kaikissa ekstruuderilinjastoissa käytetään granulaattoria. Se voi olla joko yhdistettynä suoraan ekstruuderiin tai se voi olla irrallinen. Granulaattori leikkaa terän avulla vakiokokoisia pellettejä ekstruusion jälkeen. Vakiokokoinen granulaatti on hyvin yleinen muovin muoto raaka-aineena, joten granuloinnin avulla saadaan kasvatettua muovin arvoa ja sen käytettävyyttä, koska todella moni jälkituotantoprosessi käyttää granulaatteja. Granulaattori on erittäin hyvä kierrätyksessä yhdessä ekstruuderin kanssa, koska sillä saadaan jätemuovista tehtyä uudenveroista granulaattia uusiokäyttöön. Myös tavalla tai toisella piloilta menneitä tai huonolaatuisia ekstruuderin lopputuotteita voidaan laittaa

uudestaan ekstruuderiin ja granuloida, jopa keskellä prosessia. (Wagner ym. 2013, 425 – 426.)

Granulointi on hyvä suorittaa ekstruusion yhteydessä, koska granulointi on sulatusprosessi. Muovin sulattaminen on ilman ekstruuderiä yleensä kallista, koska siihen vaaditaan paljon energiaa. Tämän takia esimerkiksi kaksoisruuviekstruuderi on erittäin hyvä granulaattien valmistusprosessissa. (Järvelä & Järvelä 2015, 21.)

5.5.1 A.S.T. -yhtiön granulaattori

A.S.T. -yhtiön 80-luvulla valmistama granulaattori toimii siten, että ekstruuderi syöttää ekstruusion jälkeen granulaattoriin massan, jonka granulaattori vetää nauhamaiseen muotoon (kuva 15). Tässä granulaattorissa on kaksi lämmistysvastusta, jotka pitävät massan sulana granulaattorin moni reikäisen levyn läpi työnnettäessä, jolloin massa menee leikkuuterälle useampana nauhana ja leikkaantuu granulaateiksi. Leikkaamisen jälkeen granulaatit putoavat veteen jäähtymään, jonka jälkeen ne kulkeutuvat veden mukana kaukalossa kuivausrumpuun. Jäähdyttämällä pelletit pitävät muotonsa. Granulaatin kokoa säädetään leikkuuterän kierrosnopeutta ja ekstruuderin ajamisnopeuksia säätämällä.



Kuva 15. A.S.T. -yhtiön valmistama granulaattori, jonka takana näkyy granulaattien kuivausrumpu

6 EKSTRUUDERIN JÄÄHDYTTÄMINEN

Ekstruuderin jäähdyttämiseen on monia syitä. Sillä pyritään säätämään ekstruuderin lämpötilaa sylinterin alueelta ja syöttöjärjestelmän alapuolelta, jotta muovi ei sulaisi ennen ruuvia. Lisälaitteet ovat usein myös liitetty samaan jäähdytysjärjestelmään esimerkiksi jäähdytysallas lopputuotteelle.

Jäähdytysjärjestelmällä myös pyritään muun muassa ehkäisemään tuotantonopeuden hidastuminen, lopputuotteen laadun heikentyminen, ruuveihin takertuminen sekä ekstruuderin ylikuumentuminen. Ylikuumentuessaan lopputuote menee piloille tai pahimmassa tapauksessa ekstruuderin itsessään hajoaa.

Ekstruuderin jäähdyttämisen pystyy toteuttamaan monella tavalla. Ilmajäähdytystä on myös käytetty vastaavanlaisissa koneissa, mutta ne ovat olosuhteille enemmän alttiita sekä jäähdytysteholtaan huomattavasti heikompia kuin nestejäähdytysratkaisut, koska vedellä on todella hyvä kyky varastoida lämpöenergiaa. Ilmajäähdytyksessä ei tosin tarvitse suunnitella ja rakentaa niin monimutkaista putkiverkostoa, joten se olisi kaikista helpoin ja yksinkertaisin ratkaisu.

Tämän opinnäytetyön ekstruuderissa suljettu vesikiertojärjestelmä on paras mahdollinen ratkaisu, koska tätä kyseistä ekstruuderia on suunniteltu käytettävän siirrettävässä kontissa ja siinä on valmiina avoimelle vesijohtovedelle suunniteltu jäähdytysjärjestelmä, joka on hyödynnettävissä suljetulle vesikiertojärjestelmälle.

Suljetun jäähdytysjärjestelmän pystyy toteuttamaan yksikertaisemmin paineettomalla säiliöllä, jossa vesi vaihdetaan sen jälkeen, kun se on lämmennyt liikaa. Toinen vaihtoehto miten suljetun jäähdytysjärjestelmän pystyy ekstruuderissa toteuttamaan on jäähdyttimen käyttäminen, jolloin vesi kulkeutuu jäähdyttimen lävitse jäähtyen. Jäähdytysratkaisussa pitää mitata oikean kokoinen jäähdytin, josta tulee myöhemmin lisää.

Suljetun jäähdytysjärjestelmän hyötynä avoimeen kiertämättömään vesijäähdytykseen on taloudellisuus veden käyttömäärässä, eikä vettä mene niin paljoa hukkaan säiliöratkaisussa. Jäähdyttimen kanssa vettä ei mene hukkaan ollenkaan ja sen avulla saadaan pidettyä jatkuva tasainen veden lämpö.

Jäähdytystehoa laskettaessa pitää ottaa huomioon monia asioita. Jos käytetään säiliötä missä pumppu pumppaa pohjalta niin lämpömäärän kaava on tässä tärkein, koska kysymyksessä on vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä ja veden ominaislämpökapasiteetti määrittää veden lämpenemisen. Myös jäähdytysratkaisussa pitää ottaa huomioon jäähdytysnesteeseen ominaislämpökapasiteetti.

6.1 Säiliöratkaisu

Säiliöratkaisu toimii veden vaihto periaatteella. Vettä siis pumpataan paineettoman säiliön pohjasta pumpulla kiertämään ekstruuderin jäähdytyskanavissa. Vesi palautuu takaisin säiliön toiseen päähän yläpuolelle. Tämä kierto jatkuu niin kauan, kunnes vesi on lämmennyt liikaa, eikä sovellu enää jäähdytykseen.

Vesi vaihdetaan tässä ratkaisussa lämpenemisen jälkeen, mutta on silti taloudellisempaa kuin avonainen järjestelmä, koska vesijohtoverkon puhdas vesi ei virtaa koko ajan viemäriin ekstruuderia ajettaessa.

Säiliön mitoituksessa pyritään laskemaan kuinka kauan ekstruuderia pystytään ajamaan tietyn kokoisella säiliöllä vaihtamatta jäähdytysvettä. Tähän vaikuttaa tietenkin se mitä polymeeriä sillä ajetaan. Säiliön mitoittamiseen täytyy laskea lämpömäärä sen vesimassan lämmitessä, joten lämpömäärän kaavasta pitää selvittää sen arvot (kaava 1).

$$Q = cm\Delta T$$

Kaava 1. Lämpömäärän kaava

Tässä kaavassa on ominaislämpökapasiteetti (tunnus c). Tiedämme veden ominaislämpökapasiteetin, joka on vakioarvo ja löytyy taulukkokirjasta eli $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$. Ominaislämpökapasiteetti tarkoittaa sitä, että kuinka paljon energiaa tarvitaan yhden kilogramman tässä tapauksessa vettä lämmittämiseen yhdellä asteella ylöspäin. Eli vedessä $4,19$ kilojoulen energialla saadaan lämmitettyä kilogramma vettä yhden celsiusasteen verran. Sitten on säiliön tilavuus eli veden massa (tunnus m) ja ΔT , joka kuvaa veden lämpötilan muutosta prosessissa (tunnus ΔT).

6.1.1 Säiliön tilavuuden laskeminen polyeteenille

Kun suunnitellaan, että polyeteeniä halutaan ajaa samalla jäähdytysvedellä 30 minuuttia putkeen. Niin saamme laskettua kuinka iso säiliö siihen pitää hankkia. Opinnäytetyöhöni liittyvällä ekstruuderilla pystyy ajamaan polyeteeniä enimmäkseen 200kg/h. Muitakin muoveja toki pystyy ajamaan tällä ekstruuderilla, mutta koska polyeteeniä on tässä ajeltu, niin lasketaan sen arvoilla. Polyeteenin ominaislämpökapasiteetti on 2,1 kJ/(kg * °C) ja sulatusenergia 290 kJ/kg. Polyeteeni myös kulkee hyvin ajossa 200°C lämpötilalla tällä ekstruuderilla. Kylmän vesijohtoveden lämpötila on noin 20 °C ja silloin, kun jäähdytysvesi täytyy vaihtaa, on sen lämpötila noin 50 °C. Näillä arvoilla saadaan laskettua polyeteenin lämpömäärä sulatuksessa (Q1) ja ajamisessa (Q2) (kaava 2).

$$Q1 = ml = 200kg/h * 290kJ/kg = 58000 kJ/h$$

$$Q2 = cm\Delta T = 2,1kJ/(kg * ^\circ C) * 200kg/h * (200^\circ C - 20^\circ C) = 75600 kJ/h$$

Kaava 2. Lämpömäärät polyeteenin sulatuksessa ja ajamisessa

Saatujen arvojen jälkeen on mahdollista laskea säiliön tilavuus kaavasta 3, jossa säiliön tilavuuden olen merkinnyt X-kirjaimella. Tämän koneen jäähdytysjärjestelmä toimii hyötysuhteella 0,5, joten Q1 ja Q2 on kerrottava kahdella ja lisättävä yhteen, jolloin saadaan niiden yhteinen lämpömäärä Q. Koska selvitän, kuinka suurella vesimassalla polyeteeniä pystyy jäähdyttämään 30 minuuttia, niin lämpömäärä veden jäähdytyksessä pitää olla puolet eli yhtä suuri kuin 0,5 tuntia, koska kJ jaettuna kJ/h jää pelkkä h (kaava 3).

$$Q = (Q1 + Q2) * 2 = 267200 kJ/h$$

$$t = \frac{Q3}{Q} = 0,5 h$$

$$Q3 = cm\Delta T =>$$

$$Q3 = 4,19 kJ/(kg * ^\circ C) * X * (50^\circ C - 20^\circ C) = 133600 kJ$$

$$X = \frac{133600kJ}{4,19kJ/(kg*^\circ C)*30^\circ C} = 1063kg$$

Kaava 3.

Vettä täytyy olla siis säiliössä 1063kg, jos halutaan ajaa puolituntia polyeteeniä säiliöratkaisussa, kunnes vesi täytyy vaihtaa. Vesi painaa kilogramman litra eli puolituntia polyeteeniä ajattaessa täytyy olla yli kuution säiliö. Tämä kaava toimii siis samalla lailla, jos vaihtaa vain jonkun toisen polymeerin arvot suoraan.

Lämpömäärän kaavaan voi syöttää massan yksikköön toisenkin arvon ja laskea, kuinka kauan sillä pystyy ajamaan polyeteeniä (kaava 3). Otan esimerkkinä 400 litraisen säiliön ja lasken, kuinka kauan ekstruuderia pystyy ajamaan ilman veden vaihtamista (kaava 4).

$$Q = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C}) * 400\text{kg} * (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 50280\text{kJ}$$

$$t = \frac{50280\text{kJ}}{267200\text{kJ}/\text{h}} = 0.19\text{h} = 12\text{min}$$

Kaava 4. Ajoaika 400-litraisella säiliöllä

6.2 Jäähdytinratkaisu

Jäähdytinratkaisuja käytetään, kuten säiliöratkaisua jäähdyttämään ekstruuderia ja/tai lopputuotetta. Jäähdytinratkaisussa vettä ei tarvitse vaihtaa ollenkaan paitsi tietenkin esimerkiksi lian, korroosion tai huoltotoimenpiteiden vaatiessa, jolloin se on taloudellisin ratkaisu ainakin veden kulutuksessa. Suurimmat kustannukset tulevat jäähdyttimen hankkimisessa ja sen asentamisessa, koska juuri oikeanlainen ja tilaan sopiva jäähdytin voi olla hyvinkin kallis. Tämä tietenkin aina tasapainottuu käytön mukaan.

Jäähdyttimen suunnittelussa tärkeintä on mitoittaa jäähdytin oikeankokoiseksi vastamaan lämpökuormaa. Jäähdytystehon laskemisessa pitää selvittää myös muutama asia. Jäähdytysteho lasketaan samalla kaavalla kuin lämpömäärä (kaava 1). Jäähdyttimen mitoituksessa tunnus m kuvaa jäähdytysnesteen massavirtaa, kun taas ΔT kuvaa jäähdytetyn ja jäähdytettävän nesteen lämpötilanmuutosta. Kaavan massavirran yksikkö myös vaihdetaan kg/s , jotta vastaukseksi tulee kilowatti eli kW.

Massavirran laskemisessa täytyy tietää jäähdytysnesteen tiheys ja tilavuusvirtaus. Tiheys ja tilavuusvirtaus kerrotaan yhteen. Vettä käytettäessä tiheys on $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$. Tilavuusvirtaus lasketaan jäähdytysveden kulkeman kanavan poikkipinta-ala kertaa virtausnopeus, mihin vaikuttaa pumppu. Huomioon pitää ottaa myös se, että veden tiheys muuttuu lämpötilan muuttuessa.

LÄHTEET

Heikkinen, R. 2020. Ekstruuderin syöttöjärjestelmä. Kuva.

Kutz, M. 2011. Applied Plastics Engineering Handbook. Elsevier Science & Technology Books. E-kirja [viitattu 21.9.2020]. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.saimia.fi/lib/lab-ebooks/reader.action?docID=739040&query=Applied+Plastics+Engineering+Handbook>

Muoviteollisuus ry 2020. Tuotantomenetelmät. Www-sivu [viitattu 5.9.2020]. Saatavissa: <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/tuotantomenetelmat/>

Lafleur, P. & Vergnes, B. 2014. Polymer Extrusion. John Wiley & Sons, Incorporated. E-kirja [viitattu 14.9.2020]. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.saimia.fi/lib/lab-ebooks/detail.action?docID=1688020>

Wagner, J. Mount, E. & Giles, H. 2013. Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook. Elsevier Science & Technology Books. E-kirja [viitattu 16.9.2020]. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.saimia.fi/lib/lab-ebooks/detail.action?docID=1418367&query=Extrusion>

Virtanen, S. 2019. Ekstruuderit sentään! Tekniikka & Talous. Artikkelit [viitattu 17.9.2020]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/ekstruuderit-sentaan-vtt-kehitti-uuden-tyyppisen-laitteen-hankalien-jatemateriaalien-kierrätykseen-testeja-tyynyilla-oljilla-havikkeleivalla/8e74941a-d16c-3ce2-a6e6-cc94db7c0cc8>

Asikainen, A. & Koivula, M. 2020. Ekstruusiolinjan käyttöönotto. LAB-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö [viitattu 5.9.2020]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/339700/Ekstruusiolinjan%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20B6%20B6notto.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Järvelä, P. & Järvelä, P. 2015. Teknisten muovien kierrätys ja uusiokäyttö. Raportti [viitattu 20.10.2020]. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BC3B5E587-A8C5-47FA-80EB-A034FBEC99%7D/119332>