

POLYPROPEENIN JÄLKIKUTISTUMINEN

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Materiaali- ja tuotantotekniikan
koulutusohjelma
Muovitekniikan suuntautumisvaihtoehto
Opinnäytetyö
Syksy 2007
Janne Väihkönen

Lahden ammattikorkeakoulu
Materiaali- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

VÄIHKÖNEN, JANNE: Polypropeenin jälkikutistuminen

Muovitekniikan opinnäytetyö, 35 sivua, 20 liitesivua

Syksy 2007

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia erilaisten säilytyslämpötilojen vaikutusta polypropeenista valmistetun kappaleen ulkomittoihin. Lisäksi tutkittiin, millainen merkitys kutistumiseen muottipaineella ja lämpötilalla on kappaletta valmistettaessa. Työssä tutkittavana raaka-aineena oli Borealis Polymersin PP BEC 5012.

Työ suoritettiin siten, että tutkittavasta materiaalista valmistettiin koekappaleita erilaisilla muottipaineilla ja lämpötiloilla. Näitä kappaleita säilytettiin 2 viikkoa erilaisissa lämpötiloissa. Koekappaleita mitattiin säilytyksen kestäessä.

Kappaleista määritettiin myös tiheydet. Todettiin, että tässä työssä käytetyllä mittaussuunnitelmällä ei kappaleiden tiheyden huomattu vanhenemisen aikana juurikaan muuttuneen.

Erilaisilla valmistusarvoilla ei ollut vaikutusta kappaleiden kutistumiseen. Kylmemmässä lämpötilassa säilytettyjen kappaleiden jälkikutistuminen pieneni. Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista tutkia kiteytymistä tarkemmin esim. DSC-laitteella.

Avainsanat: polypropeeni, kutistuminen, kiteisyys

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology

VÄIHKÖNEN, JANNE: shrinkage of polypropylene

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 35 pages, 20 appendices

Autumn 2007

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the effects of different kinds of storage temperatures on units made of polypropylene. In addition, it was examined, how temperatures affect the measures of polypropylene units. Different kinds of molding pressures and temperature effects were also studied. The material used was PP BEC 5012 of Borealis polymers.

First, some polypropylene units were manufactured. While manufacturing these units, different kinds of molding pressures and temperatures were used. These polypropylene units were stored for two weeks. During storing, some measures were taken.

The density of these units was also measured. By the methods that were used in these measurements, there were almost no changes of the values in density during the storing.

Different kinds of manufacturing parameters seemed to have quite little effect on the shrinkage of the units. The temperatures during storing appeared to have more effect. The lower the supplying temperature, the lower the value of the shrinkage appeared to be. In the future it would be interesting to examine the crystallization with the help of a DSC-machine further.

Keywords: polypropylene, shrinkage, crystallization

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 POLYPROPEENI	2
2.1 Valmistus	2
2.2 Ominaisuudet	4
2.3 Tuotteet	5
3 KOEKAPPALEET	6
3.1 Valmistus	6
3.2 Ajoarvot	7
3.3 Vanhenemisolosuhteet	8
4 MITTAUSTEN SUORITUS	8
4.1 Ulkomitat	8
4.2 Tiheys	9
5 MITTAUSTULOKSET	10
5.1 Koekappaleiden ulkomitat	10
5.1.1 Paksuus	10
5.1.2 Halkaisija	14
5.2 Tiheys	18

6 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI	22
6.1 Tiheys	22
6.2 Ulkomitat	27
7 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	34
LIITELUETTELO	35

1 JOHDANTO

Tämä päättötyö tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun tekniikan laitoksella. Työ on osa kidemuovi-tutkimusprojektia, jossa tutkittiin osittain kiteisten polyolefiinien kutistumakäyttäytymistä. Työn ohjaajana toimi muovitekniikan yliopettaja Pirkko Järvelä. Koekappaleiden valmistus ja mittaus suoritettiin tekniikan laitoksen muovilaboratoriossa laboratorioinsinööri Reijo Heikkisen ohjauksessa.

Työn lähtökohtana oli se, että polypropeenin käyttö on lisääntynyt teollisuudessa voimakkaasti. Se on korvannut varsinkin PVC:n monissa sovelluksissa. Polypropeenin kutistuma prosessoinnissa on kuitenkin moninkertainen PVC:hen verrattuna. Tämä on tuonut omat haittansa tuotantoon, varsinkin erityistä mittatarkkuutta vaativissa ruiskuvaletuissa kappaleissa. Pienetkin parametrien muutokset saattavat vaikuttaa suuresti kappaleiden mittatarkkuuteen ja muottien suunnittelu vaikeutuu. Tässä työssä on tarkoitus erityisesti tutkia, mitkä seikat vaikuttavat polypropeenikappaleen kutistumiseen nimenomaan muotista poistamisen jälkeen ja kuinka pitkän ajan kutistumista tapahtuu.

Tutkimustyön tavoitteena on hakea polypropeenikappaleelle sellaiset olosuhteet, joissa kappaleen mittojen muutokset olisivat mahdollisimman hyvin tiedossa. Polypropeenin kutistumiselle yritetään löytää jokin tunnettu arvo siten, että kutistuma on tietyissä olosuhteissa aina tietyn suuruinen. Tämä helpottaa esim. muottisuunnittelua huomattavasti, koska kappaleiden mittamuutokset voidaan paremmin huomioida jo muotinsuunnitteluvaiheessa.

Työssä tutkittiin myös, miten suuri merkitys kappaleen valmistuksessa käytetyillä parametreilla on kappaleen lopullisiin mittoihin. Parhaassa tapauksessa tutkimustyö tarjoaa sellaista tietoa, jota voidaan hyödyntää teollisessa tuotannossa.

2 POLYPROPEENI

2.1 Valmistus

Polypropeeni on osakiteinen muovi, jota valmistetaan propeenikaasusta. Propeenikaasua syntyy maaöljyn jalostuksessa sivutuotteena. Myös eteenin valmistuksessa syntyy sivutuotteena propeenia. Maaöljyn jalostusmäärät ovat niin suuria, että erillisiä propeenin tuotantoon tarkoitettuja laitoksia ei ole tarvinnut pystyttää. Polypropeeni on kehitetty Italiassa vuonna 1954. Professori Giulia Natta kehitti eteenin valmistuksessa käytettyjä katalysaattoryhdistelmiä niin, että niitä voitiin käyttää eteeniä korkeampien olefiinien polymerointiin. Tätä nk. Ziegler-Natta katalyyttiä käytetään edelleen polypropeenin polymeroinnissa. (Tammela 1989, 42.)

Polypropeeni muodostuu hiilirungosta, johon on liittynyt riittävä määrä vetyä ja metyyliryhmä (CH_3). Polymerointireaktiossa propeenimonomeereissä olevat hiilihiili kaksoissidokset hajoavat ja liittyvät yhteen polymeeriketjuksi. (Tammela 1989, 43.)

Polypropeenia valmistetaan suspensiopolymeroimalla propeenina inertissä hiilivedyissä. Tällöin käytetään em. Ziegler-Natta-katalyyttiä. Muita valmistusmenetelmiä ovat liuospolymerointi ja kaasufaasipolymerointi. Propeeni polymeroituu helposti aktiivin katalyytin avulla lähes normaalipaineessa ja $60\text{ }^\circ\text{C}$:ssa, jolloin reaktioaika on noin 8 tuntia. Polypropeenin rakenne on avaruusmainen, minkä vuoksi rakenteessa oleva metyyliryhmä voi sijaita eri puolilla polymeeriketjua. Metyyliryhmän sijaintiin voidaan vaikuttaa eri valmistusmenetelmiä ja katalyyttejä käyttämällä. (Airasmaa, Kokko, Komppa, Saarela 1991, 38.)

Metyyliryhmien sijaitessa samalla puolella polymeeriketjua, propeenina kutsutaan isotaktiseksi. Kaupallinen polypropeeni sisältää tavallisesti yli 90% isotaktista muotoa. Isotaktinen polymeerimuoto kiteytyy hyvin, mikä antaa polypropeenille hyvät lujuus- ja kemialliset ominaisuudet. (Tammela 1989, 43.)

Ataktiseksi polypropeenia kutsutaan, jos metyyliryhmä sijaitsee satunnaisesti polymeeriketjun ylä- ja alapuolella. Ataktinen polymeeriketju ei kiteydy, vaan se on

amorfista ainetta. Ataktinen polypropeeni kestää huonosti lämpöä ja kemikaaleja. Isotaktisen polymeerin lisäksi loppuosa polypropeenista on ataktista muotoa.

Kolmas polypropeenin muoto on syndiotaktinen, metyyliryhmät sijaitsevat siinä vuorotellen polymeeriketjun ylä- ja alapuolella. Se on kiteytymiskykyistä, mutta sitä ei juuri valmisteta kaupallisesti.

Polypropeenin kiteisyysaste on 40-60 %. Tarvittaessa se voidaan kuitenkin nostaa 70 %:iin lämpökäsittelyllä 150 °C:ssa. Kiteisyyden määrään vaikuttaa paitsi isotaktisen polymeerin määrä, myös molekyylin suuruus. Kun molekyylikoko kasvaa, kiteytyminen vaikeutuu. Polypropeeni voi kiteytyä kolmessa eri kidemuodossa. Tavallisin on α -kidemuoto. Siinä isotaktinen molekyyli on kierteisenä rakeena, jossa kolme rakenneyksikköä muodostavat täyden kierteen. Yleensä polypropeenista valmistetut tuotteet ovat yli 90 % α -kiteisiä. Muut harvoin esiintyvät kidemuodot ovat β -muoto ja γ -muoto. β -kidemuodossa rakenneyksiköt ovat heksagonaalisessa ja γ -kidemuodossa trikliinisessä muodossa. Nämä muodot muuttuvat α -muodoksi korotetussa lämpötilassa. (Tammela 1989, 43-44; Airasmaa 1991, 38.)

Sferuliitit ovat mikroskoopilla havaittavia kiteisen polymeerin rakenteita, joita polypropeenilla on viisi erilaista. Sferuliitit syntyvät sulamislämpötilan ja 115 °C:en välillä. Kiteisyyden lisäksi myös sferuliittien laatu ja määrä vaikuttavat polypropeenin ominaisuuksiin. Suuret sferuliitit alentavat iskusitkeyttä ja myötölujuutta, mutta kasvattavat jäykkyyttä. Sferuliittien syntyyn vaikuttaa lämpötila kappaleen jäähtymisvaiheessa, eli ruiskuvaletuissa kappaleissa käytännössä siis muotin lämpötila. Nopealla jäähtymisellä saadaan paljon pienikokoisia sferuliitteja, joiden tiheys on suuri. (Tammela 1989, 44; Kurri, Malen, Sandell, Virtanen 1999, 48.)

Kiteisyysasteella ja kidemuodolla on suuri merkitys polypropeenikappaleen kutistumiseen, mikä on tyypillistä myös muille osakiteisille muoveille. Kutistuminen johtuu siitä, että polymeeriketjut järjestyvät kiteiseen muotoon ja pakkautuvat näin tiiviimmin, jolloin kappaleen ulkomitat pienenevät. Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että polypropeenikappaletta valmistettaessa jäähdytysolosuhteilla on suuri merkitys kappaleen lopullisiin mittoihin. Korkeampi muotin lämpötila lisää

kutistumista, mutta suurin merkitys kappaleen kutistumiseen on kuitenkin kappaleen paksuudella. Mitä paksumpi kappale on, sitä suurempi on sen suhteellinen kutistuma, eikä ruiskutusnopeudella ole todettu olevan suurta merkitystä kutistumiseen. (Gipson, Grelle, Salamon 1999, 33-36.)

2.2 Ominaisuudet

Polypropeenin tiheys on 0,90-0,91 g/cm³, joka on muovien pienimpiä ja riippuu polypropeenin tyypistä. Lasittumislämpötila (T_g) on -10-(20) °C, polyeteeniin verrattaessa siis huomattavasti korkeampi ja osakiteisille muoveille tyypillisesti lasittumispiste ei ole täysin selkeä. Sulamislämpötilat vaihtelevat 150-175 °C:en välillä, ja riippuvat paitsi polymeerin laadusta, myös käytetystä mittausmenetelmästä. Valmiin polypropeenituotteen korkein jatkuva käyttölämpötila on n. 100 °C ja lyhytaikaisesti 130 °C. (Airasmaa ym. 1991, 38.)

Polypropeenaa verrataan ominaisuuksiltaan usein korkeatiheyksiseen polyeteeniin, koska ne ovat ominaisuuksiltaan ja ulkoisesti tarkasteltuna paljolti samankaltaisia. Polypropeenin etuina verrattuna korkeatiheyksiseen polyeteeniin on suurempi kovuus, jäykkyys ja kimmoisuus, sekä korkeampi käyttölämpötila ja vähäisempi jännityssäröily. Polypropeenin huonoihin puoliin kuuluu polyeteeniä heikompi UV-valon kesto.

Mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat kiteisyysaste ja molekyylien koko. Kun kiteisyysaste suurenee, kovuus, jäykkyys ja myötörajan jännitysarvo kasvavat. Aikaisemmin todettiin, että molekyylikoon kasvattaminen vähentää kiteisyyttä. Tällöin kuitenkin sitkeys ja venyvyys paranevat. Myös tiheys alenee. Kuten muillakin muoveilla, myös polypropeenin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla täyte- ja lujiteaineilla. Näitä ovat mm. puujauho, talkki ja lasikuitu. Taulukkoon 1 on kerätty joitain tyypillisiä polypropeenin ruiskuvalulaadun ja suulakepuristuslaadun mekaanisten ominaisuuksien arvoja. (Kurri ym. 1999, 50.)

TAULUKKO 1. Tyypillisiä polypropeenin mekaanisten ominaisuuksien arvoja (Airasmaa ym. 1991, 38.)

ominaisuus	ruiskuvalulaatu	suulakepuristuslaatu
tiheys, g/cm ³	0,907	0,902
sulaindeksiluku g/10 min	27	1,3
jännitys myötörajalalla, MPa	38	31
venymä myötörajalalla, %	12	16
murtolujuus, MPa	25	34
murtovenymä, %	n.20	n.700
kuulapuristuskovuus (30 s.), MPa	78	64
lovi-iskulujuus, mJ/mm ²	5	11

2.3 Tuotteet

Polyeteenin jälkeen polypropeeni on toiseksi käytetyin muovi maailmassa ja sen käyttö on syrjäyttänyt erityisesti PVC:n. Polypropeenituotteita voidaan valmistaa kaikilla kestopuovien työstömenetelmillä, joista yleisimpiä ovat ruiskuvalu ja suulakepuristus. Tyypillisiä polypropeenista valmistettuja tuotteita ovat: kotelot, säiliöt, pullot, taloustavarat, putket, kalvot ja kuidut. Polypropeenin yhteydessä on syytä mainita sen erinomaisuudesta kalvosaranan valmistukseen, josta shampoopullon korkki on erinomainen esimerkki. (Tammela 1989, 46.)

3 KOEKAPPALEET

3.1 Valmistus

Työssä tutkittavana materiaalina käytettiin Borealis Polymersin valmistamaa isotaktista blokkikopolymeeriä, tarkalta kauppanimeltään PP BEC 5012. Tästä materiaalista valmistettiin ruiskuvalamalla koekappaleita tutkimuksia varten.

Koekappaleiden muodoksi valittiin pyöreä levy, jonka syöttöpiste oli keskellä kappaletta. Tämän muotoinen kappale on helppo mitata, jolloin mittausvirheiden mahdollisuus saatiin minimoitua. Pyöreä pesä myös sallii kappaleelle vapaan kutistumisen muotissa. Muottipesässä kappaleen halkaisija oli 40 mm ja paksuus 10 mm. Syöttö oli halkaisijaltaan 7 mm:n avosyöttö.

Koekappaleiden valmistukseen käytetty muotti oli varustettu lämpö- ja paineantureilla, joilla voitiin tarkkailla todellisia muotin paineita ja lämpötiloja. Koekappaleita valmistettiin kahdella eri muotin lämpötilalla ja jälkipaineella.

Koekappaleet valmistettiin tekniikan laitoksen muovilaboratoriossa olevalla Battenfeld PA-200 ruiskuvalukoneella, jonka suurin sulkuvoima on 200 kN. Tätä arvoa myös käytettiin kappaleita valmistettaessa. Ruiskuvalukoneen ruuvin halkaisija on 22 mm ja ruiskutustilavuus 28 cm³.

Kappaleiden valmistus aloitettiin tutustumalla koneeseen ja sen käyttöön. Konetta olin käyttänyt aikaisemminkin muovien laboratoriokurssin yhteydessä, joten opetteluun ei mennyt kovinkaan kauan aikaa. Koneeseen tutustumisen jälkeen muotti asennettiin paikoilleen ja kiinnitettiin tarvittavat letkut ja johdot, jonka jälkeen kone laitettiin lämpenemään. Massan lämpötilaksi säädettiin 240 °C ja koneen lämpenemistä odotellessa syöttösuppiloon kaadettiin polypropeeni BEC 5012:ta.

Koneen lämmentyä aloitettiin kappaleiden valmistus. Kappaleita ajettiin ensin noin 15 min. Kappaleita tarkasteltiin silmämääräisesti, jotta koneen lämpötilat ja ajoarvot saatiin säädettyä kohdalleen. Kun ajoarvot olivat optimaaliset, ajettiin varsinaiset

koekappaleet. Kappaleet punnittiin tarkkuusvaalla heti valmistuksen jälkeen ja tulokset kirjattiin ylös, millä varmistettiin se, että säädetty annoskoko pysyi varmasti samana. Jos kappaleilla on jo valmistusvaiheessa erilainen massa, aiheuttaa tämä myöhemmin tehtävissä tiheyden määrittämisessä virhettä. Punnituksen yhteydessä kappaleet myös numeroitiin.

Punnituksen jälkeen odotettiin, että kappaleet jäätyivät huoneen lämpötilaan, mikä kesti noin tunnin. Tämän jälkeen kappaleet mitattiin ensimmäisen kerran, ja tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Kappaleista mitattiin paksuus ja halkaisija, ja jokaisen sarjan yhdestä kappaleesta määritettiin myös tiheys. Näiden toimenpiteiden jälkeen kappaleet siirrettiin vanhenemisolosuhteisiin.

3.2 Ajoarvot

Koekappaleita valmistettiin siten, että käytettiin kahta erilaista muotin lämpötilaa ja jälkipainetta. Muut koneen ajoarvot pysyivät samoina. Koska muotti oli varustettu paine- ja lämpötila-antureilla, jälkipaineet ovat todellisia mitattuja muotin huippupaineita. Myös lämpötilat ovat todellisia, eivätkä vain säädettyjä. Kappaleita valmistettiin 4 sarjaa, 25 kappaletta kullakin parametriyhdistelmällä, eli yhteensä kappaleita oli 100. Taulukossa 2 on kuvattuna sarjan numerointi ja käytetyt muuttuvat ajoarvot.

TAULUKKO 2. Sarjojen muuttuvat ajoarvot

sarja	jälkipaine (MPa)	muotin lämpötila (°C)
1	30	36
2	56,5	36
3	30	45
4	58	43

Muotin sulkuvoimana käytettiin 200 kN:a, joka on koneen suurin arvo. Todellinen mitattu massan lämpötila oli 238 °C. Ruiskutusaika oli 3 s ja jälkipaineaika 55 s.

3.3 Vanhenemisolosuhteet

Kappaleiden valmistamisen jälkeen ne siirrettiin erilaisiin vanhenemisolosuhteisiin. Vanhenemisolosuhteina oli viisi erilaista lämpötilaa. Lämpötilat olivat -28 °C, 0 °C, 20 °C, 53 °C ja 87 °C.

Ennen vanhenemisolosuhteisiin laittamista koekappaleet jaettiin viiden kappaleen ryhmiin siten, että jokainen sarja jaettiin viiteen osaan. Näin jokaisessa vanhennusolosuhteessa oli 20 kappaletta. Tämän jälkeen koekappaleet suljettiin pusseihin ja korkeiden lämpötilojen kappaleet sijoitettiin puulaboratoriossa sijainneisiin uuneihin. Puulaboratoriossa oli myös pakastin, johon pakkasessa vanhennettavat kappaleet sijoitettiin. 0-asteiset kappaleet laitettiin muoviämpäriin, joka täytettiin lumella ja sijoitettiin puulaboratorion kylmävarastoon. Huoneenlämmössä vanhennettavat kappaleet säilytettiin muovilaboratoriossa.

Vanhenemisolosuhteissa tarkkailtiin ainoastaan lämpötilaa. Erilainen ilmankosteus saattaa aiheuttaa kappaleille pieniä mittamuutoksia veden imeytymisen vuoksi. Ilmankosteutta tai muitakaan muuttujia ei tarkasteltu, koska niiden vaikutus kappaleiden mittoihin arveltiin olevan mitättömän pieni.

4 MITTAUSTEN SUORITUS

4.1 Ulkomitat

Ennen mittausten aloittamista koekappaleet poistettiin vanhenemisolosuhteista. Kappaleiden annettiin olla huoneenlämmössä vähintään tunnin ajan tai niin kauan, että niiden lämpötila oli sama kuin huoneen, millä ehkäistiin lämpölaajenemisen aiheuttama vääristymä mittaustuloksiin. Mittausten jälkeen kappaleet siirrettiin välittömästi takaisin vanhenemisolosuhteisiin. Kappaleiden ulkomitat mitattiin

ensimmäisen kerran noin tunnin kuluttua kappaleiden valmistamisesta ja seuraavat mittaukset olivat noin 1 vrk, 2 vrk, 7vrk ja 14 vrk:n kuluttua valmistuksesta. Tunneiksi muutettuna tämä tarkoittaa 24 h, 48 h, 168 h ja 338 h.

Kappaleet mitattiin digitaalisella työntömitalla, jonka tarkkuus oli 0,01 mm. Aina ennen mittausten aloittamista työntömitan kalibrointi tarkastettiin ja tarvittaessa säädettiin kohdalleen.

4.2 Tiheys

Kun koekappaleiden ulkomitat oli mitattu, niiden tiheys määriteltiin, mihin käytettiin flotaatiomenetelmää. Tiheysmittaukset tehtiin 1, 24, 164 ja 338 tunnin kuluttua kappaleiden valmistamisesta. 48 tunnin jälkeen mittausta ei tehty, koska arvelin, että vuorokaudessa tiheyden muutos on niin pieni, että näillä mittausten menetelmillä sen havaitseminen on vaikeaa. Kaikkien koekappaleiden tiheyttä ei määritely, vaan jokaisesta sarjasta ja vanhennusolosuhteesta valittiin yksi kappale. Tämä kappale oli jokaisella mittauskerralla sama. Koska flotaatiomenetelmä on melko hidas ja vaivalloinen mittaustapa, olisi jokaisen kappaleen mittaaminen vienyt kohtuuttomasti aikaa. Toisaalta koekappaleet haluttiin siirtää takaisin vanhennusolosuhteisiin mahdollisimman nopeasti. Myös kelluttamisessa käytettyä sinolia olisi kulunut kymmeniä litroja.

Tiheyden määritykset tapahtuivat siten, että ensin mittalasi sijoitettiin tarkkuusvaa`alle ja vaa`an näyttämä nolattiin. Mittalasiin kaadettiin noin 60 ml tislattua vettä ja lukema katsottiin vaa`asta ja otettiin ylös. Tämän jälkeen mitattava kappale laitettiin veteen ja jälleen otettiin vaa`an lukema ylös. Kappaleen pinnasta pyrittiin poistamaan ilmakuplat liikuttelemalla kappaletta vedessä, koska ilmakuplat olisivat kelluttaneet kappaletta ja siten mittaustulos olisi ollut väärä. Seuraavaksi veteen lisättiin sinolia, jota lisättiin pieninä erinä ja nestettä sekoitettiin välillä, jotta veden ja sinolin seos olisi tasalaatuista. Tätä jatkettiin niin kauan, että kappale kellui nesteessä vapaasti, ts. kappale ei ole nesteen pinnalla eikä toisaalta vajoa mittalasin pohjalle. Tällöin nesteen tiheys oli sama kuin koekappaleella. Kun sinolia oli oikea määrä, vaa`an lukema otettiin jälleen ylös.

Vaa`an lukemista pystyttiin määrittämään sinolin ja veden % -osuudet nesteessä. Kun sinolin ja veden tiheydet tunnettiin, voitiin liuoksen tiheys laskea. Tislattun veden tiheytenä käytettiin 1 g/cm³ ja sinolin tiheytenä 0,81 g/cm³ (Valtanen 2002, 664).

5 MITTAUSTULOKSET

5.1 Koekappaleiden ulkomitat

Työn aikana sekä kappaleiden paksuus ja halkaisija mitattiin yhteensä 500 kertaa. Koska mittaustuloksia on näin paljon, niiden kaikkien esittäminen tässä ei ole järkevää. Kaikki mittaustulokset ilmenevät liitteenä olevista mittauspöytäkirjoista. Jokaisessa vanhenemislämpötilassa oli viisi samanlaisilla ajoarvoilla valmistettua kappaletta, joten niiden mittaustuloksista on laskettu keskiarvot. Paksuutta ja halkaisijaa on käsitelty erikseen omissa taulukoissaan.

5.1.1 Paksuus

Paksuuden mittaustulokset on esitetty taulukoissa 3-6

TAULUKKO 3. Sarjan 1 paksuuden mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	9,996	9,976	9,988	9,986	9,994
0	9,994	9,96	9,994	9,99	9,994
20	9,996	9,984	9,994	9,982	9,986
53	9,994	9,968	9,994	9,994	9,988
87	9,994	9,966	9,992	9,982	9,982
keskiarvo	9,9948	9,9708	9,9924	9,9868	9,9888

TAULUKKO 4. Sarjan 2 paksuuden mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	10,04	10,03	10,04	10,038	10,034
0	10,044	10,032	10,04	10,036	10,036
20	10,046	10,036	10,044	10,04	10,036
53	10,04	10,018	10,04	10,036	10,032
87	10,04	10,034	10,044	10,03	10,03
keskiarvo	10,042	10,03	10,0416	10,036	10,0336

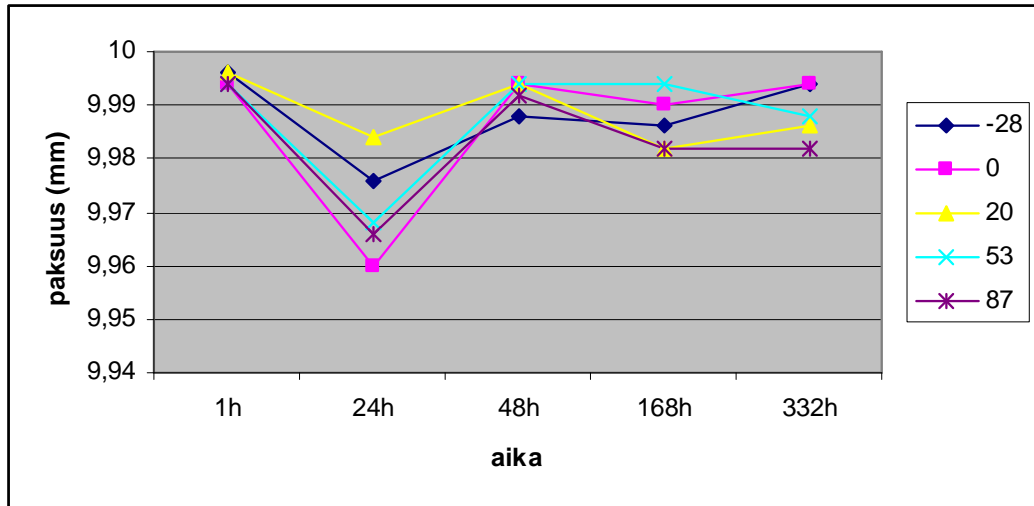
TAULUKKO 5. Sarjan 3 paksuuden mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	9,99	9,988	9,994	9,986	9,988
0	9,984	9,986	9,99	9,978	9,98
20	9,988	9,984	9,982	9,98	9,98
53	9,988	9,976	9,988	9,982	9,976
87	9,986	9,978	9,984	9,98	9,98
keskiarvo	9,9872	9,9824	9,9876	9,9812	9,9808

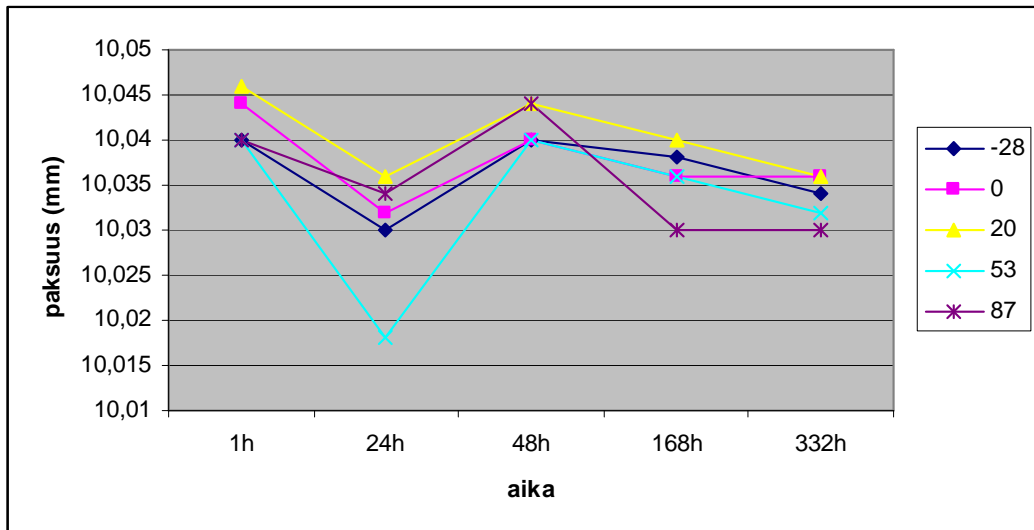
TAULUKKO 6. Sarjan 4 paksuuden mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	10,04	10,032	10,038	10,04	10,036
0	10,032	10,032	10,036	10,036	10,038
20	10,034	10,028	10,034	10,026	10,028
53	10,036	10,032	10,038	10,038	10,038
87	10,04	10,024	10,034	10,03	10,028
keskiarvo	10,0364	10,0296	10,036	10,034	10,0336

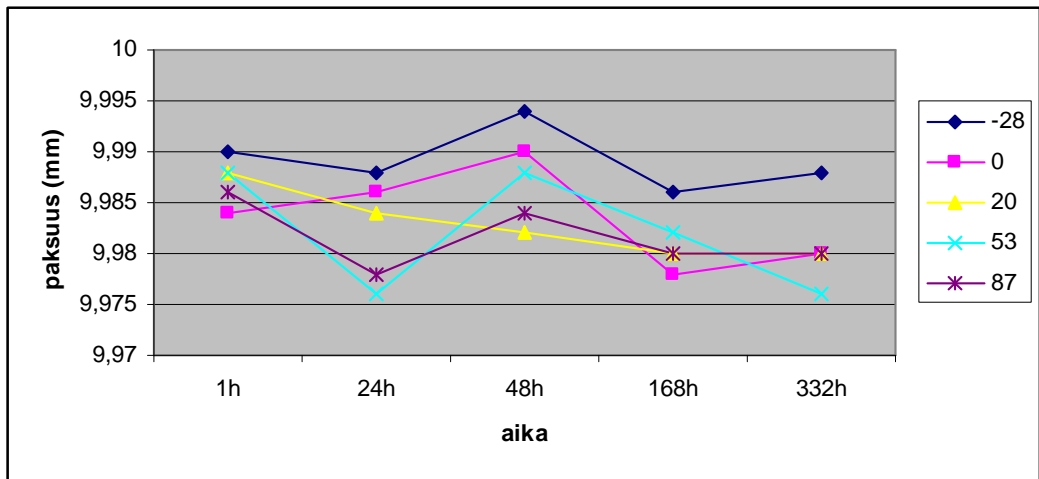
Taulukot eivät ole kovinkaan havainnollinen keino esittää mittaustuloksia. Siksi paksuuden mittaustulokset on kuvioissa 1-4 esitetty graafisesti vanhenemisajan funktiona. Kuvaajien y-akselilla on kappaleiden mitat millimetreinä ja x-akselilla vanhenemisaika tunteina.



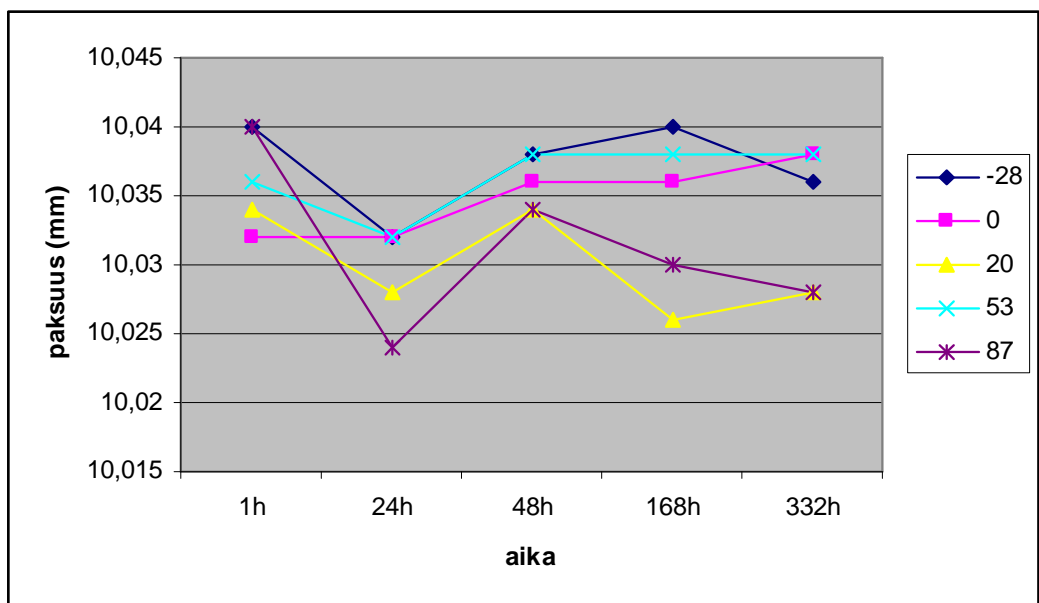
KUVIO 1. Sarjan 1 paksuus



KUVIO 2. Sarjan 2 paksuus



KUVIO 3. Sarjan 3 paksuus



KUVIO 4. Sarjan 4 paksuus

5.1.2 Halkaisija

Halkaisijoiden mittaustulokset on esitetty taulukoissa 7-10. Koekappaleiden halkaisijan mittaustulokset on käsitelty samalla tavalla kuin edellä esitetyt paksuuden mittaustulokset.

TAULUKKO 7. Sarjan 1 halkaisijan mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	39,308	39,282	39,298	39,304	39,302
0	39,304	39,264	39,298	39,296	39,284
20	39,306	39,286	39,292	39,286	39,282
53	39,314	39,27	39,288	39,276	39,272
87	39,312	39,244	39,278	39,268	39,258
keskiarvo	39,3088	39,2692	39,2908	39,286	39,2796

TAULUKKO 8. Sarjan 2 halkaisijan mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	39,436	39,41	39,422	39,42	39,414
0	39,434	39,414	39,42	39,41	39,4
20	39,44	39,418	39,412	39,406	39,4
53	39,426	39,382	39,41	39,392	39,376
87	39,428	39,372	39,382	39,366	39,362
keskiarvo	39,4328	39,3992	39,4092	39,3988	39,3904

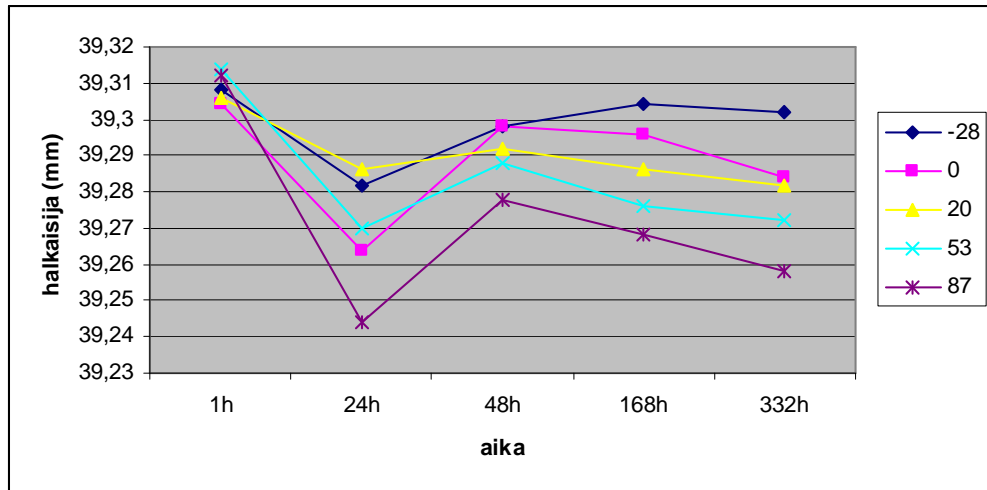
TAULUKKO 9. Sarjan 3 halkaisijan mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	39,316	39,29	39,296	39,292	39,288
0	39,308	39,288	39,298	39,278	39,284
20	39,326	39,288	39,298	39,286	39,28
53	39,302	39,27	39,286	39,278	39,264
87	39,306	39,266	39,274	39,244	39,25
keskiarvo	39,3116	39,2804	39,2904	39,2756	39,2732

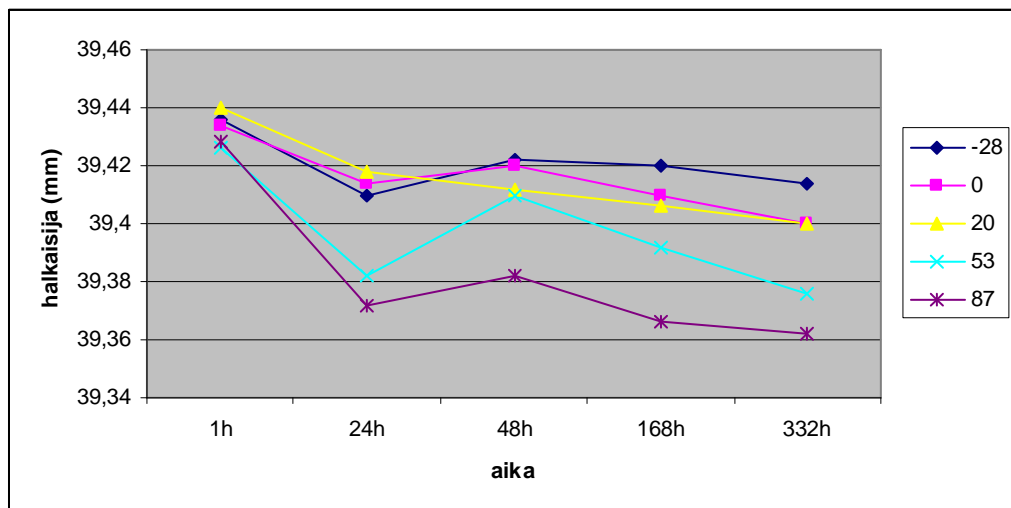
TAULUKKO 10. Sarjan 4 halkaisijan mittaustulokset

vanhennus lämpötila	vanhennus aika				
	1h	24h	48h	168h	332h
-28	39,442	39,426	39,434	39,422	39,422
0	39,44	39,416	39,436	39,42	39,418
20	39,418	39,384	39,396	39,396	39,382
53	39,434	39,406	39,416	39,4	39,394
87	39,436	39,382	39,394	39,386	39,368
keskiarvo	39,434	39,4028	39,4152	39,4048	39,3968

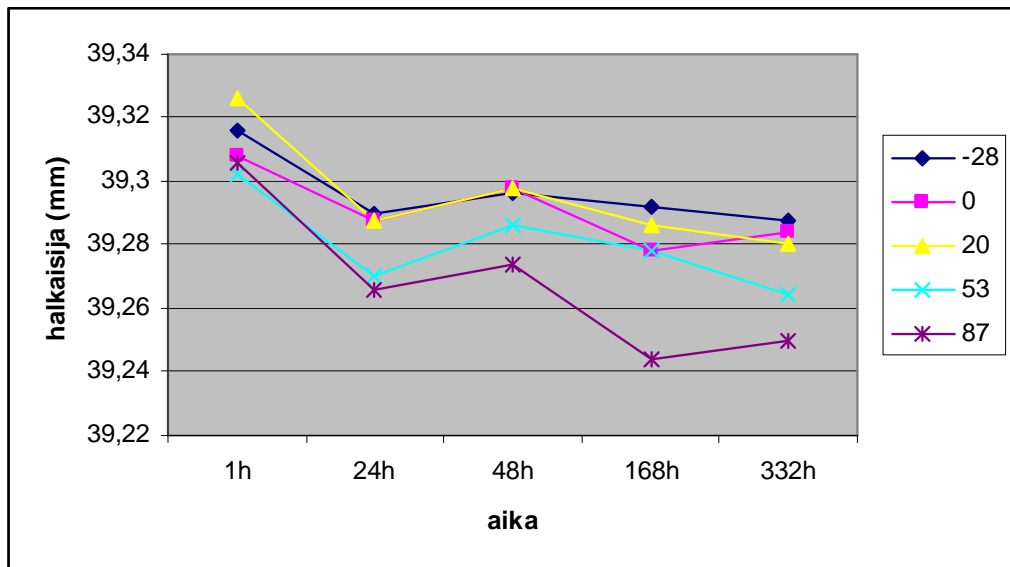
Halkaisijan mittaustulokset on esitetty graafisesti kuvioissa 5-8.



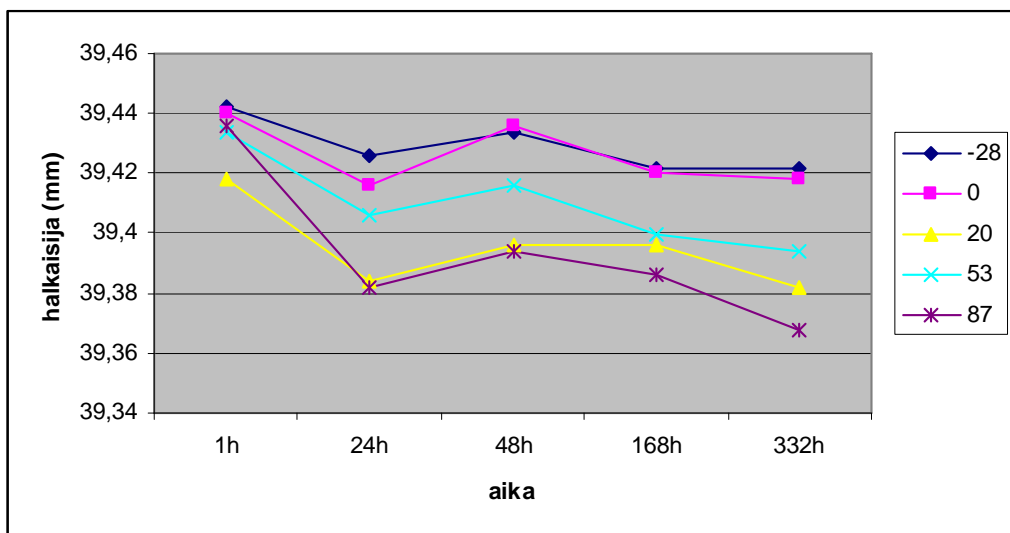
KUVIO 5. Sarjan 1 halkaisija



KUVIO 6. Sarjan 2 halkaisija



KUVIO 7. Sarjan 3 halkaisija



KUVIO 8. Sarjan 4 halkaisija

5.2 Tiheys

Taulukoissa 11-14 on kuvattuna kappaleille lasketut tiheyden arvot. Ulkomittojen taulukoista poiketen nämä eivät ole mittaustulosten keskiarvoja, vaan yksittäisiä kappaleita. Taulukoissa esitettyjen tiheyden arvojen yksikkönä on g/cm^3 . Heti kappaleiden valmistuksen jälkeen jokaisesta sarjasta mitattiin vain yksi kappale, minkä vuoksi kaikki 1 h-sarakkeessa olevat arvot ovat samoja.

TAULUKKO 11. Sarjan 1 tiheydet

vanhennus lämpötila	vanhennus aika			
	1h	24h	168h	336h
-28	0,891	0,892	0,886	0,889
0	0,891	0,894	0,892	0,892
20	0,891	0,891	0,892	0,893
53	0,891	0,894	0,891	0,892
87	0,891	0,893	0,890	0,893
keskiarvo	0,891	0,8928	0,8902	0,8918

TAULUKKO 12. Sarjan 2 tiheydet

vanhennus lämpötila	vanhennus aika			
	1h	24h	168h	336h
-28	0,891	0,896	0,892	0,891
0	0,891	0,898	0,897	0,892
20	0,891	0,892	0,890	0,893
53	0,891	0,894	0,892	0,892
87	0,891	0,892	0,889	0,891
keskiarvo	0,891	0,8944	0,892	0,8918

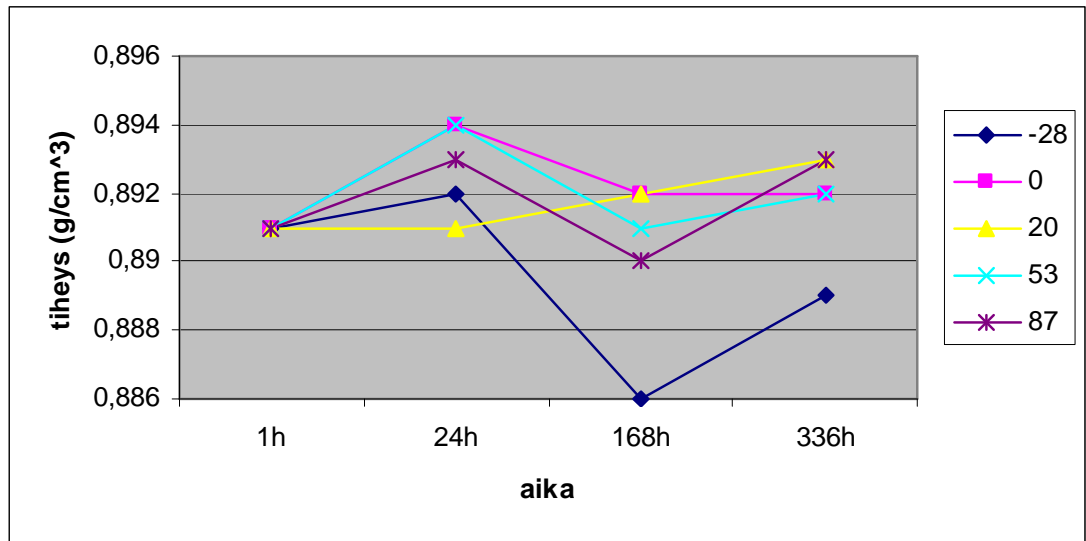
TAULUKKO 13. Sarjan 3 tiheydet

vanhennus	vanhennus aika			
	1h	24h	168h	336h
lämpötila				
-28	0,891	0,893	0,894	0,895
0	0,891	0,893	0,890	0,892
20	0,891	0,891	0,893	0,894
53	0,891	0,893	0,895	0,893
87	0,891	0,898	0,888	0,891
keskiarvo	0,891	0,8936	0,892	0,893

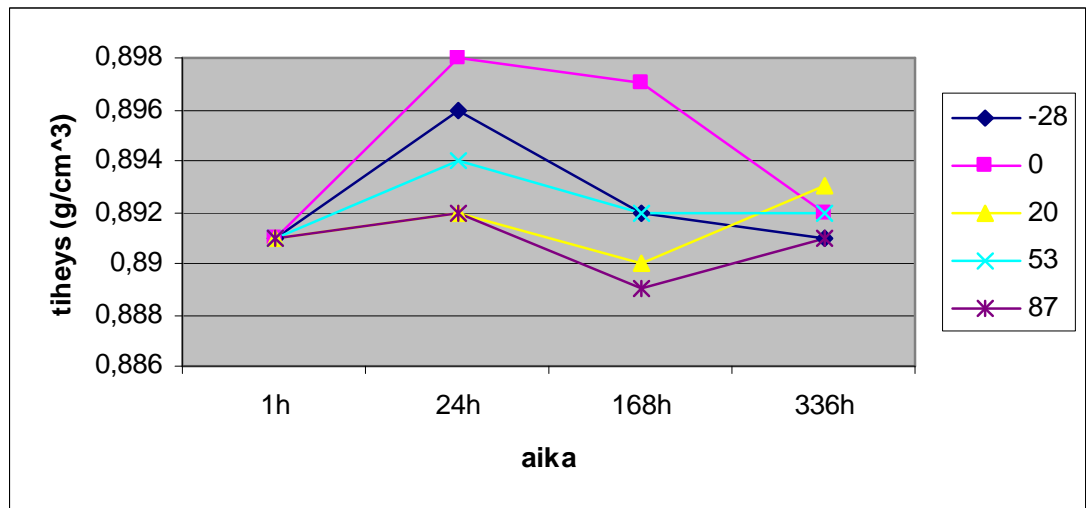
TAULUKKO 14. Sarjan 4 tiheydet

vanhennus	vanhennus aika			
	1h	24h	168h	336h
lämpötila				
-28	0,89	0,893	0,890	0,891
0	0,89	0,893	0,890	0,891
20	0,89	0,892	0,890	0,89
53	0,89	0,892	0,896	0,892
87	0,89	0,898	0,894	0,893
keskiarvo	0,89	0,8936	0,892	0,8914

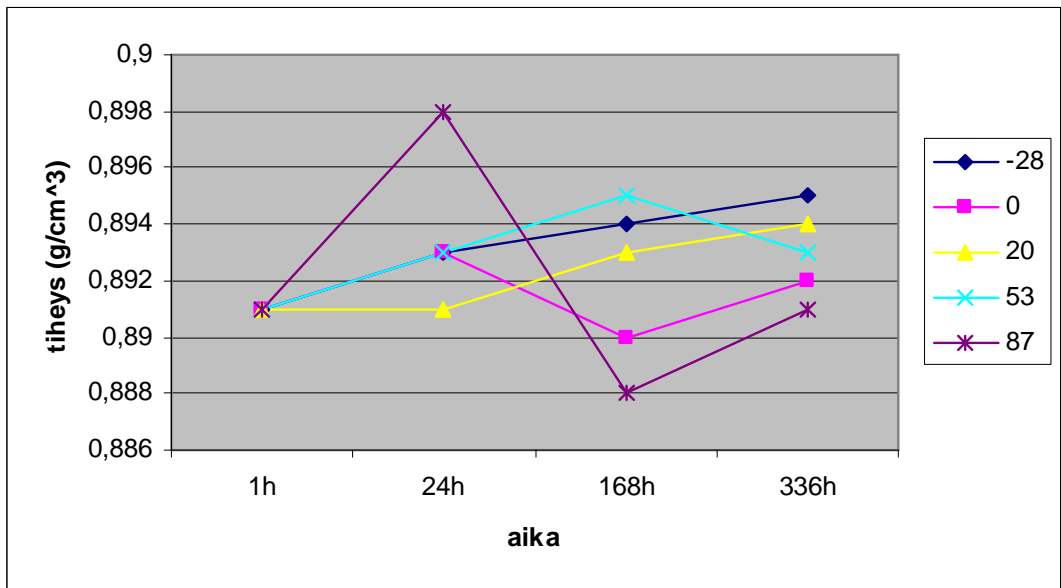
Tiheyden muutokset ajan funktiona on esitetty kuvioissa 9-12.



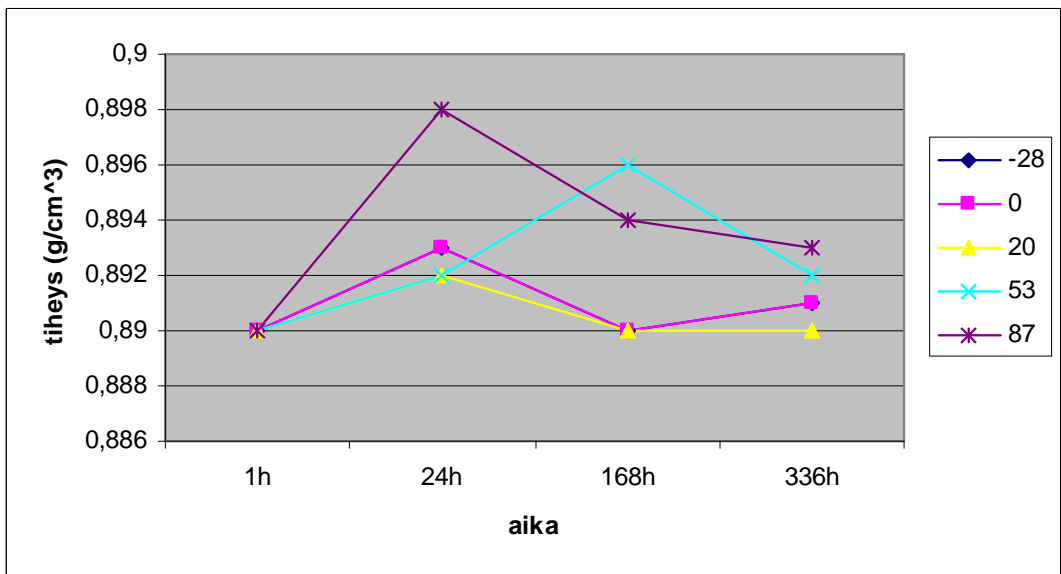
KUVIO 9. Sarjan 1 tiheys



KUVIO 10. Sarjan 2 tiheys



KUVIO 11. Sarjan 3 tiheys



KUVIO 12. Sarjan 4 tiheys

6 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI

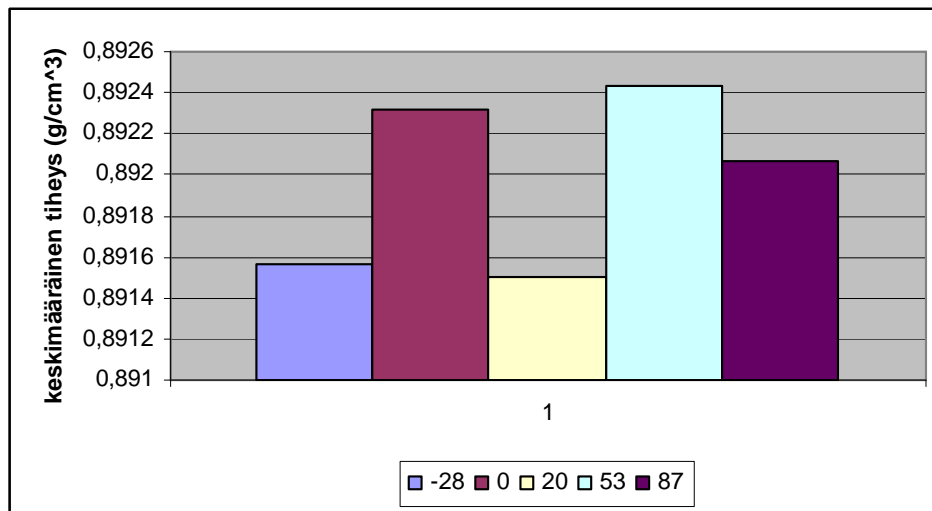
6.1 Tiheys

Tiheysmäärittelyssä käytetyn vaa`an tarkkuus oli 0,01 g. Käytännössä tämä on niin tarkka lukema, että tästä ei tiheysmäärittelyssä aiheudu virhettä. Mittausvirheen mahdollisuus oli silloin, kun sinolia lisättiin veden joukkoon. On jonkin verran mittajaan tulkinnasta riippuvaa, milloin kappale ”leijuu” nesteessä. Sinolin määrä sai muuttua vaa`an näytöllä useita grammoja ennen kuin se selvästi vaikutti kappaleen kellumiseen. Koska mittauksissa on näin suuri tulkinnan vara, voi tällä tavalla tehtyjä tiheysmittauksia pitää mielestäni korkeintaan vain suuntaa antavina. Jos itselläni olisi ollut suurempi kokemus flotaatiomenetelmän käytöstä, se olisi parantanut mittauksen luotettavuutta.

Flotaationesteiden tiheyksissä tyydyttiin käyttämään kirjallisuuden antamia arvoja, eikä veden ja sinolin todellisia tiheyksiä määritelty. Arvioisin kirjallisuusarvojen olevan kuitenkin niin lähellä todellisia tiheyksiä, että sen aiheuttama virhe tiheysmäärittelyyn on todella pieni. Lisäksi tästä syntyvä virhe vaikuttaa tasaisesti jokaisessa mittauksessa eikä selitä arvoissa tapahtuvaa hajontaa.

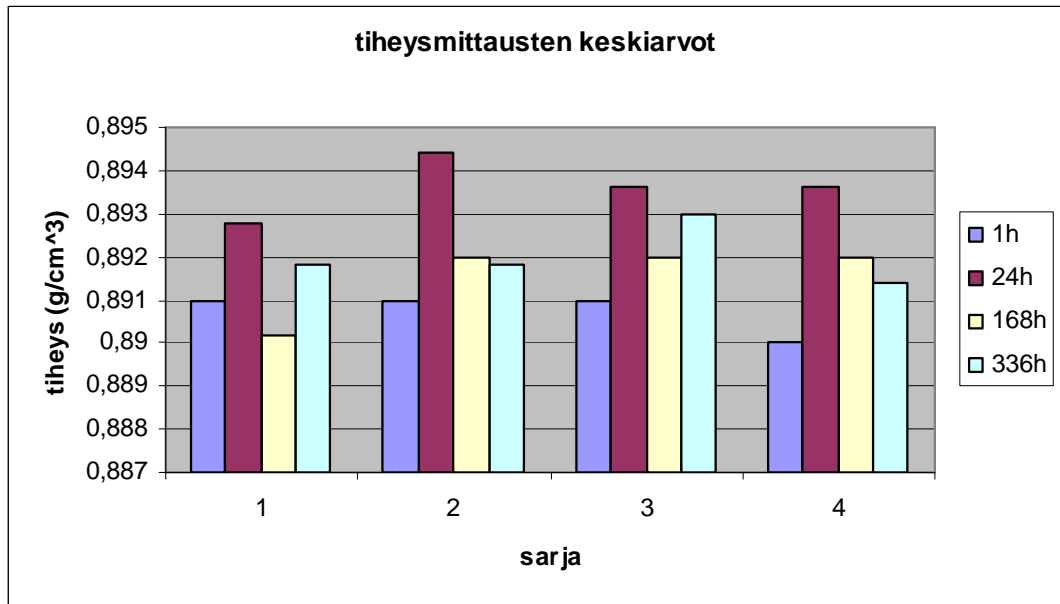
Tiheyden kuvaajat on piirretty käyttäen yksittäisen mittauksen arvoja. Tällä tavoin yksittäisessä mittauksessa tapahtunut virhe korostuu verrattuna siihen, että kuvaajan piste on monen mittauksen keskiarvo. Olisi ollut mielenkiintoista mitata tiheyksiä hieman laajemmalla otannalla, mutta kuten aikaisemmin on todettu, olisi tämä ollut mittausteknisesti todella työlästä.

Kun tarkastellaan mittaustuloksista tehtyjä kuvaajia, havaitaan, että ne eivät ole kovinkaan säännöllisiä. Eri vanhennuslämpötilojen kuvaajat kulkevat melko sattumanvaraisesti, joten niiden perusteella ei voida tehdä kovinkaan tarkkoja johtopäätöksiä vanhennuslämpötilan vaikutuksesta kappaleiden tiheyksiin. Tämä ilmenee myös kuviosta 13, jossa on kuvattuna eri vanhennuslämpötilojen keskimääräistä vaikutusta keskenään. 53 °C:ssa säilytettyjen kappaleiden tiheys näyttäisi kasvavan eniten ja huoneenlämmössä vähiten. Mikään teoria ei tätä kuitenkaan tue, vaan tämä kuvaa paremminkin tulosten epävarmuutta.



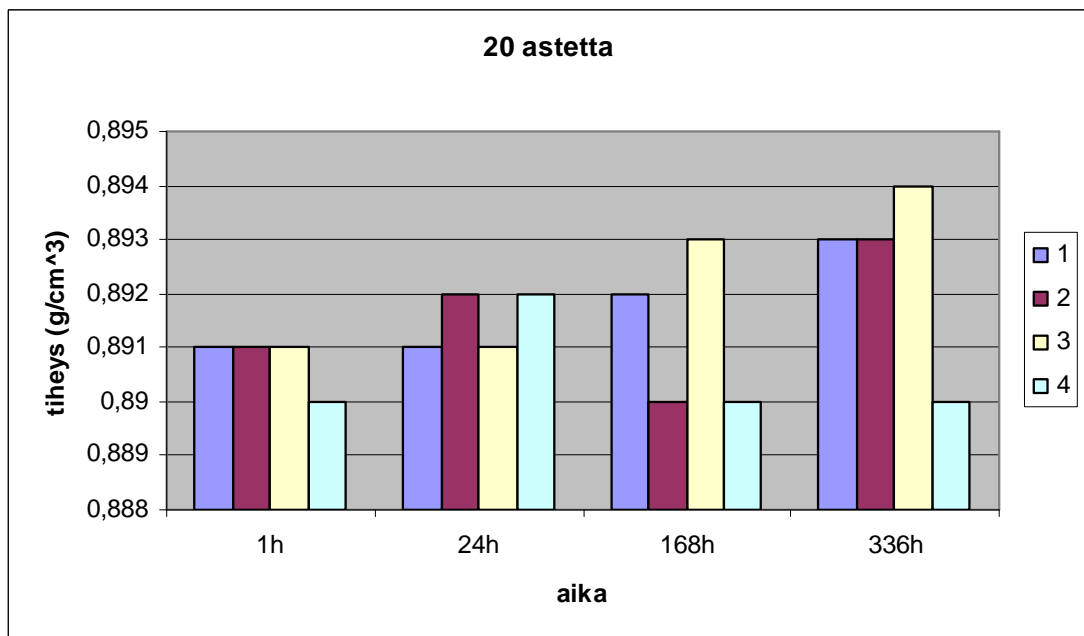
KUVIO 13. Eri vanhennuslämpötilojen vaikutus tiheyteen

Kuviossa 14 on vertailtu eri ajoarvoilla valmistettujen kappaleiden keskimääräisiä tiheyksiä keskenään. Mitään selvää johdonmukaisuutta näissä tuloksissa ei ole, vaan tiheydet tuntuvat vaihtelevan melko satunnaisesti. Valmistuksessa käytetyillä erilaisilla ajoarvoillakaan ei tunnu olevan mitään selvää vaikutusta tiheyteen. Tämä selviää varsinkin tarkasteltaessa heti valmistuksen jälkeen mitattuja kappaleita, eli kuviossa kuvattuna sinisellä pylväällä. Tässä kohtaa satunnaisen mittausvirheen vaikutus kuitenkin korostuu, koska jokaisesta sarjasta mitattiin valmistuksen jälkeen vain yksi kappale. 24 tunnin vanhennuksen jälkeen tehtyjen mittausten tiheydet näyttäisivät olevan suurimmat. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että sillä mittauskerralla kappaleen kelluminen on tulkittu erilailla kuin muilla mittauskerroilla.



KUVIO 14. Eri sarjojen keskimääräisten tiheyksien vertailua

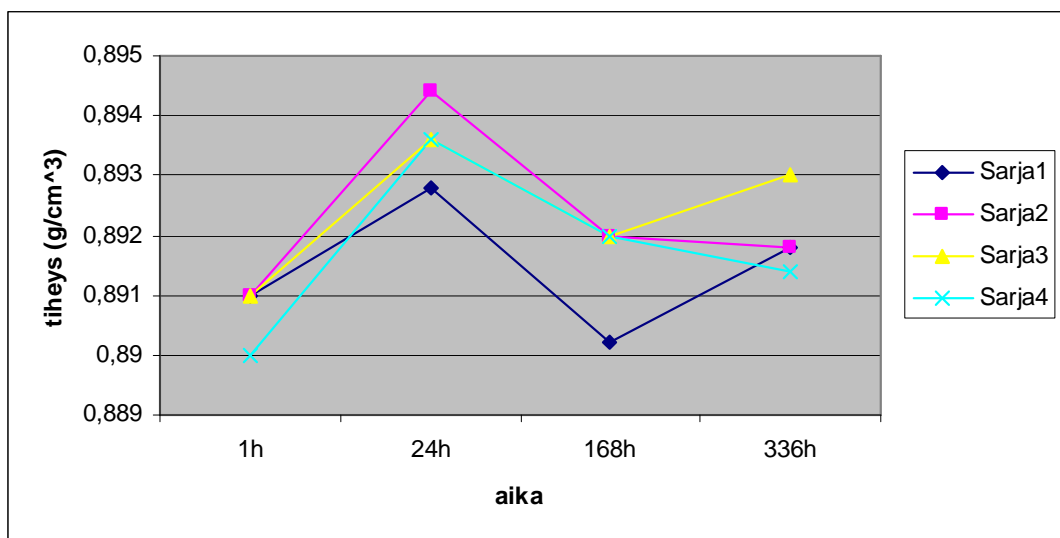
Kuviossa 15 on vielä esimerkin vuoksi tarkasteltu ajoarvojen vaikutusta 20 °C:ssa vanhentuneiden kappaleiden tiheyksiin. Tässä näyttäisi, että sarjan 3 ajoarvoilla kappaleiden tiheys on keskimäärin suurin. Keltainen palkki kuvaa sarjaa 3.



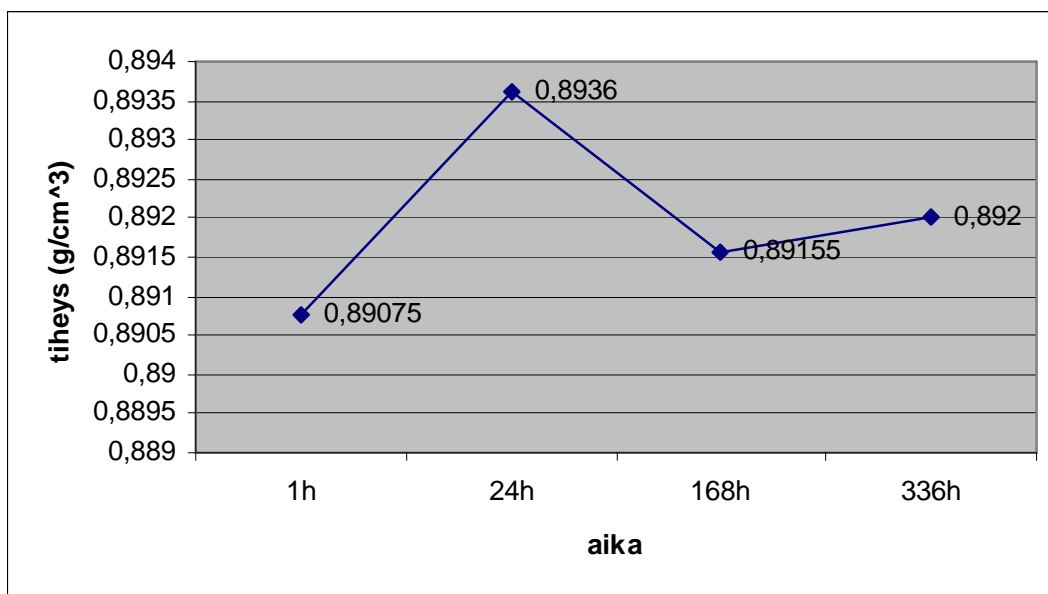
KUVIO 15. Eri ajoarvojen vaikutuksen vertailua 20° C:ssa vanhentuneiden kappaleiden tiheyksiin.

Kun kaikkia tiheyden mittaustuloksista piirrettyjä kuvaajia tarkastellaan, havaitaan, että 336 tunnin säilytyksen jälkeen tehdyissä mittauksissa tulosten hajonta on selvästi pienin. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että silloin itselläni oli jo parempi rutiini tehdä tiheydenmäärittämiä. Kappaleiden kelluntaa nesteessä oli helpompi arvioida, minkä takia uskallan pitää 336 tunnin kohdalla tehtyjä mittauksia jo suuruusluokaltaan oikeina. Erot kappaleiden tiheyksien arvoissa ovat vain muutamia gramman tuhannesosia.

Kuvioissa 16 ja 17 on kuvattuna keskimääräinen tiheyden muutos ajan funktiona. Kuviossa 16 sarjoittain, ja kuviossa 17 kaikkien kappaleiden keskiarvona. Kuten näistä kuvaajista havaitaan, ovat kahden viikon vanhenemisen jälkeiset tiheydet melko lähellä tiheyksiä, jotka on määritetty heti kappaleiden valmistamisen jälkeen.



KUVIO 16. Eri ajoarvoilla valmistettujen kappaleiden keskimääräinen tiheyden muutos.



KUVIO 17. Kaikkien kappaleiden keskimääräinen tiheyden muutos

Kappaleiden tiheyksien avulla niiden kiteisyysaste voitiin määrittellä. Ennakkotietojen perusteella arvelin, että jälkikiteytyminen on suurin yksittäinen tekijä, joka aiheuttaa polypropeenin jälkikutistumista.

100 % kiteisen polypropeenin tiheys on 0,945 ja 0 % kiteisen 0,855 (Moore 1996, 126). Tiheysmittausten perustella kappaleiden keskimääräinen tiheys oli valmistuksen jälkeen 0,89075. 336 tunnin vanhenemisen jälkeen keskimääräinen tiheys oli 0,89200. Nämä arvot näkyvät kuviosta 17. Kiteisyudessa tämä vastaa arvoja 39,72 % ja 41,11 %. Keskimäärin kappaleiden kiteisyysaste oli siis kasvanut vanhenemisen aikana 1,39 % - yksikköä.

Kiteisyysasteen muutos oli näiden mittausten perusteella niin pieni, että sillä ei yksin voida selittää polypropeenikappaleiden suurta jälkikutistuman arvoa. Näiden tulosten perusteella polypropeenikappaleissa tapahtuu jälkikiteytymisen lisäksi jokin muukin ilmiö, joka aiheuttaa kutistumista. Yksi mahdollisuus on jännitysrelaksaatio. (Heikkinen 2005.)

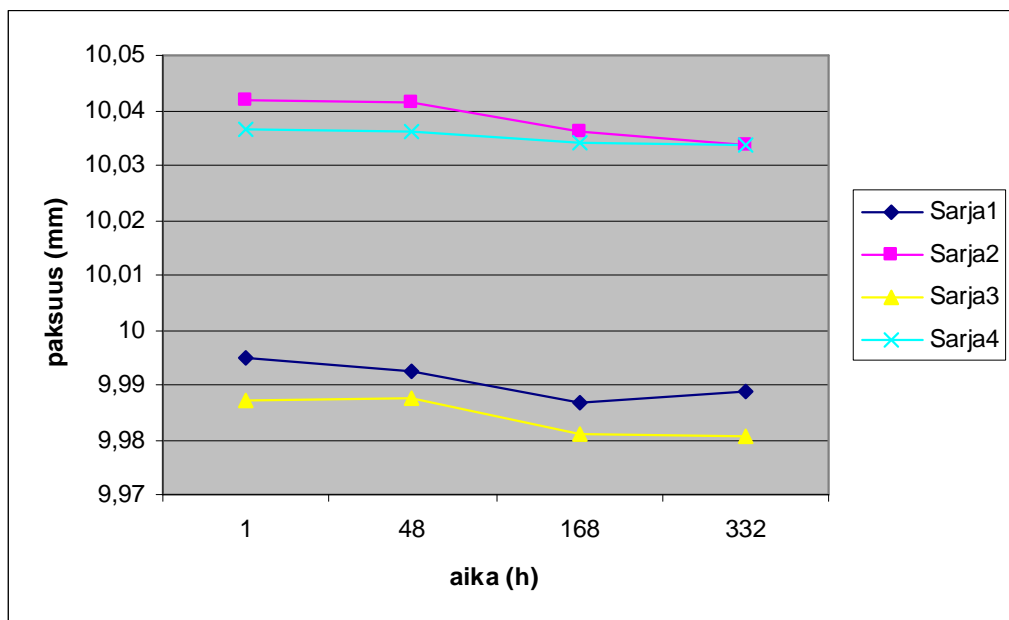
Jatkotutkimuksia voisi suorittaa esim. DSC-laitteella, jotta kappaleiden todelliset kiteisyyden asteet saataisiin paremmin selville. Tällöin voitaisiin tarkemmin määritellä, kuinka suuri osa jälkikutistumasta on todellisuudessa jälkikiteytymisen aiheuttamaa.

6.2 Ulkomitat

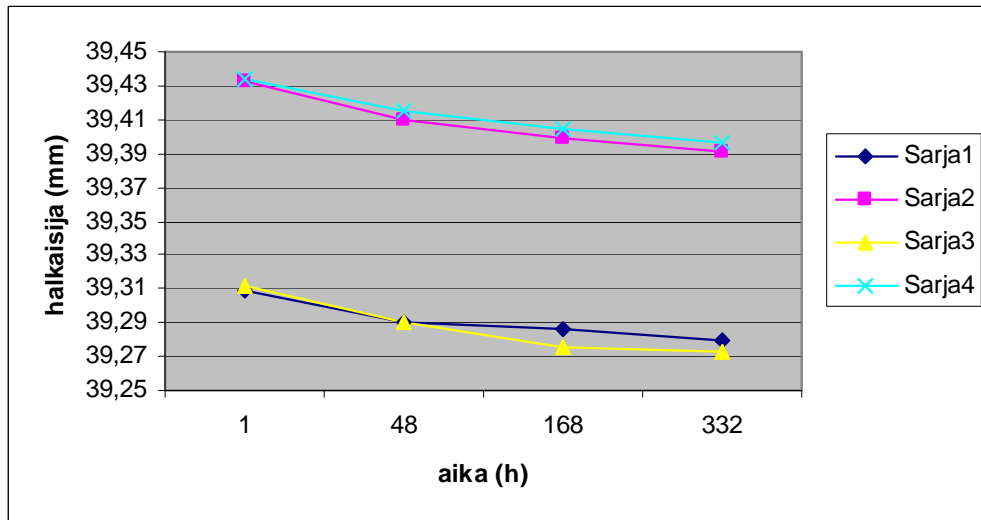
Ulkomittojen tuloksia tarkastellessa kiinnittyy huomio ensimmäisenä 24 tunnin kohdalla tehtyjen mittausten selvästi poikkeavaan lukemaan. Sama ilmiö on havaittavissa sekä paksuuden, että halkaisijan mittaustuloksissa. Koska virhe on säännöllinen, se on todennäköisesti aiheutunut itse mittalaitteesta eli digitaalisesta työntömitasta. 24 tunnin vanhenemisen jälkeen mitattaessa, työntömitan kalibroinnissa on ilmeisesti tapahtunut jokin virhe ja se on näyttänyt säännönmukaisesti liian pieniä lukemia. Muuten mittaustulokset vaikuttavat loogisilta ja oikeilta. Seuraavaksi piirretyistä kuvaajista on 24 tunnin mittaustulokset jätetty pois ilmeisen virheellisyytensä vuoksi.

Tarkasteltaessa mittaustuloksia yksittäisen kappaleen tarkkuudella havaitaan, että tulokset eivät aina ole loogisia. Yksittäisten kappaleiden mittaustulokset löytyvät liitteistä. Mittausten mukaan, jonkin yksittäisen kappaleen mitat näyttäisivät kasvaneen, mutta todellisuudessa näin tuskin on. Tällaiset tulokset johtuvat käytetyn työntömitan tarkkuudesta, joka oli 0,01 mm. Kappaleiden mittamuutokset mittausten välillä olivat kuitenkin pienempiä, mikä aiheutti tuloksiin virhettä. Työssä oli kuitenkin määrällisesti niin paljon mittauksia, että tällaiset yksittäiset mittavirheet eivät näy kovinkaan selvästi, joten tulokset ovat suuruusluokaltaan oikeita. Mitään tarkkoja arvoja kutistumiselle ei kuitenkaan ole mielekästä määritellä. Tulevaisuudessa mittaustekniikkaa kannattaisi kuitenkin kehittää tarkemmaksi ja käyttää esimerkiksi mikrometriä. Kappaleille voisi myös rakentaa mittausjigin ja käyttää mittakelloa.

Kuvioissa 18 ja 19 on tarkasteltu paksuuden ja halkaisijan mittojen muutoksia eri ajoarvoilla ajan funktiona. Suurin yksittäinen tekijä, joka vaikuttaa kappaleen mittoihin näyttäisi olevan jälkipaine. Sarjat 2 ja 4 on ajettu suuremmilla jälkipaineilla. Suhteessa jälkipaineeseen muottilämpötilalla on pienempi vaikutus kappaleiden mittoihin. Ruiskuvalutekniikan teorian perusteella tämä on odotettavissa oleva lopputulos, joten mittauksia ja kappaleiden ajoarvoja voidaan pitää onnistuneina. Kappaleiden kutistumiseen erilaisilla ajoarvoilla sen sijaan ei näyttäisi olevan merkitystä, koska eri ajoarvoilla valmistetut kappaleet näyttäisivät kutistuvan samalla tavalla. Erot mittojen muutoksissa ovat suuruusluokaltaan 0,01 mm.

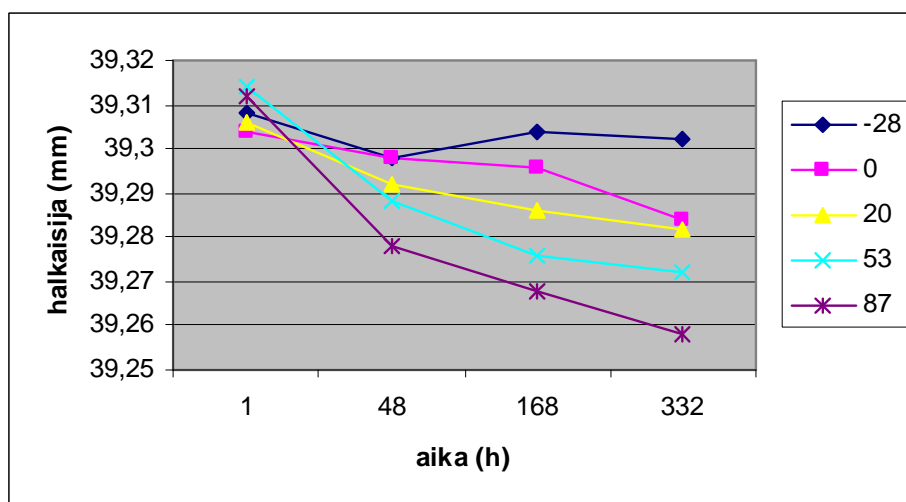


KUVIO 18. Kappaleiden keskimääräiset paksuudet

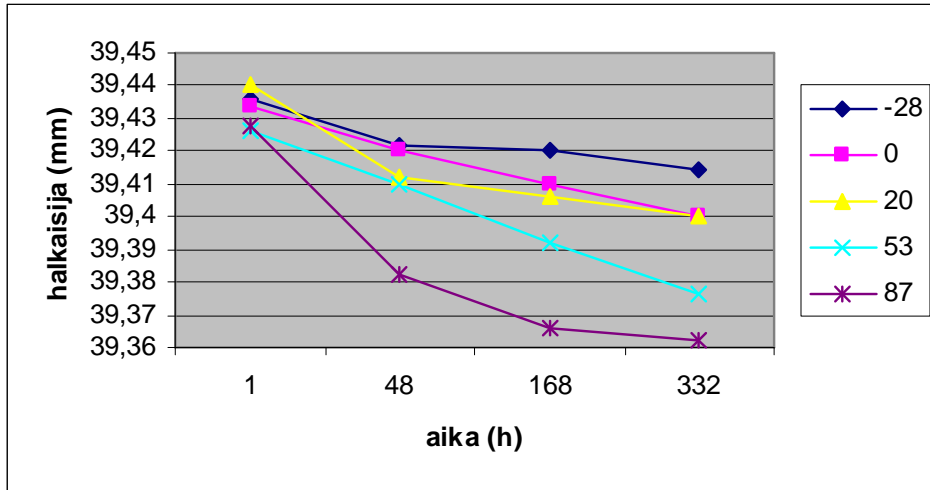


KUVIO 19. Kappaleiden keskimääräiset halkaisijat

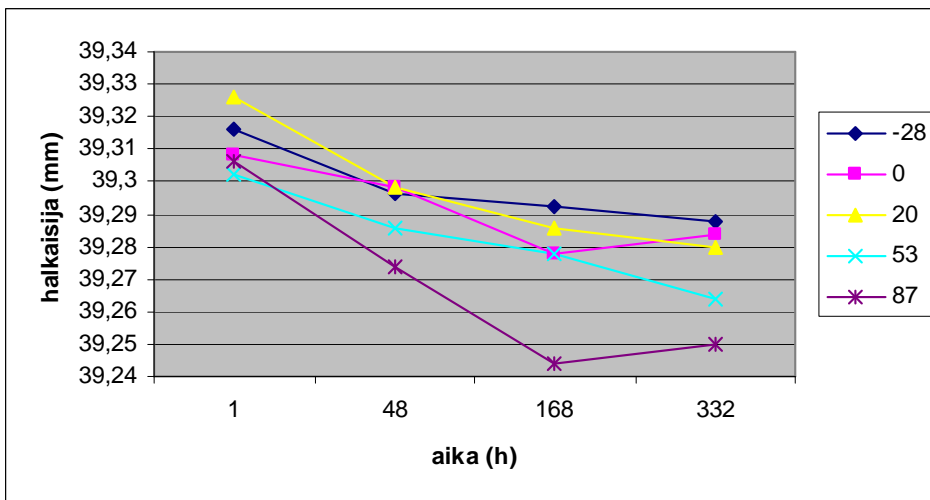
Kuviossa 20-23 on vertailtu eri vanhennuslämpötilojen vaikutusta kappaleiden mittoihin sarjoittain. Näissä kuvioissa on käytetty halkaisijan mittoja. Tuloksista voidaan havaita, että mitä alhaisemmassa lämpötilassa kappaletta säilytetään, sitä vähemmän se kutistuu tai toisinpäin ajateltuna korkeampi säilytyslämpötila suurentaa jälkikutistumaa. Sarjojen välillä ei näissäkään kuvioissa havaita suuria eroja. Kappaleiden mittamuutos halkaisijan arvoissa on suuruusluokkaa 0,05 mm ajoarvoista riippumatta, kahden viikon säilytyksen aikana.



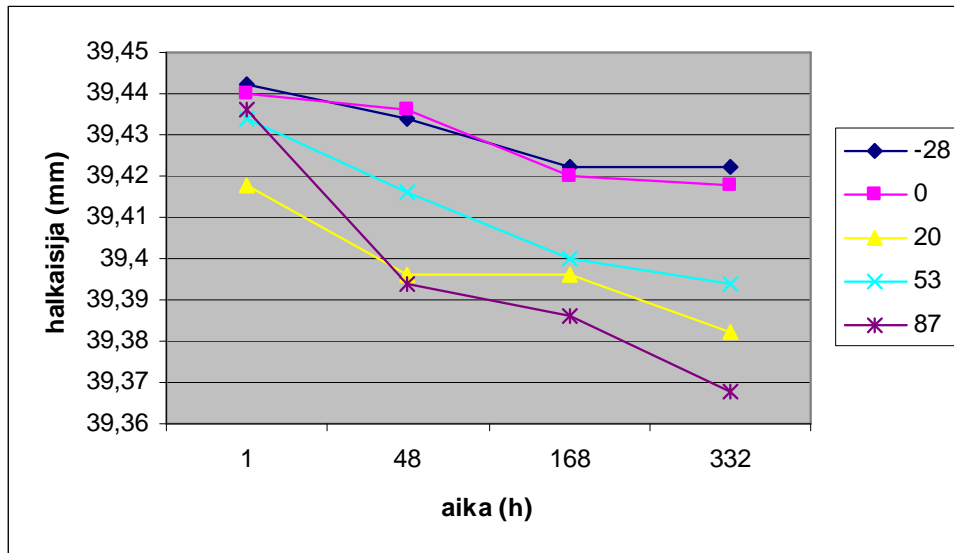
KUVIO 20. Vanhennuslämpötilojen vaikutus halkaisijoihin sarjassa 1



KUVIO 21. Vanhennuslämpötilojen vaikutus halkaisijoihin sarjassa 2

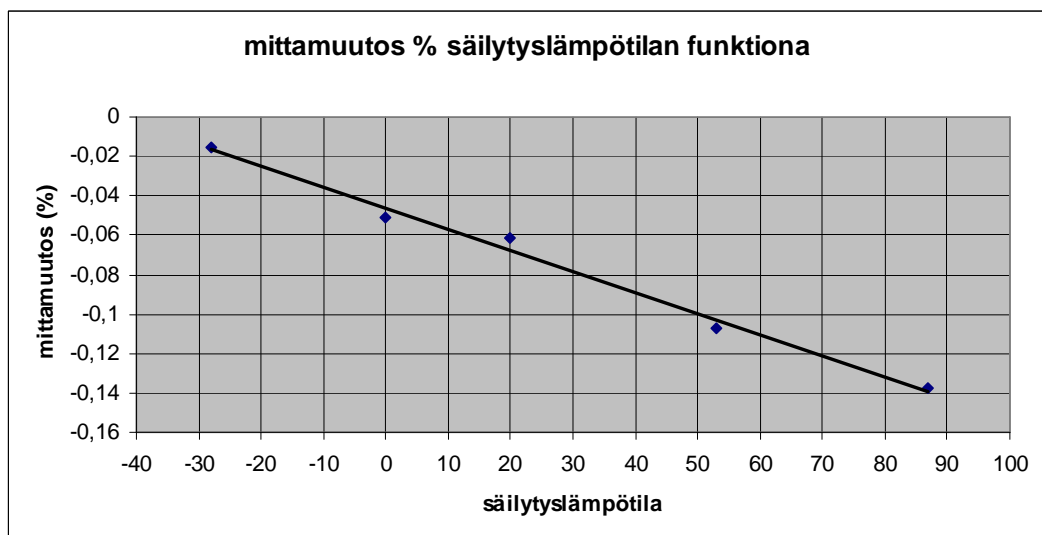


KUVIO 22. Vanhennuslämpötilojen vaikutus halkaisijoihin sarjassa 3



KUVIO 23. Vanhennuslämpötilojen vaikutus halkaisijoihin sarjassa 4

Kuvioiden 20-23 arvoista on määritelty keskimääräinen mittamuutosprosentti eri säilytyslämpötiloissa. Tätä muutosta on kuvattu kuviossa 24. Kuvion x-akselilla on kappaleen säilytyslämpötila ja y-akselilta voidaan lukea vastaava mittamuutos prosentteina. Kappaleella, jonka halkaisija on 40 mm, on vastaavat mitat ääriämpötilojen välillä 39,992 mm ja 39,936 mm kahden viikon säilytyksen jälkeen. Mittojen erotus on siis 0,056 mm.



KUVIO 24. Mittamuutos % eri säilytyslämpötiloissa

Yhteenvedona mittaustuloksista voidaan todeta, että kappaleen valmistuksessa käytetyillä ja nyt tutkituilla ajoparametreilla ei näytä olevan kutistumiseen kovinkaan suurta merkitystä. Kaikki kappaleet kutistuvat samalla lailla. Sen sijaan kappaleen säilytyslämpötilalla on merkitystä. Mitä kylmemmässä kappaletta säilytetään, sitä vähemmän jälkikutistumista tapahtuu. Kappaleen jälkikutistumisen aiheuttamia ilmiöitä ei tapahdu kylmemmässä niin paljon. Kappaleen kiteytyminen ja jännitysrelaksaatio hidastuvat kylmässä.

Saatus tulosta voidaan suoraan soveltaa teollisessa tuotannossa. Valmistuksen jälkeen kappaleet kannattaa siirtää mahdollisimman nopeasti pois kuumasta ruiskuvalukoneesta luota viileämpään varastoon, jos mittamuutokset halutaan minimoida. Suuruusluokaltaan tällöin puhutaan kuitenkin todella mittatarkoista kappaleista.

Jatkotutkimuksena olisi todella mielenkiintoista tutkia, mitä kappaleille tapahtuu, kun ne poistetaan vanhenemislämpötiloista ja annetaan olla huoneenlämpötilassa. Tämä vastaa tilannetta yleisimmissä muovikappaleiden lopullisissa käyttökohteissa. Sitä, kiihtyykö kylmässä säilytettyjen kappaleiden kutistuminen vai ovatko saavutetut tulokset pysyviä, ei nyt suoritetuista mittauksista voinut todeta.

7 YHTEENVETO

Aluksi täytyy todeta, että tämän opinnäytetyön tekeminen oli erittäin mielenkiintoista. Opin paljon polypropeenin BEC 5012 käyttäytymisestä ruiskuvalun yhteydessä. Sain myös lisää varmuutta ruiskuvalukoneen ajoarvojen säätöön.

Koekappaleiden valmistaminen onnistui mielestäni hyvin. Ruiskuvalun yhteydessä ei ilmennyt mitään ongelmia, ja kappaleista saatiin tasalaatuisia mittaustenkin mukaan. Kappaleiden mittaaminenkin onnistui pääosin hyvin. Hieman itseäni jäi harmittamaan kappaleiden tiheyksiä määritettäessä tulosten suuri vaihtelu ja tämän takia tiheyden muutoksista ei saatu selkeää kuvaa. Kappaleiden ulkomittojen mittaukset onnistuivat huomattavasti paremmin. Aluksi hieman häiritsti 24 tunnin mittausten kohdalla tapahtunut kalibrintivirhe, mutta tällä seikalla ei onneksi ollut

kovinkaan suurta merkitystä kokonaisuuden kannalta, koska mittaustuloksia oli niin paljon. Kokonaisuutena mittaustulokset olivat odotetunlaisia.

Syitä, jotka aiheuttavat polypropeenin jälkikutistumista, ei tässä työssä tutkittu kovinkaan tarkasti, mutta työ tarjoaa hyvät lähtökohdat jatkotutkimuksille, esimerkiksi kappaleiden todellisten kiteisyysasteiden tarkemmille määrittämisille. Tarkemmat testimenetelmät ja suuremmat kappalemäärät tiheyden määrittämisissä antaisivat todennäköisesti tarkempia tuloksia.

Mielestäni työlle asetetut tavoitteet täyttyivät ainakin osittain. Kutistumisen määrälle ei onnistuttu määrittämään mittaustarkkuudesta johtuen mitään tarkkaa arvoa. Työssä onnistuttiin kuitenkin selvittämään, että jälkikutistumista voidaan vähentää säilyttämällä kappaleita kylmässä. Kappaleiden valmistuksessa käytetyillä ajoarvoilla ei näyttänyt olevan merkitystä kutistumaan, vaan kaikki kappaleet kutistuivat samalla tavoin.

LÄHTEET

Airasmaa I, Kokko J, Komppa V, Saarela O. 1991. Muovikomposiitit. Helsinki: muoviyhdistys

Gipson P, Grelle P, Salamon B. 1999. Predicting shrinkage for polypropylene. Injection molding magazine 33-36

Heikkinen R. 2005. Laboratorioinsinööri. Lahden ammattikorkeakoulu, Tekniikan laitos. Keskustelut.

Kurri V, Malen T, Sandell R, Virtanen M. 1999. Muovitekniikan perusteet. Helsinki: opetushallitus

Moore E. 1996. Polypropylene Handbook. Cincinnati: Hanser Gardner Publications

Tammela V. 1989. Polymeeritiede ja muovitekhnologia osa 3. Espoo: Otatieto

Valtanen E. 2002. Tekniikan taulukkokirja. 12. painos. Jyväskylä: Genesis –kirjat Oy

LIITTEET

LIITE 1 sarjan 1 mittaus tulokset

LIITE 2 sarjan 2 mittaus tulokset

LIITE 3 sarjan 3 mittaus tulokset

LIITE 4 sarjan 4 mittaus tulokset

LIITE 1

SARJA1

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh.lämpötila
1	10,00	39,31	12,21	20
2	9,99	39,30	12,21	20
3	10,00	39,31	12,20	20
4	9,99	39,31	12,22	20
5	10,00	39,30	12,22	20
6	9,99	39,31	12,23	-28
7	10,00	39,30	12,24	-28
8	10,00	39,32	12,23	-28
9	9,99	39,31	12,23	-28
10	10,00	39,30	12,22	-28
11	9,99	39,30	12,23	0
12	10,00	39,30	12,23	0
13	9,99	39,30	12,23	0
14	9,99	39,32	12,23	0
15	10,00	39,30	12,22	0
16	9,99	39,31	12,22	53
17	9,99	39,32	12,22	53
18	10,00	39,31	12,24	53
19	9,99	39,30	12,23	53
20	10,00	39,33	12,24	53
21	10,00	39,32	12,22	87
22	9,99	39,33	12,22	87
23	9,99	39,29	12,21	87
24	10,00	39,29	12,23	87
25	9,99	39,33	12,23	87
keskiarvo	9,995	39,320	12,220	

SARJA1 24h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh.lämpötila
1	9,99	39,29	12,21	20
2	9,99	39,28	12,21	20
3	9,98	39,29	12,2	20
4	9,98	39,29	12,22	20
5	9,98	39,28	12,22	20
6	9,97	39,29	12,23	-28
7	9,99	39,29	12,24	-28
8	9,97	39,28	12,23	-28
9	9,97	39,27	12,23	-28
10	9,98	39,28	12,22	-28
11	9,95	39,26	12,23	0
12	9,95	39,25	12,23	0
13	9,96	39,27	12,23	0
14	9,96	39,27	12,23	0
15	9,98	39,27	12,22	0
16	9,97	29,28	12,22	53
17	9,96	39,27	12,22	53
18	9,97	39,26	12,24	53
19	9,97	39,26	12,23	53
20	9,97	39,28	12,24	53
21	9,96	39,25	12,22	87
22	9,96	39,24	12,22	87
23	9,96	39,25	12,21	87
24	9,97	39,24	12,23	87
25	9,98	39,24	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,265	12,220	

SARJA1 48h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh.lämpötila
1	9,99	39,29	12,21	20
2	9,99	39,29	12,21	20
3	10,00	39,28	12,2	20
4	9,99	39,30	12,22	20
5	10,00	39,30	12,22	20
6	9,99	39,29	12,23	-28
7	9,99	39,29	12,24	-28
8	9,99	39,30	12,23	-28
9	9,98	39,31	12,23	-28
10	9,99	39,30	12,22	-28
11	9,99	39,29	12,23	0
12	9,99	39,30	12,23	0
13	9,99	39,30	12,23	0
14	10,00	39,30	12,23	0
15	10,00	39,30	12,22	0
16	9,99	39,28	12,22	53
17	9,99	39,29	12,22	53
18	9,99	39,30	12,24	53
19	9,99	39,29	12,23	53
20	10,01	39,28	12,24	53
21	9,99	39,27	12,22	87
22	10,00	39,27	12,22	87
23	9,98	39,29	12,21	87
24	9,99	39,28	12,23	87
25	10,00	39,28	12,23	87
keskiarvo	9,995	39,285	12,220	

SARJA1 168h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh.lämpötila
1	9,98	39,29	12,21	20
2	9,99	39,28	12,21	20
3	9,98	39,28	12,2	20
4	9,98	39,29	12,22	20
5	9,98	39,29	12,22	20
6	9,98	39,30	12,23	-28
7	9,99	39,29	12,24	-28
8	9,99	39,32	12,23	-28
9	9,99	39,32	12,23	-28
10	9,98	39,29	12,22	-28
11	9,98	39,29	12,23	0
12	10,00	39,31	12,23	0
13	9,98	39,29	12,23	0
14	9,99	39,29	12,23	0
15	10,00	39,3	12,22	0
16	9,99	39,28	12,22	53
17	9,99	39,28	12,22	53
18	9,99	39,27	12,24	53
19	10,00	39,28	12,23	53
20	10,00	39,27	12,24	53
21	9,98	39,26	12,22	87
22	9,98	39,27	12,22	87
23	9,98	39,26	12,21	87
24	9,98	39,28	12,23	87
25	9,99	39,27	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,280	12,220	

SARJA1 336h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh.lämpötila
1	9,98	39,29	12,21	20
2	9,99	39,28	12,21	20
3	9,98	39,28	12,2	20
4	9,99	39,28	12,22	20
5	9,99	39,28	12,22	20
6	9,99	39,31	12,23	-28
7	10,00	39,30	12,24	-28
8	10,00	39,30	12,23	-28
9	9,99	39,31	12,23	-28
10	9,99	39,29	12,22	-28
11	9,99	39,28	12,23	0
12	9,99	39,28	12,23	0
13	9,99	39,29	12,23	0
14	10,00	39,29	12,23	0
15	10,00	39,28	12,22	0
16	9,98	39,27	12,22	53
17	9,98	39,26	12,22	53
18	9,99	39,28	12,24	53
19	9,99	39,27	12,23	53
20	10,00	39,28	12,24	53
21	9,98	39,26	12,22	87
22	9,98	39,26	12,22	87
23	9,98	39,25	12,21	87
24	9,98	39,26	12,23	87
25	9,99	39,26	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,275	12,220	

LIITE 2

SARJA 2

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
26	10,05	39,44	12,44	20
27	10,04	39,45	12,44	20
28	10,05	39,42	12,44	20
29	10,05	39,44	12,43	20
30	10,04	39,45	12,43	20
31	10,04	39,42	12,43	-28
32	10,04	39,45	12,44	-28
33	10,04	39,44	12,43	-28
34	10,04	39,44	12,43	-28
35	10,04	39,43	12,44	-28
36	10,05	39,44	12,43	0
37	10,05	39,43	12,43	0
38	10,04	39,43	12,44	0
39	10,04	39,44	12,44	0
40	10,04	39,43	12,43	0
41	10,04	39,42	12,44	53
42	10,04	39,43	12,43	53
43	10,03	39,42	12,43	53
44	10,05	39,43	12,44	53
45	10,04	39,43	12,43	53
46	10,04	39,44	12,43	87
47	10,04	39,42	12,44	87
48	10,04	39,43	12,44	87
49	10,04	39,43	12,43	87
50	10,04	39,42	12,44	87
keskiarvo	10,045	39,43	12,44	

SARJA2 24h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
26	10,04	39,42	12,44	20
27	10,04	39,42	12,44	20
28	10,03	39,42	12,44	20
29	10,04	39,41	12,43	20
30	10,03	39,42	12,43	20
31	10,03	39,40	12,43	-28
32	10,03	39,42	12,44	-28
33	10,03	39,40	12,43	-28
34	10,03	39,41	12,43	-28
35	10,03	39,42	12,44	-28
36	10,03	39,43	12,43	0
37	10,04	39,41	12,43	0
38	10,03	39,40	12,44	0
39	10,03	39,42	12,44	0
40	10,03	39,41	12,43	0
41	10,02	39,37	12,44	53
42	10,01	39,37	12,43	53
43	10,02	39,39	12,43	53
44	10,02	39,39	12,44	53
45	10,02	39,39	12,43	53
46	10,02	39,38	12,43	87
47	10,04	39,37	12,44	87
48	10,03	39,37	12,44	87
49	10,04	39,38	12,43	87
50	10,04	39,36	12,44	87
keskiarvo	10,04	39,39	12,44	

SARJA2 48h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
26	10,05	39,41	12,44	20
27	10,04	39,41	12,44	20
28	10,04	39,41	12,44	20
29	10,05	39,42	12,43	20
30	10,04	39,41	12,43	20
31	10,04	39,43	12,43	-28
32	10,04	39,42	12,44	-28
33	10,04	39,41	12,43	-28
34	10,04	39,43	12,43	-28
35	10,04	39,42	12,44	-28
36	10,04	39,43	12,43	0
37	10,05	39,43	12,43	0
38	10,03	39,41	12,44	0
39	10,04	39,42	12,44	0
40	10,04	39,41	12,43	0
41	10,04	39,41	12,44	53
42	10,04	39,4	12,43	53
43	10,04	39,42	12,43	53
44	10,04	39,41	12,44	53
45	10,04	39,41	12,43	53
46	10,05	39,38	12,43	87
47	10,04	39,37	12,44	87
48	10,05	39,39	12,44	87
49	10,04	39,39	12,43	87
50	10,04	39,38	12,44	87
keskiarvo	10,045	39,395	12,44	

SARJA 2
168h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
26	10,04	39,41	12,44	20
27	10,04	39,40	12,44	20
28	10,04	39,41	12,44	20
29	10,04	39,40	12,43	20
30	10,04	39,41	12,43	20
31	10,04	39,41	12,43	-28
32	10,04	39,42	12,44	-28
33	10,03	39,43	12,43	-28
34	10,04	39,42	12,43	-28
35	10,04	39,42	12,44	-28
36	10,03	39,42	12,43	0
37	10,04	39,40	12,43	0
38	10,04	39,42	12,44	0
39	10,03	39,40	12,44	0
40	10,04	39,41	12,43	0
41	10,04	39,39	12,44	53
42	10,03	39,40	12,43	53
43	10,03	39,39	12,43	53
44	10,04	39,39	12,44	53
45	10,04	39,39	12,43	53
46	10,03	39,36	12,43	87
47	10,03	39,36	12,44	87
48	10,03	39,37	12,44	87
49	10,03	39,37	12,43	87
50	10,03	39,37	12,44	87
keskiarvo	10,035	39,39	12,44	

SARJA2 336h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
26	10,04	39,40	12,44	20
27	10,04	39,40	12,44	20
28	10,03	39,40	12,44	20
29	10,04	39,40	12,43	20
30	10,03	39,40	12,43	20
31	10,03	39,43	12,43	-28
32	10,04	39,41	12,44	-28
33	10,03	39,41	12,43	-28
34	10,04	39,40	12,43	-28
35	10,03	39,42	12,44	-28
36	10,04	39,42	12,43	0
37	10,04	39,40	12,43	0
38	10,03	39,39	12,44	0
39	10,04	39,40	12,44	0
40	10,03	39,39	12,43	0
41	10,03	39,38	12,44	53
42	10,03	39,38	12,43	53
43	10,03	39,37	12,43	53
44	10,03	39,38	12,44	53
45	10,04	39,37	12,43	53
46	10,03	39,37	12,43	87
47	10,03	39,35	12,44	87
48	10,03	39,36	12,44	87
49	10,03	39,36	12,43	87
50	10,03	39,37	12,44	87
keskiarvo	10,035	39,385	12,44	

SARJA 3

kappale				
nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
51	9,99	39,32	12,22	20
52	9,99	39,33	12,24	20
53	9,99	39,32	12,22	20
54	9,99	39,34	12,22	20
55	9,98	39,32	12,22	20
56	9,99	39,34	12,22	-28
57	9,98	39,32	12,23	-28
58	10,00	39,30	12,24	-28
59	9,99	39,31	12,23	-28
60	9,99	39,31	12,22	-28
61	9,98	39,30	12,22	0
62	9,98	39,32	12,22	0
63	9,99	39,31	12,22	0
64	9,98	39,30	12,23	0
65	9,99	39,31	12,22	0
66	9,99	39,31	12,22	53
67	10,00	39,30	12,22	53
68	9,99	39,30	12,22	53
69	9,98	39,30	12,22	53
70	9,98	39,30	12,22	53
71	9,99	39,30	12,22	87
72	9,99	39,31	12,22	87
73	9,98	39,31	12,21	87
74	9,99	39,30	12,21	87
75	9,98	39,31	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,315	12,225	

SARJA3 24h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
51	9,98	39,28	12,22	20
52	9,99	39,28	12,24	20
53	9,98	39,30	12,22	20
54	9,99	39,29	12,22	20
55	9,98	39,29	12,22	20
56	9,98	39,29	12,22	-28
57	9,98	39,29	12,23	-28
58	10,00	39,29	12,24	-28
59	9,99	39,29	12,23	-28
60	9,99	39,29	12,22	-28
61	9,98	39,28	12,22	0
62	9,99	39,29	12,22	0
63	9,98	39,30	12,22	0
64	9,99	39,29	12,23	0
65	9,99	39,28	12,22	0
66	9,98	39,27	12,22	53
67	9,98	39,27	12,22	53
68	9,97	39,28	12,22	53
69	9,97	39,26	12,22	53
70	9,98	39,27	12,22	53
71	9,97	39,27	12,22	87
72	9,98	39,27	12,22	87
73	9,98	39,26	12,21	87
74	9,98	39,27	12,21	87
75	9,98	39,26	12,23	87
keskiarvo	9,980	39,270	12,225	

SARJA3 48h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
51	9,98	39,29	12,22	20
52	9,97	39,30	12,24	20
53	9,99	39,30	12,22	20
54	9,98	39,31	12,22	20
55	9,99	39,29	12,22	20
56	9,99	39,30	12,22	-28
57	9,99	39,30	12,23	-28
58	10,00	39,29	12,24	-28
59	9,99	39,28	12,23	-28
60	10,00	39,31	12,22	-28
61	10,00	39,29	12,22	0
62	9,99	39,28	12,22	0
63	9,99	39,31	12,22	0
64	9,99	39,31	12,23	0
65	9,98	39,30	12,22	0
66	9,99	39,28	12,22	53
67	9,99	39,28	12,22	53
68	9,98	39,28	12,22	53
69	9,99	39,29	12,22	53
70	9,99	39,30	12,22	53
71	9,98	39,28	12,22	87
72	9,99	39,28	12,22	87
73	9,98	39,27	12,21	87
74	9,98	39,27	12,21	87
75	9,99	39,27	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,280	12,225	

SARJA3 168h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
51	9,98	39,28	12,22	20
52	9,98	39,28	12,24	20
53	9,98	39,29	12,22	20
54	9,98	39,30	12,22	20
55	9,98	39,28	12,22	20
56	9,97	39,30	12,22	-28
57	9,99	39,30	12,23	-28
58	10,00	39,29	12,24	-28
59	9,99	39,28	12,23	-28
60	9,98	39,29	12,22	-28
61	9,98	39,28	12,22	0
62	9,98	39,28	12,22	0
63	9,97	39,28	12,22	0
64	9,98	39,27	12,23	0
65	9,98	39,28	12,22	0
66	9,98	39,28	12,22	53
67	9,99	39,28	12,22	53
68	9,99	39,28	12,22	53
69	9,98	39,27	12,22	53
70	9,97	39,28	12,22	53
71	9,97	39,24	12,22	87
72	9,99	39,23	12,22	87
73	9,97	39,26	12,21	87
74	9,98	39,25	12,21	87
75	9,99	39,24	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,260	12,225	

SARJA3 336h

kappale nro.	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
51	9,98	39,27	12,22	20
52	9,98	39,29	12,24	20
53	9,98	39,28	12,22	20
54	9,98	39,29	12,22	20
55	9,98	39,27	12,22	20
56	9,99	39,30	12,22	-28
57	9,99	39,28	12,23	-28
58	9,99	39,28	12,24	-28
59	9,99	39,29	12,23	-28
60	9,98	39,29	12,22	-28
61	9,98	39,27	12,22	0
62	9,98	39,28	12,22	0
63	9,98	39,29	12,22	0
64	9,98	39,29	12,23	0
65	9,98	39,29	12,22	0
66	9,98	39,26	12,22	53
67	9,97	39,27	12,22	53
68	9,98	39,26	12,22	53
69	9,98	39,27	12,22	53
70	9,97	39,26	12,22	53
71	9,97	39,25	12,22	87
72	9,99	39,24	12,22	87
73	9,97	39,26	12,21	87
74	9,98	39,25	12,21	87
75	9,99	39,25	12,23	87
keskiarvo	9,985	39,260	12,225	

LIITE 4

sarja4

kappaleen				vanh.
nro	paksuus	halk.	paino	Lämpötila
76	10,04	39,4	12,43	20
77	10,03	39,42	12,43	20
78	10,04	39,41	12,42	20
79	10,03	39,42	12,42	20
80	10,03	39,44	12,44	20
81	10,04	39,44	12,43	-28
82	10,04	39,44	12,43	-28
83	10,04	39,44	12,43	-28
84	10,04	39,44	12,43	-28
85	10,04	39,45	12,42	-28
86	10,03	39,45	12,42	0
87	10,04	39,43	12,43	0
88	10,03	39,44	12,43	0
89	10,03	39,44	12,42	0
90	10,03	39,44	12,42	0
91	10,04	39,43	12,43	53
92	10,04	39,44	12,42	53
93	10,03	39,43	12,42	53
94	10,03	39,44	12,43	53
95	10,04	39,43	12,43	53
96	10,04	39,44	12,42	87
97	10,04	39,43	12,42	87
98	10,04	39,43	12,42	87
99	10,04	39,44	12,42	87
100	10,04	39,44	12,42	87
keskiarvo	10,040	39,420	12,425	

sarja4 24h

kappaleen nro	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
76	10,03	39,37	12,43	20
77	10,02	39,37	12,43	20
78	10,03	39,38	12,42	20
79	10,03	39,40	12,42	20
80	10,03	39,40	12,44	20
81	10,03	39,43	12,43	-28
82	10,03	39,43	12,43	-28
83	10,03	39,43	12,43	-28
84	10,04	39,42	12,43	-28
85	10,03	39,42	12,42	-28
86	10,03	39,42	12,42	0
87	10,03	39,41	12,43	0
88	10,03	39,42	12,43	0
89	10,04	39,42	12,42	0
90	10,03	39,41	12,42	0
91	10,03	39,40	12,43	53
92	10,03	39,42	12,42	53
93	10,03	39,40	12,42	53
94	10,04	39,41	12,43	53
95	10,03	39,40	12,43	53
96	10,03	39,38	12,42	87
97	10,02	39,39	12,42	87
98	10,02	39,38	12,42	87
99	10,03	39,39	12,42	87
100	10,02	39,37	12,42	87
keskiarvo	10,025	39,370	12,425	

sarja4 48h

kappaleen nro	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
76	10,03	39,38	12,43	20
77	10,03	39,38	12,43	20
78	10,04	39,40	12,42	20
79	10,04	39,41	12,42	20
80	10,03	39,41	12,44	20
81	10,04	39,44	12,43	-28
82	10,03	39,43	12,43	-28
83	10,04	39,43	12,43	-28
84	10,04	39,44	12,43	-28
85	10,04	39,43	12,42	-28
86	10,03	39,44	12,42	0
87	10,04	39,43	12,43	0
88	10,04	39,44	12,43	0
89	10,04	39,44	12,42	0
90	10,03	39,43	12,42	0
91	10,03	39,40	12,43	53
92	10,04	39,42	12,42	53
93	10,04	39,42	12,42	53
94	10,04	39,42	12,43	53
95	10,04	39,42	12,43	53
96	10,03	39,39	12,42	87
97	10,03	39,38	12,42	87
98	10,04	39,40	12,42	87
99	10,04	39,40	12,42	87
100	10,03	39,40	12,42	87
keskiarvo	10,030	39,39	12,425	

sarja4 168h

kappaleen nro	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
76	10,02	39,39	12,43	20
77	10,02	39,39	12,43	20
78	10,03	39,40	12,42	20
79	10,03	39,40	12,42	20
80	10,03	39,40	12,44	20
81	10,04	39,41	12,43	-28
82	10,04	39,42	12,43	-28
83	10,04	39,43	12,43	-28
84	10,04	39,42	12,43	-28
85	10,04	39,43	12,42	-28
86	10,03	39,42	12,42	0
87	10,04	39,42	12,43	0
88	10,03	39,42	12,43	0
89	10,04	39,43	12,42	0
90	10,04	39,41	12,42	0
91	10,04	39,40	12,43	53
92	10,04	39,40	12,42	53
93	10,03	39,40	12,42	53
94	10,04	39,40	12,43	53
95	10,04	39,40	12,43	53
96	10,03	39,38	12,42	87
97	10,02	39,40	12,42	87
98	10,03	39,39	12,42	87
99	10,03	39,38	12,42	87
100	10,03	39,38	12,42	87
keskiarvo	10,025	39,39	12,425	

sarja4 336h

kappaleen				
nro	paksuus	halk.	paino	vanh. Lämpötila
76	10,03	39,37	12,43	20
77	10,02	39,37	12,43	20
78	10,03	39,38	12,42	20
79	10,03	39,39	12,42	20
80	10,03	39,4	12,44	20
81	10,03	39,43	12,43	-28
82	10,04	39,42	12,43	-28
83	10,03	39,42	12,43	-28
84	10,04	39,43	12,43	-28
85	10,04	39,41	12,42	-28
86	10,04	39,42	12,42	0
87	10,04	39,43	12,43	0
88	10,03	39,42	12,43	0
89	10,04	39,42	12,42	0
90	10,04	39,4	12,42	0
91	10,04	39,39	12,43	53
92	10,04	39,39	12,42	53
93	10,03	39,4	12,42	53
94	10,04	39,4	12,43	53
95	10,04	39,39	12,43	53
96	10,03	39,37	12,42	87
97	10,03	39,37	12,42	87
98	10,02	39,36	12,42	87
99	10,03	39,37	12,42	87
100	10,03	39,37	12,42	87
keskiarvo	10,030	39,370	12,425	