

# Fyss351 Viskositeettimittauksia

Assistentti:

Arvostellaan

Työ jätetty:

## **Abstract**

Tässä työssä tutkimme newtonisen ja epänewtonisen nesteen viskositeetteja Höpplerin viskometrillä ja rotaatioviskometrillä. Newtoniselle nesteelle saimme Höpplerin viskometrillä suoritetuista mittauksista arvoksi  $(0,00151 \pm 0,00006) \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$  ja rotaatioviskometrillä suoritetuista mittauksista arvoksi  $(0,00135 \pm 0,00002) \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ . Sen sijaan epänewtonista nestettä käsitelimme vain rotaatioviskometrillä. Nesteen viskositeetti muuttui leikkausnopeuden funktiona siten, että viskositeetti pieneni leikkausnopeuden suurentuessa. Tutkimme myös lämpötilan vaikutusta epänewtonisen nesteen viskositeettiin ja totesimme lämpötilan nousun pienentävän viskositeettia.

# Sisältö

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Johdanto</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Teoreettiset lähtökohdat</b>                                 | <b>1</b>  |
| 2.1 Höpplerin viskometri . . . . .                                | 1         |
| 2.1.1 Kuulaan vaikuttavat voimat . . . . .                        | 1         |
| 2.1.2 Viskositeetti . . . . .                                     | 2         |
| 2.2 Rotaatioviskometri . . . . .                                  | 2         |
| 2.2.1 Potenssilaki . . . . .                                      | 3         |
| <b>3 Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät</b>              | <b>3</b>  |
| 3.1 Höpplerin viskometri . . . . .                                | 3         |
| 3.2 Rotaatioviskometri . . . . .                                  | 4         |
| <b>4 Havainnot ja laskut</b>                                      | <b>6</b>  |
| 4.1 Newtoninen neste . . . . .                                    | 6         |
| 4.1.1 Kuulan tiheys . . . . .                                     | 6         |
| 4.1.2 Nesteen tiheys . . . . .                                    | 6         |
| 4.1.3 Viskositeetti Höpplerin viskometrillä . . . . .             | 7         |
| 4.1.4 Viskositeetti rotaatioviskometrillä . . . . .               | 8         |
| 4.2 Epänewtoninen neste . . . . .                                 | 9         |
| 4.2.1 Leikkausjännityksen riippuvuus leikkausnopeudesta . . . . . | 9         |
| 4.2.2 Potenssilaki . . . . .                                      | 11        |
| 4.2.3 Viskositeetin suhde leikkausnopeuteen . . . . .             | 13        |
| <b>5 Johtopäätökset</b>   | <b>14</b> |
| <b>6 Liitteet</b>   | <b>15</b> |

# 1 Johdanto

Tässä työssä tutkimme nesteiden viskositeetteja, eli nesteen eri kerrosten välistä liukumiskitkaa. Mitä suurempi on fluidin viskositeetti, sitä voimakkaammin se pyrkii vastustamaan ulkoisten voimien aiheuttamia muodonmuutoksia.

Fluidit voidaan jakaa kahteen eri luokkaan sen mukaan, miten niiden viskositeetit käyttäytyvät: newtoniseen ja epänewtoniseen. Newtonisella fluidilla viskositeetti ei riipu leikkausnopeudesta, kun taas epänewtonisella aineella viskositeetti muuttuu leikkausnopeuden funktiona.[3, sivu 6-4]

Työssä käytettyihin nesteisiin muodostuva virtaus on oltava laminaarista, eli nestekerrokset eivät sekoitu toisiinsa, vaan ovat ns. sileitä.

## 2 Teoreettiset lähtökohdat

### 2.1 Höpplerin viskometri

Höpplerin viskometri koostuu vinosta putkesta ( $10^\circ$ ), joka on täytetty tutkittavalla nesteellä. Kun putkesta pudotetaan kuula, kuulaan vaikuttaa kokonaisuudessaan kolme eri voimaa: kitka-, noste- ja gravitaatiovoima.

#### 2.1.1 Kuulaan vaikuttavat voimat

Kitkavoima voidaan esittää yhtälönä

$$F_f = fv = 6\pi\mu rv, \quad (1)$$

jossa  $\mu$  on nesteen viskositeetti,  $r$  kuulan säde ja  $v$  kuulan nopeus.

Nostevoima ilmaistaan ilman putken normaalin suuntaista komponenttia, koska putken seinämät kohdistavan nesteeseen yhtäsuuren pystysuuntaisen voiman kumoten normaali-voiman. Eli siitä huomoidaan vain putken suuntainen komponentti, joka on

$$F_N = F_n \cos \theta = m_n g \cos \theta = \rho_n V_K \cos \theta, \quad (2)$$

jossa  $\rho_n$  on nesteen tiheys,  $V_K$  kuulan tilavuus ja  $g$  painovoiman aiheuttama kiihtyvyys.

Kuten nostevoiman tapauksessa, myös gravitaatiovoimasta huomioidaan vain putken suuntainen komponentti:

$$F_G = G \cos \theta = m_K g \cos \theta = \rho_K V_K g \cos \theta \quad (3)$$

### 2.1.2 Viskositeetti

Newtonin toisen lain mukaan kappaleeseen vaikuttava kokonaisvoima on kappaleen massan ja sen saaman kiihtyvyyden tulo, eli

$$m \frac{dv}{dt} = G - F_n - fv \Rightarrow \frac{dv}{dt} = -\frac{f}{m} \left( v - \frac{G - F_n}{f} \right), \quad (4)$$

joka saadaan muunnettua muotoon

$$\begin{aligned} \int_{v_0}^v \frac{dv}{v - \frac{G - F_n}{f}} &= \int_0^t \frac{-f}{m} dt \\ \Rightarrow \ln \left( v - \frac{G - F_n}{f} \right) - \ln \left( v_0 - \frac{G - F_n}{f} \right) &= -\frac{f}{m} (t - 0) \\ \Rightarrow \ln \left( \frac{v - \frac{G - F_n}{f}}{v_0 - \frac{G - F_n}{f}} \right) &= -\frac{f}{m} t \\ \Rightarrow v - \frac{G - F_n}{f} &= \left( v_0 - \frac{G - F_n}{f} \right) e^{-\frac{f}{m} t} \\ \Rightarrow v &= \frac{G - F_n}{f} + \left( v_0 + \frac{G - F_n}{f} \right) e^{-\frac{f}{m} t}. \quad (5) \end{aligned}$$

Ajan kuluessa ylläolevan yhtälön oikean puolen viimeisin termi lähenee nollaa, jolloin voidaan ilmaista nopeus muodossa

$$v = \frac{G - F_n}{f} = \frac{\rho_K V_K g \cos \theta - \rho_n V_K g \cos \theta}{6\pi\mu r} = \frac{V_K g \cos \theta (\rho_K - \rho_n)}{6\pi\mu r}, \quad (6)$$

josta saadaan viskositeetti muotoon

$$\mu = \frac{V_K g \cos \theta}{6\pi r v} (\rho_K - \rho_n). \quad (7)$$

Koska kuulan nopeus Höpplerin viskosimetrin putkessa on kutakuinkin vakio, voidaan merkitä nopeus  $v = \frac{s}{t}$  ja saadaan viskositeetti muotoon

$$\mu = \frac{V_K g \cos \theta}{6\pi r s} (\rho_K - \rho_n) t = K (\rho_K - \rho_n) t, \quad (8)$$

missä siis  $K = \frac{V_K g \cos \theta}{6\pi r s}$  on vakio.

## 2.2 Rotaatioviskometri

Työssä käytetyn rotaatiometrinen valmistajan mukaan laitteiston näyttämä viskositeetti määritellään  $F_s = \frac{M_v}{r}$ , missä  $M_v$  on mitapääkohtainen vakio ja  $r$  kierrosnopeus, eli kierroksien lukumäärä minuutissa. CP-40 -mittapäälle  $M_v = 307 \text{ mPas/min}$  ja CP-51 -mittapäälle  $M_v = 4800 \text{ mPas/min}$ .

Rotaatiometrissä on pyörivä mittapää, joka on hyvin lähellä kupin pohjaa, johon on asetettu tutkittavaa nestettä. Pohja ei ole täysen vaakasuora, vaan hieman kaareva siten, että

kupin keskellä nesteen syvyys on suurempi kuin reunoilla. Kupin pohjan ja mittapään välinen kulma on  $\theta$ . Mittapää pyörii kulmanopeudella  $\omega$ . Leikkausnopeus kertoo nopeuden muutoksen pystysuunnan suhteen ja se voidaan ilmaista muodossa  $D = \frac{r\omega}{r\theta} = \frac{\omega}{\theta}$ , missä siis etäisyys  $r$  mittapään keskipisteestä ei vaikuta tulokseen. Kulman  $\theta$  ollessa pieni ei leikkausnopeus juurikaan muutu ja mittapäähän kohdistuva leikkausjännitys  $\tau$  on vakio. Leikkausjännitys siis kertoo voiman ja pinta-alan suhteen.

Kokonaisvääntömomentti on

$$\begin{aligned} \delta T &= \tau 2\pi r^2 \delta r \\ \Rightarrow T &= \int_0^R 2\pi r^2 \tau dr = \frac{2}{3} \pi R^3 \tau, \end{aligned} \quad (9)$$

josta leikkausjännitys saadaan muotoon

$$\tau = \frac{T}{\frac{2}{3} \pi R^3}. \quad (10)$$

Ja viskositeetti on

$$\mu = \frac{\tau}{D} = \frac{3\theta}{2\pi R^3} \frac{T}{\omega}. \quad (11)$$

### 2.2.1 Potenssilaki

Pseudoplastisille ja dilatanttisille nesteille voidaan approksimoida leikkausjännitystä  $\tau$  leikkausnopeuden  $D$  funktiona potenssilailalla

$$\tau = kD^n, \quad (12)$$

jossa  $k$  ja  $n$  ovat ainekohtaisia vakioita ja  $D$  leikkausjännitys. Näennäinen viskositeetti voidaan ilmaista muodossa

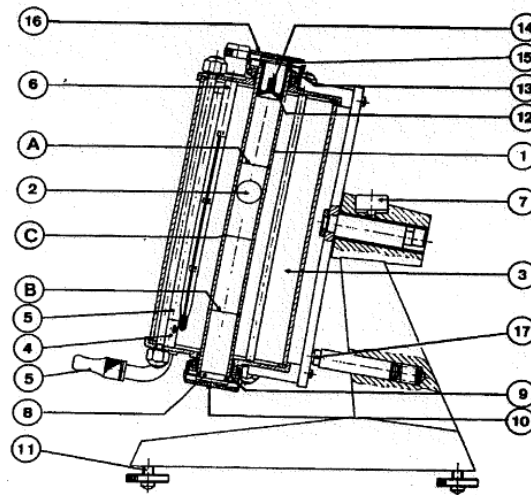
$$\mu = kD^{n-1}. \quad (13)$$

## 3 Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät

Alkuvalmisteluiden yhteydessä mittakupin (VWR, 50ml) massa tyhjänä ja kahdella eri nestemäärällä (10ml ja 20ml) newtonista nestettä mitattiin Precisa XB 220A vaa'alla, jonka luotettavuus laitteen ohjepaperin mukaan on 0,01g. Lisäksi mittasimme työssä käytetyn lasikuulan halkaisijan. Myöhemmin suoritettussa pienessä lisämittauksessa mitattiin kuulalle myös massa.

### 3.1 Höpplerin viskometri

Ensimmäisessä varsinaisessa mittauksessa käytimme kuvan 1 kaltaista Höpplerin viskometriä (Haake B 78286, DIN 53015). Viskometri vaaitettiin ihan alussa siten, että laitteessa olevan vatupassin ilmakupla on mahdollisimman keskellä, mutta kupla kuitenkin liikkui aina jonkin verran, kun putki käännettiin ylösalaisin.



Kuva 8. Höpplerin viskometri.

Numeroiden ja kirjainten merkitys on selitetty alla.

|                        |                    |                     |
|------------------------|--------------------|---------------------|
| 1. pudotusputki        | 7. tasain          | 13. tiiviste        |
| 2. kuula               | 8. vastin          | 14. putki           |
| 3. lämpöhaudeputki     | 9. tiiviste        | 15. lukituslevy     |
| 4. lämpöhauteen täyttö | 10. lukituskapseli | 16. lukituskapseli  |
| 5. lämpöhauteen poisto | 11. vaaitusruuvi   | 17. lukitsemissokka |
| 6. lämpömittari        | 12. vastin         | A,B,C merkkiviivat  |

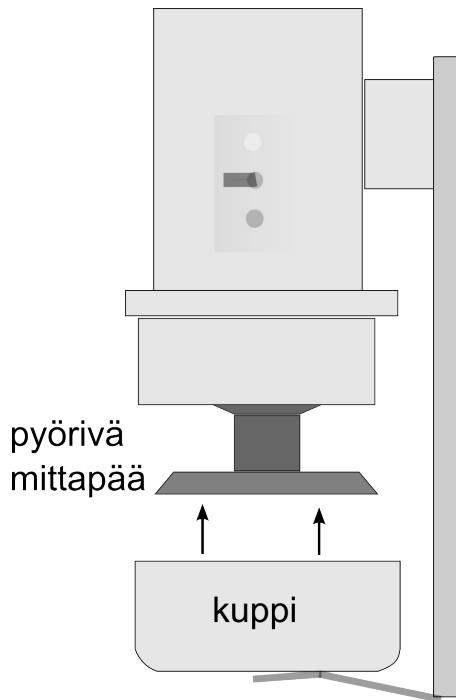
Kuva 1: Höpplerin viskometri

Täytimme viskometrin sisällä olevan putken injektioruiskulla tutkittavalla newtonisella nesteellä siten, että putkeen jäi ilmaa noin parin senttimetrin korkeuden verran. Putki oli mittaushetkellä 10 asteen kulmassa. Pudotimme kuulan putkesta sisään ja suljimme ripeästi putken korkin. Aikaa mittasimme digitaalisella sekuntikellolla käynnistäen kellon kuulan alaosan kohdatessa putkeen piirretty ylempi raja ja pysäyttäen kello kuulan pohjan kohdatessa alempi putkeen piirretty viiva. Toistimme mittauksen kymmenen kertaa kääntäen putken ylösalaisin aina uuden mittaushetken alussa.

### 3.2 Rotaatioviskometri

Toisessa varsinaisessa mittauksessa käytimme kuvan 2 kaltaista rotaatioviskometriä (Brookfield Mode. DV-III, Programmable rheometer, 98-01254), johon oli kytketty vesijäähdytin (Brookfield TC-500) lämpötilansäätöpaneeliseen. Laitteisto oli kytketty tietokoneeseen, jolla rotaatiometrin kierrosnopeutta ohjattiin Brookfield Rheocalc -ohjelman avulla. Rotaatiometrissä käytetyt mittapääät olivat irroitettavat suurempi CP-40 ja pienempi CP-51. Rotaatioviskometrillä oli tarkoitus asettaa näyte kuppiin, jossa mittapäätä pyöritettiin ja laite mittasi mm. aineen viskositeettia ja vääntömomenttia.

Ensimmäinen mittaus tällä laitteistolla tehtiin newtonisella nesteellä käyttäen CP-40 -mittapäättä noin 20 asteen lämpötilassa. Ensinnäkin moottorin ollessa pois päältä kiinnitettiin mittapää varovasti laitteen pohjan kierteisiin pitäen samalla kiintoavaimella akseli paikoillaan. Sitten asetettiin välykset, mittapään ja kupin pohjan välimatka oli tarkoitus olla 0,013mm. Välyksen asetuksessa käännettiin etuosan katkaisija oikealle ja kääntäen asteikko vasemmalle, kunnes keltainen valo sammuu ja kääntäen taas asteikko oikealle, kunnes keltainen valo syttyy. Tämän jälkeen oli käännettävä liukuvan merkkipalkin



Kuva 2: Rotaatioviskometri

keskimmäinen merkkikohta lähimmän asteikon merkkiviivan kohdalle, kääntää sitten asteikko yksi asteikonväli vasemmalle ja lopulta kääntää katkaisija vasemmalle punaisen valon sammussa. Sitten oli säädettävä lämpötilansäätöpaneelista haluttu lämpötila, joka oli ensimmäisessä mittauksessa noin 20 astetta. Näytettä siirrettiin kuppiin ruiskulla ja kuppi kiinnitettiin laitteeseen. Tietokoneohjelmalla kerättiin rotaatiometristä dataa määräten eri kierrosnopeuksia aloittaen arvosta 40 RPM aina arvoon 200 RPM asti, mitaten kierrosnopeuden aina 8 RPM välein. Jokaista mitattua kierrosnopeutta kohti tallensimme kolme arvoa.

Ylläolevat toimenpiteet toistettiin myös ruskeanharmaalle epänewtoniselle nesteelle, mutta tiedonkeruu ei onnistunut odotetusti. Jotta ylipäätään saimme vääntömomentti- ja kitka-arvoja tietokoneen näytölle, oli lämpö asetettava noin 30 asteeseen, mutta arvot heittelevät tasoittumatta ja 18 minuutin päästä viskositeettiin ja vääntömomenttiin tuli arvo "EEE..", jolloin mittapähän kohdistuva vääntömomentti oli liian suuri.

Vaihdoimme tutkittavan nesteen toiseen epänewtoniseen nesteeseen, joka oli läpinäkyvää. Suoritimme samat toimenpiteet välyksen, lämpötilan ja kupin asetuksessa kuin aiemmissa kohdissa ja keräsimme ohjelmalla dataa eri kierrosnopeuksilla. Käytimme tälle nesteelle kolmea eri lämpötilaa: n. 10, 20 ja 30 astetta.

## 4 Havainnot ja laskut

### 4.1 Newtoninen neste

#### 4.1.1 Kuulan tiheys

Tehdessämme mittausta Höpplerin viskometrillä käytimme lasikuulaa, jolle mittasimme massaksi  $m_K = 4,4795\text{g}$  (vaa'an virhe  $\delta m_K = 0,01\text{g}$ ) ja halkaisijaksi  $D_K = 15,66\text{mm}$  (työntömitan virhe  $\delta D_K = 0,01\text{mm}$ ). Kuulan tiheys saadaan jakamalla sen massa tilavuudella  $V_K$ , eli

$$\rho_K = \frac{m_K}{V_K} = \frac{m_K}{\frac{4}{3}\pi(\frac{1}{2}D_K)^3} = \frac{0,0044795\text{kg}}{\frac{4}{3}\pi(\frac{1}{2}0,01566\text{m})^3} \approx 2227,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (14)$$

Virhe kuulan tiheydelle saadaan yleisellä virheenetenemislailalla

$$\delta q = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial q}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2}, \quad (15)$$

jota käyttämällä saadaan

$$\begin{aligned} \delta \rho_K &= \sqrt{\left( \frac{\partial \rho_K}{\partial m_K} \delta m_K \right)^2 + \left( \frac{\partial \rho_K}{\partial D_K} \delta D_K \right)^2} \\ &= \sqrt{\left( \frac{0,0001\text{kg}}{\pi^{\frac{4}{3}} \frac{1}{2^3} (0,01566\text{m})^3} \right)^2 + \left( \frac{-3 \cdot 0,0044795\text{kg} \cdot 0,00001\text{m}}{\pi^{\frac{4}{3}} \frac{1}{2^3} (0,01566\text{m})^4} \right)^2} \approx 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned} \quad (16)$$

Joten kuulan tiheydelle saadaan arvo  $\rho_K = 2230 \pm 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

#### 4.1.2 Nesteen tiheys

Laskimme mittakupin massan tyhjänä ( $m_0 = 32,1590\text{g}$ ) ja kun siinä oli  $V_1 = 10\text{ml}$  tutkittavaa newtonista nestettä ( $m_1 = 39,1404\text{g}$ ) sekä, kun siinä oli  $V_2 = 20\text{ml}$  nestettä ( $m_2 = 46,4501\text{g}$ ). Mittalasin lukemasta virheeksi määritetään  $\delta V_1 = \delta V_2 = 1\text{ml}$ . Käytimme massan mittaamisessa samaa Precisa-merkkistä vaakaa kuin kuulan massan mittauksessa, eli massojen virhe on  $\delta m_1 = \delta m_2 = \delta m_0 = 0,01\text{g}$ . Tästä laskemme newtoniselle nesteelle tiheyden erikseen 10ml ja 20ml nestemäärille:

$$\rho_{n1} = \frac{m_1 - m_0}{V_1} = \frac{(0,0391404 - 0,0321590)\text{kg}}{0,000010\text{m}^3} = 698,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (17)$$



$$\rho_{n2} = \frac{m_2 - m_0}{V_2} = \frac{(0,0464501 - 0,0321590)\text{kg}}{0,000020\text{m}^3} = 715,055 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (18)$$

joista saadaan keskiarvoksi

$$\rho_n = \frac{\rho_{n1} + \rho_{n2}}{2} \approx 706,597 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (19)$$

Newtoniselle nesteelle saadaan otoskeskiarvo yhtälöllä

$$s = \sqrt{\frac{(\rho_{n1} - \rho_n)^2 + (\rho_{n2} - \rho_n)^2}{2 - 1}}, \quad (20)$$

jonka avulla saadaan keskiarvon keskivirhe

$$s_{\rho_n} = \frac{s}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{(\rho_{n1} - \rho_n)^2 + (\rho_{n2} - \rho_n)^2}{2}} \approx 8,4575 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (21)$$

Newtonisen nesteen tiheydeksi siis saadaan  $\rho_n = 707 \pm 9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

### 4.1.3 Viskositeetti Höpplerin viskometrillä

Kuulan pudotessa Höpplerin viskometrin newtonisella nesteellä täytettyä putkea pitkin mittasimme aikaa, joka kuluu kuulan liikkuaessa merkitty 10 cm pituinen välimatka. Ajat ovat taulukossa 1. Ajanmittaus aloitettiin, kun kuulan alaosa kohtasi ensimmäisen putkeen merkityn viivan ja loppui, kun kuulan alaosa kohtasi toisen viivan. Ajanottoon liittyvä virhe muodostuu mittajaan reaktioajasta sekä siitä, kuinka tarkasti mittaja katsoo oikeasta kulmasta/korkeudelta putkea arvioidakseen pallon alaosan paikka kullakin ajanhetkellä, määritellään siis ajan virheeksi nyt 0,3s.

Lasketaan taulukon 1 ajoista keskiarvo:

$$t_K = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{10}}{10} \text{s} = 19,861\text{s}, \quad (22)$$

jolle otoshajonnan  $s = \sqrt{\frac{(t_1 - t_K)^2 + (t_2 - t_K)^2 + \dots + (t_{10} - t_K)^2}{10 - 1}}$  avulla saadaan laskettua keskiarvon keskivirhe:

$$s_{t_K} = \frac{s}{\sqrt{10}} = \sqrt{\frac{(t_1 - t_K)^2 + (t_2 - t_K)^2 + \dots + (t_{10} - t_K)^2}{10 \cdot 9}} = 0,0544967\text{s} \quad (23)$$

Eli aika, jonka kuula kuluttaa liikkuaessa Höpplerin viskometrin putkessa merkkiviivojen A ja B välillä, on  $t = (19,86 \pm 0,06)\text{s}$ .

Taulukko 1: Kuulan käyttämä aika sen kulkiessa 10 cm matka Höpplerin viskometrin putkessa

| mittaus | aika (s) |
|---------|----------|
| 1.      | 20,09    |
| 2.      | 20,00    |
| 3.      | 19,97    |
| 4.      | 19,84    |
| 5.      | 20,09    |
| 6.      | 19,84    |
| 7.      | 19,81    |
| 8.      | 19,69    |
| 9.      | 19,66    |
| 10.     | 19,62    |

Höpplerin viskometrissä olevan nesteen viskositeetti voidaan selvittää yhtälön 8 avulla, yhtälössä oleva vakio  $K$  on laite- ja kuulakohtainen ja sen arvo on  $K = 0,05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ .

$$\mu_H = K(\rho_K - \rho_n)t = 0,05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot (2230 - 707) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 19,86\text{s} \approx 0,00151045 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}. \quad (24)$$

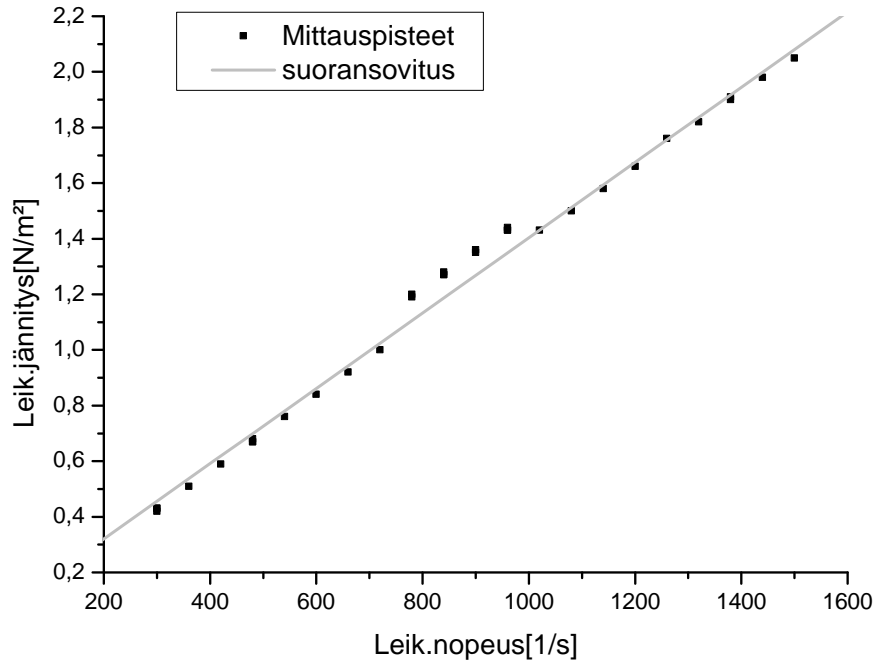
Viskositeetille lasketaan virhe virheen yleisellä etenemislailalla, eli

$$\begin{aligned} \delta\mu_H &= \sqrt{\left(\frac{\partial\mu_H}{\partial\rho_K}\delta\rho_K\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu_H}{\partial\rho_n}\delta\rho_n\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu_H}{\partial t}\delta t\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(Kt\delta\rho_K\right)^2 + \left(Kt\delta\rho_n\right)^2 + \left(K(\rho_K - \rho_n)\delta t\right)^2} \\ &\approx 0,0000504921 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}} \end{aligned} \quad (25)$$

Eli Höpplerin viskometrillä saatu viskositeetti virheineen on  $\nu_H = (0,00151 \pm 0,00006) \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$

#### 4.1.4 Viskositeetti rotaatioviskometrillä

Rotaatioviskometrillä saadut leikkausjännityksen ja -nopeuden arvot plotattiin Origin-Pro 7.5 -ohjelmalla samaan kuvaajaan. Kuvaajasta 3 saatiin viskositeetin arvo virheineen sovittamalla siihen suora, jonka kulmaketoimeksi Origin ilmoitti  $\mu = (0,00135 \pm 0,00002) \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$ . Pisteet plottautuivat muutoin selvästi samalle suoralle, mutta leikkausnopeusalueella  $(800 - 1000) \frac{1}{\text{s}}$  leikkausjännityksen arvot poikkeavat hieman sovitetusta suorasta. Tämä saattaa johtua nesteessä olevasta hetkellisestä voimakkaasta kitkasta, jos esimerkiksi siinä ovat isommat hiukkaset ovat menneet mittapään pyörimistä vaikeutamaan asentoon.



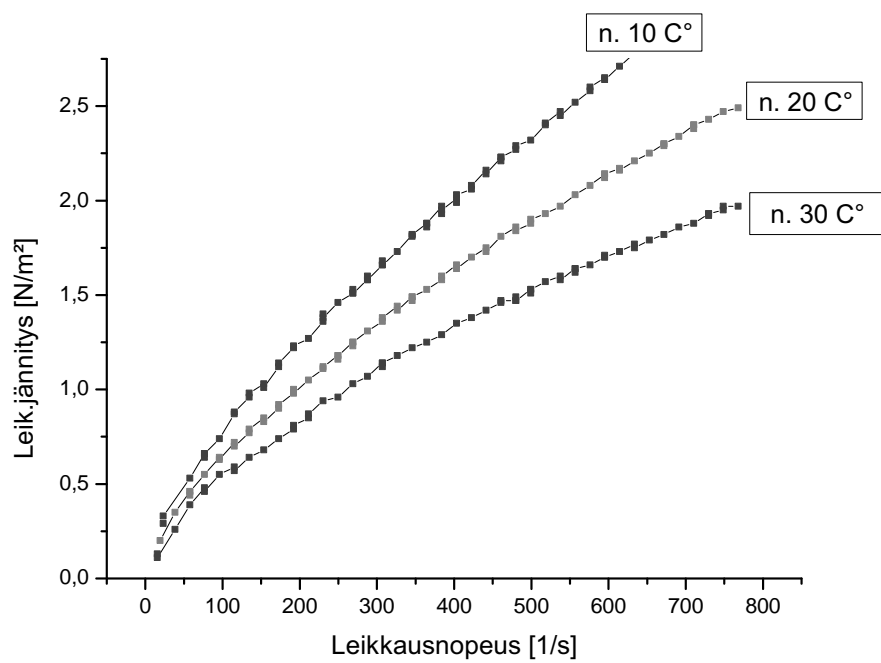
Kuva 3: Leikkasjännitys leikkausnopeuden funktiona. Kuvaajaan sovitetun suoran kulma-kerroin, eli viskositeetin, arvo on  $\mu = (0,00135 \pm 0,00002) \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ .

## 4.2 Epänewtoninen neste

Toista nestenäytettä, eli epänewtonista nestettä käytettiin vain rotaatioviskometrillä.

### 4.2.1 Leikkausjännityksen riippuvuus leikkausnopeudesta

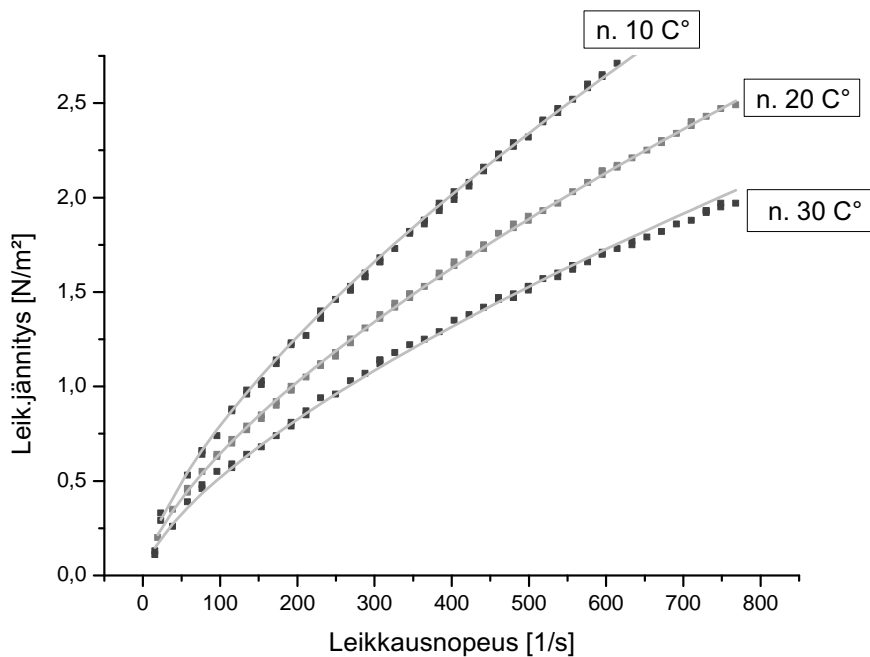
Rotaatioviskometrillä mitatut leikkausjännityksen arvot leikkausnopeuden funktiona plottattiin Originilla, plottaus on kuvassa 4. Kuvissa on selvästi nähtävissä käyrien riippuvuus lämpötilasta. Mitä suurempi lämpötila, sitä loivempi käyrä, eli korkeissa lämpötiloissa leikkausjännitys kasvaa leikkausnopeuden suhteen hitaammin.



Kuva 4: Leikkajännitys leikkausnopeuden funktiona kussakin lämpötilassa.

## 4.2.2 Potenssilaki

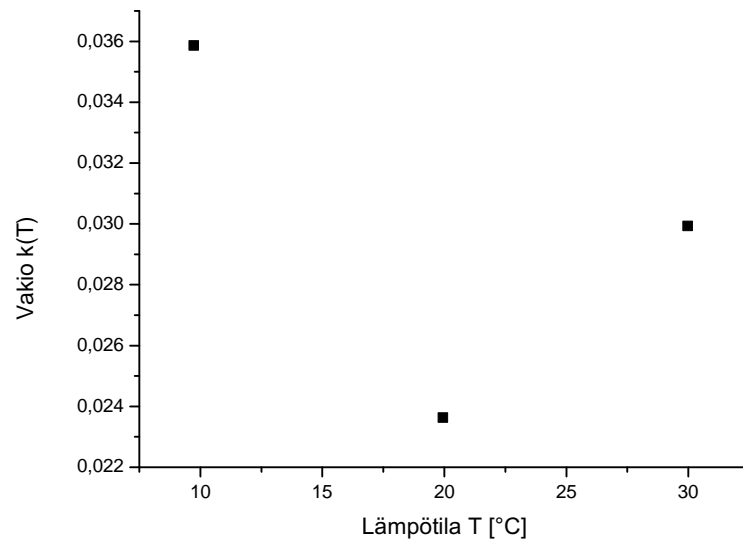
Kuvassa 5 on sovitettu leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden kuvaajaan pisteisiin funktio, joka on muotoa  $k \cdot D^n$ , missä  $k$  ja  $n$  ovat tutkittavan aineen vakioita. Kyseessä siis on yhtälön 12 mukainen potenssilaki. Origin antoi sovituksen vakioille arvot, jotka on listattu taulukkoon 2, jossa näkyvät myös lämpötilan keskimääräiset arvot, jotka on laskettu tietokoneohjelmalla tallennetusta excel-tilukosta. Vakiot plotattiin lämpötilan suhteen kuvissa 6 ja 7, joista voidaan havaita, etteivät  $k$  ja  $n$  näyttäisi riippuvan lämpötilasta ainakaan lineaarisesti. Tosin pisteitä on niin vähän, ettei voida kovinkaan varmasti sanoa niiden lämpötilariippuvaisuudesta.



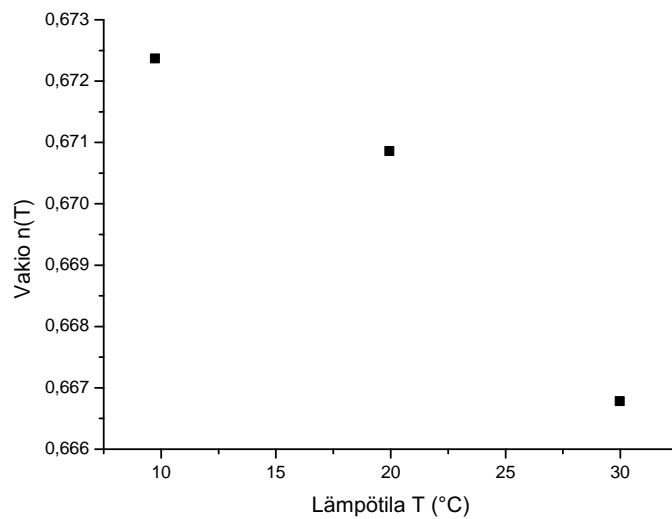
Kuva 5: Leikkasjännityksen ja -nopeuden kuvaajaan on tehty sovitusfunktio, joka on muotoa  $\tau = kD^n$ . Lämpötilakohtaiset  $k$ :n ja  $n$ :n arvot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2: Vakioiden  $k$  ja  $n$  riippuvuus lämpötilasta

| T     | $k(T)$   | $n(T)$  |
|-------|----------|---------|
| 9,73  | 0,035861 | 0,67237 |
| 19,94 | 0,02363  | 0,67086 |
| 29,97 | 0,02993  | 0,66678 |



Kuva 6: Epänewtonisen aineen lämpötilakohtainen vakio  $k(T)$  plotattu kuvaajaan lämpötilan funktiona

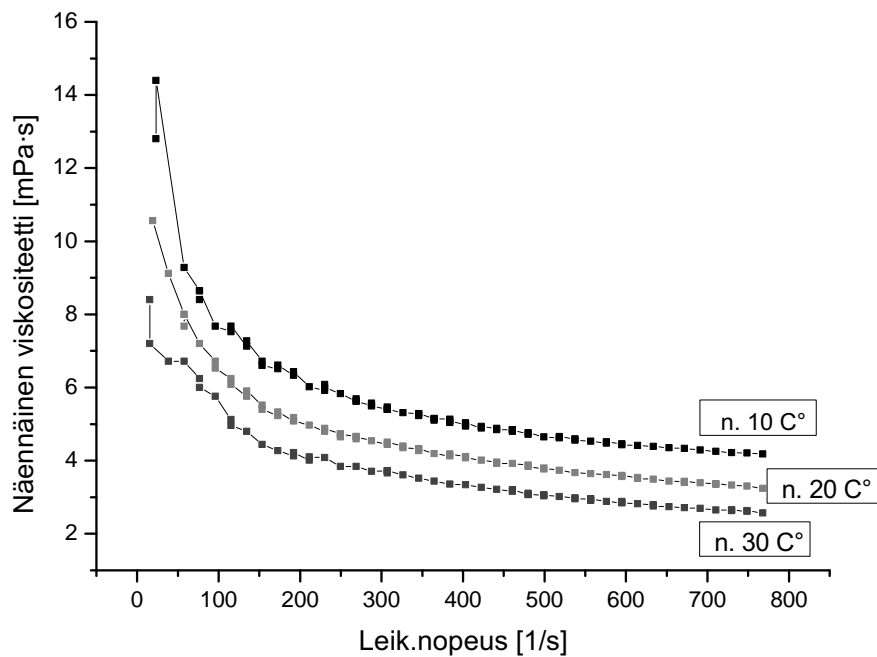


Kuva 7: Epänewtonisen aineen lämpötilakohtainen vakio  $n(T)$  plotattu kuvaajaan lämpötilan funktiona

### 4.2.3 Viskositeetin suhde leikkausnopeuteen

Kuvassa 8 on esitetty viskositeetti leikkausnopeuden funktiona. Pienillä leikkausnopeuden arvoilla viskositeetin arvot hieman heittelevät, mikä voi johtua siitä, että mittaustapahtuman alussa aineen liike-tilassa on joitain häiriöitä mittapään alkaessa pyöriä aluksi lepotilassa olevassa aineessa. Mittauksien jatkuessa leikkausnopeuden suurentuessa viskositeetin arvot kuitenkin näyttävät menevän sileälle käyrälle.

Kuvasta näkyy selvästi, että lämpötilan kasvu pienentää viskositeettia. Ehkä tämä johtuu siitä, että lämpötila nopeuttaa molekyylin sisäistä liikettä niin paljon, että molekyylien välisten sidoksien energia siirtyy molekyylien sisäiseksi liike-energioksi.



Kuva 8: Viskositeetti leikkausnopeuden funktiona kussakin lämpötilassa.

## 5 Johtopäätökset

Ensimmäiselle, eli newtoniselle nesteelle laskettiin tiheydeksi  $(707 \pm 9) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Lisäksi sille saatiin Höpplerin viskometrin avulla tehdyillä mittauksilla viskositeetiksi  $(0,00151 \pm 0,00006) \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$  ja rotaatioviskometrillä tehdyn mittauksen suoransovituksen avulla  $(0,00135 \pm 0,00002) \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ . Arvot näyttäisivät jonkin verran poikkeavan toisistaan, suoransovituksella saatu arvo on hieman pienempi. Ero saattoi johtua Höpplerin viskometrillä mittaamisessa tulleista virhetekijöistä, kuten käsin sekuntikellolla tapahtuvasta ajanmittauksesta tulevasta virheestä.

Ensimmäinen tutkittava aine saattoi olla veteen sekoitettua joko dietyylieetteriä ( $\rho = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\mu = 0,248 \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ ) tai asetonia ( $\rho = 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\mu = 0,330 \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ ). Jos dietyylieetteriin tai asetoniin sekoittaa vettä sopivasti, voidaan ehkä saada tiheys- ja viskositeettiarvoiltaan samaa ainetta kuin mitä me tutkimme. Tätä päätelmää tukevat myös tutkitun aineen makea haju, mikä on ominaista dietyylieetterille[1] ja asetonille[2]. Toinen vaihtoehto on, että aine olisi ollut laimentamatonta etanolia, sillä sen tiheys- ja viskositeettiarvot ( $\rho = 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\mu = 0,001230 \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ ) olisivat lähellä laskemiamme arvoja, mutta etanolin ominaisuuksiin ei kuulu makea haju.

Toinen, eli epänewtoninen neste kuuluu todennäköisesti Bingham-plastisen nesteen ryhmään, sillä tutkittavan nesteen viskositeetti- ja leikkausjännityksen riippuvuus leikkausnopeudesta on samankaltaista kuin Bingham-plastisten nesteiden. Nesteen viskositeetti pieneni leikkausnopeuden funktiona siten, että funktion kulmakerroin loivenee ja leikkausjännitys suurenee leikkausnopeuden funktiona kulmakertoimen loivetessa.

Tiksotrooppisen nesteen viskositeettia ei voida esittää yksikäsitteisesti leikkausnopeuden funktiona, sillä sen kerrosten väliset kitkaa aiheuttavat sidokset katkeilevat ajan kuluessa eivätkä enää liimaannu toisiinsa, vaikka virtaus hidastuisi. Jos esimerkiksi nesteen leikkausnopeus kasvatetaan maksimiinsa ja sitten hidastetaan, viskositeetti saa leikkausnopeuden funktiona pienempiä arvoja kuin nopeutusvaiheessa.



## 6 Liitteet

Liite 1. Mittauspöytäkirja

Liite 2. Rotaatiometrillä mitatut arvot newtoniselle nesteelle

Liite 3. Rotaatiometrillä mitatut arvot epänewtoniselle nesteelle noin 10 asteessa

Liite 4. Rotaatiometrillä mitatut arvot epänewtoniselle nesteelle noin 20 asteessa

Liite 5. Rotaatiometrillä mitatut arvot epänewtoniselle nesteelle noin 30 asteessa

## Viitteet

- [1] Dietyylieetteri. [http://www.ketsu.net/http/pm\\_valmiit/dietyylieetteri.htm](http://www.ketsu.net/http/pm_valmiit/dietyylieetteri.htm), 2001.
- [2] Asetoni. [http://www.ketsu.net/http/pm\\_valmiit/asetoni.htm](http://www.ketsu.net/http/pm_valmiit/asetoni.htm), 2002.
- [3] R. H. Perry and D. W. Green. *Perry's chemical engineers' handbook*. McGraw-Hill Professional, 8. edition, 2007. ISBN 9780071422949. [http://books.google.com/books?id=tH7IVcA-MX0C&printsec=frontcover&source=gbs\\_v2\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.com/books?id=tH7IVcA-MX0C&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false).