



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**BETONIN LISÄAINEIDEN SOVELTUVUUS
ALKALIAKTIVOIDUILLE SIDEAINEILLE**

Eemeli Tapalinen

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2018



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

BETONIN LISÄAINEIDEN SOVELTUVUUS ALKALIAKTIVOIDUILLE SIDEAINEILLE

Eemeli Tapalinen

Ohjaaja(t): Tero Luukkonen

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2018

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Tapalinen, Eemeli		Työn ohjaaja yliopistolla Luukkonen T, FT	
Työn nimi Betonin lisäaineiden soveltuvuus alkaliaktivoituille sideaineille			
Opintosuunta Kuitu- ja partikkelitekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Huhtikuu 2018	Sivumäärä
Tiivistelmä			
<p>Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin betonissa käytettävien lisäaineiden soveltuvuutta alkaliaktivoituille sideaineille. Nykyisin käytettävät tehonotkisteet (superplastizers) soveltuvat huonosti kehitettyjen alkaliaktivoitujen tai-geopolymeeripohjaisten betonien lisäaineiksi, minkä vuoksi niiden soveltuvuutta ja vaikutuksia betonimassaan pyritään kartoittamaan. Työ suoritettiin tekemällä sarja erilaisia kokeita, joissa vertailtiin kahdeksan kaupallisten notkistinlisäaineiden vaikutusta betonimassan ominaisuuksiin. Vertailtavia ominaisuuksia olivat vaikutukset massan leviämään, massan myötörajaan, viskositeettiin ja kovettumisaikaan. Ominaisuuksien vaikutuksia tutkittiin testaamalla eri tavoin kutakin notkistinta ja vertailemalla saatuja tuloksia sekä erilaisten käytettyjen notkistinlisäaineiden välillä, myös lisäaineettomaan vertailumassaan. Kaiken kaikkiaan kutakin koesarjaa varten valmistettiin yhdeksän erilaista massaa, joista mitattiin erikseen tarkasteltavat, työssä esitetyt tulokset. Tarkkuuden lisäämiseksi kokeissa suoritettiin toistoja, joiden pohjalta laskettuja keskiarvoja käytettiin varsinaisessa lopputuloksien tarkastelussa. Mittauksista saadut tulokset on esitelty työssä pylväsdiagrammikuvaajina, tarkemmat yksittäiset mittaustulokset ovat mukana liitteinä.</p> <p>Tehty työ voidaan jakaa kolmeen eri päävaiheeseen: 1. Kirjallisuuden tarkasteluun ja aiheeseen perehtymiseen, joissa kartoitettiin käytettävät mittausten menetelmät ja mahdolliset ongelmat. 2. Kokeelliseen vaiheeseen, jossa suoritettiin suunnitellut mittaukset. 3. Saatujen tulosten tarkastelu ja johtopäätökset.</p> <p>Työn kokeellinen osuus suoritettiin kolmella eri mittaustekniikalla: leviämämittauksella, reometrimittauksella ja kovettumisaikamittauksella. Leviämämittauksessa saadut tulokset kuvaavat pastan leviämän muutosta standardisoidulla leviämäpöydällä, reometrimittauksessa tarkasteltiin pastojen leikkauksen myötörajoja ja viskositeetteja. Kovettumisaikamittauksessa tarkasteltiin notkisteiden vaikutusta pastan kuivumiseen. Saadut tulokset on esitelty työn Tulosten tarkastelu –osiossa.</p> <p>Tulosten tarkastelu –osiota seuraavassa Johtopäätökset –kappaleessa tehdään yhteenvetoa ja kootaan edellisen kappaleen perusteella olennaisia huomioita. Kyseisessä osiossa esitellään työn lopulliset päätelmät ja niistä tehtävät johtopäätökset.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Process Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Tapalinen, Eemeli		Thesis Supervisor Luukkonen T, Ph.D.	
Title of Thesis Concrete additives suitability to alkali-activated adhesives			
Major Subject Fibre and Particle engineering	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date April 2018	Number of Pages
<p>Abstract</p> <p>In this Bachelor's Thesis, the objective was to study the suitability of traditional concrete admixtures for alkaline-activated binders. Nowadays used concrete water-reducing agents, also known as superplasticizers, suit poorly to alkaline-activated binders. Because of that, the suitability and the effects of those superplasticizers was surveyed by various methods. The research was conducted by running a series of tests, where the effects of superplasticizers to alkaline-activated geopolymer-paste were measured. The effects of superplasticizers on paste's spreading, yield strength, viscosity and setting time were studied.</p> <p>The effects of the paste properties were studied by testing superplasticizers and comparing the results reference mixture without admixtures. All in all, nine different pastes were prepared for each test series, from which the results of the study were examined separately. To increase accuracy, the experiments were performed multiple times and mean values were used for the actual end-result analysis. The results of the measurements are presented in the work as bar graphs, more specific individual measurements are included as attachments.</p> <p>The work done can be divided into three main stages: 1. review of literature and analytical 2. the experimental stage and 3. examination of the results obtained and conclusions.</p> <p>The experimental part of the work was carried out with three different measurement techniques: spreading measurement, rheometric measurement and setting time measurement. The results of the spreading measurement show the change in the spread of the paste on the standardized spreading table, while the yield stresses and viscosities were measured in the rheometric assay. In setting time measurement, the effect of admixtures on the drying of the pasta was studied.</p>			
Additional Information			

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	
2 KIRJALLISUUSKATSAUS	
2.1 Yleistä	8
2.2 Geopolymeerit.....	9
2.3 Betonien notkisteet.....	9
3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT	10
4 TULOSTEN TARKASTELU	15
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	20
6 YHTEENVETO	21
7 LÄHDELUETTELO.....	22

LIITTEET:

Liite 1; Excel-taulukko leviämämittauksista

Liite 2; Excel-taulukko reometrimittauksista

Liite 3; Excel-taulukko kovettumisaikamittauksista

1 JOHDANTO

Viime vuosikymmeninä on alettu yhä enemmän kiinnittää huomiota teollisuuden jäte-sivuainevirtojen hyödyntämiseen uusiksi tuotteiksi. Parhaat edellytykset jätteen uudelleenkäytölle on jatkuvatoimisessa prosessiteollisuudessa, jossa käytössä olevien tuotantoprosessien pääperiaatteet ovat samat. Tällöin myös syntyvien sivuainevirtojen koostumuksetkin ovat sekä fysikaalisilta että kemiallisilta ominaisuuksiltaan lähellä toisiaan, ollen siten helpommin hyödynnettäviä. Huomattavat vaihtelut uudelleenkäytettävän materiaalin laadussa ja sen sisällössä heikentävät kierrätyskelpoisuutta, eli käytettävän jätteen tulisi olla mahdollisimman edullista ja koostumukseltaan tasalaatuista. Tällaisia ovat mm. metallurgisen raskaan teollisuuden kuona-aineet, joista jotkin saattavat sisältää sellaisenaan ympäristölle haitallisia komponentteja, eivätkä sinällään sovellu täytemaa-aineeksi tai haudattavaksi. Yksi tapa hyödyntää näitä jätteitä on muodostaa niistä geopolymeroimalla uusia tuotteita. Esimerkiksi metallurgisissa prosesseissa sivutuotteena syntyvä, ympäristölle haitallisia komponentteja sisältämätön masuunikuona on todettu hyödylliseksi: sitä voidaan käyttää sellaisenaan lannoitteissa ja perinteisen rakennusbetonin lisäaineena, mutta alkaliaktivoituna siitä voidaan jalostaa ominaisuuksiltaan perinteistä betonia huomattavasti korkealaatuisempia materiaaleja (Komnitsas K. & Zaharaki D., 2007).

Vaikka erilaisten kuona-aineiden soveltuvuus geopolymerien muodossa uusien rakennusaineiden korvaajiksi on ollut pitkään tiedossa, alalla ei ole tapahtunut vielä toistaiseksi suuria muutoksien käytettyjen raaka-aineiden suhteen, vaan perinteiset menetelmät ovat edelleen ylivoimaisesti käytetyimpiä. Geopolymeriteknologian kaupallinen hyödyntäminen on ollut heikkoa ja pitkään niitä hyödynnettiin lähinnä perinteisen sementin raaka-aineiden puutetta paikkaavana korvikkeena (Komnitsas K. & Zaharaki D., 2007). Viime vuosina kiinnostus geopolymereihin on kuitenkin kasvanut ja niiden käyttö rakennusmateriaalina lisääntynyt. Geopolymeroimalla valmistettujen betonien käytössä on kuitenkin havaittu ongelmia perinteisten betonien lisäaineina käytettyjen notkisteiden kanssa. Perinteiset notkistinaineet eivät ole soveltuneet toivotusti geopolymerista valmistetuille massoille, vaan tutkimuksissa niiden on todettu hajoavan massojen omaaman korkean emäksisyyden vuoksi.

Teollisuuden kuonien hyödyntäminen geopolymerien raaka-aineena olisi paitsi kestävä kehityksen mukaista, myös ilmastoystävällistä. Etenkin rakennusteollisuudessa

käytettävän Portland-sementin käytöstä aiheutuvat ilmastonmuutosta edistävät hiilidioksidipäästöt ovat erittäin suuria. Metallurgisten prosessien sivutuotteena syntyvästä masuunikuonasta valmistetuissa geopolymeeripohjaisissa hiilijalanjälki on huomattavasti pienempi ja ottaen huomioon rakennusteollisuuden alan suuruuden sekä sementti –ja betoniaineksen vuosittaiset käyttömäärät maapallolla, voitaisiin geopolymeerien avulla vähentää vuosittaisia hiilidioksidipäästöjä merkittävästi. Perinteisen Portland-sementin valmistuksessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen on arvioitu olevan yli 50 % suurempia kuin geopolymeeripohjaisilla massoilla (Nematollahi, B., Sanjayan, J G., 2014). Lisäksi on arvioitu, että korvaamalla perinteinen sementti –ja betonimassa geopolymeereilla pienentäisi alan teollisuuden hiilijalanjälkeä jopa 80 % (Zhang Z. et al., 2014; Komnitsas K. & Zaharaki D., 2007).

Työssä notkistimien vaikutuksia tutkittiin mittaamalla alkaliaktivoidun masuunikuonapastan leviämismomenteja, myötörajaa, viskositeettia ja kovettumisaikaa.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Yleistä

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli testata kolmen mittaustekniikan avulla perinteisen betonin valmistuksessa käytettävän kaupallisen notkistinaineen soveltuvuutta geopolymeeripohjaisen alkaliaktivoitun sideaineelle. Soveltuvuutta tarkasteltiin tutkimalla notkisteiden vaikutusta pastan leviämään, myötörajan, viskositeettiin ja kovettumisaikaan. Työn taustalla olivat geopolymeeripohjaisten massojen ja perinteisissä betoneissa käytettävien notkistinaineiden käytössä kohdatut ongelmat: sekoitettaessa massoja ja notkisteita on kohdattu lukuisia ongelmia sekä massan käytössä, että lopullisen kuivuneen valurakenteen laadussa. Käyttöön liittyneitä ongelmia ovat olleet mm. vaihtelut massan juoksevuudessa ja laboratoriomittauksissa valmiissa betonissa on havaittu vakavia lujuusongelmia sekä vaihtelua valmiiden rakenteiden kovuudessa (Nematollahi, B., Sanjayan, J G., 2014).

Tavoitteena oli lisätä tietoa geopolymeerien ja notkistinaineiden välisistä vaikutuksista, jotta geopolymeerien käyttöä teollisuudessa voitaisiin tulevaisuudessa lisätä. Geopolymeeripohjaisilla sideaineilla on ongelmista huolimatta todettu olevan lukuisia laadullisia etuja perinteiseen Portland-sementtiin nähden. Tutkimukset ovat osoittaneet, että masuunikuonasta valmistetuilla massoilla on korkea varhainen kestävyys ja erinomainen kestävyys aggressiivisissäkin ympäristöolosuhteissa. Myös voimalaitosten polttoprosesseissa sivutuotteena syntyvällä lentotuhkalla on havaittu lukuisia etuja sen hyödyntämiseksi geopolymeroimalla rakennusmateriaalina. Vähän kalsiumia sisältävillä lentotuhkapohjaisilla massoilla on havaittu olevan erinomainen puristuskestävyys, pieni kuivumista seuraava kutistuma ja korkea kemiallinen kestävyys (happamat tai emäksiset altistukset) (Nematollahi, B., Sanjayan, J G., 2014). Geopolymeerien laajemmalla hyödyntämisellä voitaisiin siis saavuttaa paitsi ympäristölle vähemmän haitallisia, myös laadukkaampia rakennusmateriaaleja (Nematollahi, B., Sanjayan, J G., 2014).

Kandidaatintyössä suoritettiin edellä esiteltyjen ominaisuuksien kartoittamiseksi kolme erilaista mittaustekniikkaa, jotka esitellään tarkemmin jäljempänä. Näistä mittauksista saatujen tulosten pohjalta pyritään tekemään johtopäätöksiä kunkin notkisteen ja notkistintyyppin vaikutuksista käytettävän geopolymeeripohjaisen massan

ominaisuuksiin. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää edelleen alan tutkimuksissa ja käyttää johtopäätösten tekemiseen sekä erilaisten riippuvuuksien havaitsemiseen.

2.2 Alkaliaktivoitujen geopolymeerit

Alkaliaktivoitujen geopolymeerit alumiinisilikaateista koostuvia, matalan kalsiumpitoisuuden omaavia materiaaleja, joiden pH on nostettu korkeaksi ulkoisen alkaliaktivaattorin avulla. Alkaliaktivaattori on alkalinen, emäksinen seos, joka käynnistää polymeroitumiseen johtavat reaktioketjut ja saa aikaan materiaalin kovettumisen (Benito P. et al., 2013; van Deventer J.S.J. et al., 2006).

Geopolymeereista valmistettujen sideaineiden pääraaka-aineena toimivat luonnosta saatavat alumiinisilikaattimineraalit sekä esimerkiksi teollisuuden kuonat. Näissä teollisuuden kuonissa pääpaino on alumiini- ja piipitoisissa jätteissä, jota syntyy metalliteollisuuden sivutuotteena.

Geopolymeerit ovat sekä käytettävyydeltään lähellä perinteisiä rakennusteollisuudessa käytettäviä betoni- ja sementtiseoksia, minkä vuoksi niiden hyödyntämistä vastaavissa rakenneratkaisuissa on pyritty lisäämään. Tässä kandidaatintyössä tarkasteltavat sideaineet olivat ns. alkaliaktivoituja. Alkaliaktivoinnissa emäksinen alkaliliuos käynnistää geopolymerisaation liuottamalla lähtöaineiden sisältämät silikaatti- ja aluminaatti-ionit irralleen, jolloin ne alkavat muodostaa yhtenäisiä ketjuja ja atomitason rakenteita. Nämä rakenteet lujittuvat ja seoksen kuivuessa ne muodostavat tiiviin ja kestäväen seoksen, joka säilyttää muotonsa eikä helposti liukene tai hajoa uudelleen (Komnitsas K. & Zaharaki D., 2007, van Deventer J.S.J. et al., 2006).

2.3 Betoneissa käytettävät notkisteet

Betoneissa käytetään yleisesti erilaisia teollisia tehonotkisteita (superplasticizers), joiden tehtävänä on edistää valmistetun massan juoksevuuutta ja notkeutta, jotta sen käsittely massaa liikutellessa ja varsinaisessa valutyössä olisi helpompaa. Käyttämällä notkistimia voidaan myös vähentää massaan lisättävän veden määrää, mikä puolestaan muuttaa valmiin, valetun massan kuivumista. Notkisteet voivat tyypistään riippuen

hidastaa tai nopeuttaa massan kuivumista. Veden määrän ollessa pienempi, massa kuivuu kuitenkin tasaisemmin. Kuivuessaan hitaasti ja epätasaisesti massaan tulee nopeammin ja hitaammin kuivuneita alueita, mikä heikentää valmiin, kokonaan kuivuneen massan lujuutta ja rakenteellista kestävyyttä (Nematollahi, B., Sanjayan, J G., 2014).

Nykyään käytössä olevat notkisteet voidaan jakaa kolmeen eri ”sukupolveen”. Sukupolviin jako perustuu notkisteiden käyttöönottoaikaan (ensimmäinen sukupolvi varhaisin hyödyntäminen, kolmas uusin ja nykyaikaisin) ja niissä vaikuttavien aineiden mukaan.

1. sukupolven notkisteita ovat lignosulfonaattipohjaiset notkisteet; 2. sukupolven taas melamiinipohjaiset valmisteet, joiden tehokkuus perustuu atomitason partikkeleiden sähkömagneettisiin vetovoimiin. 3. sukupolven notkisteita ovat polykarboksylaattipohjaiset notkistimet, joissa sähkömagneettiset vetovoimat yhdessä eetteriketjujen kanssa lisäävät massan juoksevuutta (Nematollahi, B., Sanjayan, J G., (2014).

3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Työssä tehdyt mittaukset olivat: leviämämittaus, reometrimittaus ja kovettumisaikamittaus.

Mittauksissa tutkittavat notkisteet olivat erilaisia rakennusteollisuudessa perinteisen betonin valmistuksessa käytettäviä kaupallisia kemikaaleja. Näiden notkisteiden tyypit vaihtelivat vaikuttavien ainesosiansa perusteella eri pohjaisiin seoksiin. Alla olevassa taulukossa on listattuna sekä käytettyjen notkisteiden kauppanimet ja niiden tyypit, eli vaikuttavan aineksen mukaan jaoteltuna:

Taulukko 1. Tarkasteltavat notkisteet

Notkiste, kauppanimi	Tyyppi	Koostumus

SemFlow ELE-S	Polykarboksylaatti	Liuos
WRDA 90 D	Lignosulfonaatti	Liuos
Quantec PL 501	Polykarboksylaatti	Liuos
SemFlow MC	Polykarboksylaatti	Liuos
SemFlow ELE 20	Polykarboksylaatti	Liuos
Daracem F	Melamiini	Liuos
Natriumglukonaatti	Natriumglukonaatti	Kiinteä jauhe
LP-3 (Peramin F)	Lignosulfonaatti	Kiinteä jauhe

Käytetyistä notkisteista WRDA 90 D ja LP-3 (Peramin F) edustivat tyypiltään 1. sukupolven notkisteita, eli varhaisimpia ja yleisimpiä tekniikoita. Daracem F oli työn ainoa 2. sukupolven notkiste ja loput (SemFlow ELE-S, Quantec PL 501, SemFlow MC, ja SemFlow ELE 20) 3. sukupolven eli alansa tuoreinta teknologiaa.

Varsinaisessa pastassa käytetty masuunikuona oli Finnsementti Oy:lta peräisin olevaa jauhetta. Kuona oli Finnsementti Oy:n jalostamaa, alun perin SSAB:n Raahan terästehtaalta peräisin olevaa teräksen valmistuksessa syntyvää kuona-ainesta, joka koostui pääosin kalsiumista (CaO 38,51 %), piistä (SiO₂ 32,33 %) ja magnesiumista (MgO 10,24 %) sisältäen myös natriumia Na₂O, alumiinia Al₂O₃, rautaa (Fe₂O₃) ja muita raskasmetalliyhdisteitä. Mikrosilika, kauppanimeltään Parmix-silika, oli suomalaisen Fescon Oy:n tuottamaa betonin lisäaineeksi tarkoitettu mineraalijauhetta, joka koostui lähes kokonaan amorfisesta piidioksidista (SiO₂ 94,25 %) sisältäen myös jonkin verran erilaisia mineraali – ja metalliyhdisteitä (Luukkonen, T., Abdollahnejah, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M., 2018).

Kaikissa mittauksissa käytettiin pohjana kuiva-ainesuhteiltaan samaa pastaa. Pastan kuiva-ainepitoisuuksien suhteet olivat:

- 96,0 % masuunikuonaa
- 2,0 % natriumhydroksidia
- 2,0 % jauhettua mikrosilikaa

Myös veden ja notkisteen määrä suhteessa kuiva-aineiden massaan oli vakioitu. Lisätyn veden määrä oli 35,0 % kuiva-aineiden massasta ja notkisteen 0,5 %.

Poikkeuksena kovettumisaikamittaus, jossa mittauksen onnistumisen edellytyksenä edellä esitellyyn pastaseokseen tuli lisätä hiekkaa luotettavien tulosten saamiseksi. Tutkittavien kahdeksan notkisteen lisäksi tehtiin myös kaikissa kokeissa yksi referenssimittaus, jossa pastaa testattiin lisäämättä siihen mitään notkistetta vertailunäytteen saamiseksi. Yhteensä siis suoritettiin kutakin testausmenetelmää yhdeksän koesarjaa.

Kaikissa mittauksissa käytetty jauhemainen mikrosilika oli hienonnettu ennen käyttöä keraamisella huumareella mekaanisesti hienontamalla 10 minuutin ajan.

Leviämämittaukset suoritettiin Suomen standardoimisliiton (SFS standardi, Tuoreen betonin testaus, Osa 5: leviämä) mukaisten ohjeiden mukaisesti. Massan leviämämittaukset suoritettiin valmistamalla kutakin mittausta varten oma kuiva-ainemassaltaan 600 gramman pasta, jonka resepti oli:

- 576 g masuunikuonaa
- 12 g natriumhydroksidia
- 12 g jauhettua mikrosilikaa

Punnitut kuiva-aineet sekoitettiin keskenään suuren leikkausvoiman pystysekoittajalla 500 rpm nopeudella kolmen minuutin ajan, jonka jälkeen lisättiin punnitut nesteet, eli vesi ja käytetty notkiste:

- 210 g vettä
- 3 g notkistetta

Riippuen kunkin notkisteiden valmistajien käyttöohjeista, notkiste lisättiin massaan joko samaan aikaan veden kanssa tai veteen valmiiksi liuotettuna. Kun viimeinenkin pisara vettä ja/tai notkistetta oli samassa astiassa kuiva-ainesekoituksen kanssa, sekoitettiin pastaa uudelleen pystysekoittajalla 500 rpm nopeudella kolmen minuutin ajan.

Tämän jälkeen valmiin massan leviämä mitattiin leviämämittauksia varten valmistetulla, SFS-standardisoidulla leviämäpöydällä. Pasta valutettiin sekoitusastiasta kaksiosaiseen metalliseen muottiin, jonka jälkeen sitä tasoitettiin painamalla tarkoitukseen valmistetulla sullointangolla kymmenen kertaa. Toimenpiteen jälkeen muotin ylempi osa poistettiin, ja muotin alaosan täyttävän pastakerroksen pinta tasoitettiin kaapimalla ylimääräinen pasta pois.

Valmiin pastan annettiin asettua pöydällä standardin ohjeiden mukaisesti 30 sekuntia, jonka jälkeen alempi muotti poistettiin, ja pastan annettiin levitä mittauspöydälle. Sitten pöydän kampea pyörittämällä isketettiin pöydän tasoa alarajoitinta vasten viisitoista kertaa. Iskujen aikana pasta levisi pöydälle, jonka jälkeen odotettiin pastan leviämisen asettuvan eli pysähtyvän. Kun pasta lakkasi leviämästä, sen lopullinen leviämä mitattiin mittaamalla sen muodostaman alan halkaisijan pituus. Mikäli pasta levisi epätasaisesti, voitiin halkaisija mitata myös useammasta kohdasta, jolloin lopullisiin tuloksiin ilmoitettiin näiden tulosten laskennallinen keskiarvo.

Reometrimittaukset suoritettiin Oulun yliopiston kuitu- ja partikkelitekniikan laboratorion käytössä olevalla TA-Instruments-reometrillä. Reometrimittauksissa valmistettiin 100 grammaa pastaa, joka analysoitiin reometriin laaditulla ohjelmalla. Mittausta varten laadittu ohjelma jakautui kolmeen vaiheeseen: ensimmäisessä vaiheessa laitteeseen asetettu analysoitava näyte valmisteltiin varsinaista mittausta varten säätämällä sen lämpötila vakioksi 20°C ja esisekoittamalla sitä 60 sekunnin 200 1/s leikkausnopeudella. Toisessa vaiheessa aloitettiin varsinainen mittaus, jossa sekoituksen leikkausnopeutta kasvatettiin hiljalleen $0,01\text{ 1/s}$ aina 200 1/s , jonka aikana laite mittasi näytteen myötörajan ja viskositeettia piirtäen tuloksista kuvaajan. Vaiheen kesto oli 240 sekuntia ja lämpötila 20°C pidettiin vakiona. Kolmannessa vaiheessa myötörajan ja viskositeetin muutosta seurattiin, kun leikkausnopeutta vastaavasti laskettiin 200 1/s takaisin $0,01\text{ 1/s}$. Myös tämän vaiheen kesto oli 240 sekuntia ja näytteen lämpötila 20°C . Tulokset piirrettiin samaan kuvaajaan kuin edellisessä vaiheessa. Kaikki tarkasteltavat näytteet käsiteltiin tällä samalla ohjelmalla.

Reometrimittauksissa käytetty kuiva-aineiden pastaresepti oli:

- 96,0 g masuunikuonaa
- 2,0 g natriumhydroksidia
- 2,0 g mikrosilikaa

Johon lisättyjen veden ja notkisteen määrät ja suhteet kuiva-aineiden määrään olivat:

- 35,0 g vettä
- 0,5 g notkistetta

Ennen mittausten suorittamista reometri kalibroitiin tulosten luotettavuuden takaamiseksi. Pasta valmistettiin punnitsemalla kuiva-aineet ja sekoittamalla ne keskenään kolmen minuutin ajan 500 rpm nopeudella pystysekoittajalla. Tämän jälkeen punnittiin vesi ja käytetty notkiste, jotka notkisteen valmistajan ohjeiden mukaisesti lisättiin kuiva-aineiden kanssa samaan kulhoon. Vedenlisäyshetken kellonaika kirjattiin ylös varsinaista reometrillä tapahtuvaa mittausta varten. Veden ja notkisteen lisäämisen jälkeen massaa sekoitettiin kolmen minuutin ajan pystysekoittajalla 500 rpm nopeudella. Valmis pasta aseteltiin reometrin näyteastiaan mittausta varten. Kun vedenlisäyshetkestä oli kulunut 15 minuuttia, mittaus aloitettiin. Mittauksen aikana reometri keräsi saadut tiedot omaan mittauskansioonsa myöhempää tarkastelua varten. Mittauksen päätyttyä näyteastia irrotettiin ja puhdistettiin.

Kovettumisaikamittauksissa luotettavien tulosten saamiseksi jouduttiin pastan sekaan lisäämään hiekkaa mittausteknisistä syistä. Vaikka hiekka itsessään ei imeytä itseensä nesteitä, on sillä merkitystä pastaseoksen kuivumiselle. Hiekka muodostaa tasaisesti seokseen jakautuneena rakenteen, joka edistää massan kovettumista. Koska todellisessa betonin valmistuksessa käytetään hiekkaa, oli hiekan käyttö vaikutuksensa vuoksi perusteltua näissä mittauksissa. Käytetty hiekka oli standardisoitua hiekkaa, joka ajettiin lajittimen läpi, jotta mittauksissa käytettävät hiekka-annokset olisivat mahdollisimman samanlaisia rakenteelliselta sisällöltään (sama määrä eri partikkelikoon hiekanjyviä).

Varsinaisena mittauslaitteena käytettiin Vicatronic-analysointilaitetta. Kovettumisaikamittauksissa käytetty pastaresepti oli seuraava:

- 480 g hiekkaa

- 230,4 g masuunikuonaa
- 4,8 g natriumhydroksidia
- 4,8 g jauhettua mikrosilikaa

Kuiva-aineiden lisäksi pastaan punnitun veden ja notkisteen määrät olivat:

- 84 g vettä
- 1,2 g notkistetta

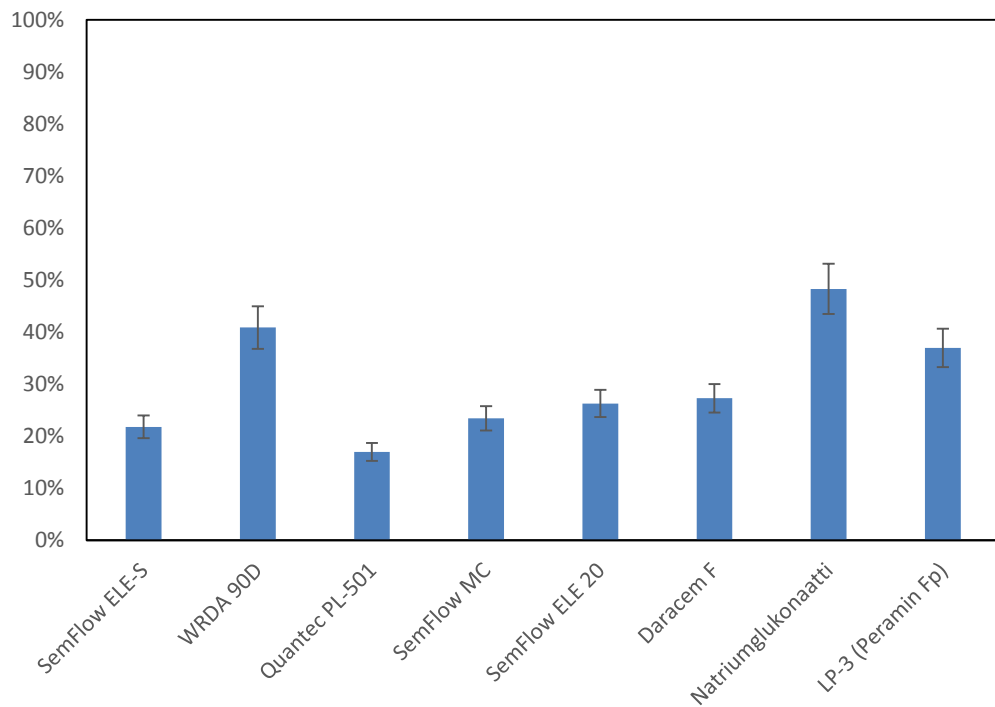
Pasta valmistettiin punnitsemalla kuiva-aineet, vesi ja notkiste erikseen. Kuiva-aineet sekoitettiin pystysekoittajalla 500 rpm nopeudella kolmen minuutin ajan. Tämän jälkeen lisättiin vesi ja/tai notkiste. Vedenlisäyksen ajankohta (kellonaika) otettiin ylös myöhempää käyttöä varten. Seosta sekoitettiin uudelleen pystysekoittajalla 500 rpm nopeudella kolmen minuutin ajan. Valmis pasta lisättiin öljytyyn Vicatronic-laitteen mittausmuottiin, jonka jälkeen sitä tärytettiin käsin tärytyslaitteella niin kauan, että massa lakkasi kuplimasta tärytyksen aikana ja pastamäärän pinta oli mittausmuotin reunan tasalla. Täryttämällä tiivistetty massa aseteltiin muotissa Vicatronic-laitteeseen ja laite käynnistettiin. Laitteeseen syötettiin tiedot vedenlisäyksen ajankohdasta, jotta mittauksen alkamisajankohta vedenlisäyshetkestä saataisiin vakioitua kaikkiin mittauksiin samaksi.

4 TULOSTEN TARKASTELU

Käytettyjen notkisteiden vaikutuksia pystyttiin tarkastelemaan vertaamalla mittauksista saatuja tuloksia notkisteettomaan referenssipastan saamiin tuloksiin. Saaduissa tuloksissa esitellyt havainnot ovat siis vertailuja referenssiin.

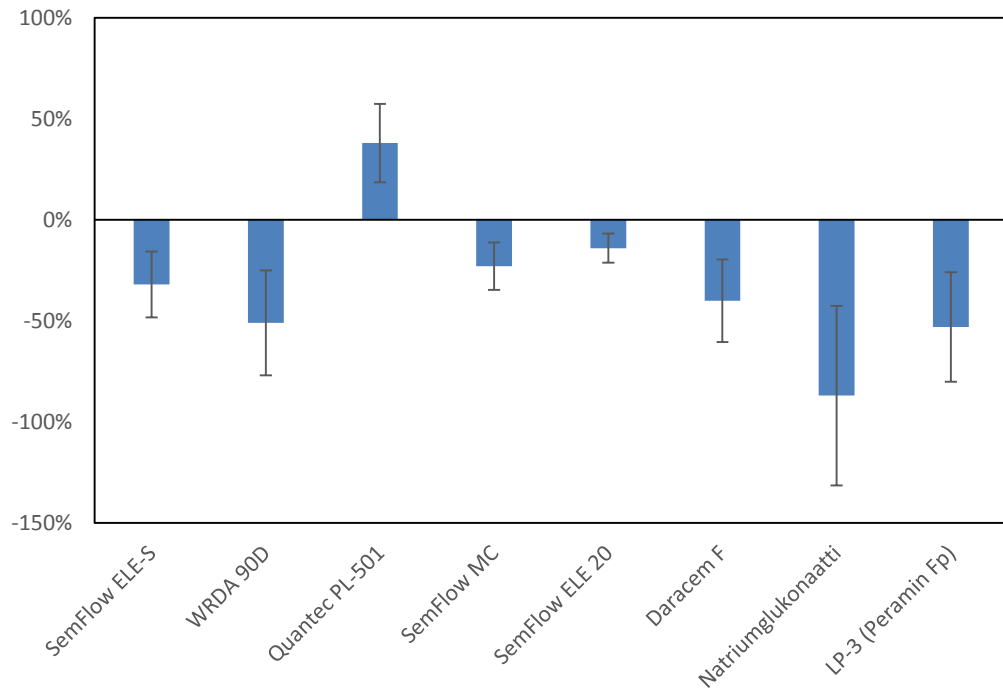
Vertailu referenssiin tehtiin laskemalla sekä referaatista että notkistettujen pastojen toistoista saadut keskiarvot, joiden perusteella eroavuudet määriteltiin. Näitä keskiarvoja verrattiin laskemalla prosentuaalinen muutos referenssiin nähden, eli kuinka monta prosenttia notkisteiden keskiarvot erosivat referaatista suuntaan tai toiseen.

Leviämämittauksista saadut tulokset koottiin toistojen jälkeen Excel-taulukkoon ja saatujen mittaustulosten avulla piirrettiin pylväsdiagrammi havainnollistamaan notkistelisyksen vaikutusta leviämään sekä kokonaisuutena, että notkistekohtaisesti. Saadut tulokset on esitetty prosenttilukuina verrattuna notkisteettomaan referenssipastan, jonka leviämän mittaukset ovat esiteltyinä työn liitteissä (Liite 1; Excel-taulukko leviämämittauksista).



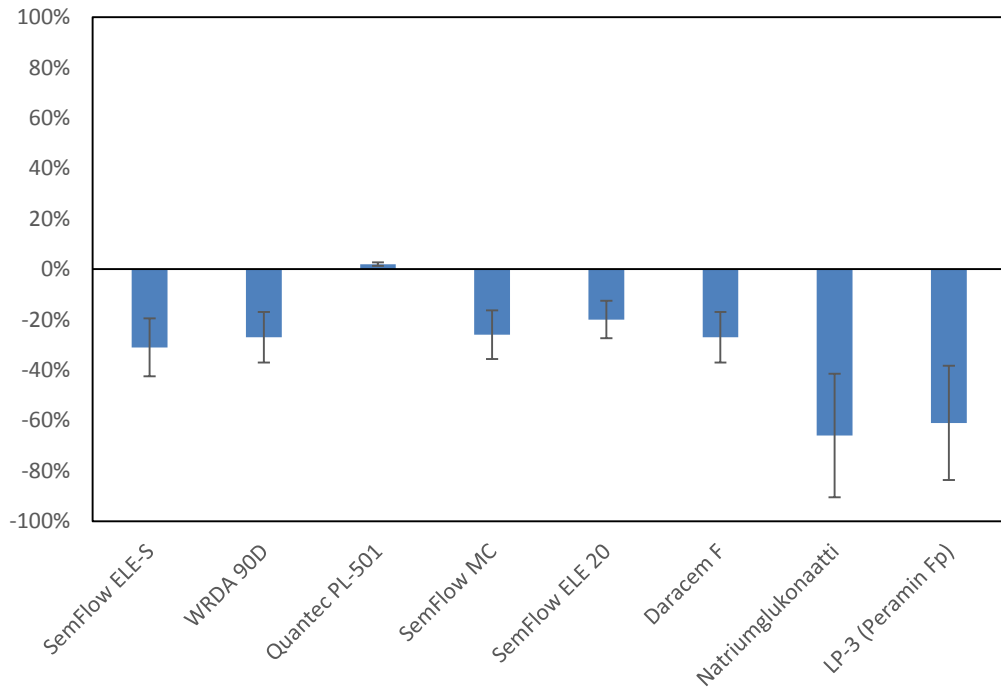
Kuva 1: Leviämämittauksissa havaittu leviämän muutos 0,5 % notkistelisyksimäärällä prosentteina. Suhteellisen virheen osuus ilmaistu mustilla palkeilla.

Kuten Kuvasta 1. voidaan havaita, leviämien muutokset ovat kaikki positiivisia eli kaikkien pastojen leviämä lisääntyi notkisteen lisäämisen myötä. Kaikkein suurin lisäys oli natriumglukonaatilla, jota seurasivat WRDA 90 D ja LP-3. Natriumglukonaatilla oli selkeästi eniten leviämää kasvattava vaikutus. Merkillepantavaa on, että kärkikolmikosta kaksi, WRDA 90 D ja LP-3 ovat molemmat tyypiltään lignosulfonaattipohjaisia. Sen sijaan jäljellä olevissa polykarboksylaattipohjaisilla ja melamiinilla ei ole havaittavissa selkeätä eroa leviämän kasvun suhteen. Kaikki notkisteet lisäsivät odotetusti pastan leviämää, tosin erot eri aineiden välillä olivat huomattavia.



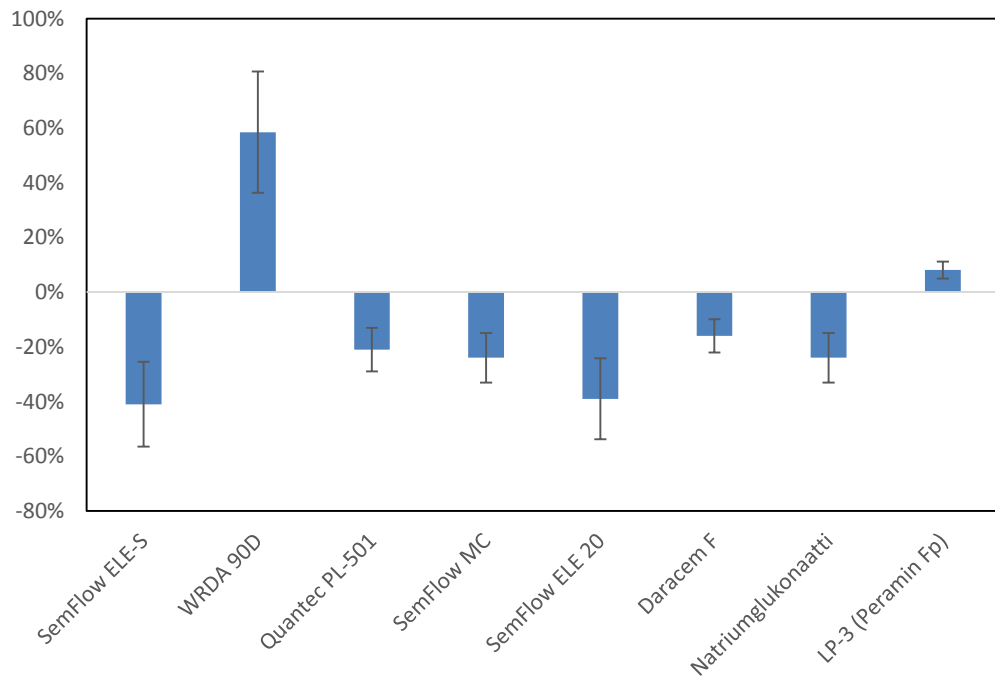
Kuva 2; Reometrimittauksissa havaittu myötörajan muutos 0,5 % notkistelisäysmäärällä prosentteina. Suhteellisen virheen osuus ilmaistu mustilla palkeilla.

Reometrimittauksista saadut tulokset muutettiin mittauslaitteen piirtämistä kuvaajista ensin tekstimuotoon jonka jälkeen ne koottiin Excel-taulukkoon. Saaduista arvoista laskettiin keskiarvot ja niitä verrattiin referenssinäytteen keskiarvoihin. Vertailun perusteella lasketut muutokset taulukoitiin ja niiden pohjalta piirrettiin Kuvan 2. mukainen diagrammi havainnollistamaan notkisteiden erilaista vaikutusta pastan myötörajaan ja viskositeettiin. Kaikki saadut toistokokeiden ja keskiarvojen laskennassa käytetyt kokeellisen arvot löytyvät työn liitteenä olevasta Excel-taulukosta (Liite 2; Excel-taulukko reometrimittauksista). Kuten kuvaajasta voidaan havaita, kaikki yhtä notkistetta lukuunottamatta laskivat pastan myötörajaa notkistamattomaan referenssiin verrattuna. Eniten myötörajaa laskivat myös leviämämittauksissa tehokkaimmiksi osoittautuneet natriumglukonaatti, WRDA 90 D ja LP-3. Erot tehokkuudessa vähiten myötörajaa laskeneihin ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin leviämämittauksissa. Huomattavimpana havaintona on kuitenkin yhden notkisteaineen osoittautuminen myötörajaa kasvattavaksi. Quantec PL-501 vaikuttaa kokeiden perusteella nostavan notkistamansa pastan myötörajaa huomattavissa määrin muihin nähden. Quantec PL-501 on tyypiltään polykarboksylaatti.



Kuva 3; Reometrimittauksissa havaittu viskositeetin muutos 0,5 % notkistelisäysmäärällä prosentteina. Suhteellisen virheen osuus ilmaistu mustilla palkeilla.

Tutkittaessa notkisteiden vaikutusta viskositeettiin toimittiin vastaavalla tavalla kuin tarkasteltaessa reometrilla saatuja myötörajan muutoksia. Kuten myötörajankin tulokset, ovat eri notkistinten viskositeettien tulokset toistoinen samassa liitteessä työn lopussa (Liite 2; Excel-taulukko reometrimittauksista). Jälleen keskiarvojen perusteella lasketut arvot vertailtiin referaatin kanssa ja sijoitettiin taulukkoon, joka on esitetty Kuvassa 3. Kuten Kuvan 3. kuvaajasta voidaan havaita, kaikki testatut notkisteet laskivat pastan viskositeettia, eli alensivat sen sitkeyttä muuttaen pastaa juoksevampaan muotoon. Kuvaajasta nähdään, että voimakkaimmin viskositeettiin vaikuttivat myös aiemmissa mittauksissa tehokkaimmiksi osoittautuneet natriumglukonaatti ja LP-3, kuitenkin muissa mittauksissa selkeästi muista polykarboksylaateista selkeästi erottuneen WRDA 90 D vaikutuksen viskositeettiin jääden muiden, polykarboksylaattipohjaisten notkisteiden tasolle. Selkeimmin kuvaajasta erottuu kuitenkin aiemmassa, myötörajan muutosta tarkasteltaessa erottuneen Quantec PL-501 vaikutus. Quantec PL-501 nosti pastan viskositeettia, mutta ero notkistamattomaan referenssiin oli ainoastaan 2 %-yksikköä. Mikään muu testatuista notkisteista ei lisännyt pastan viskositeettia, joten Quantec PL-501 ero on huomattava.



Kuva 4. Vicatronic-laitteella suoritetuissa kovettumisaikamittauksissa havaittu kovettumisajan muutos 0,5 % notkistelisäysmäärillä prosentteina. Vertailtavan arvon ollessa Initial Setting Time, IST. Suhteellisen virheen osuus ilmaistu mustilla palkeilla.

Kovettumisaikamittauksessa tarkasteltiin notkisteen vaikutusta pastan kovettumisnopeuteen. Kovettumisaikaa mitattaessa tarkasteluun otettiin kaksi laitteella saatua mittaustulosta, Initial Setting Time (IST) ja Final Setting Time (FST). Initial Setting Time:lla tarkoitetaan mittaushetkeä, jolloin laite ilmoittaa anturin piston syvyydeksi 3,0 mm tai enemmän. Final Setting Time:lla tarkoitetaan ajanhetkeä, jolloin laite ilmoittaa piston syvyydeksi 37,0 mm tai enemmän. IST siis kuvaa sitä ajanhetkeä vedenlisäyksestä, jolloin pasta on kuivuessaan alkanut menettää muovailtavuuttaan. FST vastaavasti taas kuvaa sitä ajanhetkeä vedenlisäyksestä, jolloin pasta on kuivunut siinä määrin, että se on menettänyt täysin muovailtavuutensa ja sen lujuus on riittävä kestämään tiettyä painetta. Vicatronic-laitteella saadut IST ja FST-kovettumisajat kirjattiin laitteesta Excel-taulukkoon ja näiden muutos verrattuna referenssiin laskettiin %-osuuksina vastaavalla tavalla kuin edellä kuvatuissa leviämä-, myötöraja- ja

viskositeettimittauksissa. Tuloksista muodostettiin Kuvan 4. kuvaaja. Kuvaajasta nähdään, että tutkituista notkisteista kaksi, WRDA 90 D ja LP-3 lisäsivät pastan kovettumisaikaa muiden laskiessa sitä. Huomattavimmin kovettumisaikaa lisäsi WRDA 90 D, jossa kuivumiseen kulunut aika lisääntyi 58 %:lla, LP-3 kovettumisaajan lisäyksen ollessa vain 8 %. Muilla notkisteilla kuivumisaika lyheni, eniten sitä lyhentäen polykarboksylaattit SemFlow ELE-S ja SemFlow ELE 20. Muissa mittauksissa erottunut natriumglukonaatti ei eronnut kuivumisaikansa suhteen juuri muista polykarboksylaateista. Sekä WRDA 90 D että LP-3 olivat tyyppiltään lignosulfonaatteja, muiden tyyppien vaikutuksen ollessa melko samaa tasoa lukuunottamatta muista erottuneita polykarboksylaatteja SemFlow ELE-S:ä ja SemFlow ELE 20:tä. Tarkasteltaessa notkisteiden lisäystapoja pastaan, huomataan myös, että heikommin kovettumisaikaa lisännyt notkiste, LP-3 oli WRDA 90 D:stä poiketen kiinteänä jauheena sekoitusveteen liuotettu.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkittaessa notkisteiden vaikutusta leviämään voitiin havaita, että kaikilla lisäaineilla oli pastan leviämää lisäävä vaikutus. Heikoimminkin leviämää lisännyt notkiste Quantec PL-501 kasvatti leviämää keskimäärin noin 17 %, eli kaikkien tarkasteltujen notkisteiden kohdalla voidaan puhua huomattavasta leviämän kasvusta. Vaihtelut eri notkistetyyppien välillä olivat kuitenkin merkittäviä. Tehokkaimmiksi osoittautuivat lignosulfonaatit WRDA 90 D ja LP-3 sekä natriumglukonaatti, joiden tulokset erottuvat selkeästi muista. Ainoan melamiinin Daracem F:n tulokset eivät juurikaan poikenneet muista, jäljellä olevista polykarboksylaateista.

Myötörajan muutoksia tarkasteltaessa selkeimpiä pääpiirteitä olivat lignosulfaattien voimakkaimmat vaikutukset laskea myötörajaa sekä ainoan myötörajaa nostaneen Quantec PL-501 erottuminen muusta joukosta. Kuten jo todettua, lignosulfonaatit WRDA 90 D ja LP-3 laskivat tehokkaimmin pastan leikkauksen myötörajaa, polykarboksylaattien tehon jäädessä selkeästi heikommaksi. Melamiini Daracem F ei noussut esille muista verrokeista, mutta silläkin oli selkeästi myötörajaa laskeva vaikutus.

Kuten myötörajoja tarkasteltaessa, myös viskositeettien tuloksissa polykarboksylaatti Quantec PL 501 erottui joukosta ainoana notkisteena, joka lisäsi seoksen viskositeettia. Vaikka viskositeetin kasvu ei ollut suuri, se erottaa Quantec PL 501:en selkeästi muista vertailukohteista. Viskositeetteja tarkasteltaessa havaittiin jälleen natriumglukonaatin ja lignosulfonaatti LP-3:n olevan erillään muista tyypeistä. Poikkeuksena aiempiin mittauksiin voitiin kuitenkin havaita, että lignosulfonaatti WRDA 90 D ei laskenut viskositeettia toisen lignosulfonaatin LP-3:n tavoin, vaan se jäi polykarboksylaattien tasolle, SemFlow ELE-S:n ollessa jopa sitä muutaman prosenttiyksikön tehokkaampi. Melamiini Daracem F ei tässäkään mittauksessa tehnyt juurikaan eroa polykarboksylaatteihin.

Kovettumisaikamittauksessa kaksi vertailtavaa lisäainetta kasvatti kovettumisaikaa: WRDA 90 D ja LP-3, molemmat lignosulfonaatteja. Merkillepantava ero näiden kahden välillä oli notkisteiden lisäystavassa pastaan: WRDA 90 D oli nestemäistä, LP-3 taas sekoitusveteen liuotettua. Kovettumisaikaa vähentävistä notkisteista polykarboksylaatit SemFlow ELE-S ja SemFlow ELE 20 olivat selkeästi tehokkaimmat. Muista tyypeistä melamiini Daracem F ja natriumglukonaatti myös laskivat kovettumisaikaa, mutta niistä kumpikin jäi selvästi tehokkaimmista SemFlow ELE-S ja SemFlow ELE 20 – polykarboksylaateista.

Työssä tarkastellut vaikutukset ovat nähtävissä sekä ohjeellisissa kuvaajissa sekä liitteiden taulukoissa.

6 YHTEENVETO

Pyrittäessä lisäämään geopolymeerien käyttöä tulevaisuudessa on perehdyttävä niiden ominaisuuksiin rakennusmateriaalina. Tässä työssä tarkasteltiin perinteisten, käytössä olevien notkisteiden soveltuvuutta näille geopolymeeripohjaisille sideaineille, minkä tuntemuksella on tärkeä rooli näiden massojen hyödyntämistä ajatellen. Lisäaineiden soveltuvuuden tunteminen on paitsi betonin käytön myös siitä valmistettävien rakenteiden laadunhallinnan kannalta olennaista.

Työssä tutkittiin notkisteiden vaikutusta pääosin masuunikuonasta valmistettuun massaan. Vaikutuksia mitattiin kolmella eri menetelmällä, joista saadut tulokset antavat tietoa siitä, miten eri tyyppiset notkisteet vaikuttavat alkaliaktivoituille sideaineille. Työssä saatujen tietojen pohjalta voitiin tehdä notkistekohtaiset ja notkistetyyppikohtaiset jaottelut:

Notkistetyypeistä polykarboksylaattien vaikutukset pastaan olivat lähes samoja. Ainoastaan Quantec PL-501 poikkesi muista tutkittavista kohteista taipumuksellaan kasvattaa sekä pastan myötörajaa että viskositeettia. Muissa mittauksissa se ei ominaisuuksiltaan eronnut muista kuin tehonsa puolesta. Lignosulfonaatit vaikuttivat kaikissa kokeissa samalla tavalla, eroja näiden kahden välillä ilmeni vain tehokkuudessa.

Polykarboksylaateista Quantec PL 501 poikkesi muista selkeästi kasvattamalla pastan myötörajaa. Kyseinen notkiste oli ainoa kaikista testatuista verrokeista, joka poikkesi selkeästi muista saman tyyppin lisäaineista. Muuten kaikki kyseisen tyyppin lisäaineet noudattivat vaihtelevilla tehokkuuksilla samoja vaikutussuuntia.

Kaiken kaikkiaan tarkasteltavista verrokkityypeistä tasaisimpia tuloksia tuotti natriumglukonaatti, joka antoi melko odotettavissa olevia tuloksia kaikissa mittauksissa. Vastaavasti polykarboksylaatit SemFlow ELE-S, SemFlow ELE 20 ja SemFlow MC toimivat hyvin odotetulla tavalla, kuten myös melamiini Daracem F. Nämä kaikki edellä luetellut vaikuttivat pastoihin samalla tavalla, eroja niiden välillä oli ainoastaan vaikutuksen tehokkuudessa.

Työn tuottamien tulosten perusteella voidaan tehdä jaottelua eri tavalla toimivista notkistintyypeistä ja hyödyntää saatuja tietoja myöhemmässä alan tutkimuksessa sekä käytännön työskentelyssä.

7 LÄHDELUETTELO

Komnitsas K., Zaharaki D., (2007) Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*. 20:14, 1261–1277.

Nematollahi, B., Sanjayan, J G., (2014) Efficacy of Available Superplasticizers on Geopolymers, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 7(7): 1278-1282.

Benito P., Leonelli C., Medri V., Vaccari A., (2013) Geopolymers: a new and smart way for a sustainable development. *Applied Clay Science*, 73, 1.

Zhang Z., Provis J. L., Reid A., Wang H., (2014) Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113-127.

Luukkonen, T., Abdollahnejah, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M., (2018) Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar s. 171-178

van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxson P., Lukey G.C., (2006) Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials*, A139, 506-513.

Liite 1; Excel-taulukko leviämämittauksista

Näyte Ref	Notkistin	Notkistimen tyyppi	Notkistimen ammistus (% sideaineesta)	Lisäytävä	Mittaus 1	Leviämä [mm]		Mittaus 3	Mittausten ka.	Huomittettava	Leviämän muutos [%]
						Mittaus 2	Mittaus 3				
					485,40	184,79	192,61	187,6			
SFES	SemFlow ELE-5	Polykarboksylaatti	0,50%	Luotus sekoitusveiteen	245,68	226,55	213,42	228,55			22 %
WRDA	WRDA 90D	Lignosulfonaatti	0,50%	Veden jälkeen lisäys	276,89	263,88	262	264,257	laskettu standardiohjeiden keskiarvona		41 %
OPL	Quantec PL-501	Polykarboksylaatti	0,50%	Veden jälkeen lisäys	247,35	205,91	205,12	219,46			17 %
SFMC	SemFlow MC	Polykarboksylaatti	0,50%	Luotus sekoitusveiteen	245,53	224,95	224,31	231,597			23 %
SFEZO	SemFlow ELE 20	Polykarboksylaatti	0,50%	Luotus sekoitusveiteen	243,01	234,13	233,62	236,92			26 %
DF	Daracem F	Melamiini	0,50%	Veden jälkeen lisäys	258,23	231,58	226,57	238,793			27 %
NG	Natriumlukonaatti	Natriumlukonaatti	0,50%	Luotus sekoitusveiteen	276,37	278,01	278,22	278,2	laskettu standardiohjeiden keskiarvona		48 %
LP-3	LP-3 (Peramin Fp)	Lignosulfonaatti	0,50%	Luotus sekoitusveiteen	> 300	244,12	226,62	256,913			37 %

"Laskettu standardiohjeiden keskiarvona" tarkoittaa, että leviämä on mitattu mittauspöydällä kahdesta eri suunnasta ja taulukossa oleva tulos on laskettu näiden keskiarvona leviämämittausten SFS-standardien mukaisesti.

Kuvaajassa näkyvä virheen suuruus on saatu laskemalla ensin mittausten keskiarvo, ja siitä laskemalla keskihajonta. Keskihajonnan prosentuaalinen arvo on laskettu osten keskiarvosta laskemalla n. 9,99904 %.

Liite 2; Excel-taulukko reometrimittauksista

Näyte Ref	Notkistin	Notkistimen tyyppi	Notkistimen annostus (% sideaineesta)	Lisäystapa	Myötöraja [Pa]			Viskositeetti [Pa*s]			Muutos [%]	Mittaus 3	Mittaus 2	Mittaus 1	Muutos [%]	Mittaus 3	Mittaus 2	Mittaus 1	Muutos [%]	
					Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3										Mittaus 1
SFES	SemFlow ELE-S	Polykarboksylaatti	-	-	50.1253	58.7799	71.9634	60.2895	6.1573	4.16925	4.10327	4.8008								
WRDA	WRDA 90D	Lignosulfonaatti	0.50 %	Liutus sekoitusveteen	41.7214	39.4206	41.8346	40.9922	3.31937	3.17728	3.52008	3.33891								
QPL	Quantec PL-501	Polykarboksylaatti	0.50 %	Veden jälkeen lisäys	26.5309	35.3521	26.5309	29.4713	6.21090	2.43153	1.96359	3.53534								
SFMC	SemFlow MC	Polykarboksylaatti	0.50 %	Veden jälkeen lisäys	82.4069	80.9209	85.3304	82.8861	4.59184	5.29155	4.84687	4.91009								
SFE20	SemFlow ELE 20	Polykarboksylaatti	0.50 %	Liutus sekoitusveteen	55.7255	47.9397	36.0688	46.578	3.77479	3.67634	3.27276	3.55946								
DF	Daracem F	Melamiini	0.50 %	Veden jälkeen lisäys	57.0126	52.8060	46.6600	52.1625	3.99651	4.26625	3.29254	3.83177								
NG	Natriumglukonaatti	Natriumglukonaatti	0.50 %	Liutus sekoitusveteen	36.0493	36.051	36.0501	36.0501	3.19226	3.85229	3.49782	3.51412								
IP-3	IP-3 (PeramiinEp)	Lignosulfonaatti	0.50 %	Liutus sekoitusveteen	9.08891	6.60344	8.73669	8.44295	1.65122	1.68955	1.65736	1.69398								
					30.749	27.4413	26.0045	28.0649	2.1586	1.76258	1.74349	1.88622								

Molemmissa taulukoissa olevat muutokset on laskettu prosentteina verrattuna referenssinäytteen (taulukon ylin rivi, notkisteen näyte).

Kuvaajassa näkyvä virheen suuruus on saatu lasiemalla ensin mittausten keskiarvo, ja siitä laskemalla keskihajonta. Keskihajontan prosentuaalinen arvo on laskettu otosten keskiarvosta laskemalla n. 51,019 8 % (myötöraja).

Kuvaajassa näkyvä virheen suuruus on saatu lasiemalla ensin mittausten keskiarvo, ja siitä laskemalla keskihajonta. Keskihajontan prosentuaalinen arvo on laskettu otosten keskiarvosta laskemalla n. 37,120 5 % (viskositeetti).

Liite 3; Excel-taulukko kovettumisaikamittauksista

Näyte	Notkistin	Notkistimen tyyppi	Notkistimen annostus (% sideaineesta)	Lisäystapa	Kovettumisaika [min] ja syvyys [mm]			FST (mm)	Huomioitavaa	Kovettumisaajan muutos [%]
					IST (min)	IST (mm)	FST (min)			
Ref	-	-	-	-	62,00	37,7	37,2	37,7		
SFES	SemFlow ELE-S	Polykarboksyalaatti	0,50 %	Liutos sekoitusveteen	37,00	4,4	127	38,2		
WRDA	WRDA 90D	Lignosulfonaatti	0,50 %	Veden jälkeen lisäys	106,00	4,7	391	30		58 %
QPL	Quantec PL-501	Polykarboksyalaatti	0,50 %	Veden jälkeen lisäys	49,00	9,1	109	37,4		-21 %
SFMC	SemFlow MC	Polykarboksyalaatti	0,50 %	Liutos sekoitusveteen	47,00	9,2	104	37,4		-24 %
SFE20	SemFlow ELE 20	Polykarboksyalaatti	0,50 %	Liutos sekoitusveteen	38,00	3	83	39,1		-39 %
DF	Daracem F	Melamiini	0,50 %	Veden jälkeen lisäys	52,00	5,3	97	38,7		-16 %
NG	Natriumglukonaatti		0,50 %	Liutos sekoitusveteen	47,00	3,6	437	37,4		-24 %
LP-3	LP-3 (Peramin Fp)	Lignosulfonaatti	0,50 %	Liutos sekoitusveteen	67,00	26,7	102	37		8 %

"Laskettu standardiohjoiden keskiarvona" tarkoittaa, että leviämä on mitattu mitauspöydällä kahdesta eri suunnasta ja taulukossa oleva tulos on laskettu näiden keskiarvona leviämämittausten SFS-standardien mukaisesti.

IST = Initial Setting Time, 1. ajanhetki jolloin mitausanturin lukema 3,0 mm tai enemmän

FST = Final Setting Time, 1. ajanhetki jolloin mitausanturin lukema 37,0 mm tai enemmän

Kuvaajassa näkyvä virheen suuruus on saatu laskemalla ensin mittausten keskiarvo, ja siitä laskeamalla keskihajonta. Keskihajonnan prosentuaalinen arvo on laskettu otosten keskiarvosta laskemalla n. 37,933 3 %.