Diplomityö Aalto-yliopistossa

Mikrohuokostetun betonin pakkasenkestävyys

Artikkelin valokuvat: Rudus Oy

Anna Silventoinen, dipl.ins.,
Laatuinsinööri, Rudus Oy
anna.silventoinen@rudus.fi
Mika Tulimaa, TkL,
Laatu- ja kehitysjohtaja, Rudus Oy
mika.tulimaa@rudus.fi

Aalto-yliopistossa toteutettiin vuosina 2019–2020 Rudus Oy:n toimeksiantona diplomityö, jossa tutkittiin mikrohuokostimen käyttöä rasitusluokkien XF2 ja XF4 betoneissa, eli betoneille, jotka altistuvat kloridirasitukselle.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko mikrohuokostimella saavuttaa riittävä kestävyys suolapakkasrasitusta vastaan ja miten lisäaineen käyttö vaikuttaa betonin muihin ominaisuuksiin.

Diplomityön ohjaajina toimivat Rudukselta TkL *Mika Tulimaa* ja Aalto-yliopistosta TkT *Fahim Al-Neshawy.* Työn valvojaoli professori *Jouni Punkki.* Lisäksi mukana toteutuksessa olivat Rudukselta *Max Vuorio* ja *Rauli Laine.*

Mikrohuokostin, tai joissain yhteyksissä keinohuokostin, on vaihtoehtoinen lisäaine betonin huokostukseen. Se sisältää hyvin pieniä polymeerihuokosia, jotka toimivat ilmahuokosten tapaan parantaen betonin pakkasenkestävyyttä.

Vaikka mikrohuokostin on melko tuntematon ja vähän käytetty lisäaine, ei se ole uusi keksintö. Ensimmäinen mikrohuokostin kehitettiin Hollannissa jo 70-luvulla. Ainetta tutkittiin jonkin verran myös Suomessa, mutta se ei levinnyt laajempaan käyttöön. 2010-luvulla aihetta alettiin jälleen tutkia ja tutkimuksia löytyy niin Yhdysvalloista, Japanista kuin Ruotsistakin. Silti käytännönkokemusta lisäaineesta tuntuu olevan vähän.

Mikrohuokostimen etuna pidetään sen ennustettavuutta. Toisin kuin kemiallisesti huokostetussa betonissa, mikrohuokostetun betonin ilmamäärä ei muutu esimerkiksi kuljetuksen vaikutuksesta. Lisäksi polymeerihuokosten kokojakauma ja määrä voidaan määritellä kemiallisesta huokostimesta poiketen tarkasti etukäteen. Näin vältetään liian suuret huokoset ja pidetään huokosten osuus maltillisena. Polymeerihuokosten osuus betonin tilavuudesta on vain noin prosentin luokkaa ja huokosten halkaisija vaihtelee yleensä 20 ja 100 µm välillä. Huokosten koko on suojahuokosten pienimmästä päästä.

Mikrohuokostimen toiminta perustuu itse huokosen sijaan sen ympärille muodostuvaan tyhjään tilaan. Veden jäätyessä betonin kapillaarihuokosissa, huokosen ja sementtipastan välinen tyhjä tila toimii suojahuokosen tapaan tasaten sisäisiä jännityksiä.

Mikrohuokostinlisäaineita valmistetaan niin jauheena kuin valmiina nesteenä. Tässä työssä keskityttiin nestemäiseen lisäaineeseen sen helpon käytettävyyden takia, mutta myös jauhemaisen lisäaineen käyttöä kokeiltiin.

Tutkimuksen kokeellinen osuus

Kokeellinen osuus toteutettiin Rudus Oy:n omassa kehityslaboratoriossa Helsingissä, jossa oli valmius niin massan valmistukseen kuin pakkaskokeiden suorittamiseen. Vain pintahieanalyysi tilattiin ulkopuoliselta toimijalta.

Tutkimusta varten valmistettiin kahdeksan eri betonia useilla huokostinlaaduilla ja annosteluilla. Vesi-sementtisuhteeksi valittiin 0,45 ja sideaineena käytettiin SR-sementtiä. Notkistimen ja kemiallisen huokostimen toimitti Finnsementti. Nestemäisen mikrohuokostimen annostelu vaihteli voimakkaasti muutamasta kilosta pariin kymmeneen kiloon betonikuutiota kohden.

1

1 Kuvituskuva, kohde ei liittynyt tutkimushankkeeseen. Laitaatsalmen vesiväylän ylittää kaksi kiinteää, 500 metriä pitkää betonisiltaa Savonlinnassa. Siltojen betonin pakkasenkestävyys oli luokkaa P50 ja lujuusluokka oli c45/55. Betoni oli riittävän notkeaa tiheän raudoituksen sekaan ja sen työstettävyys oli hyvä. Rudus Oy toimitti kahteen siltaan betonia yhteensä noin 15 000 m³.

Betoneista tutkittavat ominaisuudet olivat työstettävyys, ilmamäärä, lujuudenkehitys ja pakkasenkestävyys suolapakkasrasituksessa. Vertailukohtina käytettiin tavallista huokostamatonta betonia sekä kemiallisesti huokostettua betonia.

Pakkasenkestävyyttä tutkittiin laattakokein (CEN/TS 12390-9:2016). Laattakokeessa vedellä kyllästetyt betonikappaleet altistetaan vuorotellen jäätymiselle ja sulamiselle, siten, että koekappaleen pinnalla on vettä, jonka annetaan jäätyä. Vesi on kokeesta riippuen makeaa vettä tai 3 %:sta NaCl-liuosta. Tässä tutkimuksessa käytettiin NaCl-liuosta. Syklien määrä kokeessa on 56 ja yksi sykli kestää vuorokauden. Koekappaleita on neljä tutkittavaa betonia kohden ja jäätymiselle altistettava koekappale on nimellispinta-alaltaan 150 × 150 mm². Työssä tutkittiin mikrohuokostimen toimintaa suolapakkarasituksessa, jolloin betonikappaleiden pinnalle lisätään ohut kerros suolavettä. Suola vaikuttaa veden jäätymisprosessiin betonissa ja tehostaa erityisesti pintarapauman muodostumista. Rapauma on suolapakkasrasituksessa pääasiallinen vauriomuoto. Tarvittaessa voidaan mitata rapauman lisäksi myös betonin sisäistä vauriota ultraäänellä. Tässä tutkimuksessa ei sisäistä vauriota mitattu.

Laattakokeessa rapautunut betoni kerätään talteen ja punnitaan viikon tai kahden välein. Jotta betoni voidaan katsoa pakkasenkestäväksi, ei betonikappaleiden kumulatiivinen pintarapauma saa ylittää 56 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen sille standardissa asetettuja vaatimuksia. Vaatimukset vaihtelevat rasitusluokan mukaan välillä 100–650 g/m².

Mikrohuokostimen vaikutus betonin ominaisuuksiin

Mikrohuokostettu betoni ei ulkoisesti eikä olemukseltaan eronnut vertailubetonista. Se kuitenkin vaati hieman korkeamman notkistinannostelun, jotta tavoitenotkeus saavutettiin. Kemiallisesti huokostettuun betoniin verrattuna betonimassa oli jäykkää.

Mikrohuokostettujen betonien ilmamäärät eivät poikenneet huokostamattoman betonin ilmamäärästä, vaan olivat kaikissa betoneissa noin kahden prosentin luokkaa. Kemiallisesti huokostetun betonin ilmamäärä oli 5,6 % ja huokosjako 0,18 mm.

Huokostamaton betoni vaurioitui nopeasti pakkaskokeessa. Jo ensimmäisten viikkojen jälkeen koe keskeytettiin, koska rapautuminen oli niin voimakasta, että rapautumiselle annetut rajat ylitettiin ja koekappaleiden mitattavuus alkoi kärsiä. Mittaustulos antoi kuitenkin hyvän vertailupohjan mikrohuokostimen toiminnalle.

Jo pienimmällä mikrohuokostinannostelulla pintarapaumaa saatiin alennettua merkittävästi. Suolapakkasrasituksen puolessa välissä, 28 syklin jälkeen, sen ja huokostamattoman betonin välinen rapaumaero oli yli 2 kg/m². Mikrohuokostinannostelun kasvaessa, ero huokostamattomaan betoniin kasvoi entisestään.

Korkeimmalla tutkitulla mikrohuokostinannostelulla saavutettiin erittäin hyvä pakkasenkestävyys. Rapauma oli tällöin alle 100 g/m². Tulos on samaa luokkaa kemiallisesti huokostetun vertailubetonin kanssa ja molemmat soveltuisivat laattakokeen tulosten perusteella XF2- ja XF4-rasitusluokkiin niin viidenkymmenen kuin sadan vuoden käyttöiällä.

Mikrohuokostettujen betonien puristuslujuudet poikkesivat vain vähän huokostamattoman vertailubetonin lujuuksista. Mikrohuokostettujenbetonien 28 vuorokauden puristuslujuustulokset olivat kolmesta yhdeksään prosenttia matalammat kuin vertailubetonin, mutta 91 vuorokauden iässä ero oli enää yhdestä kolmeen prosenttia.

Kemiallisesti huokostetun betonin puristuslujuustulokset olivat selvästi heikompia. Tulokset olivat noin kaksikymmentä prosenttia matalammat kuin samalla vesi-sementtisuhteella valmistetun huokostamattoman betonin. Heikommat tulokset ovat suoraan yhteydessä betonin korkeampaan ilmamäärään ja huokoisuuteen. Tämä oli luonnollisesti odotettavissakin, koska suuremman ilmamäärän vaikutusta ei erikseen huomioitu suhteituksessa. Ilmamäärällä on tunnettu yhteys betoni lujuuteen: yhden prosentin ilmamäärän lisäyksellä on lujuuteen noin 5 %:n alentava vaikutus.

Mikrohuokostetun betonin ominaisuudet mahdollistavat pakkasenkestävän betonin valmistuksen pienemmillä sementtimäärillä perinteisiin pakkasenkestäviin betoneihin verrattuna. Tällä on suora vaikutus betonin hiilidioksidipäästöihin, joista valtaosa muodostuu sementin valmistuksesta.

Laadunvarmistus

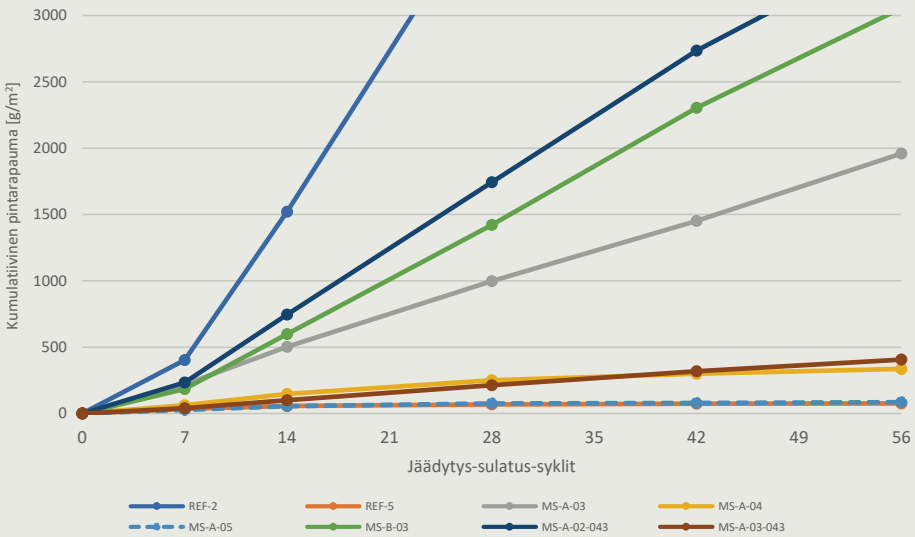
Mikrohuokostimen määrä betonissa perustuu pääasiassa tehtaan punnitustietoihin. Laadunvalvonnan osalta mikrohuokostetun betonin ilmamäärämittaus osoittautui toimi-

Tutkimuksessa tutkitut betonit ja huokostusvaihtoehdot

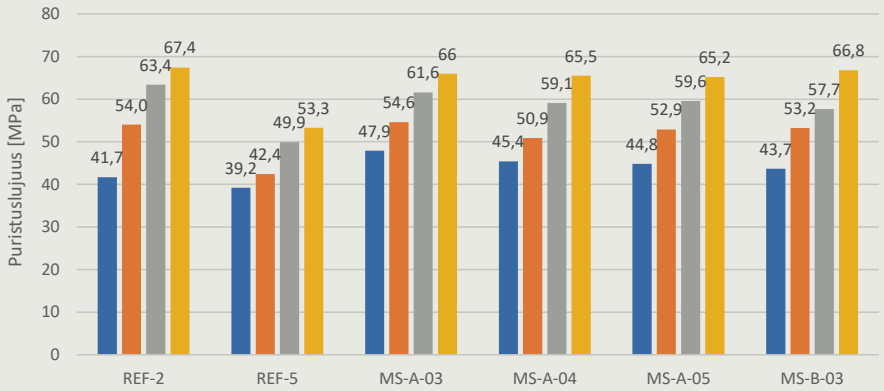
Betoni	v/s-suhde	Huokostin	Ilma-määrä [%]	Pakkasenkestävyys
REF-2	0,45	Ei huokostinta	2,4	Ei-hyväksyttävä
REF-5	0,45	Kemiallinen huokostin	5,6	Erittäin hyvä
MS-A-03	0,45	Nestemäinen MH*	1,9	Ei-hyväksyttävä
MS-A-04	0,45	Nestemäinen MH	2,3	Hyvä
MS-A-05	0,45	Nestemäinen MH	2,1	Erittäin hyvä
MS-B-03	0,45	Jauhemainen MH	2,1	Ei-hyväksyttävä
MS-A-02-043	0,43	Nestemäinen MH	1,6	Ei-hyväksyttävä
MS-A-03-042	0,42	Nestemäinen MH	1,9	Hyvä

*MH on mikrohuokostin

Kumulatiivinen pintarapauma laattakokeessa



Betonien lujuustulokset 3, 7, 28 ja 91 vuorokauden iässä



2

3

mattomaksi. Mikrohuokostimen aiheuttama tiheyden alentuminen on niin vähäinen, että siitä ei voi päätellä mikrohuokostuksen onnistumista tehdas- tai työmaaolosuhteissa.

Tutkimuksessa tehtyjen pintahieanalyysien perusteella vaikuttaisi siltä, että menetelmä ei sovellu pakkasenkestävyyden mittariksi mikrohuokostetuilla betoneilla. Tulokset seurasivat jokseenkin mikrohuokostinannosteluja, mutta myös epäjohdonmukaisuuksia löytyi. Huokosjakotulokset eivät myöskään vastanneet niitä teoreettisia tuloksia, jotka betoneille laskettiin. Mikrohuokosten välinen teoreettinen etäisyys betonissa voitiin laskea, koska mikrohuokosten osuus ja koko olivat ennalta tiedossa.

Mikrohuokostimen käyttö ja sen aiheuttamat muutokset tuotannossa

Mikrohuokostimen mikroskooppiset muovipallot ovat samoja kuin mm. kosmetiikka- ja tekstiiliteollisuuden käyttämät mikromuovit. Näin mikrohuokostimien valmistusprosessi on hyvin tunnettu ja materiaalin laadunhallinta on siten luotettavaa. Käytännössä mikromuovin määrä betonissa on kuitenkin hyvin pieni. Tutkimuksessa käytetyn nestemäinen mikrohuokostimen painosta vain noin kolme prosenttia syntyi muovista. Tämä tarkoittaisi 15 kilon annostelulla noin puolta kiloa kuutiota kohden. Tämä tuo betonin laadunvalvontaa omat haasteensa.

Mikrohuokostin nostaa selvästi betonin hintaa. Hinnan nousu perustuu yksinomaan lisäaineen aiheuttamiin kustannuksiin, eikä mikrohuokostettuun betoniin vaadittava pienempi sementtimäärä riitä kompensoimaan lisäaineen aiheuttamia kustannuksia.

Lisäaineen käyttö vaatii myös joitain erityisjärjestelyjä tehtaalla, eikä se onnistu suoraan olemassa olevalla kalustolla. Huokostimen käyttömäärät ovat moninkertaisia kemialliseen huokostimeen verrattuna, joten suurilla tuotantomäärillä aineen varastointi voi muodostua ongelmaksi.

Mikrohuokostimen luomat mahdollisuudet

Mikrohuokostin avaa uusia mahdollisuuksia, vaikka käyttö ei ole aivan yksinkertaista. Lisäaineen suurin etu on huokostuksen tasalaatuisuus. Sopivalla annostelulla voidaan saavuttaa erittäin hyvä pakkasenkestävyys ilman jatkuvaa huokostinannostelun säätämistä ja työmaalla tapahtuvaa laadunvalvontaa. Kun huokostus ei perustu kemikaalin reaktioihin, voidaan myös välttää ilmamäärän vaihtelu, huonolaatuiset ilmahuokoset ja liian alhaiset tai korkeat ilmamäärät.

Jotta mikrohuokostettu betoni voitaisiin ottaa osaksi normaalia betonin valmistusta, tarvitaan vielä varmistavaa sekä jatkotutkimusta tälle tutkimukselle. Nyt tehty tutkimus syventyi laboratoriobetonin pakkasenkestävyyteen ja lujuusominaisuuksiin. Jatkotutkimuksissa olisi hyvä tutkia mikrohuokostimen toimivuutta työmaabetoneissa sekä tärytyksen ja pumppauksen vaikutusta huokosjakoon ja siten pakkasenkestävyyteen.

2 Huokostamattoman betonin pinta oli rapautunut kokonaan pois ennen kokeen puoltaväliä.

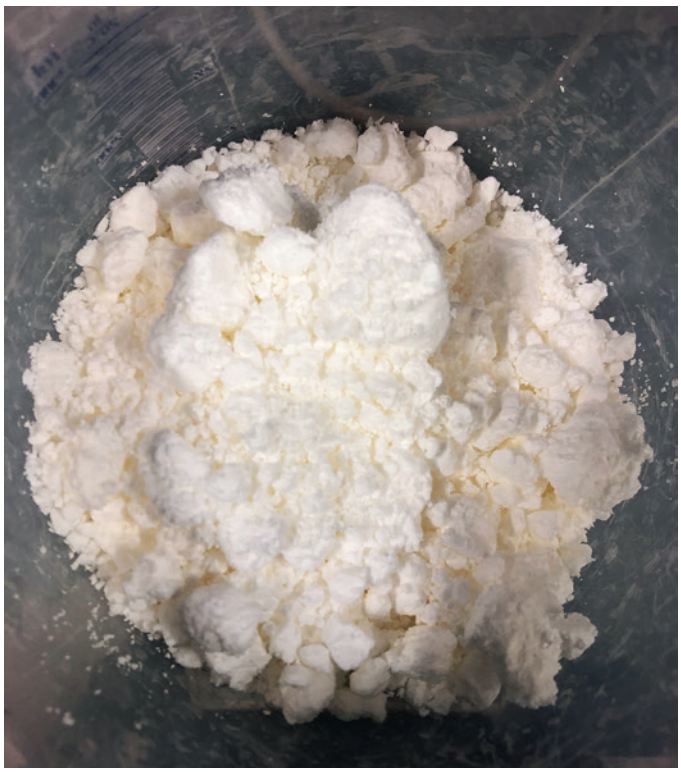
3 Sopivalla mikrohuokostinannostelulla betonipinta ei rapautunut suolapakkasrasituksessa silmällä havaittavasti.

4 Nestemäinen mikrohuokostin

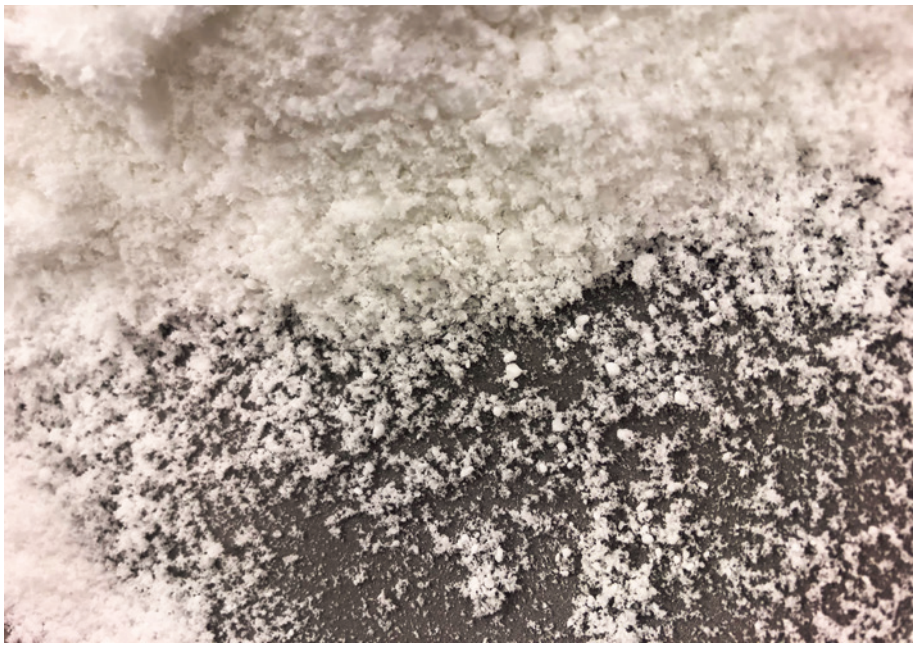
5 Jauhemainen mikrohuokostin.

6 Jauhemainen mikrohuokostin seulottuna.

4



5



6

Master Theses: Frost Resistance of Concrete Entrained with Microsphere Admixture

In 1970's a new method to make frost resistant concrete was introduced. Frost resistance was achieved by introducing small plastic balls, size of normal protective pores (10-100 µm), into concrete matrix. Method was found working but it did not gain success at that time. In recent years several new methods to introduce air voids to concrete have been developed and in the same time also this "old" microsphere method has emerged to market again. Rudus Oy wanted to find out if this was relevant method to produce frost resistant concrete considering Finnish stringent requirements for frost resistant concretes.

The research project was carried out as in the Civil Engineering Department at Aalto University. Supervisor for the master thesis was professor Jouni Punkki. Advisors were Mr. Mika Tulimaa (Lich.Tech) from Rudus Oy and D.Sc. (tech.) Fahim Al-Neshawy from Aalto University. Concrete production expertise to the project was brought by Mr. Max Vuorio from Rudus Oy.

Eight different concretes with several air-entraining admixtures were chosen for the research including reference concrete without air-entrainment and reference concrete with air 5,6 % (spacing factor 0,18 mm). Water-cement ratio was 0,45 and cement used was sulphate resistant CEM I 42,5 N – SR3.

The frost resistance of the concretes was tested e.g. by slab test with de-icing salts (CEN/TS 12390-9:2016). Results show that the more air or microspheres the better results both for traditionally air-entrained concretes and for concretes with microspheres.

The air content of the most successful microsphere concrete was 2,1 % which indicates that it is not possible to test microsphere concrete's frost resistance by air volume measurement. Currently the slab test is the only valid method to do that. Both the reference concrete and microsphere concrete with largest microsphere volume (approx. 17 kg/m^3) passed the slab test for XF2 and XF4 resistance classes for 100 years.

Results of the research show that it is possible to make frost resistant concrete for 100 years in exposure classes XF2 and XF4 with microspheres. As the air content of the concrete stays low (round 2 %), the cement amounts of these concretes can be lowered to achieve the same strength level as air-entrained concretes have. This of course lowers the emissions of the concrete. One more benefit of microsphere concretes is stability of void structure i.e. the concrete's air void structure doesn't change even though the concrete might be over compacted or in long transportation distances over mixed.