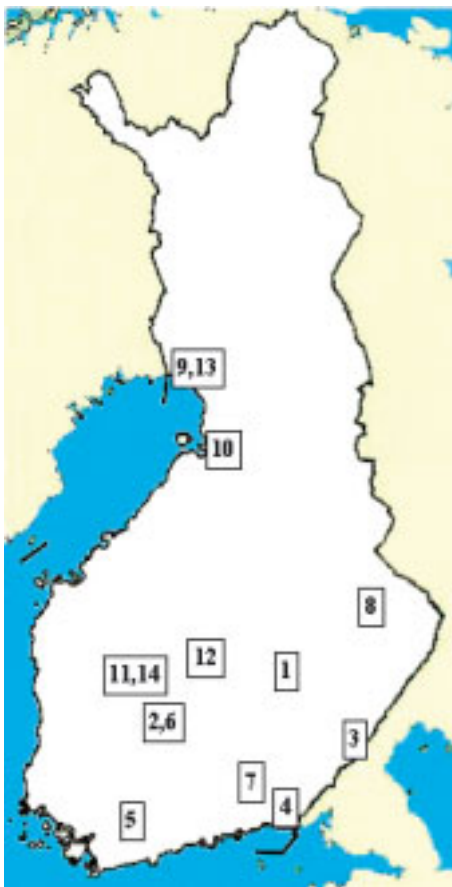


PUUPERÄISESTÄ LENTOTUHKASTA UUSI BETONIN SEOSAINE

Camilla Vornanen, diplomi-insinööri
Vesa Penttala, professori
Teknillinen korkeakoulu
Rakennusmateriaalitekniikka



1

1

Tutkimuksessa mukana olleiden tuotantolaitosten sijainti.

1. Stora Enso (SE) Varkaus
2. UPM Jämsänkoski
3. SE Imatra
4. SE Summa
5. M-real Kirkniemi
6. UPM Kaipola
7. SE Anjala
8. SE Enocell
9. SE Veitsiluoto
10. SE Oulu
11. Mäntän Energia
12. Äänevoima
13. Metsä-Botnia Kemi
14. Metsäliitto Osuuskunta, Vilppulan saha

Puuperäisellä lentotuhkalla tarkoitetaan tuhkaa, jota syntyy metsäteollisuuden energiantuotannossa vuosittain lähes 300 000 tonnia kiinteän palavan puujätteen poltossa. Puuperäisen aineksen poltto muodostaa Suomessa noin 70 % metsäteollisuuden voimalaitosten energiantuotannosta. Poltettava aines koostuu yleensä aina useammasta materiaalista. Joukossa voi olla puhdasta puuta (kuorta, haketta, purua) ja turvetta sekä lisäksi erilaisia kuitu- ja jätevesilietettä (bio-, kuitu- ja pastaliete). Tässä artikkelissa käytetään puuperäisestä lentotuhkasta yksinkertaisempaa termiä puutuhka.

Jätteeksi päätyessään puutuhka kuormittaa ympäristöä ja aiheuttaa tuotantolaitoksille yhä kasvavia kustannuksia, minkä vuoksi metsäteollisuudella onkin tarve hyödyntää sitä entistä tehokkaammin ja monipuolisemmin. Tällä hetkellä puutuhkaa käytetään muun muassa maarakentamisessa ja metsä- ja peltolanotteena, mutta betonin seosaineena sitä ei ole toistaiseksi hyödynnetty. Myös betoniteollisuudessa puutuhkan hyödyntämisellä olisi taloudellista ja ekologista merkitystä varsinkin, jos puutuhkalla korvataan osa sementistä. Sementti on betonin kallein osa-aine, ja vähentämällä betonin sementtimäärää pienennetään myös hiilidioksidipäästöjä.

Puutuhkan ominaisuuksia betonin sideaineena tai fillerinä tutkittiin *Teknillisen korkeakoulun Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa* vuosina 2006-2008 metsäteollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttöä koordinoivan *Finncao Oy:n* toimeksiantona. Projektiin osallistuivat useat suomalaiset metsäteollisuuden yhtiöt ja niiden tuotantolaitokset Suomessa. Päätaavoitteena oli selvittää, soveltuuko puutuhka ylipäättään betonin seosaineeksi vai onko sillä ominaisuuksia, jotka häiritsevät esimerkiksi lujuuden kehittymisnopeutta tai tuoreen betonin ominaisuuksia.

Alustavissa tutkimuksissa oli mukana 14 suomalaisen tuotantolaitoksen puutuhkat. Tarkemmin selvitettiin viiden puutuhkan ominaisuuksia ja toimivuutta betonissa. Eri tuotantolaitosten poltettava materiaali vaihtelee myös vuodenajasta riippuen, mikä vaikuttaa suoraan puutuhkan kemialliseen laatuun. Tämä hankaloittaa kuitenkin puutuhkan käyttöä jatkuvassa betonituotannossa. On selvää, että puutuhkan laadun tulisi olla mahdollisimman hyvin ennakoitavissa, jotta sen käyttö olisi betoniteollisuudelle mielekäästä. Tähän voidaan tulevaisuudessa toivottavasti vaikuttaa polttoprosesseja ja tuhkan talteenottoa kehittämällä. Tuhkan omi-

naisuuksien testaus riittävän usein on tietysti erityisen tärkeää.

PUUPERÄISEN LENTOTUHKAN OMINAISUUDET KIVIHILEN LENTOTUHKAA VERRATTUNA

Koska puutuhkan käytölle betonin seosaineena ei vielä ole olemassa standardeja tai muuta virallista ohjeistusta, sen tutkittuja ominaisuuksia verrattiin betonissa yleisesti seosaineena käytettyyn kivihiilen lentotuhkaan (kivihiilituhkaan) sekä sille asetettuihin viranomaisvaatimuksiin (standardit SFS-EN 450 osat 1 ja 2). Parhailaan kehitetään laadunvalvontajärjestelmää, joka mahdollistaisi puutuhkan laajemman käytön rakentamisessa.

Kemialliselta koostumukseltaan puutuhka poikkeaa hieman kivihiilituhkasta. Puutuhkan betonikäyttöä saattavatkin rajoittaa juuri tietyt betonin kannalta mahdollisesti haitalliset yhdisteet, joiden määrä voi poltetusta materiaalista riippuen kohota kivihiilituhkalle sallittua määrää korkeammaksi. Joitain haittavaikutuksia voidaan eliminoida esimerkiksi käyttämällä puutuhkabetonina vain rajoituksissa ympäristöissä tai pienentämällä suurinta sallittua puutuhkamäärää betonissa. Puutuhkien tärkeimpiä kemiallisia pitoisuuksia, joilla on merkitystä niitä käytettäessä betonin seosaineena, on esitetty taulukossa 1.

Betonitekniikan kannalta puutuhkan kriittisimpiä kemiallisia ominaisuuksia ovat rikkiyhdisteet (SO_3 -pitoisuutena mitattuna) ja kloridit. Tutkituista viidestä puutuhkasta kolmen SO_3 -pitoisuus ylitti kivihiilituhkalle sallitun määrän (3 %). Rikkiyhdisteet voivat kosteissa olosuhteissa reagoida kalsiumhydroksidin kanssa ja aiheuttaa betonissa haitallista paisumista, sementtikiven halkeilua ja betonin puristuslujuuden heikkenemistä ettringiitin, kipsin tai thaumasiiitin muodostumisen takia. Tässä tutkimuksessa tuhkasta valmistettujen laastien haitallista paisumista ei todettu, mutta rikkiyhdisteitä yli 3 % sisältävän puutuhkan käyttöä on kuitenkin hyvä välttää betonissa, jotka joutuvat kosteisiin olosuhteisiin tai altistuvat pakkasrasitukselle.

Kloridit nopeuttavat raudotteiden korroosiota ja lyhentävät näin betonin käyttöikää myös karbonatitsoitumattomassa betonissa. Kivihiilituhkan kloridipitoisuudelle asetettu yläraja on 0,1 %, joka ylittyi kaikilla puutuhkilla. Kloridipitoisuus oli niillä 0,2-0,4 % ja yhdellä puutuhkalla jopa 1,3 %. Betonin suurin sallittu kloridipitoisuus Betoninormien 2004 mukaan on 0,2 % sementin ja seosaineiden mää-

	SO ₃ [%]	Cl ⁻ [%]	SiO ₂ [%]	Kok.alkali- pitoisuus [%]	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ [%]	MgO [%]	CaO [%]	Hehk- häviö- luokka ([%])
Varkaus	8	0,4	35	4,1	35 + 18 + 3 = 56	3	15	C (7)
Jämsän- koski	3	0,2	43	3,3	43 + 22 + 4 = 69	3	15	A (1)
Imatra	10	1,3	20	4,9	20 + 14 + 4 = 38	3	31	A (2)
Summa	8	0,3	28	5,4	28 + 17 + 6 = 51	5	15	A (3)
Kirkniemi	2	0,2	36	3,7	36 + 29 + 2 = 67	2	14	B (5)
RAJA- ARVOT (SFS-EN 450-1)	< 3,0 %	< 0,1 %	reakt. > 25 %	< 5 %	> 70 %	< 4 %	vapaa < 2,5 % reakt < 10 %	A < 5 % B 5-7 % C 7-9 %

rästä, kun kyseessä on raudoitettu tai muita metalleja sisältävä betoni. Puutuhkien käyttö betonissa onkin mahdollista, ellei tämä raja ylity, kun kaikkien betonin osa-aineiden kloridipitoisuudet otetaan huomioon. Normaalisti lentotuhkaa käytettäneen betonissa niin pieniä määriä, ettei riski kokonaiskloridimäärän ylityksestä ole kovin suuri.

Muita betonin paisumista aiheuttavia tekijöitä ovat magnesiumoksidi ja kalsiumoksidi, jotka veden kanssa reagoidessaan muodostavat magnesium- ja kalsiumhydroksidia, sekä alkalireaktiot, joissa osallisina ovat kiviaines ja huokosvesi. MgO:n pitoisuudet täyttivät neljällä puutuhkalla kivihiilituhkastandardin vaatimuksen (< 4 %). CaO-pitoisuudet olivat raja-arvoihin (vapaa < 2 %, reaktiivinen < 10 %) verrattuna korkeat, mutta vapaan ja reaktiivisen CaO:n osuuksia ei tässä tutkimuksessa selvitetty. Yhdellä tuhalla CaO:n kokonaispitoisuus oli 31 % ja muilla 13-15 %. Kokonaisalkalipitoisuudeltaan Na₂O-ekvivalenteina laskettuna neljä puutuhkaa täytti kivihiilituhkan vaatimuksen (< 5 %).

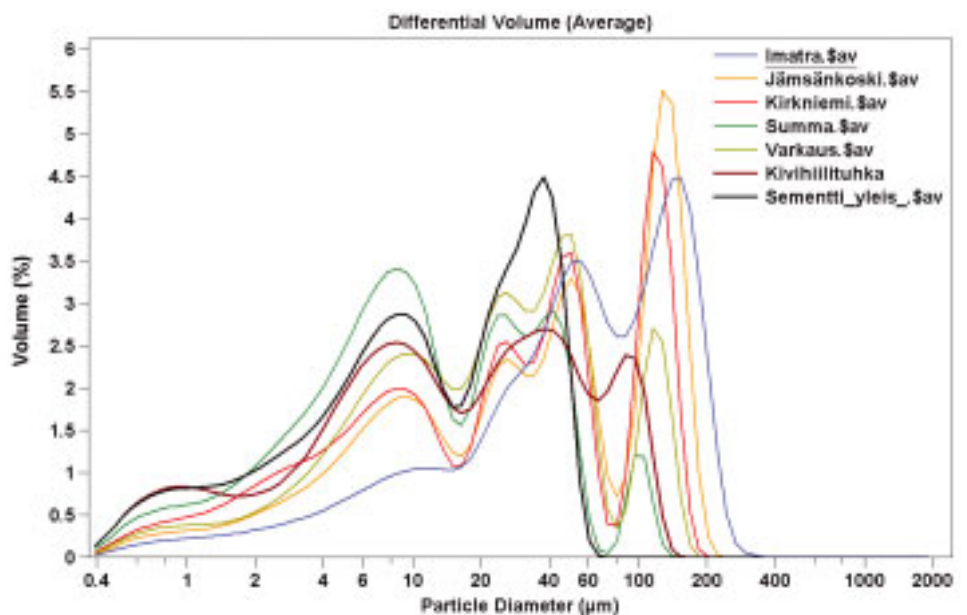
Hehkutushäviön mukaan kivihiilituhkat jaetaan kolmeen luokkaan: A (< 5 %), B (5-7 %) ja C (7-9 %). Tämän luokittelun mukaan puutuhkista yksi kuului B-luokkaan, yksi C-luokkaan ja kolme A-luokkaan. Hehkutushäviö voi kuitenkin vaihdella paljonkin eri puutuhkaerissä, mikä voi hankaloittaa tuhkien käyttöä betonissa. Lentotuhkan jäännöshiilen määrä voi betonissa vaikuttaa esimerkiksi lisäaineiden annosteluun tai vedentarpeeseen.

Puutuhkien vedentarpeeseen ja betonin työstettävyyteen voivat vaikuttaa kemiallisten ominaisuuksien lisäksi rakeisuusominaisuudet. Puutuhkista tehtiin lasergranulometrillä rakeisuusanalyysit, joiden mukaan puutuhkat olivat karkeampia ja rae-muodoltaan epäsäännöllisempiä kuin kivihiilituhka, mikä on luonnollista poltettavan materiaalin vaihdelleessa. Puutuhkissa oli yleisestimentin rakeisuus-alueella olevia ja myös sementtiä ja kivihiilituhkaa selkeästi suurempia partikkeleita. Luonnonfilleri on kuitenkin yleensä puutuhkaa karkeampaa. Rakeisuudeltaan puutuhkat sijoittuvatkin osin sementin ja osin fillerin alueelle. Puutuhkien rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 2. Kuvassa on lisäksi vertailukäyrinä yleisestimentin ja kivihiilituhkan rakeisuuskäyrät.

Tuhkien rakeiden muotoa tutkittiin valomikroskooppilla ja elektronimikroskooppilla (ESEM). Kuvissa 3 ja 4 on elektronimikroskooppikuvat yhdestä puutuhkasta ja kivihiilituhkasta 1000-kertaisina suurennoksina. Kivihiilituhkassa pallomaisten ra-

Taulukko 1.

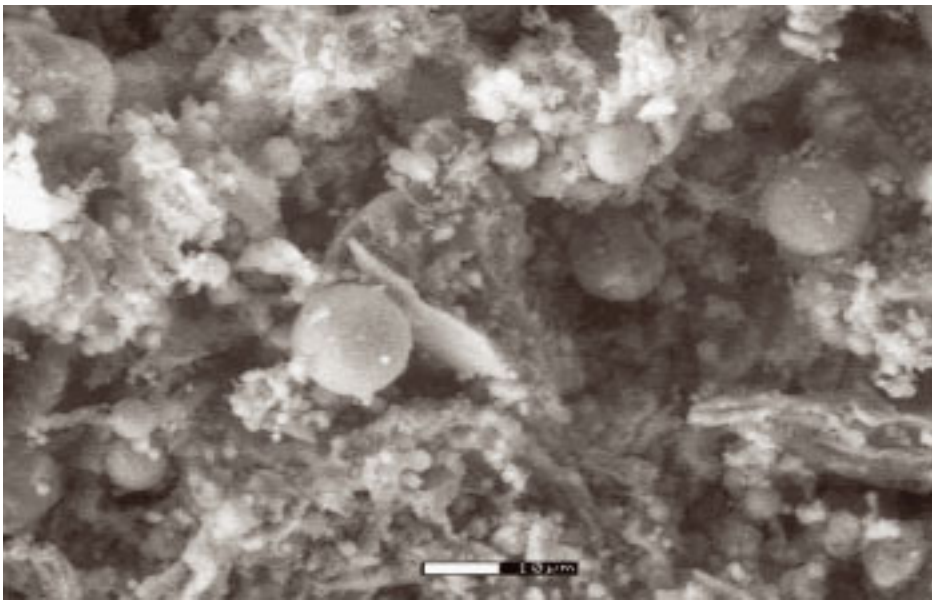
Puutuhkien betonin kannalta tärkeimmät pitoisuudet ja kivihiilituhkan raja-arvot kyseisille pitoisuuksille standardista SFS-EN 450-1. Tulokset, jotka eivät täytä standardin vaatimuksia, on tummennettu.



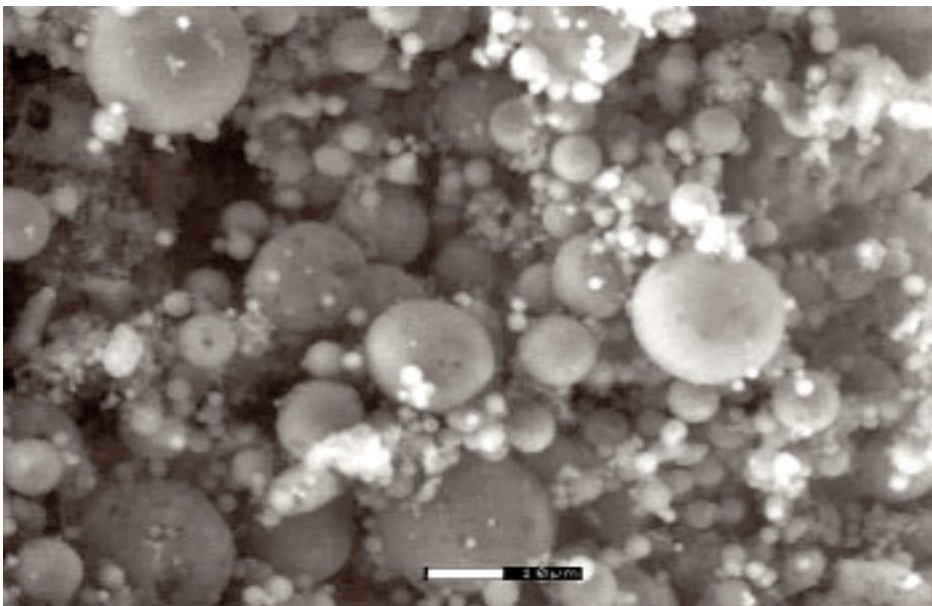
2

2

Puutuhkien, yleisestimentin ja kivihiilituhkan rakeisuuskäyrät. Pääte .\$av tuhkien nimissä on tietokoneohjelman merkintä eri näytteistä lasketulle keskiarvokäyrälle.



3
Elektronimikroskooppikuva puutuhkasta 1000-kertaisena suurennoksena.



4
Elektronimikroskooppikuva kivihiilituhkasta 1000-kertaisena suurennoksena.

keiden osuus on vallitseva, kun taas puutuhkissa pyöreitä rakeita on hieman vähemmän ja seassa on myös kulmikkaita rakeita. Osittain muotonsa ansiosta kivihiilituhkalla on puutuhkaa paremmat notkeusominaisuudet betonissa ja pienempi vedentarve. Rakeisuusominaisuudet voivat vaihdella eri tuotantolaitosten puutuhkissa.

Betoniin käytetyn lentotuhkan kiintotiheydellä on merkitystä lähinnä betonin suhteituksessa. Pyknometri menetelmällä määritetyt puutuhkien kiintotiheydet olivat 2,61-3,00 g/cm³ ja kivihiilituhkien (B- ja C-luokka) 2,14-2,22 g/cm³. Suhteituksessa onkin syytä käyttää kullekin puutuhkalle erikseen määritettyä kiintotiheyttä kivihiilituhkalle yleisesti käytetyn 2,2 g/cm³ asemesta.

Tehdastuotannossa puutuhkan käsittelystä havaittiin, että kuljetuksen ja siilon pumppaamisen jälkeen puutuhka on melko kevyttä ja laskeutuminen siilossa kestää 1-2 vuorokautta. Mikäli tuhkaa ei useisiin päiviin käytetä, se ei valu ulos siilosta ilman tärytystä. Yleisesti puutuhkaa on käsiteltävä kuten sementtiä ja sen on oltava aina käsiteltävissä ehdottoman kuivaa. Puutuhkien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

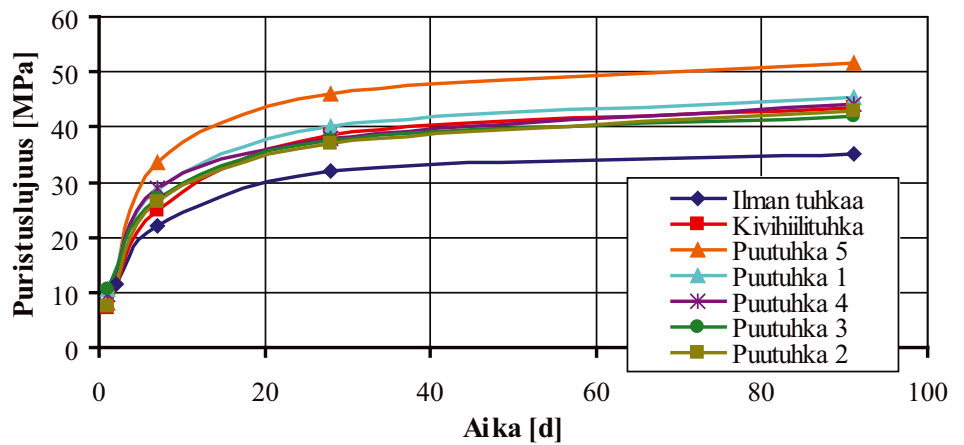
PUUTUHKA SISÄLTÄVÄN BETONIMASSAN OMINAISUUKSIA

Puutuhkaa sisältävien betonien ominaisuuksia verrattiin vastaaviin vertailubetoneihin, jotka olivat kivihiilituhkaa sisältävä ja tuhkaton betoni. Sementtinä kaikissa käytettiin Yleissementtiä CEM II A 42,5 N. Tuhkaa sisältävissä betoneissa puu- tai kivihiilituhkalla korvattiin osa filleristä ja sitä lisättiin 25 % sementin määrästä (59-66 kg/m³). Vesimenttisuhde oli kaikissa koebetoneissa 0,7 ja vesimäärä säädettiin sellaiseksi, että kukin betoni oli Betoninormien 2004 mukaisessa notkeusluokassa S2 (painuma 50-90 mm). Tavoitelujuusluokka oli K25. Laboratoriokokeiden lisäksi puutuhkien toimivuutta betonissa selvitettiin *HB-Betoniteollisuuden* normaalissa tehdastuotannossa erilaisilla betonituotteilla. Puutuhkaa käytettäessä betoneista vähennettiin sementtiä ja hienoa kiviainesta tai normaalisti käytetty kivihiilituhka korvattiin puutuhkalla.

Betonin valmistuksessa puutuhkien erityispiirteenä on niiden kivihiilituhkaa suurempi vedentarve, joka havaittiin sekä laboratorio- että tehdaskokeissa. Mitä enemmän puutuhkaa käytetään sitä suurempi on betonimassan vedentarve. Kivihiilituhka yleensä vähentää betonin vedentaruutta. Beto-

Taulukko 2.
Puutuhkien, kivihiilituhkan ja käytetyn yleissementin ominaisuuksia.

	Kiintotiheys [kg/dm ³]	Irtotiheys [kg/dm ³]	Aktiivisuus- indeksi 28 d	Laastin paisuma 14 d [μm]	Sem.pastan sitoutumis- ajan alku [min]
Varkaus	2,79	0,69 - 0,72	0,86	67	
Jämsänkoski	2,61	0,85 - 0,87	0,61	13	
Imatra	3,00	0,95 - 0,97	0,84	64	210
Summa	2,77	0,75 - 0,78	0,75	60	
Kirkniemi	2,62	0,68 - 0,72	0,83	30	225
Kivihiilituhka			0,96	54	
B-luokka	2,22				240
C-luokka	2,14				
Sementti			1	84	200



5 Tavanomaisesti jälkihoidettujen betonien puristuslujuustulokset.

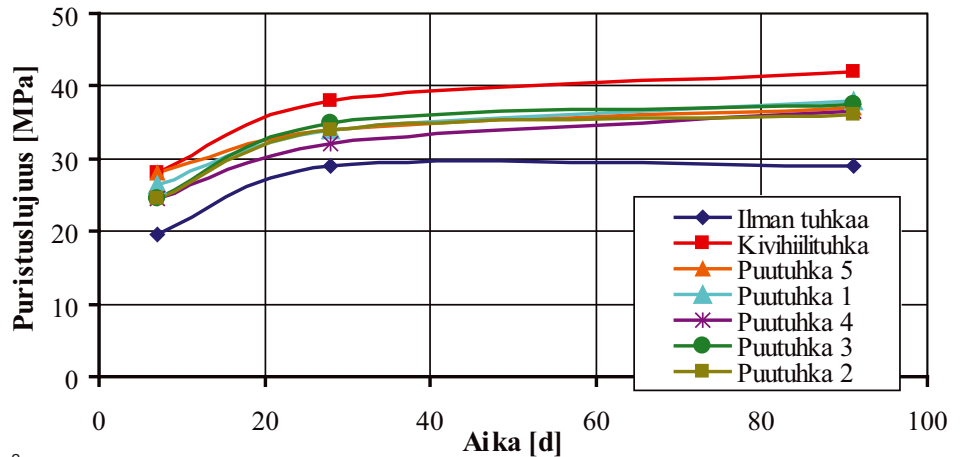
nikokeissa vertailubetoneita vastaavan notkeuden saavuttamiseksi puutuhkabetonit vaativat enemmän vettä noin $10 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ tuhkatomaan betoniin ja $20 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ kivihiilituhkabetoniin verrattuna. Vastaava vedentarpeen kasvu havaittiin selvästi myös koelaasteissa ja sementtipastoissa. Esimerkiksi aktiivisuusindeksikokeen koekappaleiden valmistuksessa standardivesimäärällä puutuhkalaasteista tuli kuivempia ja siten huomattavasti tiivistettävämpiä kuin kivihiilituhka- ja vertailulaasteista.

Tehdastuotannossa vedentarpeen muutos aiheutti valmistusteknisiä hankaluuksia korkeita ja kaapeita muuttotyyppejä käytettäessä, jolloin puutuhkan tarvitsema suurempi vesimäärä vaikeutti muottien täyttämistä betonin paakkuuntuessa ja toisaalta liian vähäinen vesimäärä heikensi hieman betonin lujuutta. Kyseisten muottien täytössä suhteituksen muutokset huomataan muutenkin herkästi. Muilla muuttotyypeillä vastaavia ongelmia ei ilmennyt.

Puutuhkien toimivuutta betonissa tarkasteltiin myös yleisimpien lisäaineiden kanssa. Lisäaineina käytettiin huokostinta (Ilma-Parmix) ja kahta erityyppistä notkistinta (lignosulfonaattipohjainen Perus-Parmix sekä polykarboksylaattipohjainen VB-Parmix). Huokostetuissa betoneissa oli tavoitteena 5-7 %:n ilmamäärä. Notkistetuissa betoneissa tavoitteena oli saavuttaa notkeusluokka S2 vähentämällä vettä ja korvaamalla menetetty notkeus notkistimella.

Valmistajan suositus huokostimen annostukseksi on 0,01-0,08 % sementin painosta. Tavoiteilmamäärän saavuttamiseksi vertailubetoniin riitti 0,01 %:n annostus sementin painosta, mutta kivihiilituhka- ja puutuhkabetoniin tarvittiin 0,12 % eli yli kymmenkertainen määrä vertailubetoniin ja huokostimen annostuksen ohjearvoihin verrattuna. Usein lentotuhkan käyttöä vältetäänkin pakkasenkestävän betonin valmistuksessa. Annostelutarpeeseen vaikuttaa erityisesti tuhkan jäännöshiilen määrä, mikä voi puutuhkalla vaihdella tuhkaerästä riippuen, jolloin tarvittava huokostinmääräkin muuttuu. Riskinä on lisäaineella tavoitellun ominaisuuden saavuttamatta jääminen tai betonin lujuusominaisuuksien heikkeneminen. Tämä annostustarpeen vaihtelu voi hankaloittaa betonin jatkuvaa tuotantoa. Puutuhkan käyttö yhdessä huokostimen kanssa ei siis liene suositeltavaa ja näin myös puutuhkan käyttöön pakkasenkestävässä betonissa on suhtauduttava erityisellä varovaisuudella.

Puutuhkat vaikuttivat hieman myös notkistimien annostelutarpeeseen. Notkistimen ja puutuhkan



6 Lämpökäsiteltyjen (+50 °C) betonien puristuslujuustulokset.

yhtäaikaisessa käytössä on varauduttava siihen, että vettä ei voi vähentää aivan yhtä paljon kuin kivihiilituhkabetonista ja vastaavasti notkistinta on lisättävä enemmän. Tavoitteenotkeuden saavuttamiseksi tutkimuksen puutuhkabetoneista vähennettiin vettä 10-12,5 % ja kivihiilituhka- ja tuhkatomaan betonista 15 % lähtösuhteituksesta samalla notkistinannostuksella.

Tehdaskokeissa puutuhkan ja notkistimen yhtäaikaisesta käytöstä saatiin hyvin hyvä kokemus, kun puutuhka mahdollisesti kuivapuristemassoihin tarkoitettuna notkistimen käytön 2-puolilaatan valmistuksessa. Normaalisti pelkkää filleriä käytettäessä kyseinen lisäaine pilaa laatan muottia vasten olevan pinnan, mutta puutuhkan kanssa lisäaine toimi hyvin ja pinnasta tuli siisti. Betonimassan sekoitus sujui puutuhkan kanssa yhtä hyvin kuin normaalibetonilla. Kyseisen tuotteen valmistuksesta kivihiilituhkaa käyttäen ei ole kokemuksia.

PUUTUHKABETONIN LUJUUDEN KEHITYMINEN

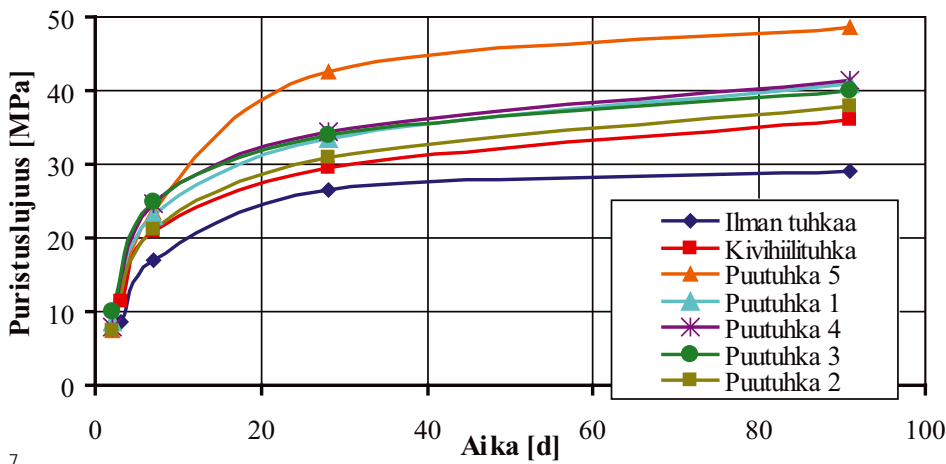
Filleriominaisuuksien lisäksi puutuhkalla on betonissa selvästi myös potsolaanisia ominaisuuksia. Betonin kannalta juuri poltettavan materiaalin joukossa olevat erilaatuiset lietteet voivat tehdä tuhkaasta kemiallisilta ominaisuuksiltaan paremman puhtaana puun poltossa syntyneeseen tuhkaan verrattuna, sillä lietteiden ansiosta tuhka on sen sideaineominaisuuksia parantavia mineraaleja ja alkuaineita.

Puutuhkaa sisältävien ja vertailubetonien puristuslujuuksia testattiin useissa eri olosuhteissa 1, 7, 28 ja 91 vuorokauden iässä, ja tulokset puutuhkabe-

tonille olivat erittäin hyviä. Puristuslujuuskokeet tehtiin tavanomaisesti kosteussäilytyksessä jälkihoidetuille koekuutioille, +50 °C:n vesihöyryssä lämpökäsitellyille sekä talvibetonointiolosuhteita jäljittelevässä lämpötilassa +10 °C säilytetyille koekuutioille. Lisäksi puristuslujuus testattiin kuumabetonista ja lisäainetta sisältäneistä betoneista.

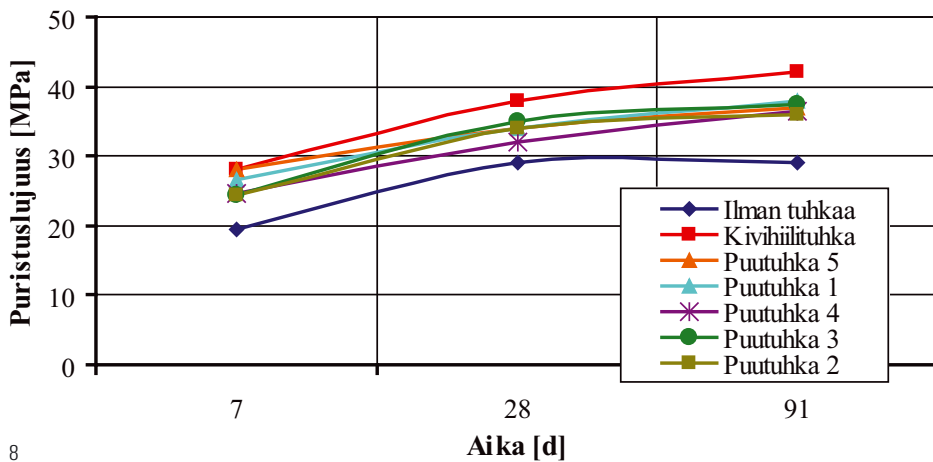
Puutuhkaa käytettäessä betonin lujuus kehittyi vastaavalla tavalla kuin kivihiilituhkaa käytettäessä, ja loppulujuus oli samaa luokkaa tai parempi kuin kivihiilituhkabetonilla tai tuhkatomaan tavanomaisella betonilla. Lämpökäsittely, +10 °C:n säilytyslämpötila ja betonin kuumennus alensivat yleisesti kaikkien betonien puristuslujuuksia noin 80-90 %:iin tavanomaisesti jälkihoidettujen betonien lujuuksista 28 vuorokauden iässä. Lujuudenkehitystä hidastavissa olosuhteissa (viileä lämpötila ja toinen notkistin) puutuhkabetonit kovettuivat hieman nopeammin kuin tuhkaton ja kivihiilituhkabetoni. Puristuslujuustuloksia on esitetty kuvissa 5-8.

Puutuhkien aktiivisuudet määritettiin standardien SFS-EN 450-1 ja EN 196-1 mukaan laastikoekappaleilla. Aktiivisuusindeksit olivat puutuhkilla 0,61-0,86, kun sementin aktiivisuusindeksi on 1. Kivihiilituhkan aktiivisuusindeksiksi saatiin 0,96. Kivihiilituhkalle vaatimus on vähintään 75 %, joka siis alitui yhdellä puutuhkalla (61 %), mutta muilla tulokset olivat hyviä. Puutuhkilla voidaanakin päätellä olevan potsolaanisia ominaisuuksia, vaikka kemiallisessa analyysissä puutuhkat alitivatkin kivihiilituhkan alarajan (70 %) reaktiivisten yhdisteiden SiO_2 , Fe_2O_3 ja Al_2O_3 yhteispitoisuudelle. Puutuhkilla pitoisuus oli 38-69 %. Lujuuden kehittymisen osalta puutuhka vaikuttaa kuitenkin soveltuvan hyvin betonin seos-



7

Lämpötilassa +10 °C säilytettyjen betonien puristuslujuustulokset.



8

Kuumabetonien (+30 °C) puristuslujuustulokset.

aineeksi ja toimivan osittain sideaineena ja osittain fillerinä. Puutuhkaa sisältäneiden betonipalkkien taivutusvetolujuus 7 ja 28 vuorokauden iässä ei poikennut vertailubetonien vastaavista lujuuksista.

Tehdaskokeissa puristuslujuuden kasvu todettiin erityisesti vallikivillä, pihakivillä ja eristeharikoilla. Lujuus kehittyi hyvin ja loppulujuudet olivat joko vastaavia tai parempia kuin normaaliuotannossa ilman puutuhkaa. Joillain tuotteilla erityisen hyvät alkulujuudet saattoivat tosin osittain johtua kloridien vaikutuksesta. Hajonta lujuuksissa ja tiheydessä oli esimerkiksi eristeharkkojen tapauksessa normaalia suurempi, mihin saattoivat vaikuttaa muotin täyttöongelmat kuivahkolla massalla. Kuukauden iässä lujuustulosten hajonta oli kuitenkin tasaantunut ja puristuslujuus oli noin 20 % normaalia parempi. Parhaiten tehdastuotteista onnistui mosaiikkibetonilaatta, jonka normaaliuotannuksesta voitiin puutuhkaa käytettäessä vähentää eniten sementtiä ja kalkkifilleriä mekaanisten ominaisuuksien kärsimättä.

SÄILYVYYSOMINAISUUDET JA MUITA KOVETTUNEEN PUUTUHKABETONIN OMINAISUUKSIA

Puutuhkan vaikutusta betonin säilyvyysominaisuuksiin ja pakkasenkestävyyteen testattiin laattakokeella standardin prCEN/TS 12390-9:2005 (E) mukaan huokostamattomille ja huokostetuille betoneille. Huokostamattomilla betoneilla pakkasenkestävyyskoetta ei kuitenkaan saatu suoritettua loppuun asti koekappaleen ja sitä ympäröivän eristeen välisen sauman halkeilun vuoksi. Tavoitesyklimäärä on kokeessa 56, mutta sauman vuotamisen

seurauksena koe keskeytyi yhdellä puutuhkabetonilla 42 ja muilla 28 syklin jälkeen. Merkittävää pinnan rapautumista ei betoneilla ennen keskeytymistä tapahtunut, mutta ongelman syy ja näin ollen myös tulokset jäivät tulkinnanvaraisiksi. On mahdollista, että ongelma liittyi rikkiyhdisteiden aiheuttamaan paisumiseen ja betonin sisäiseen rikkoutumiseen. Lisätutkimusta tarvitaan erityisesti, jos puutuhkaa halutaan käyttää huokostamattomissa betoneissa kosteusvaihteluille altistuviin tai pakkasenkestäviin betonirakenteisiin.

Huokostetuilla koebetoneilla pakkasenkestävyyskoe onnistui 56 sykliin asti, ja tulokset olivat positiivisia. Pinnan rapautumisen vaatimus 200 vuoden suunnittelukäyttöiässä täyttyi, ja sisäistä vaurioitumista kuvaava suhteellisen dynaamisen kimmokertoimen vaatimus täyttyi sekä 100 (XF1 ja XF3) että 200 (XF1) vuoden suunnittelukäyttöiässä. Huokostimen käyttöön puutuhkan kanssa on kuitenkin suhtauduttava varauksella huokostimen anostelutarpeen huomattavan kasvun takia.

Tehdastuotannossa valmistettujen puutuhkaa sisältäneiden kevytsoraharkkojen pakkasenkestävyyskoikeissa VTT:llä (VTT-S-01221-08) ja TKK:lla harkkojen puristuslujuus ei 50 jäädytys-sulatussyklin aikana heikentynyt alle sallitun, mutta taivutusvetolujuus heikkeni selvästi. Puutuhkan käyttö pakkasenkestävässä betonissa voi siis olla ongelmallista.

Raudoitteiden säilyvyyteen vaikuttava betonin karbonatisoitumisnopeus määritettiin vuoden ikäisten betonipalkkien karbonatisoitumissyvyytenä fenolftaleiiniuoksen avulla. Karbonatisoituneen kerroksen syvyys oli kaikilla betoneilla 6-7 mm. Puut-

uhkan lisäys betoniin ei siis vaikuttanut karbonatisoitumisnopeuteen ainakaan vuoden tarkastelujaksolla. Tehdaskokeiden yhteydessä tarkkailtiin myös kalkki- tai kalkkialikalihärmeen muodostumista, jossa ei ollut eroa puutuhkatuotteiden ja vastaavien kivihiilituhkatuotteiden välillä. Tehdaskokeissa havaittiin lisäksi, että puutuhkaa käytettäessä veden imeytyminen kovettuneeseen betoniin voi lisääntyä, mikä on otettava huomioon ulkokäyttöön tulevia tuotteita valmistettaessa. Veden imeytyminen voi vaikuttaa myös tuotteen värisävyyteen.

Osa puutuhkista on väriltään ruskehtavia, joten ne voivat vaikuttaa vaaleiden betonien värisävyyteen jo melko pienillä pitoisuuksilla. Tämä voi olla esteettinen haitta näkyvissä betonituotteissa. Tummissa tai pinnoitettavissa tuotteissa puutuhkan aiheuttamalla sävyllä ei ole vaikutusta tuotteen käytettävyyteen. On kuitenkin huomattava, että värisävyn muutos ei ole välttämättä tuotantoa hankaloitava tekijä, vaan betonitehtaan kokemusten perusteella puutuhkaa voitaisiin myös tarkoituksella käyttää tuotteiden säilyttämiseen.

LAADUNVALVONTA JA YHTEENVETO

Puutuhkan ominaisuudet riippuvat paljon poltettavasta materiaalista, joka vaihtelee tuotantolaitoksissa erityisesti vuodenaikasta riippuen. Poltettavan materiaalin joukossa voi olla erilaisia määriä puuta, kuorta, turvetta ja kuitu- ja jättevesilietettä. Puutuhkien hyödyntämistä betoniteollisuudessa vaikeuttaaakin juuri polttoainekoostumuksen vaihtelu vuoden aikana tuotantolaitoksesta riippuen. Puutuhkan tuottajien olisi menetelmiä kehittämällä pyrittävä mahdollisimman tasalaatuiseen tuhkaan ympäri vuoden, jotta tuhkan käyttö olisi potentiaalisille jatkokäyttäjille betoniteollisuudessa mielekästä. Tehokkaamman hyötykäytön yhtenä edellytyksenä onkin tuotantolaitosten oma motivaatio puutuhkien laadun parantamiseen esimerkiksi uusien jätekustannusten, tuhkille asetettujen raja-arvojen alentamisen sekä yritysten ympäristöstävällisyyden merkityksen kannustamana.

Puutuhkan koostumus on betonin kannalta edullinen muun muassa tuhkan sisältämien mineraalien ja alkuaineiden aiheuttamien hyvien sideaineominaisuuksien takia. Puutuhka voikin parantaa betonin puristuslujuutta merkittävästi. Sen kemialliset ominaisuudet voivat kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi betonin työstettävyyteen tai säilyvyyteen. Puutuhkan ominaisuuksista erityisesti kloridipitoisuus, rikkiyhdisteiden määrä, hehkutushäviö ja vedentarve on todennäköisesti syytä ottaa

erikseen huomioon arvioitaessa puutuhkan vaikutuksia betonin ominaisuuksiin.

Betonin suhteutuksessa on merkitystä puutuhkan kivihiilituhkaa suuremmalla kiintotiheydellä ja rakeiden rakeiden osuudella. Työstettävyyttä heikentää hieman puutuhkan raemuoto, joka on epäsäännöllisempi ja kulmikkaampi kuin pyöreäreakeisella kivihiilituhkalla. Työstettävyyteen vaikuttaa ratkaisevasti betonin tarvitsema veden määrä, jota puutuhkan käyttö lisää. Käytettäessä riittävää vesimäärää puutuhkaa sisältävän betonin valmistuksessa ja käsittelyssä ei ole ongelmia.

Tehdastuotannossa kokemukset puutuhkan käytöstä olivat positiivisia. Oleellimmat havainnot puutuhkaa sisältävistä betoneista kivihiilituhka-betoneihin tai tavanomaiseen betoniin verrattuna olivat:

- suurempi vedentarve betonia valmistettaessa
- suurempi veden imeytyminen valmiissa betonituotteessa
- hyvä puristuslujuus
- heikompi pakkasenkestävyys
- betonin värisävyn muutos

Tutkimuksen perusteella puutuhka soveltuu hyvin betonin seosaineeksi ja sitä voidaan käyttää kivihiilituhkan tavoin, kunhan sen erityispiirteet, kuten kemialliset ominaisuudet otetaan huomioon. Ilman tarkempia jatkotutkimuksia sitä ei voi ottaa kaikenlaisten betonituotteiden seosaineeksi. Lisätutkimustarve kohdistunee lähinnä puutuhkan rikkiyhdisteiden aiheuttamiin reaktioihin betonissa sekä huokostamattomiin pakkasenkestäviin betoneihin. Aluksi puutuhkaa käytettäneenkin lähinnä rakennustuotteissa, jotka eivät altistu kosteuden vaihteluille tai pakkasrasitukselle. Puutuhkan potentiaalisia käyttökohteita voivat olla esimerkiksi kevytsoraharkot, mosaiikkibetonilaatat, kuivien tilojen elementit ja valmisbetoni. Puutuhkan vaikutus betonin värisävyn on otettava huomioon käytettäessä tuhkaa näkyviin vaaleisiin betonituotteisiin. Toisaalta sen käyttöä betonin tarkoitukselliseen värjäämiseen voidaan kehittää.

Puutuhkan käyttö betonissa on siis mahdollista vasta, kun haitallisten aineiden pitoisuudet hallitaan ja virallinen laadunvalvontamenettely on määritetty. Kivihiilituhkastandardin vaatimuksia ei voi käyttää suoraan puutuhkan laadunvalvontaan jos senkään vuoksi, että standardi rajaa poltettavaksi materiaaliksi lähinnä vain kivihiilen. Puutuhka ei myöskään täytä kaikkia standardin vaatimuksia. Ki-

vihilituhkalta laadunvalvonnassa vaadittavat oleellimmat asiat ovat kloridipitoisuus, hehkutuslämpö ja aktiivisuus. Puutuhkan käyttö betoniteollisuudessa onnistunee vastaavanlaisella laadunvalvonnalla kuin kivihiilituhkalla, kunhan sille sopivat testausmenettely ja käyttökohteet määritetään. Potentiaali hyötykäytölle betoniteollisuudessa voi olla suuri, jos puutuhkan käyttö mahdollistuu kivihiiliperäisen lentotuhkan käyttöä vastaavaksi.

Puutuhkan käytöstä betonin valmistuksessa saadaan merkittävää hyötyä. Metsäteollisuudelta hyötykäyttö vähentää jätekustannuksia ja betoniteollisuudelle säästöjä syntyy kalliimpia materiaaleja, kuten sementtiä korvattaessa. Lisäksi metsä- ja betoniteollisuuden yhteistyön etuna ovat lyhyet kuljetusmatkat, jos yhteistyötä luodaan maantieteellisesti mahdollisimman lähekkäin sijaitsevien metsäteollisuuden ja betoniteollisuuden tuotantolaitosten välille. Ympäristön kannalta on merkittävää, että puutuhkan hyötykäyttö vähentää kaatopaikkojen jätekuormaa ja betoniteollisuudessa sellaisten materiaalien käyttöä, jotka kuormittavat ympäristöä esimerkiksi valmistusprosessien korkeiden hiilidioksidipäästöjen takia.

KIRJALLISUUTTA

- Ketosalo, K. 2006. Metsäteollisuuden lentotuhkien laadun vaikutus hyötykäyttösovelluksiin. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kemian tekniikan osasto. 82+5 s.
- Kortelainen, H. 2003. Metsäteollisuuden tuhkien hyötykäyttöluokittelu. Diplomityö. Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. 104+10 s.
- Naik, T. ja Kraus, R. 2003b. New source of pozzolanic material. Concrete International. Vol. 25, No. 12, ACI, Dec. 2003. ss. 55-62.
- SFS-EN 450-1. 2005. Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, määritellyt ja vaatimustenmukaisuus. 28 s.
- SFS-EN 450-2. 2005. Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 2: Vaatimustenmukaisuuden arviointi. 21 s.
- Vornanen, C. ja Penttala, V. 2008. Puuperäisten lentotuhkien käyttö betonin seosaineena ja fillerinä. TKK Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitoksen julkaisuja B:4. Espoo 2008.
- VTT-S-01221-08. Kevytsorarunkoaineharkkojen pakkasenkestävyyden määrittäminen standardin SFS 4529 kohdan 5.4 mukaisin kokein. Testausseuloste 5.2.2008. 2 s.
- www.uwm.edu/Dept/CBU/abstracts/

WOOD-BASED FLY ASH POTENTIAL NEW CONCRETE ADDITIVE

Every year almost 300 000 tons of wood-based fly ash is produced in the forest industry when solid waste wood is burned. In Finland, nearly 70% of the energy generated by the power plants in the forest industry comes from the burning of wood material.

Fly ash as waste strains the environment and causes ever-increasing costs to the production plants. At present wood ash is used e.g. in earthworks and as a forest and field fertiliser, but it has never been utilised as an additive in concrete. However, the use of fly ash could play a financial and ecological role also in the concrete industry, particularly if it is used to replace part of the cement. Cement is the most expensive component in concrete and a reduction in the amount of cement would also result in the reduction of carbon dioxide emissions.

The properties of fly ash as an additive or filler in concrete were studied in the Laboratory of Building Materials at the University of Technology in 2006-2008. The studies were ordered by Finncao Oy, which coordinates the useful utilisation of by-products produced in the forest industry.

The studies showed that wood ash is excellently suited for use as an additive in concrete and can be used in the same way as coal ash, provided the special features of wood ash, such as its chemical properties are taken into account.

More detailed research is needed before wood ash can be used as a concrete additive in all kinds of applications. More studies will most of all be necessary with respect to the reactions that the sulphur compounds present in wood ash cause in concrete as well as to non-air-entrained frost-resistant concrete. It is probable that at first wood ash will primarily be used in building products, which are not exposed to humidity variations or to frost. Other potential applications of wood ash could include lightweight aggregate concrete blocks, terrazzo concrete tiles, precast elements for dry facilities and ready-mixed concrete. The effect of wood ash on the colour of the concrete must be considered if ash is used in concrete products of a light colour. On the other hand, the use of wood ash for dyeing purposes can be developed.