General

PROJEKTNR. 14006

# Förbättring av träaskors puzzolana aktivitet i ekologisk betong – del 1

## Sammanfattning

Ece Teker, Karin Habermehl-Cwirzen, Hans Hedlund

2023-08-17

# Sammanfattning

Majoriteten av använd betong är baserad på Portlandcement, som är ett utmärkt bindemedel men har ett högt $CO_2$-avtryck. Det finns flera metoder för att förbättra situationen t.ex. genom fullständig ersättning av cement genom alternativa bindemedel eller delvis ersättning med sekundära cementbaserade bindemedel (SCM). Det största problemet med SCM, särskilt på den svenska marknaden, är deras begränsade tillgänglighet (som är fallet för masugnsslaggen) eller en total brist (som för kolflygaska). Följaktligen letar den svenska industrin efter alternativ, och träaska (WA) kan vara ett. Trä är ett ekologiskt byggmaterial. Resterna från virkesproduktionen används som bränsle för att generera värme för torkningsprocesser. Detta genererar en betydande mängd träaska, som idag används för gödsling av skogen eller som underlag i vägar men en stor del hamnar fortfarande på avfallsdeponier.

Doktorandprojektet som initierades för två år sedan syftar till att studera metoder som skulle möjliggöra användning av träaska som en effektiv ersättning av Portlandcement vid produktion av ekobetong. I denna sammanfattning presenteras resultat som erhållits i den första delen av detta projekt. Hittills har det visats att förbehandling av träaska genom torkning, siktning och malning ledde till en mekanokemisk aktivering av askan som sedan framgångsrikt kunde användas för att ersätta 20% av masugnsslaggen (GGBFS) i alkaliaktiverade system. Uppföljningsstudien kommer att fokusera på den pozzolana aktiviteten hos behandlad träaska samt dess egenskaper vid frostexponering. Projektet är ett samarbete mellan LTU och Skanska.

Slutsatserna från första delen av projektet kan sammanfattas i följande:

- *Intensiv malning av träaskan ökar materialets reaktivitet och minskar effekten av variationer i askans kemiska sammansättning.*
- *Aktivatorernas kemiska sammansättning påverkar blandningens porositet och därigenom betongens egenskaper.*
- *Ökad andel träaska ökar porositeten för alla blandningar oavsett aktivator.*
- *Natriumsilikataktiverade cementpastan hade den mest homogena och tätaste mikrostrukturen, medan de natriumkarbonataktiverade var den mest porösa.*
- *Studiens resultat visar tydligt att bildningen av C-A-S-H är den huvudsakliga reaktionsprodukten för alla proverna.*

# Summary

The majority of used concrete is based on Portland cement, which despite being a very good binder, has a high $CO_2$ footprint. There are several approaches to improve that situation, e.g. full replacement of this cement with alternative binders or partial replacement with secondary cementitious binders (SCMs). The main problem with SCMs, especially on the Swedish market, is their limited availability (GGBFS) or a complete lack (coal fly ash). Consequently, the Swedish industry has been searching for feasible alternatives. The usage of wood ash (WA) from burning timber is one of them. Timber is an ecological building material, but during its production the generated wood dust and unusable wood-based debris are burned to generate heat for the drying processes of the timber. This generates a considerable amount of ash, which is currently used for fertilizing forest or as substrate for roads.

The PhD project that was initiated two years ago aims to study methods that would enable the usage of wood ash as an effective replacement of Portland cement in the production of eco concretes. The present summary present results obtained in the first part of this project. So far it has been observed that pre-treatment of wood ash consisting of drying, sieving, and grinding produced an active material that could be successfully used to replace 20% of blast furnace slag in alkali activated systems. The follow-up study will focus on pozzolanic activity of treated wood ash as well as its durability in frost exposure. The project is a cooperation between LTU and Skanska.

Conclusions from the first part of the project can be summarized as follows:

- *Intensive grinding of the wood ash increases the material's reactivity and reduces the effect of variations in the ash's chemical composition.*
- *The chemical composition of the activators affects the porosity of the mixture and thereby the properties of the concrete.*
- *Increased proportion of wood ash increases the porosity of all mixtures regardless of activator.*
- *Sodium silicate-activated cement pastes had the most homogeneous and densest micro-structure, while the sodium carbonate-activated ones were the most porous.*
- *The results of the study clearly show that the formation of C-A-S-H is the main reaction product for all the samples.*

# Innehåll

SAMMANFATTNING ..... 1

SUMMARY ..... 2

BAKGRUND ..... 4

SYFTE ..... 5

METODER ..... 6

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR ..... 7

SLUTSATSER ..... 9

LITTERATUR ..... 10

# Bakgrund

Betong baserad på Portlandcement är det mest använda byggmaterialet (Monteiro, Miller och Horvath 2017; Teixeira, Camões och Branco 2019; Thomas et al. 2021). Produktionen av Portlandcement släpper dock ut stora mängder $CO_2$, vilket bidrar negativt till utsläppen av växthusgaser och orsakar miljöproblem. Portlandcement kan ersättas med industriella biprodukter som påverkar koldioxidutsläppet på ett positivt sätt.

Kombinationen av slagg och flygaska är det mest studerade binära systemet för ersättning at Portlandcement (Awoyera et al. 2020). Det största problemet relaterade till GGBFS och flygaska är deras begränsade utbud. Därför finns det ett behov av att söka alternativa källor. Ett exempel för ett alternativt material, som också är fokuset i denna doktorandstudie är träaska, (Sigvardsen et al. 2019; Lazik et al. 2020). Det är rester som produceras genom förbränning av trä och träprodukter. Träaskor består av oorganiskt och organiskt material som finns kvar efter förbränning. I genomsnitt ger vedeldning cirka 6-10 % aska (Siddique 2012). Sammansättningen av vedaskor varierar beroende på geografiskt läge, trädslag, delar av trädet, förbränningsteknik och temperatur, samt insamlingsmetoder och lagringsförhållanden (Etiégni och Campbell 1991; Ottosen et al. 2016; Berra, Mangialardi och Paolini 2015). Den innehåller vanligtvis höga mängder av CaO och $SiO_2$ (Vassilev et al. 2010). Variabiliteten i den kemiska sammansättningen av träaska har varit huvudproblemet som begränsat askornas användning i betong (Cheah och Ramli 2011; Sigvardsen, Geiker och Ottosen 2021; Carević et al. 2020; Berra, Mangialardi och Paolini 2015). Jämfört med Portlandcement har träaska större, oregelbundna och mer porösa partiklar med en större specifik yta. Tillsättandet av träaska minskar vanligtvis bearbetbarheten (Udoeyo et al. 2006; Carević, Pečur och Štirmer 2018; Ukrainczyk, Vrbos och Koenders 2016; Berra, Mangialardi och Paolini 2015) av cementbaserade material och leder till liknande mekaniska egenskaper av materialet jämfört med materialet utan träaska (Rajamma et al. 2009; Chowdhury, Maniar och Suganya 2015; Garcia och Sousa-Coutinho 2013). Portlandcementersättning med 10 – 20 viktprocent med träaska föreslogs som optimal (Elinwa och Ejeh 2004; Abdullahi 2006; Udoeyo et al. 2006; Rajamma et al. 2009).

Träaska som används i alkaliaktiverade system visade också fina resultat i vissa fall. Cheah et al. (Cheah, Part och Ramli 2015) lyckades att ersätta flygaska med en högre mängd av träaska (50, 60, 70 och 100 viktprocent) utan att använda någon alkaliaktivator. De uppnådde en maximal tryckhållfasthet av 18 MPa vid användning av 60 viktprocent träaska efter 90 dagars härdning. Träaska kan även användas som en delvis ersättning för flygaska, metakaolin och GGBFS. Owaid et al. (Owaid, Al-Rubaye och Al-Baghdadi 2021) föreslog att man skulle använda upp till 25 viktprocent träaska som en partiell ersättning för flygaska i geopolymerbetong för att förbättra dess kostnadseffektivitet och miljömässiga hållbarhet. Olika träaskaförhållanden jämfördes (25, 50, 75 och 100 vikt%) med användning av natriumsilikat och natriumhydroxid som aktivatorer. Härdning involverade 24 timmar vid 60°C följt av härdning vid rumstemperatur. Geopolymerbetongen med 25 viktprocent träaskaersättning uppvisade den högsta tryckhållfastheten (57,82 MPa efter 56 dagar), medan högre kvoter av träaska ledde till sämre mekaniska egenskaper, troligen på grund av den höga CaO-halten i träaskan.

Syftet med denna första del av doktorandprojektet var att studera effekter av förbehandling av träaska på dess reaktivitet i system baserade på GGBFS. Rapporten sammanfattar de viktigaste resultaten. Mer detaljerad information finns i Halvtidsrapport som publicerades vid LTU och finns tillgänglig via SBUF-länk och i de publicerade vetenskapliga artiklarna, (Teker Ercan et al. 2023) och (Ece Teker, Andrzej Cwirzen och Karin Habermehl-Cwirzen 2023 ).

## Syfte

Hela doktorandprojektet syftar till att studera och optimera effekterna av ytterligare förbehandlingar av WA på dess prestanda i ECO-betonger, när de används som SCM (ersättning för PC) och som bindemedel i alkaliaktiverade system (geopolymerer).

Målen (aktuellt läge):

1) Identifiera lämpliga träaskor baserat på deras kemiska sammansättning (delvis färdig)

2) Aktivering av i första hand kemiskt olämplig aska via kemiska eller mekanokemiska processer (delvis genomförd)

3) Utveckling av en enkel behandlingsmetod som möjliggör förbättring av de puzzolana egenskaper hos träaskor genom mekanokemisk aktivering i en kulkvarn (utvärdering av pozzolan reaktivitet pågår)

4) Undersökning av betong med Portlandcement som delvis ersatts av träaskamaterial (initierad men resultaten har inte publicerats ännu))

5) Undersökning av geopolymerbaserad betong där träaska är det enda bindemedlet (initierad men resultaten har inte publicerats ännu)

6) Bestämning av mekaniska egenskaper hos dessa betonger (pågående)

7) Mäta hydratation och hållfasthetsutveckling (pågående).

8) Bestämning av effekterna av olika asksammansättningar på härdnings-/geopolymerisationsprocessen (pågående)

9) Återanvändning av det ny utvecklade materialet (ska studeras i andra delen av projektet)

10) Bestämning av egenskaperna hos de återvunna/återanvända materialen (pågående)

11) Utveckling av en enkel behandlingsmetod som möjliggör förbättringen av puzzolana egenskaper hos träaska (pågående)

12) Säkerställning att pozzolan aktivitet hos behandlad träaska är jämförbar eller ökad i jämförelse med kolaska (pågående)

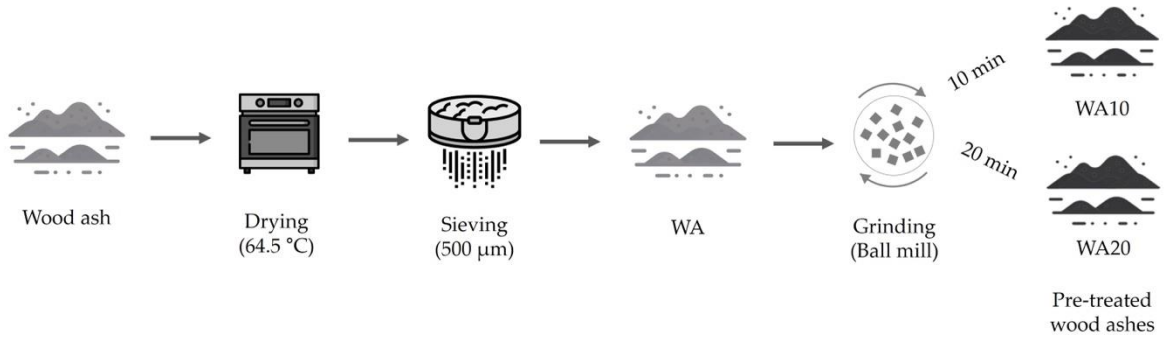
13) Minimering av den kända variationen av reaktiviteten hos träaska (pågående)

14) Skapa en databas och en riktlinje för entreprenörer för användning av bearbetad bioaskor (pågående)

15) Undersökning om de nya Eco-betong kan hjälpa till att immobilsera tunga grundämnen.

# Metoder

Studien inleddes med en omfattande litteraturöversikt som publicerades i en teknisk tidskrift med Open access, (Teker Ercan et al. 2023). Granskningen visade att träaska (WA) kan användas som ersättning för Portlandcement och vissa SCM. Egenskaperna hos producerad betong är beroende på källan till den använda träaskan. I försöksprogrammet ingick karakterisering av mottagen träaska före och efter genomförd behandling, vilket visas i figur 1. Behandlingen innefattade torkning i 65℃, siktning och högintensiv malning medels kulkvarn. Malningstiden sattes till 10 och 20 minuter baserat på tidigare forskning (Tole et al. 2020). I denna del av studien låg huvudvikten på att undersöka alkaliaktiverade system baserade på GGBFS aktiverade med natriumsilikat, natriumkarbonat och natriumhydroxid. GGBFS ersattes med WA med antingen 10 eller 20 viktprocent. Mängden alkaliaktivator var 10 viktprocent av den totala bindemedelsmängden. Detta val baserades på tidigare forskning (Humad, Provis och Cwirzen 2018) (Tole et al. 2020). De exakta sammansättning av de olika blandningarna finns i (Ece Teker, Andrzej Cwirzen och Karin Habermehl-Cwirzen 2023).




*Figur 1. Metod som används för att behandla träaskan.*

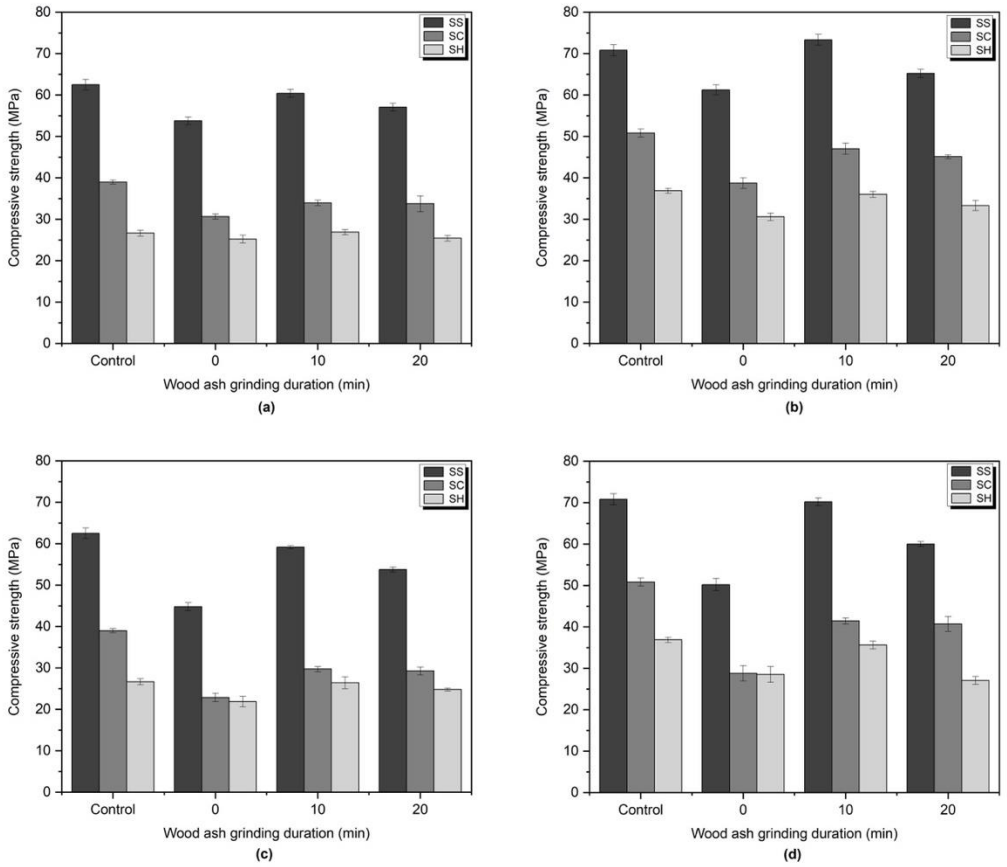
WA maldes med en kulkvarn i laboratoriestorlek, figur 2. Morfologin för WA före och efter malning bestämdes med ett svepelektronmikroskop, medan reaktionsvärmeutvecklingen mättes med TamAirs isotermiska kalorimeter, figur 2.

*Figur 2. Kulkvarn, svepelektronmikroskop och isotermisk kalorimeter som användes i forskningsprojektet.*

# Utförda undersökningar

Litteraturgenomgången visade att den kemiska sammansättningen av WA varierar och beror på råvarans ursprung, produktion och lagring. WA innehåller stora mängder CaO, $SiO_2$ och kol. Partiklarna är större, mer porösa och har oregelbundna former och större ytor jämfört med Portlandcement (PC). Hanterbarheten tenderar att försämras, härdningstiden brukar förlängas med en ökande mängd träaska. De mekaniska egenskaperna hos betong där WA delvis ersätter PC liknar en vanlig PC-baserad betong. Den optimala träaskanivån är 10–20 viktprocent för cementersättning. Vattenabsorptionen ökade vanligtvis med ökande träaskahalt; krympningen minskar vanligtvis. Med WA kan alkali-kiseldioxidreaktionen avta, WA har liten effekt på frosthållbarheten, men visar en ökad kloridpermeabilitet.

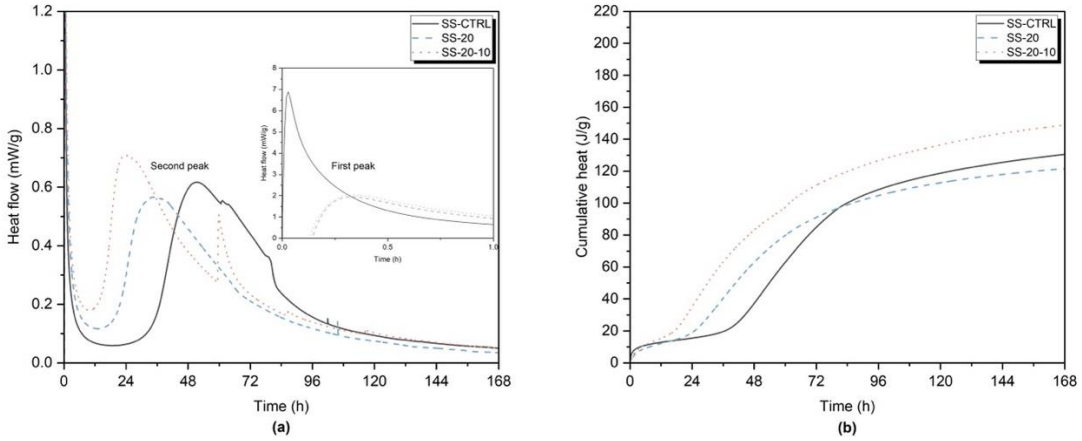
Den experimentella forskning som utförts i detta projekt har bekräftat en del resultat som finns i litteraturen. Utvalda resultat visas i följande avsnitt av i denna rapport. 7- och 28-dagars tryckhållfastheten visas i figur 3. Ersättning av GGBFS med 20 viktprocent av WA som maldes under 10 minuter gav blandningar med ungefär samma tryckhållfasthetsvärden som referensen. Denna trend var oberoende av den använda alkaliaktivatorn. Blandningar med obehandlat WA visade generellt lägre hållfasthet. Intressant nog resulterade en längre 20 minuters malningstid i lägre hållfasthetsvärden. Denna trend kan relateras till agglomeration som inträffar efter att den minsta partikelstorleken och den högsta aktiveringsgraden uppnåtts.



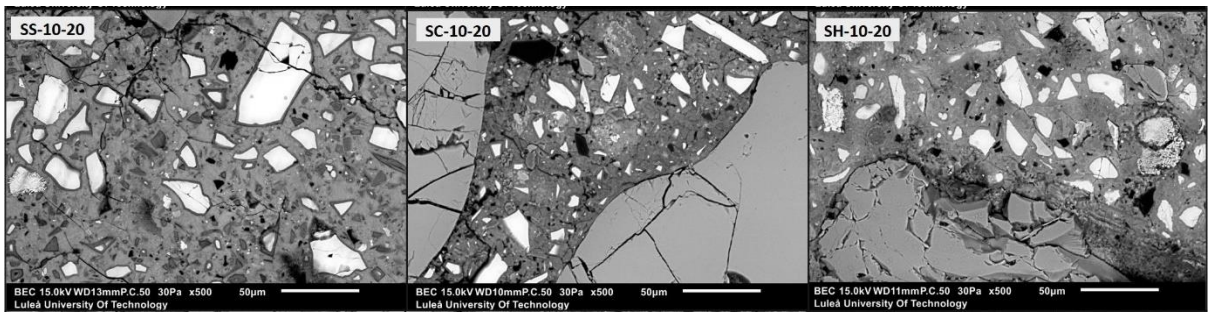

*Figur 3. Tryckhållfasthet för SS-, SC- och SH-aktiverade murbruk innehållande (a) 10 viktprocent träaska vid 7 dagar, (b) 10 viktprocent träaska vid 28 dagar, (c) 20 viktprocent*

*träaska vid 7 dagar, (d) 20 viktprocent träaska vid 28 dagar, (Ece Teker, Andrzej Cwirzen och Karin Habermehl-Cwirzen 2023).*

Värmeutvecklingen mätt medels isotermisk kalorimetri bekräftade trenderna som observerades vid bestämning av tryckhållfastheten, nämligen att 10 minuters malning förbättrar reaktiviteten hos WA. Den maximala värmeflödestoppen var högre och visade sig tidigare i jämförelse med blandningar utan WA och med icke mald WA, figur 4. Svepelektronmikroskopi, se exempelbilder i figur 5, visade något högre porositet hos bindemedelsmatrisen i blandningar innehållande WA. Dessa frågor kommer att undersökas ytterligare i den andra delen av studien på grund av dess betydelse för hållbarheten.

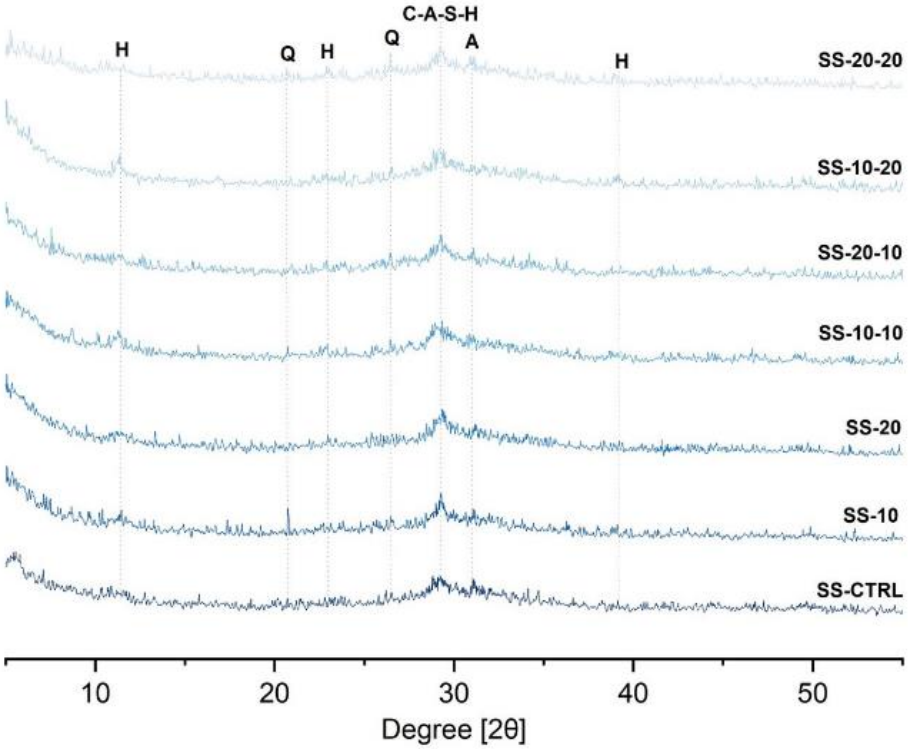



*Figur 4. Värmeflöde och ackumulerad värme av natriumsilikataktiverade pastor, SS-CTRL (100 viktprocent GGBFS-blandning aktiverad med natriumsilikat, SS-20 (natriumsilikataktiverad blandning innehållande 20 viktprocent oslipad WA) och SS- 20-20 (natriumsilikataktiverad blandning innehållande 20 viktprocent WA mald i 10 minuter) (Ece Teker, Andrzej Cwirzen och Karin Habermehl-Cwirzen 2023).*




*Figur 5. SEM-bilder av prover som innehåller 20 viktprocent WA som maldes i 10 minuter. Aktiverad med natriumsilikat (SS), natriumkarbonat (SC) och natriumhydroxid (SH), (Ece Teker, Andrzej Cwirzen och Karin Habermehl-Cwirzen 2023).*

XRD-analysen visade att huvudreaktionsfaserna var modifierade C-S-H (C-A-S-H) faser med inkludering av H - Hydrotalcit, G - Gaylussite, V - Vaterite, Q - Quartz, M - Mullite, A - Akermanite och P - Portlandite, figur 6.




Figur 6. Exempel på XRD-spektra erhållna för natriumsilikataktiverade blandningar, (Ece Teker, Andrzej Cwirzen och Karin Habermehl-Cwirzen 2023)

## Slutsatser

Litteraturgenomgången visade att det största problemet med WA är variationerna i askornas kemiska sammansättning och därmed oförutsägbara effekter på de mekaniska egenskaperna när WA används som PC-ersättning.

Den hittills genomförda experimentella studien nådde intressanta slutsatser som kan sammanfattas enligt följande.

**Huvudresultat från experimentella tester:**

• Intensiv kulkvarnsmalning av WA ökade dess reaktivitet och möjligen minskade effekten av variation i kemisk sammansättning på egenskaperna hos stelnade bindemedel.

• Den natriumsilikataktiverade cementpastan nådde de högsta tryckhållfastheterna och 10 viktprocent WA mald i 10 minuter hade en högre hållfasthet än referensblandningen för GGBFS.

• Ökat ersättning av träaska ökade porositeten för blandningar med alla testade alkaliaktivatorer.

• Natriumsilikataktiverade cementpastan hade den mest homogena och tätaste mikrostrukturen, medan de natriumkarbonataktiverade var den mest porösa.

• XRD-resultaten bekräftade att bildningen av C-A-S-H var den huvudsakliga reaktionsprodukten för alla proverna.

**Forskning/tester planerade för den andra delen av detta projekt:**

• Studier av pozzolan aktivitet i system baserade på Portlandcement.

• Studier av effekten av WA-ursprunget (2-3 olika leverantörer) på deras egenskaper och reaktivitet vid användning som pozzolan-SCM och som bindemedel i alkaliaktiverade system.

• Studier hur de nya materialen kan återvinnas och återanvändas.

# Litteratur


Abdullahi, M. 2006. “Characteristics of Wood ASH/OPC Concrete.” *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* , no. 8: 9–16.

Awoyera, P. O., A. Adesina, A. Sivakrishna, R. Gobinath, K. Rajesh Kumar, and A. Srinivas. 2020. “Alkali Activated Binders: Challenges and Opportunities.” In *Materials Today: Proceedings*, 27:40–43. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.199.

Berra, Mario, Teresa Mangialardi, and Antonio Evangelista Paolini. 2015. “Reuse of Woody Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials.” *Construction and Building Materials*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052.

Carević, Ivana, Ana Baričević, Nina Štirmer, and Jelena Šantek Bajto. 2020. “Correlation between Physical and Chemical Properties of Wood Biomass Ash and Cement Composites Performances.” *Construction and Building Materials* 256 (September). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119450.

Carević, Ivana, Ivana Banjad Pečur, and Nina Štirmer. 2018. “Durability Properties of Cement Composities with Wood Biomass Ash.” In *4th International Conference of Service Life Design for Infrastructures (SLD4), 27-30 August 2018, RILEM WEEK 2018 At: Delft, Netherlands*.

Cheah, Chee Ban, Wei Ken Part, and Mahyuddin Ramli. 2015. “The Hybridizations of Coal Fly Ash and Wood Ash for the Fabrication of Low Alkalinity Geopolymer Load Bearing Block Cured at Ambient Temperature.” *Construction and Building Materials* 88 (July): 41–55. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.020.

Cheah, Chee Ban, and Mahyuddin Ramli. 2011. “The Implementation of Wood Waste Ash as a Partial Cement Replacement Material in the Production of Structural Grade Concrete and Mortar: An Overview.” *Resources, Conservation and Recycling* 55 (7): 669–85. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002.

Chowdhury, S., A. Maniar, and O.M. Suganya. 2015. “Strength Development in Concrete with Wood Ash Blended Cement and Use of Soft Computing Models to Predict Strength Parameters.” *Journal of Advanced Research* 6 (6): 907–13. https://doi.org/10.1016/j.jare.2014.08.006.

Ece Teker, Andrzej Cwirzen, and Karin Habermehl-Cwirzen. 2023. “The Effects of Partial Replacement of Ground Granulated Blast Furnace Slag by Ground Wood Ash on Alkali-Activated Binder Systems.” *MDPI Materials*.

Elinwa, A. U., and S. P. Ejeh. 2004. “Effects of the Incorporation of Sawdust Waste Incineration Fly Ash in Cement Pastes and Mortars.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 3 (1): 1–7. https://doi.org/10.3130/JAABE.3.1.

Etiégni, L, and A G Campbell. 1991. “Physical and Chemical Characteristics of Wood Ash*.” *Bioresource Technology* 37: 173–78.

Garcia, Maria Da Luz, and Joana Sousa-Coutinho. 2013. “Strength and Durability of Cement with Forest Waste Bottom Ash.” *Construction and Building Materials* 41: 897–910. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081.

Humad, Abeer M., John L. Provis, and Andrzej Cwirzen. 2018. “Alkali Activation of a High MgO GGBS - Fresh and Hardened Properties.” *Magazine of Concrete Research*. https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00436.

Lazik, Piotr-Robert, Josipa Bošnjak, Ebru Cetin, and Aylin Kücük. 2020. “Application of Wood Ash as a Substitute For Fly Ash And Investigation of Concrete Properties.” *Otto-Graf-Journal* 19.

Monteiro, Paulo J.M., Sabbie A. Miller, and Arpad Horvath. 2017. “Towards Sustainable Concrete.” *Nature Materials*. https://doi.org/10.1038/nmat4930.

Ottosen, Lisbeth M., Esben Østergaard Hansen, Pernille E. Jensen, Gunvor M. Kirkelund, and Per Golterman. 2016. “Wood Ash Used as Partly Sand and/or Cement Replacement in Mortar.” *International Journal of Sustainable Development and Planning* 11 (5): 781–91.

https://doi.org/10.2495/SDP-V11-N5-781-791.
Owaid, Haider Mohammed, Muna M. Al-Rubaye, and Haider M. Al-Baghdadi. 2021. “Use of Waste Paper Ash or Wood Ash as Substitution to Fly Ash in Production of Geopolymer Concrete.” *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences* 30 (3): 464–76. https://doi.org/10.22630/PNIKS.2021.30.3.39.
Rajamma, Rejini, Richard J. Ball, Luís A.C. Tarelho, Geoff C. Allen, João A. Labrincha, and Victor M. Ferreira. 2009. “Characterisation and Use of Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials.” *Journal of Hazardous Materials* 172 (2–3): 1049–60. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109.
Siddique, Rafat. 2012. “Utilization of Wood Ash in Concrete Manufacturing.” *Resources, Conservation and Recycling* 67 (October): 27–33. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.07.004.
Sigvardsen, Nina M., Mette R. Geiker, and Lisbeth M. Ottosen. 2021. “Reaction Mechanisms of Wood Ash for Use as a Partial Cement Replacement.” *Construction and Building Materials* 286 (June). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122889.
Sigvardsen, Nina M., Gunvor M. Kirkelund, Pernille E. Jensen, Mette R. Geiker, and Lisbeth M. Ottosen. 2019. “Impact of Production Parameters on Physiochemical Characteristics of Wood Ash for Possible Utilisation in Cement-Based Materials.” *Resources, Conservation and Recycling* 145 (June): 230–40. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.034.
Teixeira, E.R., A. Camões, and F.G. Branco. 2019. “Valorisation of Wood Fly Ash on Concrete.” *Resources, Conservation and Recycling* 145 (June): 292–310. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028.
Teker Ercan, Ece Ezgi, Lale Andreas, Andrzej Cwirzen, and Karin Habermehl-Cwirzen. 2023. “Wood Ash as Sustainable Alternative Raw Material for the Production of Concrete—A Review.” *Materials* 16 (7): 2557. https://doi.org/10.3390/ma16072557.
Thomas, Blessen Skariah, Jian Yang, Kim Hung Mo, Jamal A. Abdalla, Rami A. Hawileh, and Erandi Ariyachandra. 2021. “Biomass Ashes from Agricultural Wastes as Supplementary Cementitious Materials or Aggregate Replacement in Cement/Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review.” *Journal of Building Engineering* 40 (August): 102332. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102332.
Tole, Ilda, Magdalena Rajczakowska, Abeer Humad, Ankit Kothari, and Andrzej Cwirzen. 2020. “Geopolymer Based on Mechanically Activated Air-Cooled Blast Furnace Slag.” *Materials* 13 (5). https://doi.org/10.3390/ma13051134.
Udoeyo, Felix F, Hilary Inyang, Young, T David, and Edmund E Oparadu. 2006. “Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete.” *Journal of Materials In Civil Engineering*. https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200618:4605.
Ukrainczyk, N., N. Vrbos, and E. A. B. Koenders. 2016. “Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials.” *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 30 (2): 137–48. https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231.
Vassilev, Stanislav V., David Baxter, Lars K. Andersen, and Christina G. Vassileva. 2010. “An Overview of the Chemical Composition of Biomass.” *Fuel* 89 (5): 913–33. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022.