

Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar

Skýrslunúmer: NMI 17-03

Verknúmer: 8HK14133

Rannsókn á notkun koltrefja í sementsbundnum efnum

Lokaskýrsla 2016

Sunna Ólafsdóttir Wallevik
Dr. Kristján Friðrik Alexandersson
Marion Coffigniez
Kristján Egill Karlsson
Aníta Hauksdóttir



Nýsköpunarmiðstöð Íslands

Maí 2017

Sunna Ólafsdóttir Walleik
Dr. Kristján Friðrik Alexandersson
Marion Coffigniez
Kristján Egill Karlsson
Aníta Hauksdóttir

Verkefnið var styrkt af rannsóknasjóði Vegagerðarinnar og Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.



Efnisyfirlit

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Inngangur..... | 1 |
| 2 | Fræðilegur bakgrunnur | 3 |
| 2.1 | Koltrefjar | 3 |
| 2.1.1 | Sameindaruppbygging koltrefja og mismunandi koltrefjategundir | 4 |
| 2.1.2 | Yfirborðsmeðhöndlunir koltrefja..... | 5 |
| 2.1.3 | Límvatnsmeðferð..... | 6 |
| 2.2 | Notkunarmöguleikar koltrefja í sementsbundnum efnunum | 8 |
| 2.3 | Ástandsgreining (skemmdaskynjun/sjálfskynjun) koltrefja | 9 |
| 2.4 | Notkun samfelldra koltrefja til styrktaraukningar og fyrir skemmdaskynjun sementsbundinna efna..... | 12 |
| 2.5 | Rafleiðni koltrefja..... | 13 |
| 2.5.1 | Koltrefja leiðnivírar í sementsbundnum efnunum og steinsteypu | 13 |
| 2.6 | Flokkun koltrefja | 14 |
| 2.6.1 | Fjaðurstuðull koltrefja | 14 |
| 2.6.2 | Lengdaraukning koltrefja | 15 |
| 3 | Aðferðafræði og mælitækni rannsóknarinnar..... | 16 |
| 3.1 | Blöndunarferli..... | 16 |
| 3.2 | Þrýsti- og beygjutogþolsmælingar..... | 16 |
| 3.3 | Frufefnagreining og greining á smásærri uppbyggingu þeirra koltrefja sem notaðar voru í rannsókninni | 18 |
| 3.4 | Hráefni..... | 19 |
| 4 | Niðurstöður..... | 20 |
| 4.1 | Þrýstiþolsprófanir | 20 |
| 4.1.1 | W/C = 0,55 | 20 |
| 4.1.2 | W/C = 0,6 | 21 |
| 4.2 | Beygjutogþolsprófanir | 23 |
| 4.2.1 | W/C = 0,55 | 23 |
| 4.2.2 | W/C = 0,6 | 25 |
| 4.3 | Mælingar á flæðieiginleikum..... | 27 |
| 4.4 | Eðlisþyngdarmælingar..... | 29 |
| 4.5 | Frufefnagreining og greining á smásærri uppbyggingu koltrefja rannsóknarinnar | 31 |
| 4.5.1 | SEM frufefnagreining..... | 31 |
| 4.5.2 | SEM myndir | 31 |
| 5 | Samantekt | 34 |
| 6 | Heimildir | 36 |



1 Inngangur

Síðastliðna áratugi hefur notkun koltrefja í erlendum steypuðnaði aukist til muna. Samtímis hafa fjölmargar rannsóknir verið gerðar á þeim eiginleikum sem sementsbundin efni að viðbættum koltrefjum hafa. Þar sem verð á koltrefjum fer lækkandi á heimsmarkaði, bendir allt til þess að notkun koltrefja muni halda áfram að aukast í byggingariðnaðinum á komandi árum [1-4].

Koltrefjar eru mjög þunnar trefjar sem eru samsettar úr kolefnisatómum bundnum saman í örsmáum kristöllum. Aðaleinkenni koltrefja er mjög hátt togþol, sérstaklega miðað við þyngd. Auk þess hafa trefjarnar aðra eftirsóknarverða eiginleika, eins og lágan eðlismassa, langtíma endingu, lágan varmaþenslustuðul, háan stífnistuðul og hátt tæringar-, raka- og þrýstiþol. Vegna þess hversu regluleg kristalgrindin er innan trefjanna, hafa þær einnig mjög háa varma- og rafleiðni [5-7]. Þessa samblöndu af eiginleikum er ekki að finna hjá neinum öðrum trefjategundum. Þessir eftirtektarverðu eiginleikar þýða að möguleiki er að nota koltrefjar á tvennskona hátt í steinsteypu og öðrum sementsbundnum efnum. Fyrsti möguleikinn er að nýta sér aflfræðilega eiginleika koltrefja til að styrkja steypu. Hinn möguleikinn er að notfæra sér rafeiginleika koltrefja til að hanna steypu sem getur gefið frá sér merki þegar sprungur eða annarskonar skaði myndast, eins og sýnt hefur verið fram á í erlendum rannsóknum [3-5, 8-24]. Þetta er mögulegt þar sem leiðni koltrefja minnkar þegar trefjarnar verða fyrir skaða, sem er einstakur eiginleiki koltrefja miðað við aðrar trefjar. Margt bendir til þess að notkun á koltrefjum í sementsbundnum efnum muni gegna lykilhlutverki í þróun á bæði hefðbundinni og hágæðasteinsteypu í framtíðinni (eins og sjálfútleggjandi- og hástyrkleikasteypu) [4], og því er þörf á rannsóknum á hvernig Íslendingar geta nýtt sér koltrefjar í framleiðslu á þessum efnum og hvaða möguleika slíkar trefjar hafa upp á að bjóða.

Nú þegar hefur verið gefin út rannsóknarskýrsla í þessu verkefni þar sem ritrýndra heimilda var aflað um notkun koltrefja í almennum sementsbundnum efnum (þ.e. hvort sem er fyrir notkun þeirra í sementsefju, múr og/eða steinsteypu) og voru upplýsingar um eðliseiginleika koltrefjastyrktra sementsbundinna efna, þá sérstaklega m.t.t. rafeiginleika og skemmdaskynjunarmælinga, teknar saman [133]. Í samantektinni var einnig farið yfir framleiðsluferli koltrefja, mismunandi koltrefjategundir og yfirborðsmeðferðir, ásamt því að farið var yfir hvernig hægt er að panta og kaupa koltrefjar [133]. Skýrsluna má sjá hér: [http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Notkun_koltrefja_sement/\\$file/Notkun_koltrefja_sement.pdf](http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Notkun_koltrefja_sement/$file/Notkun_koltrefja_sement.pdf)

Í þessari skýrslu verður tekin saman rannsókn á notkun koltrefja í hefðbundnum sementsbundnum efnum. Notast var við stuttar koltrefjar og voru áhrif þeirra skoðuð, þá sérstaklega hvað aflfræðilega eiginleika varðar. Í rannsókninni voru útbúnar fjölmargar staðlaðar múrblöndur sem innihéldu mismikið magn af stuttum óhúðuðum 3 mm koltrefjum (í 0-2% þyngdarmagni) og voru áhrif þeirra á brotstyrk, flæðieiginleika og eðlisþéttleika múrblendanna könnuð. Nánar tiltekið var allt að 2% viðbót af koltrefjum (miðað við sementþyngd) rannsökuð í múrblöndum með vatnssementshlutfallið; w/c = 0,55 og 0,6.



Uppbygging skýrslunnar er þannig að fyrst farið yfir efniseiginleika koltrefja, mismunandi koltrefjategundir, yfirborðsmeðhöndlunar og notkunarmöguleika stuttra og samfelldra koltrefja í sementsbundnum efnum. Einnig er farið yfir notkun stuttra og samfelldra koltrefja til styrktaraukningar sementsbundinna efna, rafleiðni koltrefja og skemmdaskynjunareiginleika þeirra. Því næst er farið yfir aðferðarfræði og mælitækni rannsóknarinnar, frumefnagreiningu og greiningu á smásærri uppbyggingu koltrefjanna sem notaðar voru í rannsókninni. Að lokum eru niðurstöður rannsóknarinnar kynntar og fjallað verður um næstu skref rannsóknarinnar.

Hluti af þeirri heimildarleit sem áður var framkvæmd er að finna í þessari skýrslu þar sem sú fræði sem þar kemur fram á við þegar verið er að túlka þær niðurstöður sem fengust í rannsókninni. Samantektin í okkar áður útgefnu skýrslu og í þessari skýrslu er að mestu byggð á heimilda- og þekkingarleit úr erlendum vísindaritum sem rituð eru á enska tungu. Í flestum tilfellum eru notuð flókin sérhæfð efna-, eðlis- og verkfræðileg orðasambönd til að lýsa viðfangsefninu sem erfitt er að þýða beint yfir á íslensku. Er það von skýrsluhöfunda að vel hafi tekist til við þá vinnu en þó er lesendum bent á að hafa þessa staðreynd í huga við lesturinn.

Verkefni þetta var framkvæmt eftir styrkveitingar frá rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar þar sem áætlunin var að kanna hvaða áhrif viðbót af stuttum koltrefjum hefði á staðlaðar múrblöndur (sem væri auveldlega hægt að yfirfæra yfir í staðlaðar steypublöndur). Eins og fram kom í fyrri heimildarkönnun verkefnisins [133], er erfitt fyrir hvern sem er að festa kaup á koltrefjum, þar sem þær eru m.a. notaðar í skotvopn og í hernaðarskyni. Þurfti því að notast við þær koltrefjar sem aðgengilegar voru í rannsókninni. Koltrefjarnar sem notast var við í þessari rannsókn voru stuttar óyfirborðsmeðhöndlaðar koltrefjar og væri því áhugavert að skoða annars konar koltrefjartegundir í framtíðarverkefnum og trefjar með mismunandi yfirborðsmeðhöndlunir. Áætlað var einnig að innan verkefnisins yrði hönnuð ástandsgreiningamæliaðferð fyrir sementsbundnar byggingareiningar. En vegna umfangs rannsóknarinnar og flókins uppsetningarbúnaðar í verkefninu, náðist ekki að fara jafn langt í verkefninu og vonast hafði verið með það fjármagn sem verkefnið hafði. Brösuglega gekk t.d. í fyrstu að koma viðnámsmælingarbúnaðinum upp og að hanna ástandsgreiningaraðferðina. Var um að ræða tímafrekt hönnunarferli sem enn er verið að fullhanna. Náðist því ekki að fullklára búnaðinn en eftir frekari þróunarvinnu verða þær niðurstöður kynntar, þegar framkvæmdar hafa verið rafleiðnimælingar á koltrefjastyrktum sementsbundnum efnum með sérhönnuðu ástandsgreiningamæliaðferðinni.

2 Fræðilegur bakgrunnur

2.1 Koltrefjar

Koltrefjar eru einstaklega mjóar trefjar (um 0,005–0,015 mm í þvermál) sem samanstanda af kolefnisatómum tengdum saman í örsmæðar kristöllum sem liggja venjulega samsíða öxul trefjanna. Þessi lega kristallanna gerir trefjarnar einstaklega sterkar miðað við stærð þeirra. Koltrefjar má spinna saman, mörg þúsundum í hvert skipti, til að mynda girni sem notað er svo á ýmiskonar hátt, t.d. með plast resín til að mynda hið vel þekkta koltrefjastyrkta plastefni (e. carbon fibre reinforced plastic (CFRP) material), sem hefur mjög háan styrk miðað við þyngd. Fyrir utan þann einstaka eiginleika trefjanna að vera virkilega sterkar miðað við mikinn léttleika, hafa trefjarnar marga aðra kosti, svo sem: lágan eðlismassa, góða umhverfissamhæfni, góða endingu, hátt togþol, lága varmaþenslu, háan stífleika og mjög gott efna-, þrýstings- og rakapól [5-7]. Koltrefjar eru skilgreindar sem trefjar sem innihalda a.m.k. 92% (miðað við þyngd) af kolefnisatómum á meðan að trefjar sem innihalda a.m.k. 99% (miðað við þyngd) kolefnisatóma eru venjulega kallaðar grafit trefjar [6].

Koltrefjar eru nú til dags gríðarlega mikið notaðar í samsettum efnum (e. composites) á formi: spunnins girnis, epoxívafninga (e. prepregs), samfelldra trefja og saxaðra/stuttra trefja o.fl. Samsettu efnin eru gjarnan framleidd með spuna, prófíldrætti (e. pultrusion), þrýstimótun, lofttæmisþjöppun (e. vacuum bagging), vökvamótun eða sprautuþjöppun (e. injection molding) [6, 7].

Undandarin ár hefur koltrefjaiðnaðurinn stækkað töluvert í heiminum til þess að mæta aukinni eftirspurn úr fjölmörgum áttum og ólíkra iðnaðargreina. Má þar helst nefna iðnaðar innan; flugtækni- og geimverkfræði, hernaðar og bifreiðaframleiðslu, og svo einnig vegna byggingar-, heilbrigðis- og íþróttaiðnaðarins [6, 7, 25].

Útreikninga fyrir áætlaða koltrefjanotkun í heiminum á árunum 1999-2010 eftir mismunandi iðngreinum, má sjá í töflu 1. Búist er við að stöðug aukning, á bæði framleiðslu, eftirspurn og notkun koltrefja, muni halda áfram að eiga sér stað á komandi árum og gera flestir af starfandi koltrefjaframleiðendum í heiminum í dag, ráð fyrir að stækka við sig á næstunni til að anna markaðseftirspurn [6, 7, 25, 26]. Áætlað hefur verið að heimsmarkaðseftirspurn aukist yfir 12% árlega, næstu árin [27, 28, 134].

Tafla 1: Koltrefjanotkun í heiminum á árunum 1999-2010, skipt eftir iðngreinum [6].

| | 1999 (tons) | 2004 (tons) | 2006 (tons) | 2008 (tons) | 2010 (tons) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Aerospace | 4,000 | 5,600 | 6,500 | 7,500 | 9,800 |
| Industrial | 8,100 | 11,400 | 12,800 | 15,600 | 17,500 |
| Sporting Goods | 4,500 | 4,900 | 5,900 | 6,700 | 6,900 |
| Total | 16,600 | 21,900 | 25,200 | 29,800 | 34,200 |

Eins og staðan er í dag eru pólýakrýlónítríl (PAN) koltrefjar ríkjandi á koltrefjamarkaðinum, en afgangurinn eru mismunandi tegundir af bik-trefjum (t.d. háflfljótandi (e. mesophase) og



jafnátta (e. isotropic) bikttrefjar) og örlítið af rayon unnum koltrefjum er einnig að finna á markaðinum. Mismunandi undanfara mynda mismunandi koltrefjar og ráðast efniseiginleikar koltrefjanna aðallega af hvaða forveri/undanfari (e. precursor) var notaður við framleiðslu þeirra [6, 7]. Jafnvel þó að framleiðsla á koltrefjum sé að einhverju leiti breytileg eftir því hvaða undanfari er notaður við koltrefjaframleiðsluna, er koltrefjaframleiðsluferlið í grundvallaratriðum alltaf eins og má lesa nánari lýsingu á framleiðsluferlinu í kafla 2.1.1 og í kafla 2.1.2. Í kafla 2.1.2 er einnig farið yfir sérstakar yfirborðsmeðhöndlanir koltrefja og mismunandi koltrefjahúðanir, og hvaða áhrif slíkar meðhöndlanir geta haft á efniseiginleika sementsbundinna efna.

2.1.1 Sameindaruppbygging koltrefja og mismunandi koltrefjategundir

Sameindauppbygging koltrefja er mjög háð því hvaða undanfari er notaður í hvert skipti í framleiðsluferlinu, en uppbygging koltrefja er ávallt að einhverju leiti lík uppbyggingu grafíts sem er eitt af mörgum fjölgervingum (e. allotropes) kolefnis. Kolefni er nefnilega frumefni sem býr yfir fjölgerviseiginleikum og eru demantar og grafít, líklega þekktustu fjölgervingar þess. Aðrir þekktir fjölgervingar kolefnis eru kolrör (e. carbon nanotubes), glerkennt kolefni, grafín, Lonsdaleite, myndlaust kolefni (e. amorphous carbon), Buckminsterfullerín (sem hefur sameindaformúluna C_{60}) og fullerín C_{70} og C_{540} (sem hafa sameindaformúlurnar C_{70} og C_{540}).

Grafít samanstendur af lögum af þrígirtum kolefnisatómum sem mynda sexhyrnt mynstur sem staflað hefur verið á samsíða og reglulegan hátt. Þessi lög tengjast svo saman af Van der Waals kröftum, sem leiðir af sér að grafítið hefur frekar mjúka og brothætta eiginleika. Það upphafshráefni sem notað er í framleiðsluferli koltrefja mun einkenna eiginleika þeirra og segja til um hvort koltrefjarnar fái grafíts- eða iðulagskiptaeiginleika (e. turbostratic characteristics). Í iðulagskiptum koltrefjum (e. turbostratic carbon fibres), er lega kolefnistengdu laganna ekki samfelld og lögin geta verið brotin saman, beygluð og/eða krumpuð. Koltrefjar sem búnar eru til úr pólýakrýlónítríl (PAN) undanfara hafa iðulagskipta eiginleika á meðan að koltrefjar leiddar úr hálfhljóttandi biki eru með grafítuppbyggingu eftir hitameðhöndlun við hitastig í kringum 2200°C . Lögun kolefnislaganna í iðulagskiptum koltrefjum leiðir til þess að slíkar koltrefjar hafa hátt togþol á meðan að grafítslaga koltrefjarnar hafa háan fjaðurstuðul (Young's stuðul) ásamt því að hafa háa varma- og rafleiðni, sem rekja má til reglulegrar lögunnar kolefnislaganna og mikils fjölda af óstaðbundnum rafeindum (e. delocalised electrons) innan hvers lags. Kolefnisatóm trefjanna tengjast innbyrðis á þrígirtan hátt í plani þannig að p-svigrúm atómanna eru hornrétt á planið og skarast innbyrðis og mynda þannig óstaðbundið π -rafeindakerfi, þar sem rafeindir geta ferðast um eftir kolefnislögunum. Vegna þessara reglulegu kristalgrindarlaga sem byggja upp trefjarnar og óstaðbundna π -rafeindakerfis, hafa koltrefjar þann eiginleika að þær geta leitt rafmagn [4-7].

Koltrefjar geta líka verið framleiddar með blandaðri kolefnislaguppbyggingu sem getur þá stuðlað að blöndu af viðkomandi eiginleikum (þ.e. blöndu af iðulagskiptum- og grafítseiginleikum koltrefjanna) [6, 7].

Til eru margar mismunandi framleiðsluaðferðir til að útbúa koltrefjar og þar af leiðandi eru

fjölmargar koltrefjategundir fáanlegar á markaðinum. Í aðalatriðum skiptast koltrefjategundir einkum í tvo flokka; þ.e. stuttar koltrefjar (e. short carbon fibres) og langar/samfelldar koltrefjar (e. continuous carbon fibres). Notkun stuttra koltrefja hefur verið viðfangsefni fjölmargra vísindatímaritsgreina síðastliðna tvo áratugi [1-5, 29-35]. Þegar farið er yfir rannsóknir varðandi notkun koltrefja í sementsbundnum efnunum (þ.e. íbót þeirra í hvort sem er almenna sementsefju, múr eða steinsteypu), er greinilegt að notkun stuttra koltrefja er þar meira áberandi, vegna þess hversu miklu auðveldara er að nota slíkar trefjar í sementsbundin efni og vegna þeirra ýmsu eiginleika sem slíkar trefjar geta látið í té (má þar helst nefna aflfræðilega og rafefnafræðilega eiginleika), þegar þær eru notaðar sem íaukar. Til að mynda eru stuttar jafnáttá bik-koltrefjar notaðar til að auka togþolsstyrk steinsteypu, jafnvel þó togþol, fjaðurstuðull og sveigjanleiki (e. ductility) trefjanna séu lág miðað við aðrar trefjar á borð við stál, plast og glertrefjar [1, 36]. Stuttar PAN-útleiddar koltrefjar eru einnig notar með svipuðum tilgangi, þó þær séu reyndar oft frekar notaðar sem langar samfelldar trefjar frekar en stuttar trefjar. Kolefnishúðaðar glertrefjar eru hagkvæmar vegna þess hversu ódýrar þær eru miðað við aðrar koltrefjar en þær eru samt sem áður ekki mikið notar [37]. C-laga koltrefjar eru mjög áhrifaríkar þar sem þær stuðla að meiri styrktaraukningu en hringlega hliðstæða þeirra, en stórt þvermál þeirra gerir þær hins vegar minna eftirsóknarverðar [1, 38]. Undir-mikrón koltrefjungar (e. submicron carbon filaments) [39, 40], kinrok (e. carbon blacks) [41-43], kolrör [8, 14, 15, 23, 44-60] og koltrefjungar (e. carbon filaments) [129, 130] eru aðrar kolefnisafleiður sem einnig er hægt að nota í sementsbundin efni og er nánar fjallað um í heimildakönnun sem var undanfari þessarar rannsóknarskýrslu [133].

Notkun langra samfelldra koltrefja í steinsteypu og sementsbundnum efnunum er heldur frábrugðin notkun stuttra koltrefja. Samfelldum trefjum er ekki hægt að bæta á einfaldan hátt sem íauka í steinsteypu, þannig að flóknari aðferðir eru nauðsynlegar til að nota samfelldar koltrefjar í steypu og sementsbundin efni [1, 30]. Samfelldum koltrefjum getur verið raðað á kerfisbundinn hátt til að styrkingar á sementsbundnum efnunum [21], eða það má nota þær í; koltrefjastyrktar fjölliðustangir [13, 22, 61, 62], koltrefjajakka/vafninga (e. carbon fibre jackets) [63-72], koltrefjamottur [73-76], koltrefjaplástrun (e. carbon fibre patching) [77-79] og fleira í svipuðum dúr. Notkun samfelldra koltrefja getur verið gagnleg og hagkvæm að því leiti að samfelldar trefjar tengjast mun betur við sementsefju heldur en að stuttar trefjar gera, en samfelldar trefjar eru þó því miður dýrari trefjar [1].

2.1.2 Yfirborðsmeðhöndlanir koltrefja

Hægt er að meðhöndla koltrefjar á ýmsa mismunandi vegu, einkum til þess að fá fram breytilega eiginleika trefjanna eða bæta eiginleika þeirra fyrir mismunandi aðstæður. Þessar mismunandi koltrefjameðhöndlanir verða grófllega kynntar í þessum undirkafla ásamt því hvaða áhrif slíkar meðhöndlanir geta haft á steinsteypu og sementsbundin efni.

Koltrefjaframleiðsluferlinu er hægt að skipta niður í þrjá megin hluta; Spunaferlið, þar sem undanfarinn er spuninn í trefjar, stöðgunar- eða oxunarhluta framleiðsluferlisins, en þá eru trefjarnar stöðgaðar (e. Stabilized) með efnahvörfum sem eiga sér stað þegar trefjarnar eru hitaðar upp í 200-300°C í súrefnisríku umhverfi, og svo að lokum mettnarhlutann, þar sem

trefjarnar eru hitaðar upp að 1000-3000°C í súrefnislausu umhverfi [6,7,133].

Eftir mettunarhlutann er framleiðsluferlinu nokkurn veginn lokið. Hins vegar eru flestar af þeim koltrefjum sem fáanlegar eru á markaðnum í dag ekki á þessu hráa formi. Eftir mettunarhluta framleiðslunnar fylgir oftast yfirborðsmeðhöndlun á trefjunum og að lokum svo límvatnsmeðhöndlun (e. Sizing). Bæði yfirborðs- og límvatnsmeðhöndlun gefur trefjunum mikið af þeim eiginleikum sem viðskiptavinir krefjast og eru því mikilvægur partur af framleiðsluferlinu. Þess vegna eru nákvæmar upplýsingar um þessar meðhöndlanir eignaréttur framleiðanda, því þetta aðgreinir mismunandi vörur á markaðinum. Það er því sjaldnast hægt að vita nákvæmlega hvernig trefjar eru meðhöndlaðar þegar verið er að kaupa þær [133].

2.1.2.1 Yfirborðsmeðhöndlun

Yfirborðsmeðhöndlun er framkvæmd til þess að bæta víxlverkunina milli koltrefja og sementsefju en þessi víxlverkun er mjög mikilvæg í notkun koltrefjanna í sementsbundnum efnum. Ómeðhöndlaðar trefjar bindast ekki vel við önnur samsett efni, svo mikilvægt er að bæta þessa tengingu. Yfirborðsmeðhöndlun felur oftast í sér oxun á yfirborði trefjanna, þar sem virkir hópar sem innihalda súrefni eru myndaðir. Almenna framkvæmdin snýst um að setja trefjarnar í raflausn sem inniheldur oxandi efni, t.d. saltpéturssýru, og leiðir þetta að ætingu og aukingu á yfirborðsgrófleika trefjanna, ásamt því að bæta virkum hópum á yfirborð trefjanna, til dæmis -COOH sýruhópnum. Þetta eykur virkt yfirborð koltrefjanna sem getur tekið þátt í tengingu við sementsefjuna [6,7]. Hingað til hafa koltrefjar mestmegnis verið notaðar í samsettum efnum í fjölliðuefju og því hafa flestar aðferðir til yfirborðsmeðhöndlunar verið þróaðar fyrir slíka efju (þá sérstaklega epoxí efju). Þrátt fyrir að notkun koltrefja hafi aukist í sementsefju eru fáar yfirborðsmeðhöndlanir til fyrir slíka notkun en binding trefjanna í sementsefju er töluvert veikari en í samsvarandi fjölliðukerfum [133].

Þær yfirborðsmeðhöndlanir sem þróaðar hafa verið fyrir koltrefjar til notkunar í sementsbundnum efnum eru m.a. byggðar á meðhöndlun með; ósoni [92,120,121], sílani [122,123], SiO₂ eindum [124], peroxíði (H₂O₂) [92], saltpéturssýru [92], ediksýru [92], heitri NaOH lausn [125], hitun [126] eða dikrómat meðhöndlun [92]. Staðlaðar yfirborðsmeðhöndlaðar trefjar eru á borðstólnum hjá sumum koltrefjaframleiðendum á meðan aðrir framleiðendur bjóða upp á slíka meðhöndlun aukalega, ef sérstaklega er beðið um það.

2.1.3 Límvatnsmeðferð

Nokkuð algengt er að límvatnsmeðferð fylgi beint á eftir yfirborðsmeðhöndluninni. Í grundvallaratriðum veitir meðferðin trefjunum verndarhúð sem bætir vinnanleika trefjanna. Límvatnsmeðferðin er valin þannig að samræming styrktartrefjanna og efju kerfisins er sem best. Þar sem koltrefjar eru oftast notaðar í epoxí efju er húðin oftast byggð á epoxí. Límvatnsmeðferðin gegnir tveimur hlutverkum; vörn trefjanna fyrir utanaðkomandi áhrifum og efjusamræmingu. Þessi húð er venjulega á milli 0,5-5% af þyngd koltrefjanna [4,6,7].

Þar sem límvatnsmeðferð á koltrefjum í dag er oftast byggð á epoxí lími þarf að íhuga áhrif meðferðarinnar á sementsbundin efni. Þessi epoxí húð er líklegast virk í samsettum fjölliðuefnum (þ.e. getur hvarfast við efju samsetta efnisins), en er líklegast ekki mjög

hvarfgjörn þegar hún er í sementsefju, sérstaklega þar sem sementsefja upplifir sjaldnast hátt hitastig. Nokkrar rannsóknir á hvernig epoxí húðun bendinga hefur áhrif á steypubendinga- tengistyrk hafa verið framkvæmdar og leiddu í ljós að óvirka epoxí húðin minnkaði efnafræðilega bindingu og núningskrafta milli bendinga og steinsteypu efjunnar [115]. Tengjastyrkurinn var 10% til 50% lægri [116-118]. Þó að þetta staðfesti ekki að epoxí límvatnsmeðferð hafi neikvæð áhrif á koltrefjanotkun í steinsteypu, þá bendir það til að takmörkuð límvatnsmeðferð væri betri fyrir samloðun við sementsefjuna.

Verði ekki hægt að kaupa ómeðhöndlaðar koltrefjar, mætti íhuga þann möguleika að fjarlægja límvatnsyfirborðið. Með því að hita trefjarnar upp í nógu hátt hitastig brennur húðin og ójafna yfirborð trefjanna situr eftir [119]. Hins vegar mun slík oxun líka hafa neikvæð áhrif á aðra yfirborðsmeðhöndlun og því þarf að fara varlega í slíkar aðgerðir.

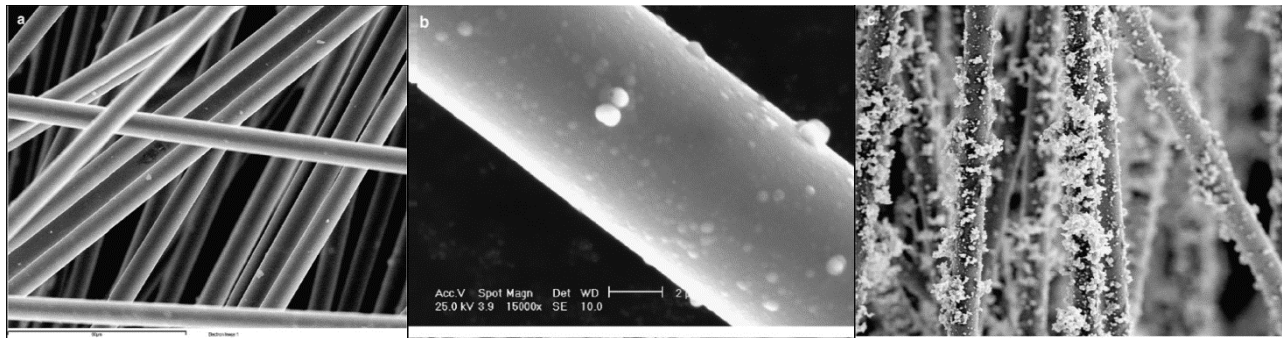
2.1.3.1 Sérstakar yfirborðsmeðhöndlanir

Oxunarmeðferð: Með hitun, efnameðferð, forskautsmeðferð, eða rafgasmeðferð, er hægt að ná fram oxun á yfirborði koltrefja. Hitunina má framkvæma í lofti, súrefni (O_2) eða ósoni (O_3). Efnameðferðin snýst um meðhöndlun með sýru eða basa lausn eða meðhöndlun með peroxíði (H_2O_2). Óson meðhöndlun á trefjum, sem hefur oft verið talin árangurrikasta meðferðin, má framkvæma með því að þurrka fyrst trefjarnar í lofti í eina klukkustund og koma þeim svo fyrir í O_3 gasi (0,6% í O_2) í fimm mínútur við $160^\circ C$ [92]. Sýnt hefur verið fram á að slík meðferð getur aukið töluvert tengistyrkinn milli koltrefja og sementsefju ásamt því að bæta togþol, fjaðurstuðul og vinnanleika efnisins. Einnig hafa tilraunir sýnt að óson meðhöndlun hefur ekki áhrif á form, togþol eða rafviðnám trefjanna sjálfra. Þegar um stuttar trefjar er að ræða hefur verið sýnt fram á að dreifing trefjanna í sementsefju er betri eftir óson meðhöndlun og þurrkrýrnun var einnig lægri með óson meðhöndluðum trefjum [92,120,121,133].

Sílan meðferð: Eitt afbrigði af sílan meðferð á koltrefjum er notkun á tveim sílan afleiðum í 1:1 þyngdarhlutfalli, leystar upp í etýlacetati. Sílan afleiðurnar eru $H_2NCH_2CH_2NHCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$ og $OCH_2CHCH_2OCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$, sem báðar hafa trimetýlsiloxí hópa á öðrum endanum á keðjunum. Fyrri sameindin hefur amín hóp á hinum enda keðjunnar og sá seinni hefur epoxí hóp á endanum. Yfirborðsmeðhöndlunin er síðan framkvæmd með því að dýfa koltrefjunum í lausn af sílan afleiðunum. Lausnin er hituð upp í $75^\circ C$ í eina klukkustund. Amín hópurinn á fyrri keðjunni er hvatinn fyrir meðferðina sem veldur því að epoxí hópurinn á seinni keðjunni binst fyrri keðjunni. Trimetýlsiloxí endarnir bindast síðan virka alkóhól -OH hópnum á yfirborði trefjanna. Eftir eina klukkustund er lausnin síuð og trefjarnar þrifnar með etýlacetati og síðan þurrkaðar. Lokaskref yfirborðsmeðhöndlunarinnar er hitun í ofni við $110^\circ C$ í 12 klukkustundir [122,123,133].

Díkrómat meðferð: Ein leið til að ná fram oxun á yfirborði trefjanna er díkrómat meðferð. Þá er trefjunum dýft í díkrómat lausn ($K_2Cr_2O_7$, 30 wt%) og brennisteinsýru (H_2SO_4 , 40 wt%) við $60^\circ C$ í tvær klukkustundir. Trefjarnar eru síðan síaðar frá og þrifnar með vatni og að lokum þurrkaðar við $110^\circ C$ í sex klukkustundir [92].

Málmhúðun á koltrefjum: Þegar ná þarf fram sérstökum eiginleikum trefjanna sem hefðbundnar aðferðir geta ekki veitt er möguleiki að málmhúða þær. T.d. hefur verið sýnt fram á að koltrefjar, húðaðar með nikkelí hafa aukna rafleiðni og vörn gegn utanaðkomandi rafsegulbylgjum, bæði í sements- og fjölliðjuefju [127].



Mynd 1: SEM myndir af; a) ómeðhöndluðum koltrefjum, b) nikkel húðuðum koltrefjum (5 min) og c) nikkel húðuðum koltrefjum (10 min) [128].

2.2 Notkunarmöguleikar koltrefja í sementsbundnum efnum

Eins og minnst var á í inngangi þessarar heimildarkönnunar hefur notkun koltrefja í steypugeiranum aukist til muna síðastliðna áratugi og hafa töluverðar rannsóknir verið gerðar á þeim eiginleikum sem sementsbundin efni að viðbættum koltrefjum hafa. Þar sem verð á koltrefjum fer sí lækkandi á heimsmarkaði vegna framþróun í framleiðsluáðferðum, bendir allt til þess að notkun koltrefja muni halda áfram að aukast töluvert í byggingariðnaðinum á komandi árum [1-3, 134]. Lengi vel var stærsti ókostur koltrefja verð þeirra, sem var mun hærra en fyrir aðrar trefjategundir, svo sem fyrir stál-, gler-, plast- og basalttrefjar. Heimsverð koltrefja hefur hins vegar farið lækkandi að undanfögnu og bendir margt til þess að það komi til með að halda áfram að lækka á næstu árum [134]. Er því tímabært að rannsaka notkun þeirra hérlandis fyrir sementsbundin efni.

Í sementsbundnum efnum er notkun stuttra koltrefja vinsælust þar sem nota má þær sem íauka á mjög einfaldan hátt. Þessi viðbót leiðir af sér aukinn styrk og þá sérstaklega hvað beygjutogþol varðar, ásamt öðrum jákvæðum aflfræðilegum eiginleikum. Þessa jákvæðu eiginleika má rekja til þess að trefjarnar brúa örsmæðarsprungur sem finna má í allri steypu. Brúun af þessu tagi spornar gegn frekari sprungumyndun, sem gerist þegar örsmæðarsprungurnar verða fyrir álagi og vaxa, en örsmæðarsprungur eru eitt mest skráða vandamál steinsteypu og sementsbundinna efna í bæði fersku og hörðnuðu ástandi. Örsmæðarsprungur af þessu tagi finnast á fasaskilum sementsefju og fylliefna áður en álag hefur verið sett á þessi efni. Þegar steinsteypa verður fyrir umhverfisáhrifum og álagi, magnast vandamálið þegar örsmæðarsprungurnar vaxa í fjölda og stærð. Eftir því sem örsmæðarsprungum fjölgar innan sementsefjunnar, aukast líkur á samruna þeirra sem á endanum getur leitt til stórra sprungna og/eða skemmda í steinsteypunni [80, 81]. Þetta eðlislæga vandamál er hægt að fyrirbyggja með trefjaþblöndun í steinsteypu og önnur sementsbundin efni þar sem trefjarnar geta borið þunga yfir þessar örsmæðarsprungur (þ.e. brúað sprungurnar) eftir að efnið hefur harðnað. Aðal tilgangurinn með slíkri trefjaþblöndun er ekki

að auka togþol þessara efna (þó trefjarnar geri það vissulega), heldur að hafa hemil á og hindra sprungumyndun og koma í veg fyrir stigmögnun og útbreiðslu á þeim vandamálum sem geta fylgt slíkum sprungum. Brúun örsmæðarsprungna með trefjaíblöndun getur einnig haft aðra jákvæða eiginleika fyrir steinsteypu sem fer eftir því við hvaða trefjategund er notast við í hvert skipti. Má þar helst nefna bættu aflfræðilega eiginleika og vinnanleika steinsteypu með því að seinka hörðunarferlinu og/eða koma í veg fyrir að örsmæðarsprungurnar dreifi sér og stækki [82-86].

Fjölbreytilegir eðliseiginleikar koltrefja þýða að notkunareiginleikar þeirra eru mjög miklir og þegar kemur að sementsbundnum efnum, eru þessar trefjar því alls ekki takmarkaðar við brúun örsmæðarsprungna og til styrktaraukningar. Sem dæmi, eru kolefnisbundnar fjölliðustyrktarstangir (e. carbon fibre reinforced polymers CFRP bars), nú notaðar í síauknum mæli í heiminum, í stað steypustyrktarstáls [13, 22, 61, 62]. Mikill léttleiki stanganna og framúrskarandi viðnám þeirra gegn tæringu gera þær einkum hagkvæmar og eftirsóttar fyrir ýmsar sérhæfðar aðstæður á borð við neðansjávarsteypuvirki.

Kristallauppröðun koltrefja veldur því að koltrefjar leiða rafstraum. Þennan eiginleika má nýta sér til að hanna hágæða steinsteypu. Leiðni trefjanna er háð lögun þeirra og hvort trefjarnar eru heilar eða ekki. Með viðnámsmælingum má því segja til um hvort trefjar í steypu hafa orðið fyrir hnjaski og því má segja til um heilbrigði steypuefjunnar. Þannig er hægt að meta hvort skemmdir hafa orðið á steiptum einingum án þess að bora eða skaða eininguna á neinn hátt. Slík kerfi hafa mikið verið rannsökuð erlendis og lofar tæknin mjög góðu og bíður upp á nýjan möguleika til ástandsgreiningar byggingamannvirkja [3-5, 8-24].

Í næstu köflum verður farið nánar yfir þessa eiginleika koltrefja í sementsbundnum efnum og vitnað í erlendar rannsóknir sem gerðar hafa verið á þessu viðfangsefni.

2.3 Ástandsgreining (skemmdaskynjun/sjálfskynjun) koltrefja

Það eru margir þættir sem geta haft áhrif á uppbyggingu sementsbundina efna sem oft á tíðum eru gríðarlega mikilvægir fyrir öryggi steyptra mannvirkja. Þetta geta verið þættir á borð við; skemmdir vegna bæði fasts álags (e. static stress) og breytilegs álags (e. dynamic stress) og skemmdir vegna frostálags, skriðs og/eða skemmdir vegna þurrkrýrnunar [9]. Meiriháttar skemmdir í steinsteypu, sem oftast leiða af sér stórar sjáanlegar sprungur, eru augljóslega frekar áhættusamar. Slíkar meiriháttar skemmdir er m.a. hægt að greina með; sjónrænu mati, vökvainnflæðismælingum (e. liquid penetrant inspection), hljóðmælingum (e. ultrasonic inspection) eða öðrum aðferðum. Samt sem áður, eru minniháttar skemmdir sem ekki fylgja sjáanlegar sprungur einnig áhættusamar þar sem þeim fylgja niðurbrot á byggingar- og örsmæðareiginleikum steinsteypu. Greining á minniháttar skemmdum sem ekki leiða af sér skaða á mannvirkjum sem verið er að rannsaka (e. non-destructive detection), er mun meira krefjandi verkefni heldur en greining á meiriháttar skemmdum á byggingarmannvirkjum [87]. Ein möguleg leið til þess er að nota rafviðnámsgreiningu, sem er mæliaðferð er ekki leiðir af sér skemmdir á mannvirkinu/byggingarefninu sem verið er að rannsaka [87, 88].

Einn mjög eftirtektarverður eiginleiki koltrefja er hæfileiki þeirra til að nema álagsspennu á áhrifaríkan hátt [10, 11, 17, 20, 89-96, 31] og/eða uppbyggingar- og örsmæðarskemmdir [9, 19, 88, 95, 96, 31, 32] sem koltrefjarnar verða fyrir, með rafviðnámsmælingum. Ástæðuna fyrir þessu má rekja til þess að koltrefjar búa yfir ákveðnum eiginleika sem kalla mætti formbreytingarviðnám (e. piezoresistivity) á íslensku, sem þýðir að þegar koltrefjar brotna eða afmyndast á einhvern hátt, breytist rafviðnám trefjanna sem greina má með viðnámsmælingum. Hugtökin sjálfskynjun (e. self-sensing) og skemmdaskynjun (e. damage sensing) má almennt nota fyrir byggingarefni þegar þau eru notuð sem eigin heildstæðniskynjarar og öll skynjarainnleiðing eða viðhenging er óþörf. Þegar koltrefjar eru notaðar til þess að styrkja steypar einingar, er því hægt að fylgjast með streitu og álagi sem steypan verður fyrir, þar sem að aflögun steypunnar mun einnig hafa áhrif á koltrefjarnar í samsetta efninu sem verið er að mæla (í þessu samhengi þá koltrefjastyrkt sementsbundin efni), sem leiðir til mælanlegs munar á viðnámi koltrefjanna. Jafnstraumsmælingar (e. direct current measurements) eru vinsælli nú til dags [9-11, 88, 95, 31, 97-99], heldur en AC riðstraumsmælingar (e. alternating current, AC measurements) [96, 100, 101], þar sem þær eru einfaldari í uppsetningu og framkvæmd, ásamt því að vera einnig meira rannsökuð mæliaðferð fyrir þetta viðfangsefni. Steinsteypa sem styrkt er á þennan hátt hefur gjarnan hlotið viðurnefnið “snjöll steypa” (e. “smart concrete”) [1, 9, 16, 17, 30, 88, 32, 97, 102-105].

Rafskynjunareiginleikar koltrefja eru tvennskonar; þ.e. annars vegar búa koltrefjar yfir afturkræfum spennueiginleikum á rúmmálsrafviðnámi (e. reversible effect of strain volume electrical resistivity) og hins vegar er viðnám koltrefja óafturkæft hvað varðar þann skaða sem þær geta orðið fyrir (e. irreversible effect of damage on the resistivity). Þessa tvenna eiginleika er aðeins hægt að aðgreina með viðnámsmælingum undir álagi og einnig þegar álagið er tekið af. Því meiri skaði sem koltrefjarnar verða fyrir, því meiri verða óafturkræfu áhrifin og þar að leiðandi verður viðnámsbreytingin meiri eftir að álagið er tekið af [106]. Breyting á grunnviðnámi er þess vegna vísbending um meiriháttar skemmd/skaða trefjanna [9, 88]. Rannsóknir á slíkum rafviðnámskemmdamælingum á koltrefjastyrktum sementsbundnum efnum eru gjarnan rannsökuð með þrýstiþols- og beygjutogþolsmælingum [88, 99]. Við þrýstiálag, minnkar viðnámið á afturkræfan hátt vegna þess að trefjarnar ganga meira inní sementsefjuna þar sem þær brúa sprungur (e. push-in of crack-bridging fibres) og því fylgir lækkun á viðnámi vegna aukins trefja/sementefju snertiflatar. Togspenna leiðir til aukins viðnáms, sem aftur er afturkræf, vegna þess að þar eru trefjarnar að ganga meira útúr sementsefjunni þar sem þær eru að brúa sprungur og því fylgir samhliða hækkun á snertiflatarviðnámi vegna minnkunar á trefja/sementefju snertifletinum. Sjálfskynjun koltrefja er einnig hægt að fá fram með beygjutogþolsmælingum sem fela í sér togálag (e. tension) á einni hlið sýnis og samtímis þrýstiálag á andstæðri hlið sýnisins, sem þýðir að nota þarf aðskilin raftengi fyrir togþols- og þrýstiþolsyfirborð sýnisins [89]. Yfirborðsviðnámsmælingar eru þess vegna framkvæmdar (en ekki rúmmálsviðnámsmælingar eins og fyrir samsvarandi þrýstiþolsmælingar fyrir koltrefjainnihaldandi sementsbundin efni) þegar beygjutogþolsmælingar eru notaðar til að rannsaka sjálfskynjun koltrefjasamsettra efna (e. carbon fiber composites) [103].

Mikilvægt er að greina á milli mismunandi tegunda skemmda á koltrefjastyrktum sementsbundnum efnunum og á milli þeirra aðferða sem notaðar eru til að greina þær. Skemmdir innan sementsbundinna efna eru til að mynda almennt rannsakaðar með rúmmálsviðnámsmælingum. Á meðan að yfirborðsnertiflatarskemmdir, eins og á milli steypustyrktarjárns og steinsteypu, og yfirborðsnertiflatarskemmdir á milli gamallar og nýrrar steypu o.s.frv., eru vaktaðar með snertiflatarviðnámsmælingum. Skemmdir á samskeytum steinsteypu og koltrefja-epoxí efju (þ.e. svo kallaður viðgerðarplástur), eru svo mældar með rúmmálsviðnámsmælingum á samsettu einingunni sem verið er að rannsaka [9].

Einnig hefur verið sýnt fram á að skynjunareiginleikar koltrefjastyrktrar steinsteypu aukist í viðurvist steypustyrktarstáls sem oftast en ekki er notað í steypum mannvirkjum. Umfang skynjunaraukningarinnar er breytileg eftir lögum og uppsetningu steypustyrktarjárnsins, sem leiðir til þess að nauðsynlegt er að stilla og fínþússa sjálfskynjunarviðnámsmælingarferlið fyrir hverja breytilega steypustyrktarjárnsuppsetningu [103].

Skemmdaskynjunarmælingar bygginga, eða byggingar heildstæðnivöktunarmælingar (e. structural health monitoring), er mjög eftirsóknarvert viðfangsefni fyrir nútíma byggingariðnað. Fyrir utan það augljósa að vera mjög gagnlegar mælingar með tilliti til almennra öryggisráðstafanna og að geta komið í veg fyrir óþarfa viðhalds- og slysakostnað, eru einnig fjölmargar fleiri ástæður fyrir því af hverju steinsteypa með slíka sjálfskynjunareiginleika er áhugaverð. Þar má nefna þætti á borð við að geta greint uppruna steypuskemmda byggingamannvirkja/eininga og að geta fundið út á hvaða tímapunkti ákveðin skemmd nái ákveðnu skemmdarstigi [9, 106].

Svo kallaður gauge-stuðull (e. gauge factor) er mikið notaður þegar unnið er með sjálfskynjunarefni/formbreytingarviðnáms samsett efni (e. piezoresistive composites) á borð við samsett koltrefjaplastefni og koltrefjastyrkt sementsbundin efni. Gauge-stuðullinn er mælieining á hlutfallslegri breytingu sem verður á DC-jafnstraumi á einingarspennu. Þessi stuðull er af stærðargráðunni 100 fyrir kolefnisstyrkt sementsbundin efni [17-19, 92, 94, 96, 31, 103, 107], og getur farið allt upp í 700, á meðan að þessi stuðull er af stærðargráðunni 2 fyrir málm strekkklappa (e. metal strain gauges) [5]. Sement verður fyrir torleiðniáhrifum (e. dielectric effect) þegar því er komið fyrir í rafsviði. Jónirnar í sementsefjunni flæða sem viðbragð við rafsviðinu sem þær skynja í kringum sig, sem leiðir til rafskautunnar í efjunni. Þessi rafskautun er línulega háð rafviðnámi efjunnar sem leiðir að minni torleiðniáhrifum í koltrefjastyrktri sementsefju heldur en í hefðbundinni sementsefju [108].

Rakainnihald sementsefju hefur áhrif á jónaleidnigetu efjunnar og hefur þ.a.l. áhrif á sjálfskynjunareiginleika koltrefjastyrktra sementsbundinna efna. En jafnvel fyrir öfgafyllsta tilfellið (mjög hátt rakastig og mjög lágt trefjainnihald), eru þau neikvæðu áhrif sem raki hefur á sjálfskynjunareiginleika trefjanna ekki skaðleg fyrir sjálfskynjunargetu koltrefjanna [16]. Gauge stuðullinn minnkar um a.m.k. 12% og breytanleiki stuðulsins sem fall af álagsstærð og álagssögu eykst. Hins vegar eykst rafleiðni efjunnar og hlutfall merkis og mælisuðs (e. signal to noise ratio) helst hátt. Samband eðlisviðnáms og álagsspennu heldur einnig áfram að vera línulegt. Út frá þessu má því áætla að hægt sé að nota koltrefjastyrkt sementsbundin efni fyrir

sjálfskynjunarmælingar, án þess að taka þurfi tillit til rakainnihalds þeirrar steypublöndu/sementsbundnu blöndu sem notast er við í hvert skipti [16].

Sjálfskynjunarmælingar á borð við þær sem talað hefur verið um hér fyrir ofan, hafa einnig verið mikið framkvæmdar og rannsakaðar fyrir koltrefjastyrkt plastefni (e. carbon fibre reinforced plastics: CFRP) [4, 5, 109-112] og önnur koltrefja-samsett efni.

2.4 Notkun samfelldra koltrefja til styrktaraukningar og fyrir skemmdaskynjun sementsbundinna efna

Árið 1999, rannsakaði Chung et al. [36] notkun samfelldra koltrefja bæði til styrktaraukningar og til skemmdaskynjunar sementsbundinna efna, með 2,6–7,4% rúmmálshlutfalli af samfelldum koltrefjum. Sjálfskynjunareiginleiki koltrefjanna var hér aftur forsendan fyrir að hægt var að framkvæma skemmdaskynjunarmælingar sementsbundnu efnanna. Yfirborðsraftengi voru notuð til að mæla rafviðnám í stefnu koltrefjanna í sementsefjunni [36].

Sjálfskynjun koltrefjanna var tveggja skrefa ferli. Við lága spennu var álags/spennu ferillinn (e. stress-strain curve) línulegur upp að 0,2% togspennu. Á því svæði var smávægileg viðnámsaukning talin mega rekja til koltrefjasementsefju samskeytaniðurbrots, sem að hluta til var afturkræft ferli. Það var engin breyting á fjaðurstuðlinum á þessu svæði. Þrátt fyrir að engin breyting hafi verið á togþolsfjaðurstuðlinum þýðir ekki endilega að enginn skaði hafi orðið á sementsbundna koltrefjaefninu, þar sem að koltrefjasementsefju-niðurbrot er ákveðin tegund af skemmd sem fylgir ekki alltaf lækkun á fjaðurstuðli. Þetta tiltekna niðurbrot er einkum mikilvægt þegar kemur að beygjutogþoli og þrýstipolsstyrk í stefnu koltrefjanna í efjunni, þannig þetta niðurbrot tengist á beinan hátt aflfræðilegum eiginleikum koltrefjastyrktra sementsbundinna efna.

Fyrir spennugildi yfir 0,2% varð skyndileg aukning á viðnámi jafnframt því að lækkun varð á togþolsstuðli samsetta efnisins. Þessa skyndilegu viðnámsbreytingu má rekja til meiriháttar brotskemmda á koltrefjunum (e. fibre breakage).

Sjálfskynjun þessara sementsbundnu efna gaf því í té sjálfskynjun á afturkræfum skemmdum við lág spennugildi (sem höfðu þó lága upplausn, sem er svipað því sem sást fyrir stuttar koltrefjar), jafnframt því að vara við verulegum skaða þegar koltrefjarnar byrja að gefa sig og brotna. Jafnvel þó að trefjalögunin hafi ekki verið eins og best var á kosið, náði togþolsstyrkurinn upp í 86 MPa, sem bendir til þess að koltrefjastyrkt sementsbundin efni á borð við þessi virðast vera virkilega eftirsóknarverð efni fyrir notkun í byggingariðnaðinum. Taka skal fram að eftir því sem rúmmálshlutfall trefjanna var aukið jókst sveigjanleiki, fjaðurstuðull og styrkur efnisins jafnframt í kjölfarið, sem eykur því möguleika á enn fjölbreyttara notagildi [36].

2.5 Rafleiðni koltrefja

Efniseiginleikar og efnafræðileg uppbygging koltrefja gerir þær einkar eftirsóknarverðar fyrir notkun í sementsbundnum efnum, í samanburði við aðrar trefjategundir. Af öllum þeirra efniseiginleikum eru það einna helst varmafræðilegir og rafefnafræðilegir eiginleikar þeirra sem gerir þær mest heillandi fyrir notkun í steinsteypu og öðrum sementsbundnum efnum. Það væri hægt að álykta að rafefnafræðilegir eiginleikar koltrefja væru líkari eiginleikum gler- og fjölliðutrefja/plasttrefja heldur en eiginleikum stáltrefja. Þetta er hins vegar ekki rétt þar sem að gler- og plasttrefjar búa ekki yfir rafleiðnieiginleikum eins og koltrefjar gera. Stáltrefjar eru einnig leiðandi, en hafa mun meira þvermál ($\sim 60 \mu\text{m}$) en koltrefjar hafa ($\sim 15 \mu\text{m}$), sem takmarkar notkunareiginleika stáltrefja í samanburði við koltrefjar sérstaklega hvað varðar álagsskynjun (e. strain sensing) og rafleiðni í steinsteypu og öðrum sementsbundnum efnum [1]. Stáltrefjar henta hins vegar betur í hitarafmagns-samsett efni (e. thermoelectric composites) vegna þess hversu háan rafeindapéttleika þær hafa, á meðan að koltrefjar hafa aðeins lágan holupéttleika (e. hole density) uppá að bjóða [1]. Þegar kemur að varmafræðilegri leiðni, eru koltrefjar mjög frábrugðnar stáltrefjum. Koltrefjaþót í sementsbundin efni, veldur auknu loftinnihaldi [1, 2]. Fyrir rafleiðni er það ekki mikið vandamál þar sem að rafleiðni koltrefja er u.þ.b. átta sinnum meiri en rafleiðni hefðbundinnar sementsefju, sem leiðir til aukinnar leiðni efjunnar þrátt fyrir loftinnihaldið. Að auki, er varmafræðileg leiðni koltrefja aðeins um einni stærðargráðu meiri en varmafræðileg leiðni sementsefju. Þetta, ásamt aukningu á loftinnihaldi með aukinni íbót af koltrefjum í sementsbundin efni veldur því að varmafræðileg leiðni snar minnkar [34]. Þetta gerir það að verkum að hægt er að nota koltrefjar þegar útbúa þarf varmafræðilega einangrun [1].

Ástæðan fyrir því að koltrefjar leiða rafmagn er vegna mjög reglulegra kristalgrindarlaga sem byggja upp trefjarnar. Kolefnisatóm trefjanna tengjast innbyrðis á þrígirtan hátt í plani og mynda kolefnislög og gerir þetta tengjanetkerfi það að verkum að p-svigrúm eru hornrétt á planið sem skarast þannig innbyrðis og mynda óstaðbundið π -rafeindakerfi, þar sem rafeindir geta ferðast um eftir kolefnislögunum. Í raun hefur grafít lágliggjandi leiðniband (e. low lying conduction band) sem útskýrir rafleiðni eiginleika þess.

Þó nokkuð margar rannsóknir hafa leitt það í ljós að PAN- koltrefjar, sem samanstanda af grafíts-kristallögum með u.þ.b. 23° snúningi frá ás hverjar trefjar, hafa háa rafleiðni og þar af leiðandi lágt rafviðnám ($\sim 1500 \mu\Omega \text{ cm}$) áslægt eftir stefnu hverjar trefjar. Einnig var ályktað að PAN-koltrefjar hafi rafleiðni á borð við hálfleiðandi efni, þ.e. geta virkað sem hálfleiðarar (e. semiconducting materials) [113, 114].

2.5.1 Koltrefja leiðnivírar í sementsbundnum efnum og steinsteypu

Almennt séð telst steinsteypa ekki rafleiðandi efni sem takmarkar möguleika þess til að vera fjölhæft efni og takmarkast notkunareiginleikar þess því að mestu við að vera byggingarefni. Af þessari ástæðu, þarf að bæta íblöndunarefnum og íaukum við steypu og önnur sementsbundin efni til þess að öðlast þá rafeiginleika sem sóst er eftir í hvert skipti.



Uppi hafa verið hugmyndir um hvort ekki sé hægt að nota koltrefjar í steinsteypu og sementsbundin efni í hlutverki leiðnivíra (e. carbon fibre wiring in concrete), með því að koma þeim fyrir í steypum einingum þannig trefjarnar geti spannað ákveðið krítískt svæði innan einingarinnar. Þannig væri hægt að nota koltrefjar til að greina skemmdir á steypu einingunni, þar sem að skemmdir af þessu tagi myndu leiða til þess að koltrefjaleiðnivírinn myndi rofna og þ.a.l. eyðileggja eiginleika vírsins til að geta borið rafstraum. Aðrar leiðnivíratengundir, eins og kopar, myndu ekki geta uppfyllt þetta hlutverk þar sem að aflfræðilegir eiginleikar slíkra leiðnivíra (og sérstaklega lengdaraukning þeirra) myndu koma í veg fyrir að vírinn myndi gefa sig og þannig nema skemmdir.

Í heimildarleit þessari tókst ekki að finna heimildir um sérstakar rannsóknir um koltrefjar sem hafa þann eina tilgang að vera merkisberar í steinsteypu, þó vitað sé til þess að verið sé að rannsaka og hanna slík kerfi erlendis. Samt sem áður fannst fjöldi heimilda um rannsóknir á borð við þær sem áður er búið að minnst á í þessari heimildarleit þar sem að sjálfskynjunareiginleikar koltrefjar eru notaðir til þess að útbúa steinsteypu og önnur sementsbundin efni, með skemmda- og sjálfskynjunar eiginleika. Oftar en ekki, eru koltrefjarnar samhliða notaðar til styrkingar á byggingarefninu í þessum rannsóknum.

2.6 Flokkun koltrefja

Koltrefjum er venjulega skipt niður í flokka eftir mismunandi togþolsfjaðurstuðli (e. tensile modulus) trefjanna sem er mælieining á hversu mikinn togkraft þarf til að lengja trefjarnar. Koltrefjar með lágan togþolsfjaðurstuðul hafa stuðul undir 240 GPa, en koltrefjar eru flokkaðar í eftirfarandi flokka: „koltrefjar með hefðbundinn togþolsfjaðurstuðul“, „koltrefjar með millistigs togþolsfjaðurstuðul“, „koltrefjar með háan togþolsfjaðurstuðul“ og „koltrefjar með mjög háan togþolsfjaðurstuðul“. Koltrefjar sem flokkaðar eru sem „koltrefjar með mjög háan togþolsfjaðurstuðul“, hafa stuðul á bilinu 500-1000 GPa [133].

Stál hefur togþolsfjaðurstuðul af stærðargráðunni 200 GPa, þannig í samanburði við mismunandi togþolsfjaðurstuðulgildi koltrefja má sjá að sterkustu koltrefjarnar eru u.þ.b. fimm sinnum sterkari en stál. Grafít-trefjar sem framleiddar eru ú frá jarðolíu biki (e. petroleum pitch) hafa gjarnan mjög háan togþolsfjaðurstuðul. Efnafræðileg uppbygging slíkra trefja minnir mikið á þrívíddar kristaluppbyggingu grafíts.

2.6.1 Fjaðurstuðull koltrefja

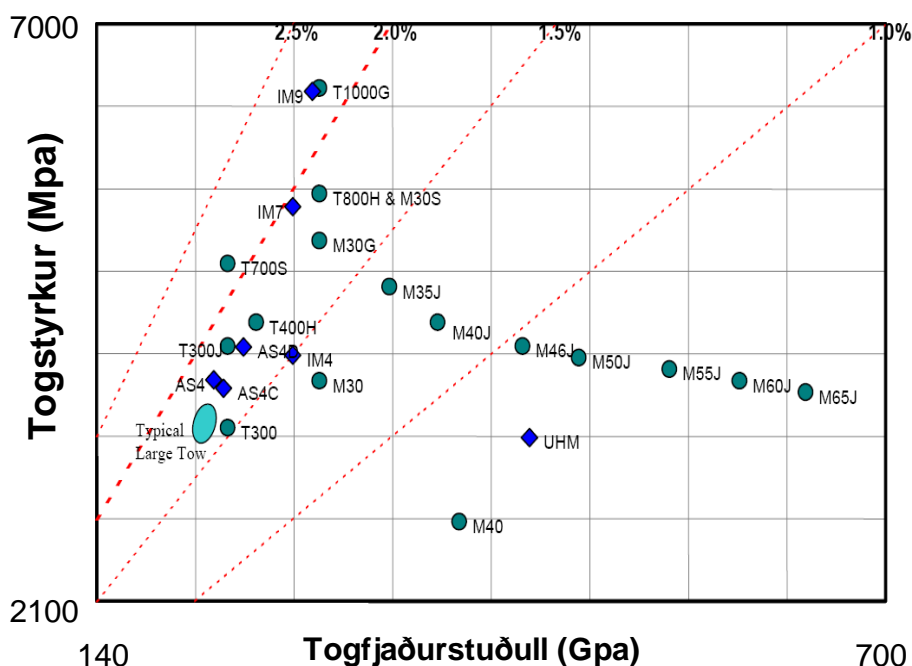
Koltrefjar eru flokkaðar sem línulegt efni sem ætti að fylgja lögmáli Hooke, þar sem að fjaðurstuðull efnisins er í grundvallaratriðum stöðugur fyrir breytileg spennugildi. Koltrefjar eru líka misátta efni (e. anisotropic materials), sem þýðir að fjaðurstuðull þeirra mun breytast eftir því í hvaða átt krafti er beitt á trefjarnar, á meðan að jafnátta efni (e. isotropic materials) hafa alltaf sömu aflfræðilega eiginleika í allar stefnur. Eftirtektarvert er að koltrefjar hafa mun hærri fjaðurstuðul (eru mun stífari) þegar krafti er beitt í stefnu trefjanna.

2.6.2 Lengdaraukning koltrefja

Þar sem að fjaðurstuðull koltrefja er stöðugur yfir stórt spennubil, er spennu/álagsferillinn nokkuð nálægt því að vera línulegur. Þetta þýðir að fyrir gefið styrkgildi, er koltrefjalenging í öfugu hlutfalli við fjaðurstuðul trefjanna. Með öðrum orðum, því stífari sem koltrefjarnar eru (þ.e. því hærri sem fjaðurstuðull trefjanna er), því minni er lengdaraukning (e. elongation) trefjanna þegar þær gefa sig og rofna.

Mynd 2 sýnir togþolsstyrk og togþolsfjaðurstuðulsgildi nokkra þeirra koltrefjategunda sem til eru á markaðinum í dag. Sjá má að meirihluti trefjanna hafa lengdaraukningu á stærðargráðunni 1,5-2%. Þróun í koltrefjaiðnaðinum hefur orðið meir og meir á þann veginn að þróa trefjar með meiri lengdaraukningu (sjá efsta hluta grafsins til hægri).

Hægt er að notast við mynd 2, til að reyna að velja hentugar koltrefjar fyrir hvert viðfangsefni. Til þess að ná fram sem bestum sjálfskynjunareiginleikum samsettra efna, er best að velja trefjar með svipaða aflfræðilega eiginleika og steinsteypan/sementsbundna efnið sem verið er að rannsaka hefur, þannig að trefjarnar fylgi hegðunarmynstri steypunnar. Það sama á við um þegar önnur samsett efni, á borð við fjölliðubundin efni, eru rannsökuð.



Mynd 2: Togstyrkur og fjaðurstuðulsgildi fyrir nokkrar af þeim koltrefjategundum sem til eru á markaðinum í dag. Brotnu línurnar á grafinu/myndinni sýna hámarks lengdaraukningu trefjanna [133].

3 Aðferðafræði og mælitækni rannsóknarinnar

Í þessum kafla verður farið yfir þá aðferðafræði og mælitækni sem notast var við í rannsókninni á koltrefjainnihaldandi sementsbundnum efnum.

3.1 Blöndunarferli



Mynd 3: Hobart múrblöndu blandari.

Í rannsókninni voru útbúnar fjölmargar staðlaðar múrblöndur sem innihéldu mismikið magn af stuttum koltrefjum (0 – 2% magn af koltrefjum miðað við þyngdarhlutföll sements í blöndunum). Vatns-sementshlutfall blandana var annaðhvort 0,55 eða 0,6. Blöndun allra múrblandna rannsóknarinnar var framkvæmd í 20 L hrærivél er nefnist Hobart blandari (sjá mynd 3) og var unnin samkvæmt ASTM C-305 staðlinum fyrir blöndunarferli sementsefju og múrblandna [131].

Eftir blöndun hráefna í hrærivélinni voru eðlisþéttleikamælingar framkvæmdar og því næst voru flæðieiginleikar blandanna mældir til að sjá hvaða áhrif aukið magn af stuttu koltrefjunum hefði á flæðieiginleika blandanna. Flæðieiginleikar voru mældir með því að mæla sigmálsflæði. Fersku sýni var komið fyrir í sigmálskeilu og síðan var keilan fjarlægð og þvermál sýnis mælt eftir að það hætti að flæða. Því næst var blöndunum komið fyrir í stöðluð stálmót fyrir brotþolsprófanir (sjá næstu undirkafla).

3.2 Þrýsti- og beygjutogþolsmælingar

Fyrir mælingar á þrýstipoli voru steypdir strendingar, 40×40×160 mm. Staðlaðar aðferðir gera ráð fyrir mælingum á þrem slíkum strendingum fyrir hverja steypugerð og fást þá sex mælingar á þrýstipoli og jafnframt þrjár mælingar á beygjutogþoli. Hver strendingur er s.s. brotinn í tvo hluta við mælingu á beygjutogþoli og svo eru báðir hlutarnir notaðir til að mæla þrýstipól. Staðlaðar aðferðir gera ráð fyrir prófun á þrýstistyrk á degi 1 eða 2 og svo á degi 7 og 28 eftir blöndun, samkvæmt EN 196-1:2005 staðlinum [132]. Í verkefninu voru styrktarmælingarnar framkvæmdar 1, 7 og 28 daga eftir blöndun. Ef að stærð blöndu leyfði voru framkvæmdar auka mælingar við 4 og 14 daga sýnaaldur. Brotþolstækið sem notað var í mælingarnar er frá Tinius Olsen sem sjá má á myndum 4 og 5 (módel: 5K18OHJ204B, tegund: K) og er í eigu Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands. Samkvæmt stöðlum skal steypublanda geymd í mótunum í sólarhring áður en hún er afformuð en þá er 1 dags styrkur strendinganna prófaður. Þeim strendingum sem brjóta átti eftir meira en 1 dags sýnaaldur, var komið fyrir í rakaklefa við 20°C

og 100% rakastig (mynd 6) og voru strendingarnir geymdir uns þeir voru brotnir. Við úrvinnslu gagnanna voru tekin meðaltalsgildi þessara mælinga sem sjá má í niðurstöðukafla þessarar skýrslu.



Mynd 4: Tinius Olsen brotþolsmælitæki Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands.



Mynd 5: Beygjutogþolsmæling í Tinius Olsen brotþolsmælitæki þar sem hver strendingur er brotinn í tvo hluta við mælingu á beygjutogþoli og svo eru báðir hlutarnir notaðir til að mæla þrýstipól.



Mynd 6: Rakaklefi þar sem sementsefju-, múr-, og steypustrendingar eru geymdir við u.þ.b. 100% rakastig á Nýsköpunarmiðstöð Íslands fyrir brotþolsprófanir.

3.3 Frumefnagreining og greining á smásærri uppbyggingu þeirra koltrefja sem notaðar voru í rannsókninni

Frumefnagreining fínefna í verkefninu var framkvæmd í rafeindasmásjá (e. scannig electron microscope) Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands af gerðinni LEO Supra 25 (sjá mynd 7). Auk þess sem hægt er að fá stækkaða mynd af því sem rannsaka á hverju sinni er hægt að efnagreina örlítinn punkt á yfirborði hlutarins. Rafeindasmásjái getur náð 1,5 nm upplausn við 20 kV og er stækkunin þá orðin 1-2 milljón föld. Sýnin sem rannsökuð eru í rafeindasmásjái þurfa að vera á föstu formi, þurr og rafleiðandi, en þau sýni sem ekki eru rafleiðandi eru venjulega húðuð með öðrum rafleiðandi efnum eins og með kolefni eða gulli. Koltrefjarnar sem notaðar voru í þessari rannsókn voru gullhúðaðar áður en sýnin voru skoðuð í rafeindasmásjá og efnagreind. Fyrir sýni sem eru útbúin þannig að þau séu þétt og með vel slípað yfirborð, er hægt að framkvæma magnbundnar mælingar á, eins og frumefnamælingar með allt að 0,1% nákvæmi. Það var gert í þessari rannsókn (sjá kafla 4.5).



Mynd 7: Rafeindasmásjá Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands.

3.4 Hráefni

Eftirfarandi hráefni voru notuð í þær múrblöndur sem rannsakaðar voru í verkefninu:

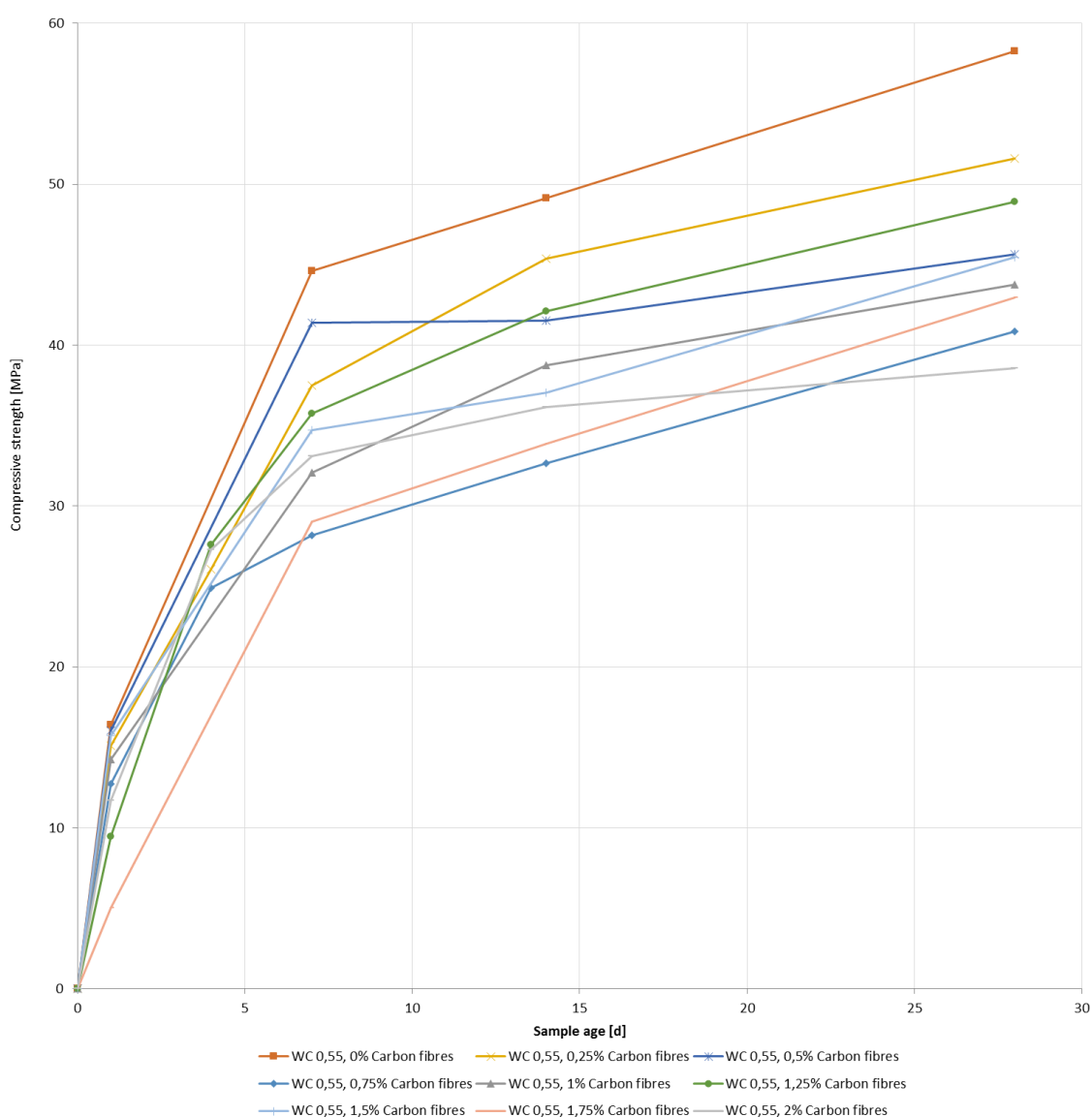
- Koltrefjarnar frá Toho Tenax Europe Gmb 150, 3mm.
- Aalborg Portland sement.
- Standart EN-196 Sandur fyrir múrblönduprófanir.
- Kranavatn.

4 Niðurstöður

Í næstu undirköflum verður farið yfir niðurstöður rannsóknarinnar. Farið verður fyrst yfir þrýstipols- og beygjutogþolsmælingar múrblandna sem innihalda mismikið magn af koltrefjum. Hér skal hafa í huga eins og nefnt var í kafla 2.2 að þá hefur viðbót koltrefja í sementsbundin efni aðalega áhrif á beygjutopol og togþol sementsbundinna efna á borð við múr og steinsteypu.

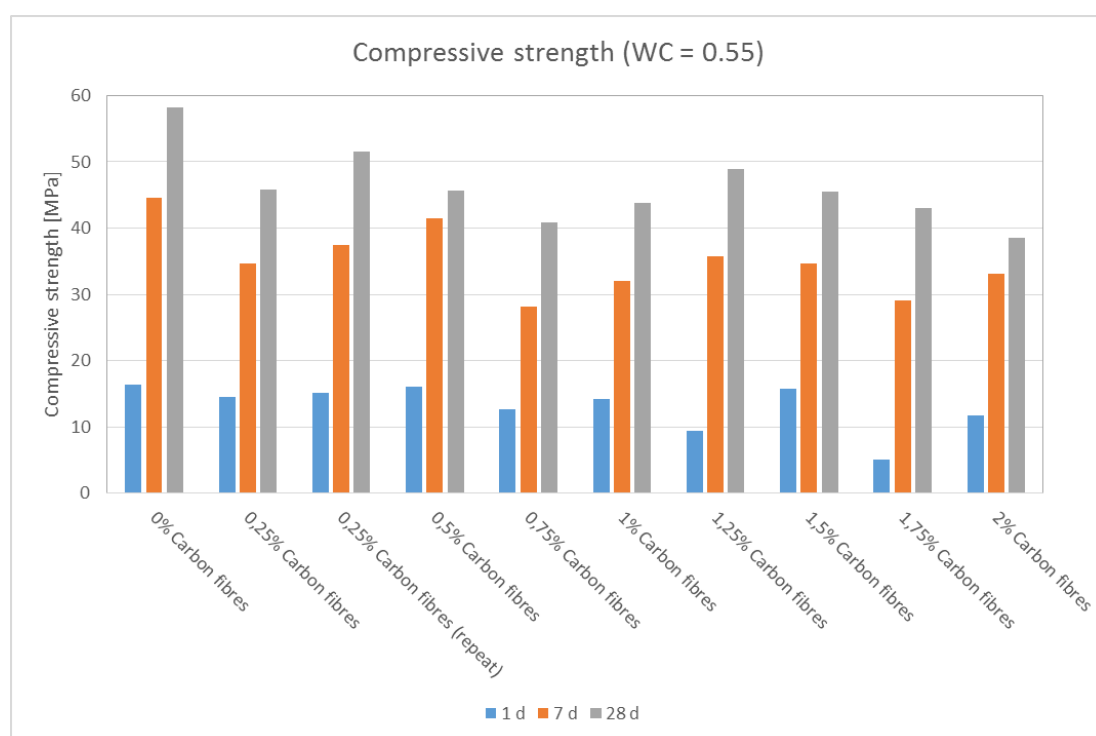
4.1 Þrýstipolsprófanir

4.1.1 W/C = 0,55



Mynd 8: Þróun þrýststyrks sem fall af tíma fyrir blöndur með mismunandi koltrefjainnihaldi og w/c = 0,55.

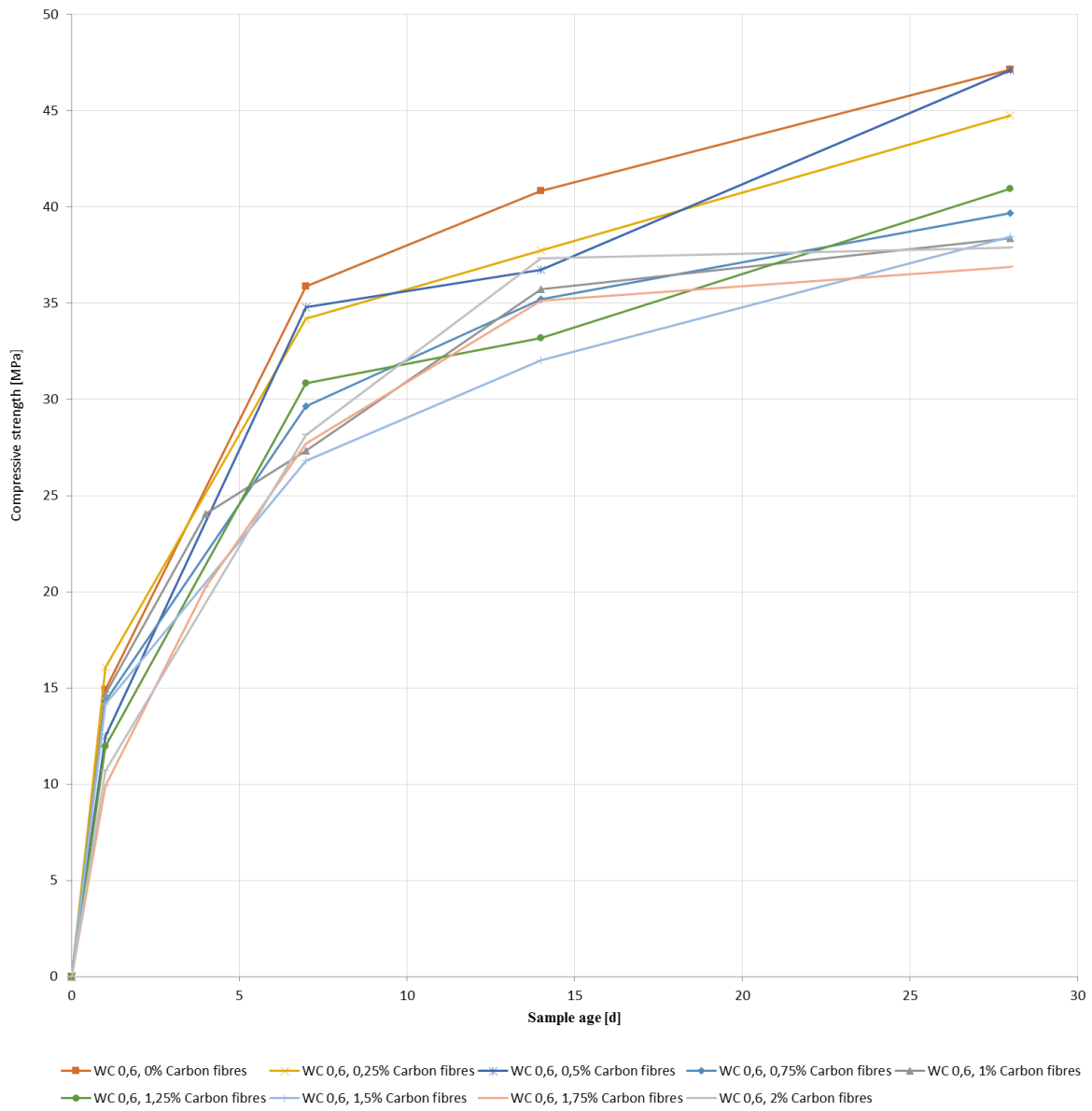
Mynd 8 sýnir hvernig þrýstistyrkur þróast sem fall af sýnaaldri fyrir blöndur sem innihalda mismunandi magn af koltrefjum og með vatnssementshlutfallið 0,55. Mynd 9 sýnir síðan eins dags styrk, 7 daga styrk og 28 daga styrk þessara mismunandi múrblandna. Niðurstöðurnar sýna þá tilhneingingu að aukið koltrefjainnihald hefur neikvæð áhrif á þrýstistyrk fyrir þessa vatnsementstölu. Þessi staðhæfing, sem og aðrar niðurstöður í þessari skýrslu, á þó aðeins við þær koltrefjar sem notaður voru í rannsókninni. Gögnin sýna hins vegar að ekki er hægt að fullyrða neitt um nákvæmt samband milli koltrefjainnihalds og þrýstistyrks þar sem aukið magn af koltrefjum leiðir ekki endilega til lægri þrýstistyrks (sbr. 0,75% koltrefjainnihald og 1,25% koltrefjainnihald). Hér gæti þó aukið loftinnihald, sem virðist myndast í koltrefjastyrktum sementsbundnum blöndum (sjá kafla 2.5), verið að hafa áhrif. Þetta verður rætt nánar í kafla 4.4 á bls. 29.



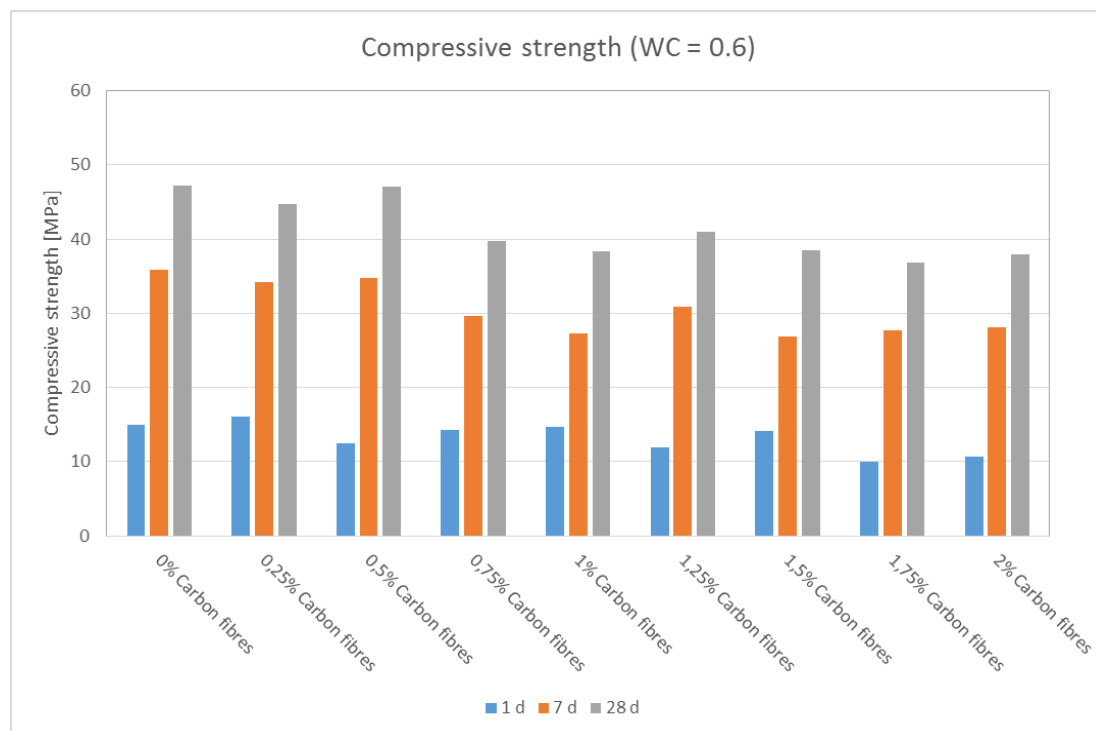
Mynd 9: Eins dags, 7 daga og 28 daga þrýstistyrkur blandna með mismunandi koltrefjainnihaldi og w/c = 0,55.

4.1.2 W/C = 0,6

Mynd 10 sýnir hvernig þrýstistyrkur þróast sem fall af sýnaaldri fyrir blöndur með vatnssementshlutfallið 0,6 og mismunandi koltrefjainnihaldi. Mynd 11 sýnir síðan eins dags styrk, 7 daga styrk og 28 daga styrk fyrir þessar mismunandi múrblöndur. Aftur gefa gögnin til kynna að koltrefjainnihald hafi neikvæð áhrif á þrýstistyrk, eins og sást fyrir w/c = 0,55. Eins dags þrýstistyrkur blandnanna virðist vera tiltölulega óháður koltrefjamagni en 28 daga styrkur sýnir sterklega þá tilhneingingu að aukið koltrefjamagn lækki langtíma þrýstistyrk fyrir þessa vatnsementstölu.



Mynd 10: Þróun þrýstistyrks sem fall af tíma fyrir blöndur með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,6$.

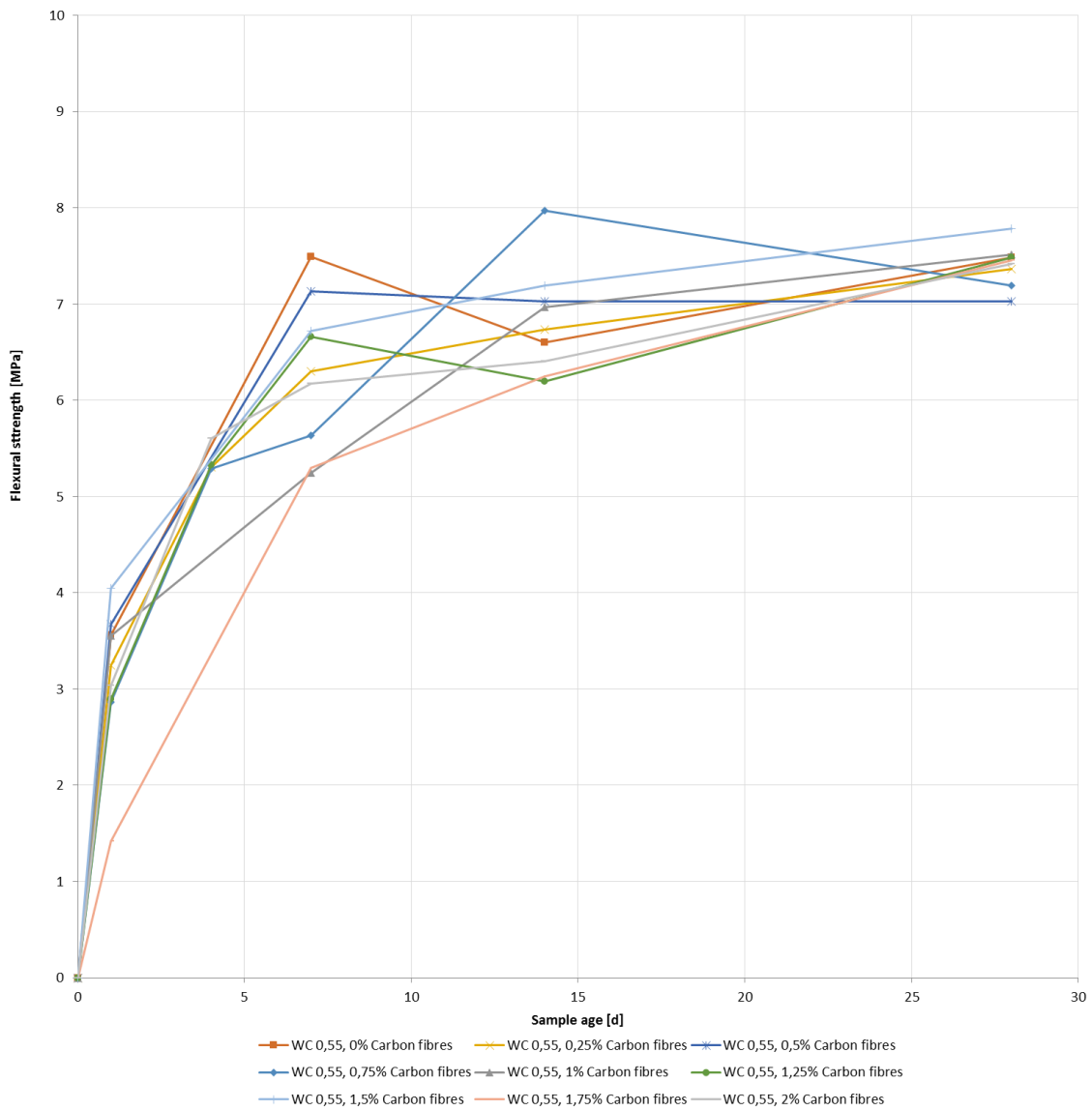


Mynd 11: Eins dags, 7 daga og 28 daga þrýstistyrkur blandna með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,6$.

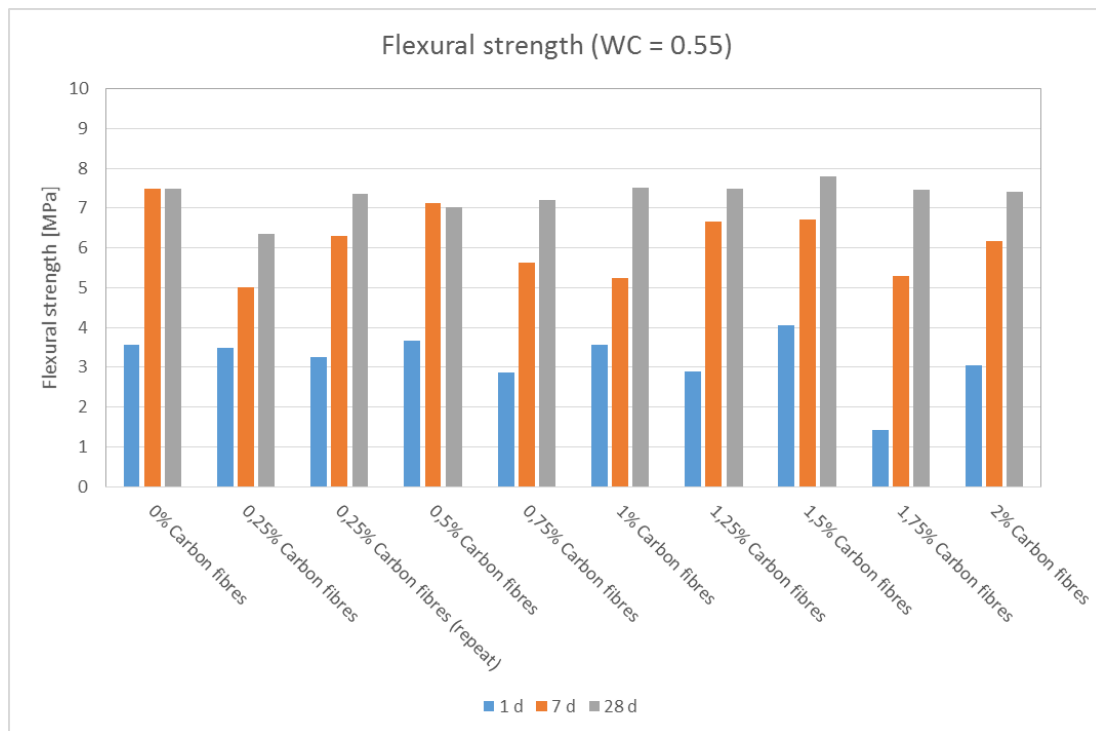
4.2 Beygjutogþolsprófanir

4.2.1 $W/C = 0,55$

Mynd 12 sýnir hvernig beygjutogþol þróast sem fall af sýnaaldri fyrir blöndur með vatnssementshlutfallið 0,55 sem innihalda mismunandi magn af koltrefjum. Mynd 13 sýnir síðan 1 dags, 7 daga og 28 daga beygjutogþol fyrir þessar mismunandi múrblöndur. Frávik í mælingum er töluvert hærra í beygjutogþolsmælingum og má það sjá þegar myndir 8 og 12 eru bornar saman. Mæliniðurstöðurnar sýna að ekki er skýrt samband milli koltrefjamagns og beygjutogþols fyrir þessa vatnssementstölu. Mikið flökt er í beygjutogþoli fyrir eins dags sýni og 7 daga sýni á meðan 28 daga niðurstöður eru frekar stöðugar fyrir allar blöndur.



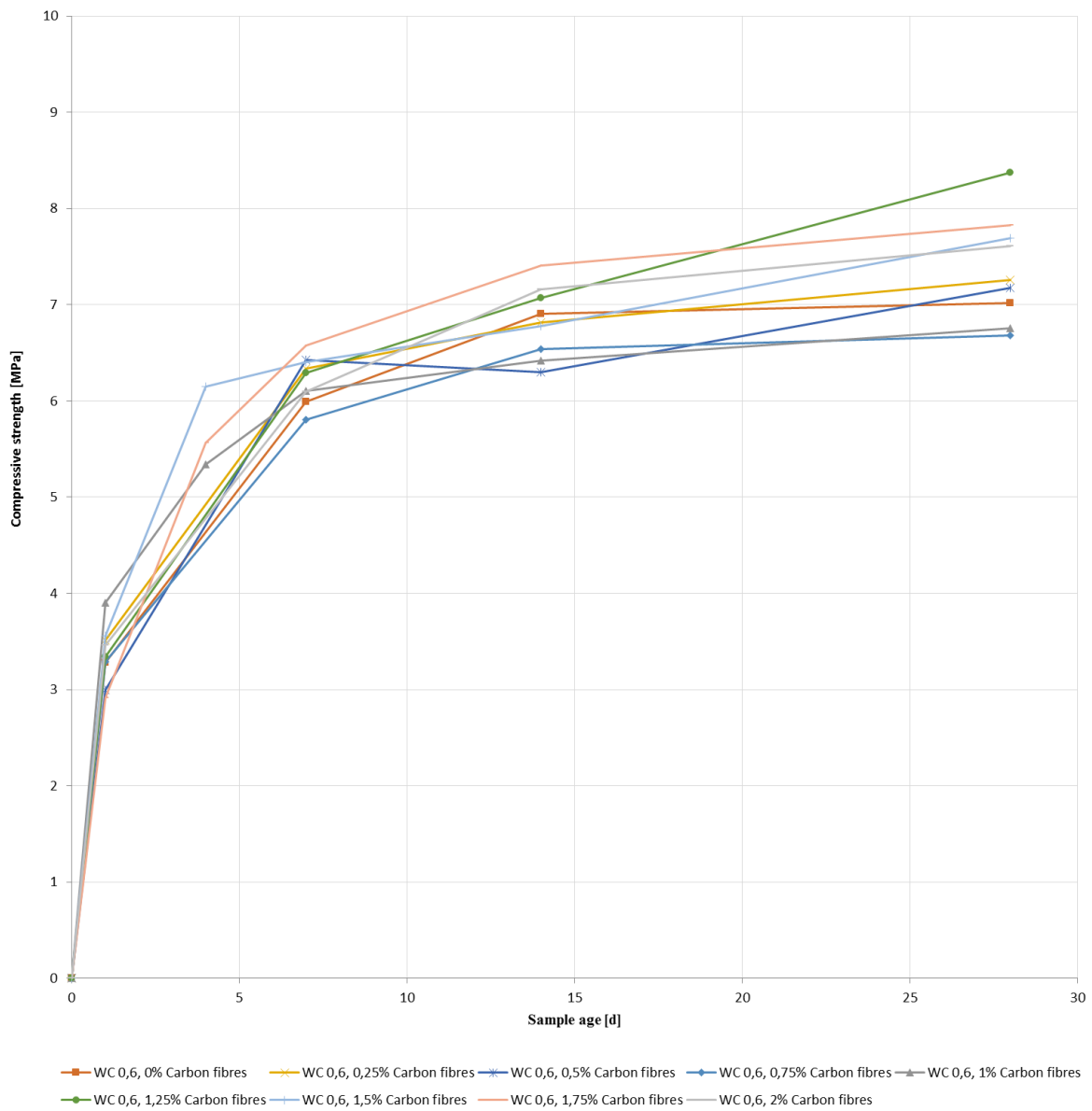
Mynd 12: Þróun beygjutogþols sem fall af tíma fyrir blöndur með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,55$.



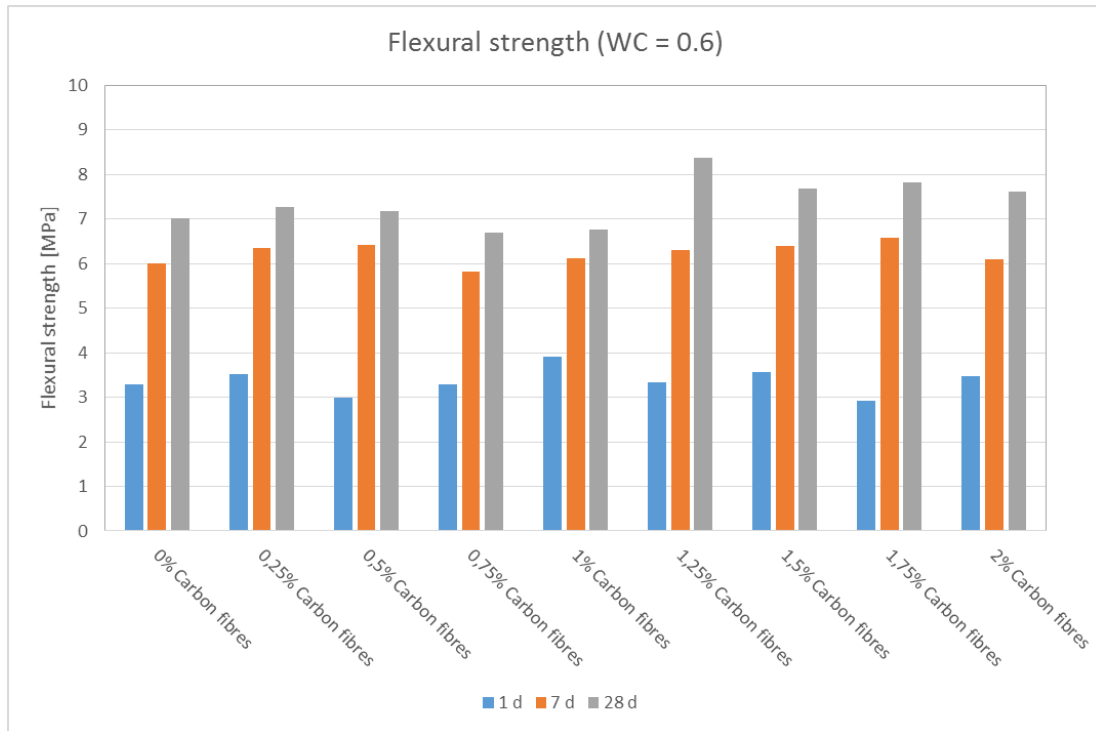
Mynd 13: Eins dags, 7 daga og 28 daga beygjutogþol blandna með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,55$.

4.2.2 W/C = 0,6

Mynd 14 sýnir hvernig beygjutogþol þróast sem fall af sýnaaldri fyrir blöndur með vatnssementshlutfallið 0,6 sem innihalda mismunandi magn af koltrefjum. Mynd 15 sýnir síðan 1 dags, 7 daga og 28 daga beygjutogþol fyrir þessar mismunandi múrblöndur. Ekki gefa eins dags og 7 daga niðurstöður til kynna að koltrefjainnihald hafi áhrif á beygjutogþol. Hins vegar má álykta út frá langtíma beygjutogþolsniðurstöðum fyrir þessa vatnssementstölu að aukið koltrefjainnihald, þá sérstaklega >1%, geti aukið beygjutogþol.



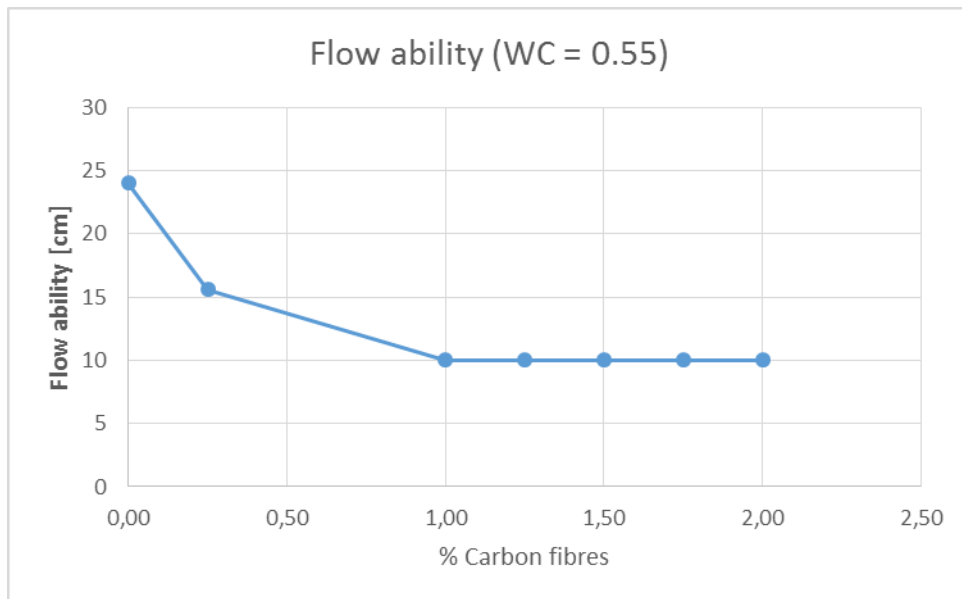
Mynd 14: Þróun beygjutögbols sem fall af tíma fyrir blöndur með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,6$.



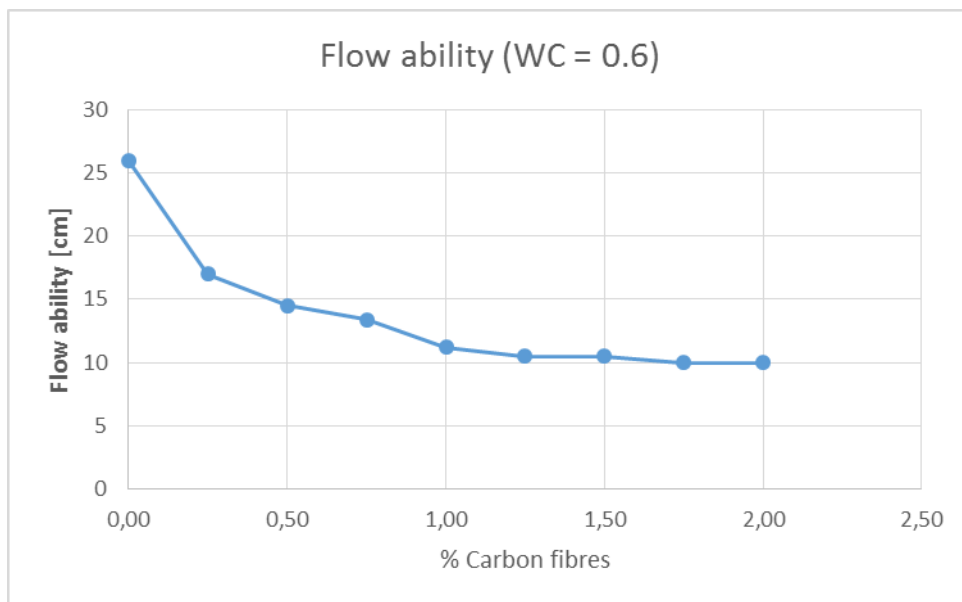
Mynd 15: Eins dags, 7 daga og 28 daga beygjutogþol blandna með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,6$.

4.3 Mælingar á flæðieiginleikum

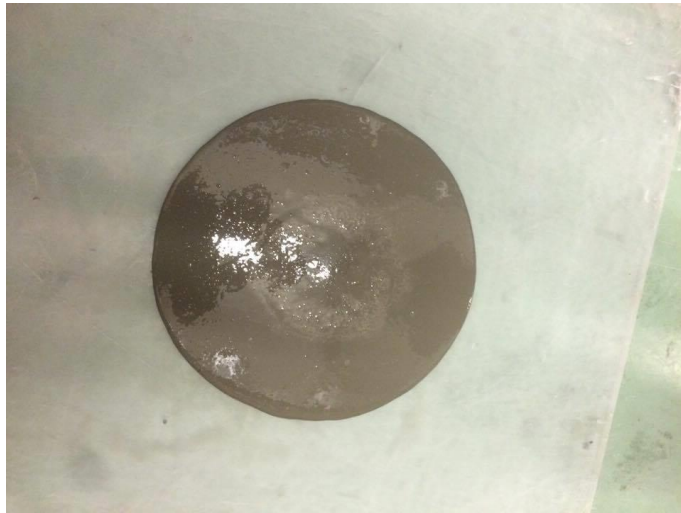
Myndir 16 og 17 sýna hvernig flæðieiginleikar múrbládnanna breytast þegar koltrefjainnihald þeirra er aukið. Svipaða hegðun má sjá fyrir bæði $w/c = 0,55$ og $w/c = 0,6$, þ.e.a.s. 0,25% viðbót af koltrefjum dregur verulega úr flæðieiginleikum og þegar $\leq 1\%$ koltrefja hefur verið bætt við hafa sýnin misst alla getu til að flæða. Mynd 18 sýnir hvernig blanda án koltrefja flæðir á meðan mynd 19 sýnir hvernig 1,25% koltrefjaviðbót leiðir til þess að sýnið flæðir ekki neitt eftir að sigmálskeilan hefur verið fjarlægð.



Mynd 16: Flæðieiginleikar múrblandna með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,55$.



Mynd 17: Flæðieiginleikar múrblandna með mismunandi koltrefjainnihaldi og $w/c = 0,6$.



Mynd 18: Flæðieiginleikar sementsblöndu með $w/c = 0,55$ og ekkert koltrefjainnihald. Þvermál sýnisins mældist 25 cm.

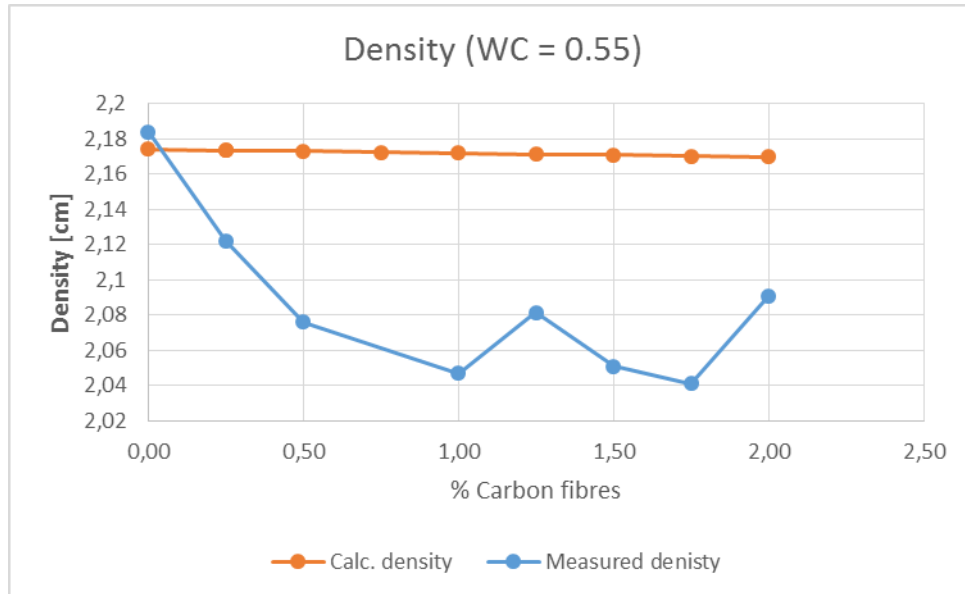


Mynd 19: Flæðieiginleikar sementsblöndu með $w/c = 0,55$ og 1,25% koltrefjainnihald. Þvermál sýnisins mældist 10 cm.

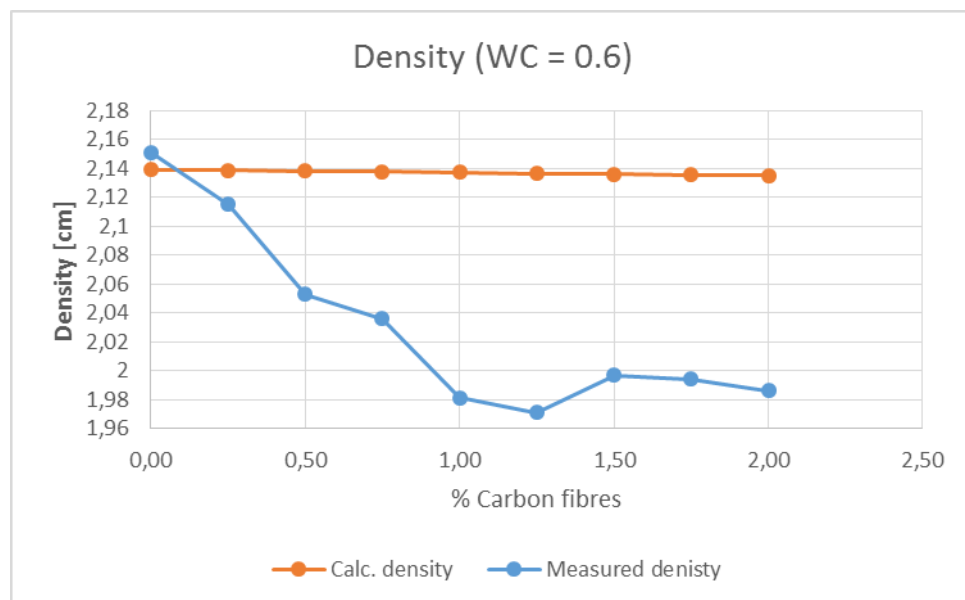
4.4 Eðlisþyngdarmælingar

Myndir 20 og 21 sýna reiknaða og mældu eðlisþyngd blandna með mismunandi koltrefjainnihald ($w/c = 0,55$ og $w/c = 0,6$). Mæld eðlisþyngd er lægri en við var búist fyrir blöndurnar sem innihalda koltrefjar. Hugsanleg skýring fyrir þessu gæti verið að uppgefin eðlisþyngd hjá framleiðanda ($1,6 \text{ g/cm}^3$) hafi ekki verið rétt. Ef að svo væri hefði mátt búast við línulegri lækku á eðlisþyngd sem fall af koltrefjainnihaldi sem ekki er raunin. Því má álykta að eitthvað annað sé að hafa áhrif á eðlisþyngdina. Eins og fram kemur í kafla 2.5 getur trefjanotkun í sementsbundnum efnum leitt til óáskilegrar loftbindingu í sementsefjunni. Slík loftbinding myndi útskýra lækkaða eðlisþyngd umfram það sem búist var við. Einnig má vera að ekki hafi tekist að ná einsleitri dreifingu á koltrefjunum þegar blöndun var framkvæmd, sem

er þekkt vandamál þegar trefjar eru notaðar í sementsbundin efni. Trefjarnar geta loðað saman og myndað klumpa og sementsefjan nær ekki að umlykja allar trefjarnar sökum þess [1, 2, 34].



Mynd 20: Reiknuð og mæld eðlisþyngd blandna sem fall af koltrefjainnihaldi ($w/c = 0,55$).



Mynd 21: Reiknuð og mæld eðlisþyngd blandna sem fall af koltrefjainnihaldi ($w/c = 0,6$).

4.5 Frumefnagreining og greining á smásærri uppbyggingu koltrefja rannsóknarinnar

4.5.1 SEM frumefnagreining

Tafla 2 sýnir niðurstöður frumefnigreiningar á stuttu Toho Tenax koltrefjunum sem notaðar voru í rannsókninni. Koltrefjarnar innihalda mestmegnis kolefni en eining innihalda þær súrefni og smávegis natríum.

Tafla 2: Frumefnagreining 1 á koltrefjunum sem notaðar voru í rannsókninni.

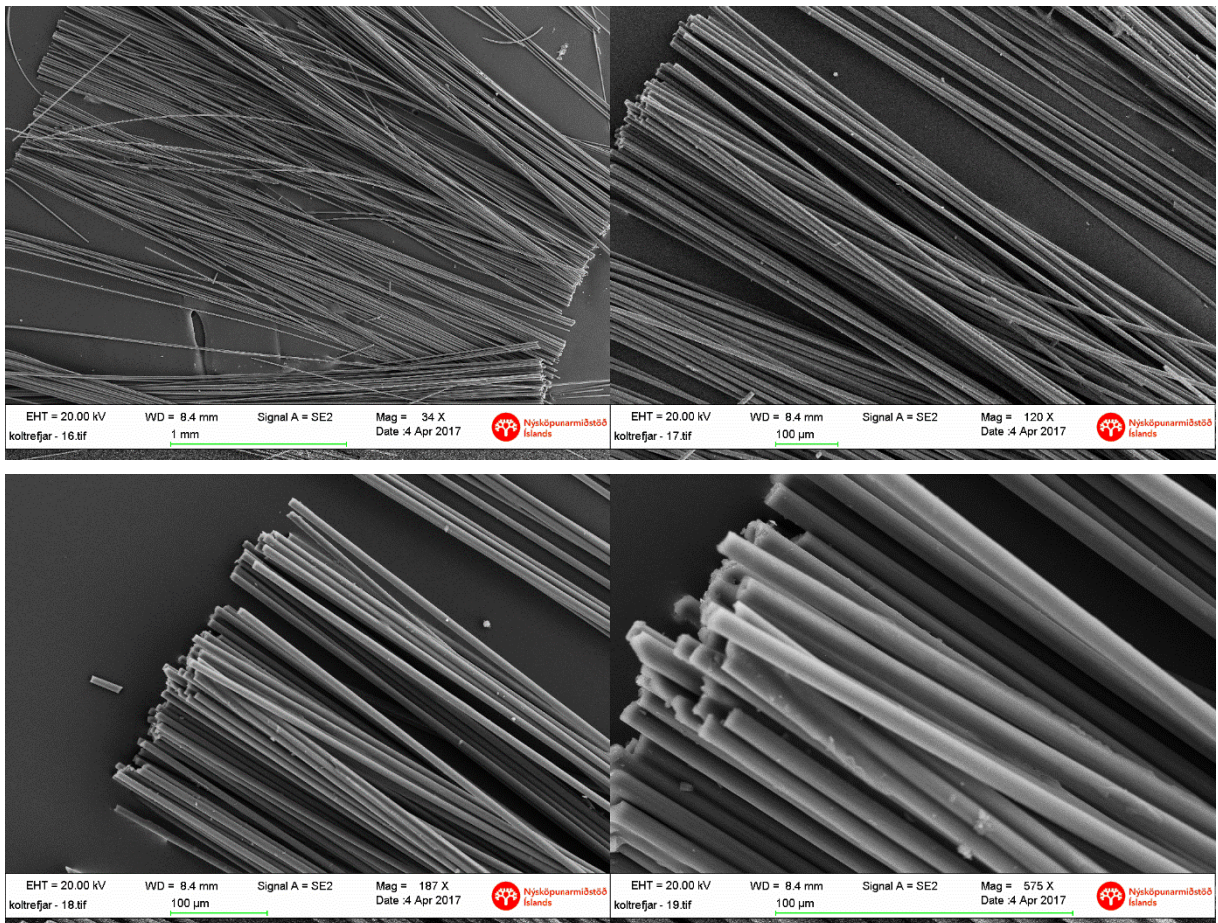
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 92.72 | 94.72 |
| O K | 5.99 | 4.59 |
| Na K | 1.29 | 0.69 |
| Total | 100.00 | |

4.5.2 SEM myndir

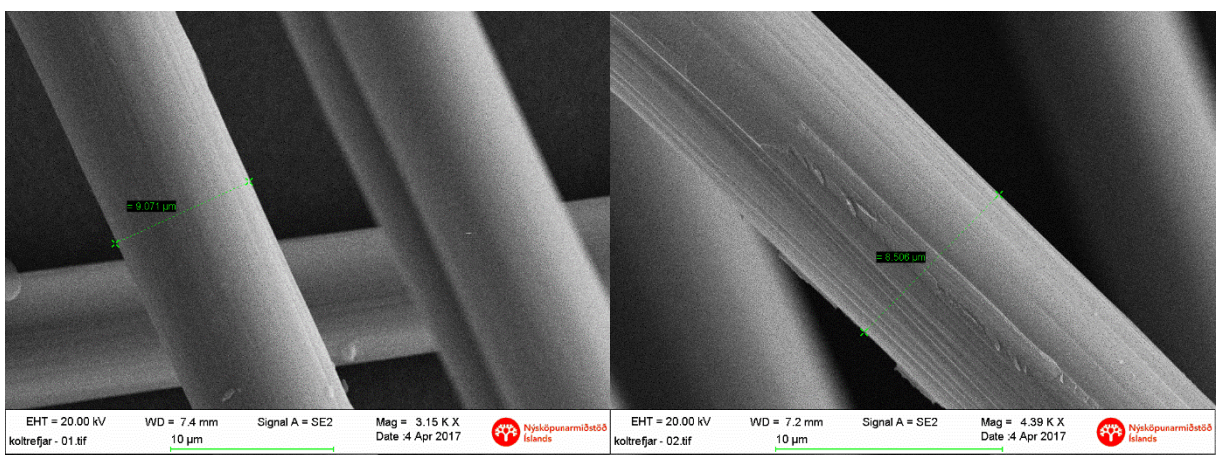
Á myndum 23, 24 og 25 má sjá rafeindasmásjágreiningu á smásærri uppbyggingu koltrefjanna sem notaðar voru í rannsókninni með mismikilli stækkun. Til samanburðar má sjá ljósmynd af koltrefjunum sem notaðar voru á mynd 22. Mynd 24 sýnir heildarútlit trefjanna og myndirnar staðfesta að lengd trefjanna er um 3 mm. Á mynd 25 má sjá mælingar á breidd trefjanna, en breiddin reynist vera um 10 μm . Mynd 26 sýnir síðan nærmynd af yfirborði trefjanna, þar sem sjá má að yfirborðið er slétt og ekki virðist sem nein yfirborðsmeðhöndlun hafi átt sér stað.



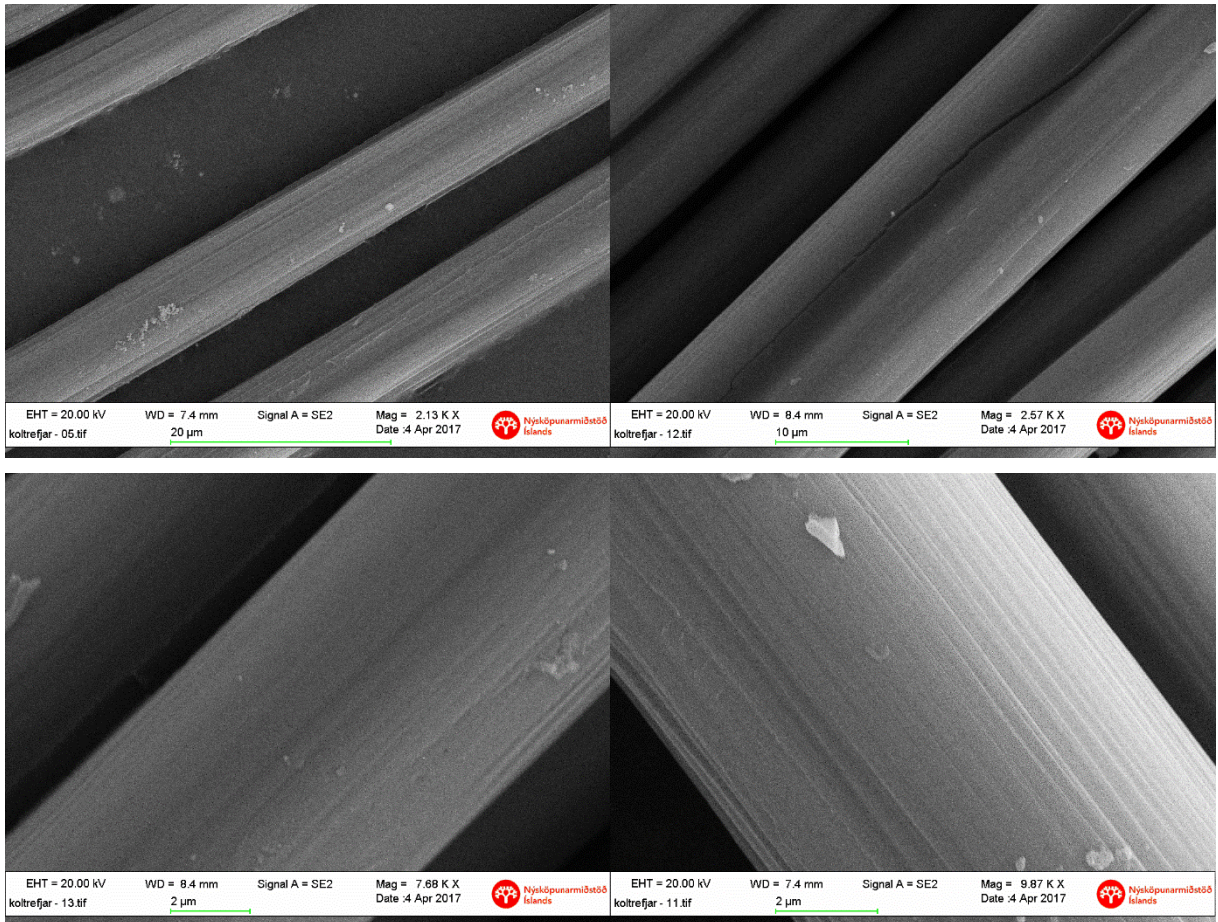
Mynd 22: Ljósmynd af stuttu koltrefjunum sem notaðar voru í rannsókninni.



Mynd 23: SEM myndir af koltrefjum sem sýna útlit trefjanna og hvernig þær mynda trefjabúnt.



Mynd 24: SEM myndir af koltrefjum með mælingum á trefjabreidd. Á vinstri myndinni mælist breiddin 9,071 μm en á hægri myndinni mælist breiddin 8,506 μm.



Mynd 25: SEM myndir af koltrefjum sem sýna slétt trefjayfirborð þeirra.

5 Samantekt

Þeir eftirtektarverðu eiginleikar koltrefja sem hér hefur verið lýst, skara langt fram úr eiginleikum annarra trefja á mörgum sviðum og er því ekki að undra að notast sé við koltrefjar í sum af vönduðustu hátækni mannvirkjum og faratækjum í heiminum í dag (t.d. í þotur, geimflaugar, kappakstursbíla og skýjakljúfa). Eiginleikar koltrefjanna gera það að verkum að notkun þeirra í mannvirkjagerð, sem og notkun þeirra til viðhalds og endurbóta byggingamannvirkja, getur stuðlað að mjög endingargóðum og jarðskjálftaþolnum byggingum sem einnig bjóða upp á heildstæðnivöktunarmælingar, eins og sýnt hefur verið fram á í fjölmörgum erlendum rannsóknum og vísindaritum.

Markmiðið með rannsókn þessari, var að afla ritrýndra heimilda um notkun koltrefja í sementsbundnum efnum og að kanna möguleikann á því að nota koltrefjar til að styrkja og bæta gæði steinsteypra mannvirkja héraendis. Í rannsókninni voru koltrefjaíbætt sementsbundin efni útbúin (staðlaðar múrblöndur) og voru flotfræðilegir og aflfræðilegir eiginleikar þeirra rannsakaðir sem fall af auknu koltrefjainnihaldi blandanna. Rannsóknin á koltrefjastyrktu múrblöndunum staðfesti mikið af því sem að finna má í fræðinni. Þær trefjar sem notaðar voru höfðu, við fyrstu sýn, væg neikvæð áhrif á þrýstistyrk múrblandna með vatnssementstölur 0,55 og 0,6. Þótt að koltrefjastyrking sé almennt ekki til þess gerð að auka þrýstipól kom þessi lækkun á óvart. Hins vegar lækkuðu trefjarnar eðlisþyngd blandanna og þessi lækkun skýrir lækkunina í þrýstistyrk að mestu leiti. Tvennt getur útskýrt þessa lækkun á eðlismassa sýnanna, annars vegar að ekki hafi tekist að ná fram einsleitri dreifingu á trefjunum í sementsefjunni og hins vegar að trefjaviðbótin hafi leitt til aukins lofts í sementsefjunni. Þar sem trefjaviðbótin var innan við 2% er líklegast að aukið loft í sementsefjunni skýri eðlismassalækkunina.

Koltrefjaviðbótin virðist hafa jákvæð áhrif á beygjutogþol og togþolsstyrk, þá sérstaklega fyrir blöndur með veikri sementsefju ($w/c = 0,6$). Trefjastyrking á sementbundnum efnum hefur almennt meiri áhrif á beygjutogþol en þrýstipól og eru þessar niðurstöður í samræmi við það. Aukning á beygjutogþols- og þrýstipólsstyrk blandanna hefði hugsanlega verið meiri sem fall af auknu koltrefjamagni ef að tekist hefði að koma í veg fyrir aukið loftinnihald í efjunni með hækkandi koltrefjamagni. Þetta er vert að hafa í huga í framtíðarrannsóknum á koltrefjainnihaldandi múrblöndum og reyna að sporna gegn loftmagninu en til eru ýmsar leiðir til þess. Ekki reyndist mögulegt að gera togþolsprófanir í þessu verkefni en það hefði verið áhugavert að sjá hvort að og hversu vel koltrefjarnar hefðu aukið togþol sýnanna.

Rannsóknir yfir lengri tíma gætu svo staðfest hvort að trefjaviðbótin hafi hemil á og hindri sprungumyndun og/eða komi í veg fyrir stigmögnun og útbreiðslu á þeim vandamálum sem geta fylgt slíkum sprungum eins og erlendar rannsóknir hafa sýnt fram á. Ef að trefjarnar ná að gera það myndi það hjálpa til við að framlengja líftíma þeirra sementsbundna efna sem þær eru notaðar í.

Markmið rannsóknarinnar var m.a. að sýna fram á að brotorka sementsbundinna efna aukist talsvert með notkun koltrefja, ef miðað er við brotorku í hefðbundnum trefjalausum efnum eða



efnum sem nota annars konar trefjar. Hafa höfundar nú þegar gert tilraunir til að rannsaka formbreytingarviðnám koltrefja og að hanna ástandsgreiningarmæliaðferð fyrir sementsbundin efni sem fjallað verður um síðar að rannsókn lokinni. Slíkar rannsóknir eru sérstaklega nýtsamlegar þar sem uppi hafa verið hugmyndir um að setja á laggirnar koltrefjaverksmiðju á Íslandi og þar með yrði aðgengi að koltrefjum á Íslandi greiðara. Með verkefninu hefur því verið lagður grunnur að þróun á íslenskum koltrefjastyrktum sementsbundnum efnum með virka rafeiginleika, sem geta sagt til um heildstæðni efnisins varðandi skemmdir þegar það er tengt við nema sem gefur frá sér straum og þróun á hátækni einingum með innbyggðum ástandsgreiningarmöguleika. Ef vel tekst til gæti þetta komið til með að reynast mikilvægt verkfæri í komandi framtíð í ástandsgreiningu mannvirkja, t.d. til að meta tjón vegna almennra skemmda og af völdum náttúruhamfara (s.s. jarðskjálfta, skriðufalla, snjóflóða, vatnsflóða og ofsaveðurs) sem og tjón af völdum almennra skemmda. Þetta verður t.d. sérstaklega mikilvægt fyrir mannvirki á jarðskjálfta- og öðrum náttúruhamfarasvæðum og fyrir mannvirki sem þurfa að bera mjög mikinn þunga. Erlendar rannsóknir hafa nefnilega einnig bent til þess að framúrskarandi eiginleikar koltrefjanna geri það að verkum að notkun þeirra í mannvirkjagerð og notkun þeirra til viðhalds og endurbóta mannvirkja stuðli að jarðskjálftapolnum byggingum. Í áframhaldandi verkefnum verða því viðnámsmælingar framkvæmdar á einingum, sem innihalda koltrefjar, á meðan álag er sett á þær í brotpólspressu. Auk þess er markmiðið að geta sýnt fram á að notkun á koltrefjum minnki verulega rýrnun og sprungumyndun. En rýrnun ásamt ófullnægjandi eftirmeðhöndlun steypu er meginorsök sprungumyndunar í steypum mannvirkjum héraendis.

Trefjastyrking mun færast í aukana á næstu árum og bendir margt til þess að notkun koltrefja muni halda áfram að aukast í byggingariðnaði á alheimsvísu þar sem verð koltrefja fer sí lækkandi á heimsmarkaði. Því er þekking á notkun koltrefja í íslenskum sementsbundnum efnum mjög mikilvæg. Til þess að almennilega nýta sér víðáttumiklu eiginleika koltrefja í sementsbundnum efnum á Íslandi, er nauðsynlegt halda áfram að rannsaka mismunandi koltrefjategundir og yfirborðsmeðhöndlunir. Ef að kemur til þess að koltrefjar verði framleiddar á Íslandi verður nauðsynlegt að vinna með framleiðendum til að ná fram þeim eiginleikum sem best henta notkun í sementsbundnum efnum á borð við múr og steinsteypu.

6 Heimildir

- [1] D. D. L. Chung. Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B-Engineering*, 31: 511–526, 2000.
- [2] D. D. L. Chung. Cement-matrix composites for smart structures. *Smart Materials & Structures*, 9: 389–401, 2000.
- [3] S. F. Huang, D. Y. Xu, C. Jun, R. H. Xu, L. C. Lu, and C. Xin. Smart properties of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Journal of Composite Materials*, 41: 125–131, 2007.
- [4] D. D. L. Chung. *Composite materials: science and applications*. Springer, 2010.
- [5] D. D. L. Chung. Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing. *Carbon*, 50 (9): 3342–3353, 2012.
- [6] X. Huang. Fabrication and properties of carbon fibers. *Materials*, 2 (4): 2369–2403, 2009.
- [7] S. Chand. Review carbon fibers for composites. *Journal of Materials Science*, 35 (6): 1303–1313, 2000.
- [8] F. Azhari and N. Banthia. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34 (7): 866–873, 2012.
- [9] D. D. L. Chung. Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 42 (1): 1–40, 2003.
- [10] D. D. L. Chung. Electrical conduction behavior of cement-matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11: 194–204, 2002.
- [11] D. D. L. Chung. Piezoresistive cement-based materials for strain sensing. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13: 599–609, 2002.
- [12] D. D. L. Chung. Review: Improving cement-based materials by using silica fume. *Journal of Materials Science*, 37: 673–682, 2002.
- [13] C. E. Bakis, A. Nanni, J. A. Terosky, and S. W. Koehler. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid frp reinforcement rods for concrete applications. *Composites Science and Technology*, 61: 815–823, 2001.
- [14] B. Han, X. Yu, E. Kwon, and J. Ou. Piezoresistive multi-walled carbon nanotubes filled cement-based composites. *Sensor Letters*, 8 (2): 344–348, 2010.
- [15] J. L. Luo, Z. D. Duan, T. J. Zhao, and Q. Y. Li. Hybrid effect of carbon fiber on piezoresistivity of carbon nanotube cement-based composite. *Advanced Materials Research*, 143: 639–643, 2011.
- [16] S. Wen and D. D. L. Chung. Effect of moisture on piezoresistivity of carbon fiber-reinforced cement paste. *Aci Materials Journal*, 105: 274–280, 2008.
- [17] S. Wen and D. D. L. Chung. Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement. *Aci Materials Journal*, 102: 244–248, 2005.
- [18] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Piezoresistivity-based strain sensing in carbon fiber-reinforced cement. *Aci Materials Journal*, 104: 171–179, 2007.

- [19] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Effects of strain and damage on strain-sensing ability of carbon fiber cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18: 355–360, 2006.
- [20] S. H. Wen and D. D. L. Chung. A comparative study of steel- and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors. *Advances in Cement Research*, 15: 119–128, 2003.
- [21] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Piezoresistivity in continuous carbon fiber cement-matrix composite. *Cement and Concrete Research*, 29: 445–449, 1999.
- [22] C. Q. Yang, Z. S. Wu, and L. P. Ye. Self-diagnosis of hybrid cfrp rods and as-strengthened concrete structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17: 609–618, 2006.
- [23] X. Yu and E. Kwon. A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties. *Smart Materials and Structures*, 18 (5): 055010, 2009.
- [24] J. Ou and B. Han. Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20 (3): 329–336, 2009.
- [25] G. Marsh. Reclaiming value from post-use carbon composite. *Reinforced Plastics*, 52 (7): 36–39, 2008.
- [26] J Sloan. Carbon fiber 2007 looks forward with optimism. *HIGH PERFORMANCE COMPOSITES*, 16 (1): 26, 2008.
- [27] S. Pimenta and S. T. Pinho. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste management*, 31 (2): 378–392, 2011.
- [28] A Roberts. The carbon fibre industry worldwide 2008–2014. *Tony Roberts, ISBN, 1871677599*, 2009.
- [29] R. Barhum and V. Mechtcherine. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 92: 56–71, 2012.
- [30] D. D. L. Chung. Dispersion of short fibers in cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17: 379–383, 2005.
- [31] W. Yao, B. Chen, and K. Wu. Smart behavior of carbon fiber reinforced cement-based composite. *Journal of Materials Science & Technology*, 19: 239–242, 2003.
- [32] X. L. Fu and D. D. L. Chung. Self-monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement. *Cement and Concrete Research*, 26: 15–20, 1996.
- [33] J. Y. Cao and D. D. L. Chung. Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture. *Cement and Concrete Research*, 31: 1633–1637, 2001.
- [34] X. L. Fu and D. D. L. Chung. Effect of admixtures on thermal and thermomechanical behavior of cement paste. *Aci Materials Journal*, 96: 455–461, 1999.
- [35] J. Kaufmann and D. Hesselbarth. High performance composites in spun-cast elements. *Cement & Concrete Composites*, 29: 713–722, 2007.
- [36] P. W. Chen and D. D. L. Chung. A comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement by latex addition. *Aci Materials Journal*, 93: 129–133, 1996.

- [37] C. M. Huang, D. Zhu, X. D. Cong, W. M. Kriven, R. R. Loh, and J. Z. Huang. Carbon-coated-glass-fiber-reinforced cement composites .1. fiber pushout and interfacial properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 80: 2326–2332, 1997.
- [38] T. J. Kim and C. K. Park. Flexural and tensile strength developments of various shape carbon fiber-reinforced lightweight cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 28: 955–960, 1998.
- [39] D. D. L. Chung. Comparison of submicron-diameter carbon filaments and conventional carbon fibers as fillers in composite materials. *Carbon*, 39: 1119–1125, 2001.
- [40] X. L. Fu and D. D. L. Chung. Submicron carbon filament cement-matrix composites for electromagnetic interference shielding. *Cement and Concrete Research*, 26: 1467–1472, 1996.
- [41] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites. *Carbon*, 45: 505–513, 2007.
- [42] H. Xiao, H. Li, and J. Ou. Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain. *Sensors and Actuators A: Physical*, 160 (1): 87–93, 2010.
- [43] Y.-M. Gao, H.-S. Shim, R. H. Hurt, E. M. Suuberg, and N. Y. C. Yang. Effects of carbon on air entrainment in fly ash concrete: The role of soot and carbon black. *Energy & Fuels*, 11 (2): 457–462, 1997.
- [44] B. M. Tyson, R. K. Abu Al-Rub, A. Yazdanbakhsh, and Z. Grasley. Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (7): 1028–1035, 2011.
- [45] F. Cota, T. H. Panzera, M. A. Schiavon, A. L. Christoforo, P. H. R. Borges, C. Bowen, and F. Scarpa. Full factorial design analysis of carbon nanotube polymer-cement composites. *Materials Research*, 15 (4): 573–580, 2012.
- [46] B. Han, Z. Yang, X. Shi, and X. Yu. Transport properties of carbon-nanotube/cement composites. *Journal of materials engineering and performance*, 22 (1): 184–189, 2013.
- [47] B. Han, X. Yu, and E. Kwon. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring. *Nanotechnology*, 20 (44): 445501, 2009.
- [48] Z. S. Metaxa, M. S. Konsta-Gdoutos, and S. P. Shah. Carbon nanofiber cementitious composites: Effect of debulking procedure on dispersion and reinforcing efficiency. *Cement and Concrete Composites*, 2012.
- [49] Z. S. Metaxa, J.-W. T. Seo, M. S. Konsta-Gdoutos, M. C. Hersam, and S. P. Shah. Highly concentrated carbon nanotube admixture for nano-fiber reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 34 (5): 612–617, 2012.
- [50] Z. S. Metaxa, M. S. Konsta-Gdoutos, and S. P. Shah. Carbon nanofiber-reinforced cement-based materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2142 (1): 114–118, 2010.
- [51] M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and S. P. Shah. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research*, 40 (7): 1052–1059, 2010.
- [52] A. L. Materazzi, F. Ubertini, and A. Dâ Alessandro. Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain. *Cement and Concrete Composites*, 37: 2–11, 2013.

- [53] J. M. Makar, J. Margeson, and J. Luh. Carbon nanotube/cement composites—early results and potential applications. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, Canada*, pages 1–10, 2005.
- [54] I. W. Nam, H. K. Kim, and H. K. Lee. Influence of silica fume additions on electromagnetic interference shielding effectiveness of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Construction and Building Materials*, 30: 480–487, 2012.
- [55] A. P. Singh, B. K. Gupta, M. Mishra, A. Chandra, R. B. Mathur, and S. K. Dhawan. Multiwalled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties. *Carbon*, 2013.
- [56] B. Wang, Z. Guo, Y. Han, and T. Zhang. Electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Construction and Building Materials*, 46: 98–103, 2013.
- [57] X. Yu and E. Kwon. Carbon nanotube based self-sensing concrete for pavement structural health monitoring. *Final report for the US Federal Highway Administration*, 2012.
- [58] M. Saafi. Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures. *Nanotechnology*, 20 (39): 395502, 2009.
- [59] G. Y. Li, P. M. Wang, and X. Zhao. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 29 (5): 377–382, 2007.
- [60] M. F. L. De Volder, S. H. Tawfick, R. H. Baughman, and A. J. Hart. Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science*, 339 (6119): 535–539, 2013.
- [61] L. J. Malvar, J. V. Cox, and K. B. Cochran. Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. i: Experimental study. *Journal of composites for construction*, 7 (2): 154–163, 2003.
- [62] F. Sayed Ahmad, G. Foret, and R. Le Roy. Bond between carbon fibre-reinforced polymer (cfrp) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (uhpfrc): Experimental study. *Construction and Building Materials*, 25 (2): 479–485, 2011.
- [63] Y. Xiao and H. Wu. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 (2): 139–146, 2000.
- [64] T. Turgay, Z. Polat, H. O. Koksall, B. Doran, and C. Karakoc. Compressive behavior of large-scale square reinforced concrete columns confined with carbon fiber reinforced polymer jackets. *Materials & Design*, 31 (1): 357–364, 2010.
- [65] F. Seible, M. J. N. Priestley, and D. Innamorato. Earthquake retrofit of bridge columns with continuous carbon fiber jackets. volume 2. design guidelines. 1995.
- [66] F. Seible, M. J. N. Priestley, G. A. Hegemier, and D. Innamorato. Seismic retrofit of rc columns with continuous carbon fiber jackets. *Journal of Composites for Construction*, 1 (2): 52–62, 1997.
- [67] R. Sause, K. A. Harries, S. L. Walkup, S. Pessiki, and J. M. Ricles. Flexural behavior of concrete columns retrofitted with carbon fiber-reinforced polymer jackets. *ACI Structural Journal*, 101 (5), 2004.

- [68] B. K. Purba and A. A. Mufti. Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (cfrp) jackets. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26 (5): 590–596, 1999.
- [69] D. A. Bournas and T. C. Triantafillou. Bond strength of lap-spliced bars in concrete confined with composite jackets. *Journal of Composites for Construction*, 15(2):156-167, 2011.
- [70] C. G. Bailey and M. Yaqub. Seismic strengthening of shear critical post-heated circular concrete columns wrapped with frp composite jackets. *Composite Structures*, 94 (3): 851–864, 2012.
- [71] M. Yaqub and C. G. Bailey. Repair of fire damaged circular reinforced concrete columns with frp composites. *Construction and Building Materials*, 25 (1): 359–370, 2011.
- [72] A. M. ElSouri and M. H. Harajli. Seismic repair and strengthening of lap splices in rc columns: Carbon fiber–reinforced polymer versus steel confinement. *Journal of Composites for Construction*, 15 (5): 721–731, 2011.
- [73] Z. Q. Li, H. S. Zheng, S. R. Zhu, and L. Ye. Whole field structural health monitoring by polymer-matrix carbon fiber smart layer. *Advanced Materials Research*, 148: 812–817, 2011.
- [74] C. S. Sharma, A. Sharma, and M. Madou. Multiscale carbon structures fabricated by direct micropatterning of electrospun mats of su-8 photoresist nanofibers. *Langmuir*, 26: 2218–2222, 2010.
- [75] C. Chang, M. Ho, G. Song, Y. L. Mo, and H. Li. Improvement of electrical conductivity in carbon fiber-concrete composites using self consolidating technology. In *Proceedings of the 12th international conference on engineering, science, construction, and operation in challenging environments. USA: Honolulu*, pages 3553–8, 2010.
- [76] J. D. Schiffman and M. Elimelech. Antibacterial activity of electrospun polymer mats with incorporated narrow diameter single-walled carbon nanotubes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3: 462–468, 2011.
- [77] M. Tavakkolizadeh and H. Saadatmanesh. Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch. *Journal of Structural Engineering*, 129: 186–196, 2003.
- [78] Z. B. Haber, K. R. Mackie, and L. Zhao. Mechanical and environmental loading of concrete beams strengthened with epoxy and polyurethane matrix carbon fiber laminates. *Construction and Building Materials*, 26 (1): 604–612, 2012.
- [79] A. Peiris and I. Harik. Field testing of steel bridge girders strengthened using ultra high modulus (uhm) carbon fiber reinforced polymer (cfrp) laminates. In *The 6 th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, pages 13–15, 2012.
- [80] P. Soroushian and M. Elzafraney. Damage effects on concrete performance and microstructure. *Cement and Concrete Composites*, 26 (7): 853–859, 2004.
- [81] A. C. Aydin. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 21: 1149–1154, 2007.
- [82] V. C. Li. Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science*, 83: 660–686, 2002.

- [83] P. Garces, J. Fraile, E. Vilaplana-Ortego, D. Cazorla-Amoros, E. G. Alcocel, and L. G. Andion. Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 35: 324–331, 2005.
- [84] M. Ishioka, T. Okada, and K. Matsubara. Mechanical properties of vapor-grown carbon fibers prepared from benzene in linzâ€“donawitz converter gas by floating catalyst method. *Journal of Materials Research*, 7: 3019–3022, 1992.
- [85] M. Sahmaran and I. O. Yaman. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*, 21: 150–156, 2007.
- [86] O. A. Duzgun, R. Gul, and A. C. Aydin. Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Materials Letters*, 59: 3357–3363, 2005.
- [87] A. K Pandey and M. Biswas. Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of sound and vibration*, 169 (1): 3–17, 1994.
- [88] D. M. Bontea, D. D. L. Chung, and G. C. Lee. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement. *Cement and Concrete Research*, 30: 651–659, 2000.
- [89] P. W. Chen and D. D. L. Chung. Concrete as a new strain stress sensor. *Composites Part B-Engineering*, 27: 11–23, 1996.
- [90] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Uniaxial compression in carbon fiber-reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions. *Cement and Concrete Research*, 31: 297–301, 2001.
- [91] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions. *Cement and Concrete Research*, 30: 1289–1294, 2000.
- [92] X. L. Fu, W. M. Lu, and D. D. L. Chung. Ozone treatment of carbon fiber for reinforcing cement. *Carbon*, 36: 1337–1345, 1998.
- [93] X. L. Fu and D. D. L. Chung. Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, 27: 1313–1318, 1997.
- [94] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating. *Cement and Concrete Research*, 31: 665–667, 2001.
- [95] Q. Z. Mao, B. Y. Zhao, D. R. Sheng, and Z. Q. Li. Resistance chagement of compression sensible cement specimen under different stresses. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 11: 41–45, 1996.
- [96] F. Reza, G. B. Batson, J. A. Yamamuro, and J. S. Lee. Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15: 476–483, 2003.
- [97] J. Cao, S. Wen, and D. D. L. Chung. Defect dynamics and damage of cement-based materials, studied by electrical resistance measurement. *Journal of materials science*, 36 (18): 4351–4360, 2001.
- [98] S. Wen and D. D. L. Chung. Damage monitoring of cement paste by electrical resistance measurement. *Cement and concrete research*, 30 (12): 1979–1982, 2000.
- [99] B. Chen, J. Y. Liu, and K. R. Wu. Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading. *Cement and Concrete Research*, 35: 2183–2191, 2005.

- [100] A. Peled, J. M. Torrents, T. O. Mason, S. P. Shah, and E. J. Garboczi. Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites. *Acı Materials Journal*, 98: 313–322, 2001.
- [101] X. L. Fu, E. M. Ma, D. D. L. Chung, and W. A. Anderson. Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement. *Cement and Concrete Research*, 27: 845–852, 1997.
- [102] X. P. Shui and D. D. L. Chung. A piezoresistive carbon filament polymer-matrix composite strain sensor. *Smart Materials & Structures*, 5: 243–246, 1996.
- [103] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars. *Carbon*, 44: 1496–1502, 2006.
- [104] D. Y. Wu, S. Meure, and D. Solomon. Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Progress in Polymer Science*, 33: 479–522, 2008.
- [105] C. Q. Yang, Z. S. Wu, and H. Huang. Electrical properties of different types of carbon fiber reinforced plastics (cfrps) and hybrid cfrps. *Carbon*, 45: 3027–3035, 2007.
- [106] S. H. Wen and D. D. L. Chung. Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 45: 710–716, 2007.
- [107] M. Chiarello and R. Zinno. Electrical conductivity of self-monitoring cfrc. *Cement & Concrete Composites*, 27: 463–469, 2005.
- [108] S. H. Wen and D. D. L. Chung. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 44: 2130–2138, 2006.
- [109] R. F. Gibson. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite structures*, 92 (12): 2793–2810, 2010.
- [110] C. E. Bakis, L. C. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla, and T. C. Triantafillou. Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 6 (2): 73–87, 2002.
- [111] Y. Qingrui. Present status of research and application of strengthening and repairing technology with carbon fibre reinforced plastics (cfrp) and its outlook in china. *Industrial Construction*, 10: 004, 2000.
- [112] U. Meier. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. *Construction and Building Materials*, 9 (6): 341–351, 1995.
- [113] S. Saq’an, A. M. Zihlif, R. S. Al-Ani, and G. Ragosta. A study on the dc electrical properties of pan-based carbon fiber/polycarbonate composites. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 18: 1203–1209, 2007.
- [114] S. Saq’an, A. M. Zihlif, S. R. Al-Ani, and G. Ragosta. Thermoelectric power and ac electrical properties of pan-based carbon fiber composites. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 19: 1079–1085, 2008.
- [115] J. J. Chang, W. Yeih, and C. L. Tsai. Enhancement of bond strength for epoxy-coated rebar using river sand. *Construction and Building Materials*, 16 (8): 465–472, 2002.
- [116] D. G. Manning. Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North american experience. *Construction and Building Materials*, 10 (5): 349–365, 1996.
- [117] B. S. Hamad. Comparative bond strength of coated and uncoated bars with different rib geometries. *ACI materials journal*, 92 (6), 1995.

- [118] O. A. Kayyali and S. R. Yeomans. Bond and slip of coated reinforcement in concrete. *Construction and Building Materials*, 9 (4): 219–226, 1995.
- [119] B. Li, C-R. Zhang, F. Cao, S-Q. Wang, B. Chen, and J-S. Li. Effects of fiber surface treatments on mechanical properties of t700 carbon fiber reinforced bn-si3n4 composites. *Materials Science and Engineering: A*, 471: 169–173, 2007.
- [120] X. L. Fu, W. M. Lu, and D. D. L. Chung. Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix. *Cement and Concrete Research*, 26: 1007–1012, 1996.
- [121] X. Fu, W. Lu, and D. D. L. Chung. Improving the strain-sensing ability of carbon fiber-reinforced cement by ozone treatment of the fibers. *Cement and Concrete Research*, 28: 183–187, 1998.
- [122] Y. S. Xu and D. D. L. Chung. Carbon fiber reinforced cement improved by using silane-treated carbon fibers. *Cement and Concrete Research*, 29: 773–776, 1999.
- [123] Y. S. Xu and D. D. L. Chung. Silane-treated carbon fiber for reinforcing cement. *Carbon*, 39: 1995–2001, 2001.
- [124] T. Yamada, K. Yamada, R. Hayashi, and T. Herai. Adhesion at the interface between carbon fiber and cementitious matrix. In J. Stinson, R. Adsit, and F. Gordaninejad, editors, *36th International Symp and Exhibition of the Soc for the Advancement of Material and Process Engineering*, pages 362–371. Soc Advancement Material & Process Engineering, 1991.
- [125] T. Sugama, L. E. Kukacka, N. Carciello, and B. Galen. Oxidation of carbon fiber surfaces for improvement in fiber-cement interfacial bond at a hydrothermal temperature of 300°C. *Cement and Concrete Research*, 18: 290–300, 1988.
- [126] T. Sugama, L. E. Kukacka, N. Carciello, and D. Stathopoulos. Interfacial reactions between oxidized carbon fibers and cements. *Cement and Concrete Research*, 19: 355–365, 1989.
- [127] M. S. Ahmad, A. M. Zihlif, E. Martuscelli, G. Ragosta, and E. Scafora. The electrical conductivity of polypropylene and nickel-coated carbon fiber composite. *Polymer Composites*, 13: 53–57, 1992.
- [128] M. Sanchez, J. Rams, and A. Urena. Oxidation mechanisms of copper and nickel coated carbon fibers. *Oxidation of Metals*, 69: 327–341, 2008.
- [129] N. M. Rodriguez. A review of catalytically grown carbon nanofibers. *Journal of Materials Research*, 8: 3233–3250, 1993.
- [130] P. Chitrapu, C. R. F. Lund, and J. A. Tsamopoulos. A model for the catalytic growth of carbon filaments. *Carbon*, 30 (2): 285–293, 1992.
- [131] ASTM International. (2014). Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency (staðall númer ASTM C305-14). West Conshohocken, PA: Höfundur.
- [132] British Standard Institution. (2005). Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength (skýrsla nr. BS En 196-1). Sótt af <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000000483082>
- [133] Sunna Ólafsdóttir Wallevik, Kristján Friðrik Alexandersson, (2013). Notkun koltrefja í sementsbundnum efnum. Lokaskýrsla 2012-2013 fyrir Rannsóknarsjóð Vegagerðarinnar.



Reykjavík: Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Sótt af:

[http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Notkun_koltrefja_sement/\\$file/Notkun_koltrefja_sement.pdf](http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Notkun_koltrefja_sement/$file/Notkun_koltrefja_sement.pdf)

[134] S.M. Schexanayder, S. Das, J. Warren, D. West. CEMAC Clean Energy Manufacturing Analysis Center. (2016). Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis. *Energy and Transportation Science Division, Oak Ridge National Laboratory*. Sótt af: <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66071.pdf>