

Sement gærdagsins og dagsins í dag

Steinsteypa morgundagsins.

Eftir Pierre- Claude Aitcin

Cement and Concrete Research 30 (2000) 1349-1359

Lauslega þýtt: Guðmundur Guðmundsson

Úrdráttur:

Steinsteypa, mest notaða byggingarefnið í heiminum, er í stöðugri þróun. Nútíma steinsteypa er meira en eingöngu blanda af sementi, vatni og fylliefnum, nútíma steinsteypa inniheldur sífellt oftar ýmis steinefni, efnablöndur, trefjar o.s.frv. Auðvitað mun hinn almenni markaður vera áfram aðalmarkaðurinn fyrir hefðbundna steinsteypu en sérmarkaðir sem krefjast sérlausna („a la carte“), t.d. mun svonefnd „smartsteypa“ (smart concrete) þróast. Þróun smartsteypu verður við tilkomu nýrrar vísindapróunar steinsteypu og íblöndunarefna svo og notkun sértækrar mælitækni til þess að skoða innri gerð steypunnar jafnvel örbyggingu (nanostructure) hennar. Það er ekki sjálfgefið að nútíma sement standi miklu framur sementi fyrir 30 – 40 árum síðan. Hátt C_3S og C_3A innihald og hár Blain- fínleiki er ekki lengur nauðsynleg forsenda þess að framleiða steinsteypu með háum byrjunarstyrk, það þarf einfaldlega að lækka vatnssementstöluna eða vatns-bindiefna hlutfallið. Þrýstipól steypu er háð pökkun sementskornanna og sementsmagninu. Staðreynd er að steinsteypa íblönduð virkri mélu, melusteypa (reactive powder concrete) með 200 MPa þrýstipóli er gjarnan framleidd með grófu sementi sem hefur alls ekki hátt C_3S eða C_3A innihald þ.e. sement þar sem einfalt er að stýra þjáltninni. Staðlar sem gerðir voru þegar 20-25 MPa steypa var mest notuð eru ekki heppilegir til að meta sement sem nota á með „súper – þjálniefnum“ til þess að gera hágæðasteypu. Hingað til hefur allt of mikið verið lagt upp úr 28 daga þrýstipóli en ekki hugað nægjanlega að endingu steypunnar. Það er mjög þýðingarmikið að hanna steypublöndur sem viðhalda 28 daga styrk allan lífaldur mannvirkisins við þær aðstæður sem fyrir eru. Að lokum verður sement og steypa að þróast m.t.t umhverfisins með sjálfbærni í huga sem þýðir að ýmsum steinefnum verður í auknum mæli blandað saman við sementgjallið og jafnframt mun vatns-bindiefna hlutfallið lækka til að auka líftíma steypumannvirkja og lengja eins mikið og mögulegt er nýtingu bindiefna og steypufylliefna.

1. Inngangur:

Sement er ennþá nauðsynlegt efni í gerð steinsteypu en í vissum tegundum nútíma steinsteypu er það ekki lengur mikilvægasta efnið þar sem steypan er „samsett efni“ (composit material). Í samsettu efni er ómögulegt að ákveða hvaða einstakur efnispáttur er mikilvægastur því að í sjálfu sér hefur samsetta efnið eiginleika sem eru mjúkið betri en samanlagðir eiginleikar þeirra efnispáttanna sem mynda það.

Sem dæmi má nefna að í dæmisögunni um hinn blinda og hinn lamaða er ómögulegt að ákveða hvor þeirra er mikilvægari einstaklingur.

Nútíma steinsteypa er meira en einföld blanda af sementi, vatni og fylliefnum.

Nútíma steypa inniheldur sífellt meira af steinefnum (mineral components) sem gefa steypunni sérstaka eiginleika. Einnig eru þar efnablöndur sem hafa jafnvel enn meiri sértæk áhrif. Nútíma steinsteypa er orðin mjög flókin efnablanda þar sem kristölluð og ókristölluð steinefni koma við sögu, og það er ekki eingöngu malað sementgjall og gips sem hvarfast við lífræn sambönd. Þessi lífrænu efnasambönd eru sérstaklega gerð til þess að undirstrika sérstaka eiginleika steypunnar eða lagfæra vissa annmarka nútíma sements.

Það væri hrokafullt að halda að ekkert annað eigi eftir að uppgötvast á sviði steinsteypu. Steypuvísindin er aðeins byrjuð að þróast og búast má við að í framtíðinni verði þróaðar nýjar tegundir steinsteypu sem uppfylla betur ýmsar félagsfræðilegar þarfir. Og fyrsta spurningin er því: er sementsiðnaðurinn tilbúinn til að mæta slíkri þróun ?

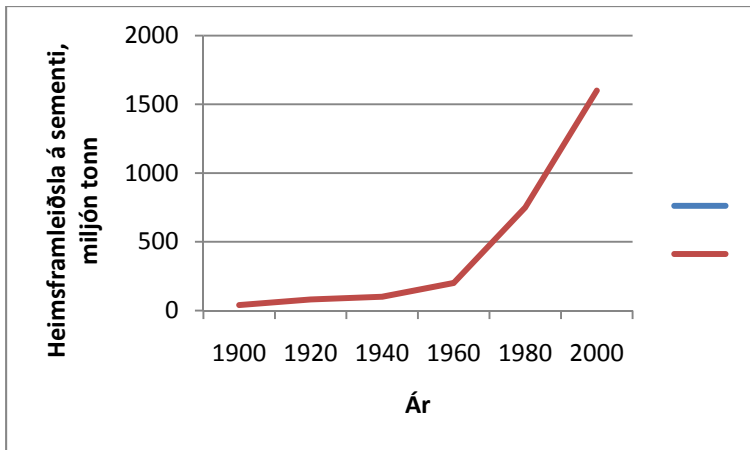
Þróun mismunandi steypugerða mun ekki endilega leiða til framleiðslu aukins fjölda af sementstegundum. En það mun krefjast þess að gæði sementsins verði miklu stöðugri en þau eru í dag. Í framtíðinni verður sement að uppfylla harðari gæðakröfur. Þróun hátækni-steinsteypu mun ekki endilega fela í sér heildar aukningu í sements- eða bindiefnisnotkun í rúmmetra af steypu þar sem bindiefnin verða nýtt betur. Í iðnaðarríkjum þýðir þetta að í besta falli sé mögulegt að framleiða meiri steypu með sama nagni af bindiefni.

Bindiefni framtíðarinnar munu innihalda minna sementsgjall þannig að sementsiðnaðurinn mun verða iðnaður vatnsbindiefna þ.e. iðnaður sem mun markaðsfæra fínt duftefni sem harðnar sé það blandað vatni. Áhugavert er að þessi aukna notkun á steinefnum öðrum en fínmöluðu sementsgjalli mun hjálpa sementsiðnaðinum við að uppfylla sum marmið sín hvað varðar sjálfbæra þróun sem stjórnvöld munu setja kröfur um. Það er þegar mjög mikilvægt að nútíma sementsiðnaður taki mið af þessu nýja hlutverki.

Önnur spurning sem vert er að spyrja er: er sementsiðnaðurinn í dag vel undirbúinn undir þessar miklu breytingar ?

2. Steinsteypa, mest notaða byggingarefni í heimi:

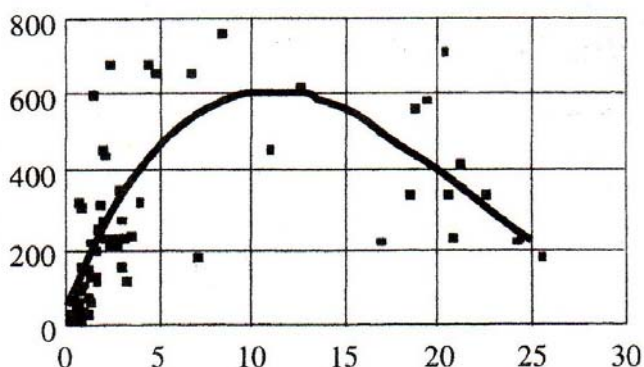
Samkvæmt upplýsingum frá Sambandi evrópskra sementsframleiðenda (Cembureau) var heildarnotkun á sementi í heiminum árið 1990 um 10 miljónir tonna. Árið 1998 var notkunin orðin 1.600 miljónir tonna. Ef gert er ráð fyrir að notuð séu 250 kg af sementi í m^3 af steypu voru framleiddir aðeins 40 miljónir m^3 af steypu árið 1900 en 6.400 miljónir m^3 árið 1997. Þetta er meira en 1 m^3 af steypu á hvern íbúa á ári eða meira en 2.5 tonn af steypu á mann á ári. Það er aðeins ferskvatn sem er notað í meira magni og mikið af því fer til spillis.



Mynd 1: *Heimsframleiðsla á sementi á tuttugustu öld (Cembureau)*

Á innan við einni öld hefur steisteypan orðið mest notaða byggingarefnið í heiminum. Samt sem áður ef við lítum nánar á mynd 1 þar sem þróun á framleiðslu sements er sýnd, sést að það er á seinni helmingi aldarinnar sem notkun sements fór að aukast svo hratt.

Að sjálfsögðu var það nauðsynlegt að byggja upp bæði í Evrópu og Japan eftir síðustu heimsstyrjöld en í henni skemmdust mörg mannvirki en tímabilið sem við tók einkenndist af aukinni borgamyndun í mörgum löndum ásamt aukinni velmegun. Sagnfræðingar og félagsfræðingar kenna okkur að þjóðfélagið verði ríkara og velmegun aukist með aukinni borgarvæðingu. Myndun borga hefur ávallt í för með sér þörf fyrir aukna mannvirkjagerð og þar af leiðandi aukna notkun á sementi: hús, skólar, sjúkrahús, leikhús, veitingahús, íþróttamannvirki, vatns- og skólpmannvirki og hreinsistöðvar, allt þarf þetta steinsteypu. Því er aukningin á sementsnotkun á síðari helmingi tuttugustu aldar mjög eðlileg.



Mynd 2: *Samband milli sementsnotkunar í kg/íbúa (y ás) og þjóðartekna á mann (x ás) í US \$ (x 1000)¹*

Mynd 2 sýnir að það er mögulegt að setja beint samband á milli notkunar sements og þjóðartekjur á íbúa en línuritið sýnir jafnframt að sementsnotkunin hættir að aukast

Þegar þjóðartekjur hafa náð vissu marki. Ýmsar skýringar eru á þessu: þróun borgarmyndunar hefur náð vissri metnun, mestur hluti nauðsynlegrar mannvirkjagerðar hefur verið byggður, tækniþróun hefur áhrif á betri nýting steinsteypunnar svo að þannig er hægt að uppfylla allar félagslegar þarfir með minna og minna efnismagni. Í dag eru markaðir fyrir byggingarefni mettaðir í öllum iðnvæddum löndum svo að einungis viðhald, endurnýjun og eðlileg framþróun er hinn drífandi kraftur við notkun þeirra.

Einu sementsmarkaðirnir sem gætu þanist út á næstu árum eru í vanþróuðu löndunum og það kallar á spurningar:

- Hver er framtíð sementsverksmiðja í iðnþróuðum löndum ?
- Munu iðnaðarlöndin verða sementsútflytjendur ?
- Munu þróunarlöndin fá fjármagn til að kaupa innflutt sement eða byggja sementsverksmiðjur til að sjá fyrir þörfum þeirra fyrir sement.

3. Framfarir í sementsiðnaði undanfarin ár:

Á undanförunum árum hefur sementsiðnaðurinn þróast mjög, sérstaklega á sviði framleiðslutækni og orkusparnaðar. Hér hefur samt sem áður síðasta orðið ekki verið sagt þrátt fyrir þá staðreynd að $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fasakerfið sé enn ráðandi í framleiðslu á Portlandsementi. Nú er þegar mögulegt að minnka verulega hitastigið í sementsofnunum bæði með betri mælitækni og einnig notkun sérstakra hvata (mineralizer)².

Með árunum hefur efnaferlið við gerð Portlandsements orðið sífellt flóknara og tæknilegra. Ferillinn er ekki eins grófur og þarfnast aðstoðar viðamikils tölvubúnaðar til þess að standa undir sértækum stýrikerfum. Þetta kallar á starfsfólk með sérþekkingu sem ekki er alltaf til staðar í þróunarlöndum.

Að auki hafa athyglisverðar framfarir orðið hvað varðar sjálbæra þróun og sumar sementsverksmiðjur hafa útrýmt ýmsum umhverfisspillandi efnum og úrgangi³.

Sumar sementsverksmiðjur eru þá þegar farnar að fá upp í framleiðslukostnað, þar sem þeim er greitt fyrir að útrýma úrgangi. Þetta kallar á enn eina spurningu: er sementsiðnaður grænn iðnaður ?

Það eru samt sem áður sum atriði í þróun sementsiðnaðarins sem ekki eru jafn góð í tæknilegu tilliti og verður fjallað um það síðar í greininni.

4. Framkoma steypuvísinda:

Á síðastliðnum 30 árum hafa vísindi um steinsteypu þróast og laða nú að sér alvöru (pure) vísindamenn. Steinsteypa er nú ávöxtur einfaldrar tækni en einnig flókin vísindi sem menn eru að ná tökum á, þó ekki í öllum einstökum atriðum. Staðreynd er að hörðun nútíma steinsteypu verður til við efnahvarf milli ókristallaðra eða kristallaðra steinefna, vatns, meira eða minna flókinna lífrænna efnasambanda og í sumum tilfellum ólífrænna salta. Í dag eru rannsóknir á steinsteypu framkvæmdar með hjálp háþróaðrar skoðunartækni og mælitækni og þannig bætum við þekkingu

okkar á steypuþækninni. Við getum meira að segja þróað nýja möguleika til notkunar steypunnar á sviðum sem ekki var unnt að sjá fyrir á árum áður.

Sem dæmi má nefna að þegar ég um 1970 fór að hafa áhuga á steinsteypu sem þá var nefnd hástyrkleikasteypa, þá var ég langt frá því að ímynda mér að hæsta bygging í heimi yrði úr steinsteypu byggð í Malasíu (Petronar-turninn). Þá var ég langt frá því að gera mér í hugarlund að 1998 myndi dýpsti borturninn í Noregi (Troll plattform) vera gerður úr steinsteypu og þetta mannvirki var hærra en Eiffel turninn. Og það var langt frá því að ég gæti ímyndað mér að 1998 væri hægt að gera málusteypu (reactive powder concrete) sem hefði meira þrýstipól en byggingastál. En það verður að líta á þessar ótrúlegu framfarir í þróun steinsteypu fremur í ljósi framfara í notkun íblöndunarefna en framfara í þróun á framleiðslu sements eins og fram kemur í næsta kafla.

4.1 Nýlegar framfarir á sviði íblöndunarefna (admixtures):

Hugmyndin að íblöndunarefnum í steinsteypu er ekki ný af nálinni. Í bókum fornromverja kemur fram að múrarar þeirra tíma notuðu eggjahvítu og blóð í steypuna⁴ og nú getum við útskýrt það þar sem blóðrauði (hemoglobin) virkar mjög tvístrandi (dispersant) á sementskorn.

Seinni tíma uppgötvun á jákvæðum áhrifum vissra lífrænna sameinda á sérstaka eiginleika steypu var oft tilviljunarkennd en nú má útskýra áhrifin vísindalega.

Í langan tíma hefur tæknin við þessar efnablöndur verið sérsvið fárra fyrirtækja sem hafa haldið henni hjá sér sem vel geymdu leyndarmáli. Mitt álit er að þetta sé svið sem hafi allt of lengi ekki náð athygli sementsframleiðenda. Það verður líka að segjast að framleiðendur íblöndunarefna eru og hafa alltaf verið mjög klárir að auglýsa sig sem sambærilegan iðnað til hliðar við sementsiðnaðinn, iðnað sem sé tengdur steypuðnaðinum en ekki sementsiðnaðinum. Ég er sannfærður um að þessi viðleitni að tengjast ekki sementframleiðendum hefur valdið heitum eins og „vatnssparar“ eða „sementssparar“ til þess að lýsa lífrænum efnasamböndum sem steypuframleiðendur nota til að framleiða steypu með vissri þjálni með minna vatni - en einnig með minna sementi.

Auðvitað er það þekkt, síðan Feret og Abrams settu fram kenningar og vitnað er í hjá Neville⁵ að það er ekki sementsmagnið sem ávarðar styrk og endingu steypunnar heldur hlutfallið milli magns sements og vatns. Lögmál Ferets frá 1905 en enn í gildi jafnvel fyrir hágæðasteypu þar sem ekki er nóg vatn til að vatna (hydrate) öll sementskornin í steypunni⁶.

Því miður hafa framleiðendur íblöndunarefna verið árangursríkir við að auka leyndarhjúp kring um notkun þessara efna með því að þróa ónauðsynlega flókna og sérkennilega iorðafraði (terminology). Slíkar efnablöndur eru ekki leyndardómsfull efnasambönd , virkni þeirra byggist á lögmálum eðlis- efna- og varmafræði og skv. Dodson⁷ eru aðeins fjórar tegundir af íblöndunarefnum:

1. sem tvístra (disperse) sementskornum
2. sem stjórna vötnunarhraða

3. sem hvarfast við efni sem myndast við vötnun
4. sem aðeins virka efnislega (physical action).

Til þess að halda markaðshlutdeild hafa framleiðendur íblöndunarefna orðið að takmarka verð á efnunum til þess að geta sýnt steypuframleiðendum fram á að frá efnahagslegu sjónarhorni sé hagkvæmara að nota íblöndunarefnin fremur en auka sementmagnið til þess að ná gefnu þrýstipóli í steypuna. En í hvert skipti sem slíkir útreikningar eru gerðir kemur auðvitað í ljós sama hvað steypuframleiðendur segja að Portlandsement er ekki svo dýrt efni. Í upphafi þróunarinnar hófu framleiðendur íblöndunarefna þess vegna að nýta áhugaverða eiginleika úrgangsefna frá iðnaði. Þessi fyrsti áfangi var markaðssetning á „vinsol resin“ sem loftblendiefni og „lignósúlfónötum“ sem vatnsspara, bæði þessi efni voru afgangsefni í trjá- og pappírsiðnaði.

Í kring um 1970 uppgötvaðist um svipað leyti bæði í Japan og Þýskalandi^{8,9} einstakir tvístrunareiginleikar (dispersing properties) nokkurra plastefna (synthetic polymers) sem nú ganga undir nafninu „súper“þjáliefni eða hágæða vatnssparar og þessi efni gjörbreyttu þróuninni á íblöndunarefnamarkaðinum. Í fyrsta skipti voru hrein efnasambönd framleidd sem íblöndunarefni fyrir steypu, efni sem voru miklu dýrari en lignósúlfónöt en miklu öflugri. Sé lignósúlfónat notað sem vatnsspari er í besta falli hægt að minnka steypuvatnið um 8-10% (og að sjálfsögðu sementsmagnið um svipaða tölu) þegar gerð er steypa með 100 mm sigmáli (lágmark til þess að geta titrað steypuna með góðu móti). En með notkun súperþjáliefna var mögulegt að framleiða steypu með 200 mm sigmáli við hvaða v/s tölu sem var. Þetta var einmitt steypan sem steypuverktakar höfðu svo lengi beðið eftir. Jafnvel hágæðasteypu með mjög lágri vatnssementstölu er nú hægt að framleiða með 200-250 mm sigmáli þó að v/s hlutfallið sé svo lágt að vatnið nær ekki að vatna öll sementskornin og þessa steypu þarf ekki að titra í mót.

Fimmtán ár hefur þurft til að súperþjáliefni hafa náð festu á markaðnum og segja má að þau séu enn ekki nýtt eins oft og æskilegt væri. Hinir einstöku eiginleikar súperþjáliefnanna eru upphafið að því að mjög skjótt reyndist mögulegt að skilja takmörk lignósúlfónatanna og yfirburði súperþjáliefnanna. Við vitum nú hvers vegna það er mjög erfitt að setja meira en 1 l. af lignósúlfónat-vatnsspara í 1 m³ af steypu³ án þess að verða var við neikvæð áhrif frá óhreinindum í lignósúlfónatinu, jafnvel þó að það sé mögulegt að setja 15 l af súperþjáliefni í hágæðasteypu og allt að 40 l í méléusteypu (reactive powder concrete)¹⁰ í sama magn af steypu.

Þegar íblöndun súperþjáliefna til þess að minnka v/s hlutfallið í hágæðasteypu hófst komust menn að því að sumar sementstegundir og súperþjáliefni eiga ekki saman (incompatible) og ekki var mögulegt að taka út vatnssparann og bæta við sementi og vatni til þess að leysa vandann¹¹. Það reyndist nauðsynlegt að fá skilning á hvers vegna þessi vandamál voru með einu sementi eða súperþjáliefni en ekki öðru.

Nýjustu rannsóknir á íblöndunarefnum þróast hratt en varúðar skal gætt þar sem við skiljum í mörgum tilfellum ekki nægjanlega vel efnaferlana milli sements og súperþjáliefna. Við vitum hvernig framleiða má steypu í stórum stíl með 150 MPa

þrýstipoli. Í steypu af þessari styrkleikagráðu er grófasta fylliefnið í steypunni veikasti hlekkurinn og með því að taka út grófa efnið er hægt að gera málusteypu sem hefur 200 MPa þrýstipól. Og það er aðeins nauðsynlegt að koma þessari steypu í þunn rör úr ryðfriú stáli til þess að ná 375 MPa þrýstipól og sé sandhlutanum í steypunni skipt út fyrir málmínu er hægt að koma þrýstipólinu upp í 800 MPa¹².

Steypa með þrýstipoli 1000 MPa (1 GPa) er ekki lengur draumur heldur gæti orðið veruleiki á 21 öldinni.

Svo hvaða framfarir hafa orðið á steypunni síðustu 30 ár án afgerandi breytinga á eðli Portlandsementsins ?

4.2 Framfarir við skoðun á innri byggingu (microstructure) og örbyggingu (nanostructure) steypunnar

Ýmsar aðrar mikilvægar framfarir hafa orðið í steyputækni með tilkomu og notkun vísindalegra rannsóknaaðferða og nýrrar tækni við að kanna innri gerð steypunnar og það nýjasta örbyggingu hennar. Notkun rafeindasmásjár hefur leikið aðalhlutverk í þessum nýju steypu- og íblöndunarefna-rannsóknum. Það er mögulegt að skoða og skilja áhrif sértækra íblöndunarefna á innri gerð steypunnar. Með því að nota þessa sérstöku skoðunartækni hefur reynst mögulegt að stýra og halda utan um þróun steyputækninnar fremur en halda áfram með tilraunum að finna lífræn efnasambönd með nýtanlegum eiginleikum. Ytri gerð steypunnar er náið tengd innri gerð hennar. Rafeindasmásjain (SEM = scanning electron microscope) er nú orðin nauðsynlegt tæki til þess að rannsaka nútíma steypu en því má þó ekki gleyma að góð ytri skoðun steypunnar eða skoðun undir venjulegri smásjá með „pólariseruðu“ eða venjulegu ljósi er ennþá nauðsynleg.

SEM smásjain er ekki aðeins tæki sem gerir fagar myndir, hún er tæki sem gerir okkur kleyft að skilja betur þá eiginleika steypunnar sem eru ekki sjáanlegir.

Fyrsta notkun segulendurkasts (magnetic resonance) til að rannsaka örbyggingu steinsteypu er mjög uppörvandi og hefur þegar skilað miklum áföngum í skilningi á eðli kalsíumsilikathydratanna (calcium silicate hydrat) sem myndast við vötnun sementsins og eru enn táknuð á óljósan hátt sem C-S-H þar sem við höfum ekkert betra til að lýsa þeim. Við erum farin að skilja betur það sem við vitum þegar um innri byggingu silisium-súrefnis-tetraedersins og ál-súrefnis-oktaedersins eða magnesíum-súrefnis- oktaedersins í kaolíni og asbesti (chrysotile asbestos), tveim efnum náskyldum C-S-H þar sem kaolín er ál-silikat-hydrat og asbest er magnesíum-silikat-hydrat.

5. Sement gærdagsins og í dag:

5.1 þróun eiginleika þess:

Sement gærdagsins var yfirleitt ekki eins fín malað og innihélt ekki eins mikið af C_3S og nútíma sement. En þetta er ekki eini munurinn. Aðrir eiginleikar sem minna ber á eru tækniuga mikilvægir. Áður en þeir verða ræddir er rétt að huga að þeim tveim

fyrst nefndu. Það er sennilega vegna þrýstings frá verktökum að sementsframleiðendur ákváðu að auka fínleika og C_3S innihald sementsins í því augnamiði að gera verktökunum kleyft að fjarlægja steypumót eftir skemmri tíma og auka þannig samkeppnishæfni þeirra.

Persónulega get ég ekki fallist á þessi rök þar sem ég get ekki skilið hvernig samkeppnishæfni verktaka batnar við að sementsframleiðendur bjóða þeim fínna sement með hærri C_3S innihaldi. Þessi afstaða hefur jafnvel haft neikvæð áhrif á sementsiðnaðinn því að þessi nýju sement ná hærri 28 daga þrýstipoli jafnvel með minna sementi en þetta 28 daga þrýstipól er aftur á móti fengið á kostnað minni endingar.

Sementsframleiðendur ættu fremur að spyrja sjálfan sig alvarlega að því hverjir eru kostir og ókostir þess að auka yfirborð og C_3S innihald sementsins við steypugerð. Það eru margar aðrar miklu hættuminni aðferðir til að auka þrýstipól steypu. Auðvitað er aukning á fínleika og C_3S í sumum tilfellum réttlætunleg t.d. í steypu í mildu loftslagi en í mörgum tilfellum hefur aukning á fínleika og C_3S haft hörmulegar afleiðingar í för með sér þegar steypa er útsett fyrir óblíðum umhverfisaðstæðum. Í reynd er það svo að þegar sement með háum fínleika og háu innihaldi af C_3S er notað má ná hærri 28 daga þrýstipoli með hærri vatnssements-tölu. Í heimild frá Wischers¹³ kemur fram að í Englandi um 1960 var hægt að gera 30-35 MPa steypu með því að nota 350 kg af sementi í m^3 af steypu með v/s tölu 0.45. Árið 1985 var hægt að framleiða 30-35 Mpa steypu með aðeins 250 kg af sementi í m^3 og v/s tölu 0.6. Fyrir hönnuð sem reiknar burðarþol er steypa í báðum tilfellum sambærileg. En sé innri gerð steypanna skoðuð kemur í ljós að þéttleiki (porosity and permeability) þeirra er gjörólíkur. Steypa með v/s tölunni 0.6 mun taka hraðar upp CO_2 (karbonate) en steypa með v/s tölunni 0.45 og mótstaða gegn sjávarvatni, frostáhrifum og afsingarsöltum verður minni og þar með ending steypunnar. Þegar steypa er útsett fyrir hörðum umhverfisáhrifum er það v/s hlutfallið sem veldur endingu hennar en ekki þrýstipolið. Það verður þó að viðurkenna að við sama fínleika og sama C_3S innihald byggist þrýstipolið á v/s tölunni en þetta er ekki lengur gilt ef fínleikinn og C_3S er ekki sá sami.

Þess vegna var hið gamla góða sement gærdagsins sem var grófara og hafði minna C_3S notað til að gera steypu þar sem þrýstipolið hélt áfram vaxa eftir 28 dagana, þar sem aftur á móti nýja sementið hefur náð öllum sínum styrk eftir 28 daga. Fyrir hönnuðinn og sementsframleiðandann eru þessi sement jöfn en fyrir eigandann þar sem viðhald og ending er aðalatriðið er gamla steypa þegar allt kemur til alls miklu sterkari og endingarbetri en 28 daga þrýstipolið gaf til kynna.

5.2 Staðlar.

Portlandsement er mjög flókið efnasamband samsett af a.m.k. fimm aðalefnum (fösum). Fasarnir fimm eru: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF og kalsíumsúlfat (gips). Sementið er framleitt úr mjög einföldum hráefnum sem innihalda auk efnasambandanna SiO_2 , CaO , Al_2O_3 og Fe_2O_3 minna magn af öðrum oxíðum sem mynda minni háttar (minor) fasa í sementinu. Þessir minni fasar eru mismunandi frá

einu sementi til annars. Með tilliti til þessara fasa í samsetningu sementins er það undirstöðu atriði að viðkomandi sement uppfylli staðalkröfur svo að það sé mögulegt að framleiða úr því steypu með fyrirsjáanlega eiginleika sem uppfylla þær kröfur sem gerðar eru til steypunnar.

Prófanir sem gerðar eru á múrblöndum eða hreinni sementsefju með v/s tölu 0.5, sem er almenn og allt að því alls staðar notuð prófunaraðferð, hafa löngum verið öruggar hvað v/s hlutfallið snertir þar sem mestur hlutur iðnaðarsteypu er með v/s hlutfall hærra en 0.5 en nú er það ekki lengur svo. Þjálni steypu með lágru v/s tölu er ekki lengur háð eingöngu vatnsmagni eða kornalögun grófa fylliefnisins heldur frekar því sem nú er nefnt samrýmanleiki (compatibility) milli sements og

íblöndunarefnanna sem notuð eru. Þetta vekur mjög mikilvægar spurningar:

Eru þeir staðlar sem nú eru notaðir til að prófa sement aðlagðir að þeirri steinsteypu sem nú er í notkun? Erum við að mæla réttu eiginleikana?

Svar mitt er já ef að langtíma markmið sementsiðnaðarins er að byggja þróun sína á steypu með 20 Mpa þrýstipóli. Svar mitt er nei ef langtíma markmiðið er að þróa steypuna til notkunar í „súper“steypur (smart concrete) sem verða að mæta samkeppni við önnur byggingarefni og halda markaðnum.

5.3 Sement, íblöndunarefni/ samrýmanleiki (compatibility)

Að sögn steypuframleiðenda og verktaka komu vandamál vegna samrýmanleika milli sements og vatnsspara (lignosulfonate) fram fyrir nokkrum árum. Samt ekki eins oft og með nútíma súperþjálniefnum. Samt eru vísindarannsóknir um þetta vandamál samrýmanleika mjög af skornum skammti. Það virðist sem það hafi ekki fengið næga athygli framleiðenda sements- og íblöndunarefna. Þar að auki var, að í hvert skipti sem lausn var í sjónmáli (í flestum tilfellum var um að ræða útskipti eða að sleppa íblöndunarefninu), hafði enginn áhuga á að vita hvað hefði komið fyrir. Í hinum fáu heimildum sem finnast (Ranc¹⁴ og Dodson og Hayden¹⁵) virðist að oft hafi hátt innihald af anhydriði (anhydrite=afvatnað gips) í kalsíumsúlfatinu (kalsíumsúlfat, CaSO_4 , = gips) verið talin orsök. Auðvitað geta sementsframleiðendur uppfyllt kröfur um SO_3 - innihald núverandi staðla með því að bæta í sementið gipsi eða blöndu af gipsi og anhydriði en svo virðist að þegar hlutur anhydriðsins verður of hár og notað er lignósúlfónat þá lækki uppleysanleiki súlfatsins í gipsinu umtalsvert (Ranc¹⁴).

Tíðni vandamála vegna ósamrýmanleika hefur aukist mjög mikið með notkun súperþjálniefna í hágæðasteypu með lágu v/s hlutfalli eða vatns- bindiefna hlutfalli þ.e. vatns-bindiefna hlutfalli miklu lægra en í hinum ginnheilögu stöðlum. Í slíkum tilfellum er ekki lengur mögulegt að leysa vandamálið með því að taka út súperþjálniefnið , það varð nauðsynlegt að skoða málið nákvæmar. Auðvitað er þetta vandamál ekki enn mikilvægt fyrir sementiðnaðinn í dag . Það er mikið mikilvæga fyrir íblöndunarefnaíðnaðinn því að hágæðasteypa er mjög lofandi markaður, nokkrir lítrar af íblöndunarefni er notað í hvern m^3 af hágæðasteypu. Þó að þetta sé ekki almennt vandamál fyrir sement eða íblöndunarefni hefur það þó dregið til sín athygli íblöndunarefnaframleiðenda og einnig sumra háskólarannsakenda sem eru að reyna

að skilja undirstöðuatriðin. Þessi sterki áhugi á að skilja og leysa vandamálið um samrýmanleikann er svo ég best veit ein af ástæðunum fyrir auknum rannsóknum á íblöndunarefnum.

Þó að við skiljum ekki til fullnustu hvernig súperþjálnefni virka með öllum sements- og súlfatfösum í Portlandsementi þá höfum við fundið í vissum tilfellum nokkrar praktískar lausnir á vandanum um ósamrýmanleikann. Tvískömmtum er ein af þessum aðferðum. Hún felst í því að bæta þjálnefninu í tveim skömmtum, í fyrra skiptið í byrjun hrærslu og seinna skiptið við lok hrærslu eða rétt fyrir niðurlögn. Við getum einnig bætt við í litlu magni seinkara eða smávegis af natríumsúlfati. Samt sem áður eru enn vandamál með sement/súperþjálnefni samsetningar sem eru óleyst.

Í raun er það svo að hafi SO_3 innihald nútíma sements og sements fyrri tíma ekki breyst gildir þetta ekki fyrir SO_3 innihald sementsgjallsins. Ekki fyrir löngu síðan var SO_3 innihald sementsgjallsins kring um 0.5% en getur farið upp í 1.5% eða hærra í vissum tilfellum (gildi allt að 2.5% eru þekkt). Þar sem hámarksgildi SO_3 í sementi skv. staðli er ennþá 3.5% eru sumum sementsframleiðendum takmörk sett hversu miklu magni af kalsíumsúlfati (gips) þeir geta bætt í sementið við mölun.

Nýlegar rannsóknir við háskólann í Sherbrook gerðar af Jiang o.fl.¹⁶ virðast sýna að hvað steypuflæði varðar sé til hagstæðasta gildi fyrir uppleysanlegt alkalímagn í sementi. Þetta hagstæðasta alkalímagn næst ekki hjá mörgum nútíma sementstegundum. Til þess að þóknast aðilum, sem fyrirskrifa notkun láalkalísements til að forðast oft ímyndaða alkalíþenslu í steypunni, selja sementsframleiðendur oft sement með óþarflega lágu alkalíinnihaldi.

Annað vandamál sem getur valdið óþægindum á næstu árum er áhrif SO_3 innihalds á seinkun ettringit- myndunarinnar (ettringit er efni sem myndast við vötnun sementsins). Margir vísindamenn sem stunda rannsóknir á alkalívirgni, en áhugi á henni virðist fara dvínandi, hafa skipt yfir á rannsóknir á ettringit- seinkun.

6.Steypa gærdagsins og í dag:

6.1 Verslunarvara eða sérvara:

Lengi vel framleiddi steypuiðnaðurinn og hönnuðir fyrirskrifuðu alhliða steinsteypu með þrýstipoli milli 15 og 25 MPa sem var nógu góð undir öllum kringumstæðun . Með árunum hefur þrýstipól steypunnar í mörgum löndum vaxið nokkuð svo að í dag hefur mannvirkjasteypa í mörgum iðnaðarlöndum þrýstipól milli 25 og 30 MPa. Þetta þýðir ekki að 20 MPa steypa sé ekki lengur notuð en það eru mörg tilfelli þar sem hönnuðir þurfa á steypu að halda sem er sterkari en 20 MPa (gangstéttar, undirstöður o.s.frv.) en stöðugt fleiri mannvirki eru byggð með sterkari steypu. Á áttunda áratugnum var farið að fyrirskrifa steypu með hærra þrýstipoli (40-50 MPa) í súlur fyrir háhýsi þar sem grannar súlur veittu meiri byggingarfræðilega möguleika og meira búseturými¹⁷. Í árána rás hefur nafnið á þessari hástyrkleika- steypu breyst í hágæðasteypu því að ljóst var að þessi steypa hafði fleira til síns ágætis en háan styrk. Þessi steypa var í fyrstu notuð utan dyra og

varð þá fyrir meiru umhverfislegu álagi svo sem í borpöllum, brúm, vegum o.s.frv. Smám saman varð mönnum ljóst að markaðurinn fyrir þannig steypu var ekki eingöngu markaður fyrir háan styrk heldur einnig markaður fyrir endingargóða steypu sem nú spannar um einn þriðja af heildarmarkaðnum fyrir steypu.

Svo hefur komið í ljós að þessi tegund steypu er umhverfisvænni en venjuleg steypa miðað við núverandi stöðu tækninnar þar sem með henni er mögulegt að ná nægilegum byggingarstyrk með minna sementi og í sumum tilfellum með aðeins einum þriðja af fylliefnum sem nauðsynleg eru til að gera venjulega steypu. Þar að auki má áætla endingartíma hágæðasteypu tvisvar til þrisvar lengri en með venjulegri steypu. Svo má endurnýta hágæðasteypu tvisvar til þrisvar sinnum áður en hún er notuð t.d. sem fyliefni í undirbyggingu vega þegar mannvirkid hefur lokið hlutverki sínu. Háagæðasteypa sem er einfaldlega steypa með lágri v/s tölu eða lágu sements/bindiefnahlutfalli (s/b tala) er hagkvæm steypa frá stofnkostnaðarsjónarmiði því að það er mögulegt að byggja sambærilegt mannvirki með minni mótasmíði, minni steypu og minna af bendistáli. Samgönguráðuneytið í Quebec fylki hefur reiknað út að stofnkostnaður steinsteyptar brúar með 50-60 MPa steypustyrk er 8% minni en samsvarandi brú með 35 MPa steypustyrk án þess að tekið sé tillit til lengri endingar brúarinnar¹⁸.

Viðurkenning á hágæðasteypu er hægfara en notkun hennar eykst stöðugt og það mun halda áfram í byrjun 21. aldarinnar þar sem hönnuðir og eigendur munu átta sig á endingu og virði þessarar steypu.

Auðvitað er hágæðasteypa ekki það undur að hún stöðvi þróun annars konar steinsteypu. Háagæðasteypa hefur sín takmörk en hún er endingargóð og gefur hönnuðum og arkitektum möguleika sem ekki eru fyrir hendi hjá venjulegri steinsteypu. Til hliðar við þróun hágæðasteypu sést nú örlla fyrir nýjum hátækni steypugerðum sem eru að yfirtaka sérmarkaði eins og trefjasteypa, þjöppuð þurrsteypa og mëlusteypa (reactive powder concrete). Allar þessar steypugerðir eru hannaðar fyrir sérmarkaði þar sem samkeppni er lítil. Aðeins alvöru fyrirtæki eru á þessum mörkuðum og eru tæknilega sérhæfð. Þar sem þau geta útvegað sérhæfða hátæknisteypu hafa þau einnig möguleika á að afhenda mikið magn venjulegrar steypu í viðkomandi mannvirki.

Það er augljóst að þessi stutti listi yfir sérstakar steypugerðir er ekki tæmandi og hann mun vaxa hratt með tímanum því að það mun verða sífellt áhugaverðara að bjóða verktökum glæsilegri, endingarbetri og hagkvæmari lausnir en hægt er að fá með notkun 20-30 MPa steypu. Þróun BOOT verkefna (build, own, operate and transfare = byggja, eiga, reka og afsala) mun án efa hraða þessari þróun í átt að sérmarkaði og áhugavert er að í sumum tilfellum gæti komið í ljós að sumar þessar steypugerðir gætu gagnast mörkuðum sem þær voru ekki hugsaðar fyrir í upphafi. T.d. er hægt að vitna í gerð sjálfútleggjandi steypu sem þróuð var í Japan í því skini að auðvelda niðurlagningu í þröng byggingamót en er nú einnig farið að nota sem „hljóða“ steypu (silent concrete, noiseless concrete) þar sem hægt er að leggja hana niður hvenær sem er sólarhringsins án þess að trufla umhverfið af því að hún þarfnast ekki titrunar. Þannig steypa er notuð í forsteyptar einingar, þær verksmiðjur eru hljóðlátari en diskótek.

6.2 Styrkur eða ending

Hönnun steyptra mannvirkja er framkvæmd af byggingarverkfræðingum, verkfræðingum sem vita það eitt um efnið hver 28 daga styrkur þess er en skilja lítið mikilvægi endingar steypunnar.

Þekking á 28 daga styrk steypu er auðvitað grunvallaratriði til þess að reikna út öryggi bygginga en það er nauðsynlegt að vita með vissu að viðkomandi steypa muni halda styrk sínum allan líftíma mannvirkisins. Því miður sýna mörg dæmi að steypa með nægum 28 daga upphafsstyrk hafði misst niður notagildið vegna umhverfisáhrifa sem steypan þoldi ekki eða hún var ekki rétt lögð niður eða aðhlúun hennar var ábótavant. Það er ekki nauðsynlegt að nefna slík dæmi til þess að finna ásæðuna fyrir lélegu áltí almennings á steypunni, það er nóg að horfa á lélegt útlit margra mannvirkja eða fjölmargra viðgerða sem krefjast mikils tíma og peninga. Það er leitt að þurfa að brjóta niður svo mörg mannvirki sem hafa ekki náð nema helmingi þess aldurs sem þeim var ætlaður svo ekki sé minnst á þann ógnarháa samfélagslega kostnað (umferðartafir, tímamissir, mengun o.s.frv.) sem því fylgir.

Sementsiðnaðurinn greiðir hátt gjald fyrir þessi mistök og í stað þess að hagnast á hagstæðum kostnaði sem fylgir nýjum byggingum þar sem sement er notað þá er fjármagnið notað í viðgerðir sem þarfnast lítils efnis en mikillar vinnu. Verktökum er sama um þetta, því að í báðum tilfellum er verkið sem vinna skal peningalega séð svipað.

Margar byggingareglur (codes) taka nú fremur tillit til endingar steypunnar en styrkleika hennar þegar valin er steypa í mannvirki. Það var líka kominn tími til. Vandamál vegna bílageymslu sem byggð var í Kanada með 20 MPa steypu olli steypu- og sementsiðnaðinum miklum vandræðum þar sem steypan var ekki frostþolin og flagnaði. Upptaka CO₂ (carbonation) í 20 MPa steypu í Evrópu kostar sementsiðnaðinn þar mikið fé, svo er einnig um áhrif sjávar á steypu í Austurlöndum nær (Middle East)

Svo er nauðsynlegt að búast við hraðara niðurbroti í framtíðinni á mannvirkjum bæði úr steinsteypu og kalki sérstaklega í borgum vegna mengunar andrúmsloftsins. Inn í óþéttri 20 MPa steypu er heil veröld af örverum. Bakteríur, sýklar, mosi og fléttur þrífast vel í holrými steypunnar. *Thiobacillus ferrooxidans* - bakterían þarfnast kalsíumsúlfats til að þrífast. Kalsíumsúlfatið er til staðar vegna áhrifa súrs regns á kalk eða steypu en þessi baktería framleiðir sem aukaafurð brennisteinssýru sem leysir upp steypuna og myndar meira kalsíumsúlfat.

Hágæðasteypa sem er mikið þéttari og stenst betur áhrif mengunarinnar og þetta mun verða ein af ástæðunum fyrir því að notkun hennar vex í framtíðinni. Hvað varðar hærri styrk sem er aðalsmerki hágæðasteypunnar þá verða hönnuðir að finna bestu leiðina til að nota hann á hagkvæman hátt.

Eftir að hafa unnið við BOOT verkefnið hef ég séð að ef verktaki verður að reka mannvirki í 25-30 ár og ábyrgjast 100 ára líftíma þá mun hann ekki að hika við að ákveða þau steypugæði sem hann notar, hann notar hágæðasteypu.

6.3 Keppnin um fleiri MPa:

Þó að þrýstipól steinsteypu sé ekki aðaleiginleiki hennar þar sem það er endingin, verður að leggja áherslu á að þessir tveir eiginleikar eru tvinnaðir saman. Sú ofuráhersla sem lögð var á þrýstipól í stöðlum og hversu auðvelt var að mæla það getur skýrt hvers vegna aukinn styrkur hefur svo mjög notið stöðugar athygli. Sífellt tilkynna vísindamenn að þeim hafi tekist að framleiða steypu með mjög háu þrýstipóli en það verður að viðurkennast að öll þessi viðleitni endar í mjög fáum iðnaðartækifærum með undantekningu af t.d. DSP (densified cement/ultra-fine particle –based material = efni úr þéttu sementi byggt á örfínnum kornum) sem þróað var af Bache¹⁹ svo og RPC (reaktive powder concrete = málusteypa sem þróuð var af Richard og Cheyrezy¹² en þessi steypa var fyrst notuð við byggingu göngubrúar í Sherbrook²⁰ .

Á hverjum degi eru stúdentar mínir að gera steypu með 400 MPa styrk og nota við það einfaldar aðferðir. Pierre Richard hefur fyrir sitt leyti tekist að gera 800 MPa steypu með því að nota málmínu svo að 1000 MPa steypa er ekki lengur nein „útópía“. Hver er framtíð slíkrar steypu sem hefur þrisvar sinnum meira þrýstipól en stál ? Enginn veit það en ég er sannfærður um að á þessari öld verður hún gerð og e.t.v. notuð. Mikilvægi þéttrar fylliefnabyggingar, mikilvægi réttar hitameðferðar og fleiri aðgerðir eru þekktar. Skapandi vinna Pierre Richard hefur verið að færa þessa vel þekktu tækni til einfalds vegar.

Auðvitað er verð á 1 m³ af steypu með virkri mélu skelfilegt í augum margra verkfræðinga sem bera það saman við verð á venjulegri steypu eða hágæðasteypu. Samt sem áður þarf að athuga að einingaverð þessarar steypu á ekki bera saman við 1 m³ heldur 1 tonn af efni. Málusteypu á að bera saman við stál en ekki venjulega steypu eða hágæðasteypu.

Þegar göngubrúin í Sherbrook var byggð var efniskostnaðurinn við gerð 200 MPa steypunnar áætlaður gróflega um US\$ 1000/m³. Nú ætti að vera hægt að framleiða sömu steypu fyrir US\$ 750/m³ og í framtíðinni má ætla að hægt verði að gera hana fyrir US\$ 600-650/m³. Kostnaðinn við gerð steypu með virkri mélu má skipta í tvo álíka hluti, kostnað málunnar og kostnað trefjanna.

En steypa jafnvel á US\$ 1000/m³ sem er um US\$ 400/tonn í mannvirkjum þar sem ending og þrýstipól eru í lykilhutverki getur keppt við stál sem kostar US\$ 1200-1500/tonn.

Í öðrum tilfellum getur þessi steypa keppt við önnur efni eins og smíðajárn, ál og jafnvel timbur.

7. Steinsteypa morgundagsins í ljósi sjálfbærrar þróunar:

Sjálfbær þróun er ekki talsýn heldur stefna sem stöðugt verður mikilvægari af því að stjórnendur heimsins eru að anda að sér sama mengaða loftið og við hin. Það er ekki lengur hægt á norðurhveli jarðar að búa í fínnum hverfum stórborga og njóta um leið hreina loftsins því að þessi hverfi eru staðsett rétt austan við önnur borgarhverfi þaðan sem mengunin kemur. Og þar sem forsetar og forsætisráðherrar G8 ríkjanna

anda að sér sama loftinu og allir aðrir hafa þeir jafnmikinn áhuga á sjálfbærri þróun eins og allir aðrir. Þess vegna mun sjálfbær þróun vara lengur en núverandi forsetar. Er það algjör nauðsyn að koma á móts við ákafa hluthafa hvað sem það kostar eða er það betra að varðveita þessa arfleifð fyrir börn okkar og barnabörn eða börn og barnabörn þessara hluthafa ?

Þegar litið er til þess að aðeins einn þriðji af íbúum heimsins nýtur þess að lifa við góð skilyrði og að þessi einn þriðji hefur ekki áhuga á að hverfa til baka til lífstíls gömlu góðu daganna og að tveir þriðju hlutar heims hefur það eitt í huga að ná sama „lífsstandard“ og við, þá er það augljóst og aðkallandi að stefna sjálfbærrar þróunar verði komið á alls staðar á jörðinni til þess að forðast að endurtaka sömu mistökin og gerð hafa verið og endað í núverandi ástandi. Framkvæmd slíkrar stefnu er ekki auðveld því að það eru alltaf einhverjir aðrir sem menga og eyða meiru en við. Sement- og steypuþnaðurinn hefur valkosti, hann verður að bæta þessari þróun við önnur vandamál sín. Ég er ekki í neinum vafa um að sement- og steypuþnaðurinn tekst að gera þessa breytingu. Sementsiðnaðurinn eða frekar bindiefnaiðnaðurinn sem mun verða nafnið á sementsiðnaðinum á byrjandi öld verður GRÆNN iðnaður. Það er engin undankoma, engin ástæða til að kvarta eða berjast, það er betra að horfast í augu við þetta nýja ástand eins fljótt og mögulegt er og breyta sement- og steypuþnaðinum í GRÆNAN iðnað og lýsa því yfir opinberlega hátt og snjallt. Það eru ótal möguleikar að gera þetta og þessi skuldbinding verður að vera þekkt almenningi.

Steinsteypa morgundagsins mun verða endingarbetri og mun þróast í átt félagslegra þarfa með sem minnstum umhverfislegum áhrifum. Mannvirkjakostnaður í framtíðinni mun fela í sér ekki aðeins beinan kostnað heldur einnig félagslegan og umhverfislegan kostnað allt frá vinnslu steypufylliefnanna til notkunar steypunnar, og inniheldur einnig niðurbrot og eyðingu mannvirkisins.

7.1 Umhverfisáhrif steinsteypu:

Það er ekki nægjanlegt að segja að orkuinnihald steypu sé óverulegt því að sú smáorka margfölduð 6400 miljónum sinnum er ekki lengur óveruleg. Það eru ótal leiðir til að minnka útstreymi CO₂ og NO_x og minnka það magn af fylliefnum sem þarf til að byggja mannvirki. Það verður einnig nauðsynlegt að læra hvernig reikna á félagslegan og umhverfislegan kostnað þegar meta skal kostnað mannvirkja. Þegar mikivægi þessa kostnaðar er tekinn til greina kemur í ljós að hágæðasteypa og steypa með virkri mélu eru í raun ekki eins dýr efni og 20-30 MPa steypa þar sem ending þeirra er betri, auðveldlega hægt að endurnýta þær margsinnis áður en þær lenda sem fylliefni í undirbyggingu vega, og svo er efnismagnið minna við notkun þeirra.

Í byrjun 21 aldar munum við sjá að sementsfyrirtækin fara að þróa óhefðbundin bindiefni sem eru umhverfisvænni í ljósi sjálfbærrar þróunar. Þetta skeður með því að notkun óbrenndra steinefna sem ekki hefur þróast mikið síðastliðin 30 ár mun aukast mjög. Það er ekki lengur nauðsynlegt að lesa gömlu rómversku textana aftur og aftur til að sannfærast um þörfina til að nota náttúrulega þöskólana. Sements- og

steypuiðnaðurinn mun smám saman ná yfirráðum yfir iðnaðarpossólönunum (metakaólin, hríshýðisaska, kísilgúr, kísilryk, kalsíneraður leir o.s.frv.). Það er ekki lengur staðreynd að íblöndun slíkra efna lækki byrjunarstyrk steypu, þar sem mögulegt er að nota súperþjálnefni. Byrjunarþrýstipolið er ekki lengur aðeins háð C_3S magninu og fínleika sementsins heldur einnig þéttleika sementsefjunnar. Þéttleikinn er háður vatns- bindiefna hlutfallinu eða vatns- sements hlutfallinu í steypunni. Í mjög þétri efju (mjög lágt vatns- bindiefna hlutfall) er ekki nauðsynlegt að hafa of mikið af bindilími (C-S-H) til að ná nægum MPa til að verktakinn geti slegið mótum frá eftir stuttan tíma. Þetta er þó ekki endilega hagkvæmt í dag svo að þarna eru líka viss hagkvæmnismörk þar sem notkun hreins Portlandssements getur verið ódýrari þegar hás byrjunarstyrks er krafist.

Þar til nýlega voru bindiefni eins og gips og kalk talin umhverfisvænni en Portlandsement. Hvað varðar notkun á gipsi og kalki eru efnahvörfin endurhvarfanleg (við upphitun endurnýjast bindiefnið) en svo er ekki með Portlandsement²⁰. Þó er þetta ekki gilt ef tímaskalanum er breytt. Ef tímaskalinn er útvíkkaður yfir í jarðfræðilegan tímaskala mun steypan að lokum enda sem blanda af kalki, leir, járnoxíði og sandi sem eru stöðugustu formin af kalsíum-,ál-,járn-, og silísíum-jónum í umhverfi okkar á jörðinni. Þetta má læra af því að skoða náttúruna.

7.2 Bindiefni morgundagsins:

Ég vil ekki lesa í telauf en ég get sett fram spádóm. Það er ekki svo áhættusamt að gera það þegar maður er orðinn meira en sextugur. Og ég er tilbúinn að taka við heiðrinum ef spáin reynist rétt eða skömminni ef hún reynist röng.

Bindiefni morgundagsins mun innihalda minna af sementsgjalli, þau munu ekki nauðsynlega hafa svo hátt C_3S innihald og þau munu í sífellt meira umfangi vera framleidd með óhefðbundnu eldsneyti. Þau munu verða að uppfylla stöðugt strangari staðalkröfur og eiginleikar þeirra verða að vera stöðugir sérstaklega þar sem gjallhlutinn verður lægri í blönduðum sementstegundum. Bindiefni morgundagsins verða sífellt samrýmanlegri fleiri og fleiri flóknum íblöndunarefnum og það mun leiða til endingarbetri steinsteypu fremur en sterkari steypu.

Þetta er aðeins byrjun á lista yfir alla þá eiginleika sem bindiefni morgundagsins munu hafa , einnig að þessi bindiefni þurfa að vera ódýr. Þetta er áskorun til sementsiðnaðarins.

7.3 Íblöndunarefni morgundagsins:

Íblöndunarefnin munu sífellt verða fleiri og oftar sniðin að viðkomandi steypu. Þau verða sífellt hreinni efni, sértækari og virkni þeirra hnitmiðaðri. Það mun stöðugt verða erfiðara að kenna íblöndunarefnunum um ef um vandamál vegna samrýmanleika er að ræða og það verður nauðsynlegt fyrir sementframleiðandann að gefa út lista um hvaða íblöndunarefni samræmast hans sementstegundum.

Íblöndunarefni eru orðnar óhjákvæmilegur hlutur við gerð steinsteypu. Þetta er ekki neitt nýtt en áhugavert og sambýli sements og íblöndunarefnis verður að skoðast

sem tækifæri á sviði tækninnar sem þó fáir sementsframleiðendur hafa áttað sig á. Sambýli lífrænnar- og stein-efnafræði svo og efnafræði ókristallaðra og örfínna (amorphous and colliodal) efna er leyndarmálið bak við árangur steypu tækninnar á þessari öld.

7.4 Steinsteypa morgundagsins:

Steinsteypa morgundagsins mun verða GRÆN, GRÆN, og GRÆN. Steypa mun hafa lágt vatns-bindiefna hlutfall, hún mun verða endingarbetri og hafa ýmsa mismunandi eiginleika til nota við mismunandi aðstæður. Sá tími verður liðinn sem steinsteypa verður talin lágverðs vara heldur rennur upp tími sérlausna (a la carte) á steypumarkaðnum.

Sements- og steypu framleiðendur verða að skilja að þeir þéna meira með því að selja sérhannaða steypu í minni skömmtum heldur en lágverðs vöru. Verktakar og verkkaupar þurfa að skilja að það er ekki mikilvægast hvað 1 m^3 af steypu kostar heldur hvað hvert MPa eða 1 ár í endingu kostar. Þegar sements- og steypu-iðnaðurinn svo og verktakar og verkkaupar átta sig á þessu hefur byggingariðnaðurinn tekið stórt skref fram á við.

Persónulega er ég sannfærður um að meiri not af BOOT (byggja, eiga, reka og afsala) verkefnum mun þröngva verktökum til aðgerða og verkkaupum til að meðtaka þessa byltingu í byggingariðnaðinum.

Steypuframleiðandur framtíðarinnar verða að þekkja hvernig höndla skal allar þessar mismunandi steypugerðir sem sements- og íblöndunar- framleiðendur bjóða fram þannig að þeir geti afhent verktökum steypu sem mun verða tæknilega fullkornari (high-tech) og hagkvæmari í verði ekki miðað við 1 m^3 heldur notagildi.

Steypuiðnaður morgundagsins verður að halda áfram að framleiða söluvöru en einnig að framleiða sérhannaðar steypur með mikilli verðmætaaukningu.

8. Þróun steypuiðnaðarins og sementsiðnaðarins á 21 öldinni:

Ég hef látið í ljós persónulegar skoðanir mínar á sögu sements og steypu og spá mína fyrir framtíðina. Eins og sjá má er ég ekki alveg hlutlaus á þessu sviði. Ást mín á steinsteypu er mikil en hefur sín takmörk því að ég þekki steypuna of vel til þess að viðurkenna að hún er ekki eina byggingarefni í framtíðarinnar. En hún er einfaldlega stórkostlegt efni, samsetningin sveigjanleg, umhverfisvæn ef gætt er varúðar og efni með fullt af ókönnuðum jafnvel ónýttum eiginleikum.

Næstu ár munu ekki vera erfiðari en nú er eða á liðnum árum, þau verða einfaldlega öðruvísi með nýjum áskorunum.

Steinsteypa mun verða mest notaða byggingarefnið í heiminum á fyrri hluta 21 aldar, þó mun hún verða mikið frábrugðin því sem hún er í dag. Steinsteypa þessarar aldar mun verða steypa sem er í umhverfislegu jafnvægi, efni sem notað er í þjónustu mannkynsins en ekki til að auka skammtíma arð nokkurra hluthafa.

Samkeppnishæfni sementsiðnaðarins mun verða háð því hvernig þessar breytingar verða. En það verður talsvert erfitt mál fyrir þungaiðnað sem svo lengi hefur staðið á

gömlum merg, iðnaður sem í of langan tíma hefur aðeins beðið eftir pöntunum og sem í of langan tíma hefur sýnt steypunni lítinn áhuga sem þó er eini markaður hans. Þegar við stígum inn í heim þar sem aðalverðmætin eru þeking og áður en við yfirgefum háskólaveröldina vil ég nota tækifærið til að koma til skila mjög mikilvægum skilaboðum: það mun verða bráðnauðsynlegt að sementsiðnaðurinn sýni háskólum meiri áhuga á 21 öldinni. Ekki allir háskóla prófessorar eru draumóramenn. Þessi samvinna er bráðnauðsynleg fyrir iðnaðinn til þess að þjálfa verkfræðinga sem koma til með að gera sementsiðnaðinn samkeppnishæfari. Einnig og það er enn mikilvægara að vekja löngun verkfræðinga, arkitekta og annarra framkvæmdaaðila framtíðarinnar, sem nema í háskólum og síðar koma til með að taka ákvarðanir, að hafa steypuna í huga þegar þeir velja byggingarefni í þau mannvirki sem þeir vinna að.

Það var við háskólann í Toulouse í Frakklandi sem ég fékk ást á steynsteypu þar sem tveir prófessoranna létu mig verða hluttakendur í ástríðu sinni. Í háskólanum í Sherbrooke hef ég reynt að koma þessari ástríðu á sementi og steypu til skila til stúdenta minna og ég held að það sé mitt mesta afrek í starfi mínu sem prófessor.

9. Niðurstaða:

Eftir að hafa lesið þessa grein um sement gærdagsins og dagsins í dag og steinsteypu morgundagsins væri ég ánægður ef aðeins eitt atriði festist í minni: í hvert skipti sem gerð er breyting við framleiðslu sements af einhverjum ástæðum þá verður um leið að svara tveim lögmætum spurningum um afleiðingar þessara breytinga þ.e. hvaða áhrif hefur það á hagkvæmni og hvernig standast þær staðalkröfur. En það mun verða nauðsynlegt að setja fram enn aðra spurningu: hver mun verða afleiðing þessarar breytingar á gæði steinsteypunnar sem gerð verður með nýju sementi? Gæði þýðir ending framar styrk. Sement er framleitt til að fá arð en einnig til að tryggja samkeppnishæfni steypunnar sem byggingarefnis. Það er algerlega rangt að sement sé eingöngu efni til að uppfylla staðalkröfur sem eru að verða úreltar og eru langt frá raunveröld steinsteypunnar. Hvað er hægt að gera við sement annað en framleiða úr því steinsteypu?

Þetta er áskorun til sements- og steypuiðnaðarins á 21 öldinni og það er hvetjandi áskorun.

Heimildir:

- [1] B. Scheubel, W. Nachtwey, Development of Cement Technology and Its Influence on the Refractory Kiln Lining, Refra Kolloquium, Berlin, Germany, 1997, pp. 25–43.
- [2] H.F.W. Taylor, Cement Chemistry, Thomas Telford, London, 1997.
- [3] H. Uchikawa, Cement and concrete industry orienting toward environmental load reduction and waste recycling, IVPAC Conference, Seoul, Korea, Taicheiyo Cement Corp., Sakuroshi, Japan, 1996, pp. 117–149.
- [4] M. Venuat, Adjuvants et Traitements, Chatillon-sous-Bagneux, France, 1984 edited by the author.
- [5] A.M. Neville, Properties of Concrete, Longman Group, London, 1995.
- [6] P.-C. Aïtcin, High-Performance Concrete, E&F SPON, London, 1998.
- [7] V.H. Dodson, Concrete Admixtures, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1990.
- [8] K. Hattori, Experience with Mighty superplasticizer in Japan, ACI SP 62 (1978) 37–66.
- [9] A. Meyer, Experience in the use of superplasticizer in Germany, ACI SP 62 (1987) 21–36.
- [10] O. Bonneau, C. Poulin, J. Dugat, P. Richard, P.-C. Aïtcin, Reactive powder concretes: from theory to practice, Concr Int 18 (4) (1996) 47–49.
- [11] P.-C. Aïtcin, C. Jolicoeur, J. MacGregor, Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, Concr Int 16 (5) (1994) 45–52.
- [12] P. Richard, M. Cheyrezy, Reactive powder concrete with high ductility and 200–800 MPa compressive strength, ACI SP 144 (1994) 507–518.
- [13] G. Wischers, The impact of the quality of concrete construction on the cement market, Report to Holderbank group, No. DIR 84/8448/4, Holderbank, Switzerland, 1984.
- [14] R. Ranc, Interaction entre les réducteurs d'eau-plastifiants et les ciments, Cim Bétons Plâtres Chaux 782 (1990) 19–20.
- [15] V.H. Dodson, T. Hayden, Another look at the Portland cement/chemical admixture incompatibility problem, Cem Concr Aggregate 11 (1) (1989) 52–56.
- [16] S.P. Jiang, B.-G. Kim, P.-C. Aïtcin, Importance of adequate alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility, Cem Concr Res 29 (1999) 71–78.
- [17] J. Albinger, J. Moreno, High strength concrete: Chicago style, Concr Constr 29 (3) (1991) 241–245.
- [18] L.-G. Coulombe, C. Ouellet, The Montée St-Rémi overpass crossing Autoroute 50 in Mirabel: the saving achieved by using HPC, Concr Can Newsl 2 (1) 1994.
- [19] H.H. Bache, Densified cement/ultra-fine particle-based materials, Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Ontario, Canada, Aalborg Cement, Aalborg, Denmark 1981, p. 17.
- [20] P.-C. Aïtcin, Concrete the most widely used construction materials, ACI SP 154 (1995) 257–266.

Um höfundinn:

Pierre Claude Aïtcin er fyrrverandi prófessor við verkfræðideild háskólans í Sherbrook í Quebec Kanada.

Frá 1990 til 1998 var hann framkvæmdastjóri vísindaseturs Kanada (Concrete Kanada) sem er samband rannsóknastofnana (öndvegissetur, center of exelence) fyrir hástyrkleikasteypu.

Hann varð meðlimur ACI (American Concrete Institut) árið 1988. Hann var meðlimur í ACI nefnd C234, kísilryk í steinsteypu og C363, hástyrkleikasteypa. Hann hlaut ACI - Arthur R. Anderson verðlaunin 1995 fyrir rannsóknir sínar á hástyrkleikasteypu, íblöndunarefnum og kísilryki og einnig verðlaun ACI fyrir byggingartækni 2004. Aïtcin er meðlimur kanadísku verkfræði akademíunnar og einnig í kanadíska byggingaverkfræðingafélaginu. Hann hlaut verðlaun frá franska byggingarverkfræingafélaginu árið 1999.

Mélusteypa (Reactive powder concrete):

Steinsteypa með virkri mélu er efni með háum styrk og sveigjanleika úr sérstakri blöndu hráefna. Hráefnablandan inniheldur Portlandsement, kísilryk, kvartsmélu, fínan kísilsand, hágæða vatnsspara, vatn og stál- eða plasttrefjar.

Þrýstipól þessarar steypu er 170-230 MPa og beygjutogþolið 30-50 MPa.

Beygjutogþolið fer eftir því hversu mikið er af trefjum í steypunni og opnar nýja möguleika fyrir sveigjueiginleika í þessu stökka efni sem venjuleg steinsteypa er. Þessi steypa hefur möguleika á að bera þunga þó að hún svigni og jafnvel eftir að byrjunarsprungur hafa myndast í henni. Þessir eiginleikar koma til vegna bættrar innri byggingar steypunnar og viðloðuna milli trefja og sementsefju.

Varanleiki steypunnar er í samræmi við að hún er vatnspétt. Hún verður ekki fyrir áhrifum CO₂ eða geta súlföt og klóríð þrengt sér inn í hana. Þá hefur hún mikla mótstöðu gegn áhrifum síru (t.d. frá andrúmsloftinu). Mótstaða gegn slitálagi er álíka og hjá teintegundum. Mikill varanleiki er til kominn vegna þéttar innri byggingar sementsefjunnar sem skapast af notkun fínnar mélu (mesta kornastærð= 600 mikron) sem valin er m.t.t. kornastærðar og efnavirkni. Niðurstaðan er lítið og einangrað holrými og þétt bygging efjunnar.

Steypan er allt að því laus við rýrnun og skrið sem gerir hana mjög hagkvæma í til notkunar í forspennta steypu. T.d. getur hún sparað notkun bendijárns og floteiginleikar hennar eru miklir t.d. er hún sjálfútleggjandi. Hægt er að framleiða hana og leggja út á hefðbundinn hátt , dæla henni eða sprauta.

Notkunar mélu í steypuna og flæðieiginleikar hennar gera það að verkum að hún nær vel að endurmynda mótaáferð og ná þannig áhugaverðu útliti.

(Heimild: Portland Cement Association, what is reactive powder concrete ?)

Smartsteypa (Smart concrete):

Einn af veikleikum steinsteypu sem byggingarefnis er að hún á erfitt með að standast sveigju og henni er því hætt við að í hana komi örsprungur. Það hefur verið mikil þörf fyrir að vakta sprungumyndun í steiptum mannvirkjum og reyna að koma í veg fyrir að sprungumyndunin haldi áfram. Þessi viðleitni er mikilvæg til þess að koma tímanlega á viðgerðum og viðhalda þannig öryggi og endingu viðkomandi mannvirkja. Ástandsmat án inngrips (non destructive evaluation) t.d. með því að koma fyrir skynjurum í byggingarhluti hefur á margan hátt verið notað í þessum tilgangi en slíkar aðgerðir eru kostnaðarsamar.

Smartsteypa var þróuð af dr. Deborah D.L.Chung hjá ríkisháskólanum í New York ríki (State university of New York) í Buffalo. Smartsteypa er trefjabent með koltrefjum. Magn þeirra í steypunni er 0.2-0.5% (rúmmál).

Með því að bæta litlu magni af stuttum koltrefjum í steypu við hrærslu í venjulegri steypuvél eykst rafviðnám hennar ef hún verður fyrir togi eða álagi. Þegar steypa verður fyrir togi eða þrýstingi verður sambandið milli trefja og sementsefju fyrir áhrifum þannig að rafviðnám steypunnar breytist. Þannig mælist tog sem breyting á rafviðnámi og þannig hefur smartsteypa hæfileika til að skynja smá styrkleikaveilur í sementsefjunni áður en þær verða alvarlegar, hæfileika sem nota má til að fylgjast með innra ástandi bygginga eða fylgjast með jarðskjálftum.

Þar að auki er koma koltrefjarnar í veg fyrir sprungumyndun þannig að sprungur halda ekki áfram að breiða úr sér og stækka eins og í venjulegri steypu.

Hægt er að nota smartsteypu til að vigta ökutæki á vegum. Vegir steiptir úr þannig steypu getur ákvarðað hvar visst öutæki er ásamt þyngd þess og hraða. Vigta mætti ökutæki þannig meðan þau eru á ferð um vegina.

Með því að bæta koltrefjum í steypu eykst kostnaður við hana um 30%. Þessi kostnaður er verulega minni en ef skynjurum er komið fyrir í steypunni. Smartsteypa er sterkari en venjuleg steypa vegna koltrefjanna. Það þarf meira afl til að beygja smartsteypu og hún þarf meiri orku til að brotna.

Dr. Deborah Chung hefur fengið einkaleyfi fyrir þessari steypu og hefur haldið áfram rannsóknum á henni t.d. notkun til vigtunar á ökutækjum á vegum.

Þó að smartsteypa hafi verið reynd og rannsökuð á rannsóknastofum þarfnast hún ennþá rannsókna við raunaðstæður (field testing). Hún er ekki ennþá fánleg á markaðnum.

(Heimild: Purdue University, division of engineering and management)