

Komposiitit:

Esimerkkinä betoni

Helsingin yliopisto

Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Kemian laitos

Kemian opettajankoulutusyksikkö

Kandidaatintutkielma

Työn tekijä: Tom Olsson

Pvm. 22.5.2011

Ohjaajat: Mikko Ritala,

Maija Aksela

1. Johdanto	3
2. Komposiittien rakenne	4
2.1 Rakennekomposiitit	5
2.1.1 Laminaattikomposiitit	6
2.1.2 Sandwich- eli kerrosrakenteet.....	7
2.2 Vaaho- ja huokoiset materiaalit	8
2.3 Kuitulujitetut komposiitit.....	8
2.3.1 Polymeerimatriisikomposiitit.....	8
2.3.1.1 Lasikuitupolymeerikomposiitit	10
2.3.1.2 Hiilikuitupolymeerikomposiitit	11
2.3.2 Metallimatriisikomposiitit	11
2.3.3 Keraamikomposiitit	12
2.4 Partikkelikomposiitit.....	12
2.4.1 Suurpartikkelikomposiitit	13
2.4.2 Dispersiolujitetut komposiitit	13
3. Betoni.....	14
3.1 Betonin historiaa	14
3.1.2 Modernin sementin ja betonin kehitys.....	15
3.2 Betoni Suomessa.....	16
3.3 Betonin rakenne	17
3.4 Betonin jaottelu.....	18
3.5 Betonin vahvistaminen	19
3.5.1 Teräsbetoni.....	20
3.5.2 Betonin jännittäminen.....	20
3.5.3 Hiilikuitulujitettu betoni	21
3.6 Sementit	21
3.6.1 Portland- sementti	21
3.6.2 Kuona-ainesementti	24
3.6.3 Aluminasementti.....	24
3.6.4 Magnesiumpohjainen sementti	25
4. Johtopäätökset.....	25
Lähteet	26

1. Johdanto

Komposiitti on määritelmän mukaan kiinteä materiaali, jossa kahden tai useamman aineen yhdistelmä on halutuilta ominaisuuksiltaan parempi kuin lähtömateriaalien ominaisuuksien summa.

Komposiitit on erittäin laaja käsite, joka kattaa alleen paljon nyky-yhteiskunnalle välttämättömiä rakenteita ja tuotteita. Työssä pyritään muodostamaan selkeä yleiskuva komposiiteista ja niiden jaottelusta. Lisäksi käsitellään tarkemmin betonia, koska se on niin tärkeä osa yhteiskuntaamme ja siinä yhdistyy monia erilaisia komposiittirakenteita hyvin havainnollistavalla tavalla. Työ on rajattu tukemaan tulevaa pro gradu- tutkielmaa, jossa tullaan tarkastelemaan komposiittien opetusta lukiossa. Komposiittirakenteita tutkitaan jatkuvasti useilla eri aloilla. Materiaalikemiassa erilaisten komposiittirakenteiden tutkimus etenee huimaa vauhtia ja uusien komposiittien tuottaminen on tärkeä tutkimusalue. Käsitteenä komposiitti on hankala, koska on vaikeaa ymmärtää kuinka laaja käsite komposiitti todella on.

Luvussa kaksi on pyritty muodostamaan selkeä yleiskuva komposiittien jaottelusta, antaen erilaisista komposiiteista arkielämän esimerkkejä. Lisäksi on pyritty havainnollistamaan erilaisia rakenteita havaintokuvien avulla. Komposiitit kehittyvät erittäin nopeasti ja niistä puhutaan jatkuvasti eri yhteyksissä kuten, avaruusaluksissa, jääkiekkomailoissa, armeijan suojarahusteissa, rakennusmateriaaleissa tai vaikka pahvilaatikossa. Työssä esiintyvän jaottelun avulla saa kuvan siitä mitä erilaisilla komposiittirakenteilla tarkoitetaan. Lisäksi työ auttaa ymmärtämään kuinka laaja käsite komposiitit todella on.

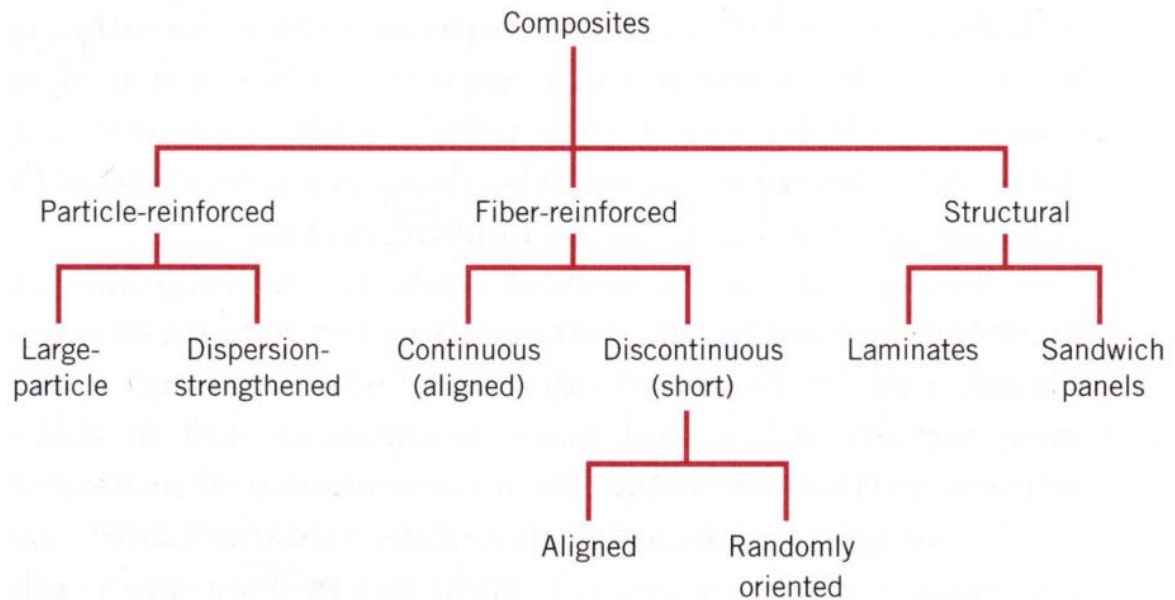
Luvussa kolme keskitytään betoniin ja sen sovelluksiin. Betoni on itsessään suurpartikkelikomposiitti, jossa sekä matriisi että partikkeli ovat keraamisia materiaaleja. Paljon rakennusmateriaalina käytetty teräsbetoni on puolestaan komposiitti, jossa betonimatriisissa on teräsrakenteita antamassa vetolujuutta. Lisäksi käsitellään sementin rakennetta niiltä osin kuin se betonista puhuttaessa on tarpeellista. Puhekielessä ”sementti” ja ”betoni” saavat usein päällekkäisiä merkityksiä, joten työssä pyritään selvästi erottamaan nämä termit toisistaan.

2. Komposiittien rakenne

Komposiitti on kiinteä materiaali, joka saadaan kahden tai useamman materiaalin yhdistelmällä, jossa kullakin materiaalilla on erilaiset ominaisuudet. Komposiitissa materiaalit yhdistetään siten että yhdistelmä on halutuilta ominaisuuksiltaan parempi kuin lähtömateriaalien ominaisuuksien summa. (esim. Encyclopædia Britannica ”composite material”, 2008)

Komposiittien hyvät ominaisuudet saavutetaan yleisimmin yhdistämällä yhden aineen kuiturakenne toisen aineen matriisiin. Vaikka kuitunipun rakennekestävyys on heikko, voidaan kuidut sulauttaa isäntämateriaaliin, joka liittää kuidut halutulla tavalla ja antaa rakenteelle lujuutta. Jäykkä kuiturakenne parantaa komposiittirakenteen kestävyyttä, samalla matriisi suojaa kuituja ulkopuoliselta rasitukselta ja kulumiselta. Lisäksi matriisi parantaa usein termistä kestävyyttä huomattavasti. Komposiittirakenne pienentää rakenteen täydellisen murtumisen mahdollisuutta. Rasituksessa voi matriisi sekä osa kuiduista katketa muiden kuitujen kestäessä, jolloin kokonaisrakenne kestää rasituksen. Lujittamattomassa materiaalissa hajoaminen usein leviää kunnes rakenne tuhoutuu täysin. (esim. Encyclopædia Britannica ”composite material”, 2008)

Komposiitteja voidaan jaotella niiden rakenteen mukaan (KUVA 1). Jaottelusta puuttuu vaahto- ja huokoiset materiaalit, koska niiden kuuluminen komposiitteihin on kiistanalaista lähteestä riippuen. (esim. Callister, 1999)



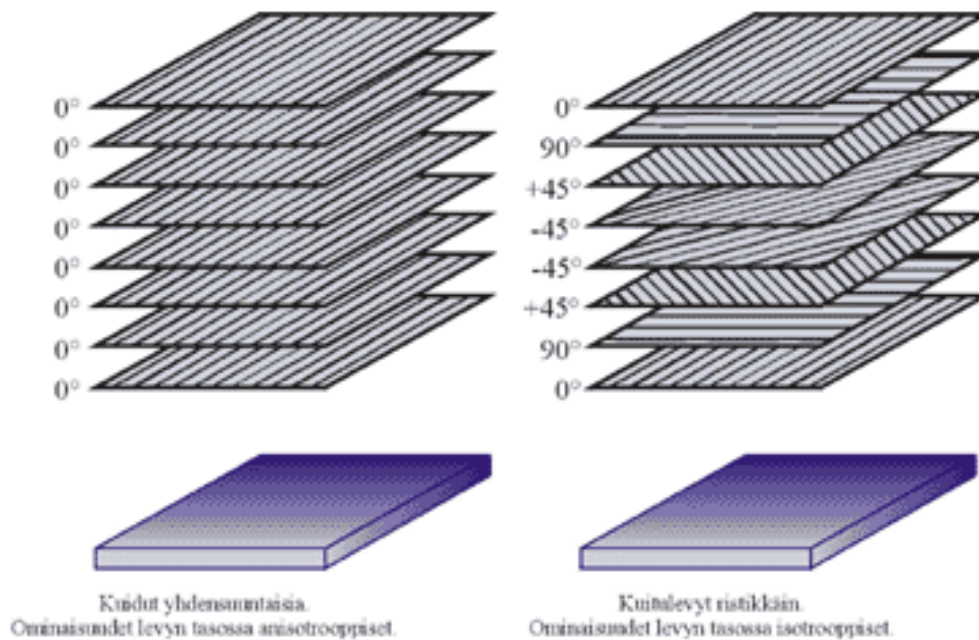
KUVA 1. Komposiittien jaottelukaavio (Callister, 1999)

2.1 Rakennekomposiitit

Rakennekomposiitit voivat koostua sekä homogeenisistä että yhdistelmäateriaaleista. Vain yhdestä materiaalista koostuvat rakennekomposiitit luetaan komposiitteihin, koska niiden rakenteessa eri osilla on selkeästi erilaiset tehtävät ja niiden ominaisuudet ovat selkeästi paremmat kuin kyseisellä materiaalilla yleensä. Rakennekomposiittien ominaisuudet riippuvat paitsi rakenneosien ominaisuuksista myös lopullisen rakenteen geometrisestä muodosta. Yleisimmät rakennekomposiitit ovat laminaattikomposiitit ja sandwich- eli kerrosrakenteet. (esim. Callister, 1999)

2.1.1 Laminaattikomposiitit

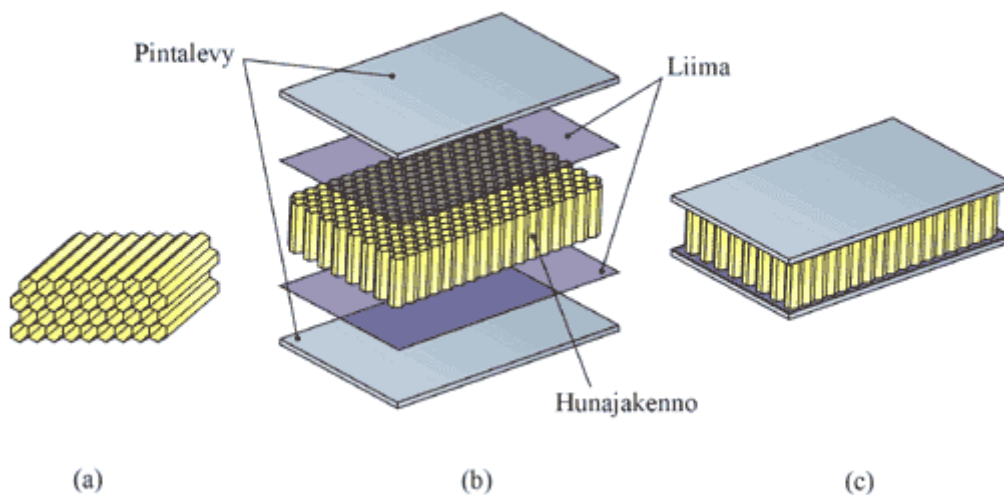
Laminaattikomposiitit rakentuvat kaksikulotteisista kerroksista, joilla on yhteen suuntaan suurempi kestävyys kuin muihin suuntiin. Tällaista suuntautunutta kestävyyttä on havaittavissa esim. puussa (puun syyt) ja kuitulujitetussa muovissa. Levyt pinotaan ja liimataan yhteen siten että suunnattu kestävyys on eri suuntaan edelliseen kerrokseen verrattuna (KUVA 2). Laminaattikomposiitit saavat näin suhteellisen korkean kestävyuden, mutta kestävyys mihin tahansa suuntaan on tietysti pienempi kuin mitä se olisi, jos kaikki kuidut olisivat samaan suuntaan. (esim. Callister, 1999)



KUVA 2. Laminaattirakenne (TUT- materiaali)

2.1.2 Sandwich- eli kerrosrakenteet

Sandwich- rakenne muodostuu kahdesta vahvemmassa ulkokerroksesta, jotka on erotettu ydinosalla. Ydinosalla ei ole yhtä tiheä ja jäykkä kuin ulkokerrokset (KUVA 3). Ulommat kerrokset joutuvat kestäämään suurimman osan pitkittäis- ja poikittaissuuntaisesta rasituksesta. Yleisiä ulkokerrosmateriaaleja ovat alumiiniseokset, kuitulujitetut muovit, titaani ja vaneri. Ydin palvelee kahta tarkoitusta. Se vastustaa ulompiin kerroksiin kohdistuvaa kohtisuoraa rasitusta. Toisaalta ydin tarjoaa tiettyä jäykkyyttä rakenteelle. Ytimessä voidaan käyttää esimerkiksi synteettistä kumia. Toinen vaihtoehto ytimelle on kennorakenne. Tällöin ytimen muodostaa kuusikulmaisista kennoista koottu kennorakenne, joka on kohtisuorassa ulkokerrosten välillä. Kennorakenteessa sama materiaali voi olla sekä ulkokerroksissa että kennostossa. Kerrosrakenteita käytetään laajalti esimerkiksi rakennusmateriaaleissa, lentokoneiden siipirakenteissa ja aaltomuovissa. (esim. Callister, 1999)



KUVA 3. Kerrosrakenteet (TUT- materiaali)

2.2 Vaahto- ja huokoiset materiaalit

Vaahtometallit ja huokoiset metallit ovat komposiitteja, joissa toinen rakenneosana on kaasumaisessa muodossa ja toinen on kiinteä metalli. Suurin ero vaahtometallin ja huokoisen metallin välillä on suhteellisessa tiheydessä. Huokoiset metallit ovat suhteellisen tiheitä ja niissä esiintyy selkeästi eristettyjä huokosia. Vaahtometalleiden tiheys on varsin pieni ja rakenteessa olevat aukot ovat yhteydessä toisiinsa. Huokoisuus vaihtelee näissä materiaaleissa välillä 30 - 98%. (esim. Schubert ja Hüsing, 2000)

Näillä metallisilla materiaaleilla on ainutlaatuisia ominaisuuksia mm. törmäysenergian vastaanotossa, veden ja ilman läpäisevyydessä, akustisissa ominaisuuksissa sekä lämmön ja sähkön eristyksessä. Vastaavia ominaisuuksia on myös muilla vaahtomateriaaleilla kuten vaahtomuovilla. (esim. Schubert ja Hüsing, 2000)

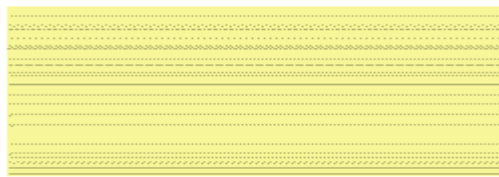
2.3 Kuitulujitetut komposiitit

2.3.1 Polymeerimatriisikomposiitit

Polymeerikomposiiteissa käytetään matriisina useimmiten hartsia, etenkin polyesteri- ja epoksihartsia. Polyesteri hartsi on halpaa, mutta se kutistuu kovettuessaan ja se imee itseensä vettä. Epoksihartsit ovat kalliimpia, mutta ne eivät kutistu ja ne ovat kutakuinkin veden kestäviä. Hartsit lujitetaan yhdistämällä niiden rakenteeseen lasikuitua, hiilikuitua tai vahvoja polymeerikuituja kuten Kevlaria. (esim. Tilley, 2004)

Matriisin tehtävänä on pitää kuidut yhdessä halutussa järjestyksessä. Kuidut yksinään ovat hauraita ja vaikka niillä on hyvä vetolujuus, niiden puristuslujuus ei ole riittävä. Kuidut lisäävät rakenteen kestävyttä. Komposiitin lopullinen kestävyys riippuu käytetyn kuidun ominaisuuksista ja geometrisistä tekijöistä, mihin kuuluvat kuidun määrä ja kuitujen pituus sekä matriisin ja kuidun välisen sidoksen vahvuus. Kuitujen suuntauksella on merkittävä vaikutus. Komposiitin kestävyys on suurimmillaan suunnattujen kuitujen suuntaan ja

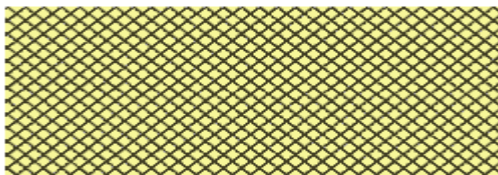
pienimmillään kohtisuorasti kuituja vastaan. Tämän vuoksi suunnatut kuitukerrokset yhdistetään usein laminaateiksi. (esim. Tilley, 2004)



(a) Jatkuva kuitu

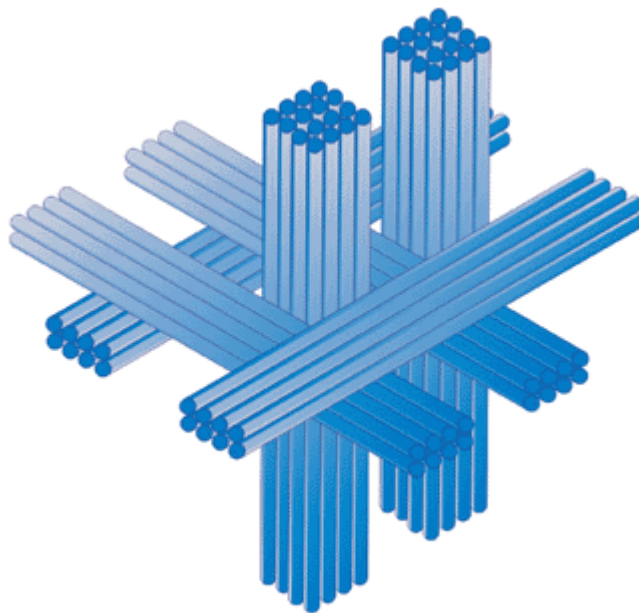


(b) Katkokuitu



(c) Kudottu matto

KUVA 4. Jatkovakuitulujitettu-, katkokuitulujitettu-, ja kudottu mattokomposiitti (TUT-materiaali)



KUVA 5. Kolmiulotteinen kuva kuitulujituksesta (TUT- materiaali)

2.3.1.1 Lasikuitupolymeerikomposiitit

Lasikuitupolymeerikomposiitti on yksinkertaisesti komposiitti, joka koostuu jatkuvista tai jatkumattomista lasikuiduista, jotka ovat polymeerimatriisissa. Lasikuitu on komposiiteissa eniten käytetty kuitu. Sen yleisyyteen on monta syytä:

1. Sulasta lasista on helppo vetää kestäviä lasikuituja.
2. Lasikuitua on helposti saatavilla ja siitä voidaan tehdä lasikuitulujitettua muovia edullisesti käyttämällä jotakin komposiitin muodostustekniikoista.
3. Lasikuitu on suhteellisin kestävä ja muovimatriisissa se muodostaa komposiitin, jolla on hyvä spesifinen kestävyys.
4. Yhdistämällä lasikuitua erilaisiin muoveihin saadaan kemiallisesti inertti tuote, jolla on hyvä korroosiokestävyys.

Lasikuidun pinnan ominaisuudet ovat erittäin tärkeitä. Pienimmätkin pinnan virheet voivat vaikuttaa tuhoisasti rakenteen vetolujuuteen. Myös normaalin ilmakehän vaikutus voi heikentää matriisin sidoksia. Uudet komposiitit päällystetään usein suojaamaan itse komposiittia. Lasikuitupolymeerikomposiiteilla on paljon rajoituksia. Rakenteet ovat melko vahvoja, mutta niiltä puuttuu monissa sovelluksissa vaadittavaa jäykkyyttä. Lisäksi lasikuitu- polymeerikomposiitit ovat melko huonoja kestävänsä korkeita lämpötiloja. Normaalikäytössä tällaiset komposiitit soveltuvat alle 200 °C lämpötiloihin. Käyttämällä piioksidikuituja ja korkean lämpötilan polymeerejä päästään 300 °C lämpötiloihin, mutta tämän jälkeen polymeerit rupeavat valumaan tai rapistumaan. (esim. Callister, 1999)

2.3.1.2 Hiilikuitupolymeerikomposiitit

Hiilikuitu on yleisimmin käytetty lujitemateriaali kehittyneissä polymeerikomposiiteissa. Hiilikuidun käyttöön vaikuttavat seuraavat asiat:

1. Hiilikuidulla on korkein elastinen kerroin ja se on kestävin kaikista lujitekuitumateriaaleista.
2. Hiilikuitu ei menetä ominaisuuksiaan lämpötilan noustessa. Korkeassa lämpötilassa tapahtuva hapettuminen saattaa puolestaan olla ongelma.
3. Huoneen lämpötilassa kosteus, monet liuottimet, hapot ja emäkset eivät vaikuta hiilikuidun ominaisuuksiin.
4. Hiilikuiduilla on monipuoliset fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet, joiden ansiosta näitä kuituja sisältävät komposiitit voidaan tuottaa erittäin tarkasti tiettyä tarkoitusta varten.
5. Kuitujen ja komposiittien tuotantokuluja on saatu pienennettyä, joten niiden hintalaatusuhde on hyvä.

Hiilikuitulujitettuja polymeerikomposiitteja käytetään nykyisin laajalti urheiluvälineissä, vapaa-ajanvarusteissa, kuitukelaustuotteissa, lentokoneiden ja helikoptereiden osissa. (esim. Callister, 1999)

2.3.2 Metallimatriisikomposiitit

Metalleja lujitetaan usein jatkuvilla kuiduilla parantamaan kestävyyttä. Metallien kanssa käytetään keraamisia kuituja [esim. piikarbidia (SiC) tai alumiinioksidia (Al_2O_3)] tai metallikuituja [(esim. volframia (W))]. Tämänlaisia kuituja on hankala valmistaa, joten jollei ole välttämätöntä käyttää kyseistä rakennetta erinomaisten ominaisuuksien vuoksi, on helpompaa käyttää pienempiä partikkeleita esim. alumiinioksidia tai piikarbidia. Nämä keraamiset partikkelit sekoitetaan usein sulan metalliseoksen kanssa. Saatu seos muovataan haluttuun muotoon. Laajimmalle levinneiden metallipartikkelikomposiittien joukkoon kuuluu sementoitu karbidimateriaali jota käytetään leikkaavana teränä teräksen työstössä. Ensimmäinen tässä tarkoituksessa käytetty yhdistelmä koostui metallisesta

kobolttimatriisista ja wolframikarbidi-partikkeleita. Tämä yhdistelmä on edelleen useimmissa käyttötarkoituksissa paras. (esim. Callister, 1999)

2.3.3 Keraamikomposiitit

Keraamisia komposiitteja käytetään kun halutaan päästä eroon keraamisten osien luontaisesta hauraudesta. Lujittamiseen käytetään kuituja tai partikkeleita. Lujittamiseen käytettävät materiaalit ovat piikarbidiä tai alumiinioksidia. Lujuus syntyy, koska kuidut tai partikkelit suuntaavat uudelleen tai silloittavat matriisissa ilmenevät säröt. Vaikka lasi yhdistetään komposiiteissa usein lasikuituihin, laminoitu lasi on myös yleinen komposiitti. Lasilaminaatti koostuu lasin ja muovikalvon kerrosrakenteesta. Tarkoituksena on estää lasin sirpaloituminen iskuvaikutuksesta. Rakennetta käytetään usein esim. luodinkestävässä laseissa. (esim. Callister, 1999)

2.4 Partikkelikomposiitit

Partikkelikomposiitit jaetaan suurpartikkelikomposiitteihin ja dispersiolujitettuihin komposiitteihin. Näiden kahden ero on lujittamismekanismissa. Suurpartikkeli- termiä käytetään selvittämään sitä, ettei partikkeleiden ja matriisin välistä vuorovaikutusta voida tarkastella atomi- tai molekyyllitasolla. Useimmissa suurpartikkelikomposiiteissa pienhiukkasosat ovat kovempia ja jäykempiä kuin matriisi. Suurpartikkelikomposiitin mekaaninen käyttäytyminen riippuu partikkeleiden ja matriisin sidoksesta näiden aineiden rajapinnassa. Dispersiolujitetut komposiitit lujitetaan huomattavasti pienemmillä partikkeleilla, joiden halkaisija on 0,01- 0,1 μ m. Partikkelimatriisi-vuorovaikutus tapahtuu atomi- ja molekyyllitasolla. Matriisi vastaanottaa suurimman osan rasituksesta ja partikkelit estävät mahdollisia liikkeitä matriisin sisällä. (esim. Callister, 1999)

2.4.1 Suurpartikkelikomposiitit

Joissain polymeerimateriaaleissa käytetään täyteaineita, joiden avulla saadaan muokattua tai parannettua aineen ominaisuuksia tai mahdollisesti laskettua lopputuotteen hintaa. Yleisimmin käytetty suurpartikkelikomposiitti on kuitenkin betoni, jossa sementti toimii rakenteen matriisina ja hiekan jyvät partikkeleina. (esim. Callister, 1999)

Jotta rakenne olisi mahdollisimman luja, tulisi partikkeleiden jakaantua tasaisesti ja niiden tulisi olla suurin piirtein samankokoisia kaikkiin suuntiin. Lisäksi aineiden määrien keskinäisellä suhteella on suuri merkitys komposiitin käyttäytymisen kannalta. Partikkeleiden lisäämisellä parannetaan rakenteen mekaanisia ominaisuuksia. Suurpartikkelikomposiitteja tehdään metalleista, polymeereistä ja keraameista. (esim. Callister, 1999)

2.4.2 Dispersiolujitetut komposiitit

Metalleita ja metalliseoksia voidaan lujittaa erittäin kovalla ja inertillä materiaalilla. Dispersiolujitukseen voidaan käyttää metalleita tai epämetalleita. Oksidihdisteet ovat yleisiä lujitusmateriaaleja. Lujitus perustuu partikkeleiden välisiin vuorovaikutuksiin ja sijoittumiseen matriisissa. Dispersiolujitetut komposiitit säilyttävät ominaisuutensa melko hyvin lämpötilan noustessa sekä pitkällä aikavälillä, koska partikkeleiksi valitaan matriisiin kanssa reagoimattomia materiaaleja. (esim. Callister, 1999)

Esimerkiksi nikkelseosten kestävyyttä korkeissa lämpötiloissa saadaan parannettua merkittävästi, kun seokseen lisätään n. 3% toriumdioksidia (ThO_2) Vastaava vaikutus saadaan aikaan alumiini- alumiinioksidiseoksilla. (esim. Callister, 1999)

3. Betoni

Betoni on maailman yleisimpiä rakennusmateriaaleja. Maailmalla tuotetaan vuosittain arviolta 6-8 km³ betonia, joka vastaa noin yhtä kuutiometriä jokaista maailman ihmistä kohden. Betoni muodostuu kemiallisesti inerteistä partikkeleista (yleensä sorasta ja hiekasta), jotka sidotaan yhteen sementillä ja vedellä. Kyseessä on suurpartikkelikomposiitti, jossa sekä matriisi että partikkeli ovat keraamisia materiaaleja. Puhkielessä ”sementti” ja ”betoni” saavat usein päällekkäisiä merkityksiä. Määritelmän mukaan betoni on komposiittimateriaali ja sementti sen sidosmatriisi. Yleisimmät betonit ovat Portland-sementtibetoni ja asfalttisementti. Betoni kestää suurta rasitusta ja sitä voi valaa käytännössä mihin muotoon tahansa. Lisäksi betoni on hyvin tulenkestävää. (esim. Callister, 1999; Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011)

3.1 Betonin historiaa

Assyriassa ja Babyloniassa rakennusaineen lujitteena käytettiin yleensä savea. Egyptiläiset kehittivät enemmän nykyaikaista betonia muistuttavan seoksen käyttämällä kipsiä ja kalkkia sidosaineina. Kalkkia saatiin kalkkikivestä, liidusta ja simpukan kuorista. Hydratoituvan sementin alkuperä on puolestaan muinaisessa Kreikassa ja Roomassa, joissa käytettiin kalkkia ja vulkaanista tuhkaa, jotka reagoivat hitaasti veden kanssa muodostaen kovan massan. Tämän kaltaista seosta käytettiin jo 2000 vuotta sitten ja sen käyttöä jatkettiin läntisessä Euroopassa. Vulkaanista tuhkaa kaivettiin Pozzuolin kaupungin liepeiltä, jonka vuoksi muinaisen Rooman aikaista sementtiä kutsutaan Pozzolana-sementiksi. Nykyisin termiä Pozzolana käytetään sementistä itsestään tai mistä tahansa hienojakoisesta alumiinisilikaatista, joka reagoi kalkin ja veden kanssa muodostaen sementtiä. Kalkki olikin käytetyin sementin muodostaja 1800-luvun alkuun saakka. (esim. Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011; ”cement”, 2011)

3.1.2 Modernin sementin ja betonin kehitys

Nykyaikaisen sementin kehityksen voidaan katsoa alkaneen vuonna 1756, jolloin John Smeaton kehitti alkuperäisen Portlandin sementin. John Smeaton kehitti uudenlaisen sementin saatuaan tehtäväksi rakentaa Eddystoneen majakan. Portlandin sementin kehittämistä annetaan kuitenkin yleensä kunnia englantilaiselle keksijälle Joseph Aspdinille, joka vuonna 1824 sai patentin sementin valmistustavalle jossa hän poltti ja jauhoi kalkkikiveä ja savea. Nimensä Portlandin sementti sai Englannissa rakentamiseen käytetystä portlandilaisesta kalkkikivestä. Aspdin käytti sementin valmistamiseen liian alhaisia lämpötiloja, jotta voitaisiin puhua nykytermeillä varsinaisesta Portlandin sementistä. Portlandin sementtiä kehitti edelleen englantilainen Isaac Charles Johnson, joka nosti polttolämpötilaa ja valmisti ensimmäisenä nykyaikaisen Portlandin sementin prototyypin. Portlandin sementin käyttö yleistyi nopeasti Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Portlandin sementti on yhä edelleen yleisimmin käytetty sementti. Seuraava merkittävä kehitysaskel oli ranskalaisen puutarhuri Joseph Monierin vuonna 1867 saama patentti teräsbetonille. Hän oli tehnyt puutarharuukkuja ja -saaveja rautaverkolla vahvistetusta betonista. Noin kolme vuosikymmentä myöhemmin maanmies Francois Hennebiquen patentoi uudenlaisen teräsbetonirakenteen, jossa palkit ja laatat muodostavat saumattoman kokonaisuuden. Nykyisin käytetään maailman laajuisesti arviolta 2 800 miljoonaa tonnia sementtiä. (esim. Betoniteollisuus määrinä ja euroina; Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011; ”cement”, 2011; Tehdään betonista, 1989)

Nimi	Vuosi	Kehitysaskel
John Smeaton	1756	Kehitti alkuperäisen Portlandin sementin.
Joseph Aspdin	1824	Patentoi sementtinsä valmistustavan.
Isaac Charles Johnson	1850	Nosti Portlandin sementin polttolämpötilaa → nykytermin mukainen Portlandin sementti
Joseph Monier	1867	Vahvisti betonirakenteen rautaverkolla.
Francois Hennebique	1892	Patentoi uuden teräsbetonirakenteen.
	2008	Sementtiä tuotetaan maailmassa n. 2800 miljoonaa tonnia vuodessa.

TAULUKKO 1. Nykyaikaisen sementin ja betonin kehitys

3.2 Betoni Suomessa

Betonin varhaishistoriaa Suomessa ei ole juurikaan tutkittu, mutta vuonna 1856 on merkintä Portlandin sementin maahantuonnista Suomen tuontitilastoissa. 1800-luvun loppupuolelle asti Suomessa käytettiin raudoittamatonta betonia. Vuosina 1899-1900 rakennetussa Kaukaan lankarullatehtaassa käytettiin uudenlaisia teräsbetoniratkaisuja. Tällöin käytettiin ensi kertaa vaakasuoraa betonipalkkirakennetta välipohjassa holvimaisen rakenteen sijasta. 1950-luvulla alkoi betonielementtitekniikan kehittäminen. Vuonna 2008 Suomessa käytettiin n. 1,5 miljoonaa tonnia sementtiä ja Suomen betoniteollisuuden liikevaihto oli noin miljardi euroa. (esim. Tehdään betonista, 1989; Betonirakentaminen 1992, 1992; Betoniteollisuus määrinä ja euroina)

3.3 Betonin rakenne

Yleensä betonissa käytetään sementtiä, johon sekoitetaan inerttejä partikkeleita (sora ja hiekkaa). Betonin rakenteesta erottaa selvästi paljaalla silmällä suuret sorapartikkelit (KUVA 6). Betonipartikkelit jaotellaan raekoon mukaan. Yleensä hienon rakeen koko on 0,025 – 6,5 mm ja karkean rakeen koko 6,5- 38 mm. Joskus käytetään jopa halkaisijaltaan 150 mm kokoisia partikkeleita. Betonissa käytettävien partikkeleiden tulee ehdottomasti olla puhtaita, koska pienikin määrää orgaanisia aineita vaikuttaa kemiallisiin reaktioihin, jotka vaikuttavat merkittävästi betonin lujuuteen. (esim. Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011; ”cement”, 2011)



KUVA 6. Betonin rakenne (wikimedia)

3.4 Betonin jaottelu

Betonit jaotellaan niissä käytettävien partikkeleiden, sementin, betonin erikoisominaisuuksien tai valmistustavan mukaan. Normaalisissa betonissa määrittävänä tekijänä on suurelta osin veden ja sementin seossuhde. Kun kaikki muut muuttujat pidetään vakioina, määrittää veden määrä suoraan betonin lujuuden: mitä vähemmän vettä, sitä vahvempaa betonia. Vettä tulee kuitenkin olla vähintään sen verran, että jokaisen partikkelin ympärille muodostuu täydellinen vaippa sementistä ja seoksen tulee olla riittävän juoksevaa tehokkaan levityksen mahdollistamiseksi. (esim. Encyclopædia Britannica "concrete", 2011)

Toinen kestävyuden määrittävä tekijä on sementin määrä suhteessa partikkeleihin. Erityisen vahvaa betonia saadaan, kun seoksessa käytetään melko pientä määrää partikkeleita. (esim. Encyclopædia Britannica "concrete", 2011)

Betonin lujuutta mitataan kilogrammoina neliösenttimetriä kohden. Lujuussuhde kertoo kuinka suuren rasituksen näyte kestää ennen murskautumista. Betonin lujuuteen vaikuttavat ulkoiset tekijät, etenkin kosteus ja lämpötila. Jos betonin annetaan kuivua liian nopeasti, siihen voi jäädä epätasaisesti jakautunutta vetorasitusta, mikä heikentää betonin rakennetta. Betonin kovetusprosessissa betonia pidetään kosteana, jolloin saadaan hillittyä kovettumisesta johtuvaa kutistumista. Matalassa lämpötilassa tapahtuva kovettuminen heikentää myös betonin lujuutta. Lämpötilasta johtuvaa heikkenemistä pyritään hillitsemään lisäaineilla, kuten kalsiumkloridilla. Tämä nopeuttaa betonin kovettumista, joka puolestaan muodostaa lisää lämpöä, joka vähentää matalan lämpötilan haitallisia vaikutuksia. (esim. Encyclopædia Britannica "concrete", 2011)

3.5 Betonin vahvistaminen

Teräslujitus mahdollistaa huomattavasti sirompien ja monimutkaisempien betonirakenteiden muodostamisen ilman, että rakenteen kestävyys kärsii (KUVA 7). Tämän havaitsivat jo vuonna 1904 pidetyssä suunnittelukilpailussa Suomen sen hetken johtavat arkkitehdit. Helsingin rautatieaseman suunnittelukilpailuun liittyen Sigurd Frosterus ja Gustaf Strengell esittivät hyvin kuvaavan teesin teräsbetonin tarjoamista mahdollisuuksista ”*Ja lopuksi voidaan Monier`n, Melanin ja kaikkien uusimpien betonirautajärjestelmien avulla, joissa arkkitehtonisesti katsoen teknillisiä vaikeuksia ei enää ole olemassa, luoda kevyitä, halpoja rakenteita ja todella uusia linjoja, joista 90-luvun arkkitehdit eivät vielä uskaltaneet edes uneksia. Siroja, joustavia, rohkeita, hienostuneita muotoja, jotka kuvastavat säkenöivää elämää ja samalla kylmäveristä levollisuutta ja laskelmallisuutta. Tulevaisuuden arkkitehtuurin johtoihteita: materiaalin mahdollisimman järkevä käyttö, materiaalin säästö ja voiman häikäilemätön keskitys.*” (esim. Tehdään betonista, 1989)



KUVA 7. Cathedral of Santa Eulalia (wikipedia)

3.5.1 Teräsbetoni

Betonia, joka on lujitettu valamalla betoni metallin (yleensä teräksen) ympärille kutsutaan teräsbetoniksi. Pelkkä betoni kestää huonosti mm. tuulta, maanjäristyksiä, värähtelyä tai muita taivuttavia voimia. Teräsbetonissa yhdistyy betonin puristuslujuus ja teräksen vetolujuus. Muodostuva yhdistelmä kestää suurta rasiitusta kaikkiin mahdollisiin suuntiin. Märän betonin juoksevuus mahdollistaa teräksen sijoittamisen juuri niihin kohtiin, joihin odotetaan suurinta vetorasitusta. (esim. Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011)

3.5.2 Betonin jännittäminen

Toinen merkittävä muuraustekninen innovaatio on ollut betonin jännittäminen. Jännitetty betoni saadaan aikaan joko esijännittämällä tai jälkijännittämällä. Esijännityksessä teräslangat tai kaapelit sijoitetaan muottiin ja jännitetään ja ankkuroidaan haluttuun muotoon. Tämän jälkeen lisätään betoni, jonka annetaan asettua. Lopuksi irrotetaan teräksen ankkurointi, jolloin teräs pyrkii palaamaan alkuperäiseen muotoonsa, jolloin se tiivistää ympärillään olevaa betonia. (esim. Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011)

Jälkijännitysprosessissa teräs johdetaan kanavaa pitkin betoniin. Kun betoni on kovettunut, ankkuroidaan teräs ulkopuolelle. Jännittämällä terästä saadaan betoniin siirrettyä halutunlainen tiivistävä vaikutus. (esim. Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011)

Jännitetty betoni neutraloi kaikki ulkoiset jännittävät voimat, jotka murtaisivat normaalin betonin, siihen pisteeseen asti, jossa kyseisen kohdan jännitysvoima ylittyy. Tekniikka mahdollistaa huomattavasti sirompien rakennelmien muodostamisen, koska rakenteeseen saadaan riittävä vetolujuus käyttämättä suuria määriä terästä lujittamiseen. (esim. Encyclopædia Britannica ”concrete”, 2011)

3.5.3 Hiilikuitulujitettu betoni

Uudenlaisiin betoneihin kuuluu mm. hiilikuitulujitettu betoni. Hiilikuitulujitetulla betonilla on tutkimusten mukaan havaittu seuraavanlaisia ominaisuuksia: kun hiilikuidun lopullinen tilavuus betonissa oli 0,189% kokonaistilavuudesta, saatiin yhdessä kemiallisten lisäaineiden ja piioksidivaahdon kanssa aikaan 85% parannus betonin taivutuslujuuteen, iskulujuus parani 205% ja puristuslujuus 22% . (Chen ja Chung, 1993)

3.6 Sementit

3.6.1 Portland- sementti

Raaka-aineet

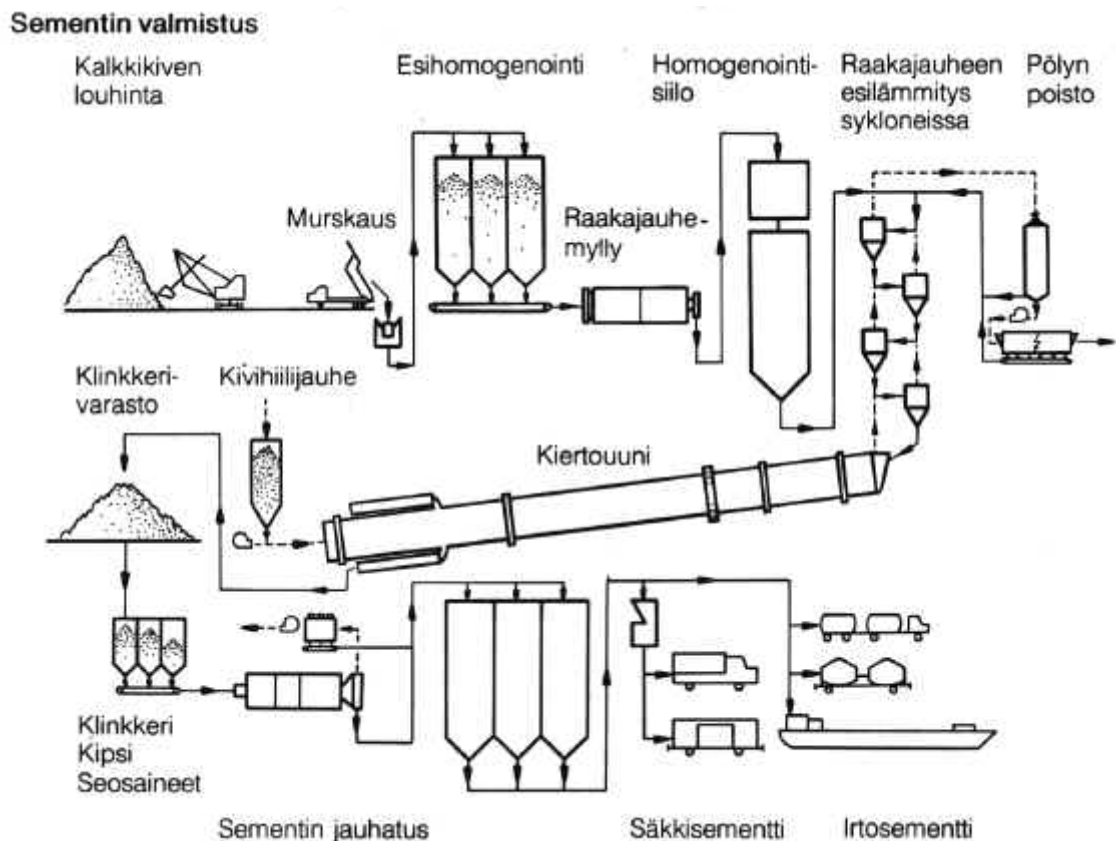
Portland-sementti koostuu pääasiassa kalkista (kalsiumoksidi CaO), silikasta (piioksidi SiO_2) ja alumiinioksidista (Al_2O_3). Kalkki saadaan kalkkikivestä ja muut oksidit savimaisesta aineesta. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

Muita Portland-sementin käytettyjä raaka-aineita voivat olla silikahiekka, rautaoksidi (Fe_2O_3) ja bauksiitti, joka koostuu suurelta osin alumiinihydroksidista ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Näitä aineita käytetään pienempiä määriä haluttujen ominaisuuksien aikaansaamiseksi. Myös magnesiumoksidia (MgO) käytetään seoksissa. Magnesiumoksidin suurin sallittu määrä Portland-sementissä on 4-5 %. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

Valmistus

Portlandin sementin valmistus voidaan jakaa neljään vaiheeseen. (KUVA 8)

- (1) Raaka-aineiden murskaaminen ja jauhaminen.
- (2) Aineiden sekoittaminen oikeassa seossuhteessa. Seoksen laatu tarkistetaan ennen polttoa. Tätä vaihetta kutsutaan homogoinniksi.
- (3) Valmistetun seoksen polttaminen kiertouunissa (1350 - 1550 °C), jolloin muodostuu sementtiklinkkeriä.
- (4) Sementtiklinkkeri sekoitetaan kipsin ja haluttujen seosaineiden kanssa. Seos jauhetaan, jonka jälkeen sementti on valmista. (esim. Encyclopædia Britannica "cement", 2011)



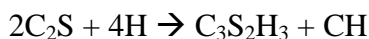
KUVA 8 Sementin valmistus (Prosessitekniikka)

Kemiallinen koostumus

Portlandin sementtiin kuuluu neljä perusainesta: trikalsiumsilikaatti ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), dikalsiumsilikaatti ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), trikalsiumaluminaatti ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ja tetrakalsiumalumiiniferriitti ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$). Lisäksi seokseen kuuluu pieniä määriä sitoutumatonta kalsiumoksidia (CaO), magnesiumoksidia (MgO) sekä pieniä määriä muita aineita. Seoskoostumus vaihtelee sementtilajien mukaan. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

Hydratoituminen

Hydratoitumisreaktiossa tärkeimpiä ainesosia ovat kalsiumsilikaatit, joita merkitään tässä C_2S ja C_3S (dikalsiumsilikaatti ja trikalsiumsilikaatti). Veden kanssa sekoitettaessa kalsiumsilikaatit reagoivat vesimolekyylien kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatin ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) sekä kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Vettä merkitään H:lla, jolloin kalsiumsilikaattihydraattia merkitään tässä kirjainyhdistelmällä C-S-H ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ja kalsiumhydroksidia C-H. Hydratoitumisreaktioita voidaan kuvailla seuraavalla yksinkertaistetuilla kaavoilla:



Hydratoitumisen alkuvaiheessa lähtöaineet liukenevat veteen, jolloin vapautuu paljon lämpöä. Tämän jälkeen hydratoitumisreaktio pysähtyy. Syytä välivaiheelle ei ole täysin selvitetty, mutta tämän välivaiheen ansiosta sementtiä voidaan muun muassa siirtää ennen valamista. Välivaihe saattaa kestää useita tunteja. Välivaiheen päätyttyä sementin kovettuminen alkaa C-H ja C-S-H-yhdisteiden alkaessa muodostua. Hydratoitumisen jatkuessa kuluu jatkuvasti sementtiä ja vettä. Muodostuvat C-H ja C-S-H-rakenteet vievät suunnilleen saman verran tilaa kuin lähtöaineet (vesi ja sementti), joten kutistuminen on hallittavissa. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

Yllä olevassa kaavassa C–S–H esitetään stoikiometrisesti spesifisenä kaavalla $C_3S_2H_3$, mutta muodostuva rakenne ei kuitenkaan ole yhdenmukainen vaan lopputuote on amorfinen geeli, jonka stoikiometria vaihtelee suuresti. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

3.6.2 Kuona-ainesementti

Kuonaseementin raaka-aineena käytetään rakeistettua kuona-ainetta, joka saadaan aikaan sopivan kuona-aineen nopealla jäähdyttämällä. Seoksessa käytetään yleensä Portlandsementtiä ja rakeista kuonaa. Lopullisessa tuotteessa voi olla jopa 85% kuona-aineita. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011) Kuona-aine sementistä tehdystä betonista saadaan oikeilla seossuhteilla aikaan huomattavasti perinteistä betonia kestävämpää. (Malagavelli et al., 2010)

3.6.3 Aluminaseementti

Korkean alumiinioksidi pitoisuuden sementti on erittäin nopeasti kovettuvaa. Sitä tehdään sulattamalla kalkkikiveä ja bauksiittia 1500 – 1600 °C lämpötilassa sulatusuunissa tai sintraamalla 1250 °C lämpötilassa. Alumiiniseementin valmistukseen soveltuvassa bauksiitissa on 50-60% alumiinioksidia, jopa 25% rautaoksidia, korkeintaan 5% piioksidia ja 10-30% vettä. Kalkkikiven piioksidi- ja magnesiumoksidipitoisuuksien tulee olla pieniä. (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

Valmis sementti sisältää 35-40% kalsiumoksidia, 40-50% alumiinioksidia, korkeintaan 15% rautaoksideja ja korkeintaan 6% piioksidia. Tärkein sementoiva ainesosa on kalsiumalumiinaatti ($CaO \cdot Al_2O_3$). (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

Korkean alumiinioksidipitoisuuden sementti saavuttaa suurimman osan lopullisesta lujuudestaan 24 tunnin sisällä ja se kestää hyvin kemiallista rasitusta. Sitä voidaan käyttää paloeristeenä. Etenkin valkoinen seos, joka sisältää hyvin vähän rautaoksidia ja piioksidia, on erittäin tulenkestävää (esim. Encyclopædia Britannica ”cement”, 2011)

3.6.4 Magnesiumpohjainen sementti

Magnesiumpohjaiset sementit ovat nopeasti kovettuvia, vahvoja, elastisia ja hyvin tulenkestäviä. Magnesiumpohjaista sementtiä on hyvin voinut käyttää muiden materiaalien kanssa sekoitettuna. Magnesiumpohjaisen sementin vedenkestävyys on kuitenkin ollut huono, koska se liukenee veteen. Vasta viime vuosina on saatu aikaan vedenkestäviä ratkaisuja. (Yunsong, 2001)

4. Johtopäätökset

Työssä on esitelty komposiittien rakennetta yleisellä tasolla. Komposiitit voidaan jakaa neljään pääryhmään: rakennekomposiitit, vaahto- ja huokoiset materiaalit, kuitulujitetut komposiitit, partikkelikomposiitit. Komposiitit muodostavat kevyempiä, halvempia ja kestävämpiä kokonaisuuksia kuin perinteiset materiaalit. Työssä pyrittiin avaamaan selkeällä tavalla komposiitit käsitteenä, koska komposiittien yleisrakenteiden hallitseminen auttaa ymmärtämään moniin tuotteisiin liittyviä rajoituksia ja kehitysmahdollisuuksia.

Valitsin betonin tarkempaa tarkastelua varten, koska betoni ja betonirakenteet ovat monipuolisia komposiitteja ja niissä yhdistyy monia komposiittien perusominaisuuksia havainnollistavalla tavalla. Betoni kuuluu itsessään partikkelikomposiitteihin. Tarkemmin sanottuna betoni on suurpartikkelikomposiitti ja erilaiset lujitetut betonit muodostavat komposiitteja, jossa betoni on komposiitin matriisi. Lisäksi työssä on tutustuttu sementteihin ja niiden kehittymiseen niiltä osin kuin on ollut tarpeellista betonin rakenteen avaamiseksi.

Betoni- ja sementtiteollisuus on erittäin tärkeä osa suomalaista yhteiskuntaa miljardiluokan liikevaihdolla ja miljoonien tonniin vuotuisella tuotannollaan. Vaikka betonin juuret ovat vuosituhansien päässä, on betoniteollisuus ja betonituotteet edelleen jatkuvasti kehittyvä tieteenala. Betonia yritetään jatkuvasti kehittää kestävämpään paremmin kulumista ja sen ominaisuuksia ääriolosuhteissa pyritään parantamaan.

Lähteet

Betonirakentaminen 1992 Tampereen Teknillinen Korkeakoulu Arkkitehtuurin osasto, 3. julkaisu, Tampere, 1992

Betoniteollisuus määrinä ja euroina

<<http://www.betoni.com/fi/Tietoa+betonista/Perustietopaketti/Betoniteollisuus+määrinä+ja+euroina/>>, 1.2.2011

Encyclopædia Britannica *cement*

<<http://www.britannica.com.libproxy.helsinki.fi/EBchecked/topic/101833/cement>>, 26.1.2011.

Encyclopædia Britannica *composite material*

<<http://www.britannica.com.libproxy.helsinki.fi/EBchecked/topic/130093/composite-material>>, 26.8.2008.

Encyclopædia Britannica *concrete*

<<http://www.britannica.com.libproxy.helsinki.fi/EBchecked/topic/131278/concrete>>, 26.1.2011.

Ji Yunsong, 2001 „Study of the new type of light magnesium cement foamed material” *Materials Letters*, 50(1), 28-31

Pu-Woei Chen ja D. D. L. Chung, 1993, Concrete reinforced with up to 0.2 vol% of short carbon fibres *Composites*, **24**(1), 33-52

Richard Tilley *Understanding Solids* John Wiley & Sons, Ltd, England, 2004

Tehdään betonista, Martinpaino Oy, Helsinki, 1989

Ulrich Schubert, Nicola Hüsing *Synthesis of Inorganic Materials* WILEY-VCH, Germany, 2000

Venu Malagavelli et. al., 2010, High performance concrete with GGBS and ROBO sand
International Journal of Engineering Science and Technology 2(10), 5107-5113

William D. Callister, Jr. *Materials Science and Engineering An introduction*, 5. painos
John Wiley & Sons, Ltd, 1999

Kuvalähteet

KUVA 1 Komposiittien jaottelukaavio

Callister, 1999 Fig. 17.2, s. 522

KUVA 2 Laminaattirakenne

http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_5_2.php (26.8.2008)

KUVA 3 Kerrosrakenne

http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_5_4.php (26.8.2008)

KUVA 4 Jatkuvakuittelujitettu-, katkokuitulujitettu-, ja kudottu mattokomposiitti

http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_5_1.php (26.8.2008)

KUVA 5 Kolmiulotteinen kuva kuitulujituksesta

http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_5_1.php (26.8.2008)

KUVA 6 Betonin rakenne

leikattu osa alkuperäisestä kuvasta

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Concrete_aggregate_grinding.JPG (1.2.2011)

KUVA 7 Cathedral of Santa Eulalia

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sta-eulalia.jpg> (1.2.2011)

KUVA 8 Sementin valmistus

<http://prosessiteknikka.kpedu.fi/doc-html/sementti.html> (17.5.2011)