

Tuoreen betonin ilmamäärän automaattinen mittaaminen – Diplomityö Aalto-yliopistossa

Teemu Ojala

Diplomi-insinööri, Projektityöntekijä
Betontechniikka
Aalto-yliopisto
teemu.ojala@aalto.fi

Tausta

Betonia on huokostettu ulkomailla pakkaskestävyyden parantamiseksi jo 1930-luvulta lähtien. Suomeen huokostaminen saapui muutamaa vuosikymmentä myöhemmin, ja varsinainen tarkoitusperäinen käyttö alkoi 1970-luvulla. Huokostuksen päämääränä on muodostaa betoniin suojahuokosia, joiden tilavuus on noin 4–6 prosenttia. Nämä huokokset estävät betonissa olevan veden jäätymisestä aiheutuvia jännityksiä, jolloin rakenne ei pääse tuhoutumaan ajan myötä. Viime vuonna huomattiin laadunvarmistuksen yhteydessä muutamassa eri rakennuskohteessa Suomessa, että ilmamäärät kovettuneissa betonirakenteissa olivat nousseet yli 10 prosenttiin. Tämä johti korjaustoimenpiteisiin, jotka taas viivästyttivät kohteen valmistumista, sillä huomattava ilmamäärän nousu merkitsi jopa 40 prosentin puristuslujuuden menetystä.

Työn tarkoitus ja sisältö

Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella tehtiin vuoden 2017 aikana diplomityö, jossa analysoitiin tuoreen betonin huokostamista akustisella mittausjärjestelmällä. Järjestelmän nimi oli CiDRA AIRtrac, joka mahdollistaa jatkuvan ja reaaliaikaisen mittauksen digitaalisesti suoraan betonisekoittimesta. Työn pää tavoitteena oli verrata akustisen mittauksen tuloksia perinteisiin tuoreen betonin ilmamäärän testausmenetelmien tuloksiin. Lisäksi tavoitteena oli selvittää, miten jatkuvaa mittausta voitaisiin käyttää ilmamäärän kehittymisen analysoimisessa sekoitustilanteessa.

Laboratoriokokeet

Laboratoriossa tehtiin 63 eri betonimassaa, joiden ilmamäärää ja notkeutta seurattiin betonin sekoitusta ja sen siirtoa rakennustyömaalle simuloivissa kokeissa. Työlle tärkeimpinä betonin ominaisuuksina pidettiin massan notkeutta sekä annosmäärää, joten massat jaettiin niiden perusteella kolmeen eri vertailusarjaan. Näiden sarjojen avulla järjestelmän mittaustarkkuutta rajoittavia tekijöitä pystyttiin sekä tunnistamaan että analysoimaan niiden vaikutuksia mittaustuloksiin. Kokeissa massoja sekoitettiin useaan kertaan puolen tunnin välein, jonka jälkeen niitä testattiin usealla eri menetelmällä. AIRtrac (Kuvio 1) mittasi betonin ilmamäärää jatkuvasti ja reaaliaikaisesti, jonka lisäksi sen ilmamäärä mitattiin tiheys- ja painemenetelmää käyttäen. Tämä johti parhaimmillaan jopa 200 vertailupariin eri testimenetelmien välillä.

Ilmamäärän mittauksen lisäksi kokeissa mitattiin betonin työstettävyyttä joko painuma- tai leviämättestillä. Testausmenetelmät noudattivat eurooppalaisia standardeja SFS-EN 12350 1–7, jotka kuuluvat tuoreen betonin testaukseen koskevaan standardisarjaan. Mitattaessa saadaan harvoin selville absoluuttista totuutta mitatun ominaisuuden arvosta. Lisäksi betonin mittaukseen liittyy olennaisesti epävarmuutta ja suurta hajontaa tuloksissa, joita pyrittiin pienentämään suurella määrällä mittauksia. Näistä syistä diplomityössä verrattiin analyttisesti menetelmien tuloksia keskenään mahdollisimman suurella määrällä testituloksia.

AIRtrac-teknologia toiminta perustuu äänennopeuden mittaamiseen huokoisessa



Tekijä: Teemu Ojala

Yhteystiedot: teemu.ojala@aalto.fi
D-työn nimi: Analyzing the air-entrainment of fresh concrete with an acoustic measurement system
Koulutusohjelma: Aalto-yliopisto, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka
Valvoja: Professori Jouni Punkki, Aalto-yliopisto
Ohjaaja: Professori Jouni Punkki
Lisätietoja: <https://aaltodoc.aalto.fi/>

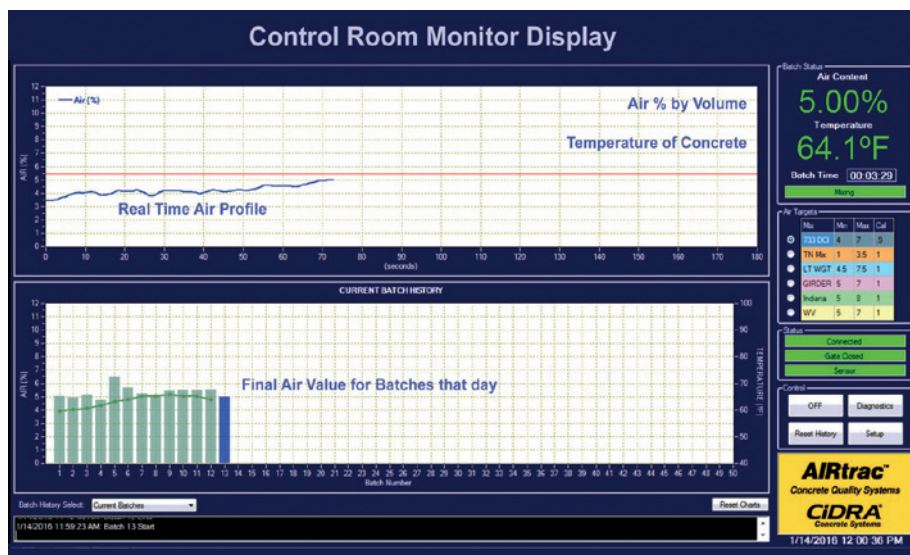
1-2 CiDRA AIRtrac asennettuna betonisekoittimen pohjaan.



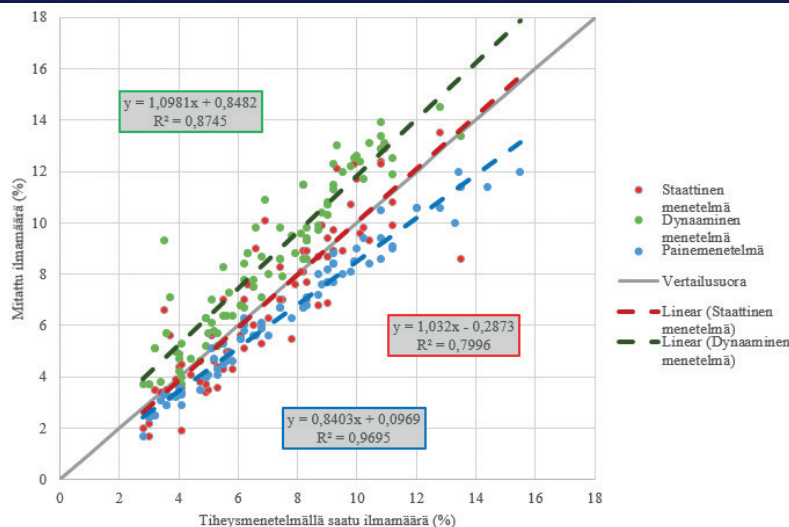
1



2



Kuvio 1



Kuvio 2

Kuvio 2 Mittausmenetelmiä verrattuna keskenään regressiosuoran avulla.

sedimentissä kuten betonissa. Ilmamäärän noustessa äänen nopeus hidastuu, jolloin viive lähettimen ja vastaanottimen välillä kasvaa. Laskettu äänennopeus voidaan muuttaa ilmamääräksi kertoimien avulla. Jatkuvan mittauksen takia kerätystä datasta jouduttiin laskemaan jälkepäin arvoja, joita verrattiin tiheys- ja painemenetelmällä saatuihin arvoihin. Yleisesti kaikkiin mittaustapoihin liittyy mittausvirhe, joka muodostuu toistettavuuden ja uusittavuuden määrittelemästä mittaussäätelmän tarkkuudesta. Hyvällä mittauslaitteella mittaustuloksiin ei synny juurikaan hajontaa huolimatta siitä, kuka suorittaa kokeen ja pysyvätkö tulokset samana tietyn henkilön koetta toistaessa.

Tulosten analysointi

Työssä saatuja mittaustuloksia verrattiin keskenään. Tämä tapahtui tilastollisia menetelmiä, regressiomalleja, histogrammeja sekä tilastollisia tunnuslukuja käyttäen. Mittaushavaintojen perusteella tuloksista tehtiin pisteparvi kuvaajia (Kuvio 2), joista nähtiin eri menetelmien korrelaatio sekä visuaalisesti että lineaarisen regressiomallin avulla. Tulosten

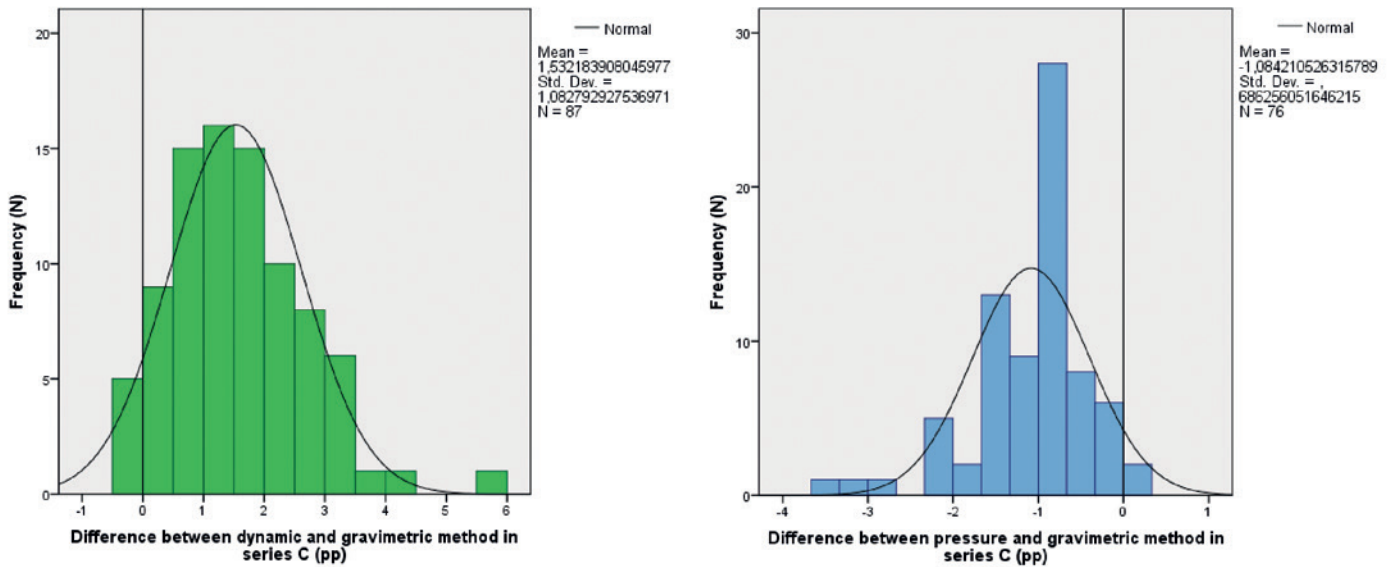
eroavaisuuksia tarkasteltiin käyttämällä histogrammeja (Kuvio 3), jolloin saatiin tarkempaa tietoa tulosten täsmällisyydestä ja vinoudesta. Seuraavaksi esitetään tuloksia viimeisestä koesarjasta, jossa oli varmistettu riittävä betonimassa sensorin yllä koko simuloinnin ajan. Vaikka AIRtrac mittaisi ilmamäärää jatkuvasti, jouduttiin vertailua varten laskemaan vertailukelpoisia lukuarvoja. Lukuarvoiksi valittiin kaksi eri lähestymistapaa, joista toinen otetaan mediaanilukemana (dynaaminen mittaustapa) juuri ennen sekoittimen pysäytystä ja toinen keskiarvona pysäyttämisen jälkeen (staattinen mittaustapa).

Painemenetelmällä saatiin muihin ilmamäärän mittausten menetelmiin nähden keskimäärin tarkempia tuloksia, joita kuvaavat korkea selitysaste (0,97) sekä pieni keskihajonta (0,69), kun niitä verrattiin tiheysmenetelmään. Mittauksen virheellisyys kasvoi kuitenkin noin 10 prosentin ilmamäärän jälkeen, jonka syystä korrelaatio tiheysmenetelmään nähden huononi. CIDRA AIRtrac:illa saatiin myös lupaavia tuloksia. Dynaamisen mittauksen selitysasteeksi saatiin 0,87, jota voidaan pitää hyvänä tuloksena. Dynaaminen mittaus kuvaa tarkimmin todel-

lisen maailman mittaustapaa, johon kyseinen akustinen järjestelmä on tarkoitettu sekoittimen ollessa käynnissä. Tämän lisäksi staattisella mittauksella saatiin selitysasteen arvoksi 0,80, joka jäi 17 prosenttia pienemmäksi kuin painemenetelmän selitysaste.

Myös regressioanalyysissä nähdyn hajonnan suuruudet ovat nähtävissä histogrammeista sekä visuaalisesti että keskihajonnan kautta. Verrattaessa histogrammien perusteella laskettua painemenetelmän keskihajontaa 0,69 dynaamisen mittauksen keskihajontaan 1,08 nähdään, että AIRtrac:n tulosten täsmällisyys on alhaisempi. Dynaamisen mittauksen tulokset olivat keskimäärin 1,53 prosenttiyksikköä korkeampia, jonka voidaan olettaa johtuvan siitä, että AIRtrac mittaa sekoituksen aikana tiivistämätöntä betonia.

Vaikka diplomityössä keskityttiin analysoimaan AIRtrac-teknologian mittaustarkkuutta, tehtiin työssä tämän lisäksi muutamia testejä, joissa pyrittiin mittaamaan ilmamäärän kehittymistä betonimassassa ensimmäisen sekoituksen aikana reaaliajassa. Kuviossa 4 esitetään seitsemän eri betonin ilmamäärän kehittymistä pitkitetyssä sekoituksessa. Betonimassat olivat



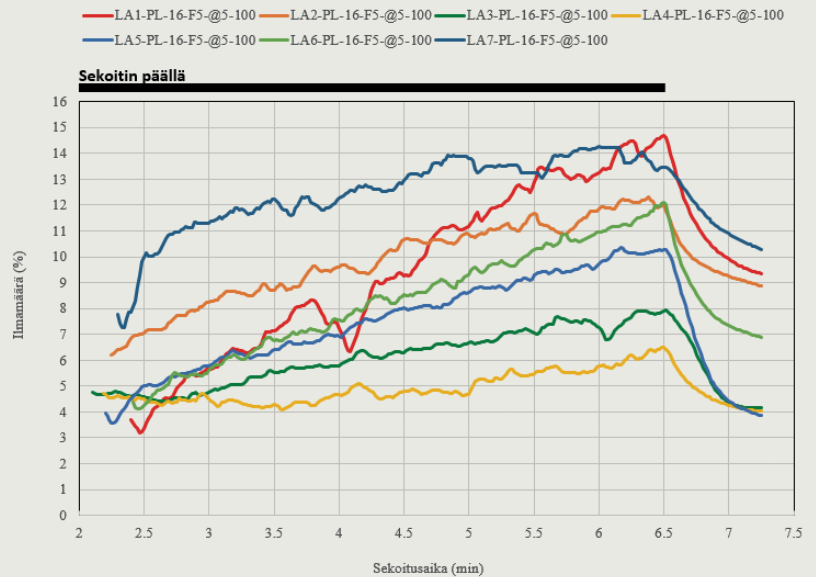
Kuvio 3

Kuvio 3 Mittausmenetelmiä verrattuna keskenään histogrammien avulla.

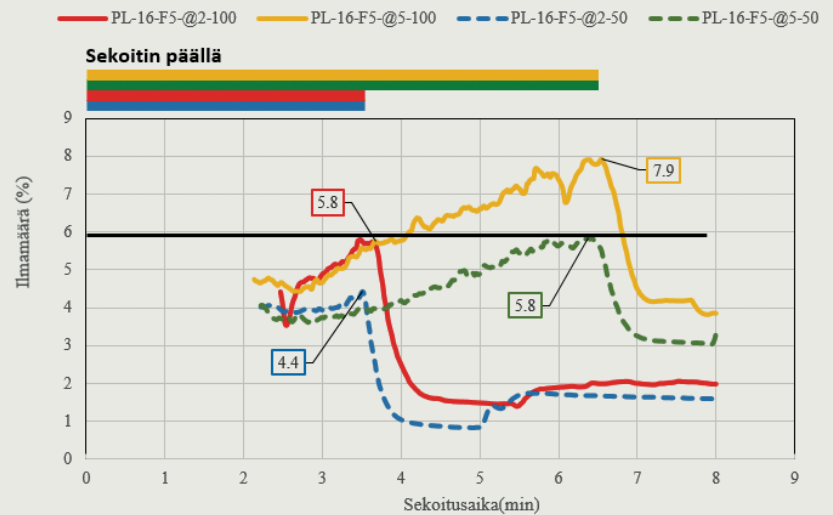
Kuvio 4 Ilmamäärän kehittymistä analysoidiin jatkuvan mittauksen avulla pitkitetyissä sekoituskokeissa

Kuvio 5 Huokostimen annosmäärän ja sekoitusajan vaikutuksia verrattiin keskenään AIRtrac-teknologiaa käyttäen.

Kuvio 4



Kuvio 5





3 Airtrac-mittauslaitteisto.

3

suunniteltu niin, että suhteutusilmamäärä saavutettiin kahden minuutin märkäsekoituksen kohdalla. Kokeen perusteella voitiin nähdä ilmamäärien nousevan pääsääntöisesti kaikilla lisäaineilla lineaarisesti aina kuuteen minuuttiin saakka niinkin korkeaksi kuin 15 prosenttia, joka on jo noin 2,5-kertainen alkuperäiseen ilmamäärään verrattuna. Tämä tarkoittaisi betonirakenteessa samanlaisia lujuudenmenetyksiä, joita voitiin todistaa laboratorion ulkopuolella vuoden 2016 puolella. Kokeiden tuloksissa saattavat kuitenkin korostuvat laboratoriossa käytetyn sekoittimen alhainen sekoitusteho sekä suurehkot lisäainemäärät.

Työssä haluttiin myös selvittää jatkuvan mittauksen tuomia mahdollisuuksia ilmamäärän kehittymisen analysoimisessa sekoituksen aikana. Kuten kuviossa 5 voidaan nähdä, niin puolitetulla huokostimen annostuksella voidaan saavuttaa sama ilmamäärä, jos sekoitus-aikaa pidennetään noin kuuteen minuuttiin. Koska kuitenkin ilmamäärä kehittyy betonissa sekoitusprosessin ja lisäaineiden yhteistyössä, joudutaan sekoitus aika optimoimaan jokaisen käytettävän lisäaineen, sekoittimen ja reseptin kanssa erikseen.

Johtopäätökset

Tuloksia vertaamalla huomattiin, että eri mittausmenetelmät antoivat järjestäen johdonmukaisia mittaus tuloksia. Poikkeuksena painomenetelmä näytti suuremmissa, yli 10 prosentin, ilmamäärissä suhteellisesti pienempiä tuloksia kuin muut menetelmät. Tästä huolimatta tiheys- ja painamenetelmällä saatiin hyvin samanlaisia

tuloksia normaalilla mittausalueella. Akustinen ilmamäärän mittaus tapa osoitti lupaavia tuloksia diplomityön perusteella. Mittaustarkkuus oli hyvä, kun valmistajan asettamat raja-arvot varmistettiin mittaustilanteessa. Korrelaatio dynaamisen ja staattisen menetelmän ja laskennallisen menetelmän välillä oli riittävä ilmamäärän mittaukseen betoniasemalla sekä laboratoriossa tehtävään ilmamäärän kehittymisen analysointiin sekoituksen aikana.

Työssä huomattiin myös, että laboratorio-olosuhteissa massan määrällä betonisekoittimessa ja työstettävyydellä voi olla suuri vaikutus mittaustarkkuuteen, mikäli valmistajan antamia minimiehtoja ei noudateta. Käytännössä kuitenkin monet mittaustarkkuuteen vaikuttavat raja-arvot voidaan välttää, sillä betonia tehdään suuremmalla sekoittimen täyttöasteella, jolloin sensori pysyy riittävän aikaa peittyneenä. Vaikka perinteisillä menetelmillä saatiin hieman tarkempia mittaus tuloksia, niin digitaalisten järjestelmien mahdollistama automaattinen laadunvalvonta tekee niistä ylivoimaisia tulevaisuuden tarpeita ajatellen.

Tulevaisuuden tavoitteet

Työn perusteella akustiseen mittaukseen perustuvalla teknologialla voidaan digitaalisesti mitata ilmamäärää betoniannoksittain suoraan betonisekoittimesta, jolloin laadunvarmistus koskien ilmamäärää voitaisiin tehdä reaaliaikaisesti ja vaivattomasti betoniasemalla. Koska betonirakenteen lopulliseen ilmamäärään vaikuttavat useat eri tekijät koko toimitusketjun aikana, on tulevaisuudessa oltava mahdollisuus

mitata betonin kriittisiä ominaisuuksia myös rakennuspaikalla. Esimerkiksi betonipumpun yhteyteen asennetulla mittauslaiteella voitaisiin varmistaa, ettei kuljetuksen aikana betonimassassa ole tapahtunut oleellisia muutoksia. Koska käytännössä oikeanlaisella nopeudella on suuri vaikutus työmaalla tapahtuvan betonivalun onnistumiseen, olisi tärkeää saada samalla mitattua betonin nopeus reaaliaikaisesti.

Diplomityössä saatiin lisäksi viitteitä siitä, kuinka digitaalista mittausta voidaan hyödyntää esimerkiksi betoniasemalla itse betonin ja laadunvarmistuksen kehittämisessä. Betonin tuotannon digitalisaation liittyy tulevaisuudessa myös muiden betonin valmistusprosessin kannalta tärkeiden osien integroiminen automatisoituun verkkoon ja esineiden internetiin (IoT = Internet of Things). Tällöin tuotantoketjun välinen informaatio kyseisestä betonista siirtyisi vaivattomasti eteenpäin aina seuraavaan vaiheeseen. Automaattisesti siirtyvää tietoa voisivat olla muun muassa tiivistystavat, lujuuden kehitys sekä betonin kuivuminen, jotka vaikuttavat olennaisesti betonivalun onnistumiseen. Samalla koestusmenetelmien mittaustarkkuutta voitaisiin parantaa, kun aikaisemman vaiheen tiedot saataisiin välitettyä aina seuraavaan vaiheeseen.

Työssä tehtiin yli 60 huokostettua betoni-massaa yhteistyössä tilaustutkimus Robust Air:n kanssa, jonka tarkoituksena oli selvittää, miksi ilmamäärät olivat nousseet huomattavan korkeiksi aiheuttaen betonirakenteiden lujuusongelmia.

4 Airtrac-mittauslaitteisto asennettuna.



4

Air-entrained concrete has been manufactured since the 1970s in Finland. The small air-entrained bubbles (4–6 % of the concrete volume) protect concrete from the freeze-thaw deterioration caused by the tension when the water freezes and expands inside the concrete. In 2016, it was noticed that the air amounts were elevated in some cases to over 15 percent that caused significant compressive strength losses in the finished structures. This suggests that the quality control in the concrete industry might be insufficient and furthermore the available measurement technology could be rather limited in today's standards.

The goal of the thesis was to analyze the air-entrainment of fresh concrete using an acoustic measurement system called CiDRA AIRtrac. This was done by comparing the accuracy and precision of the acoustic system to the tradition methods that are commonly used for the measurement of the air amount in fresh concrete. This AIRtrac technology allows a real-time and continuous measurement directly in the mixer while the concrete batch is being mixed. The air content measurements are based on changes in the travel time of acoustic waves in bubbly liquids such as concrete. In the experimental work, a total of 63 concrete batches were tested within multiple series, which resulted in a maximum of 200 comparison points.

On the study, the AIRtrac technology showed promising results. Furthermore, measuring the air content of the fresh concrete was automatic and therefore effortless when compared to the traditional testing methods. Many of the limit-

ing factors that affected the laboratory results can be avoided in the concrete industry. In addition, the continuous measurement opens new possibilities for the development of concrete. For example, the required mixing energy can be optimized to specific chemical additives for more stable and reliable air-entrainment. Finally, digital measurement systems could be combined into a single network (Internet of Things = IoT) that would allow seamless data exchange during the concrete production.