

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691(043.2)
Avtor:	Vid Pristavec
Mentor:	prof. dr. Violeta Bokan - Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	prof. dr. Zvonko Jagličić, univ. dipl. fiz.
Naslov:	Spremljanje vlažnosti v kompozitih z mineralnim vezivom
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	49 str., 10 pregl., 33 sl., 17 graf.
Ključne besede:	temperatura, relativna vlažnost, sistem senzorjev, merski sistem, hidratacija, hidratacijska toplota, mineralna veziva, kompozit, mešanice, gradbeništvo

Izvleček:

Cilj diplomske naloge je bil izdelati in preveriti delovanje sistema senzorjev, s pomočjo katerih bi lahko dolgoročno merili spreminjanje temperature in relativne vlažnosti v kompozitih z mineralnim vezivom. V sodelovanju s Fakulteto za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, smo izdelali dokaj preprost merilni sistem, ki je sestavljen iz 8 senzorjev za merjenje temperature in relativne vlažnosti, sistema za sprejem in obdelavo signalov in sistema za napajanje ter prenos podatkov.

V prvem delu naloge smo sestavili senzorje in preverili ali delujejo pravilno. Odločili smo se za uporabo senzorskih sond proizvajalca Sensirion, poimenovanih SHT 25. Gre za senzorje z digitalnim I²C vmesnikom, ki ponujajo dolgoročno stabilnost, komercialno dostopnost in sprejemljivo mersko napako. Okolje, v katero bodo senzorji vgrajeni, je zelo agresivno, zato so zaščiteni s posebnim pokrovom filtra in epoksi premazom. Vrednosti se beležijo in shranjujejo na računalniški enoti Raspberry Pi3. Odčitavanje in zapisovanje senzorskih podatkov deluje na podlagi treh napisanih skript, ki se izvršijo vsaki 2 minuti. Vzporedno uporabljamo komercialno poznan merilni sistem Ahlborn ALMEMO, s pomočjo katerega na koncu preverjamo verodostojnost podatkov pridobljenih z našim sistemom senzorjev.

V drugem delu smo pripravili recepture treh različnih mešanic in sicer : čista apnena malta, podaljšana cementna malta in lahki samozgoščevalni beton. Predhodno smo za namen preiskave pripravili tudi 8 opečnih zidakov. Mešanice smo zamešali po standardnem postopku in vanje vgradili senzorje.

Pridobljene vrednosti temperature in relativne vlažnosti obeh merilnih sistemov smo analizirali in med seboj primerjali. Podrobneje smo obravnavali proces hidratacije in z njo povezano teoretično ozadje. S primerjanjem pridobljenih rezultatov meritev je bilo ugotovljeno, da izdelan senzorski sistem kljub zadovoljivemu delovanju potrebuje nekaj izboljšav. Primerjava rezultatov temperature je pokazala dobro delovanje sistema, večja odstopanja in slabše delovanje pa opazimo pri primerjavi rezultatov relativne vlažnosti. S pomočjo preiskave je bilo ugotovljeno, kakšne spremembe in izboljšave potrebujemo oz. bi želeli v procesu razvoja SHT merilnega sistema.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC– DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	691(043.2)
Author:	Vid Pristavec
Supervisor:	prof. Violeta Bokan - Bosiljkov, Ph. D.
Cosupervisor:	prof. Zvonko Jagličić, Ph. D.
Title:	Humidity control in composites with mineral binder
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	49p., 10 tab., 33 fig., 17 graph.
Keywords:	temperature, relative humidity, sensor system, measurement system, hydration, hydration heat, mineral binders, composite, mixtures, civil engineering

Abstract:

The purpose of the diploma thesis was to design and test the functioning of a sensor system, which could be used for long term measurements of the temperature and relative humidity in mineral binder composites. In a cooperation with the Faculty of Electrical Engineering University of Ljubljana, we have developed a fairly simple measuring system consisting of 8 sensors for measuring temperature and relative humidity, a system for receiving and processing signals, a power supply system and data transmission system.

In the first part of the thesis we assembled the sensors and checked if they are working properly. We decided to use Sensirion sensor probes, named SHT 25. These sensors are using a digital I²C interface and are offering long-term stability, commercial accessibility and acceptable measurement errors. The environment in which the sensors will be integrated is very aggressive, so sensors have been protected with a special filter cover and epoxy coating all over the sensors. All the values sensors recorded were stored on a Raspberry Pi3 computer unit. All the sensor data readings and recordings works on the basis of three written programs, which are executed every 2 minutes. To compare all the received values with SHT sensor system we used commercially well known sensor system Ahlborn ALMEMO.

In the second part of the thesis we prepared three different mixtures: pure lime mortar, cement – lime mortar and lightweight self – compacting concrete. We also prepared 8 brick units. All the mixtures were mixed by standard procedure and the sensors were installed inside them.

All the obtained values of temperature and relative humidity of both sensor system were analysed and compared with each other. We discussed the hydration process and its theoretical background in more details. By comparing all the obtained results we found that despite satisfying performance, the sensor system needs some improvements. Worse performance were observed when comparing relative humidity results. Within investigation we identified which changes and improvements are needed or can be done within the measurement system development.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi pomagali pri delu in omogočili nastanek te diplomske naloge.

Za vodenje, strokovno pomoč in mentorstvo pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici prof. dr. Violeti Bokan - Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad in somentorju prof. dr. Zvonku Jagličiću, univ. dipl. fiz.

Zahvaljujem se tudi asist. Martinu Klunu, mag. inž. grad. in Franciju Čeponu, dipl. inž. grad. za nesebično pomoč pri pripravi in izvedbi laboratorijskih preiskav ter Slavenu Ranogajcu, mag. inž. el. za pomoč in navodila pri izdelavi merilnih senzorjev.

Na koncu bi se zahvalil še svojim staršem in bližnjim prijateljem za podporo v času študija.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC– DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA.....	VII
1 UVOD	1
2 UPORABLJENA MINERALNA VEZIVA	2
2.1 Apno	2
2.2 Cement	4
2.3 Portland cement.....	5
2.3.1 Proces hidratacije	6
2.3.1.1 Hidratacijska toplota	9
2.3.1.2 Razvoj drugih produktov hidratacije	10
3 VLAŽNOST, TEMPERATURA IN ALKALNO OKOLJE	12
3.1 Vlažnost v zraku.....	12
3.1.1 Absolutna vlažnost	12
3.1.2 Relativna vlažnost	12
3.2 Temperatura	12
3.3 Alkalno okolje.....	13
4 UPORABLJENI MERSKI SISTEMI	14
4.1 Predstavitev merilnega sistem senzorjev SHT	14
4.1.1 Senzor za merjenje vlažnosti.....	18
4.1.2 Senzor za merjenje temperature	18
4.1.3 Težave pri izdelavi senzorjev	18
4.1.4 Predvidene težave pri uporabi in vgradnji senzorjev	18
4.2 Merilni sistem Ahlborn ALMEMO 2590 – AA.....	19
5 PRIPRAVA OPEČNIH ZIDAKOV	21
6 PRIPRAVA MEŠANIC	22
6.1 Podaljšana cementna malta (PCM)	22
6.1.1 Postopek mešanja	22
6.2 Čista apnena malta (AM)	23

6.2.1	Postopek mešanja	23
6.3	Lahki samozgoščevalni beton (LSCC)	24
6.3.1	Postopek mešanja	25
7	VGRADITEV SENZORJEV V MEŠANICE	26
7.1	Podaljšana cementna malta.....	26
7.2	Čista apnena malta.....	27
7.3	Lahki samozgoščevalni beton.....	28
7.3.1	Izdelava kalupa.....	28
7.3.2	Vgraditev senzorjev.....	28
8	ANALIZA REZULTATOV	30
8.1	Rezultati meritev relativne vlažnosti in temperature s senzorji SHT	30
8.1.1	Laboratorij	31
8.1.2	Hidracija v začetnem času	32
8.1.3	Lahki samozgoščevalni beton – LSCC.....	34
8.1.4	Podaljšana cementna malta – PCM	36
8.1.5	Čista apnena malta (AM).....	38
8.2	Rezultati meritev relativne vlažnosti in temperature s senzorjem AA	40
8.2.1	Laboratorij	40
8.2.2	Lahki samozgoščevalni beton – LSCC.....	41
8.3	Primerjava meritev SHT in AA	43
8.3.1	Laboratorij	43
8.3.2	Lahki samozgoščevalni beton LSCC.....	45
9	ZAKLJUČKI	48
VIRI		50

KAZALO SLIK

Slika 1: Krog preobrazbe apna	3
Slika 2: Morfologija C-S-H gela, CH kristalov in kristalov etringita [6].....	8
Slika 3: Proces hidratacije cementa [7]	8
Slika 4: Sproščena toplota v odvisnosti od časa hidratacije [5]	9
Slika 5: Razvoj hidratacijske toplote glede na vodocementno razmerje in finost cementa [9]	10
Slika 6: Časovni razvoj hidratacijskih produktov (levo) in časovni razvoj lastnosti betona (desno) [5]	11
Slika 7: Razvoj trdnosti mineralov cementa [8]	11
Slika 8: Razlika med vsebnostjo vlage, ki se zmanjšuje od leve proti desni [11]	12
Slika 9: SHT sistem senzorjev v laboratoriju	14
Slika 10: SHT senzor	14
Slika 11: Shema delovanja merilnega sistema SHT [17]	15
Slika 12: I ² C vmesnik s priključenimi senzorji	15
Slika 13: Raspberry Pi3 [18]	16
Slika 14: Največja toleranca relativne vlažnosti pri temperaturi 25 °C [16]	17
Slika 15: Največja toleranca temperature v °C [16]	17
Slika 16: AA senzor temperature in vlage	19
Slika 17: Ahlborn ALMEMO 2590	19
Slika 18: Prikaz položaja senzorja SHT in AA v mešanici LSCC	20
Slika 19: Sušenje opečnih zidakov v pečici pri 100 °C (levo) in namakanje opečnih zidakov v vodi (desno)	21
Slika 20: Pripravljene količine peska, apna in cementa za podaljšano cementno malto	22
Slika 21: Pasiranje apna	23
Slika 22: Tehtanje sestavin lahkega samozgoščevalnega betona	25
Slika 23: Dodajanje murskega proda v mešalni boben	25
Slika 24: Senzor vgrajen v spojnico	26

Slika 25: Simulirana zidana opečna stena	26
Slika 26: Senzor v spojnici čiste apnene malte.....	27
Slika 27: Vgradnja senzorja v zgornjo spojnico	27
Slika 28: Vgradnja obeh senzorjev v svežo betonsko mešanico LSCC	28
Slika 29: Po 24 urah odstranimo del opaža	29
Slika 30: Pogled na zgornji del kalupov	29
Slika 31: Senzorji AA in SHT vgrajeni v svežo betonsko mešanico	29
Slika 32: Analiza vrednosti pridobljenih s sistemom senzorjev SHT	30
Slika 33: Izbira časovnega koraka v programu Excel	30

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemijska sestava portland cementa	5
Preglednica 2: Masa suhih opečnih zidakov	21
Preglednica 3: Masa opečnih zidakov v fazi priprave	21
Preglednica 4: Sestava mešanice podaljšane cementne malte - PCM	22
Preglednica 5: Sestava mešanice čiste apnene malte - AM	23
Preglednica 6: Določanje vlažnosti agregata mešanice LSCC	24
Preglednica 7: Sestava mešanice lahkega samozgoščevalnega betona - LSCC	24
Preglednica 8: Primerjava vrednosti temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju	43
Preglednica 9: Primerjava vrednosti temperature in relativne vlažnosti v mešanici LSCC 1	45
Preglednica 10: Primerjava vrednosti temperature in relativne vlažnosti v mešanici LSCC 2	45

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Časovni potek temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju.....	31
Grafikon 2: Razvoj temperature v prvih 50 urah preizkusa	32
Grafikon 3: Časovni potek temperature v mešanici LSCC 1 in LSCC 2	34
Grafikon 4: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici LSCC 1 in LSCC 2	35
Grafikon 5: Časovni potek temperature v mešanici PCM	36
Grafikon 6: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici PCM.....	37
Grafikon 7: Časovni potek temperature v mešanici AM.....	38
Grafikon 8: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici AM.....	39
Grafikon 9: Časovni potek temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju (sistem AA).....	40
Grafikon 10: Časovni potek temperature v mešanici LCSS 1 in LCSS 2 (sistem AA).....	41
Grafikon 11: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici LCSS 1 in LCSS 2 (sistem AA).....	42
Grafikon 12: Primerjava vrednosti T v laboratoriju izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA	43
Grafikon 13: Primerjava vrednosti RH v laboratoriju izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA	44
Grafikon 14: Primerjava vrednosti T v mešanici LSCC 1 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA	46
Grafikon 15: Primerjava vrednosti T v mešanici LSCC 2 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA	46
Grafikon 16: Primerjava RH v mešanici LSCC 1 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA	47
Grafikon 17: Primerjava RH v mešanici LSCC 2 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA	47

OKRAJŠAVE

Oznaka	Razlaga
V/C	Vodo – cementno razmerje
T	Temperatura
RH	Relativna vlažnost
LSCC	Lahki samozgoščevalni beton
PCM	Podaljšana cementna malta
AM	Čista apnena malta
SHT	Razvijajoči senzorski sistem za merjenje relativne vlage in temperature
AA	Komercialno dostopen merilni sistem Ahlborn ALMEMO
SP	Superplastifikator
HT	Hidratacijska toplota

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Gradbeništvo je panoga, ki ima izjemen vpliv na razvoj nacionalnega in evropskega gospodarstva. Ustvari okoli 10 % BDP in v EU zagotavlja preko 20 milijonov delovnih mest, kar nakazuje na to, kako zelo pomemben je trajnostni razvoj gradbene industrije. Z razvojem materialov in materialnih lastnosti je gradnja postala hitrejša, cenejša in hkrati bolj varna. Znatno so se povečale tudi možnosti oblikovanja stavb in uporabe konstrukcijskih materialov. Na trg so vstopili številni novi dodatki in tehnologije gradnje, ki so povzročili, da proizvodnja apnenih, cementih, predvsem pa betonskih mešanic ni več tako zelo enostaven tehnološki postopek. Zahtev za uporabo naprednejših in učinkovitejših materialov je vedno več, zato so se povečale potrebe po spremljanju, testiranju in nadzorovanju vgrajenih materialov. Poleg tega pa ne smemo pozabiti tudi na stroge standarde in druge omejitve, ki prav tako zahtevajo določene kontrole kakovosti. Vse to so razlogi, da se na trgu pojavljajo številne tehnološke ideje in rešitve, katere inženirjem olajšajo delo ter povečajo produktivnost in kakovost gradnje.

Namen diplomske naloge je predstaviti, izdelati in preveriti delovanje senzorskega sistema za merjenje relativne vlage in temperature, v sodelovanju s strokovnjaki Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani (v nalogi poimenovani sistem senzorjev SHT). Izdelan merski sistem uvrščamo med neporušne metode testiranja. Senzorji merijo spreminjanje temperature in relativne vlage v kompozitih z mineralnim vezivom. V okviru diplomske naloge smo vgradili 7 senzorjev v 3 različne kompozitne materiale in sicer: podaljšano cementno malto, čisto apneno malto in lahki samozgoščevalni beton. Zunanji, osmi senzor služi kontroli relativne vlažnosti in temperature v laboratoriju.

Cilj diplomske naloge je:

- Preveriti stabilnost ter obstojnost senzorjev v agresivnem alkalnem mediju (beton ali malta).
- Spremljati spreminjanje vlažnosti in temperature v času sušenja.
- Izboljšati delovanje merilnih senzorjev.

Dobljene rezultate bomo vzporedno primerjali z rezultati komercialnega merilnega sistema Ahlborn ALMEMO (v nalogi poimenovan sistem senzorjev AA). Informacije in rezultati, ki jih bodo v prihodnosti tovrstni vgrajeni senzorji ponujali izvajalcu, bodo lahko pomembno vplivali na nadaljnje odločitve v času gradnje.

2 UPORABLJENA MINERALNA VEZIVA

Mineralna veziva so snovi, ki se pri mešanju z vodo spremenijo v plastično zmes. Ta se v procesu vezanja strdi in spremeni v čvrsto gradivo. Dobljeni material sodi med keramične materiale in povezuje druge keramične materiale ter tako tvori konstrukcijske elemente [1].

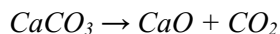
Razvrščamo jih v 4 večje skupine:

- Zračna veziva, ki vežejo na zraku (gašeno apno, mavec, glina).
- Hidravlična veziva, ki vežejo na zraku in v vodi (hidravlično apno, cement).
- Ognjeodporna veziva (glina).
- Avtoklavna veziva.

V diplomski nalogi se bomo osredotočili predvsem na apno in portlandski cement. To sta vezivi, ki smo ju uporabili pri pripravi mešanic.

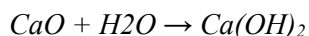
2.1 Apno

Apno pridobivamo z žganjem apnenca v posebnih pečeh pri temperaturah med 925 in 1340 °C. Čas in temperatura žganja sta odvisna od velikosti kamnov. Pri segrevanju apnenca pride do kemične reakcije (kalcinacije) in tako nastane **živo apno** [2]:



Apno vsebuje CaO – kalcijev oksid in v manjši količini tudi MgO – magnezijev oksid. Dobljeno živo apno je v večjih kosih, katere se zmelje v fini prah. Živoapnena malta je zmes živega apna, peska in vode. Uporabljamo jo za zidavo, ometavanje in izvedbo tlakov.

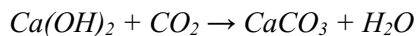
Živemu apnu lahko dodamo tudi vodo (proces gašenja) in dobimo **gašeno ali hidratizirano apno**:



Apneno testo praviloma dlje časa odležava v apneni jami prekrito s slojem vode, ker tako pridobiva na kakovosti. Priporočljiv čas odležavanja apnenega testa je od 2 meseca do nekaj let [2].

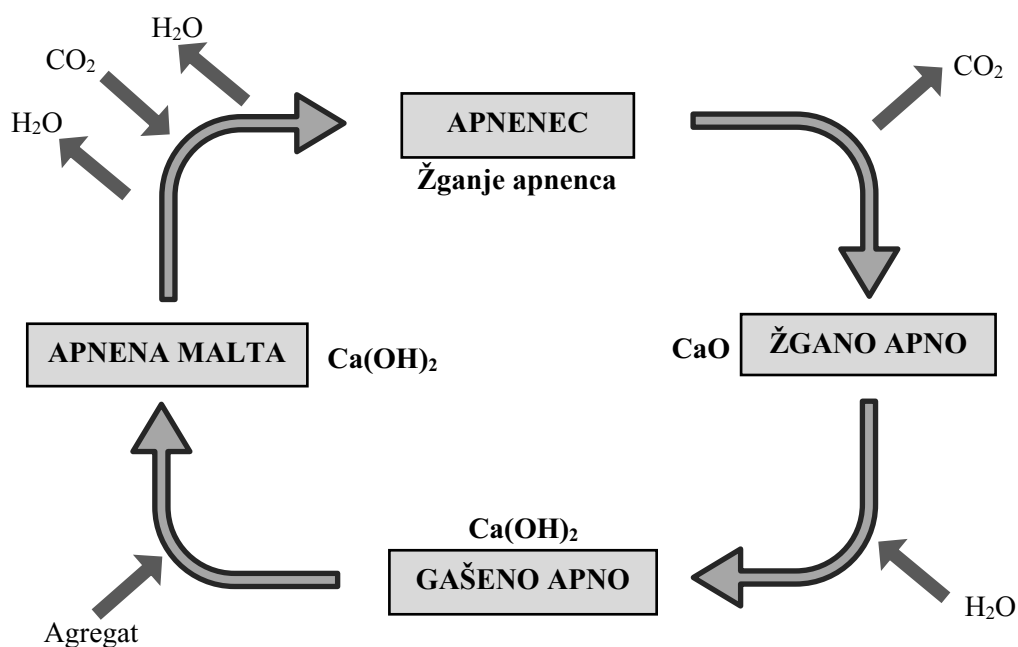
Hidratizirano apno je apno v praškasti obliki ali v obliki apnenega testa. Apno v praškasti obliki vsebuje točno določeno, teoretično potrebno količino vode glede na maso živega apna. Apnena malta je zmes apnenega testa ali praškastega apna in ustrezne količine vode ter mineralnega agregata [2].

Strjevanje apnene malte se začne z izhlapevanja vode v okolico ter vezanjem hidratiziranega apna s CO₂ iz zraka. Ko postane apnena malta delno suha, se začne proces karbonatizacije, pri kateri kalcijev hidroksid reagira z ogljikovim dioksidom (raztopljen v vodi) in tvori kalcijev karbonat [2].



Potek karbonatizacije je odvisen od mnogih faktorjev, ki jih delimo na eksterne in interne. Med eksterne uvrščamo relativno vlažnost, cikle navlaževanja in sušenja, delež CO_2 v zraku in temperaturo. Med interne faktorje uvrščamo poroznost in prepustnost materiala ter sestavo in kakovost apna. Karbonatizacija je optimalna v okolju z relativno vlažnostjo med 40 in 60 % ter okolju z zadostno vsebnostjo ogljikovega dioksida. S povečevanjem koncentracije CO_2 se stopnja karbonatizacije poveča in vodi do hitrejšega strjevanja apnene malte. Topnost in reaktivnost CO_2 je najbolj optimalna v temperaturnem območju okoli 20 °C. Za proces karbonatizacije je značilno, da pride do povečanja prostornine in mase kalcijevega karbonata, zato se poroznost malte zmanjša. Zmanjšana poroznost oz. zmanjšana velikost por vpliva na prepustnost malte in difuzijo CO_2 iz okolice v malto. Slabša kot je difuzija CO_2 , počasnejša je karbonatizacija. Velik vpliv ima tudi kakovost apna oz. apnenega testa. V maltah narejenih iz dlje časa uležanega apnenega testa (več kot 5 let) je potek karbonatizacije hitrejši in kakovostnejši [2].

Preobrazbo apna najlažje ponazorimo s spodnjo shemo.



Slika 1: Krog preobrazbe apna

2.2 Cement

Je sestavina, katera je danes v gradbeništvu nepogrešljiva. Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki v stiku z vodo veže in se strdi. Mešanico vode in cementa imenujemo cementna pasta. Ta se s časom strdi in nastane trden cementni kamen, sestavljen večinoma iz kalcijevih silikat hidratov, ki tako v vodi kot na suhem nudi odlično stabilnost in trdnost [1].

Osnovna sestavina so minerali, katere najdemo v apnencu in glini ali njuni naravni mešanici - laporju. Surovine se ustrezno pripravi in po potrebi zmeša z dodatki (žlindra, boksit, železova ruda itd.). Mešanico zmeljemo v mlinu surovin in dobimo surovinsko moko. Surovinska moka se homogenizira in transportira v izmenjevalec toplote. Namen izmenjevalca toplote je segreti in dekarbonizirati surovinsko moko (apnenec razpade v živo apno). Predgreta surovinska moka gre nato v rotacijsko peč, v kateri se dalje segreva. Rotacijska peč je dolga peč v obliki cevi, ki je postavljena pod rahlim nagibom (3,5 %). Cev se počasi vrti in omogoča potovanje ter žganje surovin v treh intervalih (opisani spodaj). V prvih dveh surovine žgemo na visokih temperaturah, v tretjem intervalu pa surovine ohlajamo. Različni temperaturni nivoji povzročijo nastanek novih mineralov, katere potrebujemo v končnem produktu – klinkerju. Dobimo cementni klinker, na pogled podoben pepelu v obliki 30 mm velikih granul temne sive barve. Za običajne vrste cementov se v glavnem proizvaja klinker, ki vsebuje 60 - 70 % alita, 20 - 25 % belita, 7 - 10 % ferita, 7 - 10 % aluminata, vsebnost prostega apna pa naj ne bi bila večja od 2 %. Klinker se nato ohladi in zmelje v fini prah. Pri mletju se pogosto dodajajo dodatki: tuf, žlindra, apnenec in elektrofiltrski pepel. Katere dodatke dodamo je odvisno od vrste cementa [3].

1. Faza: segrevanje do 1300 °C

S segrevanjem do 1300 °C dobimo 3 pomembne reakcije:

1. Razpad kalcita v apno (CaO) in CO_2
2. Razpad glinenih materialov
3. Reakcija apna z razgrajenimi kremenčevimi in glinenimi materiali.

V tej fazi nastane manjša količina taline, vendar je kljub temu pomembna za spodbujanje kasnejših reakcij. Glavni produkti te faze so: belit, aluminat, ferit in apno.

2. Faza: segrevanje od 1300 do 1450 °C

Prva tvorba klinkerja se pojavi v temperaturnem območju med 1300 in 1340 °C. Nastane talina, pretežno iz aluminata in ferita. Najvišjo temperaturo 1450 °C doseže material v coni sintranja, kjer potekajo najpomembnejše reakcije. Večji del prostega apna in belita reagira in dobimo alit. V tem temperaturnem območju je približno 30 % mešanice še v tekočem stanju - talina.

3. Faza: ohlajanje

Faza ohlajanja odločilno vpliva na kvaliteto cementa. V fazi ohlajanja se talina kristalizira v aluminat in ferit. Hitrost hlajenja do 1250 °C je počasna, sledi pa hitro hlajenje. Hitro hlajenje zadrži obstoječo mineralno sestavo klinkerja s čim večjo vsebnostjo alita, ki prispeva k trdnosti cementa.

2.3 Portland cement

Portland cement je predstavnik silikatnih cementov in je najpogostejše uporabljen cement v gradbeništvu. Uporablja se za izdelavo betonov in malt. Sestavljen je iz osnovnih mineralov portland cement klinkerja in številnih dodatkov (žindra, pucolan, elektrofiltrski pepel itd.). Cementni klinker je poli – mineralni material, sestavljen iz oksidov CaO (C), SiO_2 (S), Al_2O_3 (A) in Fe_2O_3 (F) [4].

Portland cement, ki smo ga uporabili v raziskavah je zmes štirih glavnih mineralov in dodatkov:

Preglednica 1: Kemijska sestava portland cementa

Mineral	Kemijski zapis	Oznaka	Masni delež
Trikalcijev silikat (alit)	Ca_3SiO_5	C_3S	50-70 %
Dikalcijev silikat (belit)	Ca_2SiO_4	C_2S	15-30 %
Trikalcijev aluminat (aluminat)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A	5-16 %
Tetrakalcijev aluminoforit (ferit)	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF	5-17 %
Sadra	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	/	/
Polnila	/	/	/

Minerali portland cementa in njihove najpomembnejše lastnosti [4], [5]:

Trikalcijev silikat - C_3S je najpomembnejši mineral med minerali cementnega klinkerja. Značilno je, da močno reagira in pri strjevanju največ prispeva k začetni trdnosti. Na začetku hidratacije z vodo reagira zelo hitro in pri tem se sprošča veliko hidratacijske toplote. Polovico trdnosti pridobi že v prvih 3 dneh.

Dikalcijev silikat - C_2S za razliko od C_3S počasneje reagira z vodo in zato postopno strjuje ter sprošča bistveno manj hidratacijske toplote. K trdnosti cementne paste prispeva bistveno kasneje kakor C_3S .

Trikalcijev aluminat - C_3A na začetku z vodo reagira zelo hitro in pri tem sprošča veliko hidratacijske toplote. Hitrost vezanja se omejuje z dodajanjem sadre. Prispeva samo k zgodnji trdnosti. Zelo je občutljiv na sulfatno korozijo.

Tetrakalcijev aluminoforit - C_4AF cementu daje značilno sivo barvo. Strjuje počasi in zato malo prispeva k trdnosti cementne paste. V primerjavi s C_3A je bolj odporen na sulfatno korozijo.

2.3.1 Proces hidratacije

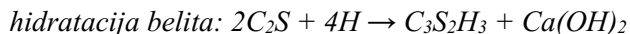
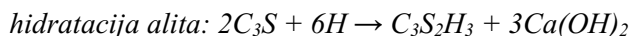
Hidratacije je eksotermna reakcija med zrnji cementa in vodo, ki povzroča mehansko fizikalno spreminjanje sveže betonske mešanice v strjen beton oz. prehod sveže plastične cementne paste v cementni kamen. Molekule vode obdajo ione trdnih delcev cementa in omogočajo, da se lepo uredijo novonastale gelske in kristalne strukture, ki oblikujejo heterogeno mikrostrukturo z visoko tlačno trdnostjo. Prehod mešanice iz tekoče v trdno obliko imenujemo vezanje, kasnejši razvoj mehanskih lastnosti pa strjevanje [4], [5].

Hidratacije je odvisna od:

- Sestave klinkerja.
- Količine primesi v mineralih klinkerja.
- Količine in oblike kalcijevega sulfata.
- Finosti in granulacijske sestave cementa.
- Vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice.

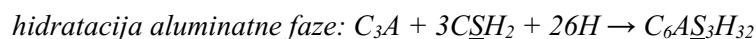
V cementni pasti se prične odvijati več pomembnih faz [4], [5]:

1. Reakciji trikalcijevega silikata (C_3S) in dikalcijevega silikata (C_2S) z vodo proizvedeta kalcijev silikat hidrat in kalcijev hidroksid $Ca(OH)_2$. Pri reakciji se sprošča hidrationska toplota. Hidratacija zapisana z enačbami poteka takole:



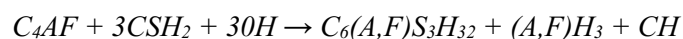
Oba silikata potrebujeta približno enako količino vode za hidratacijo. Glavni produkt hidratacije silikatov je C-S-H gel.

2. Reakcija sadre in trikalcijevega aluminata (C_3A) ob prisotnosti vode. V reakciji nastaja etringit in hidrationska toplota. Reakcija aluminatne faze z vodo bi bila trenutna, če tega ne bi preprečeval dodatek sadre. Enačba reakcije je takšna:

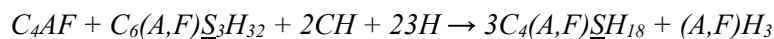


Hidratacija aluminatne faze zahteva največjo količino vode. Podobno hidratizira tudi feritna faza, vendar bistveno počasneje.

3. Reakcija ferita (C_4AF) s sadro. V prvi reakciji ferit reagira s sadro in vodo ter pri tem tvori etringit, apno in aluminijev hidroksid:



Ferit nato reagira še z novonastalim etringitom iz prejšnje reakcije:



Reakcije mineralov klinkerja, kalcijevega sulfata in vode so eksotermne, zato lahko spremljamo količino sproščene hidrationske toplote v odvisnosti od časa. Proces hidrationske običajno razdelimo na 5 obdobij (slika 4):

Predindukcijsko obdobje (1)

Največ hidrationske toplote v procesu hidrationske se razvije v predindukcijskem obdobju, ko zmešamo minerale klinkerja in vodo. Prva faza običajno traja nekaj minut. Hidrationska in razvoj hidrationske toplote se počasi upočasni zaradi nastajanja etringita, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na površini cementnih zrn [5].

Indukcijsko obdobje – obdobje mirovanja (2)

Predstavlja prehod v glavno reakcijo hidrationske. Pospešena je tvorba C-S-H gela na površini cementnih zrn in prej nastalem etringitu. Površina cementnih zrn je v večjem delu prekrita s C-S-H gelom. Kohezija cementnega kompozita se poveča, kar pomeni, da se je začelo vezanje in prehod v trdno agregatno stanje. Do sprememb hidrationske toplote v tem obdobju ne prihaja [5].

Obdobje pospešene hidrationske (3)

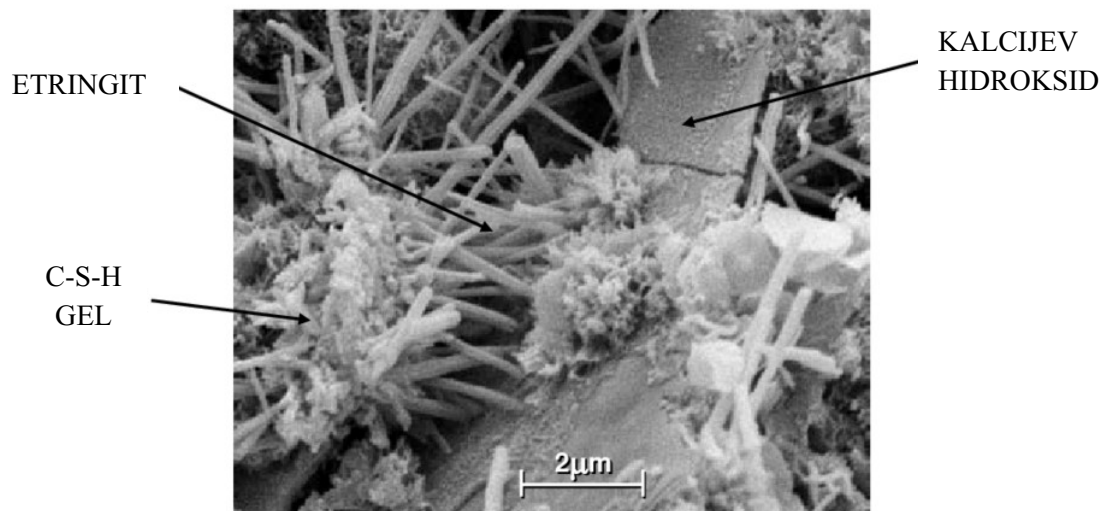
Prične se okoli 3 ure po prvi fazi in traja do 10 ur. Hidrationska poteka pospešeno, zato je rast produktov hidrationske v temu obdobju največja. Zaradi povečane hitrost hidrationske minerala C_3S v tej fazi ponovno naraste hidrationska toplota. Cementni gel je gosta tekoča zmes z enakomerno razporejenimi zrn [5].

Obdobje pojemajoče hidrationske (4)

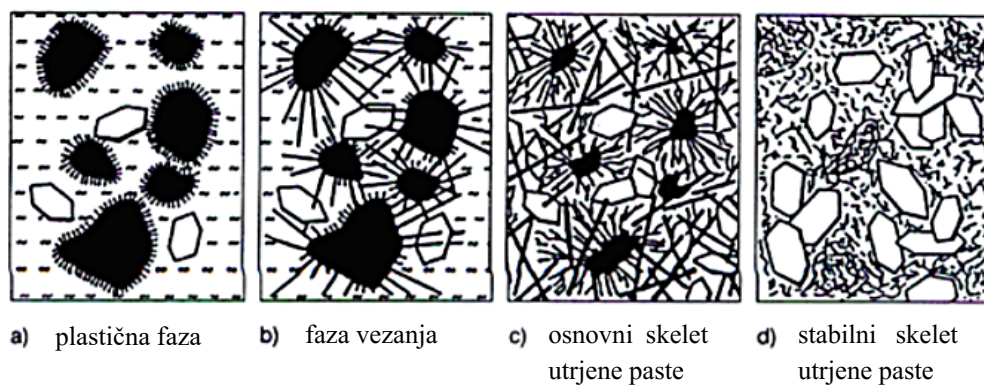
Proces hidrationske in sproščanje hidrationske toplote se v tem obdobju bistveno upočasni zaradi poraščenosti površine nehidratiziranih cementnih zrn s C-S-H gelom, ki ovira difuzijo molekul vode. Zaradi hidrationske C_3S in C_2S še vedno počasi nastaja C-S-H gel. V nadaljevanju hidrationske material zori. Prostor med zrnici cementa se zapolnjuje s C-S-H gelom in kristali kalcijevega hidroksida. Gel se s časom gosti, struktura se dalje zapolnjuje in tvori cementni kamen [5].

Obdobje mirne hidrationske (5)

Proces hidrationske se skoraj popolnoma umiri. Traja toliko časa, dokler so na voljo nehidratizirana cementna zrna cementa in voda. Cementni kompozit v tem obdobju pridobiva na trdnosti [5].



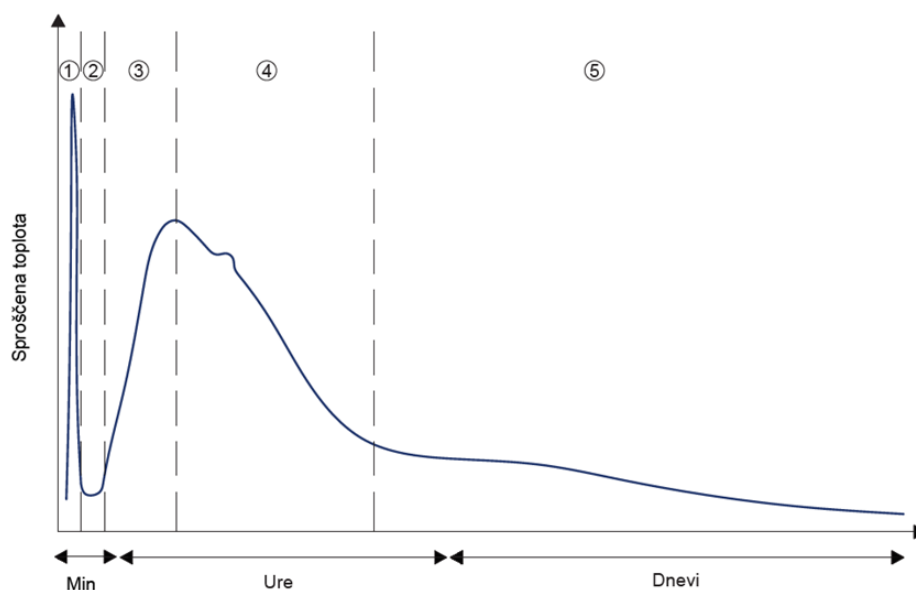
Slika 2: Morfologija C-S-H gela, CH kristalov in kristalov etringita [6]



Slika 3: Proces hidratacije cementa [7]

2.3.1.1 Hidratacijska toplota

Hidratacijska toplota je količina toplote, ki se sprosti med hidratacijo enega grama nehidratiziranega cementa. Količina hidratacijske toplote je odvisna od posameznih hidratacijskih toplot njegovih komponent. Največ hidratacijske toplote razvijeta minerala alit in aluminat, potem sledi ferit in nato belit. S poznavanjem mineraloške sestave cementa lahko vplivamo na količino sproščene hidratacijske toplote in na končno trdnost cementa. Prevelika količina sproščene toplote lahko negativno vpliva na končno trdnost cementa. Sproščena toplota ima pozitiven vpliv v zimskem času, ko delno varuje beton pred zmrzovanjem [8].



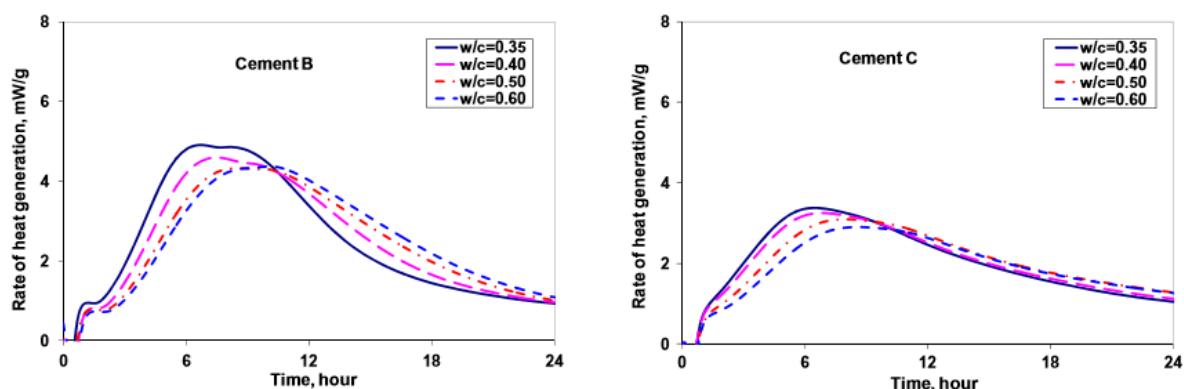
Slika 4: Sproščena toplota v odvisnosti od časa hidratacije [5]

Spremljanje razvoja hidratacijske toplote (HT) betona postaja vedno bolj pogosto. Na proces hidratacije in razvoj hidratacijske toplote močno vplivajo kemične in fizikalne lastnosti portland cementa, vodocementno razmerje (V/C), mineralni ali kemični dodatki itd. Na podlagi poznavanja razvoja hidratacijske toplote lahko predvidevamo kvaliteto betonske mešanice in kasneje strjenega betona [9].

Vodocementno razmerje nadzira količino vode, ki je na voljo za hidratacijo zrn cementa. Količina vode vpliva na V/C razmerje in razmik cementnih zrn. Nižje kot je V/C razmerje (manj vode, zrna cementa so bližje), hitrejši in močnejši je razvoj hidratacijske toplote. Z dodajanjem vode v betonsko mešanico razredčimo vodocementno raztopino (povečamo V/C) in zmanjšamo intenzivnost hidratacije ter razvoj HT. S časom se razvoj HT upočasni [9].

Poleg V/C razmerja na razvoj HT močno vpliva tudi finost cementnih zrn. Največ HT razvijejo najbolj fina cementna zrna. Proces hidratacije poteka na površini zrna cementa. Fino mleta cementna zrna imajo večjo specifično površino s katero v stik pride voda, zato je proces hidratacije intenzivnejši. Bolj kot je površina zrn groba, počasnejša in nižja je generacija hidratacijske toplote [9].

Slika 5 prikazuje razvoj hidratacijske toplote v odvisnosti od časa dveh betonskih mešanic z različno finim cementom. Cementna zrna cementa B so bolj fina, zrna cementa C pa bolj groba.



Slika 5: Razvoj hidratacijske toplote glede na vodocementno razmerje in finost cementa [9]

2.3.1.2 Razvoj drugih produktov hidratacije

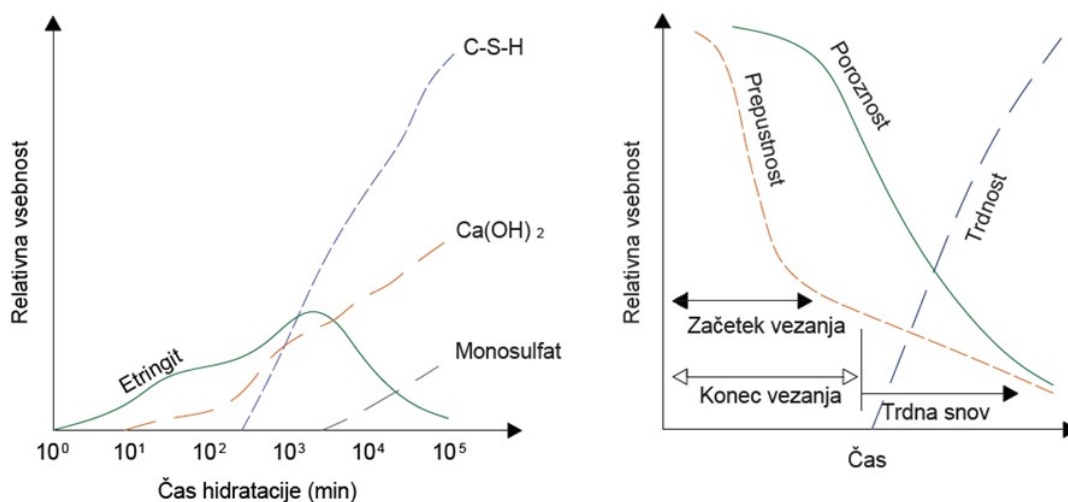
Poleg poznavanja vpliva toplote je za razvoj senzorjev pomembno, da poznamo tudi druge produkte hidratacije. Med procesom hidratacije se pojavijo medpovršinske sile, ki vplivajo na razvoj mikrostrukture paste. Z rastjo medpovršinskih sil se razdalje med delci zmanjšujejo in delci se povezujejo v strukturo [5].

V procesu hidratacije so za nas pomembni trije hidratacijski produkti. C-S-H gel je glavni hidratacijski produkt in zavzema od 50 do 70 % prostornine cementne paste. Med strukturami C-S-H gela nastajajo gelne pore, ki nimajo vpliva na trdnost in prepustnost cementnega kamna.

Drugi hidratacijski produkt je CH – kalcijev hidroksid, ki zavzema od 20 do 25 % prostornine cementne paste. Kalcijev hidroksid je anorganska spojina, zaradi katere je cementna matrica visoko alkalna in neugodna za vgrajene senzorje (podrobno razloženo v poglavju 3.3). Zaradi majhne specifične površine nima večjega vpliva na trdnost cementnega kamna [5].

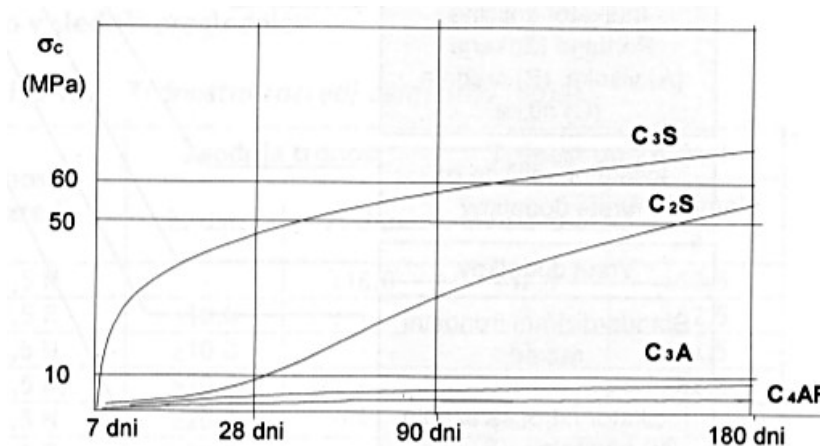
Zadnji produkt hidratacije je etringit, kateri zavzema od 20 do 25 % celotne prostornine cementne paste. Največji vpliv ima na začetno plastičnost v času hidratacije. Nima večjega vpliva na razvoj trdnosti cementnega kamna.

Z napredovanjem hidratacije poroznost betonske mešanice pada. Pore, katere nastanejo v betonski mešanici delimo na gelne, kapilarne in zračne pore. Največji vpliv imajo kapilarne pore. Zračne pore nastajajo med procesom mešanja in vgrajevanja v obliki zračnih mehurčkov. Vplivajo na trdnost in prepustnost cementnega kamna. Bolj kot je cementni kamen prepusten, večji je vpliv okolice na strjevanje [5].



Slika 6: Časovni razvoj hidratacijskih produktov (levo) in časovni razvoj lastnosti betona (desno) [5]

Končna trdnost in njen časovni prirastek sta odvisna tudi od mineraloške sestave cementa. Na začetno trdnost najbolj vpliva alit, na kasnejši prirast trdnosti pa belit. Minerala ferit in aluminat k trdnosti ne doprineseta veliko [8].

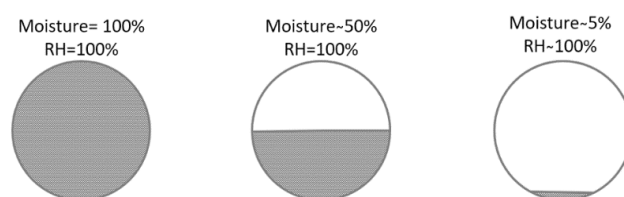


Slika 7: Razvoj trdnosti mineralov cementa [8]

3 VLAŽNOST, TEMPERATURA IN ALKALNO OKOLJE

3.1 Vlažnost v zraku

Vlažnost v zraku je določena s količino vodne pare v zraku ali v porah trdne snovi. Merimo jo z vlagomerom (higrometrom) in jo podajamo kot relativno ali absolutno vlažnost [10]. Koliko vlage lahko sprejme zrak je odvisno predvsem od njegove temperature. Velja namreč, da višja kot je temperatura, več vlage lahko zrak sprejme. Pomembno je, da ločimo razliko med relativno vlago v porah in vsebnostjo vlage v betonu, saj izraza predstavljata dve različni značilnosti betona. Vsebnost vlage v betonu predstavlja količino kapljevinske vode, med tem ko relativna vlažnost opisuje količino vodne pare v porah znotraj betonske mešanice. Razliko najlažje opišemo s pomočjo spodnje slike [11]:



Slika 8: Razlika med vsebnostjo vlage, ki se zmanjšuje od leve proti desni [11]

3.1.1 Absolutna vlažnost

Absolutna vlažnost v_a je izražena kot masa vodne pare m_v na kubični meter zraka. Največja možna absolutna vlažnost pri določeni temperaturi je tista, pri kateri je parni tlak vodne pare enak nasičenemu parnemu tlaku [10].

$$v_a = \frac{m_v}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (1)$$

3.1.2 Relativna vlažnost

Določena je z razmerjem med absolutno vlažnostjo in nasičeno vlažnostjo. Nasičena vlažnost plina (v_{an}) je največja absolutna vlažnost plina pri določeni temperaturi. Temperaturo, pri kateri je plin polno nasičen z vlago imenujemo rosišče. Relativna vlažnost nam prikaže razmerje med količino vodne pare v zraku pri določeni temperaturi v primerjavi z maksimalno količino vodne pare, ki bi jo zrak še lahko absorbiral, preden bi ta začela kondenzirati. Izrazimo jo v procentih [10], [12].

$$\eta = \frac{v_a}{v_{an}} [\%] \quad (2)$$

3.2 Temperatura

Temperatura je ena osnovnih fizikalnih količin s katero lahko opredelimo stanje snovi. Predstavlja tudi eno osnovnih termodinamičnih spremenljivk, ki določa stanje teles. Merimo jo s termometrom. Osnovni enoti temperature sta kelvin (K) in stopinja Celzija (°C). V diplomski nalogi smo uporabili temperaturna tipala na osnovi polprevodnika silicija (IC temperaturni senzorji). Senzor je vgrajen direktno v integrirano vezje, kar omogoča analogno – digitalno pretvorbo signala. Senzor z integriranim vezjem proizvaja izhodni tok, ki je sorazmeren s temperaturo. Uporabljamo jih predvsem zato, ker imajo hiter odzivni čas, nizko ceno, so robustno izdelani in enostavni za vgradnjo [13].

3.3 Alkalno okolje

O alkalnem okolju govorimo, kadar so vrednosti pH višje od 7 (med 7 – 14). Nastane zaradi hidroksidnih ionov – OH^- , ki so posledica raztapljanja kalcijevega hidroksida – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in prisotnosti natrijevih – Na in kalijevih – K ionov. Kalcijev hidroksid je značilen predvsem za apno, najdemo pa ga tudi v cementu oz. nastaja v procesu hidratacije cementa (reakcija minerala C_3S in C_2S z vodo) [2], [5].

Alkalno okolje nastane v vseh treh uporabljenih kompozitnih mešanicah:

- Maksimalno alkalno okolje v apneni malti (zelo velik delež apnenega testa).
- Močno alkalno okolje v lahkem samozgoščevalnem betonu (velik delež cementa).
- Močno alkalno okolje v podaljšani cementi malti (srednje velik delež apna in cementa).

Visoka alkalnost poleg nevarnosti poškodb oči, draženja kože ali opeklin močno vpliva tudi na plastične in kovinske komponente iz katerih je sestavljen senzor SHT. Kovine zaradi močno alkalnega okolja korodirajo, razpadati pa lahko začne tudi plastika in silicij, iz katerega je narejen senzor temperature in vlažnosti. V izogib poškodbi komponent smo senzorje SHT v celoti premazali z epoksi premazom, ki je odporen na alkalno okolje [14], [15].

4 UPORABLJENI MERSKI SISTEMI

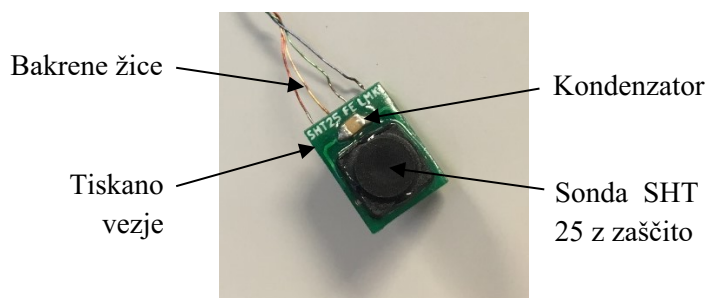
4.1 Predstavitev merilnega sistem senzorjev SHT

Senzorski sistem SHT je sestavljen iz 8 senzorjev za merjenje temperature in relativne vlage, sistema za sprejem in obdelavo signalov, sistema za napajanje in prenos podatkov. Sistem je zaenkrat še v fazi razvoja na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. S tovrstnimi preizkusi želimo preveriti obstojnost senzorjev in vpliv okolja v katerega bodo vgrajeni (voda, alkalno in agresivno okolje). Dolgoročni cilj je, da bi na koncu imeli brezžični sistem senzorjev primernih dimenzij, katerega bi vzporedno vgrajevali skupaj z medijem in tako kontrolirali hidratacijo cementa oz. sušenje mešanic.

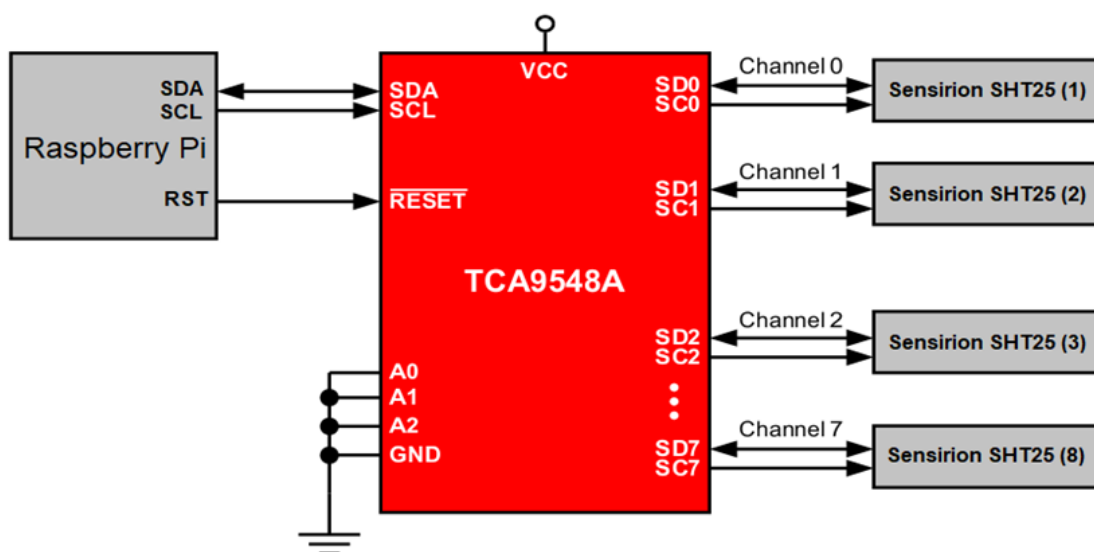


Slika 9: SHT sistem senzorjev v laboratoriju

7 senzorjev je namenjenih vgradnji v medij, en senzor pa služi kontroli relativne vlažnosti in temperature v laboratoriju. Sonde senzorja SHT 25, ki smo jih vstavili v svežo mešanico, so senzorji z digitalnim vmesnikom I²C zaprti v pokrov filtra za zaščito pred prahom, potopitvijo v vodo in vstopom vode ter onesnaženjem s cementnim kompozitom. Senzorji so bili zaradi agresivnega okolja dodatno premazani in zaščiteni z epoksi smolo. Razpon delovanja senzorjev je med 0 % in 100 % relativne vlažnosti in so eni redkih senzorjev, ki so sposobni dolgotrajnega delovanja pri 100 % relativni vlažnosti. Poleg naštetih lastnosti jih odlikujejo še druge: delovanje v temperaturnem območju med - 40 do 120 °C, odlična dolgoročna stabilnost in enostavna komercialna dostopnost. Zaradi čim manjše strukturne vsiljivosti so senzorske sonde zasnovane in sestavljene tako, da so čim manjše (6 mm x 6 mm x 2 mm). Senzor (slika 10) je izdelan iz silicija, ohišje senzorja pa je sestavljeno iz prevlečenega bakreno - svinčenega okvirja in zelene epoksi mase. Celotni senzorski sistem je skladen z RoHS – Restriction of Hazardous Substances in WEEE – Waste Electrical and Electrical Equipment [16].

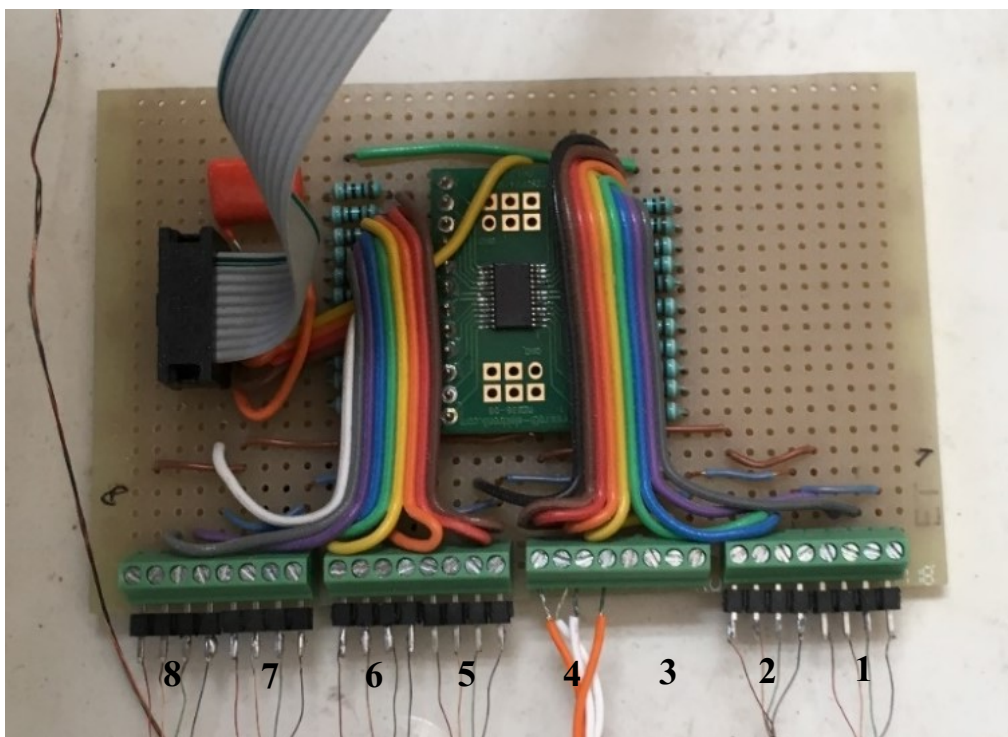


Slika 10: SHT senzor



Slika 11: Shema delovanja merilnega sistema SHT [17]

Vsak SHT senzor je z I²C vmesnikom (slika 12) povezan s štirimi zelo tankimi izoliranimi bakrenimi žicami premera 0,1 mm (4 x 0,1 mm), ki zagotavljajo le zanemarljiv toplotni tok. Žice so tako tanke zato, ker želimo preprečiti morebitne neželene termodinamične vplive, kot so: zapora izhoda zračnih mehurčkov, prevelik toplotni tok, kapilarno delovanje itd. na relaciji med površino materiala in senzorja.



Slika 12: I²C vmesnik s priključenimi senzorji

Podatki se beležijo in shranjujejo na glavni enoti Raspberry Pi3 (slika 13), ki je preprost računalnik z mnogimi funkcijami. Izbrali smo ga zato, ker zagotavlja digitalni izhod preko vmesnika I²C, je robusten, zanesljiv pri dolgotrajni uporabi, cenovno ugoden in omogoča shranjevanje ter grafični prikaz podatkov [17].



Slika 13: Raspberry Pi3 [18]

Za odčitavanje senzorskih podatkov skrbijo trije kratki programi. Prvi odčitava vrednosti temperature in relativne vlažnosti posameznega senzorja, drugi preklaplja med senzorji in shranjuje podatke v izhodno datoteko. Tretji program samodejno zažene prva dva programa vsaki dve minuti.

Podatki, ki jih dobimo v izhodni datoteki, so shranjeni v naslednjem formatu:

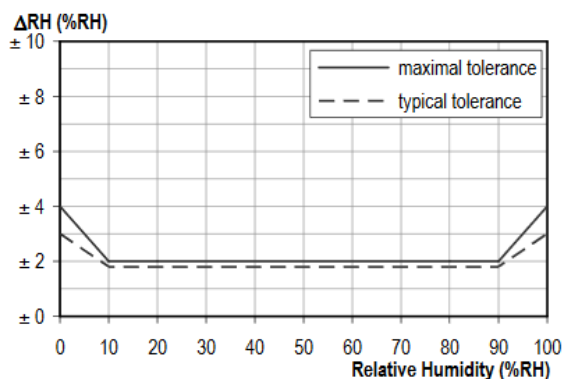
Tue Jul 16 16:08:01 2019	<i>RH 1</i>	<i>T 1</i>	<i>RH 2</i>	<i>T 2</i>	...	<i>RH 8</i>	<i>T 8</i>
--------------------------	-------------	------------	-------------	------------	-----	-------------	------------

Vrednosti so ločene z vejicami in se z vsakim novim ciklom (na vsaki 2 minuti) shranjujejo v datoteko. V primeru napake senzorja (temperature ali relativne vlažnosti) bo zapisana vrednost »Error«. V takšnem primeru je lahko na senzorju prišlo do enkratne napake ali pa je senzor prenehal delovati, če se vrednosti »Error« ponavljajo.

Umeritev senzorjev ni bila izvedena, ker je bilo v predhodni uporabi in umeritvi enakih senzorjev ugotovljeno, da ne izboljša rezultatov in so vrednosti, ki jih navaja proizvajalec dovolj natančne. Iz grafov na sliki 14 in 15 lahko vidimo merske napake senzorja, ki jih navaja proizvajalec [16].

Relativna vlažnost:

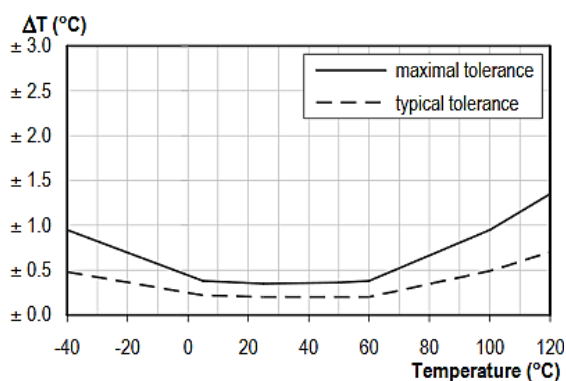
1. Območje med 10 – 90% RH $\Rightarrow$ merska napaka $\pm 1,8$ % RH.
2. Območje med 0 – 10% in 90 – 100% RH $\Rightarrow$ merska napaka ± 3 % RH.



Slika 14: Največja toleranca relativne vlažnosti pri temperaturi 25 °C [16]

Temperatura :

1. Območje med 0 – 60 °C $\Rightarrow$ merska napaka $\pm 0,3$ °C.
2. Območje med - 40 – 0 °C in 60 – 120 °C $\Rightarrow$ merska napaka $\pm 1,0$ °C / $\pm 1,3$ °C.



Slika 15: Največja toleranca temperature v °C [16]

Vredno je omeniti, da vrednosti relativne vlage nad 100 % pomenijo le, da so senzorji polno nasičeni, torej je dejanska relativna vlažnost 100 %.

4.1.1 Senzor za merjenje vlažnosti

Vrednost relativne vlažnosti dobimo s pomočjo spodnje pretvorbene formule (navaja proizvajalec) [16]:

$$RH = -6 + 125 \times \frac{S_{RH}}{2^{16}} \quad (3)$$

Kjer je:

S_{RH} = izhodni signal relativne vlažnosti, ki ga senzor zabeleži oz. prebere.

4.1.2 Senzor za merjenje temperature

Vrednost temperature dobimo s pomočjo spodnje pretvorbene formule (navaja proizvajalec) [16]:

$$T = -46,85 + 175,72 \times \frac{S_T}{2^{16}} \quad (4)$$

Kjer je:

S^T = izhodni signal temperature, ki ga senzor zabeleži oz. prebere.

4.1.3 Težave pri izdelavi senzorjev

Največ težav pri izdelavi senzorjev sem imel zaradi majhnih sestavnih delov, katere smo potem s spajkanjem povezali v celoto – delujoč senzor. Pri spajkanju smo si delo olajšali z uporabo posebne paste oz. plastifikatorja, ki pospeši izdelavo in izboljša kvaliteto povezav. Pozorni smo morali biti na primerno temperaturo spajkalnega čepa, da ni prišlo do zažiga talila in poškodbe tiskanega vezja ali sonde. Posebno pozornost smo namenili pripravi bakrenih žic, s katerimi so senzorji povezani z vmesnikom I²C. Na obeh koncih žic je bilo potrebno pravilno odstraniti okoli 3 mm izolacije, da smo lahko potem žico povezali na senzor in vmesnik I²C.

4.1.4 Predvidene težave pri uporabi in vgradnji senzorjev

V času izdelave senzorjev smo predvideli, da bi se težave z delovanjem senzorjev lahko pojavljale v več primerih. Zelo natančno odstranjevanje izolacije žic je bilo dokaj zahtevno in pogosto je spajkalnik odstranil nekoliko preveč izolacije, kot bi bilo potrebno. Zaradi tega je zelo majhen del žice ostal neizoliran in bi lahko v času vgradnje povzročil dve stvari: kratek stik med žico in vodo/medijem ali kratek stik v primeru, da bi se neizolirana dela sosednjih dveh žic pri vgradnji dotaknila. Tovrsten problem se je po mojem mnenju pojavil pri vgradnji čisto prvega senzorja v prvo mešanico lahkega samozgoščevalnega betona. Druga težava, katero sem predvidel je bila možnost poškodb povezave med senzorjem in žicami, ko beton ali malta prične vezati in se strjevati. Stiki so bili kljub zaščiti z epoksi smolo še vedno zelo občutljivi na večje sile, ki bi lahko pretrgale žico na mestu stika ali celo poškodovale sondo senzorja.

4.2 Merilni sistem Ahlborn ALMEMO 2590 – AA

Vzporedno z meritvami s sistemom senzorjev SHT smo izvajali meritve s komercialno dostopnim grafičnim merilnim instrumentom Ahlborn ALMEMO 2590 (slika 17). Gre za dobro uveljavljen ročni merilni instrument z več vhodnimi kanali, na katere lahko priključimo različne merilnike/senzorje. Podatki se shranjujejo na instrumentu samem, povezljiv pa je tudi z računalnikom. Omogoča meritve vlage, temperature, hitrosti zraka, tlaka, sile itd. V okviru diplomske naloge smo z instrumentom merili relativno vlažnost in temperaturo v mešanici lahkega samozgoščevalnega betona – LSCC in v laboratoriju. Uporabili smo dva visoko natančna senzorja relativne vlažnosti in temperature FHAD 646 z vgrajenim procesorjem signala (slika 16), kateri je preko kabla povezan z merilnim instrumentom. Senzor relativne vlažnosti ima razpon med 0 in 100 % *RH* z možnimi merskimi napakami $\pm 1,3$ % *RH*. Senzor temperature ima razpon med -100 in $+200$ °C in možnimi napakami $\pm 0,2$ K. Narejen je iz polikarbonata, filter senzorja pa iz polietilena. Zaradi visoke cene senzorja in preprečitve uničenja le tega smo se pred pričetkom vgradnje odločili, da senzorjev ne bomo vgradili neposredno v mešanico. Pomagali smo si s klasično PVC cevko, na koncu katere smo prilepili filter senzorja in vse skupaj vgradili v betonsko mešanico. Sondo senzorja smo kasneje vstavili v PVC cevko in jo privili v navoj na filtru senzorja [19].

Podatki, ki jih potrebujemo, so shranjeni in zapisani v naslednjih vrsticah:

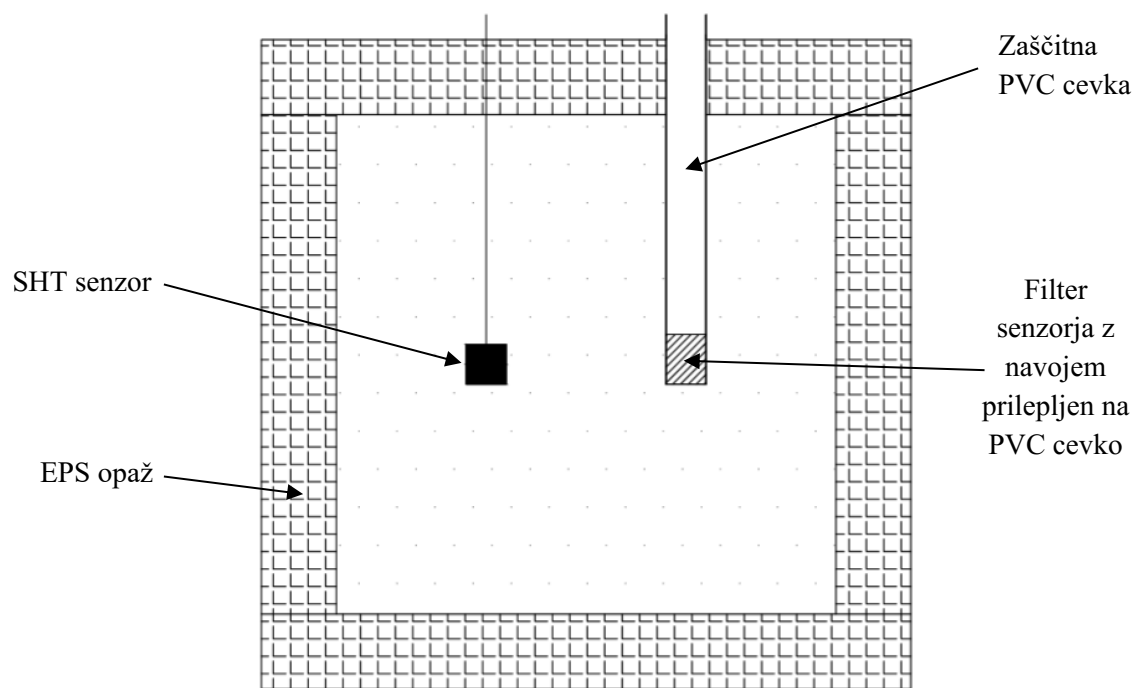
19.08.2019	12:09:44	M 00: °C	M 01: °C	M 10: %	M 11: %
------------	----------	----------	----------	---------	---------



Slika 17: Ahlborn ALMEMO 2590



Slika 16: AA senzor temperature in vlage



Slika 18: Prikaz položaja senzorja SHT in AA v mešanici LSCC

5 PRIPRAVA OPEČNIH ZIDAKOV

V okviru preiskave smo oštevilčili in pripravili 8 opečnih zidakov standardnega formata 250/120/65 mm iz Goriških opekarn (kasneje smo jih uporabili samo 6). Ker je bila vlažnost zidakov različna in nam nepoznana, smo se odločili za sušenje zidakov (slika 19 levo). Zidake smo sušili toliko časa, da se njihova masa pri tehtanju ni spreminjala več. Celoten čas sušenja je bil 96 ur (tehtanje opravljeno vsakih 24 ur, skupaj 4 tehtanja). Za popolnoma suhe zidake smo določili njihovo prostorninsko maso (preglednica 2). Za tehtanje opečnih zidakov in sestavin mešanic smo uporabili tehtnico z natančnostjo 0,01 g. V nekaterih primerih smo tehtanje mase opečnih zidakov ponovili in res dobili rezultate, ki se niso razlikovali za več kot eno stotinke grama. V nadaljevanju kljub temu izmerjene mase opečnih zidakov in sestavin mešanic zaokrožujemo na 1 g natančno, kar pri izmerjenih masah okoli 1 kg in več pomeni boljšo natančnost od 0,1 %.

Preglednica 2: Masa suhih opečnih zidakov

	Opeka 1	Opeka 2	Opeka 3	Opeka 4	Opeka 5	Opeka 6	Opeka 7	Opeka 8
4.Tehtanje	2969 g	3016 g	3027 g	3000 g	3021 g	3004 g	3009 g	3028 g



Slika 19: Sušenje opečnih zidakov v pečici pri 100 °C (levo) in namakanje opečnih zidakov v vodi (desno)

Postopek priprave zidakov pred vgradnjo je obsegal tudi 30 minutno namakanje zidakov v vodi (slika 19 desno). Po namakanju je sledilo še 30 minutno odcejanje površinske vode in ponovno tehtanje zidakov. Iz rezultatov tehtanja vidimo, da je vodovpojnost zidakov za tako kratek čas namakanja zelo velika. V povprečju so odcejani zidaki vpili 590 g vode. Z namakanjem površino opečnega zidaka pravilno pripravimo in zmanjšamo ter upočasnim prehod vode iz sveže malte zaradi kapilarnega srka opečnatega materiala. S tem zagotovimo dodaten čas, ki ga ima delavec na voljo za obdelavo in vgradnjo malte v zid.

Preglednica 3: Masa opečnih zidakov v fazi priprave

Št.opeke	Pred namakanjem [g]	Takoj po namakanju [g] (30 min namočen)	Po odcejanju [g] (30 min odceditev)
1	2973	3559	3556
2	3019	3618	3616
3	3029	3621	3618
4	3005	3598	3596
5	3025	3622	3619
6	3006	3597	3594

6 PRIPRAVA MEŠANIC

V tem poglavju opisujemo recepture in postopek priprave mešanic, v katere smo kasneje vgradili senzorje. Vse uporabljene sestavine so bile pravilno hranjene v laboratoriju Fakulteta za Gradbeništvo in geodezijo, torej v prostoru s kontrolirano temperaturo in vlago. Temperatura je bila ves čas okoli $20^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ in relativna vlažnost $RH > 50\%$. Zelo pomembno je, da upoštevamo oz. poznamo vlažnost uporabljenih agregatov, saj to vpliva na konsistenco malte in betona.

6.1 Podaljšana cementna malta (PCM)

Izbrana mešanica podaljšane cementne malte ima prostorninsko razmerje cement: apno: pesek = 1: 3: 9. Vgradnja izbrane malte je mogoča do 4 ure po zamešanju.

Preglednica 4: Sestava mešanice podaljšane cementne malte - PCM

Material	Opis materiala	Količina [g]
Pesek	Suh drobljen apnenčev pesek, 0 – 4 mm	3117
Cement	CEM UNIVERSAL 42,5 N; SIST EN 197-1	231
Apno	Hidrirano apno, Kresnice	346
Dodana voda	Voda, ki smo jo dodali mešanici	570



Slika 20: Pripravljene količine peska, apna in cementa za podaljšano cementno malto

6.1.1 Postopek mešanja

Če je notranji del mešalnega bobna suh, ga z mokro krpo navlažimo in obrišemo. V posodo najprej stresemo pesek in cement ter ju 30 sekund suho mešamo. Suhi zmesi nato dodamo vodo in mešamo še približno 30 sekund. Z mešanjem nadaljujemo približno 60 sekund. Mešanje nato za trenutek prekinemo in s sten posode odstranimo nabrani material. Nato ponovno mešamo še 60 sekund na višji hitrosti (2. stopnja). V temu času bi morale biti mešanje zaključeno in mešanica dovolj homogena. V primeru, da ni dovolj homogena, nadaljujemo z mešanjem toliko časa, da dosežemo željeno homogenost. Če smo se odločili za dodaten čas mešanja, moramo dodaten čas zabeležiti.

Pripravljena mešanica podaljšane cementne malte ima ustrezno konsistenco za zidanje.

6.2 Čista apnena malta (AM)

Izbrana mešanica čiste apnene malte ima prostorninsko razmerje apno: pesek = 1: 2. Vgradnja izbrane malte je mogoča do 12 ur po zamešanju.

Preglednica 5: Sestava mešanice čiste apnene malte - AM

Material	Opis materiala	Količina [g]
Pesek	Suh drobljen apnenčev pesek, 0 – 4 mm	3814
Apneno testo	Stranje pri Kamniku	762
Dodana voda	Voda, ki smo jo dodali mešanici	410

6.2.1 Postopek mešanja

Apneno testo najprej pretlačimo skozi 2 mm sito, da odstranimo nečistoče in negašene kose žganega apna (slika 21). Pretlačeno apneno testo stresemo v predhodno navlaženo mešalno posodo in med mešanjem na minimalni hitrosti (1. stopnja) počasi dodajamo suh pesek in vodo. Po 60 sekundah mešanje prekinemo, da očistimo morebitne prilepljene delce sveže malte na lopaticah in steni mešalne posode.

Nato z mešanjem nadaljujemo na višji hitrosti (2. stopnja) še 60 sekund.

Pripravljena mešanica čiste apnene malte ima ustrezno konsistenco za zidanje.



Slika 21: Pasiranje apna

6.3 Lahki samozgoščevalni beton (LSCC)

Pred vgradnjo v betonsko mešanico, agregat stehtamo in določimo količino vode, ki je že vezana v zrnih agregata. Dejanska vlažnost agregata vpliva na količino vode, ki jo moramo dodati betonski mešanici, da dosežemo projektirano V/C razmerje mešanice. Pomembno je, da vsako vrsto agregata obravnavamo posebej, saj dejanski vlažnosti zrn nista enaki. Postopek izračuna dejanske vlažnosti zrn [4]:

1. Stehtamo pladenj v katerem bomo tehtali agregat (m_{pl}).
2. V pladenj dodamo agregat in ju skupaj stehtamo. Dobimo maso vlažnega agregata skupaj s pladnjem (m_{vl+pl}).
3. Maso vlažnega agregata (m_{vl}) dobimo tako, da od mase agregata s pladnjem odštejemo maso pladnja oz. po formuli: $m_{vl} = m_{vl+pl} - m_{pl}$
4. Agregat s pladnjem smo postavili v sušilnico, ga posušili in ponovno stehtali. Dobili smo maso suhega agregata s pladnjem (m_{suh+pl}).
5. Maso suhega agregata (m_{suh}) dobimo tako, da od mase suhega agregata s pladnjem odštejemo maso pladnja oz. po formuli: $m_{suh} = m_{suh+pl} - m_{pl}$
6. Maso vode v agregatu (m_{vode}) določimo tako, da od mase vlažnega agregata s pladnjem odštejemo maso posušenega agregata s pladnjem oz. po enačbi: $m_{vode} = m_{vl+pl} - m_{suh+pl}$
7. Iz pridobljenih vrednosti lahko izračunamo dejansko vlažnost agregata po formuli:

$$vl_{dej} = \frac{m_{vl} - m_{suh}}{m_{suh}} * 100 \% \quad (5)$$

Preglednica 6: Določanje vlažnosti agregata mešanice LSCC

Agregat in frakcija	Ekspandirana glina (0-8 mm)	Mleti murski prod (0-4 mm)
m_{pl}	218 g	224 g
m_{vl+pl}	486 g	876 g
m_{suh+pl}	477 g	855 g
m_{vl}	268 g	652 g
m_{suh}	259 g	631 g
m_{vode}	9 g	21 g
vl_{dej}	3,5 %	3,3 %

V preglednici 7 so prikazane končne količine za predpisano betonsko mešanico.

Preglednica 7: Sestava mešanice lahkega samozgoščevalnega betona - LSCC

Material	Opis materiala	Količina [g]
Murski prod	Fino mlet, rahlo vlažen, 0-4 mm	2434
Cement	CEM UNIVERSAL 42,5 N; SIST EN 197-1	2171
Ekspandirana glina	Granule ekspandirane gline, rahlo vlažne, 0-8 mm	1000
Dodana voda	Voda, ki smo jo dodali mešanici	845
Dodatki	Superplastifikator PCE	23



Slika 22: Tehtanje sestavin lahkega samozgoščevalnega betona

6.3.1 Postopek mešanja



Slika 23: Dodajanje murskega proda v mešalni boben

Notranji del mešalne posode navlažimo ali obrišemo z vlažno krpo, če je ta suh. V posodo najprej stresemo granule ekspanzirane gline in murski prod (slika 23) ter ju 30 sekund suho mešamo. Zmesi nato dodamo cement in mešamo še približno 30 sekund. Nato med mešanjem počasi dodajamo vodo in superplastifikator. Z mešanjem nadaljujemo približno 60 sekund. Mešanje nato za trenutek ustavimo in s sten posode odstranimo nabrani material. Nato ponovno mešamo še 60 sekund na višji hitrosti (2. stopnja). V temu času bi morale biti mešanje zaključeno in betonska mešanica dovolj homogena. V primeru, da mešanica ni dovolj homogena nadaljujemo z mešanjem toliko časa, da dosežemo željeno homogenost.

Konsistenca betonske mešanice je bila določena z metodo razleza s posedom SF. Razlez mešanice je znašal 600 mm.

7 VGRADITEV SENZORJEV V MEŠANICE

Sestavljene senzorje smo pred vgradnjo v kompozitne mešanice izpostavili okolju s povečano vlažnostjo in nekaj dni preverjali delovanje ter smiselnost rezultatov, katere so senzorji beležili. Po nekajdnevni kontroli smo se prepričali, da senzorji delujejo pravilno in so pripravljeni za vgradnjo.

V nadaljevanju navajamo dva različna časa vgradnje. Raspberry Pi3 ni bil priklopljen na internetno povezavo, zato so datumi in časi, ki jih računalnik navaja napačni. Za namen analize rezultatov upoštevamo pravilne datume in ure. Izračunali smo, da je razlika nekaj manj kot 20 dni.

Postopek vgradnje senzorjev je opisan v naslednjih podpoglavjih.

7.1 Podaljšana cementna malta

Čas vgradnje senzorjev SHT: 5.8.2019 ob 12:00, (Raspberry enota: 16.7.2019 ob 16:02).

Zidano opečno steno smo simulirali iz 3 opečnih zidakov in dveh spojnic. V vsako spojnico smo vgradili en senzor. Najprej smo na odcejen opečni zidak nanесли 0,5 cm debel sloj malte in v sloj nežno vtisnili SHT senzor (slika 24). Nato smo na obstoječi sloj nanесли še dodatni 0,5 cm debel sloj malte. Skupna debelina spojnice na koncu znaša 1 cm. Postopek smo ponovili še na stiku zgornjih dveh zidakov (slika 25).



Slika 24: Senzor vgrajen v spojnico



Slika 25: Simulirana zidana opečna stena

7.2 Čista apnena malta

Čas vgradnje senzorjev SHT: 5.8.2019 ob 13:07, (Raspberry enota: 16.7.2019 ob 17:04).

Vgradnja senzorjev v čisto apneno malto (slika 26 in 27) je potekala po popolnoma enakem postopku kakor pri podaljšani cementni malti. Najprej smo na pripravljen opečni zidak nanesti 0,5 cm debel sloj čiste apnene malte in v sloj malte nežno vtisnili SHT senzor. Nato smo nanesti še zgornji sloj spojnice, tako, da je bila končna debelina spojnice 1 cm. Postopek smo ponovili še na stiku zgornjih dveh zidakov.



Slika 27: Vgradnja senzorja v zgornjo spojnico



Slika 26: Senzor v spojnici čiste apnene malte

7.3 Lahki samozgoščevalni beton

V mešanici lahkega samozgoščevalnega betona LSCC 1 in LSCC 2 smo vgradili senzor SHT in senzor AA.

Čas vgradnje senzorja SHT v LSCC 1: 5.8.2019 ob 12:35, (Raspberry enota: 16.7.2019 ob 16:34).

Čas vgradnje senzorja SHT v LSCC 1: 5.8.2019 ob 13:05, (Raspberry enota: 16.7.2019 ob 17:02).

Čas vgradnje senzorja SHT v LSCC 2: 5.8.2019 ob 12:55, (Raspberry enota: 16.7.2019 ob 16:50).

Čas vgradnje senzorja AA v LSCC 1: 19.8.2019 ob 12:10.

Čas vgradnje senzorja AA v LSCC 2: 19.8.2019 ob 12:10.

7.3.1 Izdelava kalupa

Za vgradnjo mešanice lahkega samozgoščevalnega betona smo izdelali dva preprosta kalupa iz ekstrudiranega polistirena (slika 31). Notranje dimenzija kalupa so 20 x 20 x 8 cm. Stranski dve stranici kalupa sta bili oblečeni v folijo, da smo ju po 24 urah lažje odstranili in s tem pospešili sušenje betona.

7.3.2 Vgraditev senzorjev



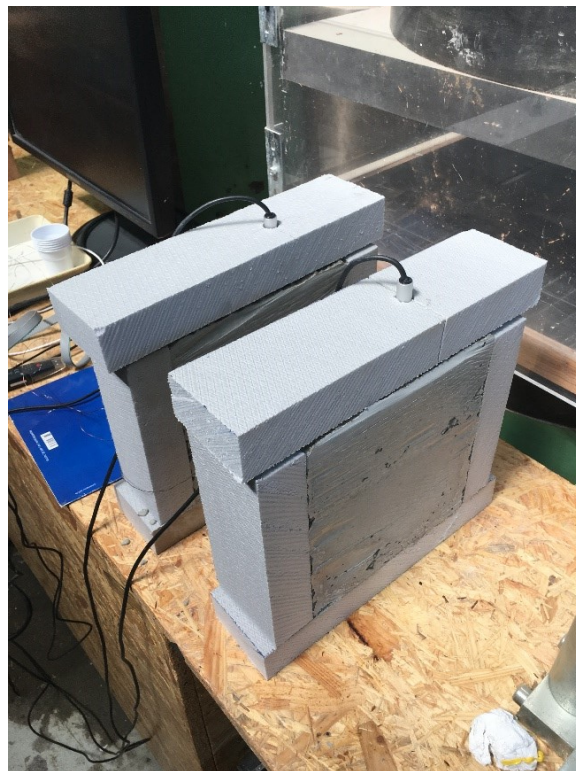
Slika 28: Vgradnja obeh senzorjev v svežo betonsko mešanico LSCC

Vgradnja senzorjev v lahki samozgoščevalni beton (slika 28) je bila nekoliko bolj zahtevna. Najprej smo z betonom do polovice napolnili predhodno izdelan kalup. Potem smo v svežo betonsko mešanico pazljivo vtisnili senzor SHT in PVC cevko s filtrom senzorja AA. Nato smo kalup z uporabo manjše žlice zelo previdno do vrha napolnili z betonom. Položaj senzorjev je med dodajanjem betona moral ostati nespremenjen, hkrati pa je dodatna previdnost preprečila poškodbe žic senzorja SHT. Predvideno je bilo, da v vsako mešanico/kalup vgradimo en SHT in en AA senzor.

V prvo mešanico smo na koncu dodatno vgradili še en SHT senzor, ker je prvi senzor takoj po vgradnji za trenutek prenehal delovati.



Slika 30: Pogled na zgornji del kalupov



Slika 29: Po 24 urah odstranimo del opaža



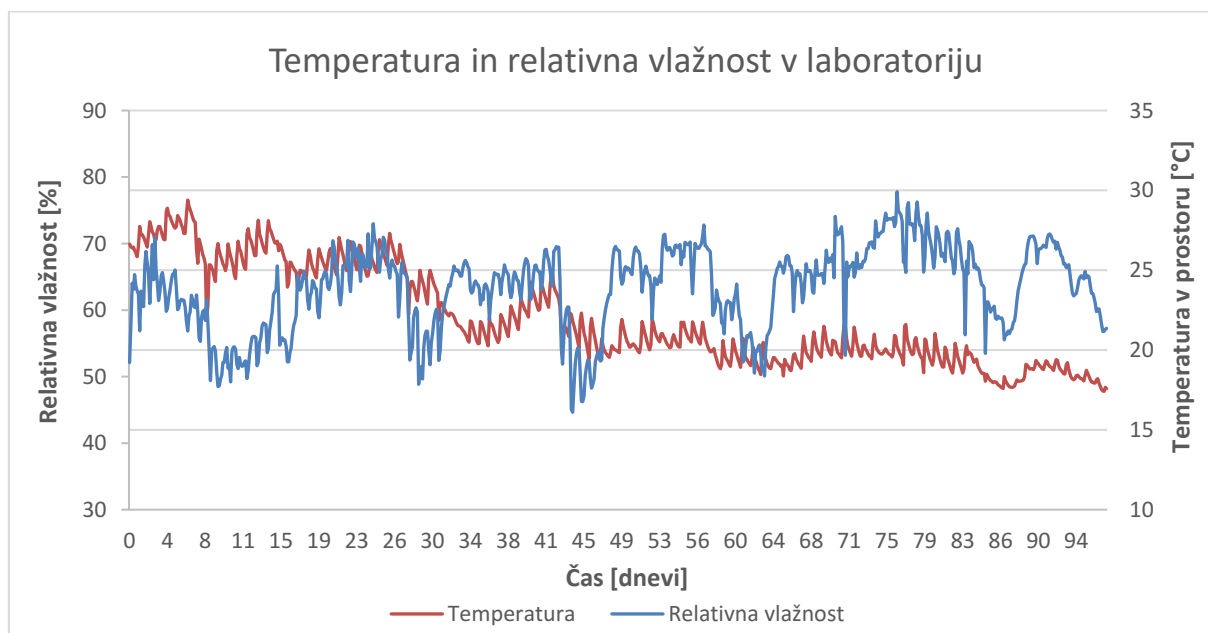
Slika 31: Senzorji AA in SHT vgrajeni v svežo betonsko mešanico

Če so senzorji delovali toliko časa, da so zabeležili veliko vrednosti, smo izbrali večji časovni interval. Ko izberemo mešanico in časovni interval, program iz vseh vhodnih vrednosti izpiše zgolj tiste, ki sovpadajo z izbranim časovnim intervalom. Program izpiše tudi število neuspešnih meritev vrednosti temperature in relativne vlažnosti ter število prebranih vrstic iz katerih izpiše vrednosti.

Zaradi velike količine podatkov in velikega števila zapisanih napak (Error), smo se odločili za izdelavo funkcije v programu Excel (slika 33), s pomočjo katere lahko vrednosti izpisujemo z večjim časovnim intervalom in tako dobimo bistveno manj vrednosti, ki pa kljub temu zadostujejo za kvalitetno analizo meritev. Izbira časovnega intervala je temeljila na času delovanja senzorjev.

8.1.1 Laboratorij

Grafikon 1 prikazuje časovni potek meritev RH in T laboratorija, v katerem se je opravljala preiskava. Senzor je praktično brez večjih napak deloval vseh 96 dni. Za izdelavo grafikona smo se odločili uporabiti 3 urni časovni interval, ki je zajemal 775 podatkov RH in T .



Grafikon 1: Časovni potek temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju

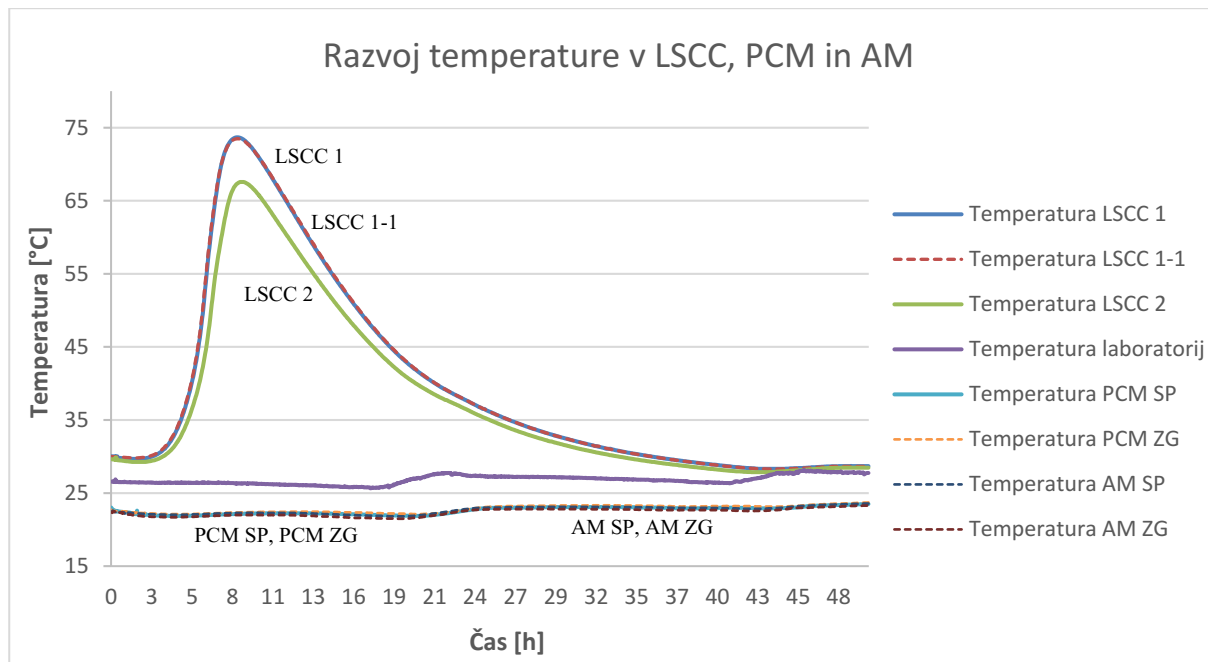
Skozi celotno obdobje preiskave je razvidno počasno periodično zniževanje temperature kar lahko povežemo z zniževanjem zunanje temperature. S preiskavo smo pričeli sredi poletja in smo jo zaključili pozno jeseni. Najvišja izmerjena temperatura v laboratoriju je bila okoli 30 °C, najnižja pa okoli 17 °C. Povprečna temperatura v času preiskave v laboratoriju je bila 22 °C.

Relativna vlažnost je nihala med 45 in 80 %. Povprečna vrednost, izračunana iz vrednosti pridobljenimi s sistemom SHT je 63 %. Nihanje relativne vlage kot tudi temperature lahko povežemo z razmerami v prostoru, v katerem smo preizkus opravljali. V laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo je istočasno potekalo kar nekaj preiskav, zaradi katerih so bila pogosto odprta vhodna vrata laboratorija. S tem so se razmere v laboratoriju ves čas spreminjale in vplivale na končne rezultate meritev.

Iz vrednosti, pridobljenimi tekom preiskave lahko predpostavimo, da so razmere v laboratoriju zagotovile optimalno oz. kvalitetno sušenje vseh mešanic.

8.1.2 Hidratacija v začetnem času

V grafikonu 2 so zbrane vrednosti temperature vseh 7 vgrajenih senzorjev in senzorja iz laboratorija v prvih 50 urah preizkusa. Iz poteka krivulj je razvoj hidrationske toplote razviden samo pri mešanici LSCC. Sproščene hidrationske toplote pri mešanicah PCM in AM ne zaznamo. Preizkušanca iz mešanice LSCC imata bistveno večji volumen oz. delež cementa kot spojnice iz mešanice PCM.



Grafikon 2: Razvoj temperature v prvih 50 urah preizkusa

Mešanica LSCC vsebuje cement, fini agregat (mleti murski prod), lahki agregat (ekspandirana glina), superplastifikator in vodo. Kot smo že omenili v poglavju 2.3.1.1 hidrationska toplota nastaja pri hidrationski cementa oz. cementne paste. Več kot je cementa, več sproščene toplote lahko pričakujemo. Na V/C razmerje smo vplivali tudi z dodajanjem superplastifikatorja, zaradi katerega uporabimo manj vode kot bi jo uporabili sicer. V/C razmerje je manjše in proces hidrationske je zato bolj intenziven.

Navadno velja, da agregatna zrna zmanjšujejo prostornino cementne paste glede na celotno prostornino mešanice in istočasno odvajajo oz. akumulirajo sproščeno hidrationsko toploto. Če je agregata dovolj, se lahko zamakne tudi začetek in konec vezanja. Fino mleti agregat nima velike prostorske vsiljivosti, zato na prostornino cementne paste kot tudi na odvajanje toplote ne vpliva veliko. Drugi agregat, ki smo ga tudi uporabili in ima bistveno večji vpliv je lahki agregat iz ekspandirane gline (granule). Zrna lahkega agregata lahko delujejo kot toplotni izolator in še dodatno prispevajo k razvoju hidrationske toplote.

Hidrationska obeh mešanic poteka z enako hitrostjo, vendar se pri prvi mešanici razvije več toplote, kot pri drugi. Najvišja temperatura je v obeh mešanicah dosežena približno 9 ur po vgradnji. V mešanici LSCC 1 sta vgrajena senzorja zabeležila maksimalno temperaturo 73,6 °C in 73,4 °C; v mešanici LSCC 2 pa 67,6 °C.

Dosežena temperatura je višja kot običajno zaradi opaža izdelanega iz ekstrudiranega polistirena, ki s svojo funkcijo toplotne izolacije beton izolira pred vplivi iz okolice in zadržuje hidrationsko toploto v preizkušancu. Da vpliv toplotne izolacije ne bi bil prevelik, del opaža odstranimo že po 24 urah. Po doseženem temperaturnem maksimumu temperatura počasi pada, hidratacija se umiri, proces se stabilizira in temperatura sovpada s temperaturo okolice oz. laboratorija.

Razlika v sproščeni toploti se pojavi zato, ker sta konsistenci mešanic LSCC različni. V mešanico LSCC 2 smo dodali malenkost večjo količino vode, zato smo povečali V/C razmerje in s tem upočasnili proces hidratacije. Vpliv vodocementnega razmerja V/C je podrobneje opisan in predstavljen v poglavju 2.3.1.1.

V mešanici PCM – podaljšane cementne malte in AM – čiste apnene malte do razvoja hidrationske toplote ne pride oz. je ne zaznamo. Kot smo že omenil zgoraj, za razvoj hidrationske toplote potrebujemo vodo in cement. V čisti apneni malti cementa ni, zato se toplota ne sprošča.

Mešanica PCM je bila zamešana v razmerju cement: apno: pesek = 1: 3: 9. Količina peska je v primerjavi s količino cementa bistveno večja, zato je razvoj hidrationske toplote tako majhen, da zaradi odvajanja toplote v okolico ni izmerljiv. Agregat zmanjša prostornino cementne paste v enoti prostornine, istočasno pa odvaja toploto zaradi hidratacije cementa. Razvoj hidrationske toplote bi bil po vsej verjetnosti opazen, če bi spojnica oz. preizkušanec imel večji volumen ali pa bi bil toplotno izoliran, tako kot mešanica LSCC. Na temperaturo v spojnici vplivata tudi opečna zidaka in temperatura v laboratoriju.

Pri PCM in AM opazimo tudi, da so vse pridobljene vrednosti temperature ves čas 3 - 5 °C nižje kot temperatura v laboratoriju. Do temperaturne razlike pride zaradi izhlapevanja vode v malti. Gre za naraven fizikalni proces, ko voda pri izhlapevanju odvzame toploto okolici pri prehajanju iz kapljevinske v plinasto fazo. Povedano drugače, za izhlapevanje vode v malti se porablja okoliška toplota in zato temperatura v spojnici pada. Proces poznamo pod imenom evaporacijsko oz. adiabatsno ohlajanje. Izhlapevanje je odvisno od relativne vlažnosti zraka in zračnega toka. Bolj kot je prostor suh in zračen, bolj intenzivno bo izhlapevanje [20].

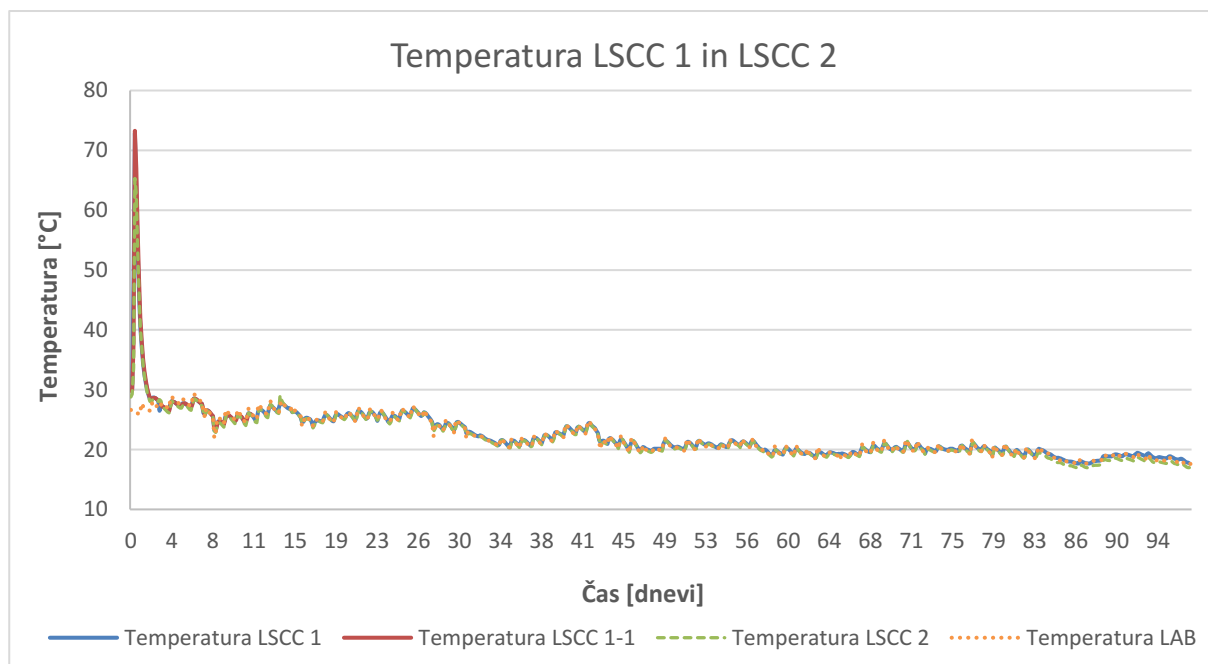
Pojav najbolje opišemo z delovanjem psihrometra, ki temelji na dejstvu, da imajo vlažni predmeti zaradi izhlapevanja nižjo temperaturo od suhih. Psihrometer je naprava za merjenje relativne vlažnosti, ki meri vlago v zraku na principu dveh ločenih termometrov:

1. *Suhi termometer – kaže temperaturo zraka.*
2. *Mokri termometer – običajno kaže nižjo temperaturo (ovit v mokro krpo).*

Vzrok nižje temperature na drugem termometru je izhlapevanje vode. Bolj kot je zrak suh, več vlage lahko sprejme (intenzivnejše je izhlapevanje). Temperaturna razlika med termometroma je odvisna od relativne vlažnosti zraka [20].

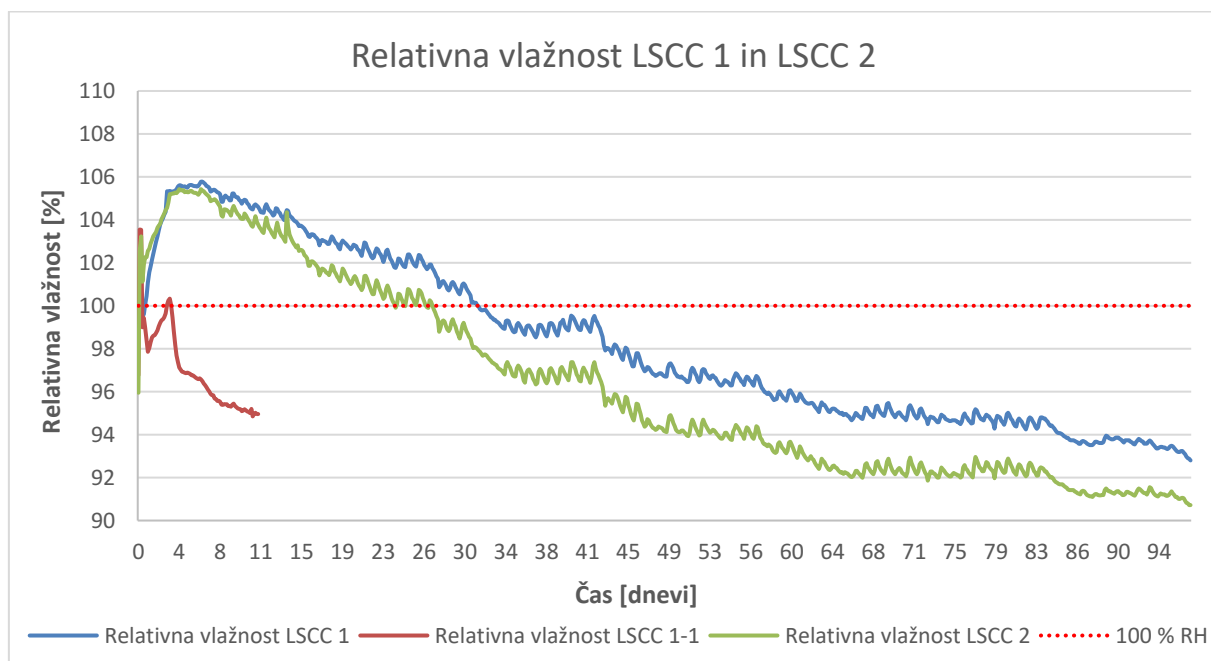
8.1.3 Lahki samozgoščevalni beton – LSCC

Na grafikonu 3 in 4 je prikazan časovni potek meritev RH in T vgrajenih senzorjev v mešanici LSCC. V mešanico LSCC 1 smo vgradili dva senzorja, v mešanico LSCC 2 pa enega. Drugi vgrajeni senzor v mešanico LSCC 1 je prenehal delovati bistveno prej. Deloval je samo 11 dni. V tem času je zabeležil 7920 vrednosti RH in T . Ostala dva senzorja sta delovala vseh 96 dni. V tem času je vsak senzor zabeležil 69685 vrednosti RH in T . Za izdelavo grafikonov smo uporabili 3 urni časovni interval.



Grafikon 3: Časovni potek temperature v mešanici LSCC 1 in LSCC 2

Hidratacijo in razvoj hidrationske toplote smo podrobneje obdelali že v poglavju 8.1.2. Iz poteka krivulj vidimo, da po končani intenzivni hidrationski krivulje temperature mešanic LSCC sovpadajo s krivuljo temperature laboratorija.



Grafikon 4: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici LSCC 1 in LSCC 2

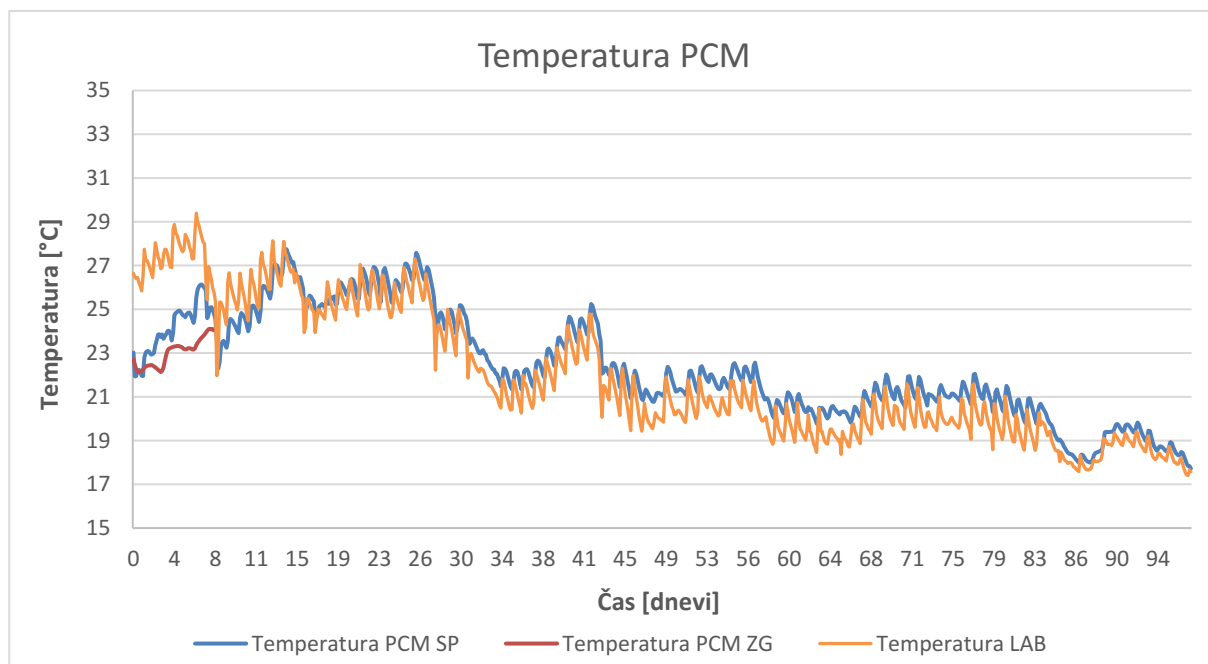
V trenutku, ko smo senzorje vgradili v mešanici LSCC je začela vrednost RH naraščati. Narašča prvih 140 ur oz. 6 dni, potem pa se umiri in začne počasi padati. Maksimalna vrednost, ki je bila izmerjena je 106 %. Naj še enkrat poudarimo, da izmerjene vrednosti nad 100 % pomenijo le, da so sonde polno zasičene (100 % RH – prisotna merska napaka). Prvih 30 dni je okolica senzorja še vedno popolnoma zasičena z vodo, saj je vrednost RH nad 100 %. Zadnja vrednost RH , ki je bila izmerjena po 96 dneh oz. približno 3 mesecih je znašala 91 oz. 93 % in nakazuje na počasno sušenje betona tudi v okolici senzorja.

Za betone je značilno, da se sušijo zelo dolgo časa, lahko tudi več let. V naši mešanici smo uporabili lahki glineni agregat, ki je bil pred uporabo in vgradnjo v mešanico primerno vlažen oz. namočen. Dodatno navlaženi agregata v mešanici prispeva k večji količini vode in posledično k počasnejšemu sušenju.

V poglavju 8.1.1 smo analizirali pridobljene vrednosti RH laboratorija in ugotovili, da so bile razmere v laboratoriju ves čas idealne.

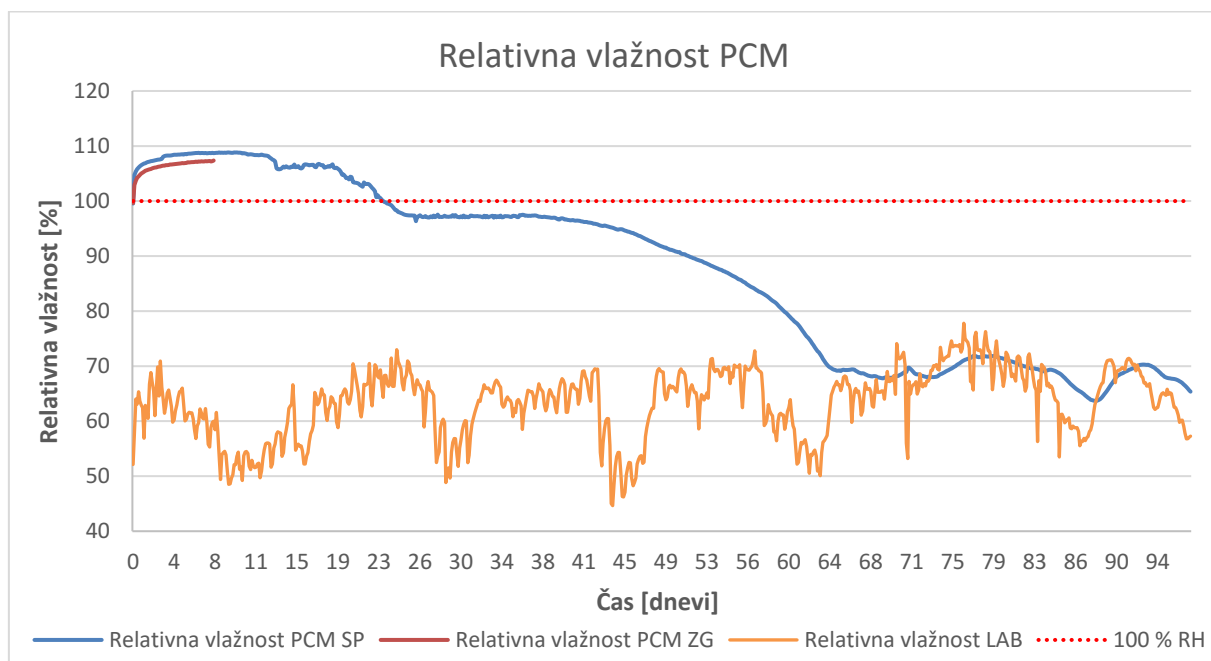
8.1.4 Podaljšana cementna malta – PCM

Na grafikonu 5 in 6 je prikazan časovni potek meritev RH in T vgrajenih senzorjev v obe spojnici PCM. Senzor v zgornji spojnici (*poimenovan ZG*) je prenehal delovati po 63 urah. Senzor v spodnji spojnici (*poimenovan SP*) je deloval vseh 96 dni. Senzor SP je v 96 dneh zabeležil 69685 meritev RH in T . Za izdelavo grafikonov smo se odločili uporabiti 3 urni časovni interval. Za analizo rezultatov uporabljamo vrednosti pridobljene s senzorjem v spodnji spojnici.



Grafikon 5: Časovni potek temperature v mešanici PCM

V prvih 14 dneh preizkusa opazimo, da je temperatura v spodnji spojnici 3 – 5 °C nižja od temperature v laboratoriju. Razlog za temperaturno razliko je adiabatno ohlajevanje, katerega smo podrobno opisali v poglavju 8.1.2. Po 14 dneh opazimo, da pričnejo vrednosti temperature spodnje spojnice sovpadati z vrednostmi temperature v laboratoriju.



Grafikon 6: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici PCM

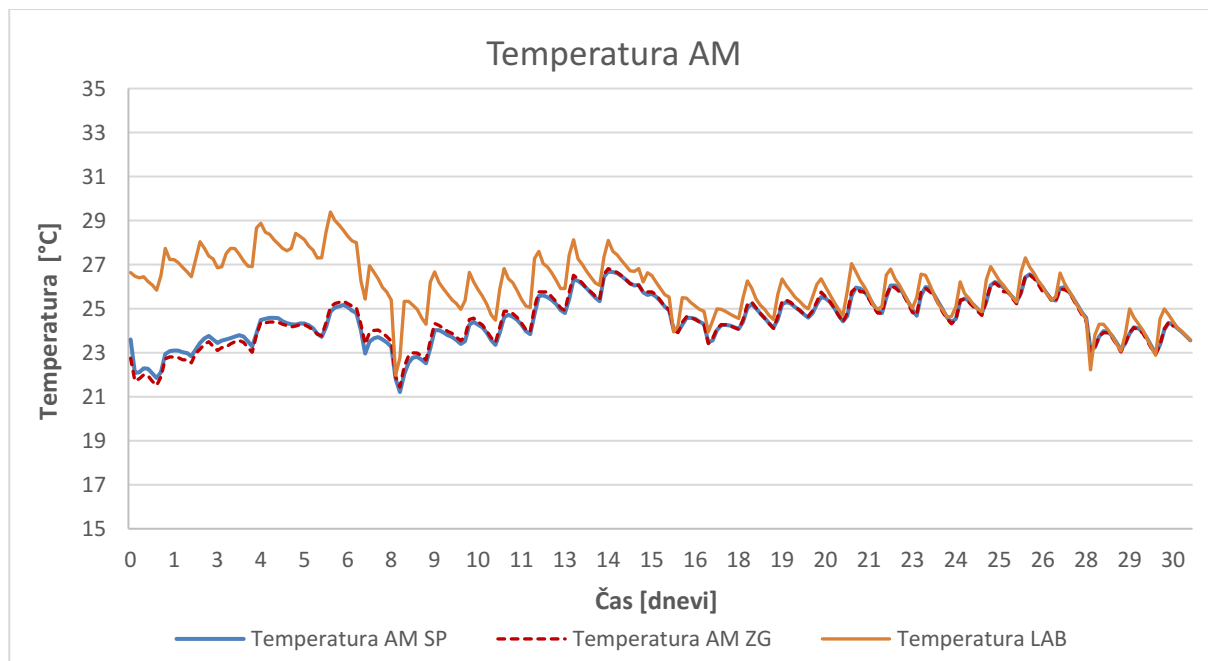
Iz poteka krivulje relativne vlažnosti spodnje spojnice opazimo, da imamo 100 % relativno vlažnost v spojnici približno 38 dni po vgradnji senzorjev (ob upoštevanju ± 3 % merske napake). Relativna vlažnost potem enakomerno pada in po preteklih 65 dneh začne sovpadati z relativno vlažnostjo okolice, kar nakazuje na sušenje mešanice okoli senzorja.

Proces vezanja cementnega dela veziva v malti je zaključen, apno pa veže CO_2 še naprej.

8.1.5 Čista apnena malta (AM)

Na grafikonu 7 in 8 je prikazan časovni potek meritev RH in T vgrajenih senzorjev v obe spojnici AM. Oba senzorja sta prenehala delovati po 30 dneh. V tem času sta zabeležila okoli 21800 vrednosti RH in T . Za izdelavo grafikonov smo se odločili uporabiti 3 urni časovni interval.

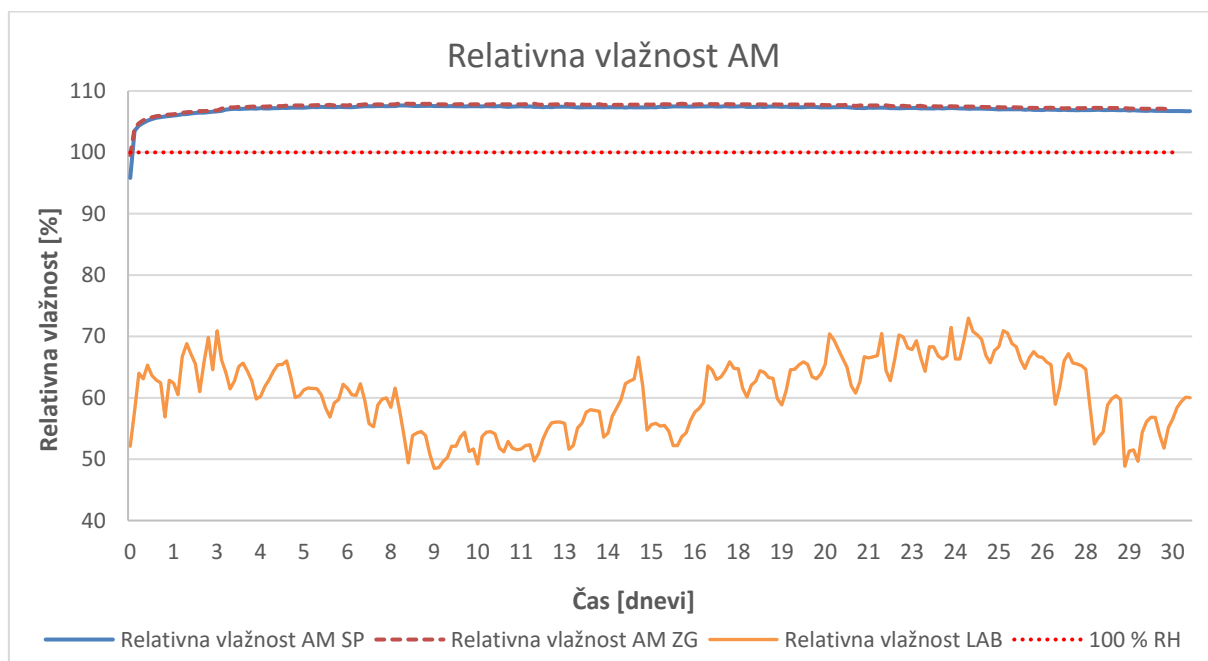
Apnena malta zaradi visoko alkalnega okolja predstavlja najbolj agresiven medij za senzorje.



Grafikon 7: Časovni potek temperature v mešanici AM

Podobno kot pri PCM, tudi pri AM opazimo začetno razliko med temperaturo v spojnici in temperaturo v laboratoriju. Razlika nastane zaradi adiabatnega ohlajevanja, ki z izhlapevanjem vode iz apnene malte hladi okolico. Po 14 dneh opazimo začetek sovpadanja temperature v laboratoriju s temperaturo v obeh spojnicah.

Razvidno je tudi, da je potek temperature v obeh spojnicah AM enak. Na podlagi tega lahko sklepamo, da sta senzorja v času delovanja delovala pravilno.



Grafikon 8: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici AM

Takoj po vgradnji senzorjev v svežo mešanico AM opazimo dvig relativne vlažnosti preko 100 % *RH*. Kot smo že omenili v poglavju 4.1, vrednosti nad 100 % pomenijo, da je senzor polno zasičen (*RH* 100%). V času preizkusa, se vrednosti *RH* niso spustile pod 100 %, kar kaže na visoko sposobnost zadrževanja vlage v apneni pasti in s tem na počasno sušenje apnene malte.

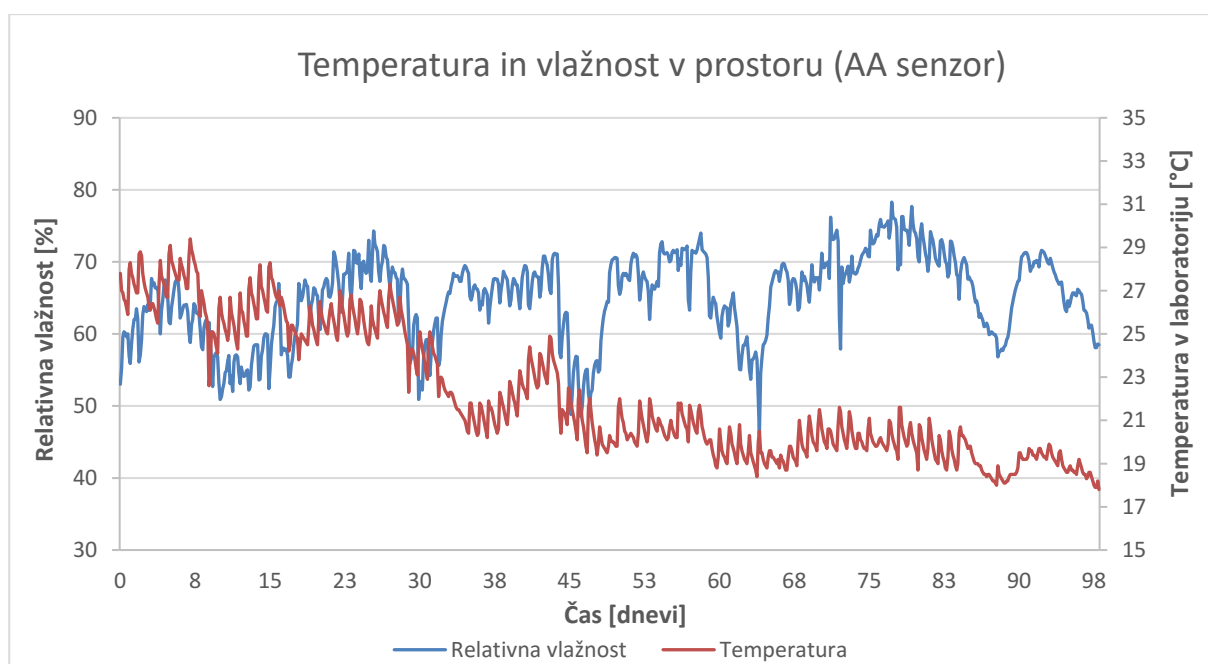
Če vrednosti *RH* AM primerjamo z vrednostmi *RH* PCM po 30 dneh preizkusa, vidimo, da je v notranjosti spojnic kljub zunanjemu »posušenemu« izgledu še vedno zelo visoka relativna vlažnost. Če je delovanje senzorjev pravilno, lahko zaključimo, da se spojnici apnene malte oz. apnena malta suši počasneje kakor podaljšana cementna malta.

8.2 Rezultati meritev relativne vlažnosti in temperature s senzorjem AA

V tem poglavju predstavimo in komentiramo rezultate meritev relativne vlažnosti in temperature izmerjene z merilnim sistemom AA – Ahlborn ALMEMO. Uporabili smo 3 senzorce in sicer: 1 senzor v vsaki mešanici LSCC in en senzor za kontrolo razmer v laboratoriju. Delovanje sistema AA je podrobno predstavljeno že v poglavju 4.2, vgradnja senzorjev v mešanici LSCC pa je opisana v poglavju 7.3.2.

Z uporabo sistema senzorjev AA želimo preveriti delovanje in pravilnost rezultatov zasnovanega senzorskega sistema SHT.

8.2.1 Laboratorij



Grafikon 9: Časovni potek temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju (sistem AA)

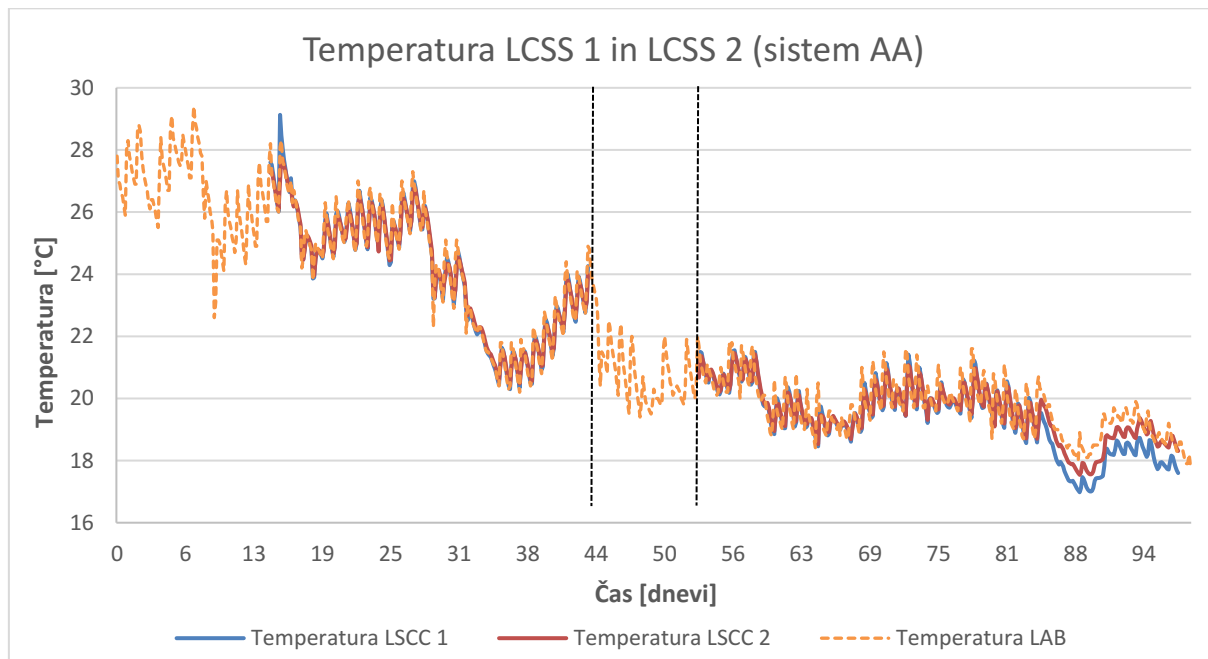
Iz grafikona 9 je razvidno, da je potek temperature in relativne vlažnosti zelo podoben grafikonu 1, v katerem smo predstavili vrednosti temperature in relativne vlažnosti pridobljene s sistemom senzorjev SHT.

Temperatura vseh 98 dni oz. 3 mesece periodično pada zaradi nižjih zunanjih temperatur, ki vplivajo na temperaturo v laboratoriju. Izmerjena maksimalna temperatura je bila 29 °C in minimalna temperatura 17 °C. Vrednosti sta bili zaradi prevelikega odstopanja od ostalih vrednosti iz grafikona odstranjeni. Povprečna temperatura, izračunana na podlagi pridobljenih vrednosti s sistemom senzorjev AA v času preizkusa je 22 °C.

Vrednost relativne vlage je nihala med 45 % (minimalna RH) in 80 % (maksimalna RH). Povprečna vrednost relativne vlage v času preizkusa je bila 65 %.

Razlog nihanja temperature in relativne vlage v laboratoriju smo pojasnili že v poglavju 8.1.1.

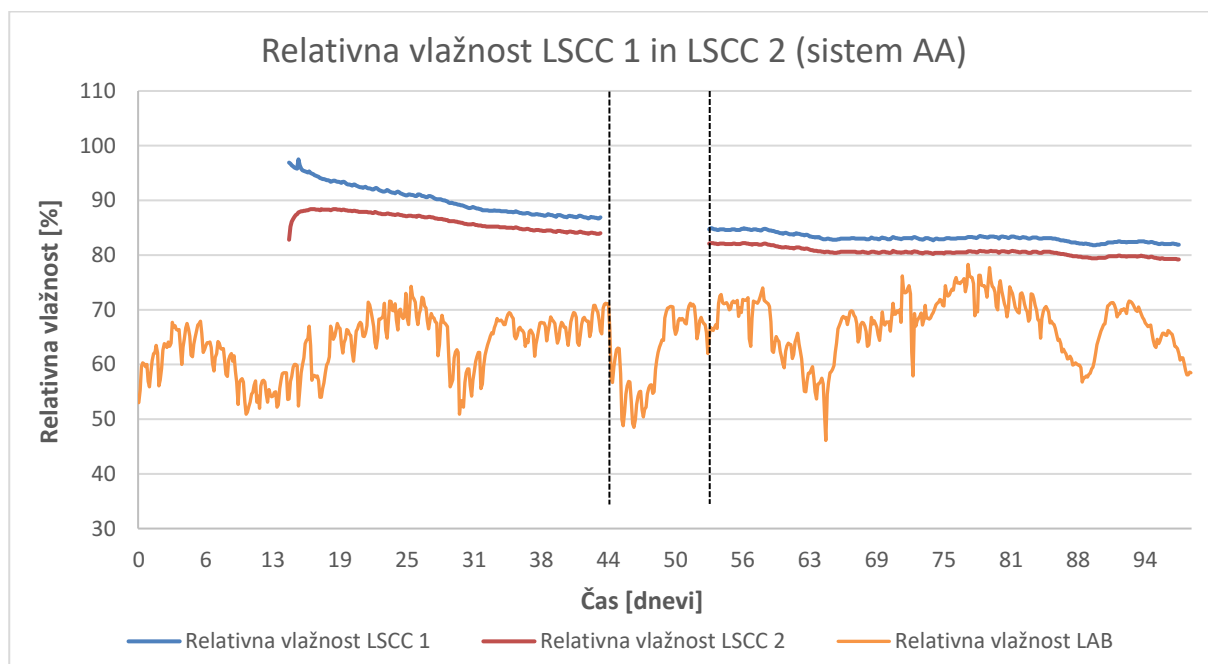
8.2.2 Lahki samozgoščevalni beton – LSCC



Grafikon 10: Časovni potek temperature v mešanici LCSS 1 in LCSS 2 (sistem AA)

Senzorja AA sta bila v mešanici LSCC 1 in LSCC 2 vgrajena 19.8.2019, torej 14 dni pozneje kakor sistem senzorjev SHT. Senzorje AA lahko visoka začetna *RH* poškoduje ali celo uniči. Zaradi poznejše vgradnje senzorjev na grafikonu ni vidnega temperaturnega maksimuma povezanega s sproščanjem hidratacijske toplote. Na označenem območju je prikazan tudi 10 dnevni izpad podatkov, zaradi zapolnitve spominskega prostora glavne enote AA sistema senzorjev.

Razvidno je, da je potek temperature v obeh mešanicah LSCC enak in sovpada s temperaturo v laboratoriju. Na podlagi ujemanja pridobljenih vrednosti lahko sklepamo, da so vrednosti in delovanje sistema pravilni.



Grafikon 11: Časovni potek relativne vlažnosti v mešanici LCSS 1 in LCSS 2 (sistem AA)

Zaradi poznejše vgradnje obeh senzorjev v mešanici LSCC na grafikonu nimamo značilnega naraščanja vrednosti RH . Zanimivo je, da vrednosti RH mešanice LSCC 1 že padajo, medtem ko vrednosti RH mešanice LSCC 2 še rastejo. Razlogov je lahko več:

1. Pri RH 90 % in več senzorja nista več pravilno umerjena.
2. Razlika med legama vgrajenih senzorjev.
3. Razlika v konsistenci mešanice.
4. Razlika v izoliranosti od okolice.

Iz grafikona je razvidno, da so vrednosti RH že pod 100 % in notranjost preizkušancev na poziciji senzorjev ni več polno zasičena. Zadnji izmerjeni vrednosti RH sta bili 82 % in 79 % ter sta bistveno nižji od zadnjih izmerjenih vrednosti sistema SHT. Po 96 dnevih je vrednost relativne vlažnosti v obeh preizkušancih še vedno bistveno višja od vrednosti relativne vlažnosti laboratorija, zato povezave med njima zaenkrat še ne moremo videti.

8.3 Primerjava meritev SHT in AA

V tem poglavju primerjamo delovanje sistema senzorjev SHT in AA. Primerjamo vrednosti temperature in relativne vlažnosti, katere smo pridobili v obeh preizkušancih mešanice LSCC in laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Krivulje temperature in relativne vlažnosti so prikazane v grafikonih 12, 13, 14, 15, 16 in 17. V preglednicah 8, 9 in 10 so zbrane in med seboj primerjane maksimalne, minimalne in povprečne vrednosti obeh merilnih sistemov.

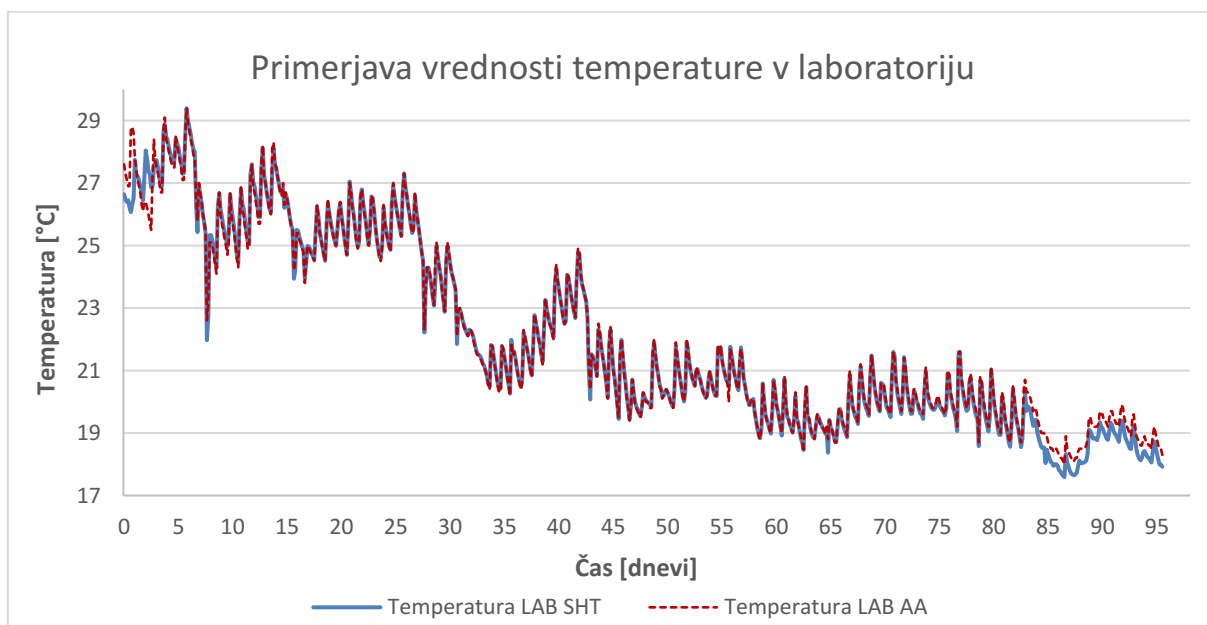
8.3.1 Laboratorij

Čas $t = 0$ predstavlja čas, ko smo zaključili z vgradnjo mešanic in senzorjev ter pričeli z merjenjem. Potek krivulj temperature v odvisnosti od časa je praktično enak, manjše odstopanje je vidno zgolj na začetku in koncu preiskave. Malenkost večja razlika je opazna pri primerjavi krivulj relativne vlažnosti v odvisnosti od časa, kar pa ni opazno pri primerjavi vrednosti RH zbranih v preglednici 8. Če primerjamo krivulje in rezultate zbrane v preglednici 8, lahko potrdimo, da je delovanje obeh sistemov res zelo primerljivo.

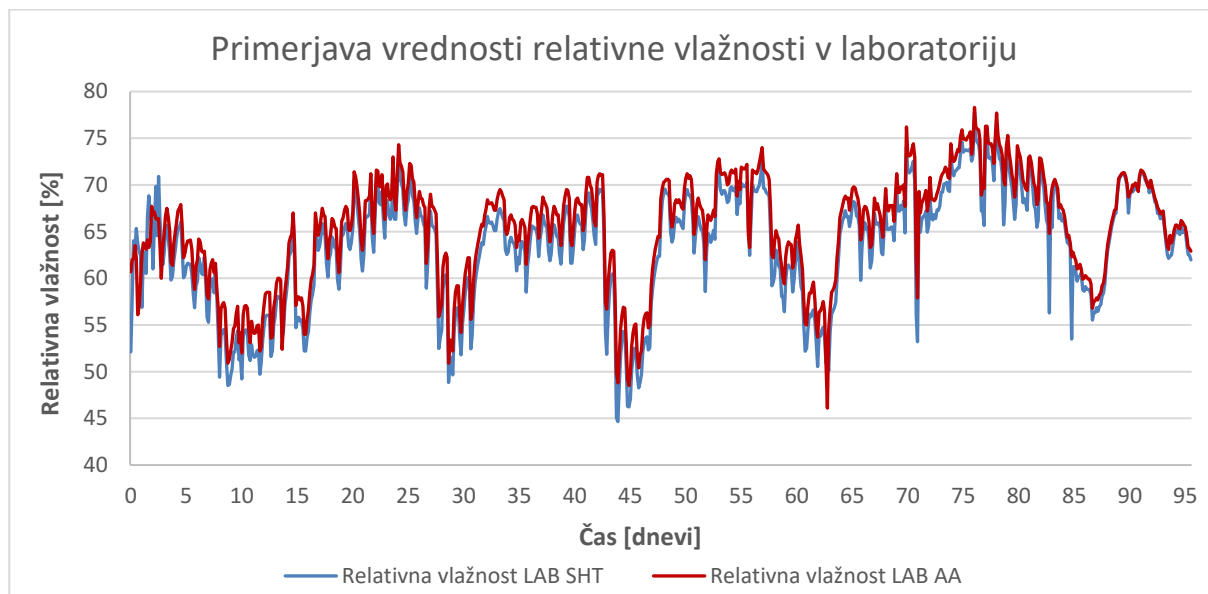
Zavedati se moramo, da sistem senzorjev AA že nekaj časa ni bil kalibriran, zato je pravilnost oz. merska napaka rezultatov vprašljiva in je po vsej verjetnosti razlog za razliko v rezultatih.

Preglednica 8: Primerjava vrednosti temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju

LAB	Max. T (°C)	Min. T (°C)	Povp. T (°C)	Max. RH (%)	Min. RH (%)	Povp. RH (%)
SHT	26,64	17,59	22,04	77,79	44,65	63,44
AA	29,4	18	22,11	78,3	46,1	65,25
Razlika	2,76	0,41	0,07	0,51	1,45	1,81



Grafikon 12: Primerjava vrednosti T v laboratoriju izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA



Grafikon 13: Primerjava vrednosti RH v laboratoriju izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA

8.3.2 Lahki samozgoščevalni beton LSCC

Čas $t = 0$ predstavlja čas, ko smo zaključili z vgradnjo senzorjev, oba kalupa do konca napolnili z betonsko mešanico in začeli z merjenjem. Pomembno je, da se zavedamo, da v primeru betonske mešanice LSCC med seboj primerjamo samo tiste vrednosti, ko sta pravilno delovala oba sistema senzorjev. Iz grafikonov je razvidno, da smo s sistemom senzorjev AA pridobili bistveno manj podatkov.

V preglednici 9 in 10 so zbrane maksimalne, minimalne in povprečne vrednosti temperature in relativne vlažnosti mešanice LSCC 1 in LSCC 2. Iz rezultatov opazimo, da se vrednosti temperature minimalno razlikujejo oz. so praktično enake, kar lahko vidimo tudi iz poteka krivulj temperature v odvisnosti od časa.

Veliko večja razlika pa se pojavi pri primerjavi rezultatov relativne vlažnosti. Razlike so velike, med 7 in 16 % *RH* (preglednica 9 in 10). Najbolj presenetljivo je tudi močno razlikovanje povprečnih vrednosti *RH*. Odstopanje vrednosti obeh merilnih sistemov je lepo vidno tudi iz poteka krivulj relativne vlažnosti v odvisnosti od časa (grafikona 16 in 17). Kljub večjim razlikam vrednosti *RH* pa opazimo primerljivo hitrost padanja *RH*, kar nakazuje na smiselno delovanje SHT sistema.

Razlika se po vsej verjetnosti pojavi zaradi načina vgradnje senzorjev AA v mešanici LSCC, kateri je podrobno opisan v poglavju 4.2. Najbolj vprašljivo je tesnjenje med senzorjem in PVC cevko ter možnost vstopanja okoliškega suhega zraka v notranjost preizkušanca. V temu primeru lahko prihaja do mešanja zunanjega suhega in notranjega vlažnega zraka ter napačnih vrednosti. Senzor SHT je vgrajen direktno v mešanico, zato nevarnosti vpliva zunanjega zraka ni. Vprašljiv je tudi vpliv obliivanja senzorja z betonsko mešanico. Senzor SHT ima bistveno manjšo oz. prostorninsko manj vsiljivo zaščito filtra kot senzor AA, zato betonska mešanica bistveno bolj oblije sam senzor kot pa senzor sistema AA. Pri senzorju AA beton oblije le zaščitno mrežico, senzor pa ostane v zraku.

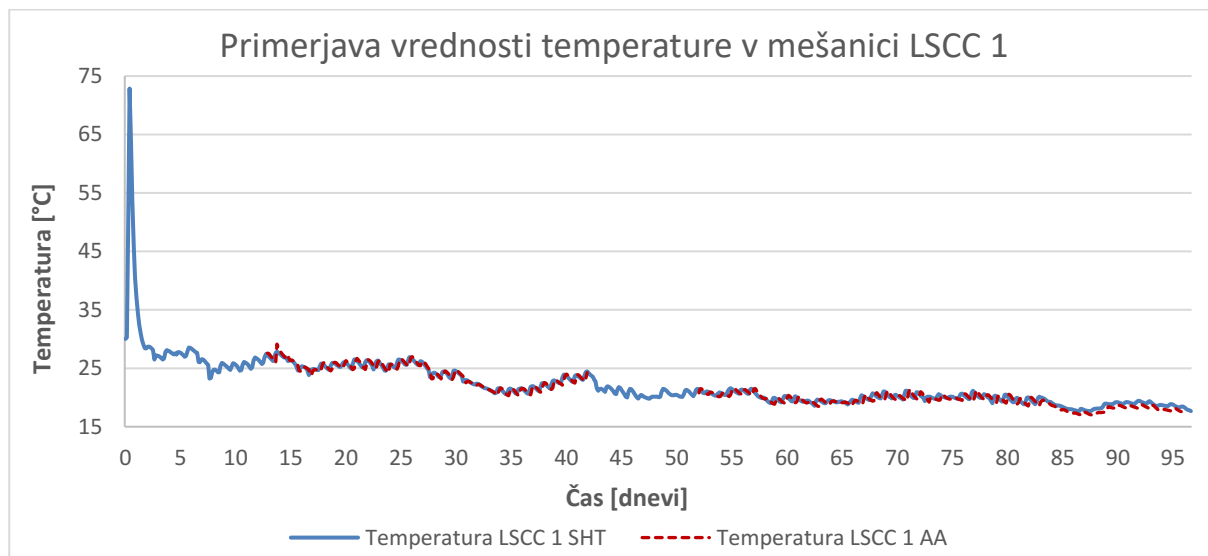
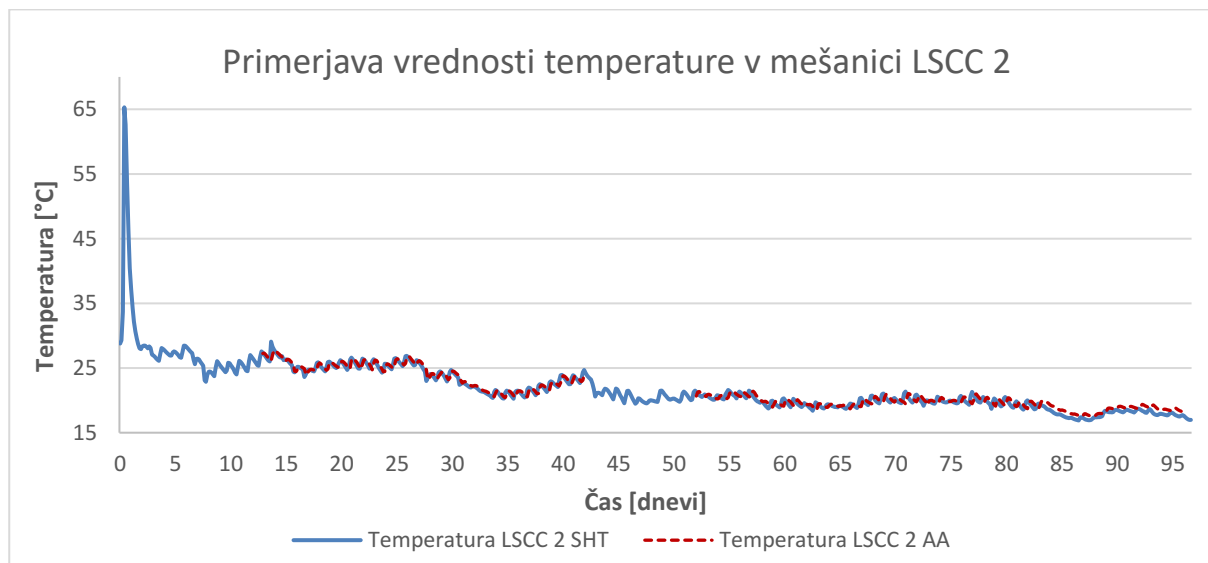
Pomembno je tudi, da se zavedamo, da merilni sistem senzorjev AA ni bil izdelan za uporabo v takšnih preiskavah.

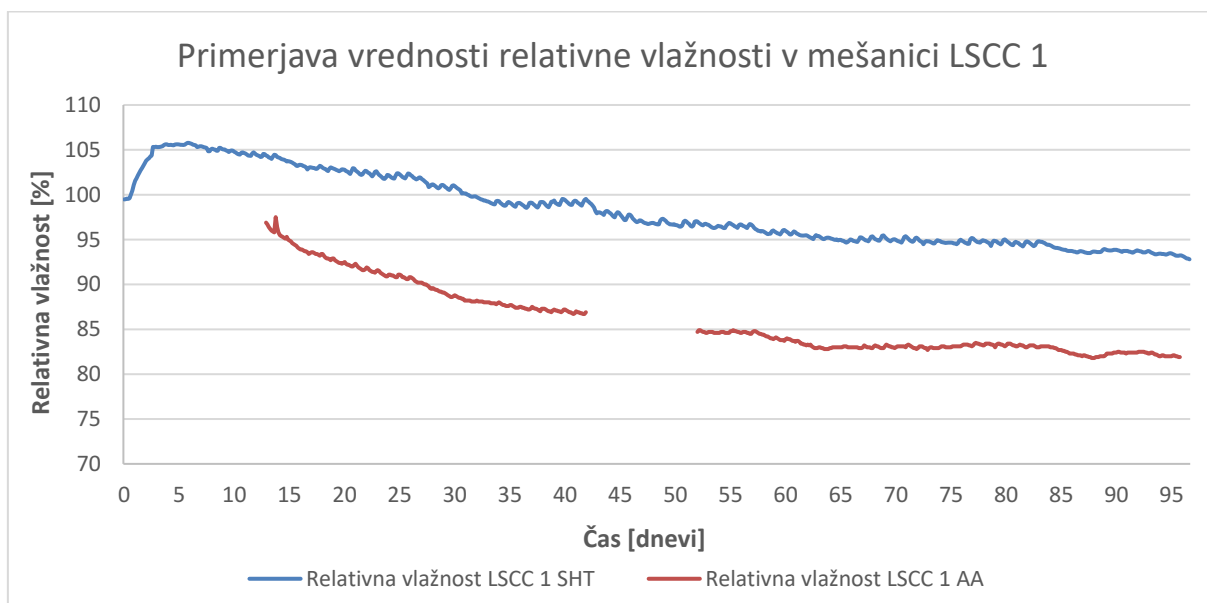
Preglednica 9: Primerjava vrednosti temperature in relativne vlažnosti v mešanici LSCC 1

LSCC 1	Max. <i>T</i> (°C)	Min. <i>T</i> (°C)	Povp. <i>T</i> (°C)	Max. <i>RH</i> (%)	Min. <i>RH</i> (%)	Povp. <i>RH</i> (%)
SHT	27,83	17,67	21,34	104,45	92,80	97,31
AA	29,13	16,98	21,24	97,5	81,8	85,98
Razlika	1,30	0,69	0,10	6,95	11,00	11,33

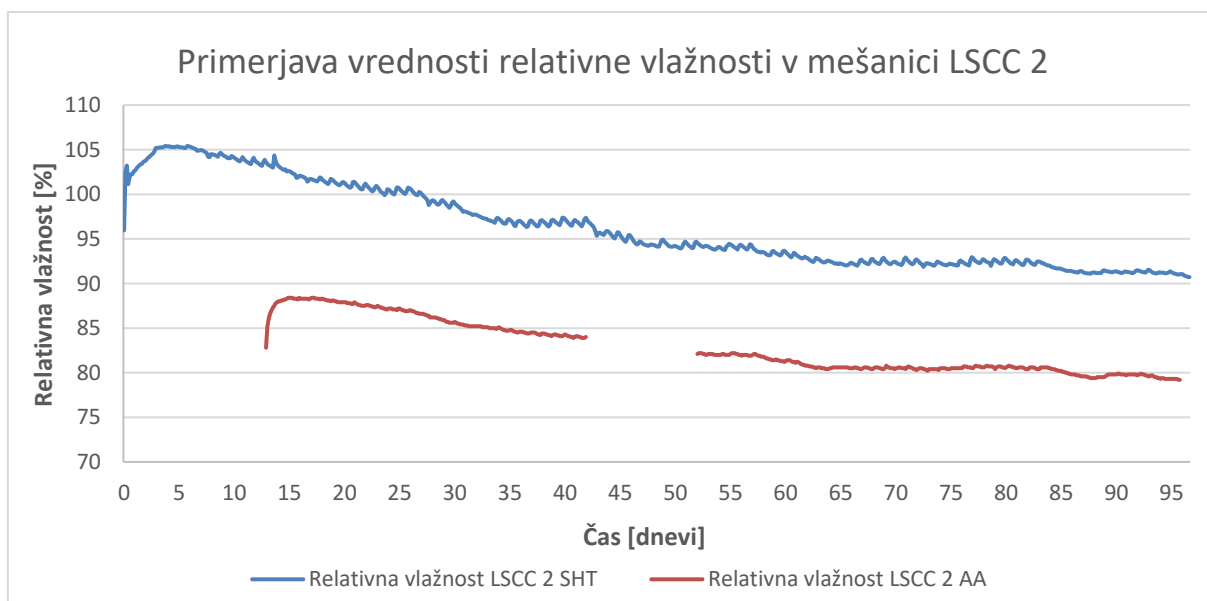
Preglednica 10: Primerjava vrednosti temperature in relativne vlažnosti v mešanici LSCC 2

LSCC 2	Max. <i>T</i> (°C)	Min. <i>T</i> (°C)	Povp. <i>T</i> (°C)	Max. <i>RH</i> (%)	Min. <i>RH</i> (%)	Povp. <i>RH</i> (%)
SHT	29,08	16,89	21,10	104,36	90,72	95,10
AA	27,75	17,54	21,35	88,4	79,2	82,84
Razlika	1,33	0,65	0,26	15,96	11,52	12,26

Grafikon 14: Primerjava vrednosti T v mešanici LSCC 1 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AAGrafikon 15: Primerjava vrednosti T v mešanici LSCC 2 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA



Grafikon 16: Primerjava *RH* v mešanici LSCC 1 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA



Grafikon 17: Primerjava *RH* v mešanici LSCC 2 izmerjene s sistemom senzorjev SHT in AA

9 ZAKLJUČKI

Vsi predstavljeni rezultati so pokazali, da je delovanje sistema senzorjev SHT zadovoljivo. Kot smo že predvidevali na samem začetku preiskave, je bilo delovanje sistema senzorjev SHT v laboratoriju dobro. To je pokazala tudi primerjava rezultatov obeh merilnih sistemov.

Določene pomanjkljivosti so pokazali senzorji, ki so bili vgrajeni v tri različne kompozitne mešanice. Od 7 vgrajenih senzorjev so na koncu preiskave delovali samo še 3 senzorji. En senzor je prenehal delovati že po 3 dneh, drugi trije pa po 11 oz. 30 dneh. Razlogov za prenehanje delovanja je več, nekaj smo jih omenili že v poglavju 4.1.4. Cement in apno sta zelo agresivna materiala, ki ustvarita agresivno alkalno okolje. Vsak senzor, ki je deloval do konca preiskave je v 96 dneh zabeležili okoli 69600 vrednosti temperature in relativne vlažnosti. Iz vrednosti opazimo, da se vsake toliko časa pojavi »Error«, kar pomeni, da je bila meritev neuspešna. Če primerjamo število vseh uspešnih meritev s številom neuspešnih meritev npr. v mešanici LSCC 1, ugotovimo, da je bilo samo 0,43 % meritev *RH* in 0,13 % meritev *T* neuspešnih. Podobne rezultate dobimo tudi v ostalih mešanicah. Delovanje sistema se je v temu primeru izkazalo za dobro.

Krivulje temperature istih mešanic in krivulja temperature prostora sovpadajo, kar kaže na pravilno delovanje senzorjev. Tudi primerjava vrednosti temperature obeh merilnih sistemov je tako grafično kot tudi računsko pokazala, da sta sistema beležila podobne vrednosti (primerjava samo v mešanicah LSCC 1 in LSCC 2). Na podlagi poteka krivulj in primerjavi vrednosti temperature smo ugotovili, da sistem senzorjev SHT deluje pravilno oz. beleži podobne vrednosti temperature kot sistem senzorjev AA. Sistem se je dobro obnesel tudi v obdobju hidratacije, ko so se vrednosti temperature bistveno zvišale.

Večja razlika in vprašljivost delovanja sistema senzorjev SHT pa se pojavi pri primerjavi vrednosti relativne vlažnosti. V mešanicah LSCC 1 in LSCC 2 senzorji SHT izmerijo za okoli 10 % večjo relativno vlažnost od senzorjev AA medtem, ko so rezultati meritev vlažnosti v laboratoriju podobne. Zaradi zgoraj že omenjenih prilagoditev vgradnje sistema senzorjev AA ne moremo zagotovo trditi, da sistem senzorjev AA beleži pravilne vrednosti in posledično sistem senzorjev SHT napačne. Oba sistema lahko delujeta povsem pravilno in do razlike prihaja zaradi različne narave vgradnje enega in drugega sistema senzorjev. Senzor sistema SHT je popolnoma oblit z betonsko mešanico, medtem ko senzor sistema AA vstavimo v PVC cevko, v katero lahko vstopa tudi zunanji zrak. Če na koncu pogledamo še potek krivulj relativne vlažnosti sistema senzorjev SHT posameznih mešanic, pa je tako kot pri poteku krivulj temperature opaziti sovpadanje krivulj in posledično pravilno delovanje sistema senzorjev.

Značilno je, da je kapilarna poroznost betonov pri nizkem V/C razmerju majhna, poleg tega so majhni tudi premeri oblikovanih kapilarnih por. Sušenje betona je zato zelo počasno. Preizkušanca betonske mešanice LSCC sta imela relativno velik volumen, zato visoka vrednost relativne vlažnosti v jedru po preteklih 96 dneh ni presenetljiva, sploh ob predpostavki, da uporabljamo vlažen agregat iz ekspandirane gline.

Sistem senzorjev je v fazi razvoja, zato je prostora za izboljšave še zelo veliko. Dimenzija in zasnova senzorjev oz. sond je zadovoljiva. Sonde so dovolj majhne in strukturno nevsiljive, zato jih lahko vgradimo praktično kamorkoli (manjše spojnice, večji stebri, betonske plošče, prefabricirani elementi itd). V primeru, da bi sistem razvili do te mere, da bi ga pogosto uporabljali, bi izdelava samih senzorjev morala biti avtomatizirana, saj je izdelava posameznega senzorja preveč zamudna in zahtevna. Zaradi zahtevne izdelave (spajkanje majhnih elementov, izvedbe zaščite) prihaja do napak. Od skupno 12 pripravljenih senzorjev, jih je na koncu delovalo samo 8 (pri nekaterih nismo ugotovili, zakaj niso delovali). Če predpostavimo, da bi morali izdelati 100 senzorjev, katere bi npr. vgrajevali v stebre pri gradnji večstanovanjske stavbe, na koncu pa bi jih delovalo samo 70, bi bil tak sistem merjenja premalo zanesljiv in stroškovno neupravičen.

Velik problem je omejenost uporabe samega merilnega sistema zaradi načina povezovanja senzorjev z glavno enoto oz. Raspberry Pi3 računalnikom. Bakrene žice in stiki so dokaj občutljivi, zato smo z njimi morali pazljivo ravnati. Omejeni smo tudi z dolžino bakrenih žic, da ne prihaja do raznih fizikalnih vplivov na natančnost merjenja, sama zasnova merilnega sistema pa od nas zahteva, da so vse žične povezave lepo urejene. Končni cilj razvoja merilnega sistema je sestaviti brezžični sistem, ki bi bil z vidika povezovanja bistveno bolj uporaben. Z uporabo brezžične tehnologije pa se pojavijo nova vprašanja in sicer:

- Čas delovanja senzorjev (kapaciteta baterije).
- Senzorji bodo bistveno večji (vprašanje strukturne vsiljivosti).
- Vpliv agresivnega okolja na brezžični senzor, ki je bistveno bolj občutljiv kot žični.
- Vprašljivo delovanje brezžičnega sistema senzorjev v večjih betonskih elementih.

Vgradnja senzorjev je zaradi kompliciranega žičnega sistema počasna in dokaj zahtevna. Pazljivi smo morali biti na položaj senzorja in vseh 4 žic, ki so bile povezane s senzorjem. Če bi ta sistem prenesli na večje gradbišče, kjer gradnja poteka hitro, sile pri vgrajevanju mešanic so bistveno večje, delavci niso tako pazljivi kot smo bili mi, tak sistem zaenkrat verjetno še ne bi deloval.

Kljub temu, da je uporaba senzorjev zaenkrat omejena na laboratorij omogoča spremljanje razvoja različnih kompozitov in s tem lahko prispeva k optimiziranju časovnih okvirjev gradnje, ki so vedno bolj omejeni. V prihodnosti bi z uporabo senzorjev na gradbišču lažje določali, kdaj lahko elemente razopazimo in nadaljujemo z gradnjo, kdaj beton dovolj zveže in že lahko prevzame obtežbo itd. Zanimivo bi bilo tudi uporabljati tak sistem za kontrolo trajnosti konstrukcije oz. konstrukcijskih elementov. Nenavadno spreminjanje relativne vlažnosti ali temperature znotraj konstrukcijskega elementa bi lahko pomenilo, da je konstrukcija poškodovana ali razpokana. Tako bi lahko pravočasno ukrepali in sanirali ali v skrajnem primeru celo preprečili morebitno porušitev konstrukcije.

Ugotovili smo, da potrebuje sistem senzorjev SHT dve izboljšavi in sicer: izboljšavo robustnosti senzorja ter spremembo načina povezovanja. Rezultati so pokazali, da je uporaba sistema SHT v betonih in maltah smiselna.

VIRI

- [1] Žarnič, R. 2005. Ljubljana. Lastnosti gradiv: str 77 - 135.
- [2] Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine, Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M.Uranjek).
- [3] Lafarge. 2003. O cementu. <http://www.lafarge.si/nasi-izdelki/o-cementu/> (Pridobljeno 15. 1. 2020.)
- [4] Maček, G. 2019. Neporušne metode merjenja lastnosti cementnih kompozitov, Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Maček).
- [5] Strmšek, L. 2017. Primerjava standardnih in naprednih metod preiskav cementnih kompozitov pri zgodnji starosti, Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Strmšek).
- [6] Alizadeh, A. R. 2009. Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems.
https://www.researchgate.net/publication/282611085_Nanostructure_and_Engineering_Properties_of_Basic_and_Modified_Calcium-Silicate-Hydrate_Systems (Pridobljeno 22. 10. 2019.)
- [7] Martinović, M. 2010. Primjena diferencijalne mikrokolorimetrije u istraživanju hidratacije cementa, Diplomaska naloga. Split, Sveučilište u Splitu, Kemijsko – tehnološki fakultet: str 7.
https://bib.irb.hr/datoteka/561649.Martinovic_Marija_Zavrzni_rad.pdf (Pridobljeno 13. 10. 2019.)
- [8] Saje, D. 2015. Ljubljana. Tehnologija betona. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/KMLK/Drago/IPiMK/IPiMK_2015_2016/2015_10_02_0003_Tehnologija_betona_TEORIJA.pdf (Pridobljeno 14. 10. 2019.)
- [9] Hu, J., Ge, Z., Wang, K. 2013. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813009215?via%3Dihub> (Pridobljeno 15. 12. 2019.)
- [10] Strnad, J. 1977. Fizika, 1. del. Mehanika, toplota: str. 198.
- [11] De Carufel, S. 2019. Understanding Relative Humidity in Concrete.
<https://www.giatecscientific.com/education/understanding-relative-humidity-in-concrete/> (Pridobljeno 20. 12. 2019.)
- [12] Žirovec, M. 2014. Brežžični sistem za merjenje temperature in relativne vlažnosti v zaščitnih oblačilih, Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko (samozaložba M. Žirovec).
- [13] Omega. 2018. Introduction to Integrated Circuit Temperature Sensors.
<https://www.omega.com/en-us/resources/integrated-circuit-sensors> (Pridobljeno 1. 12. 2019.)
- [14] Research Gate. Environmental stress cracking of poly(vinyl chloride) in alkaline solutions. 2000.
https://www.researchgate.net/publication/223420537_Environmental_stress_cracking_of_polyvinyl_chloride_in_alkaline_solutions (Pridobljeno 10. 1. 2019.)

- [15] Sjöberg, S. 1996. Silica in aqueous environments.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022309395005625> (Pridobljeno 10. 1. 2020.)
- [16] Sensirion. Datasheet Humidity Sensor SHT25.pdf. <https://www.sensirion.com/en/download-center/> (Pridobljeno 22. 10. 2019.)
- [17] Ranogajec, S. 2018. Development of multichannel temperature/relative humidity sensor system. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.
- [18] Techradar. 2016. Raspberry Pi 3 review. <https://www.techradar.com/reviews/pc-mac/pc-mac-desktops/raspberry-pi-3-1316838/review> (Pridobljeno 5. 11. 2019.)
- [19] Ahlborn ALMEMO. 2004. Datasheet ALMEMO® 2590A.
<https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap01/eng/2590Ae.pdf> (Pridobljeno 23. 11. 2019.)
- [20] Gazvoda, M., Mihič, S. 2010. Merjenje vlažnosti, Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. http://lrmte.fe.uni-lj.si/lrmte/slo/UNIVSS/meri_pret/seminar%202011/seminarska_merjenje%20vlažnosti.pdf (Pridobljeno 15. 12. 2019.)