

Primljen / Received: 26.5.2016.

Ispravljen / Corrected: 13.7.2017.

Prihvaćen / Accepted: 8.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.4.2018.

Utjecaj agregata obloženog geopolimerom s letećim pepelom na bitumenske mješavine

Autori:



Doc.dr.sc. **Srividya Dayal**, dipl.ing.građ.
Tehnički fakultet Thiagarajar
Odjel za građevinarstvo
Tamilnadu, Indija
vidyakrishna2006@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Nagan Soundarapandian**, dipl.ing.građ.
Tehnički fakultet Thiagarajar
Odjel za građevinarstvo
Tamilnadu, Indija
nagan_civil@tce.edu

Prethodno priopćenje

Srividya Dayal, Nagan Soundarapandian

Utjecaj agregata obloženog geopolimerom s letećim pepelom na bitumenske mješavine

Istraživanje prikazano u radu provedeno je u svrhu određivanja svojstava agregata obloženog geopolimerom na bazi letećeg pepela i utjecaja tih svojstava na karakteristike bitumenskih mješavina. Provedeno je ispitivanje agregata, analiza letećeg pepela i geopolimera na bazi letećeg pepela mikroskopom za elektronsko skeniranje (SEM), ispitivanje mješavina Marshallovom metodom, indirektno vlačno ispitivanje, ispitivanje reologije reometrom s dinamičkim smicanjem (DSR) te ispitivanje bitumenskih mješavina s agregatom obloženim geopolimerom na bazi letećeg pepela opetovanim opterećenjem.

Ključne riječi:

geopolimer na bazi letećeg pepela, obloženi agregat, bitumenske mješavine, mikroskop za elektronsko skeniranje

Scientific Paper – Preliminary report

Srividya Dayal, Nagan Soundarapandian

Effect of fly-ash based geopolymer coated aggregate on bituminous mixtures

The research presented in the paper is conducted to evaluate properties of fly ash-based geopolymer coated aggregates and their effect on characteristics of bituminous mixtures. The investigation included aggregate testing, scanning electron microscope (SEM) analysis of fly ash and fly ash-based geopolymer, Marshall mix design, indirect tension test, dynamic shear rheometer (DSR) test for rheology, and repeated load test on bituminous mixtures with fly ash-based geopolymer coated aggregates.

Key words:

fly ash-based geopolymer, coated aggregate, bituminous mixtures, scanning electron microscope

Vorherige Mitteilung

Srividya Dayal, Nagan Soundarapandian

Einfluss des mit Geopolymer beschichteten Zuschlagsstoffs mit Flugasche auf Bitumenmischungen

Die in der Abhandlung dargelegte Untersuchung wurde zum Zwecke der Bestimmung der Merkmale des mit Geopolymer auf Flugaschebasis beschichteten Zuschlagstoffs durchgeführt sowie des Einflusses dieser Merkmale auf die Eigenschaften von Bitumenmischungen. Durchgeführt wurde eine Untersuchung des Zuschlagstoffs, eine Analyse der Flugasche und des Geopolymers auf Flugaschebasis mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (SEM), eine Untersuchung der Mischungen mithilfe der Marshall-Methode, ein indirekter Zugversuch, eine Untersuchung der Rheologie mit einem dynamischen Scher-Rheometer (DSR) sowie eine Untersuchung der Bitumenmischungen mit dem mit Geopolymer auf Flugaschebasis beschichteten Zuschlagstoff durch wiederholte Belastung.

Schlüsselwörter:

Geopolymer auf Flugaschebasis, beschichteter Zuschlagstoff, Bitumenmischungen, Rasterelektronenmikroskop

1. Uvod

Kao zemlja u razvoju, Indija se danas suočava s velikom potražnjom pogodnog agregata za razvoj svoje infrastrukture, a s druge je strane opterećena problemima kako postupati s letećim pepelom koji nastaje kao nusproizvod rada termoelektrana na ugljen.

Prema izvještaju grupe Freedonia iz SAD-a (Svjetska proizvodnja građevinskog agregata) [1], 30-35 % agregata koristi se za nestambene građevine, 25 % za gradnju autocesta te 25 % za stambeni sektor, a pritom se očekuje da će potražnja za agregatom i dalje rasti. Patrick Smit je 2013. godine izvijestio u časopisu *Aggregate Business International* [2] da će, prema predviđanjima, globalno tržište građevnim agregatom rasti po stopi od 5,2 % godišnje te da će dostići količinu od 48,3 milijardi tona do 2015. godine. U Indiji se očekuje godišnji rast potražnje za agregatom od 8,5 %, što bi iznosilo 5 milijardi tona do 2020. godine, a to predstavlja najbržu stopu rasta u svijetu.

S tim u vezi, u izvješću Nacionalnog tijela za električnu energiju (*Central Electricity Authority*) od 31. ožujka 2011. navodi se da termoelektrane na ugljen proizvode 54,09 % od ukupne električne energije proizvedene u Indiji. Leteći pepeo se najviše upotrebljava u industriji cementa (48,12 %), a samo 13,02 % koristi se za gradnju cestovnih prometnica i nasipa. Općenito, u Indiji je u 2014. i 2015. iskorišteno otprilike 55,69 % letećeg pepela generiranog u istom razdoblju. Predviđa se da će u godini 2031. do 2032. ukupna potražnja za ugljenom iznositi oko 1800 milijuna tona te da će se u istom razdoblju generirati 600 milijuna tona letećeg pepela. Zasad se kao nusproizvod godišnje generira 95 milijuna tona letećeg pepela, a ta količina zauzela bi prostor od približno 2630 hektara zemljišta (izvor: Ministarstvo znanosti i tehnologije, Indija, 2010. godine).

Slijedi prikaz relevantne literature koja bi mogla pomoći u pronalaženju rješenja u pogledu potražnje za agregatom i iskorištavanja letećeg pepela.

1.1. Leteći pepeo u bitumenskim mješavinama

Brojna se istraživanja diljem svijeta provode kako bi se istražila moguća primjena letećeg pepela u bitumenskim mješavinama. Rezultati mnogih istraživanja pokazuju da primjena letećeg pepela kao punila u bitumenskim mješavinama povećava otpornost pri niskim temperaturama, vlačnu čvrstoću, otpornost na pojavu pukotina uslijed zamora te otpornost na djelovanje vode (Kumar i dr. [3], Vishal Sharma i dr. [4] i M.N. Rahman i dr. [5]. Suheibani [6] je pokazao da se dodatkom letećeg pepela klase F, bitumenskim mješavinama povećava indirektna vlačna čvrstoća, otpornost na pojavu kolotruga te otpornost na pojavu pukotina uslijed zamora. Nakon istraživanja mikrostrukture bitumenskih veziva modificiranih letećim pepelom, Sobolev i dr. [7] zaključili su da leteći pepeo, ako je ravnomjerno raspoređen u bitumenskoj matrici, uspješno usporava pojavu pukotina. To istraživanje potvrđuje mogućnost korištenja letećeg pepela kao sredstva za poboljšanje svojstava i ponašanja bitumenskih veziva

i mješavina. Istraživanje koje su proveli Sobolev i dr. [8] pokazuje da dodavanje letećeg pepela ne utječe negativno na mogućnost zbijanja bitumenskih mješavina, te da oble čestice letećeg pepela pridonose smanjenju temperature miješanja i ugradnje, a istovremeno poboljšavaju obradivost mješavina. Zbog relativno visokog udjela kalcijevog oksida, leteći pepeo usporava pojavu kolotruga, povećava omjer vlačne čvrstoće, održava stabilnost mješavine i smanjuje temperaturne deformacije. Tara Sen i Umesh Mishra [9] navode da se upotrebom letećeg pepela smanjuje mogućnost ljuštenja zbog njegovih hidrofobnih svojstava. Gordana Kaluđer i dr. [10] zaključuju da leteći pepeo kao punilo u bitumenskim mješavinama dovodi do povećanja koncentracije veziva.

1.2. Geopolimer na bazi letećeg pepela

Geopolimeri su anorganski materijali koji po svom sastavu formiraju dugu kovalentno povezanu nekrystalnu strukturu. Sirovine koje se koriste u sintezi polimera na bazi silicija uglavnom su minerali od kojih se formiraju stijene, tj. minerali geološkog podrijetla, pa je stoga Joseph Davidovits [11] razvio koncepciju geopolimera na bazi letećeg pepela, a materijal je zamislio kao gustu amorfnu fazu polukristalaste trodimenzionalne mikrostrukture. Vaan Jaarsveld i dr. [12] istraživali su geopolimerizaciju te su ustanovili da su u nekim slučajevima svojstva geopolimernih materijala bolja od svojstava postojećih cementnih materijala. Xu, H i dr. [13] i Diaz i dr. [14] ustanovili su da kalcij sadržan u letećem pepelu bitno utječe na svojstva svježje geopolimerske mješavina i na očvrslu proizvod, što može biti rezultat formiranja hidratiziranih kalcij-silikatnih spojeva. Hongling Wang i dr. [15] sintetizirali su geopolimer iz metakaolinita uz aktivaciju NaOH i otopine natrijevog silikata, te su proučavali utjecaj NaOH na svojstva geopolimera. To istraživanje je pokazalo da se gustoća i čvrstoća betona s geopolimerima povećava s porastom koncentracije NaOH. Bakharev [16] je istraživao trajnost geopolimerskih materijala proizvedenih od letećeg pepela klase F te je zaključio da se najbolje ponašaju materijali pripremljeni u mediju natrijevog hidroksida u kontaktu sa sulfatnom okolinom. Ipak, praktična upotreba geopolimera na bazi letećeg pepela u kolničkim konstrukcijama prilično je ograničena. Tome može biti razlog nedostatak informacija o njegovim inženjerskim svojstvima. Budući da maseni udio agregata u bitumenskoj mješavini iznosi 90-95 %, može se reći da trajnost i ponašanje kolnika uvelike ovisi o kvaliteti agregata korištenog u njegovoj izradi, a kvaliteta agregata ovisi o površinskoj teksturi, veličini i obliku zrna te o mineraloškom sastavu. Kako se sve teže mogu naći kvalitetni agregati, prikladna financijska ravnoteža između vijeka trajanja i cijene agregata može se postići kroz primjenu lokalno dostupnih materijala. Imajući tu činjenicu na umu, u ovom se radu istražuju marginalni agregati prikupljeni iz raznih kamenoloma, čija su svojstva poboljšana oblogom od geopolimera na bazi letećeg pepela, a istražuje se i utjecaj geopolimera na bitumenske mješavine.

2. Materijali

U ovom se istraživanju za pripremu geopolimera na bazi letećeg pepela upotrebljavaju dvije vrste letećeg pepela te natrijev silikat i natrijev hidroksid kao alkalni medij (vrijednost molarne koncentracije: 10). Kao krupnozrnati agregat korišten je lomljeni kamen iz kamenoloma granita. Bitumen klase VG 10 korišten je kao vezivo u pripremi bitumenskih mješavina. Podaci o materijalima, izvoru materijala i ispitivanjima prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Materijali korišteni u istraživanju

Materijal	Izvor	Ispitivanja
Leteći pepeo (FA1)	Termoelektrana Tuticorin	Ispitivanje kemijskog sastava, SEM s EDAX
Leteći pepeo (FA2)	Tvrtka za lignit Neyveli	
Kemikalije: natrijev silikat i natrijev hidroksid	Lokalni dobavljač	Kontrola čistoće (detalji o pakiranju)
Geopolimer na bazi letećeg pepela	Laboratorijska priprema	Ispitivanje obradivosti
Krupnozrnati agregat – neobloženi (obični)	Razni kamenolomi granita	Fizikalna ispitivanja: gustoća, upijanje vode i kombinirani indeks
Krupnozrnati agregat – geopolimer na bazi letećeg pepela – obloženi agregat	Laboratorijska priprema	Mehanička ispitivanja: ispitivanje na udar, drobljenje, trošenje i ljuštenje
Bitumen (VG10)	Lokalni dobavljač pored Thirumanagalama	Ispitivanje točke razmekšanja, duktilnosti, penetracije i viskoznosti

2.1. Leteći pepeo

Leteći pepeo dobiven iz termoelektrane Tuticorin (FA1) i tvrtke za lignit Neyveli (FA2) odlikuje se sivkastobijelom bojom a po prirodi je heterogen. FA1 sadrži 1,6 % sumpornog trioksida (maseni udio) i slobodni CaO, a pripada klasi letećeg pepela F prema normi ASTM C618. Maseni udio lužine dostupne u obliku natrijevog oksida iznosi 1,23 %. Specifična gustoća letećeg pepela FA1 iznosi 1,8, a 90 % letećeg pepela prolazi kroz sito veličine 45 µm. Maseni udio silicija i kalcijevog oksida u letećem pepelu FA2 iznosi 35,23 % tj. 9,09 %. Specifična gustoća iznosi 1,76, a 95 % materijala prolazi kroz sito veličine 45 µm. Kemijski sastav letećeg pepela prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav letećeg pepela

Komponenta	FA 1	FA 2
Silicijev dioksid (SiO ₂) + aluminijev oksid (Al ₂ O ₃) + željezni oksid (Fe ₂ O ₃), maseni udio	81,49	76,97
Silicij(kao SiO ₂), maseni udio	52,03	35,23
Magnezijev oksid (as MgO), maseni udio	3,27	4,15
Ukupan sumpor kao sumporni trioksid (SO ₃), maseni udio	1,60	3,53
Gubitak žarenjem	2,59	4,75

2.2. Alkalne tekućine

U ovom su istraživanju korišteni silikati i hidroksidi visoko-alkalnog natrija topivog u vodi. Od lokalnog je dobavljača kupljen natrijev silikat (Na₂SiO₃) i natrijev hidroksid (NaOH) poznat i kao kaustična soda, u obliku listića, čistoće 98 %. Hidroksidna otopina potrebna za potpunu aktivaciju pripremljena je u koncentraciji od 10 M dodavanjem 10 x 40 = 400 grama NaOH listića u jednu litru destilirane vode, gdje 40 predstavlja molekularnu težinu NaOH. Svojstva geopolimera mijenjaju se s povećanjem koncentracije alkalnog medija. Ispitivanja obradivosti FA1 provedena su pri koncentracijama NaOH od 8M, 10M, 12M, 14M i 16M, dok su za FA2 ispitivanja obradivosti provedena pri koncentracijama od 15M, 22M i 29M.

2.3. Geopolimer na bazi letećeg pepela

Geopolimeri pripadaju skupini anorganskih polimera. Reakcija geosinteze između bilo kojeg pucolanskog spoja ili izvora silicijeva i aluminijevog oksida u alkalnom mediju dovodi do geopolimerizacije te nastanka trodimenzionalnog polimernog lanca sastavljenog od veza Si-O-Al (Joseph Davidovits) [11]. Podaci iz literature o geopolimernoj pasti pokazuju da koncentracija NaOH bitno utječe na svojstva geopolimera. Probne mješavine pripremljene su za različite razine obradivosti geopolimerne paste na bazi letećeg pepela kako bi se odredili točni udjeli letećeg pepela, natrijevog silikata i natrijevog hidroksida. Dobiveni rezultati prikazani su u tablicama 3 i 4. Leteći pepeo prosijan je kroz sito veličine 45 µm. Otopina NaOH pripremljena je 24 sata prije nego što je korištena za pripremu geopolimera. Granule natrijevog silikata otopljene su u otopini NaOH četiri sata prije dodavanja letećeg pepela, pri čemu je miješanje trajalo tri minute. Omjer natrijevog silikata i NaOH održavan je u rasponu od 0,5 i 0,4, kako bi se pasta od geopolimera i letećeg pepela mogla koristiti za oblaganje krupnozrnatog agregata. Geopolimerna pasta pripremljena je sporim dodavanjem točno određene količine letećeg pepela (FA1) u alkalnu otopinu, nakon čega je provedeno miješanje električnom miješalicom u vremenu od 8 minuta kako bi se postigla odgovarajuća konzistencija, a prema preporukama Temuujin-a i dr. [17]. Geopolimer s FA2 pripremljen je na isti način. Kako je FA2 sadržavao nešto više CaO, vrijeme miješanja potrebno za postizanje tražene konzistencije produženo je na 15 minuta.

2.3.1. Obradivost

Obradivost geopolimerne paste s letećim pepelom ispitana je metodom Marshovog stošca te pomoću uređaja za ispitivanje rasprostiranja prema radu Debabrata Dutta [18]. Marshov stožac je protočni stožac s odnosom širine i visine 2:1 i s radnim obujmom koji ne smije iznositi manje od jedne litre. Sastoji se od stošca širine 152 mm i visine 305 mm, a na vrhu se nalazi cjevčica dužine 50,8 mm i unutarnjeg promjera 4,76 mm. Sito broj 10 pričvršćeno je pri vrhu stošca na polovici njegove širine. Geopolimerna pasta priprema se za razne molarne koncentracije natrijevog hidroksida. Pritom treba paziti da se ne dodaje voda. Geopolimerna pasta ulije se u Marshov stožac te se mjeri vrijeme protoka 240 ml paste u sekundama, i to 30 sekunda nakon pripreme.

U postupku s uređajem za ispitivanje rasprostiranja, kao kalup za prihvat geopolimerne paste upotrebljava se brončani cilindar promjera 6 cm i visine 8 cm. Na stolu za ispitivanje razastiranja, vanjskog promjera 50 cm, nalazi se 50 jednako razmaknutih koncentričnih krugova. Kalup se postavlja točno na sredinu stola za razastiranje i pritom treba paziti da

sredina kalupa odgovara sredini stola. Nakon punjenja kalupa geopolimernom pastom, kalup se podiže vertikalno te dolazi do izlivanja paste. Promjer i područje rasprostiranja mjeri se nakon prestanka tečenja. Rezultati obradivosti geopolimerne paste pripremljene s letećim pepelom tipa FA1 i FA2 prikazani su u tablicama 3. i 4.

Rezultati ispitivanja obradivosti korišteni su pri određivanju odgovarajućeg udjela sastojaka za pripremu geopolimera na bazi letećeg pepela. Ustanovljeno je da se fluidnost geopolimera pripremljenog s obje vrste letećeg pepela smanjuje s povećanjem koncentracije NaOH. Rasprostiranje (mm) se smanjuje s povećanjem molarne koncentracije NaOH, čime geopolimerska pasta postaje tvrda smjesa. Za potrebe daljnjeg istraživanja, odnos natrijevog silikata i natrijevog hidroksida i alkalnog aktivatora prema količini pepela zadržan je na 0,4 za geopolimer na bazi letećeg pepela pripremljen s FA1. Kako bi se održala ista konzistencija za geopolimer na bazi letećeg pepela pripremljen s FA2, vrijednost 0,35 usvojena je kao omjer natrijevog silikata i natrijevog hidroksida, dok je kao omjer između alkalnog aktivatora i letećeg pepela zadržana vrijednost 0,4.

Tablica 3. Obradivost geopolimera s letećim pepelom FA1

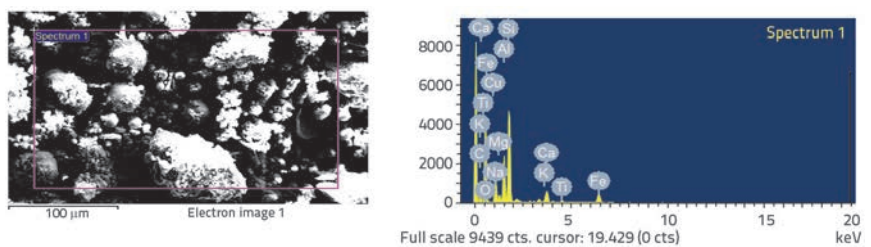
Natrijev silikat/ natrijev hidroksid	Aktivator/ leteći pepeo	Protok na Marshovom stošcu [s]					Rasprostiranje na stolu [mm]				
		8 M	10 M	12 M	14 M	16 M	8 M	10 M	12 M	14 M	16 M
0,5	0,6	394	406	414	506	656	181	175	168	123	114
	0,55	434	447	456	548	688	169	166	157	134	112
	0,5	473	489	497	583	717	162	154	145	127	107
	0,45	523	532	540	611	747	148	141	132	119	98
	0,4	568	577	583	638	769	124	127	116	102	87
0,46	0,6	351	372	381	496	648	209	197	189	153	124
	0,55	398	413	422	540	678	197	188	178	141	120
	0,5	436	455	464	562	684	191	175	165	132	118
	0,45	482	498	507	589	711	179	163	153	126	103
	0,4	496	524	543	597	734	163	148	144	117	85
0,42	0,6	340	348	356	472	612	234	226	223	173	157
	0,55	381	389	397	513	649	221	214	211	167	149
	0,5	420	431	439	540	694	219	201	198	136	132
	0,45	453	474	482	565	707	201	188	187	122	104
	0,4	479	502	503	592	746	189	162	168	112	89
0,4	0,6	292	316	327	357	507	263	248	239	183	169
	0,55	331	357	368	391	530	251	239	227	176	154
	0,5	372	399	410	398	548	246	227	216	169	131
	0,45	418	442	453	414	564	223	214	203	152	125
	0,4	440	456	475	445	589	204	197	191	133	113

Tablica 4. Obradivost geopolimera s letećim pepelom FA2

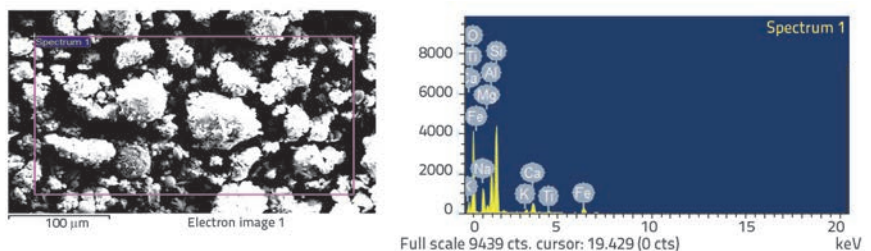
Natrijev silikat/ natrijev hidroksid	Aktivator/ leteći pepeo	Protok na Marshovom stošću [s]			Rasprostriranje na stolu [mm]		
		15 M	22 M	29 M	15 M	22 M	29 M
0,45	0,6	360	384	408	160	143	137
	0,55	388	409	444	149	136	157
	0,5	432	445	473	123	124	145
	0,45	492	507	548	103	99	132
	0,4	518	536	579	94	87	116
0,4	0,6	334	355	385	187	179	159
	0,55	371	386	402	167	157	148
	0,5	418	447	469	151	145	137
	0,45	453	474	493	129	121	117
	0,4	494	512	531	113	107	98
0,35	0,6	289	319	334	213	192	188
	0,55	331	377	364	197	181	171
	0,5	369	399	423	181	173	169
	0,45	398	445	463	167	153	146
	0,4	437	472	490	144	128	114

2.3.2. Analiza SEM

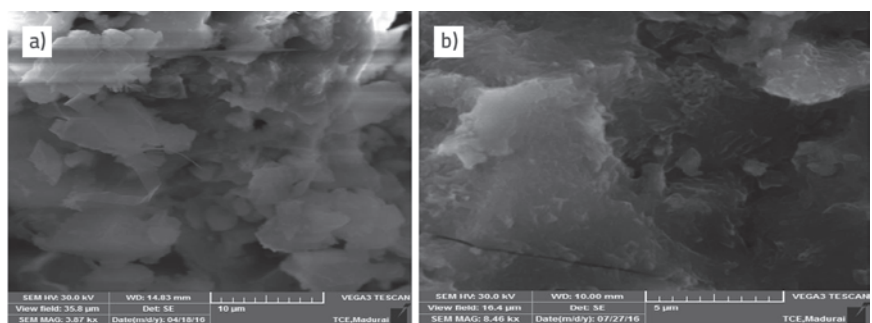
Postupak skeniranja elektronskim mikroskopom (engl. *scanning electron microscopy*, SEM) proveden je kako bi se dobio bolji uvid u morfologiju letećeg pepela i geopolimera na bazi letećeg pepela. Tim se postupkom dobivaju mikroskopske slike visoke rezolucije koje prikazuju razliku područja reakcije i kemijskog sastava. Pokus SEM-EDAX proveden je na uzorcima letećeg pepela i geopolimera na bazi letećeg pepela, koji su pripremljeni u alkalnom mediju natrijevog hidroksida molarne koncentracije 10. Na slikama geopolimera na bazi letećeg pepela (slike 3.a i 3.b) prikazana je mikrostruktura s većim brojem susjednih čestica na kojima nije bilo reakcije ili je reakcija bila djelomična. Osnovni elementi koji se mogu uočiti na EDAX spektrima letećeg pepela su kisik (O), silicij (Si), natrij (Na), kalcij (Ca), aluminij (Al) s tragovima magnezija (Mg), kalija (K), titanija (Ti) i željeza (Fe). Međutim, nisu pronađeni tragovi natrija (Na) i kalija (K). Može se, dakle, zaključiti da natrijevi silikati i natrijev hidroksid potpuno sudjeluju u postupku polimerizacije. Slike SEM uzoraka letećeg pepela FA1 i FA2



Slika 1. a) SEM prikaz FA1; b) EDAX prikaz FA1



Slika 2. a) SEM prikaz FA2; b) EDAX prikaz FA2



Slika 3. a) SEM prikaz geopolimera FA1 (10M); b) SEM prikaz geopolimera FA2 (15M)

prikazane su na slikama 1.a i 2.a. Mikroskopske slike geopolimera na bazi letećeg pepela pripremljene s FA1 i FA2 prikazane su na slikama 3.a i 3.b. SEM mikrografski prikazi pokazuju da količina kalcija uz proizvodnju geopolimernog gela uvjetuje i formiranje kalcijevih silikata (Xueying i dr.) [19].

2.4. Krupnozrnati agregat

Kvaliteta, čvrstoća i trajnost agregata imaju ključnu ulogu pri projektiranju bitumenskih mješavina. Tim se svojstvima na minimum svodi dezintegracija, tj. propadanje materijala, a s druge strane maksimalno se povećava stabilnost zbijenog materijala. Iako je upotreba lokalnog agregata često ekonomski opravdana, to nije uvijek moguće jer lokalni agregat ponekad ne udovoljava zahtjevima kvalitete koji se postavljaju na agregat za bitumenske mješavine.

Obični (neobloženi) agregat

Lomljeni kamen prikupljen s tri različita kamenoloma granita u blizini grada Madurai na drobilišnom je postrojenju drobljen i frakcioniran na željene veličine, te je upotrijebljen kao krupnozrnati agregat. Prikupljeni materijal zajednički je tretiran kao agregat iz istog nalazišta. Takav lokalni materijal nosi naziv marginalni agregat.

Agregat obložen geopolimerom s letećim pepelom

Do sada su u okviru brojnih istraživanja primjenjivane različite metode za obradu agregata, primjerice kao što su miješanje agregata, impregnacija, oblaganje organskim polimerima i sl. Može se dakle reći da se koncept oblaganja prirodnog agregata već duže vremena primjenjuje u graditeljstvu. Bayomi [20] je predložio koncept oblaganja prirodnog agregata običnim portlandskim cementom, čime je poboljšano prijanjanje bitumenskog veziva uz površinu agregata te je tako povećana čvrstoća bitumenske mješavine i njezina otpornost na deformacije. Kamaruddin i dr. [21] istraživali su asfalt koji sadrži agregat obložen cementom, te su zaključili da tako tretirane mješavine dosežu vrlo visoku razinu krutosti a uz to su i otpornije na deformacije.

Kako su geopolimeri na bazi letećeg pepela dobro poznato alternativno vezivo za cement, u ovom se radu istražuje primjena agregata obloženoga geopolimerom na bazi letećeg pepela u bitumenskim mješavinama. Oblaganje agregata geopolimerom predloženo je zato što je taj materijal dovoljno gust da prekrije površinu agregata, a da pritom ne dođe do prijanjanja na druge čestice i formiranja grudica. Geopolimerna pasta na bazi letećeg pepela pripremljena je na način opisan u poglavlju 2.3 kako bi se postigla konzistencija u skladu sa zahtjevima. Agregat koji se oblaže geopolimerom na bazi letećeg pepela treba biti vruć, jer pri nižim temperaturama geopolimer na bazi letećeg pepela ne prijanja u potpunosti uz površinu agregata. Usvojeno je da minimalna temperatura oblaganja agregata iznosi 140°C. Postupak se treba provesti sa što manje odstupanja kako bi se omogućilo ispravno provođenje naknadnog ispitivanja

agregata. Da bi se osiguralo ravnomjerno oblaganje agregata, upotrijebljena je odgovarajuća miješalica. Tekstura neobloženog i obloženog drobljenog agregata prikazana je na slici 4.



Slika 4. Neobloženi agregat i agregat obložen geopolimerom na bazi letećeg pepela

Fizikalna i mehanička svojstva agregata ispitana su na drobljenom bijelom granitnom agregatu obloženom od geopolimera na bazi letećeg pepela ili bez te obloge. Za oblaganje agregata korišten je geopolimer s FA1 molarne koncentracije NaOH od 10M, te geopolimer s FA2 molarne koncentracije NaOH od 15M. U istraživanju se koriste oznake CA-FA1 i CA-FA2 za označavanje agregata obloženog geopolimerom na bazi letećeg pepela tipa FA1 odnosno tipa FA2. Za ocjenu pogodnosti tako tretiranog agregata za korištenje u kolničkim konstrukcijama primijenjeni su uvjeti koje je propisalo Ministarstvo za cestovni prijevoz i autoceste (MoRTH, Indija, 2004.).

2.4.1. Fizikalna svojstva

Za projektiranje bitumenskih mješavina značajna su sljedeća svojstva: gustoća, upijanje vode te oblik i veličina zrna. Ispitivanja tih svojstava provedena su prema normi IS 2386. Kod agregata obloženog geopolimerom na bazi letećeg pepela utvrđene su više vrijednosti gustoće. Iz tablice 5. vidimo da kod obloženih materijala nema bitne promjene upijanja vode i kombiniranog indeksa. Tome je vjerojatno razlog prisutnost CaO i veliki broj čestica koje nisu izreagirale u geopolimeru ali, kako su vrijednosti unutar zadanih granica, agregat se ipak smatra povoljnim za korištenje u cestogradnji.

Tablica 5. Fizikalna svojstva agregata

Ispitivanje	Neobloženi agregat	CA- FA1 (10M)	CA- FA2 (15M)	Norma	Uvjeti MoRTH
Gustoća	2,59	2,62	2,64	IS 2386 Part III	2,5-3,0
Upijanje vode [%]	0,71	0,55	0,61	IS 2386 Part III	max 2
Kombinirani indeks [%]	22,34	22,76	22,81	IS 2386 Part I	max 35

Tablica 6. Mehanička svojstva agregata

Ispitivanje	Neobloženi agregat	CA- FA1 (10M)	CA- FA2 (15M)	Norma	Uvjeti MoRTH
Otpornost na udar [%]	33,31	23,38	23,55	IS 2386 Part IV	maks. 24
Otpornost na drobljenje [%]	32,00	25,43	22,45	IS 2386 Part IV	maks. 24
Otpornost na predrobljivanje (Los Angeles) [%]	32,25	33,77	33,75	IS 2386 Part IV	maks. 30
Otpornost na ljuštenje	Više od 95			IS 6241	Minimalna vrijednost sačuvane obloge 95

2.4.2. Mehanička svojstva

Ispitana je otpornost na drobljenje, otpornost na udar te otpornost na predrobljivanje (metoda Los Angeles) kako bi se odredila mehanička otpornost agregata. Rezultati tih ispitivanja prikazani su u tablici 6. Komparativno bolji rezultati postignuti su za agregate obložene geopolimerom pripremljenim s letećim pepelom FA2. Tome je možda razlog veći udio CaO i formiranje kalcijevih silikata te prodiranje u pore agregata, u skladu s istraživanjima Temuujina i dr. [17].

2.5. Vezivo

Bitumen klase VG10 korišten je kao vezivni materijal. Ispitana su njegova fizikalna svojstva i utvrđeno je da to vezivo udovoljava zahtjevima norme IS: 73-2006. Svojstva bitumena prikazana su u tablici 7.

Tablica 7. Svojstva veziva

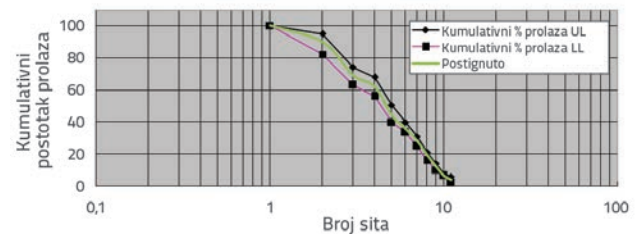
Svojstvo	Vrijednost
Penetracija pri 25°C (1/10 mm, standardni penetrometar)	86
Točka razmekšanja (metoda prstena i kuglice) [°C]	40
Duktilnost pri 27°C [cm]	> 100
Gustoća	1,05
Viskoznost (Brookfieldov viskozimetar), 135°C [N/mm ²]	0,533

3. Granulometrija agregata i projektiranje mješavina

3.1. Granulometrija agregata

Granulometrija agregata je najznačajniji parametar koji izravno i značajno utječe na svojstva bitumenskih mješavina. Istraživanja koja su proveli Y.R. Kim i dr. [22] pokazuju da se bolja otpornost na pojavu kolotruga postiže primjenom granulometrije s dominacijom u srednjem

rasponu vrijednosti. K. Kantha Kumar i A. Veeraragavan [23] smatraju da je za bitumenske mješavine najpogodnija gornja granulometrijska krivulja u području iznad tri četvrtine prikaza, i to zato što se time osigurava maksimalna otpornost na zamor. Drobljeni granitni materijal dopremljen iz kamenoloma usitnjen je u frakcije od 25 mm, 12 mm, 10 mm i 6 mm, a punilo je proizvedeno u drobilišnom postrojenju. Sijanjem je postignuta granulometrija koja odgovara uvjetima MoRTH-a za bitumenske mješavine klase I (BC). Granulometrija agregata usvojena u ovom istraživanju prikazana je na slici 5.



Slika 5. Granulometrija agregata za bitumenske mješavine klase I

3.2. Projektiranje mješavina Marshallovom metodom

Cilindrični uzorci promjera 101,6 mm i visine 63,5 mm pripremljeni su za odabrani granulometrijski sastav agregata prema ASTM D6926 kako bi se analizirao utjecaj agregata obloženih geopolimerom na bazi letećeg pepela u izradi bitumenskih mješavina. U istraživanju je primijenjena Marshallova metoda koja se preporučuje u indijskim tehničkim uvjetima za projektiranje bitumenskih mješavina te u tehničkim uvjetima MoRTH-a (Indijska vlada, 2004.). Tri vrste bitumenskih mješavina za BC klasu I pripremljene su i ispitane u skladu s Marshallovom metodom:

- BC mješavina tipa I s neobloženim (običnim) agregatom,
- BC mješavina tipa II s agregatom obloženim geopolimerom na bazi letećeg pepela FA1,
- BC mješavina tipa III s agregatom obloženim geopolimerom na bazi letećeg pepela FA2.

Za pripremu mješavina tipa II i tipa III obloženi je agregat pripremljen prema postupku objašnjenom u poglavljima 2.3. i 2.4.

Obloženi je agregat pomiješan s vrućim bitumenom (zagrijanim na temperaturu od 160°C). Temperatura je održavana u rasponu od 150 do 160°C, uzorci su se razlikovali po količini bitumena, a svaka stranica uzorka opterećena je sa 75 udaraca. Temperatura zbijanja varirala je od 95 do 110°C. Na cilindričnim je uzorcima zatim provedeno ispitivanje Marshallove stabilnosti i tečenja prema normi ASTM D6927. Maksimalna vrijednost opterećenja pri slomu zabilježena je uz opterećenje površine uzorka ravnomjernom brzinom od 50,8 mm/min. Analiza udjela šupljina provedena je kako bi se odredio optimalan udio bitumena. Kriteriji projektiranja bitumenskih mješavina klase 1, definirani prema uvjetima MoRTH-a, prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Kriteriji za projektiranje bitumenskih mješavina

Kriteriji mješavine (pokusi prema Marshallu)	Granice
Zbijanje (broj udaraca po stranici uzorka)	75
Stabilnost, kN	9
Tečenje, mm	2 do 4
Udio šupljina ispunjenih zrakom	3 do 5
Udio šupljina ispunjenih bitumenom	65 do 75
Udio šupljina u agregatu	min 13

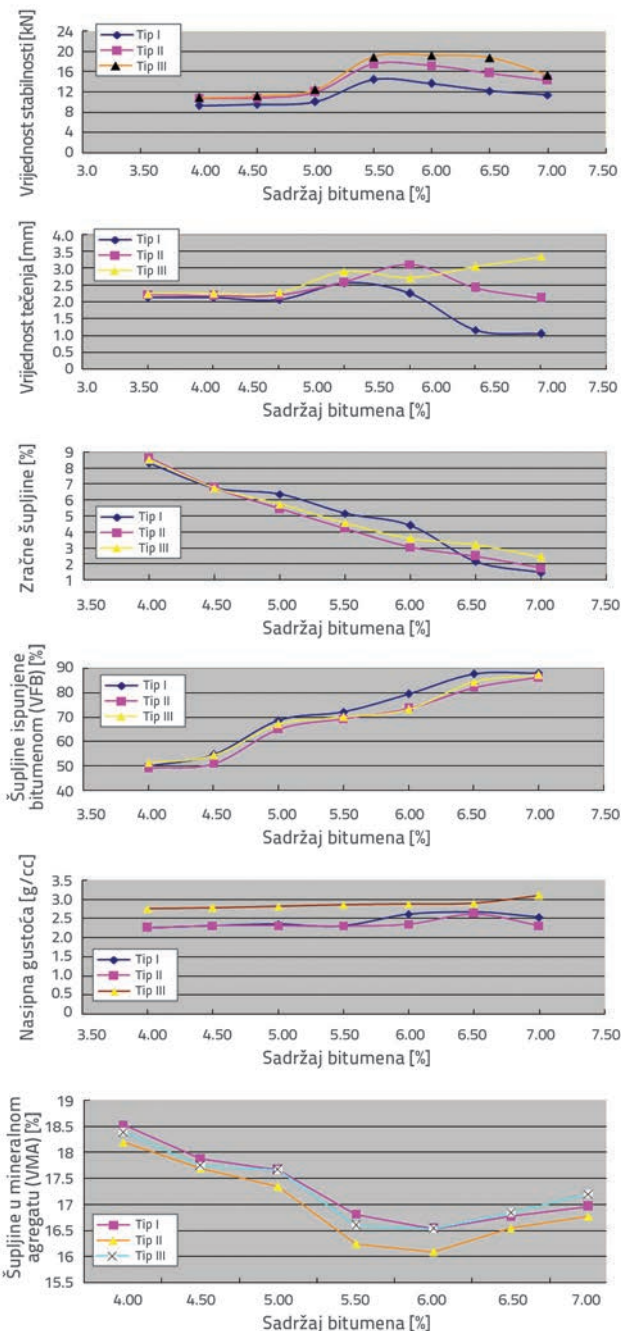
3.3. Optimalni udio bitumena

Udio bitumena tijekom ispitivanja varirao je od 4 do 7 %. Količina bitumena postupno je povećavana od po 0,5 %. Jedini kriterij za projektiranje optimalnog udjela bitumena jest taj da udio šupljina ispunjenih zrakom treba biti u rasponu od 3 do 5 %. Optimalni udio bitumena određen na osnovi toga kriterija, maksimalne gustoće i maksimalne stabilnosti. Utvrđeno je da optimalni udio bitumena odgovara udjelu šupljina ispunjenih zrakom od 4 %. Rezultati ispitivanja bitumenskih mješavina prikazani su na slici 6. Svaka točka predstavlja numeričku srednju vrijednost od tri uzorka.

Gustoća pri maksimalnoj stabilnosti i udjelu šupljina od 4 %, prikazana je na slici 6. Analizom dobivenih rezultata ustanovljeno je da optimalni udio bitumena (OBC) potreban za mješavine tipa I i tipa II iznosi 5,5 % za odabrani granulometrijski sastav agregata. Za mješavinu tipa III kriteriji projektiranja mogu se zadovoljiti uz optimalni udio bitumena od 5,8 %. Razlog tome mogao bi biti veći udio kalcijevog oksida u FA2, što dovodi do formiranja kalcijevih silikata te do upijanja veće količine veziva, kao što navodi i Md. Kamal Hussain u radu [24]. Dobiveni projektirani udio bitumena usvojen je u daljnjoj analizi.

3.4. Ispitivanje osjetljivosti na vlagu

Voda je glavni uzrok preranog oštećenja savitljivih kolničkih konstrukcija. Ispitivanja osjetljivosti bitumenskih mješavina na vlagu provedena su prema normi ASTM D 1075. Ispitivanje je provedeno na uzorcima koji su bili pripremljeni isto kao



Slika 6. Svojstva bitumenskih mješavina

i za Marshallovu metodu, a podijeljeni su po tipovima (I, II i III). Za svaki tip mješavine pripremljeno je šest uzoraka koji su podijeljeni u dvije grupe od po tri uzorka. Uzorci iz grupe I potapaju se u vodu na temperaturi 25°C i ostaju potopljeni 4 sata. Uzorci grupe II potapaju se najprije u vodu temperature 60°C, gdje ostaju 24 sata, a onda u vodu na temperaturi 25°C gdje ostaju 2 sata. Na tim uzorcima provedeno je ispitivanje Marshallove stabilnosti. Vrijednosti Marshallove stabilnosti između te dvije grupe su uspoređene, te je određen indeks zadržane čvrstoće. Rezultati su prikazani u tablici 9. Zadržana

stabilnost pri optimalnom udjelu veziva iznosila je više od 85 % za bitumenske mješavine tipa II i III, što je indikator otpornosti na djelovanje vode.

Tablica 9. Vrijednost zadržane stabilnosti

Udio bitumena [%]	Bitumenska mješavina	Vrijednost stabilnosti [kN]		Indeks zadržane čvrstoće
		Grupa I	Grupa II	
5,5	Tip I	14,26	10,45	0,73
5,5	Tip II	16,78	14,37	0,86
5,8	Tip III	19,12	17,45	0,91

4. Ispitivanja bitumenskih mješavina i rezultati

Osnovna laboratorijska ispitivanja bitumenskih mješavina uključuju indirektno vlačno ispitivanje, ispitivanje opetovanim opterećenjem i ispitivanje reometrom s dinamičnim smicanjem. Indirektnim vlačnim ispitivanjem dobivamo podatke o vlačnoj čvrstoći materijala kolničke konstrukcije. Ispitivanja opetovanim opterećenjem provedena su kako bi se odredilo djelovanje agregata obloženog geopolimerom na bazi letećeg pepela u bitumenskim mješavinama na karakteristike zamora materijala te trajne deformacije. Ispitivanje reometrom s dinamičkim smicanjem provedeno je kako bi se stekao bolji uvid u promjene reoloških karakteristika veziva pod utjecajem agregata obloženog geopolimerom na bazi letećeg pepela.

4.1. Indirektno vlačno ispitivanje

Viša vlačna čvrstoća znak je bolje otpornosti materijala na pojavu pukotina pri niskim temperaturama, Huang i dr. [25]. Vlačne karakteristike bitumenskih mješavina određene su nanošenjem opterećenja na Marshallov uzorak uzduž dijametralne ravnine s konstantnim tlačnim opterećivanjem paralelno te uzduž vertikalne dijametralne ravnine uzorka pomoću dviju nasuprotno postavljenih traka za nanošenje opterećenja. Takvim opterećivanjem postiže se relativno ravnomjerno vlačno naprezanje poprečno na smjer opterećenja te uzduž vertikalne dijametralne ravnine, što u konačnici dovodi

do sloma uzorka razdvajanjem po vertikalnom promjeru. Za uzorak promjera 101 mm korištena je traka za nanošenje opterećenja širine 13 mm kako bi se osiguralo ravnomjerno opterećenje, odnosno ravnomjerna raspodjela naprezanja. Indirektna statička vlačna čvrstoća određena je primjenom postupka u skladu s normom ASTM D 6931. Usvojena je brzina opterećenja od 51 mm/min. Oprema za ispitivanje i slom uzorka prikazani su na slici 7.



Slika 7. Indirektno vlačno ispitivanje

Zabilježeno je najveće opterećenje pri kojem dolazi do sloma uzorka. Maksimalno opterećenje je podijeljeno s odgovarajućim geometrijskim faktorima kako bi se na temelju sljedeće jednadžbe dobila vlačna čvrstoća pri lomu:

Tablica 10. Indirektna vlačna čvrstoća

Udio bitumena [%]	Bitumenska mješavina	Indirektna vlačna čvrstoća (neobloženi agregat) [kPa]	Horizontalna deformacija [%]	Indirektna vlačna čvrstoća (obloženi agregat) [kPa]	Horizontalna deformacija [%]	Omjer vlačne čvrstoće
5,5	Tip I	662,4	6,2	433,2	4,3	0,65
5,5	Tip II	792,7	8,6	643,5	5,4	0,81
5,8	Tip III	864,6	9,4	739,6	6,2	0,86

- S_t - 2000P/πtD
 P - maksimalno opterećenje [N]
 t - visina uzorka neposredno prije ispitivanja [mm]
 D - promjer uzorka [mm]

Uzorcima su pripremljeni na način opisan u poglavlju 3.2. Ispitivanja su provedena pri temperaturi od 25°C, a opterećenje je nanošeno do sloma uz stopu deformacije od 50,8 mm/min. Horizontalna deformacija pri slomu zabilježena je uređajem LVDT za razne mješavine bitumenskog betona. Vlačna deformacija pri slomu određena je pomoću indirektnog vlačnog ispitivanja. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 10. Općenito se može zaključiti da su se mješavine pripremljene s agregatima obloženima geopolimerom na bazi letećeg pepela bolje ponašale i imale viši omjer vlačne čvrstoće. Visoka vrijednost vlačne deformacije pokazuje veću otpornost na pojavu pukotina pri niskim temperaturama. U usporedbi s uobičajenim mješavinama s neobloženim agregatima, mješavine tipa II i tipa III imale su više vrijednosti vlačne deformacije, što potvrđuje veću otpornost na pojavu pukotina.

4.2. Ispitivanje opetovanim opterećivanjem

U okviru ovog ispitivanja provedeno je indirektno vlačno ispitivanje s opetovanim opterećenjem pri temperaturi od 25°C kako bi se odredio rezilijentni modul i otpornost na zamor projektiranih bitumenskih mješavina. Ispitivanje je odabrano jer se jednostavno može provesti na Marshallovim uzorcima. Mnogi istraživači primjenjuju tu ispitnu metodu za određivanje otpornosti bitumenskih mješavina na zamor. Rad [26] navodi da rezultati ispitivanja opetovanim opterećenjem mnogo bolje pokazuju stvarno trajanje kolnika negoli statička ispitivanja puzanja. Shivangi Gupta i A. Veeraragavan [27] koristili su to ispitivanje kako bi istražili otpornosti na zamor bitumenskih mješavina modificiranih pomoću SBS-a (stiren-butadien-stirena).

Za ispitivanje je korištena oprema Državnog instituta za tehnologiju u indijskom gradu Tiruchirappalliju, slika 8. U okviru tog ispitivanja – sa zadanom veličinom sile i trajanjem pokusa – dijametralno je na valjkaste uzorke nanešano opetovano opterećenje pomoću osobnog računala. Opterećenje od 1,40, 1,60 i 2 kN nanešeno je u vremenu od 0,1 s odmorom od 0,9 s. Ispitivanje završava slomom uzorka. Kumulativna trajna deformacija izražena u funkciji broja ciklusa opterećenja može se povezati s potencijalom pojave kolotruga. Pripremljeno je ukupno devet valjkastih Marshallovih uzoraka, po tri za svaki tip mješavine, kao što je i naznačeno u odjeljku 3.2 Uzorcima su ispitani kako bi se odredili parametri zamora. Poissonov koeficijent i rezilijentni modul izračunani su pomoću izraza koje su predložili Mohammad i Paou [28]. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 11.

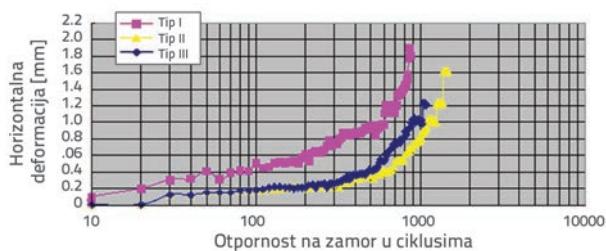


Slika 8. Repeated load test

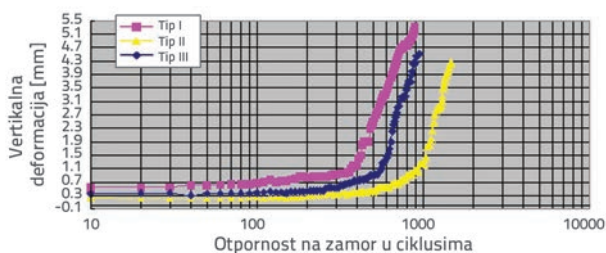
Tablica 11. Repeated load results

Opterećenje [kN]	Prosječni rezilijentni modul [MPa]	Otpornost na zamor (broj ciklusa)	Početna vlačna deformacija (mikrodeformacija)
Mješavina tipa I			
1,4	44,47	952	127
1,6	50,82	814	135
2	63,53	238	157
Mješavina tipa II			
1,4	51,41	1313	91
1,6	67,21	900	112
2	73,33	334	127
Mješavina tipa III			
1,4	71,4	1521	53
1,6	83	1112	77
2	92	540	95

Rezultati ispitivanja zamora upućuju na veće vrijednosti rezilijentnog modula mješavina tipa II i III s agregatom obavijenim geopolimerom na bazi letećeg pepela, u odnosu na mješavinu tipa I s neobavijenim agregatom. Povećanje vrijednosti rezilijentnog modula iznosi oko 15,6 % za mješavine tipa II. Mješavine tipa III, pripremljene upotrebom FA2 koji ima veći udio kalcijevog oksida, imaju porast rezilijentnog modula od 38,8 % u odnosu na mješavinu tipa I. Na slikama 9. i 10. možemo vidjeti da bitumenske mješavine s agregatom obavijenim geopolimerom na bazi letećeg pepela imaju bolju otpornost na trajne deformacije. Može se uočiti da se sva tri tipa mješavina ispitanih na trajne deformacije isto ponašaju do sloma, iako je kod mješavina tipa II i III uočena bolja otpornost na kumulativnu horizontalnu i vertikalnu deformaciju u funkciji broja ciklusa, a to upućuje na veću otpornost na pojavu kolotraga.



Slika 9. Odnos između horizontalne deformacije i broja ciklusa za 1,4 kN



Slika 10. Odnos između vertikalne deformacije i broja ciklusa za 1,4 kN

4.3. Ispitivanje rometrom s dinamičkim smicanjem

Mehanička svojstva bitumenskih mješavina izravno ovise o svojstvima veziva. Bitumeni su termoplastični materijali koji su elastični pri radnim temperaturama, krte pri niskim temperaturama, a se pri višim temperaturama ponašaju se kao fluidi i imaju sposobnost tečenja. Pri umjerenim temperaturama oni se ponašaju viskoelastično. Ovo osnovno reološko svojstvo treba se ispitati za primjenu veziva u bitumenskim mješavinama. Reometar s dinamičkim smicanjem (engl. *Dynamic Shear Rheometer, DSR*) uređaj je koji se može koristiti za određivanje reoloških svojstava veziva u visokom rasponu temperatura i uvjetima opterećenja.

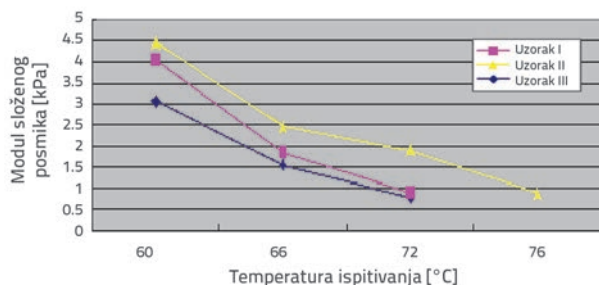
Ispitivanje u okviru ovog istraživanja provedeno je prema normi AASHTO T315 kako bi se stekle dodatne spoznaje o prianjanju geopolimera na bazi letećeg pepela na površinu agregata. Bitumen korišten za mješavinu tipa I tretiran je kao čisti bitumen (uzorak 1). Bitumen je izdvojen iz mješavine tipa II (uzorak 2) i mješavine tipa III (uzorak 3) prema indijskoj normi IRC SP11-1998. Bitumensku mješavinu trebalo je više puta prati i filtrirati s otapalima (benzen) u uređaju za izdvajanje bitumena. Zatim je bitumen izdvojen destilacijskom metodom Abson prema normi ASTM D1856. Prema toj metodi, otopina bitumena i benzena se zagrijava dok sav benzen ne ispari, nakon čega se bitumen skuplja u posudi pomoću kondenzatora.

U ovom je istraživanju ocijenjeno ponašanje bitumena određivanjem vrijednosti DSR pri visokim temperaturama, a u ispitivanju je korišten razmak od 0,124 mm te stožasta pločica promjera 25 mm. Tanki uzorak bitumena smješten je između dvije pločice, od kojih je donja nepomična. Gornja pločica oscilira naprijed-natrag po uzorku, brzinom od 10 radijana u sekundi simulirajući smicanje. Na svakom uzorku veziva izmjeren je kompleksni posmični modul (G^*) i fazni kut (δ), i to počevši od temperature 60 °C pa do sloma uzorka. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja reometrom s dinamičkim smicanjem

Uzorak	Temperatura [°C]	Posmično naprezanje [kPa]	Deformacija [%]	Kut faznog pomaka	$G^*/\sin\delta$ [kPa]	$G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]	Napomene
Uzorak 1	60	0,28398	11,98	86,78	3,063	3,057	Uzorak je prošao ispitnu temperaturu od 69,8 °C, a popustio je kod 72 °C
	66	0,18542	11,99	88,06	1,547	1,545	
	72	0,09249	11,98	88,21	0,772	0,772	
Uzorak 2	60	0,48798	11,98	86,97	4,097	4,068	Uzorak je prošao ispitnu temperaturu od 71,1 °C, a popustio je kod 72 °C
	66	0,22098	12	88,08	1,843	1,841	
	72	0,10741	11,99	88,83	0,896	0,896	
Uzorak 3	60	0,54688	12,96	86,98	4,407	4,417	Uzorak je prošao ispitnu temperaturu od 72,3 °C, a popustio je kod 76 °C
	66	0,44087	11,98	88,21	2,464	2,464	
	72	0,32654	11,98	88,21	1,882	1,878	
	76	0,10651	11,99	88,24	0,877	0,877	

Na slici 11. vidimo da je kompleksni posmični modul bitumena izdvojenog iz mješavina tipa II i tipa III viši od odgovarajućeg modula nemodificiranog bitumenskog uzorka iz mješavine tipa I, i to na svim temperaturama na kojima je provedeno ispitivanje. To znači da anorganski geopolimer na bazi letećeg pepela utječe na vezivo. Tijekom analize parametra kolotražnja, $G^*/\text{Sin}\delta$, i parametra zamora, $G^* \cdot \text{Sin}\delta$, utvrđeno je da nema bitnih razlika između uzoraka.



Slika 11. Odnos kompleksnog posmičnog modula i temperature ispitivanja

5. Zaključak

Na temelju rezultata istraživanja, može se zaključiti sljedeće:

- Ako se prirodnom agregatu doda geopolimerska pasta na bazi letećeg pepela, to dovodi do poboljšanja fizikalnih i mehaničkih svojstava marginalnih agregata, što ih čini pogodnima za primjenu u kolničkim konstrukcijama.
- Analiza SEM pokazala je na gusto područje čestica koje su izreagirale u geopolimeru na bazi letećeg pepela, koji je pripremljen s letećim pepelom s višim udjelom kalcijevog oksida.

- Fluidnost geopolimerske paste pripremljene s FA1 i FA2 smanjuje se s povećanjem molarne koncentracije natrijevog hidroksida.
- Geopolimeri pripremljeni s letećim pepelom s višim udjelom kalcija iskazuju više vrijednosti čvrstoće agregata kod bitumenskih mješavina s agregatom obloženim geopolimerom na bazi letećeg pepela.
- Bitumenske mješavine s agregatom obloženim geopolimerom na bazi letećeg pepela otpornije su na trajne deformacije, što bi moglo značiti da su i otpornije na kolotražnje i zamor.
- Rezultati pokusa reometrom s dinamičkim smicanjem na izdvojenom vezivu jasno pokazuju da geopolimer na bazi letećeg pepela utječe na vezivo koje iskazuje više vrijednosti kompleksnog posmičnog modula s porastom temperature ispitivanja u usporedbi s vezivom koje nije bilo modificirano.

Stoga se može sa sigurnošću zaključiti da se geopolimer na bazi letećeg pepela može upotrebljavati za oblaganje prirodnog agregata u svrhu poboljšanja kvalitete agregata. Osim toga, primjena takvog obloženog agregata u bitumenskim mješavinama pridonosi stabilnosti i produžava vijek trajanja tih mješavina, te se može usvojiti i kao mjera za gospodarenjem letećim pepelom.

Zahvala

Autori ovog rada zahvaljuju Centru izvrsnosti u Odjelu za prometnice Državnog instituta za tehnologiju u Tiruchirappalliju u Indiji na financijskoj podršci tijekom ovog istraživanja.

LITERATURA

- [1] World Construction Aggregates, A research study by Freedonia Group, 2007, pp. 4, www.freedoniagroup.com
- [2] Smith, P.: Demand of Aggregates in India, Aggregate Business International, 2013
- [3] Kumar, P., Mehndiratta, H.C., Singh, V.: Use of fly ash in bituminous layer of pavement, Journal of Indian Highways, New Delhi, India, pp. 41-50, 2008
- [4] Sharma, V., Chandra, S., Choudhary, R.: Characterization of Fly ash Bituminous Concrete Mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, 22 (2010) 12, pp. 1209-1216, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000125
- [5] Rahman, M.N., Sobhan, M.A.: Use of Non-Conventional Fillers in Asphalt- Concrete Mixture, International Journal of Innovation and Applied Studies, 3 (2013), pp. 1101-1109.
- [6] Suheibani, A.S.: The Use of fly ash as an asphalt extender in asphalt concrete mixes, Ph.D thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Mich. 1986
- [7] Sobolev, K., Flores, Wasiuddin (Wasi), N.M.: The Use of Fly Ash as Filler in Asphalt Cement: Phase I, Final Report, UWM-WE Energies, pp. 17, 2011
- [8] Solobev, K., Flores, I., Bohler, J.D., Faheem, A., Covi, A.: Application of fly ash in Asphalt Concrete: from Challenges to Opportunities, Review paper, University of Wisconsin-Milwaukee, USA, 2013.
- [9] Sen, T., Mishra, U.: Usage of Industrial Waste Products in Village Road Construction, International Journal of Environmental Science and Development, 1 (2010) 2, pp. 122-126.
- [10] Androjic, I., Kaluder, G., Komljen, M.: Usage of the Fly Ash in Hot Asphalt Mixes, The 28th International Baltic Road Conference held on 26-28 Aug 2013 in Vilnius, Lithuania
- [11] Davidovits, J.: Soft mineralogy and geopolymers, Proceedings of Geopolymer 88 International Conference, The Universite de Technologie, Compiengne, France, 1988
- [12] van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C.: The Characterization of source materials in fly ash based geopolymer, Materials, Letter, 57 (2003), pp. 1272-1280.

- [13] Xu, H., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J.: The activation of C class F- Fly ash and blast furnace slag using geopolymerization, In Eight CANMET/ACI International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, NV, USA, 2009
- [14] Diaz, E.I., Allouche, E.N., Eklund, S.: Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers, *Fuel*, 89 (2010), pp. 992-996.
- [15] Wang, H., Li, H., Yan, F.: Synthesis and mechanical properties of metakaolinite - based geopolymer, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268 (2005) 1-3, pp. 1-6.
- [16] Bakharev, T.: Thermal behaviour of geopolymers prepared using F Fly ash and elevated temperature curing, *Cement Concrete Research Journal*, 36 (2006), pp. 1134-1147.
- [17] Temuujin, J., Riessen, A., van Mackenzie, K.J.D.: Preparation and characterisation of fly ash-based geopolymer mortars, *Construction Building Materials*, 24 (2010), pp. 1906-1910.
- [18] Dutta, D., Chakrabarty, S., Bose, C., Ghosh, S.: Comparative Study of Geopolymer Paste prepared from Different Activators, *Recent Trends in Civil Engineering and Technology*, 2 (2012) 3, pp. 1-10.
- [19] Xueying Li, XinweiMa, Shoujie Zhang, Enzu Zheng.: Mechanical Properties and Microstructure of Class C Fly ash-based Geopolymer Paste and Mortar, *Materials*, 6 (2013), pp. 1485-1495, <http://dx.doi.org/10.3390/ma6041485>, 2013
- [20] Bayomi, F.M.: Development and Analysis of Cement - Coated Aggregates for Asphalt Mixtures - Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance' American Society for Testing and Materials, pp. 19-34, 1992
- [21] Kamaruddin, I., Napiah, M.: Effect of Cement coated aggregates on the creep and deformation characteristics of asphaltic concrete bituminous mixtures, *WIT Transactions on The Built Environment*, 128 (2012), pp. 661-670.
- [22] Kim, Y.R., Yim, N., Khosla, N.P.: Effect of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete, *ASTM STP 1147* (1992), pp. 310-328, <http://dx.doi.org/10.1520/STP24225S> 1992
- [23] Kantha Kumar, K., Veeraragavan, A.: Optimizing the Bituminous Concrete Mixes for Fatigue Performance, *The open Construction Building Technology Journal*, 2 (2008), pp. 53-58.
- [24] Md. Kamal, H., Ullah, F.: Laboratory Evaluation of Lime Modified Asphalt Concrete mixes with respective to Moisture Susceptibility *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 11 (2011) 54, pp. 45-52.
- [25] Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., Egan, B. K.: Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record 1929*, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 37-45, 2005, <https://doi.org/10.3141/1929-05>
- [26] Read, J.M.: Fatigue cracking of Bituminous Paving Mixtures', Ph.D Thesis, University of Nottingham, Department of Civil Engineering, 1996
- [27] Gupta, S., Veeraragavan, A.: Fatigue Behaviour of Polymer Modified Bituminous Concrete Mixtures, *Journal of Indian Road Congress*, 548 (2009), pp. 58-64.
- [28] Mohammad, L.N., Paul, H.R.: Evaluation of Indirect Tensile Test for Determining Structural Properties of Asphalt Mix' *Transportation Research Board*, 1417 (1993), pp. 58-63, <http://www.trb.org/Publications/Pages/262.aspx>, 1993
- [29] Ministry of Road Transport and Highways (Fourth Revision, 2004), Specifications for Road and Bridge works, published by Indian Road Congress on behalf of Government of India
- [30] ASTM D 6926 Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus.
- [31] ASTM D6927 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures
- [32] ASTM D1075 Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures.
- [33] ASTM D6931 Indirect Tensile Strength of Bituminous Mixtures