

Primljen / Received: 14.3.2018.

Ispravljen / Corrected: 29.11.2018.

Prihvaćen / Accepted: 10.3.2019.

Dostupno online / Available online: 10.7.2022.

Otpadni boksit - održivo punilo za asfaltne mješavine

Autori:



Doc.dr.sc. **Jayvant Choudhary**, dipl.ing.građ.
Institut za tehnologiju i znanost Madhav
Gwalior, Indija
Odjel za građevinarstvo
Jayvant.Choudhary@mitsgwalior.in



Prof.dr.sc. **Brind Kumar**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Banaras Hindu, Varanasi, Indija
Indijski tehnološki institut
Odjel za građevinarstvo
kumar_brind.civ@iitbhu.ac.in



Izv.prof.dr.sc. **Ankit Gupta**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Banaras Hindu, Varanasi, Indija
Indijski tehnološki institut
Odjel za građevinarstvo
ankit.civ@iitbhu.ac.in; anki_ce11@yahoo.co.in
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Jayvant Choudhary, Brind Kumar, Ankit Gupta

Otpadni boksit - održivo punilo za asfaltne mješavine

Otpadni boksit ili crveni mulj koristi se u mješavinama od asfaltbetona kao zamjensko punilo umjesto kamenog brašna. Projektirane su asfaltne mješavine s oba punila i ocijenjena je njihova čvrstoća, volumetrijska svojstva i ponašanje u raznim okolnostima (pojava kolotruga, pojava pukotina, dugotrajno starenje i osjetljivost na vlagu). Mješavine s crvenim muljem odlikuju se višim vrijednostima stabilnosti prema Marshallu i otpornije su na pojavu kolotruga i pojavu pukotina zbog mineralogije i finoće crvenog mulja. Alkalna i hidrofobna svojstva crvenog mulja omogućila su postizanje zadovoljavajuće otpornosti mješavine na vlagu. Međutim, mješavine s crvenim muljem imale su viši optimalni udio veziva i manju otpornost na dugoročno starenje, što se pripisuje poroznosti crvenog mulja.

Ključne riječi:

korištenje otpada, punilo, crveni mulj, asfaltbeton, održivost

Research Paper

Jayvant Choudhary, Brind Kumar, Ankit Gupta

Bauxite Residue: A viable filler for asphalt mix

Bauxite residue or red mud is used as surrogate filler for stone dust in asphalt concrete mixes. Asphalt mixes with both fillers were designed and strength, volumetric properties, and performance against various distresses (rutting, cracking, long-term aging, and moisture susceptibility) were assessed. Red mud mixes displayed higher Marshall stability and resistances against rutting and cracking due to mineralogy and fineness of red mud. Alkaline and hydrophobic nature of red mud produced satisfactory moisture resistant mix. However, red mud mixes had higher optimum binder content and lower long-term aging resistance which was attributed to porous nature of red mud.

Key words:

waste utilization, filler, red mud, asphalt concrete, sustainability

1. Uvod

Mješavine od asfaltbetona ubrajaju se među površinske slojeve koji se danas najčešće primjenjuju u globalnoj mreži savitljivih kolnika. Te se mješavine uglavnom sastoje od agregata (krupnozrnatih i sitnozrnatih), punila i bitumenskog veziva. Agregati raznih veličina čine kostur koji pruža otpor prometnom opterećenju, a bitumen djeluje kao vezivo koje povezuje zrna agregata. Punilo se može definirati kao najsitniji agregat koji prolazi kroz sito određene veličine (0,075 mm u SAD-u i Indiji tj. 0,063 mm u Europi) [1].

Čestice punila imaju dvojak ulogu u asfaltnim mješavinama. Krupnije čestice punila najčešće služe kao inertni materijal kojim se zapunjava prostor između većih zrna agregata u mješavinama, a istovremeno se povećava gustoća i nepropusnost mješavine. S druge strane, čestice punila sitnije od bitumenskog premaza imaju aktivnu ulogu u promjeni viskoznosti i konzistenciji smjese bitumena i punila [2]. Takvo djelovanje utječe na karakteristike asfaltnih mješavina u pogledu pojave kolotruga, otpornosti na zamor, pukotina pri niskim temperaturama, starenja i osjetljivosti na vlagu [2]. Neodgovarajuća krutost unutar smjese također može dovesti do ocjeđivanja tijekom prijevoza mješavine, a vrlo krute mješavine koje tako nastaju teško se mogu obrađivati i zbijati [3]. Utjecaj punila na učinkovitost bitumenskog veziva i mješavina ovisi o fizikalnim (oblik zrna, veličina, tekstura, raspodjela veličina zrna, poroznost itd.) i kemijskim svojstvima punila (mineralogija, količina gline itd.) te o fizikalno-kemijskoj interakciji s bitumenom [2-4]. Stoga je izbor optimalne kvalitete i količine punila itekako značajan za kvalitetno projektiranje vruće asfaltnih mješavina. Zbog ekoloških razloga i znatnog porasta cijene novih mješavina, istraživači u novije vrijeme pokušavaju koristiti razne otpadne i uporabive materijale kao punila u asfaltnim mješavinama. Otpadni materijali kao što ugljeni leteći pepeo, jalovina bakra, granitna prašina, mramorna prašina, otpadno staklo, ciglena prašina i pepeo kanalizacijskog mulja, uspješno se koriste kao punila u raznim asfaltnim mješavinama [5-9].

Otpadni boksit također poznat kao „crveni mulj“ zapravo je nusproizvod koji nastaje tijekom proizvodnje glinice kaustičnim izluživanjem boksita Bayerovom postupku. Crveni mulj je mješavina minerala koji su se prvobitno nalazili u boksitu, a formira se tijekom Bayerovog ciklusa. Crveni se mulj odvaja u obliku alkalne isplake visoke ionske čvrstoće. Svake se godine proizvede više od 145 milijuna tona crvenog mulja, od čega četiri milijuna tona samo u Indiji [10]. Odlaganje crvenog mulja u bazene i na odlagališta može dovesti do zagađivanja podzemnih voda zbog izluživanja teških metala. Posljednjih desetljeća provedena su brojna istraživanja kako bi se omogućilo korištenje većih količina crvenog mulja za razne namjene [10, 11]. Međutim, niti u jednom od tih istraživanja nije detaljno ispitano korištenje crvenog mulja u asfaltnim mješavinama, a naročito nije njegova primjena kao punila. U jednoj novijoj studiji ispitana je otpornost na pojavu kolotruga za asfaltnih mješavina u kojima se kao punilo koristio crveni mulj i kameno brašno [12]. Pokazalo se da je asfaltna mješavina s crvenim muljem otpornija na trajne deformacije zbog relativno manje specifične površine crvenog mulja, pa je u konačnici smanjena potrebna količina bitumena u mješavini i ograničena toplinska osjetljivost. Osim toga, utvrđeno je da i sitne čestice crvenog mulja (čestice sitnije od 20 μm) utječu na svojstva bitumena, što također doprinosi poboljšanju otpornosti mješavina na pojavu kolotruga [12]. Unatoč tako opsežnim istraživanjima, za sada se nigdje u svijetu ne bilježi značajnija upotreba crvenog mulja. U ovom se radu istražuje primjena crvenog mulja kao mineralnog punila u asfaltbetonu koji se u Indiji najčešće koristi za izradu habajućih slojeva. Ovaj rad je pokušaj karakterizacije i istraživanja pogodnosti primjene crvenog mulja kao mineralnog punila u asfaltnim mješavinama koje se projektiraju Marshallovom metodom. Svojstva mješavina koje sadrže oba punila ocjenjuju se ispitivanjem njihovih osnovnih karakteristika i provođenjem raznih laboratorijskih ispitivanja, i to s najmanje tri uzorka za svako ispitivanje kako bi se zadovoljio kriterij ponovljivosti standardnih vrsta ispitivanja.

Tablica 1. Svojstva agregata i bitumena VG-30

Materijal	Karakteristike	Vrijednosti	Norma
Agregat	Zapreminska težina krupnozrnatog agregata [g/cm^3]	2,736	ASTM C127-15 [13]
	Prividna specifična težina krupnozrnatog agregata [g/cm^3]	2,810	ASTM C127-15 [13]
	Zapreminska težina sitnozrnatog agregata [g/cm^3]	2,694	ASTM C128-15 [14]
	Prividna specifična težina sitnozrnatog agregata [g/cm^3]	2,739	ASTM C128-15 [14]
	Otpornost agregata na udar [%]	13,4	IS:2386 (Part IV) [15]
	Otpornost na habanje prema metodi Los Angeles [%]	14,7	IS:2386 (Part IV) [15]
	Kombinirani indeks plosnatosti i izduženosti	23,8	IS: 2386 (Part I) [16]
Bitumen	Apsolutna viskoznost pri 60°C, (poise)	2692	IS: 73 [17]
	Penetracija pri 25°C, 100 g, 5 s, (0,1 mm)	62	
	Točka razmekšanja, (uređaj s prstenom i kuglicom) [°C]	51,5	
	Duktilnost pri 27°C (razvlačenje 5 cm/min) [cm]	>100	
	Specifična težina [kg/m^3]	0,999	

Tablica 2. Usvojen granulometrijski sastav mješavine asfaltbetona (klasa II) [1]

Veličina sita [mm]	19	13,2	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Gornja-donja granica [%]	100	90-100	70-88	53-71	42-58	34-48	26-38	18-28	12-20	4-10
Usvojena granulometrija [%]	100	95	79	62	51	41	32	23	14	7

2. Materijali i eksperimentalna istraživanja

2.1. Materijali

2.1.1. Agregati

U ovom se istraživanju koristi drobljeni agregat dolomitskog podrijetla dopremljen s kamenoloma Dalla koji se nalazi u okrugu Sonbhadra (24°41'23"N, 83°3'55"E) indijske savezne države Uttar Pradesh. Agregat je prosijan i opran kako bi se s njegove površine odstranile sitnije čestice. Fizikalna svojstva agregata prikazana su u tablici 1. Mješavina od asfaltbetona (klase II), koja je jedna od najpopularnijih mješavina za asfaltne slojeve, projektirana je u skladu s indijskim normama [1]. Odabrani granulometrijski sastav prikazan je u tablici 2.

2.1.2. Bitumen

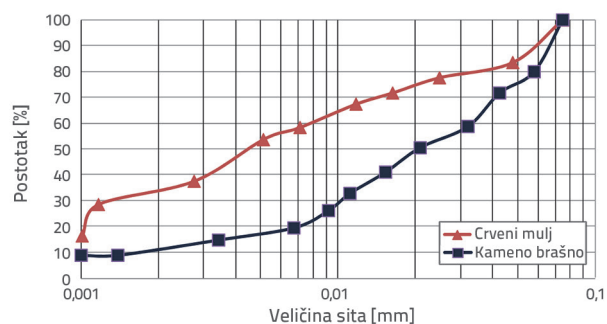
U ovom se istraživanju upotrebljava lokalno dostupan bitumen VG 30 (klasa viskoznosti = 30). Taj se bitumen najčešće koristi u Indiji umjesto bitumena 60/70. Različita svojstva, definirana prema normi IS: 73 [6], prikazana su u tablici 1.

2.1.3. Punilo

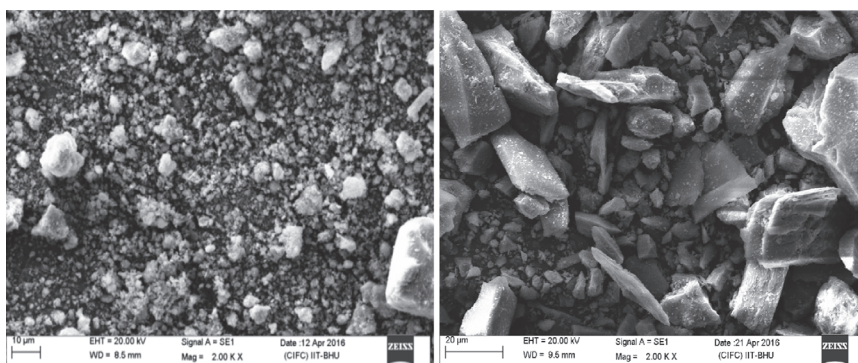
U ovom je radu kao kontrolno punilo korišteno kameno brašno iz kamenoloma Dalla koji se nalazi u pokrajini Sonbhadra (24°41'23"N, 83°3'55"E). Crveni mulj, koji je također korišten u istraživanju, dopremljen je s jalovišta tvrtke Hindustan Aluminium Corporation (Hindalco) čije se postrojenje nalazi u gradu Renukoot (24.2°N, 83.03°E) u indijskoj saveznoj državi Uttar Pradesh. U ovoj je analizi korištena u sušnici osušena frakcija punila koja prolazi kroz sito veličine 0,075 mm.

Fizikalna karakterizacija parametara, kao što su specifična težina i granulometrijski sastav, provedena je pomoću pokusa za određivanje specifične težine [18], tj. granulometrijskom analizom [19]. Proveden je i njemački pokus za punilo [20] kako bi se odredila međuzrnska poroznost ili udio šupljina u oba punila. Radi se o jednostavnom pokusu u kojem se punilo kontinuirano dodaje u malim dozama u 15 g hidrauličkog ulja do točke u kojoj mješavina punila i ulja nije više koherentna. Ukupna količina punila dodanog ulju prije nego što mješavina postane nekoherentna poznata je kao vrijednost njemačkog pokusa za punilo. Porozno punilo ima

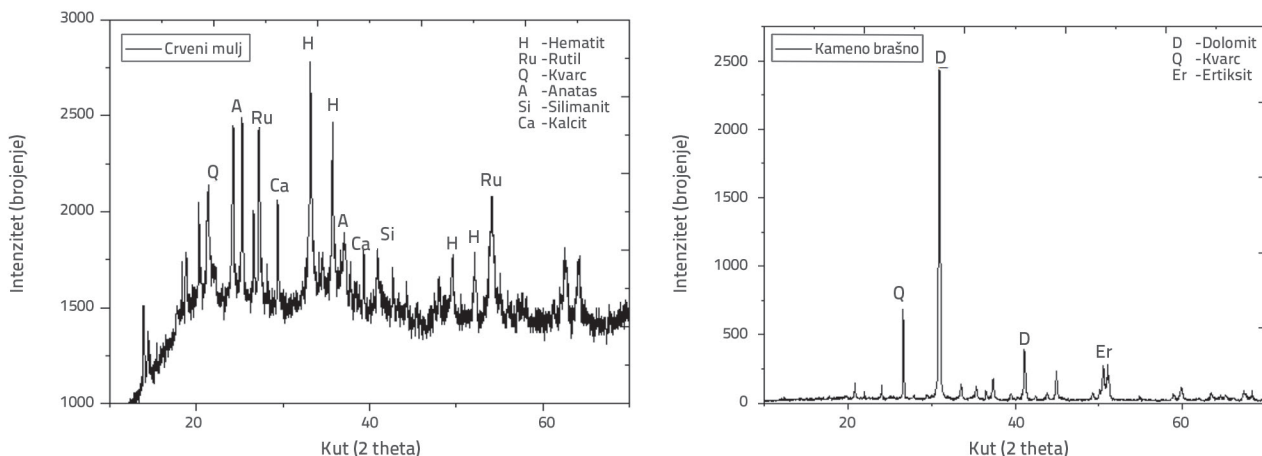
nisku vrijednost njemačkog pokusa za punilo. Štetna količina gline u oba je punila određena pokusom s metilenskim modrilom (eng. *Methylene Blue Value* - MBV) [21]. U ovoj analizi, standardna se vodenasta otopina metilenskog modrila (eng. *Methylene Blue* - MB) kontinuirano dodaje suspenziji punila i vode sve do trenutka kada prestaje apsorpcija modrila. U pokusu MBV određuje se količina MB koja je potrebna da se prekrije čitava površina gline u punilu. Drugim riječima, vrijednost MBV proporcionalna je količini štetne gline sadržane u punilu. Morfološke i mineraloške analize provedene su pomoću elektronskog mikroskopa (SEM) i rendgenske difrakcije (XRD). Osnovne komponente materijala određene su primjenom energijskih razlučujućeg rendgenskog postupka (EDX). Određen je također i afinitet materijala prema bitumenu definiranjem vrijednosti pH i faktora hidrofilnosti [22]. pH vrijednost punila određena je ispitivanjem vrijednosti pH otopine punila i vode pripremljene miješanjem punila i deionizirane vode u težinskom omjeru od 1:9. Punilo s izraženim alkalnim svojstvima pokazuje veći afinitet prema bitumenu. Koeficijent hidrofilnosti dobiva se izračunavanjem omjera obujmova nakon sedimentacije istih obujmova punila u vodi i parafina u vremenu od 72 sata. Punilo koje ima koeficijent hidrofilnosti manji od 1 iskazuje veći afinitet prema bitumenu u odnosu na vodu. Odgovarajući rezultati navedeni su u tablici 3. i na slikama od 1. do 3.



Slika 1. Granulometrijski sastav oba punila



Slika 2. SEM prikazi crvenog mulja (lijevo) i kamenog brašna (desno)



Slika 3. XRD prikazi crvenog mulja (lijevo) i kamenog brašna (desno)

Tablica 3. Karakterizacija čestica punila

Svojstva punila	Crveni mulj	Kameno brašno	Zaključci
Specifična težina	3,12	2,70	Crveni mulj ima veću specifičnu težinu zbog dominacije aluminija i željeza u njegovom sastavu
Vrijednost metilenskog modrila [m/g]	2,875	3,250	Crveni mulj sadrži manje štetne gline po jedinici težine materijala
Vrijednost njemačkog pokusa za punilo [g]	50	85	Crveni mulj ima veću poroznost / udio šupljina po jedinici težine
Modul finoće	3,03	5,38	Može se reći da je crveni mulj sitnozrnatije punilo u odnosu na kameno brašno
Koeficijent jednolikosti (Coefficient of Uniformity - Cu)	12,37	17,89	Kameno brašno ima relativno dobro graduirane čestice
Oblik i tekstura čestica (SEM)	Male čestice konglomeratnog materijala izrazito hrapave teksture	Oštrobridne čestice glatke do hrapave teksture	Sitne čestice i hrapava tekstura crvenog mulja mogu uzrokovati povećanu apsorpciju bitumena
Sastojci primarnih elemenata (EDX)	Željezo, natrij, ugljik, aluminij, silicij, titan, kisik, kalcij,	Kalcij, magnezij, silicij, kisik, ugljik, natrij, željezo, aluminij	Osnovni sastojci crvenog mulja su željezo, silicij i aluminij koji su prisutni u obliku svojih oksida, Crveni mulj također sadrži i male količine oksida titana te u tragovima i razne okside ostalih teških metala
Osnovni mineraloški sastav (XRD)	Hematit (Fe ₂ O ₃), rutil (TiO ₂), kvarc (SiO ₂), anatas (TiO ₂), silimanit (Al ₂ SiO ₅), kalcit (CaCO ₃)	Dolomit (CaMg(-CO ₃) ₂), kvarc (SiO ₂), ertiksit, (Na ₂ Si ₄ O ₉)	Kameno brašno sadrži dolomit, a radi se o neotopivom mineralu na bazi kalcija koji se dobro veže s bitumenom, Crveni mulj također sadrži kalcit koji omogućuje dobro povezivanje bitumena i agregata, Niti u jednom od ta dva materijala nema ekspanzivne gline, Stoga se može očekivati da su oba materijala dostatno otporna na ljuštenje
Koeficijent hidrofилности	0,85	0,77	Oba materijala su hidrofobna
Vrijednost pH	9,98	12,57	Oba su materijala po svojoj prirodi alkalna te pokazuju dobar afinitet prema bitumenu

2.2. Projektiranje i ispitivanje mješavine od asfaltbetona

2.2.1. Projektiranje mješavine od asfaltbetona

U indijskim se uvjetima za određivanje optimalnog udjela bitumena (eng. *Optimum Asphalt Content* - OAC) u mješavini preporučuje Marshallova metoda za projektiranje asfaltnih mješavina [1]. Za određivanje optimalnog udjela bitumena u mješavini korišten je postupak projektiranja mješavine koji je definiran u MS-2 [23]. Prema tom su postupku pripremljeni uzorci mješavina od asfaltbetona zadanog granulometrijskog sastava (tablica 2.) za pet različitih udjela bitumena (4,5 %, 5 %, 5,5 %, 6,0 % i 6,5 %). Agregat je grijan na temperaturi od 160 do 170 °C u vremenu od 24 sata prije pripremanja mješavine. Nakon toga je bitumen zagrijan na temperaturu od 135 do 140 °C prije miješanja s agregatom. Mješavine su zbijene standardnim Marshallovim čekićem nanošenjem 75 udaraca na svaku stranu. Temperature miješanja i zbijanja obiju mješavina definirane su prema uputama iz norme MS-2 [23]. Za svako je punilo ispitano ukupno 15 uzoraka (po tri za svaki udio bitumena) kako bi se odredila Marshallova stabilnost, tečenje, postotak šupljina u mješavini (eng. *Air Voids* - VA), šupljine između agregata (eng. *Voids in Mineral Aggregates* - VMA) te šupljine ispunjene bitumenom (eng. *Voids Filled with Asphalt* - VFA). Određen je udio asfalta s postotkom šupljina u mješavini od 4 %, te su ostala prije navedena svojstva uspoređena s vrijednostima iz specifikacije. Prema postupku definiranom u Izvješću NCHRP br. 567 [24], izračunana je i prividna debljina premaza (eng. *Apparent Film Thickness* - AFT) pri optimalnom udjelu bitumena. Vrijednost AFT može se izračunati pomoću izraza (1):

$$AFT = \frac{1000VBE}{S_s P_s G_{mb}} \quad (1)$$

gdje je AFT prividna debljina premaza (u mikronima); VBE efektivni udio veziva (postotak od ukupnog obujma mješavine); S_s specifična površina agregata (m^2/kg); P_s udio agregata (postotak od ukupne težine mješavine); G_{mb} zapreminska težina mješavine.

2.2.2. Kvocijent po Marshallu (MQ)

Kvocijent po Marshallu (MQ) je odnos Marshallove stabilnosti (kN) i tečenja (mm) pri optimalnom udjelu bitumena, a primjenjuje se kao pokazatelj u ocjenjivanju trajne deformacije (pojave kolotruga) bitumenskih mješavina. Viša vrijednost MQ pokazuje na veću otpornost materijala na trajne deformacije i posmik, te stoga i na pojavu kolotruga.

2.2.3. Posredna vlačna čvrstoća (ITS)

Vlačna čvrstoća zbijenih bitumenskih mješavina primjenjuje se za ocjenjivanje otpornosti kolnika na pojavu pukotina. Određuje se prema normi ASTM D 6931 [25]. Viša vrijednost

posredne vlačne čvrstoće (eng. *Indirect Tensile Strength* - ITS) pokazuje veću otpornost na zamor i pojavu pukotina pri niskim temperaturama. Za svako su punilo pripremljena tri Marshallova uzorka pri njihovom optimalnom udjelu bitumena, nakon čega su uzorci podijeljeni u dvije skupine. Na svaki je uzorak nanoseno opterećenje po dijametralnoj ravnini uz konstantnu brzinu tlačnog opterećenja (51 mm/min) kroz dvije suprotne linije opterećenja, sve do sloma. Bilježi se vršno opterećenje te se izračunavaju vrijednosti posredne vlačne čvrstoće (ITS) prema izrazu (2):

$$ITS = \frac{2000P}{\pi DT} \quad (2)$$

gdje je ITS posredna vlačna čvrstoća izražena u kPa, P je vršno opterećenje (N), D je promjer uzorka (mm), a T je debljina uzorka (mm).

2.2.4. Zadržana Marshallova stabilnost (RMS)

Osjetljivost na vlagu obiju mješavina određena je pomoću zadržane Marshallove stabilnosti (RMS). Za svako je punilo pripremljeno šest Marshallovih uzoraka pri njihovom optimalnom udjelu bitumena. Uzorci su podijeljeni u dvije grupe. Prva grupa uzoraka (netretirani uzorci) pripremljena je tako da su tretirani 30 minuta u vodi zagrijanoj na 60 °C. Ti su uzorci tlačeni do sloma nanošenjem konstantnog opterećenja brzinom od 51 mm/min i za to su korištene zaobljene čelične ploče za nanošenje opterećenja. Druga grupa uzoraka (tretirani uzorci) uronjena je na 24 sata u vodu zagrijanu na 60 °C. Nakon toga je na uzorke nanoseno opterećenje prema prije opisanom postupku. Vrijednost RMS određena je pomoću srednje stabilnosti svake grupe prema izrazu (3):

$$RMS = \frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \cdot 100 \quad (3)$$

gdje je MS_{uncond} prosječna Marshallova stabilnosti netretiranih uzoraka (kN), a MS_{cond} je prosječna Marshallova stabilnost tretiranih uzoraka (kN).

2.2.5. Ispitivanje adhezije

Gubitak adhezije na kontaktu između bitumena i agregata jedan je od osnovnih mehanizama koji dovode do oštećenja zbog prisutnosti vlage. Mehanizam adhezije može se podijeliti na dva dijela, tj. na aktivnu i pasivnu adheziju.

Aktivna adhezija može opisati kao sposobnost bitumena da potpuno obavije agregat tijekom miješanja vruće asfaltne smjese. Vrijeme miješanja obiju mješavina određeno je s namjerom da se definira utjecaj punila na aktivnu adheziju. Bitumen, agregat i punila zasebno su grijani do temperature od 170 °C te su zatim ručno pomiješani. Izmjereno je ukupno vrijeme (u sekundama) koje je proteklo od trenutka dodavanja bitumena do trenutka postizanja stopostotne obavijenosti [26].

Tablica 4. Prosječni Marshallovi i volumetrijski parametri mješavina pri optimalnom udjelu bitumena

Vrsta mješavine	OAC [%]	Marshallova stabilnost [kN]	Tečenje [mm]	Zapremninska težina [g/cm ³]	VMA [%]	VFA [%]	AFT [μ]
Kameno brašno	5,19	14,36	3,2	2,462	14,79	72,95	5,25
Crveni mulj	5,32	17,38	3,5	2,499	14,83	73,02	5,20
Zahtjev	-	9 (min)	2-4	-	14 (min)	65-75	-

Pasivna adhezija definira se kao sposobnost bitumena da prione uz površinu agregata u prisutnosti vanjskih faktora kao što su cestovni promet i vlaga [27]. Pokus s vrelom vodom proveden je prema normi ASTM D 3625 [28] kako bi se analizirao utjecaj punila na pasivnu adheziju. Rastresit uzorak težine približno 250 g rashlađen je u rasponu temperature između 85 °C do vrelišta vode. Zatim je uzorak na deset minuta ostavljen u posudi s uzavrelom destiliranom vodom. Odvojen je bitumen koji se pojavio na površini, a uzorak je rashlađen do sobne temperature. Zatim je uzorak izvađen iz vode i stavljen na bijeli papirnati ručnik. Tri osobe su vizualno utvrdile stupanj obavijenosti agregata bitumenom. Neodgovarajuća pasivna adhezija može ubrzati razne negativne pojave na kolniku kao što su pojava pukotina, preuranjena pojava kolotruga, krunjenje, stvaranje udarnih jama i znojenje kolnika.

2.2.6. Dugotrajno starenje

Postupak dugotrajnog starenja definiran u Strateškom programu za istraživanje cestovnih prometnica (SHRP) A-003A usvojen je kako bi se simulirao utjecaj otvrdnjavanja u vremenu od deset godina [29]. Za svako je punilo pripremljeno šest Marshallovih uzoraka pri njihovim optimalnim udjelima bitumena, nakon čega su uzorci podijeljeni u dvije grupe. Prosječna Marshallova stabilnost uzoraka iz prve grupe (netretirani uzorci) određena je prema normi ASTM D 1559 [30]. Svi uzorci iz druge grupe tretirani su pet dana u peći pri temperaturi od 85 °C. Nakon tretiranja, uzorci su ispitani prema normi ASTM D 1559 [30] kako bi se odredila Marshallova stabilnost nakon starenja pri temperaturi od 60 °C. Srednji omjer Marshallove stabilnosti (MMSR), koji je omjer između prosječne Marshallove stabilnosti nakon starenja i prije starenja, izračunan je kako bi se analizirao utjecaj punila na otvrdnjavanje tijekom vremena.

3. Analiza rezultata ispitivanja

3.1. Marshallova i volumetrijska analiza

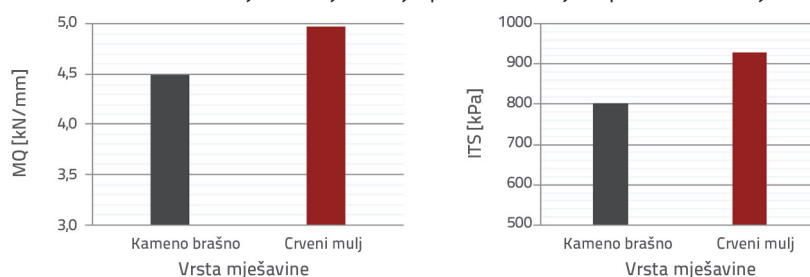
Rezultati Marshallovih i volumetrijskih ispitivanja, ostvareni pri optimalnom udjelu bitumena, prikazani su u tablici 4., gdje je optimalni udio bitumena u mješavini crvenog mulja (5,32 %) veći od istog udjela mješavine kamenog brašna

(5,19 %). To se može pripisati većoj poroznosti crvenog mulja, što se vidi iz niže vrijednosti njemačkog pokusa za punilo (50 gm) u usporedbi s odgovarajućom vrijednosti za kameno brašno (85 gm). Zbog izrazite poroznosti, mješavine crvenog mulja imale su i nešto viši sadržaj šupljina između agregata (VMA) pri optimalnom udjelu bitumena. Time se objašnjavaju viši zahtjevi tih mješavina za postizanjem 4 % šupljina u bitumenu, što je dovelo do povećanja vrijednosti optimalnog udjela bitumena u odnosu na mješavine s kamenim brašnom.

Mješavine s crvenim muljem imaju veću zapremninsku težinu od mješavina s kamenim brašnom, što se može objasniti većom specifičnom težinom crvenog mulja. Stabilnost mješavina crvenog mulja za 21,03 % je veća od stabilnosti mješavina s kamenim brašnom pri optimalnom udjelu bitumena. Takva veća stabilnost mješavina s crvenim muljem objašnjava se njihovim kemijskim sastavom jer se mješavine s crvenim muljem uglavnom sastoje od željeza i aluminija u obliku njihovih oksida. Općenito uzevši, obje mješavine udovoljavaju Marshallovim i volumetrijskim zahtjevima koji su definirani u indijskim normama [1]. Prividna debljina premaza mješavine s crvenim muljem (5,20 μ) nešto je niža od iste vrijednosti mješavine s kamenim brašnom (5,25 μ). Tome je razlog činjenica da se crveni mulj odlikuje većom apsorpcijom bitumena zbog veće poroznosti, što smanjuje efektivni udio veziva u mješavini s crvenim muljem u usporedbi s konvencionalnom mješavinom kamenim brašnom.

3.2. Otpornost na trajne deformacije

Vrijednost kvocijenta po Marshallu (MQ) mješavine s crvenim muljem (4,97 kN/mm) nešto je viša od odgovarajuće vrijednosti mješavine s kamenim brašnom (4,49 kN/mm) (slika 4.a). Očito je da manja prividna debljina premaza označava veću otpornost prema pojavi kolotruga [24]. Mješavine s crvenim muljem imaju manju prividnu debljinu premaza od mješavina



Slika 4. Ponašanje mješavina sa stajališta: a) otpornosti na pojavu kolotruga (lijevo); b) otpornosti na pojavu pukotina (desno)

Tablica 5. Prosječni Marshallovi i volumetrijski parametri mješavina pri optimalnom udjelu bitumena

Vrsta mješavine	Aktivna adhezija (vrijeme miješanja u sekundama)	Pasivna adhezija (prekrivenost bitumenom u %)
Kameno brašno	98	90
Crveni mulj	108	85

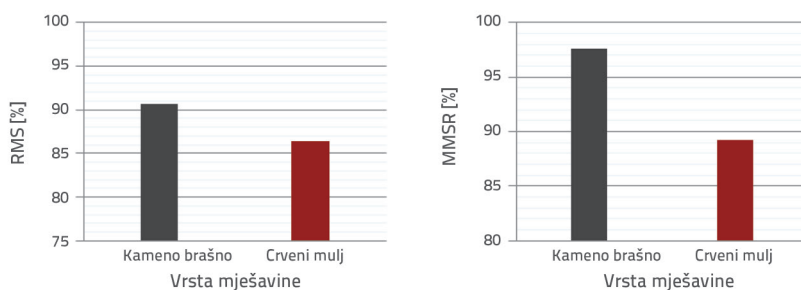
s kamenim brašnom, pa stoga imaju višu vrijednost MQ u odnosu na konvencionalnu mješavinu. Veća krutost mješavina s crvenim muljem pripisuje se finoći crvenog mulja i njegovoj tendenciji ravnomjernog rasprostiranja u mješavini [31]. Ovo može biti odgovoran čimbenik za vrhunsku ITS vrijednost mješavina crvenog mulja (slika 4.b).

3.3. Otpornost na pojavu pukotina

Posredna vlačna čvrstoća mješavina s crvenim muljem (930 kPa) veća je od odgovarajuće čvrstoće konvencionalnih mješavina s kamenim brašnom (802 kPa). Čestice crvenog mulja relativno su sitnije od čestica kamenog brašna, na što upućuje i niže vrijednosti modula zrnatosti. Primjena punila sa sitnijim česticama obično dovodi do povećanja krutosti i posredne vlačne čvrstoće asfaltnih mješavina, i to zbog ravnomjernijega prostiranja takvih punila i formiranja ujednačene strukture mješavine [31]. Taj faktor možda je i razlog bolje posredne vlačne čvrstoće mješavina s crvenim muljem (slika 4.b).

3.4. Otpornost na prodor vlage

Obje mješavine udovoljavaju indijskim kriterijima prema kojima zadržana stabilnost treba iznositi najmanje 75 % [1]. Međutim, utvrđeno je da mješavine s kamenim brašnom imaju nešto veću zadržanu stabilnost u odnosu na mješavine s crvenim muljem (86,48 %) (slika 5.a). Tome je vjerojatno razlog viši postotak dolomita u mineralnom sastavu kamenog brašna i veća prividna debljina premaza mješavine. Mješavine pripremljene s crvenim muljem također su vrlo otporne na prodor vlage. Razlog tome je vjerojatno viši udio čestica agregata obavijenog bitumenom, što omogućuje prikladnu zaštitu od prodora vlage. Dodatni razlog je možda niži udio štetne gline u crvenom mulju i/ili prisutnost kalcita u mineraloškom sastavu crvenog mulja, što poboljšava otpornost na prodor vlage.



Slika 5. Otpornost mješavina na: a) vlagu (lijevo); b) dugotrajno starenje (desno)

3.5. Analiza adhezije

Slično kao i kod rezultata koji su postignuti u vezi sa zadržanom stabilnošću prema Marshallu, utvrđeno je da mješavine s kamenim brašnom imaju više vrijednosti aktivne i pasivne adhezije. Kameno brašno ima veću aktivnu adheziju u mješavinama pripremljenima s kamenim brašnom treba manje vremena da postignu potpunu obavijenost u odnosu na mješavine s crvenim muljem (tablica 5.). Što se tiče pokusa s uzavrelom vodom, u oba su slučaja zabilježeni slični rezultati o vrijednosti zadržanog bitumena (tablica 5.). Očito je da se mješavina s kamenim brašnom odlikuje boljom aktivnom adhezijom jer kameno brašno ima veći afinitet prema bitumenu u odnosu na crveni mulj, na što upućuje niži koeficijent hidrofilnosti i viša pH-vrijednost.

3.6. Otpornost na dugotrajno starenje

Utjecaj dugotrajnog starenja na ponašanje mješavina s kamenim brašnom i crvenim muljem iskazan je u obliku Marshallovog srednjeg koeficijenta stabilnosti (eng. *Mean Marshall Stability Ratio* - MMSR), kao što je to prikazano na slici 5.b. Mješavine s crvenim muljem imaju nižu vrijednost MMSR (89,28 %) u odnosu na mješavine s kamenim brašnom (97,65 %). Već je navedeno da je prividna debljina premaza (AFT) mješavina s crvenim muljem manja od odgovarajuće debljine konvencionalnih mješavina. Niža vrijednost AFT uzrokuje ubrzano otvrdnjavanje bitumenskog veziva [32]. Stoga niže vrijednosti AFT kod mješavina s crvenim muljem dovodi do smanjenja adhezije između bitumena i agregata, što uzrokuje smanjenje Marshallove stabilnosti tretiranog uzorka.

4. Zaključak

U ovom je radu analizirana mogućnost korištenja crvenog mulja (umjesto kamenog brašna) u mješavinama od asfaltbetona.

Utvrđeno je da crveni mulj ima sve pozitivne karakteristike punila. Marshallova i volumetrijska svojstva mješavina od asfaltbetona pripremljenih s crvenim muljem udovoljavaju svim kriterijima koji su zadani u indijskim normama. Ustvari, pokazalo se da mješavine s crvenim muljem imaju bolju stabilnost po Marshallu u odnosu na konvencionalne mješavine, što se može pripisati prisutnosti aluminijevih

i željeznih oksida u sastavu tog mulja. Međutim, crveni mulj je relativno porozan pa apsorpira veće količine bitumena, što je dovelo do povećanja optimalnog udjela bitumena u mješavini. Mješavine koje sadrže crveni mulj također su imale veći Marshallov kvocijent i višu vrijednost posredne vlačne čvrstoće i to zbog izrazitije finoće crvenog mulja. Mješavine s crvenim muljem imale su marginalno slabiju otpornost na vlagu u usporedbi s mješavinama s kamenim brašnom. Ipak, mješavine s crvenim muljem udovoljile su minimalnim zahtjevima u pogledu zadržane stabilnosti, a uz to su kod njih zabilježene i prilično povoljne vrijednosti aktivne i pasivne adhezije. To se može pripisati izrazito alkalnim i hidrofobnim

svojstvima crvenog mulja, što je osiguralo dobru adheziju između bitumenskog veziva i punila. Osim toga, zadovoljavajuće ponašanje u odnosu na prodor vlage također osigurava prisutnost tvari koje pogoduju adheziji (kao što je npr. kalcit), te odsutnost minerala aktivne gline. Mješavine s crvenim muljem pokazale su relativno nižu otpornost na dugoročno starenje, a razlog je znatnije oksidiranje bitumenskog veziva zbog manje prividne debljine premaza mješavine. Imajući na umu njegove nedostatke, crveni se mulj može učinkovito koristiti kao punilo u mješavinama od asfaltbetona, a njegova se primjena može smatrati ekonomičnom u područjima u kojima su dostupne veće količine tog materijala.

LITERATURA

- [1] Ministry of Road Transport & Highways: Specifications for Road and Bridge Works, Section 500, Fifth Revision, Indian Roads Congress, New Delhi, India, 2013.
- [2] Huang, B., Shu, X., Chen, X.: Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties, *International Journal of Pavement Engineering*, 8 (2007) 1, pp.1-9
- [3] Brown, E.R., McRae, J.L., Crawley, A.B.: Effect of aggregates on performance of bituminous concrete, implication of aggregates in design, construction and performance of flexible pavement, ASTM STP 1016, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989., pp. 34–63
- [4] Wang, H., Al-Qadi, I., Faheem, A., Bahia, H., Yang, S.H., Reinke, G.: Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2011), pp. 33-39
- [5] Chandra, S., Choudhary, R.: Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes Performance Characteristics of Bituminous Concrete with Industrial Wastes as Filler, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (2013), pp. 1666-1673
- [6] Choudhary, J., Kumar, B., Gupta, A.: Laboratory evaluation on recycling waste industrial glass powder as mineral filler in hot mix asphalt, *Proceedings of Civil Engineering Conference- Innovation for Sustainability*, Hamirpur, India, 2016., pp. 352-359
- [7] Choudhary, J., Kumar, B., Gupta, A.: Application of waste materials as fillers in bituminous mixes, *Waste Management*, 78 (2018), pp. 417-425
- [8] Choudhary, J., Kumar, B., Gupta, A.: Effect of filler on the bitumen-aggregate adhesion in asphalt mix, *International Journal of Pavement Engineering*, 21 (2018) 11, DOI:10.1080/10298436.2018.1549325
- [9] Tenza-abril, A.J., Saval, J.M., Cuenca, A.: Using Sewage-Sludge Ash as Filler in Bituminous Mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2014) 4, pp. 45-54
- [10] Paramguru, R., Rath, P., Misra, V.: Trends in red mud utilization-A review, *Miner Process Extractive Metall Rev*, 26 (2005), pp.1–29
- [11] Prasad, P.M., Sharma, J.M.: Characterization of and applications for an Indian red mud, *Proc. of Electrometallurgy, Cent. Electrochemical Res. Inst.*, 1986., pp.12-22
- [12] Lima, M.S.S., Thives, L.P.: Evaluation of permanent deformation in asphalt mixtures composed with red mud as filler, *Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague, Czech Republic, 2016.
- [13] ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [14] ASTM C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [15] IS 2386 (Part IV): Methods of Test for Aggregates for Concrete, Bureau of Indian Standard, New Delhi, 1997, reaffirmed 2002.
- [16] IS 2386 (Part 1): Methods of test for aggregates for concrete, Bureau of Indian Standard, New Delhi, 1963, reaffirmed 2002.
- [17] Bureau of Indian Standards: IS: 73 - Paving bitumen-specification (Second Revision), New Delhi, India, 2015.
- [18] ASTM D854-14: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2014.
- [19] ASTM D422-63: Standard test method for particle-size Analysis of soils, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2007.
- [20] National Asphalt Pavement Association: Evaluation of baghouse fines for hot mix asphalt, *Information Series*, 127 (1999).
- [21] EN 933: Tests for Geometrical Properties of Aggregates-Part 9-Assessment of Fines Methylene Blue Test, British Standards Institution, London, UK, 1999.
- [22] Ministry of Transport of P.R. China: Test methods of aggregate for highway engineering (JTG E42–2005), China Communications Press, Beijing, 2005.
- [23] Asphalt Institute: Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types: Manual Series No. 2 (MS-2), 6th Ed., Lexington, KY, 1999.
- [24] Christensen, D.W., Bonaquist, R.F.: Volumetric requirements for Superpave mix design (Vol. 567), *Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, DC, 2006.
- [25] ASTM D6931-17: Standard Test Methods for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken. USA, 2017.
- [26] Pasandín, A.R., Pérez, I.: The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 58 (2015), pp. 53-58
- [27] Tarrer, A.R., Wagh V.: The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding, *SHRP-A/UIR-91-507*. Washington, DC, 1991.

- [28] ASTM. D 3625-12. Standard practice for effect of water on bituminous coated aggregate using boiling water, ASTM International, Philadelphia, USA, 2005.
- [29] Kliewer, J., Bell, C., Sosnovske, D.: Investigation of the relationship between field performance and laboratory ageing properties of asphalt mixtures (SHRPA –003A), Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance, ASTM STP 1265, ASTM International, PA, 1995.
- [30] ASTM D-1559.: Test for resistance to plastic flow of bituminous mixture using Marshall apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [31] Modarres, A., Bengar, P.A.: Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder, International Journal of Pavement Engineering, 20 (2017) 1, DOI: 10.1080/10298436.2017.1373390
- [32] Kandhal, P., Chakraborty, S.: Effect of asphalt film thickness on short-and long-term aging of asphalt paving mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1535 (1996) 1, pp 83-90