

## Pregled metoda primjene otpadnih automobilskih guma u proizvodnji asfaltnih mješavina i mogućnost primjene u Crnoj Gori

Ivan Božović<sup>a</sup>, Katarina Mirković<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Uprava za saobraćaj, Podgorica, Crna Gora

<sup>b</sup> Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora

### PODACI O RADU

DOI: 10.31075/PIS.67.02.03

Stručni rad

Primljen: 05/03/2021

Prihvaćen: 03/06/2021

Koresponding autor: e-mail:

katarinam@ucg.ac.me

*Ključne reči:*

Suvi i mokri postupak

Asfaltna mješavina sa granulatom

gume

Gumom modifikovan bitumen

### REZIME

Primjena otpadnih automobilskih guma u proizvodnji asfaltnih mješavina sa uspjehom se već preko 50 godina koristi širom svijeta, počev od SAD, Australije, Južne Afrike, mnogih država Evrope, a pomaci u ovoj oblasti mogu se naći i u zemljama regiona, prije svih Mađarskoj. Cilj ovog rada jeste upoznavanje sa metodama primjene otpadnih automobilskih guma u proizvodnji asfaltnih mješavina koje su u primjeni u svijetu, upoznavanje sa osnovnim treninima, opremom i mehanizacijom neophodnom za proizvodnju, izvođenje i ispitivanje mješavina, kao i analiza osnovnih uslova moguće primjene u Crnoj Gori.

### 1. Uvod

Ideja o primjeni gume u proizvodnji asfaltnih mješavina nije novijeg porijekla i veže se čak za 1840. godinu i pokušaje implementiranja elastičnih karakteristika gume u asfaltnu mješavinu kako bi se dobila trajnija konstrukcija. Kasnije, tokom 1940-ih godina Američka kompanija „Rubber Reclaiming Company“ počela je sa proizvodnjom devulkanizovane reciklirane gume pod nazivom „Ramflex“, dok se primjena otpadnih guma u vidu komadića vezuje se za sredinu 1960-ih godina (1964) i Čarlsa Mekdonalda (Charles McDonald).

Mekdonald je dodavanjem komadića gume uspio da modifikuje bitumen i dobije vezivo koje je sadržalo inženjerske osobine oba materijala i nazvao ga guma-bitumen (asphalt-rubber-gumirani bitumen). Kod pojedinih autora može se naći i naziv „Overflex™“. Mekdonaldova metoda postavila je osnovu za razvoj i drugih metoda primjene komada otpadne gume u modifikaciji veziva i mješavina, objedinjenje kroz postupak koji se naziva „mokri postupak“ (Wet process).

Gotovo uporedo sa razvojem mokrog postupka, razvijao se još jedan oblik-postupak dodavanja otpadnih guma koji je podrazumijevao dodavanje komadića otpadne gume u vidu agregata čime je otpadna guma zapravo modifikovala samu asfaltnu mješavinu.

Ovaj postupak razvijen je 1968.godine od strane dvije Švedske kompanije „Skega AB“ i „AB Vaegfoerbaetringer“ i naziva se suvi postupak (Dry process). Nešto kasnije (1978), ovaj postupak patentiran je u SAD pod nazivom „PlusRide“ ili „Rumac“ (Rubber modified asphalt concrete).

Američko Društvo za testiranje i materijale ASTM (American Society for Testing and Materials) je 1988. godine zvanično uvelo definiciju za asfalt-gumu (bitumen-guma;asphalt-rubber), a kasnije ovaj materijal i standardizovalo kroz ASTM D6114-97.

Primjena otpadne gume u proizvodnji asfaltnih mješavina primjenjuje se širom SAD, Južnoj Africi, Australiji, a od evropskih zemalja treba istaći Portugal, Španiju, Italiju, Češku i Švedsku kao zemlje u kojima se najviše koristi, ali tu su i Francuska, Belgija, Njemačka, Austrija, Holandija.

Od zemalja u regionu postoje podaci o izvršenim laboratorijskim ispitivanjima u Srbiji, a u Sloveniji je 2010. godine urađena test dionica na putu Ljubljana (Litijska) – Zadvor i 2013. godine test dionica na putu Divača-Kozina.

U Mađarskoj je bitumen modifikovan gumenim granulatom (nazvan CSRB-chemically stabilized crumb rubber bitumen) 2008. godine dobio nacionalno tehničko odobrenje za primjenu u putogradnji ( ÉME 13/2008 H1) , a postupak proizvodnje i proizvod su patentirani 2009. godine.

Od zvaničnih standard i propisa, a koji se odnose na primjenu otpadne gume u proizvodnji asfaltnih mješavina su: ASTM D6114, SABITA Manual 19, Austroads, "Caltran Asphalt Rubber user guide".

## 2. Guma kao sirovina

Za proizvodnju savremenih guma koristi se oko 200 različitih sirovih materijala. Najznačajniju komponentu gume za primjenu u proizvodnji asfaltnih mješavina predstavljaju elastomeri u vidu prirodne gume koja se dobija iz drveta kaučuka i sintetičke gume (butadien, stiren, neopren).

Prirodna guma je superiornija od sintetičke u pogledu elastičnih svojstava, a sintetička guma je mnogo stabilnija od prirodne u pogledu interakcije sa uslovima kakvi su vrijeme i temperatura – termička stabilnost. Druga značajna komponenta je čađ. Čađ se uglavnom koristi da poveća krutost u gazištu gume (u cilju poboljšanja trenja, kontrole abrazije i smanjenja akvaplaninga), ali i za poboljšanja fleksibilnosti i smanjenja temperature koja se prikuplja u zidovima gume. Studije su pokazale da dodavanje čađi u mješavinu povećava izdržljivost veziva-bitumena. Ovakvo vezivo je više viskozno i obično zadržava deblji film oko agregata. Deblji film odlaže štetno dejstvo oksidacije i samim tim produžava vijek konstrukcije usled staranja

Ostale komponente gume su karbonska žica, zatim razna sintetička vlakna odnosno tekstili, antioksidansi i razni fileri. Procenat ovih komponenti u gumi varira zavisno od proizvođača, kao i od toga da li se radi o automobilskoj ili kamionskoj gumi. Procenat pojedinih sirovina u dati su u tabeli 1.

**Tabela 1.** Sastav guma za putničke automobile i kamione

Vrsta materijala	Putnička vozila i laki kamioni %	Kamionske gume %
Prirodna guma	19	34
Sintetička guma	24	11
Metali-žica	12	21
Vlakna-tekstil	4	0
Antioksidansi	14	10
Fileri	26	24

Izvor: <https://www.ustires.org>

Međutim, da bi se otpadna guma mogla koristiti u proizvodnji asfaltnih mješavina potrebno je odvojiti sirovine koje se mogu ugraditi u asfaltnu mješavinu od onih koje to ne mogu. U sirovine koje se mogu ugraditi iz otpadne gume spadaju prirodna i sintetička guma i čađ, dok se žice i vlakna odbacuju. Ako se usvoji da je prosječna težina automobilske gume (dimenzije koje su najviše u upotrebi) 9 kg, od jedne automobilske gume dobija se oko 4,5 – 5 kg (Heitzman, 1992) sirovine za dalju upotrebu u proizvodnji asfaltnih mješavina. Dakle, otprilike polovina težine gume.

Konačni proizvod koji se dobija iz otpadnih guma za modifikaciju bitumena i asfaltnih mješavina u literaturi se naziva „crumb rubber modifier“ – CRM (modifikator na bazi gume) i proizvodi se u obliku zrna-čestica, sa maksimalnim zrnom veličine 4.75 mm. Treba napomenuti da CRM ne predstavlja samo puko sitnjenje automobilske gume uz odvajanje nepoželjnih sirovina već je u pitanju mnogo „finiji“ tehnološki proces proizvodnje od koga zavisi način primjene, ali i ispunjenost osnovnih zahtjeva koji omogućavaju kvalitetnu primjenu CRM-a u modifikaciji bitumena i asfaltnih mješavina.

Osim u obliku CRM-a, za proizvodnju asfaltnih mješavina, tj. modifikaciju bitumena može se primijeniti i devulkanizovana guma.

### 2.1. Proizvodnja CRM-a

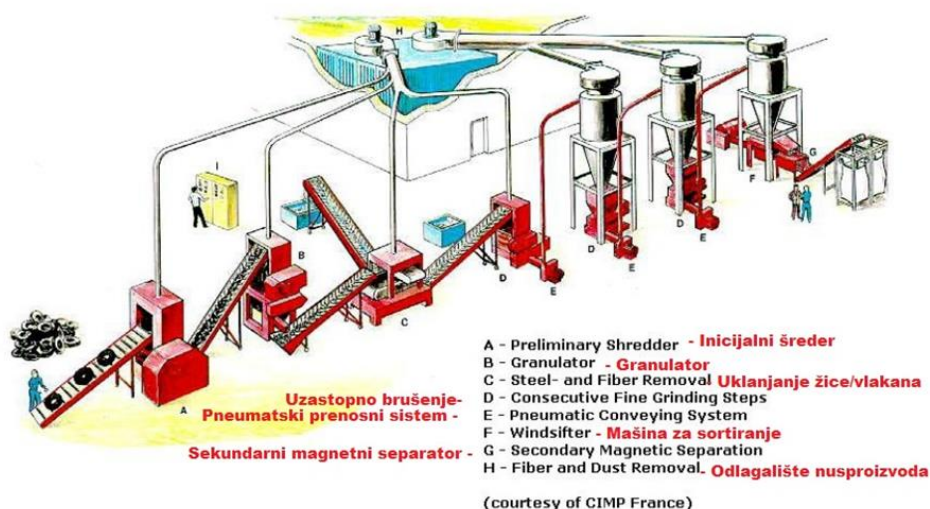
Proizvodnja CRM od sirovina podrazumijeva primjenu posebne opreme i mehanizacije u okviru par metoda koje se danas koriste.

Od metoda koje se koriste za proizvodnju CRM-a najpoznatije, a i one koje se najviše koriste su ambijentalno mljevenje (brušenje) i kriogenska metoda (metoda zaleđivanja-smrzavanja). Osim ove dvije metode u Americi se koristi i „metoda mokrog brušenja“ (wet grinding method). A u upotrebi je i „hydro jet size reduction“.

**Ambijentalna metoda**, odnosno ambijentalno mljevenje, kako i sam naziv govori, podrazumijeva proizvodnju CRM-a na ambijentalnoj, tj. sobnoj temperaturi. Zapravo, samo početak procesa proizvodnje započinje na sobnoj temperaturi, ali temperatura tokom procesa raste i dostiže vrijednosti i do 130 °C. U okviru ambijentalne metode postoji mogućnost primjene više različite opreme odnosno procesa sitnjenja. Ovi procesi odnose se na postupak sitnjenja, ali i na postupak odvajanja žice(metala) i vlakana od CRM-a što se vrši pomoću vazduha pod pritiskom ili vodom. CRM se proizvodi jednim od tri procesa i to:

- Granulatorski proces (granulator process) koji proizvodi zrna pravilnog oblika veličine od 9,5 mm do No.40 (granulated crumb rubber).
- Proces mrvljenja (crackermill process) koji se najčešće koristi i proizvodi zrna nepravilnog oblika veličine od No. 4 do No. 40
- Proces mikro mrvljenja (micro-mill process) proizvodi veoma fina zaobljena zrna veličine od No. 40 do No. 200.

Sami postupak podrazumijeva ciklus sitnjenja i filtriranja i prikazan je na slici 1:



Slika 1. Shema postrojenja za proizvodnju CRM-a po ambijentalnoj metodi  
 Izvor: (Reshner, 2006)

Čestice gume koje se dobijaju ovim metodama obično imaju lomljen (sječen) oblik, grube teksture i približno istih dimenzija na sječenoj strani. Mašine za mljevenje rade na niskim brzinama i guma se obično obrađuje kroz dva do tri mlina kako bi se ostvarila radukcija čestica u veličini i one dodatno oslobodile od metalnih i fiber komponenata. Za dobijanje jako sitnih komada CRM-a ovom metodom obavezna je primjena više ciklusa sitnjenja.

Kod **kriogenske metode** se sirovina iz otpadne gume (ili cijela guma) pomoću tečnog azota smrzava (obično

između -87 do -198 °C) dok ne postane krta, kada se pomoću udarnog čekića (prese) razbija na sitne komadiće relativno malih specifičnih površina u odnosu na one dobijene ambijentalnim mljevenjem. Ovaj metod može da se primijeni u bilo kojoj etapi redukcije komada otpadne gume. Obično se kao sirovinski materijal koriste komadi-čestice veličine 50 mm ili manje. Materijal se smrzava u komorama oblika tunela ili se potapaju u „kade“ tečnog azota. Ovim procesom se komadi gume usitnjavaju na čestice dimenzija u rasponu od 6 mm do sita No. 30. Proces proizvodnje prikazan je na slici 2:



Slika 2. Shema postrojenja za proizvodnju CRM-a po kriogenskoj metodi  
 Izvor: (Reshner, 2006)

## 2.2. Osnovni zahtjevi za CRM

Da bi bila moguća primjena u modifikaciji bitumena CRM mora da zadovolji određene uslove. Ovi uslovi definisani su standardima koji su upotrebi, a koji su pomenuti u uvodnom dijelu.

Njima se definiše niz uslova, počevši od načina proizvodnje CRM, pa tako standard u Južnoj Africi (SABITA) podrazumijeva isključivo primjenu ambijentalne metode, nikako kriogenske.

Standardima su takođe definisani i sirovinski sastav CRM-a, pa jedan od njih – „CALTRAN” definiše da CRM koji se koristi kao modifikator mora da sadrži  $25\pm 2\%$  od ukupne mase visoko prirodne gume dok se preostalih  $75\pm 2\%$  dobija od otpadne automobilske gume. Standardima su takođe definisani i granulacija, prisustvo vlage i štetnih materija, metala i vlakana. Prema ASTM D6114 ove karakteristike su definisane na sledeći način:

- Prisustvo vlage manje od 0,75 %,
- Relativna gustoća  $1.15\pm 0,05$ ,
- Bez prisustva čestica obojenih metala,
- Ne više od 0.01% metala sa prisustvom gvožđa,
- Prisustvo vlakana (fiber) ne veće od 0,50% od ukupne mase,
- Maksimalno zrno veličine 2,36 mm (No 8).

Određivanje navedenih karakteristika definisano je takođe standardima. Jedan od takvih je i „California Test 385“ od strane Kalifornija DOT (Department of transportation). Ovim standardom definisani su postupci određivanja procenta žice-metala pomoću magneta, granulometrijskog sastava pomoću sita, prisustvo vlakana pomoću pincete kao i relativne gustine CRM-a.

## 2.2. Statistički podaci

Prema brojnim statističkim podacima koji se mogu pronaći na internetu godišnje se u svijetu proizvede preko milijardu komada guma, dok se odbaci oko 800 miliona. Problem deponovanja otpadnih guma poznat je širom svijeta i praktično ne postoji zemlja koja je ovog problema oslobođena. Otpadna automobilska guma je nepoželjna za deponovanje jer su kapaciteti deponija uvijek ograničeni, a otpadne gume taj prostor brzo popunjavaju i zauzimaju mnogo veći prostor od drugog otpada obzirom na procenat šupljina koji iznosi 75%.

Mnoge zemlje pronalaze rješenje u smanjenju broja otpadnih guma-deponija kroz reciklažu i ponovnu upotrebu, spaljivanje ili izgradnju saobraćajnica. Statistički podaci koje se tiču načina tretiranja otpadnih automobilskih guma procentualno se razlikuju iz godine u godinu i od izvora do izvora. Prema podacima iz SAD-a (US Tire Manufacturers Association) oko 43% otpadnih guma se spaljuje, oko 25% sitni (ground rubber), oko 16% deponuje, oko 8% koristi u građevinarstvu, a preostalih 8% u razne svrhe.

U Crnoj Gori se prema podacima kojima raspolaže Direktorat za zaštitu životne sredine, a koji se opet oslanjanju na podatke dobijene iz auto-servisa, godišnje uveze od 150 000 do 200 000 guma. Takođe, ovaj organ procjenjuje da se godišnje odbaci od 80000 do 85000 guma (oko 1000 t), koje završe na prijavljene ili neprijavljene deponije koje već dugo godina stvaraju problem.

U Crnoj Gori je članom 49 Zakona o upravljanju otpadom donijeta uredba kojom se definiše način i postupak osnivanja sistema preuzimanja, sakupljanja i obrade otpadnih guma i rada tog sistema. Ovom uredbom je definisano da su ovi sistemi, odnosno preduzeća obavezna da od preuzetih guma 90% njih pripremi za ponovnu upotrebu. Prema podacima uzetih sa sajta Organizacije KOD u Crnoj Gori je 2013. godine preuzeto 5 000 tona guma (preko 400 000 komada), ali ništa od toga nije reciklirano. Ako se ovo uporedi sa prethodnim pasusom koji se tiče broja guma koje se godišnje odbace dolazimo do podatka da je sa količinom preuzetom od strane preduzeća 2013-e godine do danas u Crnoj Gori odbačeno 12000 tona guma odnosno gotovo 1.2 miliona guma.

## 3. Postupci i metode

Prema načinu dodavanja CRM-a, odnosno njegovog djelovanja na asfaltne mješavine razlikuju se dva postupka u okviru koje svrstavaju sve metode koje se koriste.

Jedan postupak podrazumijeva miješanje CRM-a sa bitumenom i njegovu modifikaciju, pri čemu se ovako modifikovan bitumen dalje koristi u proizvodnji asfaltnih mješavina. Ovaj postupak se naziva mokri postupak.

Drugi postupak podrazumijeva primjenu CRM-a u vidu agregata, pri čemu u veoma maloj mjeri dolazi do reakcije sa bitumenom, pa se ovim postupkom modifikuje samo mješavina. Ovaj postupak naziva se suvi postupak.

### 3.1. Mokri postupak

Kako je navedeno mokri postupak podrazumijeva modifikaciju bitumena primjenom CRM-a. Sama reakcija sastoji se iz dva simultana procesa i to:

- Apsorpcije aromatičnih ulja iz bitumena u polimerni lanac gume i
- Parcijalne digestije gume.

Apsorpcija ulja iz bitumena u polimerni lanac CRM-a ostvaruje se na temperaturi od 160-220 °C što sa jedne strane izaziva bubrenje CRM-a i njegovo omekšavanje, a takođe smanjenje procenta aromatičnih ulja (rastvarača asfaltna) čime se formira gel struktura (Lo Presti, 2013).

Na reakciju guma-bitumen utiče niz faktora, kako procesnih, tako i karakteristike materijala. Od faktora samog procesa najvažniji su svakako temperatura i vrijeme reakcije, ali i aparatura. Karakteristike bitumena zavise od njegovog porijekla i raznih dodataka (aditiva), a CRM zavisi takođe od porijekla, ali i od veličine čestica. Ako je temperatura prevelika ili vrijeme reakcije predugo (obično traje od 30 min do jednog sata) bubrenje će se nastaviti do granice kada

ће доћи до depolimerizacije-devulkanizacije CRM-a što znači disperziju gume (pretvaranje u tečno stanje) u bitumen, a što krajnje utiče na smanjenje kompleksnog modula smicanja ( $G^*$ ). Elastične osobine (fazni ugao) nastavljaju da se modifikuju do određenog nivoa, kada počinje da se gubi efekat modifikacije (Lo Presti, 2013; Subhy, 2016).

Prema načinu miješanja tj. reakciji sa bitumenom mokri postupak je u nekim standardima (i kod nekih autora) podijeljen u dvije „familije“. Tako „CALTRAN“ dijeli mokri postupak na:

- Mokri postupak sa visokom viskoznošću (wet process – high viscosity)
- Mokri postupak bez miješanja (wet process – no agitation).

Prvi postupak predstavlja da kažemo „tradicionalni“ postupak primjene otpadne gume u asfaltnim mješavinama i u okviru nje su Mekdonaldova metoda (McDonald) i metoda konstantnog-kontinualnog miješanja (continuous blending technology).

**Mekdonaldova metoda** podrazumijeva proizvodnju asfaltnih mješavina sa dodatkom otpadne gume primjenom klasičnih asfaltnih baza, tzv. „batch plant“ (baze sa cikličnim radom), sa izvjesnim modifikacijama na opremi. Ove modifikacije potrebne su kako bi se ostvarilo miješanje bitumena i CRM-a prije miješanja sa agregatom, pa se dakle modifikacije na opremi vrše samo na dijelu prije „upumpavanja“ modifikovanog bitumena u mikser sa vrelinim agregatom. Oprema koja se dodaje osnovnoj opremi sastoji se od različitih „tankova“ opremljenih puževima, a kod pojedinih proizvođača potrebna je i zamjena pumpe kojom se modifikovani bitumen upumpava u mikser sa agregatom obzirom na veću viskoznost nego kod klasičnog bitumena. Ova oprema proizvodi se u dva oblika. Jedan koji podrazumijeva opremanje baze stacionarnim silosima-tankovima, a drugi primjenu mobilnih baza za modifikaciju bitumena. Prednost svakako imaju mobilne baze, obzirom na to da se osim za proizvodnju modifikovanih asfaltnih mješavina (u stacionarnim bazama) mogu koristiti i na gradilištu za spravljanje modifikovanog bitumena na licu mjesta i upotrebi za tretiranje površine kolovoza pomoću distributera i „slurry seal“ mašine. Sami postupak podrazumijeva dodavanje gume (najčešće vrećama od 25 kg koje se tope na određenoj temperaturi) prethodno zagrijanom bitumenu i to u silos-tank opremljen puževima sa brzim miješanjem. Nakon tog inicijalnog miješanja (par minuta) mješavina se prebacava u tank (tankove) sa puževima sa sporim miješanjem u kojima se ostvaruje sjedinjavanje ove dvije sirovine. Miješanje se mora obezbijediti minimum 45 min na temperaturama između 190 i 218 °C. Pošto se dodavanjem gume temperatura mješavine smanjuje, bitumen mora biti zagrijan na temperaturi između 204 i 224 °C prije dodavanja CRM-a.

Nakon miješanja modifikovani bitumen se dalje miješa sa vrelinim agregatom po standardnoj proceduri. Preporuka je da se bitumen modifikovan gumom koristi u periodu od 4h nakon 45-0 minutne reakcije. U suprotnom potrebno je njegovo čuvanje u posebnim izolovanim tankovima u kojima se ova mješavina hladi, međutim u slučaju da temperatura padne ispod 190 °C mješavina se mora opet zagrijati do temperature 218°C. „CALTRAN“ dozvoljava dva ciklusa ponovnog zagrijavanja, ali da mješavina ispuni sve zahtjeve sve zahtjeve (min penetracija 25-70, tačka razmekšanja 52-74, elastičnost na 25°C min 18, prividna viskoznost 1500-4000). Reakcija između gume i bitumena traje sve dok je mješavina u tečnom stanju. Kada se guma razloži dolazi do pada viskoznosti, ali se dodavanjem 10% CRM-a po masi veziva viskoznost vraća na zahtijevane vrijednosti. Upravo je skladištenje gumom modifikovanog bitumena najveći nedostatak ovog tipa mokrog postupka zbog fazne separacije jer se CRM ne digestira u potpunosti u bitumen pa kao teži tone na dno silosa sa skladištenje.

„SABITA“ omogućava korišćenje spravljenog modifikovanog bitumena sve dok on svojim karakteristikama zadovoljava potrebne uslove, a u slučaju da on izgubi potrebne karakteristike dozvoljena je primjena do maksimum 25% pripremljene mješavine u procesu spravljanja nove mješavine.

Dešava se da se komadići gume tokom miješanja međusobno zalijepe, pa se kao rešenje za ovaj problem dodaje mineral talk ili kalcijum karbonat u količini od 4% od količine gume.

**Metoda kontinualnog miješanja** podrazumijeva primjenu asfaltne baze sa kontinualnim miješanjem gdje se bitumen, CRM i agregat miješaju istovremeno. Ova metoda naziva se još i „Florida postupak“, a jedna od bitnih karakteristika ove metode je u tome što je oprema za proizvodnju mobilna pa se spravljanje asfaltnih mješavina (sa ili bez modifikatora) može vršiti na licu mjesta.

Istraživanja su pokazala da su prednosti metode **visoke viskoznosti** u povećanju izdrživosti kolovozne konstrukcije, otpornosti površinskih slojeva na zamor i refleksiju pukotina (pukotina koje „ne rade“), veće otpornosti na promjenu temperature (temperaturni gradijent), kao i veću otpornost na habanje. Takođe, usled uvećanja količine veziva i prisustva čađi u gumi manja je oksidacija bitumena što utiče na veću otpornost na starenje.

Brojna laboratorijska istraživanja su pokazala veće vrijednosti viskoznosti, penetracije i tačke razmekšanja, ali manju duktilnost. Istraživanja su pokazala i uticaj na smanjenje buke u vrijednosti od par decibela.

Nedostaci ove metode odnose se prije svega na problem skladištenja zbog pojave fazne separacije, zatim na povećanje inicijalnih troškova zbog nabavke dodatne opreme za postojeće baze. Takođe, obzirom da se mješavine prilikom ugradnje brže hlade što u nekoj mjeri komplikuje samu ugradnju. Ispitivanje koje se tiče stabilnosti prilikom skladištenja, a koje je izveo Geiger (Geiger, i drugi, 2012) ukazalo je na snažnu zavisnost između karakteristika modifikovanog bitumena i hemijske kompozicije CRM-a, konkretno odnosa sadržaja poliizoprena i ukupnog sadržaja ekstrakta acetona i pepela.

Ovaj odnos definisan je kao „faktor kompatibilnosti“ – „*cf*“. Ispitivanje je sprovedeno na način što je modifikovani bitumen čuvan u cijevima prečnika 2,5 cm i visine 20 cm u vertikalnom položaju tokom 72 sata. Uzorci su nakon toga bivali izloženi smrzavanju na temperaturi -20 stepeni i rezani na tri jednaka dijela (po visini). Kontrola stabilnosti izvršena je određivanjem tačke razmekšanja gornjeg i donjeg uzorka cijevi, a ako je razlika u temperaturama do 5 °C smatra se da je mješavina dobre stabilnosti pri čuvanju. Ono što je uočeno jeste da primjena CRM-a kod koga je faktor *cf* manji od 1,5 daje modifikovani bitumen kod koga je razlika u temperaturi tačke razmekšanja komada uzoraka veća od 5 stepeni.

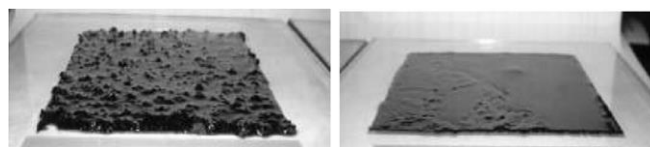
Neki autori navode i problem pojave neprijatnog mirisa iako nije štetan (Lo Presti, 2013).

Može se zaključiti da je primjena i Mekdonaldove metode i metode kontinualnog miješanja moguća u Crnoj Gori. Međutim, treba odmah napomenuti da se u Crnoj Gori koriste isključivo ciklične asfaltne baze (batch plants), pa bi za primjenu metode kontinualnog miješanja bilo potrebno nabaviti kompletno asfaltno postrojenje. Obzirom na karakteristike ovih baza i mogućnost primjene na gradilištu njihova nabavka bi svakako bila dobro rješenje za kompaniju koja planira nabavku nove asfaltne baze (nevezano za primjenu otpadne gume kao modifikatora), ali je dalja analiza ove metode sa ekonomskog aspekta previše komplikovana obzirom na brojne uticaje koje treba uzeti u obzir (cijena postrojenja, obim posla, udaljenost gradilišta i td.).

Modifikacija postojećih asfaltnih baza za korišćenje Mekdonaldove metode podrazumijeva nabavku opreme koja bi služila za miješanje bitumena i gume, dok skladištenje koje je ranije pomenuto kao potencijalni problem ove metode u Crnoj Gori i ne bi bio toliko izražen obzirom na obim posla i dosadašnju praksu gdje se vrlo rijetko dešava potreba za skladištenjem bitumena, eventualno u slučajevima kvara asfaltne baze. Iz tog razloga može se zaključiti da se Mekdonaldova metoda može uzeti u dalje razmatranje.

**Mokri postupak bez miješanja** podrazumijeva direktno spravljanje modifikovanog bitumena u rafineriji i ovaj postupak, tj. metoda naziva se još i „**terminal blend**“.

Mješavina bitumena i gume spravlja se pod određenim uslovima koji se odnose na temperaturu, vrijeme trajanja miješanja i pritiska, a veoma je slična uslovima za polimer modifikovane bitumene. Za razliku od prve metode, kod ove metode miješanje se vrši na većim temperaturama (200-300 °C) i pri većim brojem obrtaja puževa, pri čemu ne dolazi do bubrenja komadića gume već njihove depolimerizacije/devulkanizacije i kompletne digestije u bitumen. Na taj način dobija se gusta homogena mješavina bez prisustva komadića gume za razliku od prve metode (slika 3).



Slika 3. Bitumen modifikovan CRM-om dobijen Mekdonaldovom metodom i u rafineriji  
Izvor: (Lo Presti, 2013)

Kako metoda „terminal blend“ podrazumijeva spravljanje modifikovanog bitumena u rafineriji (ili terminalu za distribuciju bitumena), isključuje se dalje razmatranje o mogućnosti primjene u Crnoj Gori u ovom trenutku.

### 3.1.1. Mekdonaldova metoda (McDonald technology)

Tehnologija koja se i danas koristi i predstavlja osnovu za mokri postupak vezuje se za Čarlsa Mekdonalda (Charles McDonald) i 1964. godinu. Iako je primjena gume u modifikaciji bitumena od ranije bila poznata Mekdonald je prvi počeo da koristi gumu na način na koji se to i danas koristi u vidu komadića veličine No 16-No 30 u procentu od 15-22 % od mase veziva, pri temperaturi od oko 200 °C i vremenu trajanja reakcije 30-45 min.

OVAKO DOBIJENO VEZIVO U POČETKU SE KORISTILO U VIDU „flastera“-zakrpa (**band-aid**) od 1964. godine, a primarna upotreba ovih zakrpa bila je u cilju odlaganja ili totalnog sprečavanja širenja pukotina kroz asfaltni zastor. Prva mašinska ugradnja CRM modifikovanog bitumena ostvarena je 1968-e godine pomoću tzv. „slurry seal“ mašine, a tokom ove godine tečni bitumen sa dodatkom gume ugrađen je i pomoću „distributera“, nakon čega je izvršeno dodavanje agregata čime čime je dobijena membrana nazvana „**stres apsorbirajuća membrana**“ ili **SAM** (stress absorbing membrane). Nedostatak ovog načina primjene ogledao se u čupanju zrna agregata, pa se kao rešenje za ovo preko SAM-a izveo sloj klasične asfaltne mješavine (HMA) u vidu habajućeg sloja, čime je SAM sloj zatvoren i zaštićen od spoljnog uticaja.

Ovako izvedeni SAM sloj nazvan je „**stres apsorbirajuća membrana-međusloj**“ ili **SAMI** (stress absorbing membrane interlayer). Tokom 1975-e godine u primjeni je počeo da se koristi i oblik SAMI-a poznat kao sistem 3 sloja (tree-layer system), nastao kao rešenje zbog problema koji je SAMI sistem imao kada se nanosi na hrapavu površinu, pa je u okviru ovog troslojnog sistema prvi sloj bio izravnavajući, drugi SAMI, a treći habajući (HMA) sloj. Primjena otpadne gume u proizvodnji asfaltnih mješavina počela je da se koristi od 1975. godine. (Brown, 1993).

Danas se Mekdonaldova metoda koristi za popravku rupa i pukotina, odnosno dilatacija kod betonskih kolovoznih konstrukcija, zatim za presvlačenje u vidu SAM sloja, međusloja–SAMI, u asfaltnim mješavinama svih tipova, a koristi se čak i kao izolaciona „zavjesa“ (subgrade soil) ispod asfaltnih slojeva u cilju zadržavanja vlage van posteljice.

Ono što je jako važno, a tiče se Mekdonaldove metode jeste to da je **patent istekao 1992. godine**, pa se slobodno može koristiti.

Kada se koristi u vidu SAM i SAMI-a, vezivo se spravlja na licu mjesta, a ugradnja se vrši pomoću distributera. Obično se koristi oko 2,5 – 3,5 litra po kvadratu veziva modifikovanog sa nekih 20-ak % CRM-a koji se primjenjuje u vidu spreja, a zatim se pokriva odgovarajućim agregatom kako bi se obezbijedila odnosno dobila habajuća površina otporna na klizanje. Veličina CRM-a koja se primjenjuje kod SAM i SAMI je No10–No16. Kao agregat za izradu SAM koristi se lomljeni kamen visokog kvaliteta, šljunak, šljaka. Agregat ne smije da sadrži organske materijale, primjese gline ni prašine koje bi smanjile adheziju. Iz ugla mogućnosti primjene SAM i SAMI slojeva u Crnoj Gori, ista bi se mogla smatrati neopravdanom iz više razloga. Kao prvo tu je ekonomski faktor koji podrazumijeva nabavku i distributera i opreme-blendera za spravljanje gumom modifikovanog bitumena na licu mjesta, a primjena SAMI sloja u vidu troslojnog sistema opet bi podrazumijevala struganje i izradu klasičnih asfaltnih mješavina –izravnavajućeg i habajućeg sloja čime bi inicijalni troškovi bili neopravdani. Iz tog razloga dalje razmatranje primjene otpadne gume u vidu SAM i SAMI sloja neće se dalje razmatrati.

Mekdonaldova metoda može se koristiti kod sva tri tipa mješavina (gusta, otvorena, skeletna), pri čemu se za projektovanje asfaltnih mješavina mogu koristiti Maršalova i Hvimova metoda, ali i SUPERPAVE metoda.

Kod **gustih asfaltnih mješavina** koristi se tipična mješavina agregata i odgovarajuće gumom modifikovano vezivo. Agregat treba da zadovolji iste karakteristike kao kod konvencionalnih mješavina. Kada se koristi manje od 5% CRM-a i to manjeg od

No50, može se koristiti klasična gusta mješavina agregata. Sa većim dodatkom CRM-a treba odabrati krupniji agregat kako bi se obezbijedilo dovoljno šupljina za čestice gume. Ako se primijeni previše sitna frakcija agregata ili previše krupne čestice crna zabilježeni su problemi u smislu da će odmah nakon ugradnje i zbijanja, i to dok je još vruća, mješavina pokazivati karakteristike nestabilnosti i sunderaste strukture, ako su krupne krupnija zrna agregata pritisnuta unutar mješavine. Druga karakteristika koja se primjećuje jeste zadržavanje nivoa šupljina u mješavini uprkos povećanju količine veziva.

Guste asfaltne mješavine sa dodatkom gume mogu da se koriste kako kod novih asfaltnih mješavina tako i u rekonstrukcijama i to za noseće slojeve i habajuće, ali se danas uz ovu mješavinu koristi isključivo vezivo dobijeno pomoću „terminal blend“ metode. Mnogi standardi i propisi uopšte ne tretiraju ovaj tip mješavine u okviru Mekdonaldove metode (a ni kontinualnog miješanja). Tako na primjer, „CALTRAN“ je na osnovu ispitivanja i ogleda na probnim dionicama tokom 1980-ih i 1990-ih godina izdao smjernice u kojima se jednom od tačaka „**eliminišu guste mješavine sa CRM modifikovanim vezivom**“ (Zhou, 2014) Osim „CALTRAN“-a i druge države SAD su svojim priručnicima i pravilnicima isključile primjenu gustih asfaltnih mješavina. Razlog je zbog malog procenta šupljina čime se značajno otežava ugradnja mješavine, pa se dešavalo da mješavine odmah po ugradnji dožive kolaps.

„CALTRAN“ je u okviru pomenutih smjernica utvrdio primjenu Mekdonaldove metode isključivo sa otvorenim i skeletnim agregatnim mješavinama.

**Otvorene mješavine** koje se koriste sa CRM modifikovanim vezivom koriste se isključivo za završne-habajuće slojeve i to u izgradnji novih i rekonstrukciji postojećih konstrukcija. Razlikuju se dva tipa otvorenih mješavina u zavisnosti od količine primijenjenog modifikovanog veziva. Prvi tip podrazumijeva primjenu 6-8% veziva po masi mješavine, što je 50-60% više veziva nego kod konvencionalnih otvorenih mješavina. Drugi tip je označen kao otvorena mješavina sa visokim procentom veziva (Open graded High Binder) koja podrazumijeva primjenu veziva u količini od 8-10% od mase mješavine. Otvorene agregatne mješavine su pogodne za primjenu bitumena modifikovanog CRM-om jer ovako „gućće“ vezivo sa poboljšanim karakteristikama poboljšava i same karakteristike mješavine obzirom da je agregatna mješavina koja se koristi ista kao kod konvencionalnih mješavina čime se dobijaju konstrukcije veće trajnosti. Otvorene mješavine sa CRM modifikovanim vezivom imaju niz povoljnosti koje su se tokom eksploatacije dokazale u vidu smanjenja buke 3-5 db, poboljšanju poroznosti i odvodnje sa površine kolovoza, većoj trajnosti konstrukcije i boljoj pronijivosti.

Upravo ovo zadnje predstavlja i glavni nedostatak ovog tipa mješavine jer je uočeno da je kod gradskih saobraćajnica koje karakteriše saobraćaj sa čestim zaustavljanjem i kretanjem izraženo čupanje zrna agregata, pa je preporuka da se ova mješavina koristi samo za vangradske puteve. Istraživanja koja su sprovedena u Oregonu (1993 i 1999. god) i drugim državama SAD, a koja se tiču izvedenih asfaltnih mješavina sa CRM modifikovanim vezivom pokazala su da je trajnost otvorenih mješavina oko 10-ak godina, ali sa izvjesnim oštećenjima. Tako je za zastor na „Evergreen Point“ mostu izvedenom 1982.godine utvrđeno da je posle 15 godina korišćenja pod teškim saobraćajem utvrđeno da je konstruktivno zadovoljavajući, ali da su se kasnije javio problem habanja i čupanja zrna agregata. Sa druge strane, zastor na „Columbia R-39th Street“ izveden 1986. godine trajao je 11 godina, pri čemu je veliki problem sa habanjem primijećen posle samo 6 godina trajnosti (Hunt, 2002).

Međutim, ono što su ova istraživanja pokazala, a i brojna laboratorijska jeste jako dobro ponašanje **skeletnih mješavina** sa CRM modifikovanim vezivom. Tako je isto istraživanje pokazalo da da zastor postavljen 1991. godine (Butte Fllas Road-Jackson County) i to u debljini od samo 12.5 mm posle 8 godina upotrebe nije pretrpio nikakva oštećenja. Isto se utvrdilo i za zastore izvedene na „Old Salem Road“ i „CR648 Fish Hatchery Drive“ 1990. odnosno 1993. godine. Ono što je posebno značajno kod skeletnih mješavina sa dodatkom otpadne gume je u tome što se sa manjom debljinom sloja dobijaju iste, ako ne i bolje karakteristike od konvencionalnih mješavina većih debljina. „CALTRAN“ je razvio sistem koji definiše primjenu tanjih slojeva skeletnih mješavina sa CRM modifikovanim vezivom kao ekvivalent konvencionalnim gustim mješavinama većih debljina, kao i četiri strategije primjene. U tabeli 2 su date ekvivalentne debljine za smanjenje/usporevanje širenja pukotina (Reflective Crack Retardation Equivalencies):

**Tabela 2. Ekvivalentne debljine skeletnih mješavina sa CRM modifikovanim vezivom (RHMA-G)**

HMA mm	RHMA-G mm
45	30
60	30
75	45
90	45
105	45 za pukotine manje od 3 mm

Izvor: (Shatnawi, Sousa)

Za debljine preko 105mm potrebno je prethodno izvesti SAMI sloj.

Kako bi se potvrdile ove preporuke koje je definisao „CALTRAN“ u Južnoj Africi je sprovedeno ispitivanje pomoću „simulatora teškog sabračaja“ (Heavy Vehicle Simulator – HVS) u kojem je praćeno ponašanje

konvencionalne guste mješavine debljine 75 mm kao i skeletnih mješavina debljina 38 i 25 mm. Sve mješavine projektovane su u skladu sa specifikacijama koje definiše „CALTRAN“. Ispitivanje je sprovedeno primjenom opterećenja od 40 i 80 kN, a rezultati testiranja dati su u tabeli 3:

**Tabela 3. Rezultati ispitivanja pomoću HVS u Južnoj Africi**

Broj prelaza	Opterećenje kN	Temp. °C	HMA 75 mm	RHMA-G 38 mm	RHMA-G 25 mm
0-100.000	40	10	Sitne pukotine	Bez pukotina	Bez pukotina
100.000-175.000	40	10	Blok pukotine	Bez pukotina	Bez pukotina
175.000-200.000	80	10	100% pukotine	Bez pukotina	Sitne pukotine
200.000-237.000	80	10	Testiranje stopirano	Bez pukotina	100% pukotine
237.000-250.000	80	-5	Testiranje stopirano	50% pukotina	Testiranje stopirano

Izvor: (Shatnawi, Sousa)

Slična istraživanja sprovedena u Virdžiniji i Kaliforniji su dala približno iste rezultate (Shatnawi, Sousa). Dakle, može se zaključiti da RHMA-G mješavine daju mnogo bolje rezultate od konvencionalnih gustih mješavina duplo manje debljine, pri čemu „CALTRAN“ definiše minimalnu debljinu sloja od 30 mm za RHMA-G mješavinu. Skeletne mješavine mogu se koristiti za završne ali i noseće slojeve kod novih i rekonstrukcije postojećih kolovoza s tim što se kod rekonstrukcije postojećih za noseći sloj radi u vidu SAMI sloja. Za razliku od otvorenih mješavina, prednost skeletnih je u tome što se mogu koristiti i u urbanim djelovima, tj. gradskim saobraćajnicama kod koji se mješavine otvorenog tipa nijesu dobro pokazale. **Može se zaključiti da se skeletne mješavine modifikovane CRM-om nameću kao najbolje rješenje za eventualnu primjenu u Crnoj Gori.** Za modifikaciju se najviše korisi bitumen BIT50/70 (Južna Afrika), dok se u SAD koristi „performance grade“ (PG) nomenklatura, odnosno bitumen PG64-22 (ili PG58-28). Agregatna mješavina koja se koristi odgovara konvencionalnim skeletnim (gap graded) mješavinama, a procenat veziva se kreće u granici 7-9% po masi mješavine. Količina CRM-a koja se koristi različito je definisana propisima i iznosi min 12% za Floridu, 15% za Teksas i po ASTM i 20 % za Kaliforniju (CALTRAN). Jedna tipična mješavina CRM-a koja se koristi data je u tabeli 4:

**Tabela 4. Granulometrijski sastav CRM-a**

Sito #	Veličina sita	Prolaz kroz sito %
10	2 mm	100
16	1,18 mm	75-100
30	600 µm	25-100
50	300 µm	0-45
100	150 µm	0-10
300	75 µm	0

Izvor: (Hicks, 2002)



### 3.2. Суви поступак

Суви поступак подразумијева примјену CRM-a у виду агрегата, при чему је модификација битумена минимална и то искључиво од стране веома ситних зрна CRM-a. Суви поступак развијао се готово упоредо са mokrim поступком. Originalni koncept dodavanje otpadne gume u vidu agregata u cilju modifikacije asfaltnih mješavina razvijen je od strane dvije kompanije iz Švedske „Skega AB“ i „AB Vaegfoerbaetringer“ krajem 1960-ih godina (1968) i imao je naziv „Rubit“. Ovim konceptom dodavano je 3-4% CRM-a od ukupne mase mješavine, a veličina CRM-a bila je u granicama 1,6-6,4 mm. Ovaj postupak od 1976. godine počinje da se primjenjuje i na Aljasci (SAD), a 1978. godine patentiran je u SAD pod nazivom „PlusRide“ ili „Rumac“ (Rubber modified asphalt concrete). Od pojave u SAD, četiri korporacije su raspolagale sa PlusRide metodom i to: „AllSeason Surfacing Corp“, „PlusRide Asphalt Inc“, „PaveTech Corp“ i „EnviroTire Inc“. Sve četiri korporacije su bile iz Sijetla, a posljednja – EnviroTire Inc je preuzela sve patente i uspostavila posebne uslove licenciranja sa izvođačima (Brown, 1993). U početku se PlusRide metoda primjenjivala za guste asfaltnе mješavine. Problem ove metode u gustim mješavinama bio je u diskontinualnosti. Približno polovina projekata imala je problem prilikom ugradnje, a neke se čak nijesu mogle ni ugraditi. Od onih koje su uspješno ugrađene većina se tokom posmatranja ponašala ekvivalentno konvencionalnim mješavinama.

Ispitivanjima PlusRide-a, a u cilju poboljšanja mogućnosti primjene u gustim i skeletnim mješavinama, 1986-g godine profesor na Univerzitetu Oregon, Takallou (Bary Takallou) razvija novu tehnologiju u okviru suvog postupka. Ova tehnologija подразумијевала je „generično“ građiranu mješavinu agregata i CRM-a, pa je i sama tehnologija nazvana „Generic Dry“ (Generic Rumac) ili „Tak system“. Ova metoda подразумијевала je primјenu i sitnih i krupnijih zrna CRM-a, kako bi sitna zrna reagovala sa bitumenom (kao što je slučaj kod mokrog postupka), a krupna zamijenila dio agregata (kao originalna PlusRide metoda).

Tokom 80-ih godina nastala je još jedna metoda u okviru suvog postupka od strane Inženjera Američke vojske, kao dio programa „Strategic Highway Research Program“ – „Cold Regions Research and Engineering Laboratory -CRREL“, koji su se fokusirali na povećanje procenta CRM-a kao i najveće veličine zrna. Ova metoda u sklopu suvog postupka poznata je kao „chunk rubber asphalt concrete“ (bukvalan prevod asfalt da dodatkom komada gume).

Prednost ovog postupka ogleda se prije svega u proizvodnji, gdje nije potrebna praktično nikakva modifikacija asfaltnih baza. Kod cikličnih asfaltnih baza CRM se miješa i zagrijava sa agregatom prije nego se sjedini sa vezivom. Prednost suvog postupka je i u primjeni veće količine CRM-a (2-4% od mase

mješavine), ali i zbog primjene krupnijeg CRM-a kojeg je lakše i jeftinije proizvesti (do 6 mm). Prema nekim autorima uticaj na apsorpciju buke kod mješavina dobijenih suvim postupkom veći je nego kod mješavina dobijenih mokrim postupkom (Bressi, 2019).

Još jedna prednost mješavina dobijenih suvim postupkom uočen je kod test dionica izrađenih u hladnijim klimama i odnosi se na fenomen pucanja tankog sloja leda u procesu njegovog formiranja, a za ovaj fenomen najveći uticaj imaju elastična konstrukcija koja se dobija primjenom gume i uticaja saobraćaja.

Sa druge strane, veliki nedostaci mješavina suvog postupka ogleda se u nedostatku kontinuiteta i činjenici da rezultati test dionica, ali i laboratorijskih ispitivanja idu u granicama od jako dobrih do jako loših rezultata. Tu su još i problemi nikakvog ili jako malog uticaja na vezivo, slabijeg zbijanja prilikom ugradnje, slabije kohezije između agregata i bitumena čime se povećava senzibilnost na uticaj vlage, a mješavine dobijene ovim postupkom pokazale su i slabije rezultate na zamor i habanje (Jones i ostali, 2017).

Kada se govori o mogućnosti primjene u Crnoj Gori pozitivne strane su mali inicijalni troškovi, ali najveći nedostatak u ovom trenutku za dalje istraživanje predstavlja činjenica da su metode u okviru suvog postupka (PlusRide i GenericDry) patentirane, a nijesu poznati uslovi i cijena kupovine prava na korištenje metoda čime ni preciznije formiranje cijena i analiza nijesu mogući.

### 4. Oprema

Da bi se otpadna automobilska guma mogla koristiti u proizvodnji mješavina u Crnoj Gori potrebno je omogućiti proizvodnju CRM-a. Na osnovu ranije navedenog, prednost za proizvodnju CRM-a ima ambijentalna metoda. Opremu i mehanizaciju koja se koristi za ovu metodu proizvodi više proizvođača širom svijeta. Pretragom interneta lako se može doći do velikog broja Kineskih proizvođača, kojih je najviše u ovom trenutku ponuđeno na tržištu. Od proizvođača u Evropi, a od kojih su se mogli dobiti konkretni podaci, postoji „ALFA SPK“ iz Rusije koja proizvodi postrojenja različitih veličina pod nazivom „ATR“ za proizvodnju CRM-a, odnosno reciklažu gume. Najmanje postrojenje u ponudi je ATR-250 koje proizvodi oko 300 kg recikliranje gume u periodu od jednog sata, a najveća ATR-1000 i ATR-King koja proizvode oko 800 kg po satu. Prosječno postrojenje - ATR-500 veličine je 18x4x4 m (zauzima prostor od oko 80 kvadrata), troši električnu energiju u količini od 150-180 kWh, a za proizvodnju je neophodno angažovati 4 radnika. Vrijednosti postrojenja kreću se od 99000-759000 dolara. Proizvođač preporučuje proizvodnju u dvije smjene po 10-12 časova. Postrojenje ATR-500 dato je na slici 4:



**Slika 4.** Postrojenje za proizvodnju CRM-a/reciklažu gume ATR-500  
Izvor: (ALFA-APK)

Oprema za modifikaciju asfaltnih mješavina može biti mobilna ili stacionarna. Mobilna postrojenja su jako popularna u Americi, a jedno od takvih je proizvođača „CEI Enterprises“. Ovo postrojenje može se koristiti u kombinaciji kako sa cikličnim tako i kontinualnim bazama. Međutim, u komunikaciji sa proizvođačem došlo se do informacije da oni ne vrše prodaju u Evropi, zbog nemogućnosti transporta. Istraživanjem interneta nije se moglo pronaći da ovakva postrojenja proizvodi neko u Evropi.

Osim mobilnih postrojenja, postoje i stacionarna kojih je mnogo više u ponudi. Treba napomenuti da su ova postrojenja tretiraju kao stacionarna jer se postavljaju pored asfaltnih baza, ali im veličina omogućava da budu transportovane sa jedne na drugu lokaciju. Istraživanjem na internetu može se doći do više proizvođača, a za potrebe ovog rada uzet je proizvod Kineskog proizvođača „Liaoyuan Road Construction Machinery Co“ dato na slici 5.

U komunikaciji sa proizvođačem dobijen je podatak da je moguće povezati postrojenje sa asfaltnim bazama koje se koriste u Crnoj Gori (konkretno „BENNINGHOVEN“ kompanije Bemax) s obzirom da omogućava proizvodnju 10-12t/h modifikovanog bitumena dok najveće asfaltna baza u Crnoj Gori proizvode do 240 t/h asfalta.

Takođe proizvođač je dao napomenu da se uz ovo postrojenje ne prodaju pumpa, kao ni silosi za čuvanje modifikovanog bitumena. Pumpe koje su sastavni dio asfaltnih baza u Crnoj Gori zbog velike razlike u viskoznosti nije moguće koristiti već se koriste specijalne pumpe sa povratnim ventilom i spiralnim zupčanicom. Vrijednost postrojenja sa slike 6 je 46000 dolara sa uračunatim transportom, a kako ne postoje podaci o cijeni pumpe za potrebe rada usovjije se ukupna cijena 70000 €.



**Slika 5.** Postrojenje za proizvodnju-modifikaciju bitumena sa CRM-om  
Izvor: (Liaoyuan Road Construction Machinery Co)

## 5. Opravdanost primjene u Crnoj Gori

Kada se u obzir uzme crnogorska praksa u putogradnji i činjenica da je Crna Gora malo tržište nameće se da je primjena ovako modifikovanih mješavina najpovoljnija kod investicionog održavanja državnih puteva. Godišnje se kroz investiciono održavanje „presvuče“ oko 40 km puteva. Takođe, garancija koja se daje na trajnost ovih intervencija je oko 3-5 godina, dok Caltrans za svoje strategije (tabela 2) daje garanciju od 10 godina pri čemu su debljine modifikovanih mješavina značajno manje od konvencionalnih gustih mješavina. Ova razlika u debljinama najviše utiče na cijenu ugradnje pa nije ni čudo što sa povećanjem obima posla vrijednost modifikovanih mješavina dolazi do izražaja. **Za konkretan primjer treba uzeti slučaj kada se umjesto struganja i presvlačenja konvencionalnom gustom mješavinom AB 11 debljine 4 cm, koristi skeletna mješavina sa CRM modifikovanim bitumenom RHMA-G debljine 3 cm.** Iako je moguća veća razlika u debljinama, usvojena je ova kako bi se išlo na stranu sigurnosti.

Treba uzeti u obzir da se širom svijeta u prosjeku oko četvrtina reciklirane gume koristi u putogradnji, dok u Crnoj Gori ne postoje kvalitetni planovi ni za rješavanje problema deponovanja otpadnih guma, njihove reciklaže, a da se ne govori o primjeni reciklirane gume. Ako se podatak o broju odbačenih guma u Crnoj Gori tokom godine od 85000 usvoji kao tačan, da je prosječna težina automobilske gume 12 kg, kao i činjenica da se oko polovine težine gume odbaci kroz elemente koji su zabranjeni standardima dolazimo do podatka da se u Crnoj Gori godišnje odbaci oko 1.020.000 kg gume spremne za reciklažu odnosno oko 510.000 kg gume koja se nakon recikliranja može koristiti. Sa druge strane, za godišnje investiciono održavanje od 40 km prosječne širine 7 m i debljine 3 cm, a za pretpostavljenu količinu veziva od 8% i učešće CRM-a od 20% (prema Caltrans) dobija se potrebna količina CRM-a od 322.560 kg.

Dakle, moguće je sve otpadne gume na godišnjem nivou iskoristiti za proizvodnju CRM-a koji bi se koristio u modifikaciji veziva i da opet ostane značajna količina reciklirane gume za druge namjene.

Međutim, zbog nepoznatih podataka koji se analizom u ovom trenutku ne mogu predvidjeti, a tiču se udaljenosti transporta spravljene mješavine od asfaltne baze, kvalifikacije radne snage pri ugradnji mješavine, smanjenje-nemogućnost ugradljivosti na niskim temperaturama, za analizu će biti primijenjena dužina od 20 km (toplija klima), dakle polovina godišnjeg investicionog presvlačenja.

Modifikovana asfaltna mješavina koja će biti predmet kontrole sastoji se od agregatne mješavine, veziva i filera, a u sljedećim količinama:

- Vezivo BIT 50/70+CRM prema Caltrans-u = 7,3 %;
- Filer = 3%;
- Mješavina agregata = 89,7 %.

Količina CRM-a u vezivu usvojena je prema Caltransu i iznosi 20%, a procenat prolaska agregata kroz sita usvojena je prema Way-u (Way i ostali, 2011):

- 0/4 – 30%
- 4/8 – 25%
- 8/11 – 17%
- 11/19 – 18%.

Kompanija ALFA SPK u svojoj ponudi ima četiri postrojenja i to: ATR250, 300, 500 i ATR 1000. Teorijski učinci ovih postrojenja su redom: 300, 400, 600 i 800 kg/h, dok su količine gume koje se tokom sata recikliraju za 100 kg više od navedenih. Uzevši ovo u obzir, kao i pretpostavke da će tokom godine dana postrojenje biti u radu 320 dana, 5 dana nedjeljno i 10 h dnevno dobijaju se sljedeći učinci ovih postrojenja:

- ATR 250: 1.280.000 kg gume odnosno 106.666 komada (12 kg prosjek);
- ATR 300: 1.600.000 kg gume odnosno 133.333 komada;
- ATR 500: 2.240.000 kg gume odnosno 186.666 komada;
- ATR 1000: 2.880.000 kg gume odnosno 240.000 komada.

Dakle, s obzirom da se u Crnoj Gori godišnje odbaci oko 85000 guma, može se zaključiti da je postrojenje ATR 250 sasvim dovoljno u ovom trenutku za potrebe reciklaže. Vrijednost ovog postrojenja iznosi 99.000 USD, odnosno kada se prevede u evre i uveća za potrebe transporta bude gotovo tačno 99.000 evra. Ova cijena ne obuhvata porez s obzirom da postoji mogućnost da se radi o donaciji ili državnoj investiciji, a takođe ne obuhvata cijenu izgradnje objekta za smještaj postrojenja.

Sve ovo dodatno povećava troškove, ali treba uzeti u obzir i činjenicu da u slučaju da se radi o privatnoj investiciji za očekivati je da Investitor već na raspolaganju ima objekat. Broj radnika potreban za upravljanje ovim postrojenjem je 3-4 (4 usvojeno). Količina CRM-a potrebna za 20 km investicionog održavanja, širine 7 m i debljine sloja 3 cm, a za usvojenu asfaltnu mješavinu iznosi 147.168 kg. Za razliku od teorijskog učinka postrojenja od 300 kg/h usvaja se praktični učinak od 120 kg/h.

Na osnovu ovih podataka i usvojene cijene goriva i maziva dobija se cijena po satu postrojenja ATR-250 od **59,05 €/h**, odnosno **0,49 €/kg**.

Za analizu cijena proizvodnje asfaltnih mješavina uvode se sljedeće pretpostavke:

- nijesu potrebni silosi za skladištenje modifikovanog bitumena već se modifikacija vrši u okviru proizvodnje mješavine;
- koštanje radnog sata baze računa se kao novo asfaltno postrojenje iako se radi o postrojenjima koja su u upotrebi već niz godina;
- potrošnja struje za proizvodnju mješavine veća je za 50 kwh u odnosu na standardnu potrošnju, a na račun postrojenja sa slike 6. Pretpostavka je da kada ovo postrojenje radi standardni breneri za bitumen su isključeni, a povećana potrošnja uslovljena je većom temperaturom proizvodnje;
- cijene pogonskih energija i materijala usvojen je za raniji period, odnosno period prije Covid-a 19, s obzirom da nije očekivano da će se trenutne cijene zadržati;
- radna snaga će se zanemariti, s obzirom da je broj radnika gotovo isti, a cijena po jedinici mjere zanemarljivo mala;
- zapreminska masa asfaltne mješavine 2400 kg/m<sup>3</sup>.
- praktični učinak baze 72 m<sup>3</sup>/h.

Za usvojeni praktični učinak (Up), odnosno usvojenu normu vremena ( $1/Up = 0,0138$ ) dobijaju se sljedeće jedinične cijene proizvodnje po m<sup>3</sup>:

- asfaltna baza: 25,26 €/m<sup>3</sup>,
- modifikovana asfaltna baza: 31,34 €/m<sup>3</sup>.

Za usvojene dimenzije predviđene za rehabilitaciju L=20 km, s=7 m, d= 4 (3) cm, potrebne količine asfaltna iznose 5600 odnosno 4200 m<sup>3</sup> što u konačnom daje sljedeće cijene proizvodnje:

- **konvencionalna mješavina: 141.456 €,**
- **modifikovana mješavina: 131.628 €.**

Cijene materijala-mješavina date su u tabeli 5:

**Tabela 5. Cijena materijala za spravljanje AB11 i RHMA-G mješavina**

Materijal	AB 11 debljine 4 cm (faktor korekcije t/m <sup>2</sup> = 0,096)			RHMA-G debljine 3 cm (faktor korekcije t/m <sup>2</sup> = 0,072)			
	Norma	Jed. Cijena	Cijena €/m <sup>2</sup>	Norma	Jed. Cijena	Cijena €/m <sup>2</sup>	
BIT 50/70	54 kg	0,43	2,22	58,4 kg	0,43	1,81	
FILER	57 kg	0,05	0,27	30 kg	0,05	0,11	
0/4	0,352 t	11,7	0,40	0,269 t	11,7	0,23	
4/8	0,211 t	9,3	0,19	0,223 t	9,3	0,15	
8/11	0,226 t	11,7	0,25	0,152 t	11,7	0,13	
11/19	0			0,160 t	11,7	0,13	
CRM				14,6 kg	0,49	0,52	
Ukupno:			3,33	Ukupno:			3,08

Cijena materijala-mješavina za L=20 km i s= 7 m iznosi:

- **AB 11 d= 4cm: 3,33x20.000x7 = 466.200 €**
- **RHMA-G d= 3cm: 3,08x20.000x7 = 431.200 €**

Iako se gornje cijene mogu dovesti u pitanje, ono što se gotovo sa sigurnošću može reći jeste da je ugradnja RHMA-G mješavina jeftinija nego konvencionalnih, a na račun manje debljine od 1 cm. Kako bi se olakšao proračun uvešće se neka pojednostavljena u pogledu usvajanja istih praktičnih učinaka mašina, cijena radnog sata, isključenja radne snage koja je ista. Dakle, usvojiće se samo različiti faktor korekcije na račun debljina i izbaciti valjak guma-guma koji se ne koristi za ugradnju RHMA-G. Primjenom ovih pojednostavljenja dobijaju se sledeće cijene ugradnje:

- **AB 11 d= 4 cm: 3,97 €/m<sup>2</sup>,**
- **RHMA-G d= 3 cm: 2,94 €/m<sup>2</sup>**

Kada se u račun uključi i održavanje koje je prema tvrdnjama Caltrans-a takvo da mješavine modifikovane gumom, konkretno RHMA-G, imaju duplo veću trajnost od konvencionalnih mješavina može se zaključiti da je primjena otpadne gume u proizvodnji asfaltnih mješavina u Crnoj Gori svakako nešto o čemu treba razmisliti. Ušteda koja se dobija na ugradnji na račun debljine svakako može pokriti dodatne inicijalne troškove proizvodnje CRM-a i mješavina, dok je uticaj na životnu sredinu i smanjenje problema otpadnih guma nemjerljiv.

## 6. Zaključak

Primjena otpadne gume u modifikaciji asfaltnih mješavina moguća je u Crnoj Gori. Kada se uzmu u obzir navedeni podaci zaključuje se da je primjena mokrog postupka, tj. Mekdonaldove metode u kombinaciji sa skeletnom mješavinom agregata najbolje rješenje. Ova kombinacija omogućava primjenu tanjih slojeva kao zamjenu za konvencionalne mješavine za završni sloj čime razlika u debljini značajno smanjuje troškove ugradnje. Ovi troškovi su toliko manji da u velikoj mjeri pokrivaju troškove nabavke potrebne opreme.

Naravno, primjena ove metode morala bi biti i zakonski definisana, tj. "provučena kroz pravilnik". Time bi se dala alternativa postojećim rješenjima i omogućila privatnim firmama opravdanost ulaganja. Takođe, potrebno je izvršiti i dodatna ispitivanja u pogledu dobijanja konkretnih laboratorijskih analiza, izradu probne dionice, ali i utvrđivanje konkretnih zahtjeva koji se tiču potrebe skladištenja modifikovanog bitumena, dužine transporta mješavine itd. Istraživanje treba usmjeriti i na nove metode, konkretno "Dry hybrid" metodu koja se razvija u Italiji, a koja podrazumijeva primjenu CRM-a u vidu filera. Primjena CRM-a na ovaj način značajno smanjuje ulaganje u opremu, jer dodatna oprema i nije potrebna, a primjena jako sitnog CRM-a omogućava modifikaciju bitumena u određenom nivou.

## Overview of methods of application of waste car tires in the production of asphalt mixtures and the possibility of application in Montenegro

Ivan Božović, M.SC.CE

Directorate for traffic, Podgorica, Montenegro

Katarina Mirković, Ph.D.CE

University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Podgorica, Montenegro

**Abstract:** The use of waste car tires in the production of asphalt mixtures has been used successfully for over 50 years around the world, starting with the USA, Australia, South Africa, many European countries, and progress in this area can be found in the region, especially Hungary. The aim of this paper is to get acquainted with the methods of application of waste car tires in the production of asphalt mixtures that are used in the world, to get acquainted with the basic conditions, equipment and machinery necessary for production, construction and testing of mixtures, as well as an analysis of the basic conditions for possible application in Montenegro.

**Key words:** Dry and wet process, asphalt mixtures with rubber granulate, rubber modified bitumen

## Literatura

- [1] ASTM D6114/D6114M (2009), American Society for Testing and Materials.
- [2] Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder.
- [3] Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J., & Losa, M. (2019). Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the art and statistics. *Coatings*.
- [4] Caltrans. (2005). *Use of scrap tire rubber - State of the technology and best practices*. State of California Department of Transportation.
- [5] Caltrans. (2006). *Asphalt rubber Usage Guide*. State of California Department of Transportation.
- [6] Cao, W. (2006). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using rubber dry process. *Construction and Building Materials*, 6. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/238381333\\_Study\\_on\\_properties\\_of\\_recycled\\_tire\\_rubber\\_modified\\_asphalt\\_mixtures\\_using\\_dry\\_process?\\_esc=publicationCoverPdf&el=1x\\_2&enrichId=rgreq-79b4dab04ffd6daf9eca3d9a65194079-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzO](https://www.researchgate.net/publication/238381333_Study_on_properties_of_recycled_tire_rubber_modified_asphalt_mixtures_using_dry_process?_esc=publicationCoverPdf&el=1x_2&enrichId=rgreq-79b4dab04ffd6daf9eca3d9a65194079-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzO)
- [7] Fontes, L., Pereira, P., Pais, J., & Triches, G. (2006). Behaviour of asphalt rubber mixtures with different crumb rubber and asphalt binder sources. *Asphalt Rubber*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/277160287\\_Behaviour\\_of\\_asphalt\\_rubber\\_mixtures\\_with\\_different\\_crumb\\_rubber\\_and\\_asphalt\\_binder\\_sources](https://www.researchgate.net/publication/277160287_Behaviour_of_asphalt_rubber_mixtures_with_different_crumb_rubber_and_asphalt_binder_sources)
- [8] Fornai, D., Sangiorgi, C., Mazzotta, F., Bermejo, J., & Saiz, L. (2016). A new era for rubber asphalt concrete for the green public procurement in road construction. *1st European Road Infrastructure Congress*. Leeds, United Kingdom: European Road Infrastructure Congress ERF.
- [9] Geiger, A., Hollo, A., Thernesz, A., Durgo, R., Czibor, S., Bartha, L., & Gergo, P. (2012). Chemically Stabilized Rubber Bitumen. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012*. Istanbul.
- [10] Hegazi, M. (2014). *Evaluation of cold weather performance of rubber modified asphalt placed in Ontario*. Waterloo, Ontario: University of Waterloo.
- [11] Heitzman, M. A. (1992). *State of the practice-design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier*. Washington: Federal Highway Administration Office of Engineering.
- [12] Hicks, R. (2002). *Asphalt rubber design and construction guidelines, Volume I - Design guidelines*. Sacramento: California Integrated Waste Management Board (CIWMB).
- [13] Hunt, E. (2002). *Crumb rubber modified asphalt concrete in Oregon*. Salem, Oregon: Oregon Department of Transportation.
- [14] Jensen, W., & Abdelrahman, M. (2006). *Crumb rubber in performance-graded asphalt binder*. Lincoln: University of Nebraska.
- [15] Jimenez, R. (1978). *Testing methods for asphalt rubber*. Phoenix, Arizona: Arizona Department of Transportation.
- [16] Jones, D., Liang, Y., & Harvey, J. (2017). *Performance Based Specifications: Literature Review on Increasing Crumb Rubber Usage by Adding Small Amounts of Crumb Rubber Modifier in Hot Mix Asphalt*. Sacramento: California Department of Transportation Division of Research, Innovation, and System Information.
- [17] Lo Presti, D. (2013). *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures literature review*. *Construction and Building Materials*, 20. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/257196093\\_Recycled\\_Tyre\\_Rubber\\_Modified\\_Bitumens\\_for\\_road\\_asphalt\\_mixtures\\_A\\_literature\\_review](https://www.researchgate.net/publication/257196093_Recycled_Tyre_Rubber_Modified_Bitumens_for_road_asphalt_mixtures_A_literature_review)
- [18] Sabita. (2009). *Sabita Manual 19 Guidelines for the design, manufacture and construction of bitumen rubber asphalt wearing courses*. Sabita.
- [19] Subhy, A. T. (2016). *Characterisation and development of rubberised bitumen and asphalt mixture based on performance-related req.* Nottingham: The University of Nottingham.
- [20] Way, G. B., Kaloush, K. E., & Biligiri, K. (2011). *Asphalt-rubber Standard Practice Guide*. Rubber Pavement Association.