

Primljen / Received: 15.7.2015.

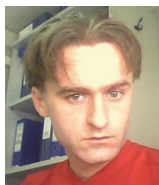
Ispravljen / Corrected: 21.2.2016.

Prihvaćen / Accepted: 27.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.7.2016.

Starenje vrućih asfaltnih mješavina

Autor:



Dr.sc. **Ivica Androjić**, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
ivica.androjić@gmail.com

Pregledni rad

Ivica Androjić

Starenje vrućih asfaltnih mješavina

U radu je dan pregled dosadašnjih istraživanja vezano za starenje proizvedenih vrućih asfaltnih mješavina i izvedenog asfaltnog sloja. Starenje asfalta događa se uslijed djelovanja vanjskih i unutarnjih čimbenika. Unutarnji čimbenici podrazumijevaju udio bitumena u mješavini, debljinu sloja bitumena oko zrna agregata, volumni udio šupljina te svojstva agregata i veziva. Detaljno su opisani svi utjecajni čimbenici na proces starenja veziva i asfaltnih mješavina te dio prisutnih modela koji se u današnje vrijeme koriste za predviđanje starenja proizvedenog i ugrađenog asfalta.

Ključne riječi:

starenje veziva, starenje asfaltnih mješavina, isparavanje, oksidacija, modeli za predviđanje starenja

Subject review

Ivica Androjić

Ageing of hot mix asphalt

An overview of current surveys related to the ageing of placed hot mix asphalt and asphalt pavement courses is presented in the paper. Asphalt ageing occurs as a result of external and internal factors. Internal factors include bitumen content in the mixture, thickness of bitumen layer enveloping aggregate grains, air void content, and properties of aggregates and binders. All factors affecting the ageing process of binders and asphalt mixtures are described in detail, including also some of the existing models that are presently used to predict ageing of produced and placed asphalt.

Key words:

binder ageing, ageing of asphalt mixture, volatilisation, oxidation, ageing prediction models

Übersichtsarbeit

Ivica Androjić

Alterung heißer Asphaltmischungen

In dieser Arbeit wird ein Überblick bisheriger Untersuchungen bezüglich Alterung hergestellter heißer Asphaltmischungen und ausgeführter Asphaltdecken gegeben. Zur Alterung von Asphalt kommt es durch die Einwirkung externer und interner Faktoren. Interne Einflüsse beziehen sich auf den Bitumenanteil in der Mischung, die Stärke der Bitumenschicht um das Gesteinskorn, den Volumenanteil an Poren, sowie die Eigenschaften von Gesteinskörnung und Bindemittel. Daher werden alle Einflussfaktoren in Bezug auf Alterungsprozesse von Bindemitteln und Asphaltmischungen, sowie ein Teil vorhandener Modelle, die heutzutage zur Voraussage der Alterung hergestellten und verbauten Asphalts angewandt werden, detailliert beschrieben.

Schlüsselwörter:

Alterung von Bindemitteln, Alterung von Asphaltmischungen, Verdunstung, Oxidation, Modelle zur Voraussage der Alterung

1. Uvod

Asfaltna mješavina dobivena vrućim zagrijavanjem sastavnih komponenti sadrži u svom udjelu mineralnu mješavinu, kameno brašno, bitumen i po mogućnosti razne dodatke. Primjena asfaltnih mješavina u cestogradnji prevladava u današnje vrijeme. U SAD-u je više od 4,186 milijuna kilometara popločenih cesta, od čega je čak 93 % asfaltirano [1]. U Europi se asfaltne mješavine između ostalog najčešće koriste u završnim slojevima konstrukcija [2]. Prosječna proizvodnja asfaltnih mješavina za razdoblje od 2007. do 2013. godine iznosila je 307,1 milijuna tona za područje Europe [3], a u SAD-u je to iznosilo čak više od 500 milijuna tona godišnje [1]. Tijekom toga dolazi do značajne potrebe za energijom od 85 kWh po proizvedenoj toni asfaltne mješavine [4] i nepovoljnog utjecaja na okoliš uslijed ispuštanja velikih količina plinova CO₂, CH₄ i N₂O [5].

Svake godine, kako navode neki autori, milijarde dolara se troše na izgradnju i održavanje asfaltnih konstrukcija. Bez obzira na znatan trošak, trajnost asfaltnih kolnika je od 10 do 20 godina, a onda dolazi do oštećenja od zamora, pojave temperaturnih i drugih pukotina [6]. Asfaltni kolnici se pretežito projektiraju na razdoblje trajanja do 20 godina, pri čemu se već u prvih pet godina počinju pojavljivati određene neispravnosti [7, 8]. U tablici 1. dan je prikaz procijenjene trajnosti asfaltnih kolnika prema različitim izvorima.

Tablica 1. Trajnost asfaltnih slojeva

Autori	Predviđena trajnost asfaltnih konstrukcija [god]
Michigan Concrete Association [9]	15,5
Babić [10]	10 – 20
EAPA [11]	20
CEDR (2014) [12]	20 - 30

Izloženost asfalta raznim utjecajnim čimbenicima u proizvodnji i tijekom uporabe dovodi do pojavljivanja kratkoročnog i dugoročnog starenja. Kratkoročno starenje pojavljuje se u miješalici ili bubnju uslijed kontakta zagrijanog agregata s vrlo tankim slojem bitumena. Osim u miješalici, kratkoročno starenje pojavljuje se i u drugim etapama proizvodnje i ugradnje. Dugoročno starenje asfaltnih kolnika događa se uslijed njihove izloženosti djelovanju vanjskih vremenskih uvjeta. Starenje se pojavljuje pri djelovanju unutarnjih i vanjskih varijabli. Unutarnje varijable obuhvaćaju svojstva materijala, asfaltne mješavine, veziva, udjela šupljina i debljine veziva oko agregata. Vanjske varijable uzimaju u obzir temperaturu miješanja, vanjske vremenske uvjete i dugoročno izloženost asfaltnih površina vremenskim uvjetima.

Mehanizam starenja asfalta sastoji se od lakog isparavanja, oksidacije i steričkog otvrdnjavanja. Lako isparavanje i oksidacija su posljedica promjene u molekularnoj strukturi, a steričko je otvrdnjavanje posljedica molekularne reorganizacije.

Do isparavanja dolazi uslijed rasta temperature tijekom proizvodnje, skladištenja, transporta i ugradnje vruće asfaltne mješavine. Temperature proizvedenog asfalta veće od 150 °C dovode do početka isparavanja određenih frakcija bitumena, pri čemu zagrijavanje za svakih dodatnih 10 do 12 °C može udvostručiti emisiju lakog isparavanja [13]. To dovodi do rasta vrijednosti viskoznosti bitumena za 150 do 400 % [14]. Do oksidacije asfalta dolazi uslijed reakcije kompleksnih organskih komponenti u bitumenu te atmosferskog kisika i UV zračenja. Oksidacija dovodi do povećanja krhkosti i pojavljivanja pukotina asfaltnog sloja [15]. Steričko otvrdnjavanje bitumena događa se na sobnoj temperature tijekom vremena, pri čemu dolazi do reorganizacije molekula u bitumenu [16]. Fizičko otvrdnjavanje rezultira rastom viskoznosti i pojavom volumnih kontrakcija.

Asfaltne mješavine se pretežito projektiraju sa 4-postotnim udjelom zračnih šupljina (3 do 5 %), ovisno o vrsti mješavine i njenoj namjeni. Pravilno izveden asfaltni kolnik sadržavat će 6 do 8 % zračnih šupljina nakon ugradnje i 3 do 5 % nakon određenog razdoblja uporabe [17]. Starenje asfaltnih slojeva dovodi do fizikalnih i mehaničkih promjena u bitumenu. Fizikalne promjene su smanjena duktilnost, penetracija, viša točka razmekšanja i paljenja, što je posljedica promjene veličine molekula veziva. Mehaničke promjene svojstava bitumena upućuju na rast mehaničkog i dinamičkog modula za čak 100 do 400 %, kako se navodi u [18].

Laboratorijsko simuliranje starenja asfalta usmjereno je na ubravanje starenja bitumena s obzirom na temperaturu, oksidaciju i fotodegradaciju. Uslijed toga uzima se u obzir i debljina bitumenskog filma oko zrna agregata i volumni udio šupljina u asfaltu. Ispitivanja se provode u različitim vremenskim intervalima za kratkoročno starenje (dani) te mjeseci za dugoročno starenje. Za simuliranje dugoročnog starenja najčešće se upotrebljava tlačna komora za ubrzano starenje (PAV) te termostatska komora s rotirajućim posudama (eng. *rolling thin-film oven* - RTFO) za kratkoročno starenje. RTFOT (eng. *rolling thin film oven tester* - RTFOT) je postupak ispitivanja u kojem se tanki sloj bitumena unutar boce izlaže temperaturi od 163 °C u trajanju od 85 minuta. PAV tretman podrazumijeva upotrebu komore zagrijane na 100 °C tijekom 20 sati pri pritisku od 2,07 MPa.

Cilj rada je dati pregled dosadašnjih istraživanja vezano za starenje bitumena i asfaltnih mješavina tijekom proizvodnje i uporabe. Istraživanjem se nastoji pokazati koji čimbenici mogu utjecati na starenje te na koji se način može povećati trajnost asfaltnih kolnika tijekom uporabe.

2. Utjecaj starenja na svojstva asfalta

Bitumen je smjesa organskih spojeva koji nastaju destilacijom nafte. Sastoji se od iznimno velikog broja kemijskih različitih molekula, što je dovelo do toga da ih kemičari do sada nisu razdvojili i utvrdili njihova svojstva [19]. U svojem sastavu sadrži ugljikovodik i kisikove spojeve s primjesom dušičnih i sumpornih spojeva. Naftni bitumen u svom sastavu može sadržavati oko 80-90 % atoma ugljika, do 11 % atoma vodika, do 1,1 % dušika,

približno do 5,5 % sumpora i drugih tvari za prikazane vrste bitumena [20]. Procjenjuje se da je svjetska upotreba bitumena oko 102 milijuna tona godišnje, od čega se 85 % koristi u cestogradnji, 10 % za natkrivanje krovova te 5 % za ostvarivanje vodonepropusnosti raznih građevnih materijala [21]. Maseni udio bitumena u vrućoj asfaltnoj mješavini kontinuiranog sastava može biti otprilike 3 do 8 % te minimalno 6 % za lijevani asfalt [22].

2.1. Lako isparavanje

Porast temperature asfalta tijekom proizvodnje, transporta i ugradnje dovodi do isparavanja određenih frakcija bitumena, što je karakterizirano kao kratkoročno starenje. Lako isparavanje asfalta vezano je s okolišnim uvjetima te UV zračenjem kao bitnim utjecajnim čimbenikom [23]. Isparavanje dovodi do degradacije asfaltnog kolnika rezultirajući rastom krutosti i negativnim utjecajem na funkcionalnu i strukturnu izvedbu kolnika. Lolly u svojem radu [24] istražuje utjecaj rasta temperature i vremena izlaganja bitumena visokim temperaturama. Dobiveni rezultati pokazuju da se najveći rast viskoznosti bitumena pojavljuje uslijed povećanja vremena izloženosti. Značajne promjene u dinamičkim modulima događaju se tijekom prvih nekoliko sati izloženosti povišenim temperaturama što dovodi do porasta kratkoročnog starenja veziva. Cui i dr. [25] analiziraju svojstva dvaju bitumena prilikom lakog isparavanja pri visokim temperaturama. Rezultati pokazuju da se težina bitumenskog veziva smanjuje uslijed njegovog izlaganja visokim temperaturama. Nakon određenog isparavanja dolazi do rasta točke razmekšanja i pada vrijednosti penetracije. Kuszewski i dr. [26] nastoje odrediti vrijednosti lakog isparavanja na 20 uzoraka bitumena. Početno ispitivanje izvedeno je na 50-gramskim uzorcima bitumena (debljine oko 2,5 cm) koji su grijani od 5 sati na 163 °C. Gubitci u masi uzorka uslijed isparavanja iznosili su od 0,01 do 0,14 %. Autori daljnje ispitivanje provode na 20 uzoraka bitumena pojedinačne mase od 12 grama te 6 mm debljine. Gubitci u masi uslijed isparavanja za drugu seriju kretali su se od 0,6 do 0,64 %. Provedeno ispitivanje dovodi do zaključka da smanjenje ispitne mase uzorka sa 50 na 12 g dovodi do četiri puta većeg gubitka mase uslijed lakog isparavanja. Autori Cui i dr. [27] istražuju isparavanje lakih organskih komponenti i ponašanje bitumenskih uzoraka. Uslijed toga se dobiveni rezultati uspoređuju s onima koji su dobiveni ispitivanjem uzoraka koji u svom sastavu sadrže SBS i aktivni ugljikov filer (punilo). Dobiveni rezultati pokazuju da kombinirano dodavanje 4 % SBS-a i 4 % aktivnog ugljikovog punila smanjuje emisiju lakog isparavanja ispitnih bitumenskih uzoraka, što u konačnici dovodi do povećanja otpornosti na deformaciju pri višim temperaturama.

2.2. Oksidacija

Organski složeni sastojci bitumena reagiraju s atmosferskim kisikom i UV zračenjem. Kao posljedica toga dolazi do

otvrdnjavanja površine, pojava pukotina i prodiranja kisika u te sastojke, što dovodi do oksidacije. Sung [28] istražuje oksidaciju 15 različitih vrsta veziva. Zaključuje da se oksidacija ne pojavljuje samo na površini kolnika već štetno utječe na cijelu dubinu konstrukcije. Vezivo u kolniku postaje tvrđe i krhkije na dubini presjeka do čak 15 cm. Hagos i dr. [29] navode da je zbog djelovanja velikog broja utjecaja na starenje teško u laboratoriju precizno simulirati starenje koje će se desiti tijekom uporabe. Također se navodi da postojeća laboratorijska ispitivanja starenja relativno dobro opisuju starenje za asfalte standardnih gustoća, što nije slučaj za porozne asfalte. Van Vilet i dr. [30] zaključuju da s porastom starenja dolazi do rasta kompleksnog modula i pada faznog kuta pri istraživanju poroznog asfalta. Količina osjetljivost bitumena biti na otvrdnjavanje uslijed oksidacije, značajno utječe njegovo podrijetlo, to jest njegova trajnost značajno ovisi o njegovom kemijskom sastavu [31]. Ta je ovisnost dokazana na pokusnoj dionici u SAD-u tijekom 1950. godine [32]. Dobiveni rezultati pokazuju da podrijetlo bitumena i njegov sastav značajno utječu na trajnost kolnika.

2.3. Steričko otvrdnjavanje

Steričko otvrdnjavanje odnosi se na otvrdnjavanje bitumena na sobnoj temperaturi pri čemu dolazi do reorganizacije molekula veziva [33]. Masson i dr. [33] navode da vrijeme između zagrijavanja, sipanja i ispitivanja mora biti minimalno 24 sata kako bi se ostvarila dobra ponovljivost ispitivanja svojstava bitumena. Guern i dr. [34] istražuju fizikalno-mehanička svojstva pet različitih tipova bitumena prije i nakon starenja. Bitumeni su izabrani temeljem podrijetla sirovine, načina prerade i karakteristika modifikacije. Cilj istraživanja je određivanje utjecaja starenja na kemijski sastav u odnosu na vrstu ispitnog veziva. Dobiveni rezultati pokazuju da se tijekom starenja udio asfaltena očekivano povećava u svim uzorcima te da njegova aglomeracija značajno ovisi o vrsti bitumena, što upućuje na to da prisutnost kristaliziranih frakcija ima značajan utjecaj na cjelokupan proces.

Na slici 1. prikazan je asfaltni zastor čija su svojstva dosegla granične uporabe vrijednosti.



Slika 1. Asfaltni zastor tijekom uporabe (granične uporabne vrijednosti)

3. Ispitivanje, modeli i tehnike protiv starenja

Mnoge se metode ispitivanja starenja bitumena u laboratoriju rade s ciljem ostvarenja što veće korelacije dobivenih rezultata u odnosu na terenske uzorke. Dije se na ispitivanja u pećnici te one izložene oksidaciji pod pritiskom. Kratkoročno starenje veziva vezano je za oksidaciju i gubitak hlapljivih komponenti. Za ispitivanje najčešće se primjenjuje pokus otvrdnjavanja u tankom filmu s horizontalnim rotiranjem (eng. *thin-film oven test* - TFOT), pokus otvrdnjavanja u tankom filmu s vertikalnim rotiranjem (eng. *rolling thin-film oven test* - RTFOT) i rotirajućom tikvicom (RFT-12607-3:2008 [35, 36]). Pokus otvrdnjavanja u tankom filmu s horizontalnim rotiranjem izvodi se na način da se 50-gramski bitumenski uzorak, unaprijed zadanih dimenzija (HRN EN 12607-2 [37]), stavi na odgovarajuću policu koja se nalazi u ventilirajućem sušioniku u kojem se održava temperatura od 163 °C. Polica se okreće brzinom od 5 do 6 okretaja u minuti u trajanju od 5 sati. Takav ostarjeli bitumen mora zadovoljiti zahtjeve glede minimalnog % zadržane penetracije ili maksimalne viskoznosti. Pokus otvrdnjavanja u tankom filmu s vertikalnim rotiranjem izvodi se tako da se zadani uzorak (HRN EN 12607-1 [38]) u osam bočica pojedinačne težine 35 g bitumena izlaže djelovanju zagrijanog zraka na temperaturi 163 °C u trajanju od 85 minuta. Ta metoda simulira starenje veziva tijekom miješanja, transporta i ugradnje asfalta. Cilj ispitivanja je određivanje svojstava bitumena prije i nakon ispitivanja te promjena u masi uzorka [39].

Najznačajnije metode za ispitivanje dugoročnog starenja su primjena tlačne komore za starenje (eng. *pressurized aging vessel* - PAV), PAV-HRN EN 14769 [40] i metode s rotirajućim cilindrom (eng. *rotating cylinder aging test* - RCAT), RCAT - HRN EN 15323:2008, [41]. Postupak ispitivanja (PAV) uključuje prethodno očvršćivanje bitumena (RTFOT ili TFOT) nakon čega slijedi izlaganje bitumenskog uzorka mase 50 g, 140 mm promjera i 3,2 mm debljine kontroliranim uvjetima. Uzorak se izlaže zraku pod pritiskom od 2,1 MPa pri temperaturi od 85 °C (65 sati), 90 °C (20 sati), 100 °C (20 sati) ili 110 °C u trajanju od 20 sati. Metoda s rotirajućim cilindrom (RCAT) je razvijena za simuliranje kratkoročnog i dugoročnog starenja. Prije izlaganja ispitnog uzorka dugoročnom starenju potrebno je uzorak izložiti uvjetima da se ostvari kratkoročno starenje. To se može ostvariti primjenom RTFOT metode, TFOT metode ili direktno metodom s rotirajućim cilindrom (RCAT) što uvelike olakšava postupak ispitivanja.

3.1. Modeli starenja

Mnoga istraživanja upućuju na razvijene empirijske ili poluempirijske modele koji uzimaju u obzir ponašanje materijala u kemijskom, fizikalnom, matematičkom i drugom smislu. Prema Vallerga i dr. [42], na vremensko otvrdnjavanje bitumena utječe oksidacija, hlapljivost, polimerizacija, tiksotropija, sinereza i separacija. Jedan od prijašnjih modela jest uveden indeks starenja (eng. *aging index* - AI) koji uključuje ispitivanje

viskoznost bitumena [43] prije i nakon njegove izloženosti temperaturi od 107 °C u trajanju od 2 sata:

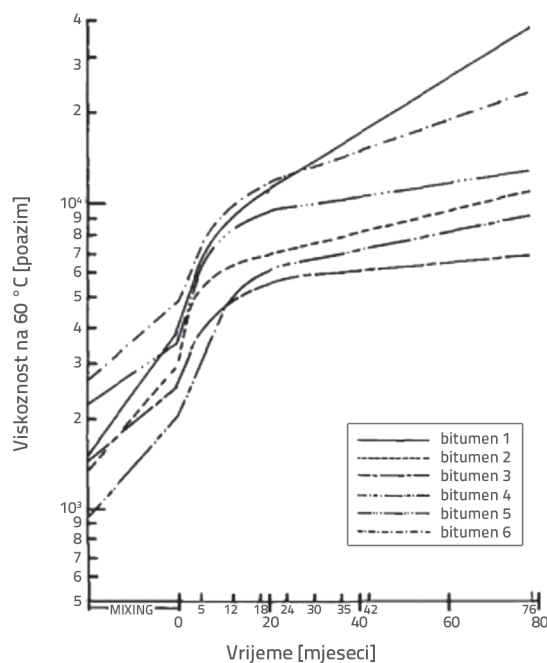
$$AI = \frac{\eta_A}{\eta_B} \quad (1)$$

gdje je:

η_A - viskoznost nakon tretmana

η_B - viskoznost prije tretmana.

Na slici 2. prikazana je vrijednosti promjena vrijednosti viskoznosti za određene ispitne uzorke prema ispitivanju Kandala i dr. [44].



Slika 2. Viskoznost testnih uzoraka [44], $P = \text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, poise

Iz slike 2. vidljivo je da vrijednost viskoznosti bitumena značajno raste u fazi miješanja sastavnih komponenti asfaltnih mješavina te u početnom periodu uslijed ugradnje. Lee [45] istražuje promjene u reološkim i kemijskim svojstvima za osam različitih bitumena tijekom 48 mjeseci uporabe. Usporedno s tim provedeno je ispitivanje u laboratoriju na uzorcima bitumena identičnog sastava. Rezultati studije upućuju na sljedeću hiperboličnu zavisnost fizikalnih svojstava:

$$\log(T_1) = \frac{T_f}{a + bT_f} \quad (2)$$

gdje je

T_1 - vrijeme potrebno da se ostvari određeno svojstvo u laboratoriju

T_f - vrijeme na terenu potrebno da se ostvari određeno svojstvo.

Benson [46], između ostalog, istražuje faktore koji utječu na otvrdnjavanje bitumena i prikazuje model za predviđanje

otvrdnjavanja veziva u funkciji vremena za viskoznost (V) i penetraciju (P):

$$V = at^n \quad (3)$$

$$P = a + b \ln(t) = a \quad (4)$$

Tu se pojavljuju i mnogi drugi autori [47-49] koji sa svojim modelima starenja predviđaju svojstva korištenih veziva asfalta i mješavina. Prema Robertsu i suradnicima [20], vrijednost vremenskog otvrdnjavanja, uz indeks starenja, može se izraziti i pomoću postotka zadržane penetracije (Pzp):

$$P_{zp} = \frac{\text{Penetracija}_{\text{starog}} \text{ bitumena}}{\text{Penetracija}_{\text{svježeg}} \text{ bitumena}} \times 100 \quad (5)$$

Zbog starenja dolazi do smanjivanja vrijednosti penetracije. Prema prikazanim modelima dolazi se do zaključka da vrijednost penetracije manja od 20 može dovesti do pojave ozbiljnijih pukotina. Bitumen se smatra otpornim na pojavu pukotina ako mu je vrijednost penetracije viša od 30 [44].

3.2. Tehnike protiv starenja

Oksidacija veziva dovodi do otvrdnjavanja bitumena tijekom proizvodnje, ugradnje i uporabe ceste. Antioksidansi varijabilnog sastava upotrebljavaju se da bi se umanjilo otvrdnjavanje i povećala trajnost bitumena u mješavini. Dodavanje polietilenskog otpada i gume u asfaltnu mješavinu omogućuje apsorpciju lakih frakcija bitumena, što omogućuje veću otpornost veziva prema starenju [50]. Primjena toplih asfaltnih mješavina također povećava trajnost i otpornost prema starenju jer dolazi do smanjenja oksidacije i lakog isparavanja uslijed snižavanja proizvodnih temperatura. Tople asfaltnje mješavine se proizvode pri temperaturi približno do 135 °C [51], što je znatno niže od proizvodne temperature vruće asfaltnje mješavine (>160 °C).

Iwanski i dr. [52] navode da su tijekom rekonstrukcije ceste (Kielce, Poljska) u asfaltnu mješavinu SMA dodali 30 % vapna u zamjenu za dio kamenog brašna. Nakon nekoliko godina, ispitivanja veziva pokazuju da dodatak hidratiziranog vapna povećava otpornost veziva na starenje, što omogućuje ostvarivanje bolje otpornosti bitumenske mješavine na prisutnost vode i smrzavanje.

Zafari i dr. [53] istražuju primjenu nanosilicija kao aditiva za povećanje otpornosti protiv starenja asfaltnog veziva. Izdvojeni bitumen izlaže se kratkotrajnom zračenju upotrebom RTFO uređaja. Dobiveni rezultati pokazuju da nanosilicij kao dodatak bitumenu povećava vrijednosti kompleksnih modula i viskoznost veziva te da njegova primjena poboljšava otpornost veziva na starenje, kolotraženje i dr.

Lesueur i dr. [54] pokazuju da se hidratizirano vapno ponaša kao aktivno punilo u asfaltnoj mješavini koje smanjuje kemijsko starenje bitumena i ukružuje ga više nego normalno kameno brašno iznad sobne temperature.

Autori Edwards i dr. [55] analiziraju utjecaj dodatka voska u cestograđevni bitumen oznake 160/220 i njegov utjecaj na starenje veziva. Promjene u reološkim svojstvima voskom modificiranog bitumena zavise od vrste korištenog bitumena i tipa te količine dodanog voska. Autori navode da dodatak voska nema pozitivan utjecaj na svojstva otpornosti bitumena protiv starenja.

U današnje vrijeme dosta je izražena usmjerenost na korištenje što većeg udjela recikliranog asfalta u proizvodnji novih asfaltnih mješavina. Kao jedan od nedostataka pri korištenju velikog udjela recikliranog asfalta jest povećanje krutosti ukupnog veziva u mješavini, što može dovesti do smanjenja ukupne trajnosti asfaltnog sloja. Da bi se taj problem minimalizirao, koriste se mekša veziva radi ostvarenja traženih svojstava ukupnog veziva, smanjuje se udio šupljina s ciljem povećanja udjela veziva u sloju te se koriste tzv. pomlađivači (Rejuvenator) koji služe za povrat osnovnih fizikalnih i kemijskih svojstava [56]. Ti pomlađivači često u svom sastavu sadrže ulja za podmazivanje s visokim udjelom maltena, pa ih osnovni bitumen gubi tijekom uporabe. Učinak pomlađivača ovisi o ujednačenosti dodatka unutar reciklirane mješavine i o difuziji pomlađivača unutar ostarjelog veziva oko agregata. Zauimanis i dr. [57] istražuju primjenu šest različitih vrsta pomlađivača koji su dodani u uzorak ekstrahiranog veziva. Primjena pomlađivača pokazala je da oni dovode do razmekšanja ekstrahiranog veziva te da snižavaju optimalnu temperaturu zbijanja za 15 do 25 °C u odnosu na ekstrahirano vezivo.

4. Zaključak

Tijekom proizvodnje, transporta i ugradnje asfaltnje mješavine dolazi do kratkoročnog starenja bitumena. Dugoročno starenje veziva događa se tijekom uporabe asfaltnog kolnika kada na bitumen djeluju razni vanjski utjecaji. Starenje bitumena se događa pri djelovanju vanjskih i unutarnjih varijabli, pri čemu unutarnje varijable obuhvaćaju svojstva materijala, mješavine, veziva, šupljina i dr. Vanjske varijable obuhvaćaju temperaturu mješavine, vanjske vremenske uvjete te dugoročnu izloženost asfaltnih površina vremenskim uvjetima. Mehanizam starenja bitumenske mješavine sastoji se od lakog isparavanja, oksidacije i steričkog otvrdnjavanja. Do isparavanja dolazi tijekom zagrijavanja bitumena u proizvodnji, skladištenja, transporta i ugradnje vruće asfaltnje mješavine. Oksidacija bitumena se pojavljuje kao reakcija kompleksnih komponenti bitumena s atmosferskim kisikom i UV zračenjem. Steričko otvrdnjavanje nastaje uslijed reorganizacije molekula veziva tijekom otvrdnjavanja bitumena na sobnoj temperaturi.

Metode ispitivanja starenja dijele se na ispitivanja u pećnici te one izložene oksidaciji pod pritiskom. Za ispitivanje kratkoročnog starenja najčešće se koristi pokus otvrdnjavanja u tankom filmu s horizontalnim rotiranjem, pokus otvrdnjavanja u tankom filmu s vertikalnim rotiranjem i rotirajućom tikvicom. Najznačajnije metode za ispitivanje dugoročnog starenja su primjena tlačne komore za starenje i metoda s rotirajućim cilindrom. Cilj je takvih

laboratorijskih ispitivanja starenja ostvariti što veću korelaciju dobivenih rezultata u odnosu na terenske uzorke.

Da bi se smanjio negativan utjecaj starenja na svojstva asfaltnih mješavina, primjenjuju se razni antioksidansi, proizvode se tople asfaltnje mješavine te se koriste razni dodatci u proizvodnji

koji sprečavaju gubitak dijela hlapljivih tvari iz proizvedenog i ugrađenog asfalta. Primjenjuju se asfaltnje mješavine i proizvodnji koje iziskuju niže temperature spravljanja, pri čemu dolazi do ušteda u utrošku toplinske energije i smanjenog starenja bitumena te produžene trajnosti izvedenog kolnika.

LITERATURA

- [1] Engineering Overview, NAPA, Dostupno na stranici: https://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=33 (14.06.2014.)
- [2] Tušar, A., Avsenika, L.: Increasing the Percentage of Recycled Asphalt, Transport Research Arena 2014, Paris,
- [3] Asphalt.in.figures.2013, Dostupno na stranici: [http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt %20in %20Figures/AIF_2013_Final.pdf](http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF_2013_Final.pdf) (5/26/2015)
- [4] Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixes, European Asphalt Pavement Association, Asphalt.in.figures, EPA, ... (online). <http://www.eapa.org/asphalt.php> (Pristup 18.11.09)
- [5] Peng, B., Cai, C., Yin, G., Li, W., Zhan, Y.: Evaluation system for CO₂ emission of hot asphalt mixture, Journal of traffic and Transportation Engineering, Volume 2, pp. 116-124
- [6] Han, R.: Improvement to a transport Model of Asphalt Binder Oxidation in Pavements: Pavement Temperature Modeling, Oxygen Diffusivity in Asphalt Binders and Mastics, and Pavement Air Void Characterization, ožujak 2011, UHI Number: 3471283
- [7] Huang, Y.H.: Pavement Analysis and Design. 2nd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, ISBN 0-13-142473-4, pp. 785, 2004.
- [8] Morosiuk, G., Riley, M.: Modelling Road Deterioration and Works Effects in HDM-4. In: Highway development & Management, World Road Association, 6 (2004), pp. 296.
- [9] Michigan Concrete Association, dostupno online: www.miconcrete.org/node/9 (21.12.15)
- [10] Babić, B.: Projektiranje kolničkih konstrukcija, Zagreb, 1997. ISBN 953-96085-9-7
- [11] Long-Life Asphalt Pavements-Technical version (2007) EPA European Asphalt Pavement Association
- [12] CEDR Transportational Road Research Programme Call 2012: Recycling Road construction in a post-fossil fuel society, veljača 2014
- [13] Read, J., Whiteoak, D.: The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford, 2003.
- [14] Bell, A.: Summary report on the aging of asphalt-aggregate systems, Transportation Research Board, 10 (1989), pp. 1-121.
- [15] Petersen, J. C.: A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships, Transportation Research E-Circular, 1 (2009), Transportation Research Board.
- [16] Masson, J.F., Collins, P., Polomark, G.: Steric hardening and the ordering of asphaltenes in bitumen, Energy and Fuels, 19 (2005) 1, pp. 120-122.
- [17] NCHRP Report: A manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary, Transportation Research Board, Washington, 673 (2011).
- [18] Abbas, A., Choi, B.C., Masad, E., Papagiannakis, T.: The influence of laboratory aging method on the rheological properties of asphalt binders, Journal of Testing and Evaluation, 30 (2002), pp. 171-176, <http://dx.doi.org/10.1520/JTE12304>
- [19] A review of the fundamentals of Asphalt Oxidation, Transportation Research Circular, Number E-C140, 2009, Transportation Research Board of the National Academics
- [20] Roberts, L.F., Kanthal, S.P., Brown, R.E., Lee, Y.D., Kennedy, W.T.: Hot Mix Asphalt materials, mixture design, and construction. NAPA Education Foundation, Lanham Maryland, 1996.
- [21] Eurobitume, dostupno online: <http://www.eurobitume.eu/bitumen/what-bitumen>, (pristup 19.12.15)
- [22] Razrada tehničkih svojstava i zahtjeva za građevne proizvode za proizvodnju asfaltnih mješavina i za asfaltnje slojeve kolnika, Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb, lipanj 2013.
- [23] Man, Y., Shaopeng, W., Meizhu, C.: Experimental Investigation of the Volatilization of Asphalt under Different Conditions, Advanced Materials Research, 463-464 (2012), pp. 69-75, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.463-464.69>
- [24] Lolly, R.: Evaluation of Short Term Aging Effect of Hot Mix asphalt Due to Elevated Temperatures and Extended Aging Time, Arizona State University, 2013.
- [25] Cui, P.Q., Zhang, H.H., Wu, S.P.: Influence of High-Temperature Volatilization on Performance of Bituminous Binder, Key Engineering Materials, 599 (2014), pp. 164-167, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.164>
- [26] Kuszewski, J.R., Gorman, W.B., Kane, E.G.: Characterization of asphalt volatility using TGA and Iatroscan analyses, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roofing Technology
- [27] Cui, P., Wu, S., Li, F., Xiao, Y., Zhang, H.: Investigation on Using SBS and Active Filler to Reduce the VOC Emission from Bituminous Materials, Materials, 7 (2014), pp. 6130-6143, <http://dx.doi.org/10.3390/ma7096130>
- [28] Sung, H. J.: The effects of asphalt binder oxidation on hot mix asphalt concrete mixture rheology and fatigue performance, Texas A&M University, 2006.
- [29] Hagos, E.T., Molenaar, A.A.A., Van de Ven, M.F.C.: Chemical characterization of laboratory and field bitumen aging in Porous Asphalt Concrete, Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials-Loizos, Partl, Scarpus & Al-Qadi (eds), Taylor&Francis Group, London, 2009.
- [30] Van Vliet, D., Erkens, S., Leegwater, G.A.: Characterization of Long Term Field Aging of Polymer Modified Bitumen in Porous Asphalt, 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements RILEM Bookseries, 4 (2012), pp. 889-899, http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_86
- [31] Petersen, J.C.: Chemical Composition of Asphalt as Related to asphalt Durability: State of the Art in Transportation Research Record 999, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1984., pp.13-30

- [32] Hveem, F.N., Zube, E., Skog, J.: Progress Report On the Zaca-Wigmore Experimental Asphalt Test Project. Special Technical Publication, American Society for Testing Materials, 277 (1959), pp. 1-45
- [33] Masson, J.F., Collins, P., Polomark, G.: Steric hardening and the ordering of asphaltene in bitumen, *Energy and Fuels*, 19 (2005) 1, pp. 120-122.
- [34] Guern, M.L., Chailleux, E., Farcas, F., Dreessen, S., Mabile, I.: Physico-chemical analysis of five hard bitumens: Identification of Chemical species and molecular organization before and after artificial aging, *Fuel*, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.04.035>
- [35] HRN EN 12607-3:2008 Bitumen i bitumenska veziva -- Određivanje otpornosti na otvrdnjavanje djelovanjem topline i zraka -- 3. dio: RFT metoda (EN 12607-3:2007)
- [36] Airey, G.D.: State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 2003., pp. 165-176, <http://dx.doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- [37] HRN EN 12607-2: Bitumen i bitumenska veziva - određivanje otpornosti na otvrdnjavanje djelovanjem topline i zraka - 2.dio: TFOT metoda (EN 12607-2:1999) : bitumen and bituminous binders - determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air - part 2 : TFOT method (EN 12607-2:1999).
- [38] HRN EN 12607-1:2008 Bitumen i bitumenska veziva -- Određivanje otpornosti na otvrdnjavanje djelovanjem topline i zraka -- 1. dio: RTFOT metoda (EN 12607-1:2007)
- [39] Rana, A.Y., Ratnasamy, M., Salihudin, H., Fauzan, J., Eltahir, A.: An overview of quantification of fatigue resistance of asphalt mixture using pre-aged Binder, *WALIA journal*, 31 (20-15) S1, pp. 125-132
- [40] HRN EN 14769-2012 Bitumen i bitumenska veziva -- Postupak oponašanja ubrzanoga dugotrajnog starenja uporabom tlačne komore (PAV) (EN 14769:2012)
- [41] HRN EN 14769-2012 Bitumen i bitumenska veziva -- Određivanje ubrzanog dugotrajnog starenja metodom s rotirajućim cilindrom (RCAT) (EN 15323:2007)
- [42] Vallerger, B.A., Monismith, C.L., Granthem, K.: A study of Some Factors Influencing the Weathering of Paving Asphalt, *Proceedings AAPT*, 26 (1957)
- [43] Griffin, R.L., Miles, T.K., Penther, C.J.: Microfilm durability test for asphalt, *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, 34 (1955), pp. 31
- [44] Kandhal, P.S., Sandvig, L.D., Koehler, W.C., Wenger, M.E.: Asphalt Viscosity – Related Properties of In-Service Pavements in Pennsylvania, *Astm, Special Technical Publication*, 532 (1973)
- [45] Lee, D.: Asphalt durability correlation in Iowa, *Transportation Research Record*, 468 (1973), pp. 43-60.
- [46] Benson, P.E.: Low temperature transverse cracking of asphalt concrete pavements in central and west Texas. *Texas Transportation Institute, Texas A&M University*, 1976.
- [47] Shiau, J., Tia, M., Ruth, B., Page, G.: Evaluation of aging characteristics of asphalts by using TFOT and RTFOT at different temperature levels, *Transportation Research Board*, Washington, DC, 1342 (1992), pp. 58-66.
- [48] Huh, J., Robertson, R.: Modeling of oxidative aging behavior of asphalts from short-term, high-temperature data as a step toward prediction of pavement aging, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1535(1996), pp. 91-97, <http://dx.doi.org/10.3141/1535-12>
- [49] Chen, J., Huang, L.: Developing an aging model to evaluate engineering properties of asphalt paving binders. *Materials and Structures*, 33 (2000), pp. 559-565, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480536>
- [50] Fernández-Gómez, W.D., Quintana, H.R., Lizcano, F.R.: A review of asphalt and asphalt mixture aging, *Ingenieria e investigacion*, 33(2013) 1, pp. 5-12.
- [51] Rukavina, T., Dragčević, V., Ožbolt, M.: Posebne asfaltnje mješavine i postupci, *Dani prometnica*, 2008.
- [52] Iwanski, M., Mazurek, G.: Hydrated lime as the Anti-aging Bitumen Agent, *Procedia Engineering*, 57 (2013), pp. 424-432, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.055>
- [53] Zafari, F., Rahi, M., Moshtagh, N., Nazockdast, H.: The Improvement of Bitumen Properties by adding Nanosilica, *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*, 3 (2004).
- [54] Lesueur, D., Petit, J., Ritter, H.J.: The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state of the art review, *Road Materials and Pavement Design*, 14 (2013) 1, pp. 1-16, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>
- [55] Edwards, Y., Tasdemir, Y., Isacsson, U.: Influence of Commercial Waxes on Bitumen Aging Properties, *Energy Fuels*, 19 (2005) 6, pp. 2519-2525
- [56] Effect on Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mixtures with high RAP and RAP and RAS Contents, *NCAT Report 12-05*, lipanj 2012
- [57] Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R.: Use of rejuvenators for production of sustainable high content RAP Hot Mix Asphalt, *The XXVIII International Baltic Road Conference*