

## Environmental engineering Aplinkos inžinerija

# ATNAUJINANČIŪJŲ MEDŽIAGŲ POVEIKIS PASENDINTO POLIMERAIS MODIFIKUOTO KELIŲ BITUMO PENETRACIJAI IR MINKŠTĖJIMO TEMPERATŪRAI

Audrius VAITKUS , Indrė PALIONYTĖ \*, Rita KLEIZIENĖ 

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2021 m. birželio 21 d.; priimta 2021 m. rugsėjo 3 d.

**Santrauka.** Straipsnyje aprašomas polimeru modifikuoto kelių bitumo regeneravimo dviejų rūšių atnaujinančiosiomis medžiagomis efektyvumas. Pasirinktos dvi alternatyvios atnaujinančiosios medžiagos – aromatinė alyva Nygen 910 ir minkštasis kelių bitumas V12000. Tirtas PMB 45/80-55 bitumas, kuris naudojamas asfalto dangos viršutiniuose ir apatiniuose sluoksniuose. Asfalto dangos eksploatacijos metu dėl saulės UV radiacijos, temperatūros ir aplinkos deguonies poveikio asfalto viršutinis sluoksnis pasiekia didžiausią senėjimo laipsnį iš visų konstrukcijos sluoksnių. Bitumo senėjimui laboratorijos sąlygomis imituoti atliktas trumpalaikis ir pagreitintas ilgalaikis sendinimas. Siekiant nustatyti optimalų atnaujinančiosios medžiagos kiekį eksperimentai atlikti su 8 %, 10 % ir 14 % atnaujinančiosios medžiagos nuo bitumo masės. Atnaujinančiųjų medžiagų poveikis vertintas tiriant pagrindines bitumo fizikines savybes: penetraciją ir minkštėjimo temperatūrą. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad aromatinė alyva yra daugiau nei 2,5 karto efektyvesnė nei minkštasis bitumas.

**Reikšminiai žodžiai:** asfalto mišinys, atnaujinančiosios medžiagos, bitumas, fizikinės savybės, Nygen 910, regeneravimas, V12000.

## Įvadas

Lietuvoje yra 15 418,056 km valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga (Lietuvos automobilių kelių direkcija prie susisiekimo ministerijos, 2021). Šiomis dienomis viena iš sunkiausių problemų, su kuria susiduria miestų ir kelių inžinieriai, yra asfalto eksploatacinių savybių praradimas, jos sudaro didelę dalį išlaidų. 2021 metų Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimu pagal kelių priežiūros ir plėtros programą kelių priežiūrai ir remontui skirta 531 mln. eurų. Asfalto dangų eksploatacijos metu bitumas sensta (t. y. oksiduojasi, kietėja, blogėja funkcinės savybės) ir tampa nebetinkamas eksploatacijai. Natūrali bitumo oksidacija vyksta tik pirmuose (1–2) asfalto dangos centimetruose veikiant saulei ir orui. PMB 45/80-55 bitumas prieš 10–15 metų buvo dažniausiai naudojamas asfalto viršutiniuose sluoksniuose, kadangi dauguma kelių projektuojami 20 metų projektiniam laikotarpiui, remonto poreikis šiems keliams didėja. Siekiama padidinti asfalto atsparumą ir prailginti eksploatacijos trukmę, pagerinti bitumo savybes. Todėl tyrime siekiama nustatyti dviejų skirtingų atnaujinančiųjų medžiagų poveikį polimeru modifikuoto kelių bitumo savybių pokyčiui. Tyrimo objektas – polime-

ru modifikuoto kelių bitumo savybių atkūrimas panaudojant atnaujinančiąsias medžiagas.

## 1. Mokslinės literatūros analizė

Bitumo senėjimas vyksta ir jo gaminimo metu (perdirbimo gamykloje), sandėliuojant, transportuojant, maišant asfaltą, pervežant ir tankinant asfalto mišinį, taip pat dėl poveikio aplinkai eksploataavimo metu. Bitumą eksploataavimo laikotarpiu veikia įvairūs veiksniai nuo transporto priemonių apkrovų iki natūralių gamtos reiškinių. Intensyviausias bitumo senėjimo procesas vyksta asfalto gamykloje bitumą sumaišius su įkaitintomis mineralinėmis medžiagomis ir kurį laiką asfalto mišinį maišant nustatytoje temperatūroje. Tuo metu temperatūra yra aukščiausia ir bitumo plėvelė yra ploniausia. Lengviausias bitumo frakcijos pradeda garuoti ir vyksta intensyvi bitumo oksidacija, t. y. bitumas kietėja (senėja). Oksidacija yra sudėtingas cheminis ir fizikinis procesas, kuris priklauso nuo deguonies, aukštos temperatūros, mineralinių medžiagų paviršiaus bei bitumo plėvelės storio (Read ir Whiteoak, 2003; Petersen, 1984). Bitumo komponentinę

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [indre.palionyte@stud.vilniustech.lt](mailto:indre.palionyte@stud.vilniustech.lt)

sudėtį galima išskirti į dvi plačias grupes: maltenus ir asfaltenu (Read ir Whiteoak, 2003). Maltenai suteikia takumo ir plastiškumo, o asfaltenu yra kietoji dalelė. Bet koks disbalansas ar dalelių atskyrimas sukelia asfaltų senėjimą ir suirimą (Durante, 2020). Dėl bitumo senėjimo proceso ir atitinkamai padidėjusio klampumo asfalto dangos konstrukcijos standumas padidėja eksploataciniu laikotarpiu. Pirmasis senėjimo apibūdinimas yra pateikiamas atsižvelgiant į bendrą procesą (angl. *mechanism*), kai dalis malteno virsta asfaltenu faze, todėl asfaltenu kiekis didėja, o maltenų mažėja (Loise et al., 2019). Maltenai yra n-alkane (pentanas arba heptanas) tirpūs asfalto molekuliniai komponentai, tai likučiai, likę po to, kai naftos perdirbimo gamyklos pašalina iš žalios naftos kitus naudingus darinius, tokius kaip benzinas ir žibalas. Asfaltenu junginiai yra kitas pirminis asfalto komponentas (Brownridge, 2010). Šio proceso metu dėl stipresnės poliarinės ir polinės sąveikos tarp asfaltenu didėja klampumas ir mažėja elastingumas (Loise et al., 2019). Kai asfaltenu molekulės nėra pakankamai judrios, kad veikiamos apkrovos galėtų prasilenkti, bituminio rišiklio atsparumas įtrūkimams mažėja (Petersen, 1984). Tačiau senėjimas, remiantis Loise ir kt. (2019), yra sudėtingesnis ciklas, apimantis skirtingus procesus, paprastai vykstančius skirtingais laiko tarpais. Ilgalaikis senėjimas, remiantis Roberts et al. (1996), yra skirtingų procesų padarinys (1 paveikslas).

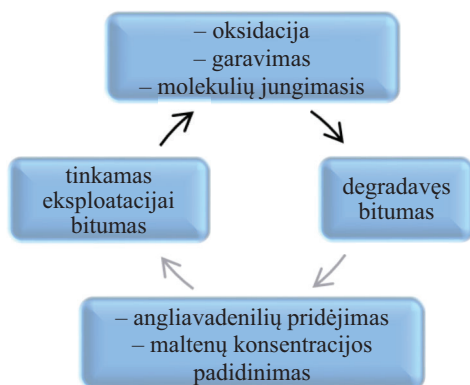
Remiantis Adeola et al. (2019), vienas didžiausių iššūkių – naftos ir dujų produktų atkūrimas iš netradicinių išteklių, tokių kaip sunkioji nafta, skalūnų dujos ir skysčiai, suslėgtosios dujos, anglies sluoksniu metanas ir bituminiai angliavandeniliai, dėl fizikinių, cheminių bei geologinių jų savybių. Atnaujinančioji medžiaga apibrėžiama kaip medžiaga, galinti atkurti pirmines bitumo reologines savybes. Todėl daroma prielaida, kad pagrindinis atnaujinančiosios medžiagos poveikis turėtų būti mažesnis standumas ir didesnis elastingumas. Pirmasis žingsnis siekiant atkurti pirmines bitumo reologines savybes yra grąžinti santykį tarp asfaltenu ir maltenų (Durante, 2020). Išskiriamos dvi rūšys atnaujinančiųjų medžiagų – biologinės bei pagamintos naftos pagrindu. Biologinės atnaujinančiosios medžiagos neturi maltenų, o cheminė reakcija tarp bio-

loginių produktų ir asfalto sustiprina maltenų ir asfaltenu atsiskyrimą, kuris jau vyksta dėl senstančios asfalto dangos oksidacijos. Biologinės atnaujinančiosios medžiagos tiesiog sukelia jau išseiktų maltenų, likusių sendintame asfalto rišiklyje, tirpinimo procesą, o ne papildo juos tikra atstatomąja chemija. O pagamintos naftos pagrindu atnaujinančiosios medžiagos gali atkurti tinkamą cheminę pusiausvyrą tarp molekulinų komponentų, nes juose yra maltenų. Pagal Karlsson ir Isacson (2006) atnaujinančiosios medžiagos turėtų atkurti panaudoto rišiklio savybes iki tinkamų statybai ir kelio dangos charakteristikoms, tuo pačiu metu gerinti chemines savybes atsižvelgiant į patvarumą. Atnaujinančioji medžiaga taip pat turi būti ir kaip papildoma rišamoji medžiaga siekiant pagerinti bet kurį naują užpildą, pridėtą į panaudotą mišinį, ir atitikti mišinio konstrukcijos reikalavimus. Be to, atnaujinančiosios medžiagos turėtų lengvai išsiskirstyti sename rišiklyje tolygiai nuo maišymo iki maišymo, kad atnaujintas rišiklis būtų patogus naudoti. Tačiau kiekviena atnaujinančioji medžiaga gali veikti skirtinguose procesuose.

Bitumo atnaujinimo procesas yra aktuali tema, susijusi su karšto regeneravimo panaudojimo technologijos kelyje ir pakartotino asfalto panaudojimo technologijomis, kur sendinto bitumo savybės gali būti daugiau arba mažiau atkurtos pridėdant atitinkamą kiekį atnaujinančiosios medžiagos. Įvairios medžiagos naudojamos bitumui atnaujinti siekiant sumažinti klampumą ir standumą. Kadangi bitumo senėjimas yra susijęs su skirtingais fizikiniais ir cheminiais mechanizmais (oksidacija, garavimas, struktūriniai pokyčiai), įvairios atnaujinančiosios medžiagos naudojamos bitumo minkštėjimo temperatūrai pagerinti, struktūros savybėms atkurti (Loise et al., 2019).

Atnaujinančiosios medžiagos kiekio parinkimas yra esminis žingsnis siekiant efektyviai atkurti sendinto bitumo savybes. Jei priedo kiekis bus per mažas, atkurti bitumo savybių gali nepavykti, o jei per didelis, bitumas tampa per minkštas ir padidina provėžų atsiradimo tikimybę. Todėl labai svarbu nustatyti optimalų atnaujinančiosios medžiagos kiekį, kad būtų pasiektos reikalingos bitumo savybių charakteristikos (Pradhan ir Sahoo, 2019). Siekiant nustatyti atnaujinančiosios medžiagos kiekį, kad būtų pasiektos atitinkamos reikšmės (penetracijos indeksas, klampumo laipsnis, eksploatacinis laipsnis), taikomi įvairūs kriterijai, tokie kaip klampumas aukštoje temperatūroje (Romera et al., 2006; Zaumanis et al., 2014), eksploatacinės savybės (Im et al., 2014; Mogawer et al., 2013). Shen et al. (2005) ir Chen et al. (2014) atliko tyrimus naudodami fizikines ir reologines atnaujintų ir pirminių bitumų savybes, kad nuspręstų, koks priedo kiekis yra efektyvus.

Didžioji dalis tyrimų, susijusių su bitumo atnaujinimu, atliekami nmodifikuotam bitumui. Trūksta tyrimų ir informacijos apie polimerais modifikuoto bitumo atnaujinimo procesus, todėl šiuo tyrimu siekiama nustatyti polimerais modifikuoto bitumo atnaujinimo efektyvumą. Oksidacijos procesų paveikto naudoto asfalto mišinio bitumo atnaujinimas dažniausiai atliekamas įmaišant minkštojo bitumo, tačiau galima pasiekti ir didesnę efektyvumą panaudojant kitas atnaujinančiąsias medžiagas.



1 paveikslas. Bitumo degradavimo ir atnaujinimo procesas  
Figure 1. Bitumen degradation and regeneration process

## 2. Tyrimo objektas ir metodai

Bandymai atlikti su PMB 45/80-55 bitumu, kurio reglamentuojamos charakteristikos pateikiamos 1 lentelėje. Bitumui atnaujinti naudotos dvi medžiagos: minkštasis bitumas V12000 ir aromatinė alyva Nygen 910 (2 paveikslas). Bitumui ir atnaujinančiajai medžiagai maišyti naudotas įrenginys Silverson L5M-A. Tolygiam bitumo ir naudojamų medžiagų išmaišymui užtikrinti naudotas specialus maišymo antgalis, kuris maišymo metu gali pasiekti 8000 rpm greitį. Maišymai atlikti su trimis kiekiais atnaujinančiosios medžiagos: 8 %, 10 %, 14 %.

1 lentelė. Bitumo charakteristikos (LST EN 12591:2009)  
Table 1. Bitumen characteristics (LST EN 12591:2009)

Charakteristikos	PMB 45/80-55
Penetracija esant 25 °C	45-80
Minkštėjimo temperatūra	≤55 °C



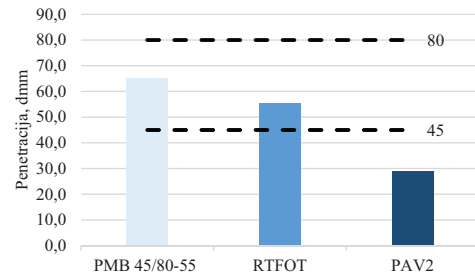
2 paveikslas. Naudotos bitumą atnaujinančios medžiagos:  
a) minkštasis bitumas V12000; b) aromatinė alyva Nygen 910  
Figure 2. Materials used for bitumen regeneration: a) soft bitumen V12000; b) aromatic oil Nygen 910

Eksperimentiniam tyrimui įgyvendinti atliktas trumpalaikis sendinimas (LST EN 12607-1 2015 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas) ir dvigubas (48 val. trukmės) pagreitinatas ilgalaikis sendinimas (LST EN 14769:2012 1 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitinatas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (PAV)). Nustatytos fizikinės savybės: penetracija (LST EN 1426:2007 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Penetracijos adatos būdu nustatymas); minkštėjimo temperatūra (LST EN 1427:2007 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas).

## 3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

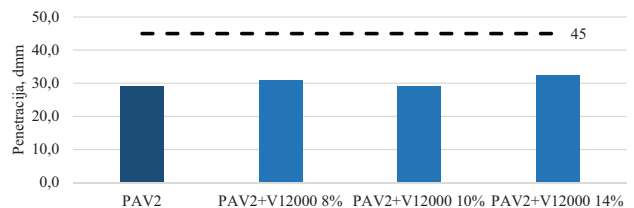
### 3.1. Penetracijos rezultatai

Tirtų bandinių penetracijos vertės palygintos su LST EN 14023:2010 standarte apibrėžtomis vertėmis. Analizuojant pirminio ir pasendintų bandinių adatos penetraciją esant 25 °C (3 paveikslas) nustatyta, kad atlikus RTFOT sendinimą penetracijos reikšmė sumažėja 15 % ir



3 paveikslas. Pirminio po RTFOT ir PAV2 bandinių penetracijos rezultatai (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal LST EN 14023)

Figure 3. Primary, after RTFOT and PAV2 samples penetrations results (horizontal dotted lines indicate the limits of the requirements according to LST EN 14023)



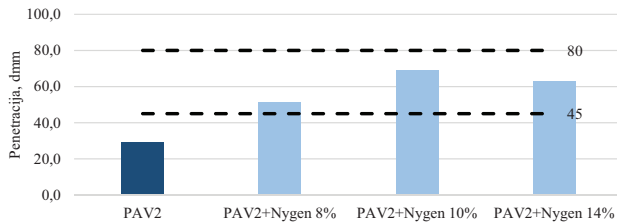
4 paveikslas. Bandinių su V12000 penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal LST EN 14023)

Figure 4. Distribution of penetration values for samples with V12000 (horizontal dotted lines indicate the limits of the requirements according to LST EN 14023)

tenkina reglamentuojamas savybes. Po RTFOT sendinimo atlikus dvigubą PAV sendinimą penetracijos reikšmė, lyginant su pradinio bandinio reikšme, sumažėja 55 % ir nebetenkina reglamentuojamų savybių. Šio bandinio penetracijos reikšmė 35 % mažesnė, nei reglamentuojama apatinė riba šios rūšies bitumui.

Visų bandinių su minkštuoju kelių bitumu V12000 penetracijos rezultatai (4 paveikslas) netenkina reglamentuojamos minimalios penetracijos reikšmės. Bandinio su 8 % atnaujinančiosios medžiagos penetracijos reikšmė nustatyta 31 % mažesnė už minimalią ribą, su 10 % – 35 %, o su 14 % – 28 %. Mažiausia penetracijos reikšmė gauta pridėjus 10 % šios atnaujinančiosios medžiagos. Lyginant penetracijos rezultatus su pasendinto bitumo rezultatais, nustatyta, kad bandinio su 8 % atnaujinančiosios medžiagos reikšmė padidėjo 6 %, o su 14 % beveik dvigubai daugiau – 14 %. Tik su 10 % atnaujinančiosios medžiagos nustatyta, kad penetracijos reikšmė sumažėja 0,5 %.

Visų bandinių su Nygen 910 penetracijos rezultatai (5 paveikslas) patenka į reglamentuojamų rezultatų ribas. Bandinio su 8 % atnaujinančiosios medžiagos penetracijos reikšmė nustatyta 13 % didesnė už minimalią ribą, su 10 % – 53 %, o su 14 % – 40 %. Lyginant penetracijos rezultatus su pasendinto bitumo rezultatais, nustatyta, kad bandinio su 8 % atnaujinančiosios medžiagos vertė padidėjo 1,7 karto, su 10 % – 2,4 karto, su 14 % – 2,2 karto. Didžiausia penetracijos reikšmė nustatyta su 10 %



5 paveikslas. Bandinių su Nygen penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal LST EN 14023)

Figure 5. Distribution of penetration values for samples with Nygen (horizontal dotted lines indicate the limits of the requirements according to LST EN 14023)

Nygen 910, vienintelio šio bandinio penetracijos rezultatas nustatytas didesnis nei pradinio bitumo.

Penetracijos rezultatais nustatyta, kad PMB 45/80-55 bitumo atnaujinimas su minkštuoju kelių bitumu V12000 nedaug padidina arba netgi sumažina (su 10 % priedo -0,2 dmm) penetraciją ir bitumas nebetenkina reglamentuojamų savybių. Nygen pridėjimas itin padidina penetracijos reikšmes ir netgi viršija nustatytas su pradiniu bitumu.

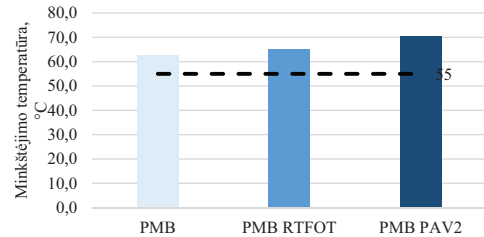
### 3.2. Minkštėjimo temperatūros rezultatai

Analizuojant pirminio ir pasendintų bandinių minkštėjimo temperatūrą (6 paveikslas) nustatyta, kad atlikus RTFOT sendinimą minkštėjimo temperatūra padidėja 4 %, o atlikus dvigubą PAV sendinimą 13 %. Visų bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai viršija reglamentuojamą minimalią ribą. Pradinio bitumo minkštėjimo temperatūra 14 % didesnė už ribinę, bandinio po RTFOT 19 %, o po dvigubo PAV sendinimo 28 %.

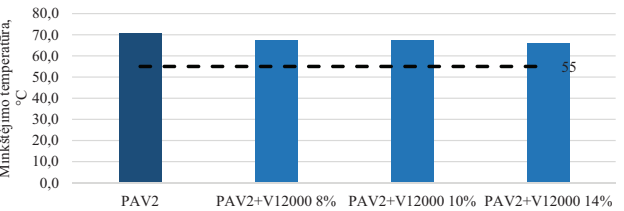
Visų bandinių su minkštuoju kelių bitumu V12000 minkštėjimo temperatūros rezultatai (7 paveikslas) tenkina reglamentuojamą minimalią reikšmę. Didinant atnaujinančiosios medžiagos kiekį, nustatytos minkštėjimo temperatūros nedaug skiriasi ir atitinkamai yra didesnės už minimalią reikšmę 23 %, 22 % ir 20 %. Lyginant atnaujintų ir pasendinto bitumų minkštėjimo temperatūras nustatyta, kad bandinio su 8 % V12000 reikšmė sumažėjo 4 %, su 10 % – 5 %, o su 14 % – 6 %.

Visų bandinių su Nygen 910 minkštėjimo temperatūros rezultatai (8 paveikslas) tenkina reglamentuojamą minimalią reikšmę. Didinant atnaujinančiosios medžiagos kiekį nustatytas minkštėjimo temperatūros mažėjimas. Bandinių su 8 % Nygen minkštėjimo temperatūros reikšmė 13 % didesnė už minimalią reglamentuojamą reikšmę, o su 10 % atnaujinančiosios medžiagos – 9 %. Bandinio su 14 % Nygen minkštėjimo temperatūros reikšmė taip pat tenkina minimalaus reikalavimo ribą ir ją viršija 2 %. Lyginant atnaujintų ir pasendinto bitumų minkštėjimo temperatūras nustatyta, kad bandinio su 8 % V12000 reikšmė sumažėjo 11 %, su 10 % – 14 %, o su 14 % – 20 %.

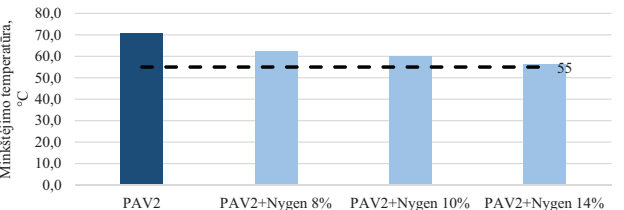
Optimalus aromatinės alyvos kiekis nustatytas pagal penetracijos ir minkštėjimo temperatūros rezultatus.



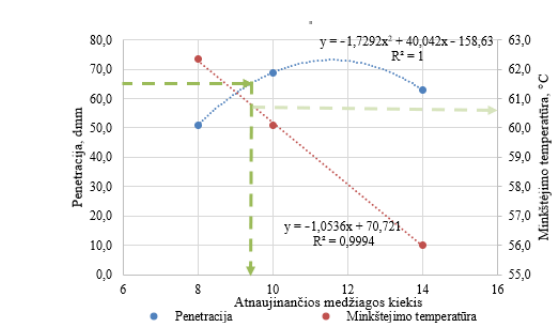
6 paveikslas. Pirminio po RTFOT ir PAV2 bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal LST EN 14023)



7 paveikslas. Bandinių su V12000 minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal LST EN 14023)



8 paveikslas. Bandinių su Nygen minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal LST EN 14023)



9 paveikslas. Optimalus aromatinės alyvos kiekis pagal siekiamas penetracijos ir minkštėjimo temperatūros reikšmes

Figure 9. Optimal content of aromatic oil according to the desired values of penetration and softening point

Eksperimentinių bandymų rezultatai pateikiami sklaidos diagramoje, kurioje reikšmės sujungtos krypties linija, siekiant gauti R reikšmę, kuo artimesnę 1. Nustatyta siekiamos penetracijos reikšmė 65,3 dmm. Į penetracijos lygtį įrašius siekiamą reikšmę nustatyta, kad optimalus aromatinės alyvos kiekis yra 10 %. Tuomet patikrinama minkštėjimo temperatūros gaunama reikšmė (įrašius 10 %), ar viršijama minimali reglamentuojama riba. Minkštėjimo temperatūros ir penetracijos rezultatais nustatytų reikšmių su minkštuoju kelių bitumu pasiekti nepavyko, reikėtų tęsti eksperimentą didinant atnaujinančiosios medžiagos kiekį, todėl šiame tyrime tolesniuose skaičiavimuose ši medžiaga neįtraukiama.

## Išvados

1. Bitumo degradaciją asfalto dangoje kelio eksploatacijos metu nulemia bitumo oksidacija, garavimas bei molekulių jungimasis. Šiuos veiksnius nulemia bitumo komponentų pokytis veikiant saulės ultravioletinei radiacijai, oksidacijai veikiant deguoniui, temperatūros poveikis. Senėjimo metu dėl oksidacijos bitume asfaltenu kiekis didėja, o maltenų sumažėja.
2. Siekiant iki pradinių regeneruoti bitumo fizikines ir mechanines savybes būtina nustatyti faktines pasenusio bitumo savybes ir parinkti tinkamą atnaujinančiosios medžiagos kiekį. Atnaujinančiosios medžiagos kiekis visais atvejais priklauso nuo pasenusio bitumo faktinių ir regeneruoto bitumo siektinųjų savybių.
3. Atlikus trumpalaikį PMB 45/80-55 bitumo sendinimą minkštėjimo temperatūra padidėjo nuo 62,5 °C iki 65,3 °C, atlikus pagreitintą ilgalaikį 45 valandų trukmės sendinimą ši temperatūra dar padidėjo iki 70,6 °C. Penetracijos bandymais nustatyta, kad atlikus trumpalaikį sendinimą penetracija sumažėjo nuo 65,3 dmm iki 55,4 dmm, o po ilgalaikio sendinimo iki 29,2 dmm, todėl šis bitumas neatitinka reglamentuojamų (45–80 dmm) ribų.
4. Tyrimu nustatytas tik nežymus PMB 45/80-55 bitumo regeneravimo minkštuoju kelių bitumu V1200 poveikis. Penetracija su 10 % atnaujinančiosios medžiagos sumažėjo 0,5 % (29,0 dmm), su kitais kiekiais padidėjo nuo 10 % (31,0 dmm) iki 11 % (32,4 dmm). Minkštėjimo temperatūra sumažėjo nuo 4,2 % (67,6 °C) iki 6,4 % (66,1 °C).
5. Tyrimu nustatyta, kad Nygen 910 atnaujinama pasenusį PMB 45/80-55 bitumą su visais tirtais kiekiais. Penetracija padidėjo nuo 75 % (51,0 dmm) iki 114 % (63,0 dmm). Minkštėjimo temperatūra sumažėjo nuo 11,7 % (62,4 °C) iki 20,7 % (56,0 °C).
6. Tirtos dvi naftos pagrindu pagamintos atnaujinančiosios medžiagos: minkštasis kelių bitumas ir aromatinė alyva. Su visais minkštuoju kelių bitumo kiekiais penetracijos ir minkštėjimo temperatūros rezultatų reikšmės nepasiekė pradinių. Aromatinės alyvos optimalus kiekis nustatytas 10 %, kai pasiekiamos pirminės penetracijos ir minkštėjimo temperatūros reikšmės.

## Literatūra

- Adeola, A. O., Fapohunda, O., Jimoh, A. T., Toluwalolu, T. I., Ige, A. O., & Ogunyeye, A. C. (2019). Scientific applications and prospects of nanomaterials: A multidisciplinary review. *African Journal of Biotechnology*, 18(30), 946–961. <https://doi.org/10.5897/AJB2019.16812>
- Brownridge, J. (2010). The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation: use and need for asphalt rejuvenation. In *1st International Conference on Pavement Preservation* (pp. 351–364), Newport Beach CA, United States.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., & Sang, Y. (2014). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66, 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033>
- Durante, M. (2020). *Asphalt road bio-based rejuvenators – functionality review*. Pavement Technology. <https://www.pavetechnic.com/bio-based-rejuvenators-a-review-of-functionality/>
- Im, S., Zhou, F., Lee, R., & Scullion, T. (2014). Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials. *Construction and Building Materials*, 53, 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.025>
- Karlsson, R., & Isacson, U. (2006). Material-related aspects of asphalt recycling—state-of-the-art. *Journal of materials in civil Engineering*, 18(1), 81–92. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81))
- Lietuvos automobilių kelių direkcija prie susisiekimo ministerijos. (2021). *Valstybinės reikšmės keliai*. <https://lakd.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/lietuvos-keliai/valstybines-reiksmes-keliai>
- Lietuvos Respublikos Vyriausybė. (2021). *Nuatrimas „Dėl kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšų naudojimo 2021 metų sąmatos patvirtinimo*. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAP/cfd0f5815fa611eb9954cfa9b9131808?positionInSearchResults=4&searchModelUUID=5c2e075e-7d20-4554-a2f3-465a6e1f3047>
- Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., & Rossi, C. O. (2019). A review on bitumen rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives. *Applied Sciences*, 9(20), 1–44. <https://doi.org/10.3390/app9204316>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2009). *LST EN 12591:2009. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai* [Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens]. <https://www.lsd.lt/>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2010). *LST EN 14023:2010. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų sistema*. <https://www.lsd.lt/>
- Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S., & Austerman, A. J. (2013). Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(Suppl. 2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812836>
- Petersen, J. C. (1984). Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: State of the art. *Transportation Research Record*, 13–30.
- Pradhan, S. K., & Sahoo, U. C. (2019). Performance assessment of aged binder rejuvenated with Polanga oil. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English edition)*, 6(6), 608–620. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.06.004>
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook* (5th ed.). Thomas Telford Publishing.

- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction* (2nd ed.). Transportation Research Board.
- Romera, R., Santamaría, A., Peña, J. J., Muñoz, M. E., Barral, M., García, E., & Jañez, V. (2006). Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen. *Rheologica Acta*, 45(4), 474–478. <https://doi.org/10.1007/s00397-005-0078-7>
- Shen, J., Amirkhania, S., & Lee, S.-J. (2005). The effects of rejuvenating agents on recycled aged CRM binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(4), 273–279. <https://doi.org/10.1080/10298430500439319>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538–550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>

## EFFECT OF REJUVENATORS ON PENETRATION AND SOFTENING POINT OF AGED POLYMER-MODIFIED ROAD BITUMEN

A. Vaitkus, I. Palionytė, R. Kleizienė

### Abstract

The article describes the efficiency of polymer-modified road bitumen regeneration with two types of rejuvenators. Two alternative rejuvenators have been selected aromatic oil Nygen 910 and soft road bitumen V12000. PMB 45/80-55 bitumen, which is used in the upper and lower layers of asphalt pavement, was investigated. During the life time of the asphalt pavement, due to the effects of solar UV radiation, temperature and oxygen, of all the layers of the structure asphalt top layer reaches the highest degree of aging. Short-term and long-term aging were performed to simulate the aging of the bitumen under laboratory conditions. To determine the optimal amount of rejuvenator experiments were performed with 8%, 10% ir 14% rejuvenator by bitumen mass. The effect of rejuvenators were evaluated by studying the main physical properties of bitumen: penetration and softening temperature. In an experimental study, aromatic oil was found to be more than 2.5 times more effective than soft bitumen.

**Keywords:** asphalt mixture, rejuvenators, bitumen, physical properties, Nygen 910, regeneration, V1200.