



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

Indrė Palionytė

**POLIMERU MODIFIKUOTO KELIŲ BITUMO REGENERAVIMO
ATNAUJINANČIOMIS MEDŽIAGOMIS TYRIMAS**

**INVESTIGATION OF POLYMER MODIFIED ROAD BITUMEN
REGENERATION USING REJUVENATORS**

Baigiamasis magistro darbas

Keliai ir geležinkeliai studijų programa, valstybinis kodas 6211EX039

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Viktoras Vorobjovas
(Vardas, pavardė)

(Data)

Indrė Palionytė

**POLIMERU MODIFIKUOTO KELIŲ BITUMO REGENERAVIMO
ATNAUJINANČIOMIS MEDŽIAGOMIS TYRIMAS**

**INVESTIGATION OF *POLYMER MODIFIED ROAD BITUMEN*
REGENERATION USING REJUVENATORS**

Baigiamasis magistro darbas

Keliai ir geležinkeliai studijų programa, valstybinis kodas 6211EX039

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas:

Prof. dr. Audrius Vaitkus

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas:

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas:

dr. Aušra Žemienė

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2021

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų
rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos
aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Indrė Palionytė, 20152991

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Keliai ir geležinkeliai, KmF-19

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2021 m. gegužės 17 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Polimeru modifikuoto kelių bitumo regeneravimo atnaujinančiomis medžiagomis tyrimas“ patvirtintas 2021 m. kovo 04 d. dekanų potvarkiu Nr. 41ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas profesorius daktaras Audrius Vaitkus.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Indrė Palionytė
(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

Statybos inžinerija studijų kryptis
Keliai ir geležinkeliai studijų programa,
valstybinis kodas 621 | EX039

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) Indrei Palionytei

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: . Polimeru modifikuoto kelių bitumo regeneravimo atnaujinančiomis medžiagomis tyrimas

patvirtinta 2021 m. kovo 4 d. dekanų potvarkiu Nr. 41 ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2021 m. gegužės d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išanalizuoti bitumo senėjimo procesus asfalto dangos eksploatacijos metu. Aprašyti bitumo komponentų pokyčius ir šių pokyčių spartą lemiančius veiksnius išklasifikuoti pagal svarbą.

Aprašyti ir įvertinti bitumo atjauninimo fenomeną bei praktikoje žinomas metodikas atjaunintojo kiekiui parinkti.

Aprašyti eksperimentinio tyrimo metodiką. Atlikti eksperimentinį tyrimą, kurio metu būtų įvertintas dviejų skirtingų atjauninančių medžiagų efektyvumas pasendinto polimerais modifikuoto bitumo regeneravimui.

Atlikti eksperimentinių tyrimų rezultatų analizę ir interpretaciją.

Pateikti polimerais modifikuoto bitumo atjauninančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmą.

Pateikti bendrąsias išvadas ir rekomendacijas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

(Parašas)

Prof. dr. Andrius Vaitkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
Indre Palionyte
(Vardas, pavardė)

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Aplinkos inžinerijos fakultetas Kelių katedra	ISBN ISSN Egz. sk. Data
Antrosios pakopos studijų Kelių ir geležinkelių programos magistro baigiamasis darbas Pavadinimas Polimeru modifikuoto kelių bitumo regeneravimo atnaujinančiomis medžiagomis tyrimas Autorius Indrė Palionytė Vadovas Audrius Vaitkus	
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame magistro darbe sprendžiama problema, susijusi su pakartotinu kelių bitumo naudojimu. Iš eksploatacines charakteristikas praradusios kelio dangos išgautam bitumui sudaroma galimybė atstatyti pirmines savybes panaudojant atnaujinančias medžiagas. Baigiamajame magistro darbe išanalizuoti bitumo senėjimo procesai bei jų poveikis mechaninėms savybėms, atnaujinimo medžiagos ir metodai. Eksperimentiniu tyrimu nustatytos fizikinės (penetracija, minkštėjimo temperatūra) ir funkcinės (tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos, kompleksinis šlyties modulis) savybės minkštuoju kelių bitumu ir aromatine alyva atnaujinam kelių bitumui. Tyrimo rezultatų analize nustatytas atnaujinančių medžiagų poveikis polimerais modifikuoto kelių bitumo savybių pokyčiui bei pasiūlytas atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo pagal funkcinės savybės algoritmas. Mechaninėmis savybėmis (dinaminiu šlyties moduliui) pagrįstas polimerais modifikuoto bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas yra efektyvesnis (mechaninės savybės turi realų poveikį funkcionavimui kelyje) ir ekonomiškė (laiko bei sąnaudų atžvilgiu) už fizikinėmis savybėmis (penetracija ir minkštėjimo temperatūra) paremtą metodiką.	
Prasminiai žodžiai: atnaujinančios medžiagos, bitumas, bitumo regeneravimas, funkcinės savybės, Nygen 910, V12000.	

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Environmental Engineering Department of Roads	ISBN ISSN Copies No. Date*.....*.....
Master Degree Studies Roads and Railways study programme Master Thesis Title Investigation of Polymer Modified Road Bitumen Regeneration Using Rejuvenators Author Indrė Palionytė Academic supervisor Audrius Vaitkus	
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The final Master thesis solves the problem of road bitumen reuse. Bitumen extracted from a road surface that has lost its performance characteristics could be restored to its original properties using rejuvenators. In the final master's thesis the processes of bitumen aging and their effect on mechanical properties, rejuvenators and rejuvenation methods are analyzed. The experimental study determined the physical (penetration, softening temperature) and functional (linear viscoelastic properties, complex shear modulus) properties of road bitumen renewed with soft road bitumen and aromatic oil. The analysis of the research results determined the effect of rejuvenating substances on the change of properties of polymer-modified road bitumen and proposed an algorithm for selecting the amount of rejuvenating material according to its functional properties. An algorithm for selecting the amount of polymer-modified bitumen rejuvenating material based on mechanical properties (dynamic shear modulus) is more efficient (mechanical properties have a real impact on road performance) and more cost-effective (in terms of time and cost) than physical properties (penetration and softening temperature) method.	
Keywords: Rejuvenators, bitumen, bitumen regeneration, functional properties, Nygen 910, V12000.	

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS	12
ĮVADAS.....	13
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	15
1.1. Bitumo senėjimas asfalto dangos eksploatacijos metu	15
1.2. Bitumo regeneravimas atnaujinančiomis medžiagomis.....	22
1.3. Bitumo atnaujinimo metodikų apžvalga	29
1.4. Skyriaus išvados	39
2. BITUMO ATNAUJINIMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	40
2.1. Tyrimo objektas	40
2.2. Tyrimo metodai.....	41
2.2.1. Bitumo bandinių paruošimas	43
2.2.2. Fizikinių savybių nustatymo metodai.....	45
2.2.3. Funkcinių savybių nustatymo metodai	47
2.3. Bandymų rezultatai	50
2.4. Skyriaus išvados	60
3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ INTERPRETAVIMAS	62
3.1. Bitumo savybių atitikimas normatyvinių techninių dokumentų reikalavimams	62
3.2. Regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio atitikimas referenciniam	66
3.3. Polimerais modifikuoto bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas	68
3.4. Skyriaus išvados	74
BENDROSIOS IŠVADOS	77
LITERATŪROS SĄRAŠAS	80
A PRIEDAS	89

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Bitumo degradavimo ir atnaujinimo procesas	16
2 pav. Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo numatomi bitumo penetracijai ir minkštėjimo temperatūrai schema (Koudelka, Porot, Coufalik & Varaus, 2018).....	30
3 pav. Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo numatomi bitumo penetracijai ir minkštėjimo temperatūrai grafikas (Ameri et al., 2018)	31
4 pav. Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo schema atsižvelgiant į kritinę aukščiausią ir žemiausią PG temperatūrą.....	33
5 pav. Bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio minimali ir maksimali riba, kad atitiktų PG reikalavimus (Barborak, 2018).....	35
6 pav. Minimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio nustatymas pagal rišiklio kokybės reikalavimą (Barborak, 2018).....	35
7 pav. Bitumo senėjimo charakteristikų tikrinimas (Barborak, 2018)	36
8 pav. Mechaninėmis savybėmis paremtas teorinis atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas	38
9 pav. Minkštasis bitumas V12000	40
10 pav. Aromatinė alyva Nygen 910.....	40
11 pav. Eksperimentinio tyrimo planas bitumo atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimui	42
12 pav. Pagreitinto ilgalaikio sendinimo prietaisas	44
13 pav. Lėkštelės naudojamos PAV sendinimui	44
14 pav. Maišytuvas Silverson L5M-A.....	45
15 pav. Maišymo antgalis.....	45
16 pav. Indas su vandeniu ir bandiniu minkštėjimo temperatūros nustatymui	46
17 pav. Prietaisas adatos penetracijai nustatyti	47
18 pav. Adatos pozicija: a) prieš bandymą; b) po bandymo	47
19 pav. Dinaminis šlyties reometras.....	48
20 pav. Skirtingų bandinių penetracijos vidutinių reikšmių pasiskirstymas	51
21 pav. Skirtingų bandinių minkštėjimo temperatūros reikšmių pasiskirstymas	52
22 pav. Deformacijų diapazono bandymo duomenų analizė ir LVE ribų nustatymas	53
23 pav. Tiesiškai tampriai klampauso būvio ribose nustatytos deformacijos	54

24 pav. Išmatuotų kompleksinių šlyties modulių vidutinių reikšmių pasiskirstymas skirtingais temperatūrų intervalais: a) nuo 2 °C iki 20 °C; b) nuo 26 °C iki 44 °C	55
25 pav. Išmatuotų fazės kampų priklausomybė nuo temperatūros: a) temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C; b) temperatūros intervale nuo 26 °C iki 44 °C)	56
26 pav. Išmatuotų kompleksinių šlyties modulių pasiskirstymas pagal temperatūrą: a) temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C; b) nuo 26 °C iki 44 °C prie 10 rad/s dažnio.....	57
27 pav. Išmatuotų fazės kampų priklausomybė nuo temperatūros: a) temperatūros intervale nuo 2 iki 20 °C; b) nuo 26 iki 44 °C prie 10 rad/s dažnio	58
28 pav. Skirtingų gamintojų kompleksinio šlyties modulio rezultatai pagal bandymų temperatūras.....	59
29 pav. Pirminio, po RTFOT ir PAV2 bandinių penetracijos rezultatai (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal <i>LST EN 14023</i>	63
30 pav. Bandinių su V12000 penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal <i>LST EN 14023</i>)	63
31 pav. Bandinių su Nygen penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal <i>LST EN 14023</i>).....	63
32 pav. Pirminio, po RTFOT ir PAV2 bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal <i>LST EN 14023</i>).....	64
33 pav. Bandinių su V12000 minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal <i>LST EN 14023</i>)	65
34 pav. Bandinių su Nygen minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal <i>LST EN 14023</i>)	65
35 pav. Referencinio ir minkštuoju kelių bitumu regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio palyginimas: a) 2–20 °C temperatūrose; b) 26–44 °C temperatūrose	66
36 pav. Referencinio ir aromatine alyva regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio palyginimas: a) 2–20 °C temperatūrose; b) 26–44 °C temperatūrose.....	67
37 pav. Referencinio ir 45 valandų trukmės PAV sendinimu pasendinto bitumo kompleksinio šlyties modulio palyginimas	68
38 pav. Optimalus aromatinės alyvos kiekis pagal siekiamas penetracijos ir minkštėjimo temperatūros vertes.....	69
39 pav. Kompleksinio šlyties modulio tinkamumo ribos pagal standartinį nuokrypį esant 2–20 °C	70
40 pav. Kompleksinio šlyties modulio tinkamumo ribos pagal standartinį nuokrypį esant 26–44 °C ...	70
41 pav. Bandinių su skirtingais kiekiais aromatinės alyvos ir po 45 valandų trukmės PAV sendinimo kompleksinių šlyties modulių santykiai prie 44 °C.....	71

42 pav. Patikslintas atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimo bitumo atnaujinimui algoritmas	72
--	----

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Bitumo senėjimą lemiantys veiksniai (Traxler, 1963).....	17
2 lentelė. Skirtingų atnaujinančių medžiagų ir jų kiekių įtaka bitumo regeneravimui.....	28
3 lentelė. Optimalus atnaujinančios medžiagos kiekis bitumo atnaujinimui (Zhang et al., 2020b).....	32
4 lentelė. Bitumo charakteristikos (LST EN 12591 2009).....	40
5 lentelė. Leidžiami skirtumai tarp penetracijos reikšmių pagal <i>LST EN 1426:2015</i>	47
6 lentelė. Penetracijos bandymų rezultatai skirtingiems bandiniams.....	50
7 lentelė. Minkštėjimo temperatūros bandymų rezultatai skirtingiems bandiniams.....	52
8 lentelė. Bitumo mechaninių savybių nustatymui naudotos deformacijos kiekvienai temperatūrai	54
9 lentelė. Skirtingų gamintojų bitumo kompleksinio šlyties modulio standartinis nuokrypis	69
10 lentelė. Atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimo skirtingais metodais bitumo kiekio ir laiko sąnaudų palyginimas	73

SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS

DSR – dinaminis šlyties reometras;

PAV – pagreitintas ilgalaikis sendinimas;

PMB – polimerais modifikuotas bitumas

RTFOT – trumpalaikis bitumo sendinimas.

IVADAS

Lietuvoje yra 15 418,056 km valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga (LAKD, 2021). Šiomis dienomis viena iš sunkiausių problemų, su kuria susiduria miestų ir kelių inžinieriai, yra asfalto eksploatacinių savybių praradimas, kurių atstatymas sudaro didelę dalį išlaidų. Kelių priežiūrai ir remontui 2021 metams Lietuvos Respublikos Vyriausybė skyrė 531 mln. eurų. dangų eksploatacijos metu bitumas sensta (t. y. oksiduojasi, kietėja, blogėja funkcinės savybės) ir tampa nebetinkamas eksploatacijai. Natūrali bitumo oksidacija vyksta tik pirmuose 1-2 cm asfalto dangos 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. Pasenusio bitumo regeneravimas atnaujinančiomis medžiagomis yra paremtas fizikinėmis, bet ne funkcinėmis savybėmis, kurios turi realų funkcionavimą kelyje. Taikomas pasenusio regeneruojamo bitumo optimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimas yra neefektyvus.

Tyrimo objektas – polimeru modifikuoto kelių bitumo savybių atstatymas panaudojant atnaujinančias medžiagas. Baigiamajame darbe siekiama nustatyti dviejų skirtingų atnaujinančių medžiagų poveikį polimerais modifikuoto kelių bitumo savybių pokyčiui bei pasiūlyti funkcinėmis savybėmis pagrįstą atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmą. Baigiamojo darbo tikslui pasiekti suformuoti šie darbo uždaviniai:

1. Atlikus mokslinės literatūros šaltinių analizę aprašyti bitumo senėjimo procesus bei jų poveikį mechaninėms savybėms.
2. Remiantis mokslinės literatūros analize aprašyti bitumo atnaujinimo galimybę ir metodus.
3. Sukurti teorinį bitumą atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmą.
4. Atlikti eksperimentą atnaujinančios medžiagos poveikiui polimeru modifikuoto bitumo regeneravimui įvertinti.
5. Nustatyti dviejų skirtingų atnaujinančių medžiagų pridedamo kiekio poveikį regeneruoto bitumo mechaninėms ir fizikinėms savybėms.
6. Išanalizuoti ir interpretuoti eksperimentinio tyrimo rezultatus.
7. Pateikti rekomendacijas polimerais modifikuoto kelių bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmui ir jo taikymui.

Darbe keliama hipotezė, kad mechaninėmis savybėmis (tiesiškai tampriai klampaus būvio ribomis, dinaminio šlyties modulių) pagrįstas polimerais modifikuoto bitumo atnaujinančios medžiagos

kiekio parinkimo algoritmas yra efektyvesnis (mechaninės savybės turi realų poveikį funkcionavimui kelyje) ir ekonomiškesnis (laiko bei sąnaudų atžvilgiu) už fizikinėmis savybėmis (penetracija ir minkštėjimo temperatūra) paremtą metodiką.

Parengtas straipsnis, pagal kurį 2021 metais Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ buvo skaitytas pranešimas tema „Atnaujinančių medžiagų poveikis pasendinto polimeru modifikuoto kelių bitumo penetracijai ir minkštėjimo temperatūrai“ (žr. Priedai).

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Bitumo senėjimas asfalto dangos eksploatacijos metu

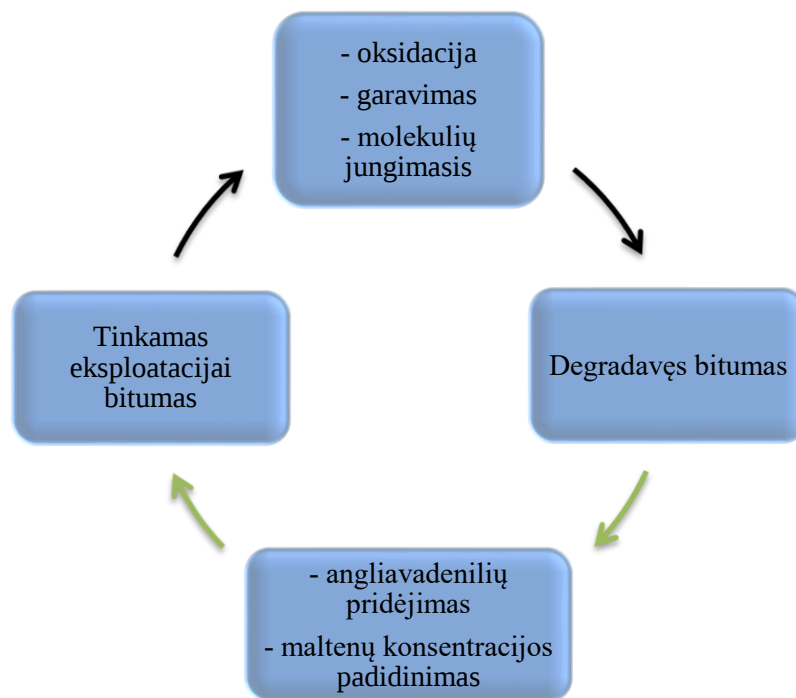
Bitumo senėjimas vyksta ir jo gaminimo metu (perdirbimo gamykloje), sandėliuojant, transportuojant, maišant asfaltą, pervežant ir tankinant asfalto mišinį, taip pat dėl poveikio aplinkai eksploataciniu metu. Bitumą eksploataciniu laikotarpiu veikia įvairūs veiksniai, pavyzdžiui, transporto priemonių apkrovos, gamtos reiškiniai. Kinijos mokslininkai Wei et al. (2019) atliko tyrimą, kuriame nagrinėjo, kaip ultravioletinė spinduliuotė veikia paprasto ir SBS (Stirenas-Butadienas-Stirenas) modifikuoto bitumo senėjimą. Tyrimui atlikti taikyti makroskopinio poveikio, mikrostruktūros ir morfologijos tyrimo metodai. Tyrimo metu nustatyta, kad bituminės dangos senėjimo procesas eksploataciniu laikotarpiu yra veikiamas ne tik aukšta temperatūra ir ultravioletine spinduliuote, bet ir aplinkos veiksniais. Asfalto danga veikiama vandens, rūgštinio lietaus ar chloro druskos korozijos, sensta daug greičiau, ypač rūgščioje ar druskingoje aplinkoje. Be to, daroma išvada, kad paprastą ir SBS modifikuotą bitumą veikiant ultravioletiniais spinduliais, senėjimo procesai iš esmės yra vienodi. Dėl ultravioletinių spindulių sendinimo, makroskopiniu būdu bitumo penetracija sumažėjo, o minkštėjimo temperatūra ir atsparumas provėžoms padidėjo. Mikroskopiškai lengvieji bitumo komponentai pavirsta sunkiaisiais, todėl sumažėja aromatinių ir sočiųjų angliavandenių dalelių kiekis, o padaugėja asfaltenų ir dervų (Wei et al., 2019).

Bitumas turi tik du molekulinis komponentus: maltenus ir asfalteną. Maltenai bitumui suteikia takumo ir plastiškumo, o asfaltenas yra kietoji jo dalelė. Bet koks disbalansas ar dalelių atskyrimas sukelia asfaltų senėjimą ir žlugimą (Durante, 2020). Dėl bitumo senėjimo proceso ir atitinkamai padidėjusio klampumo, asfalto dangos konstrukcijos standumas padidėja eksploatavimo metu. Senėjimo procesas apibūdinamas atsižvelgiant į bendrą procesą, kai dalis malteno virsta asfalteno faze, dėl to asfaltenų 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. Asfaltenų junginiai yra kitas pirminis asfalto komponentas (Brownridge, 2010). Šio proceso metu dėl stipresnės poliarinės ir polinės sąveikos tarp asfaltenų, didėja klampumas ir mažėja elastingumas (Loise et al., 2019). Kai asfalteno micelės nėra pakankamai judrios, kad veikiamos apkrovos galėtų prasilenkti, bituminio rišiklio atsparumas įtrūkiams mažėja (Petersen, 1984). Tačiau senėjimas yra sudėtingesnis ciklas, apimantis skirtingus procesus, paprastai vykstančius skirtingais laiko intervalais (Loise et al.,

2019). Kaip teigia Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy (1996) ilgalaikis senėjimas yra skirtingų procesų padarinys:

- oksidacinis (dėl sudėties pokyčių vykstant bitumo dalelių ir atmosferos deguonies reakcijoms);
- garinis (dėl mažos molekulinės masės komponentų garavimo maltene šie junginiai turi aukštesnį garų slėgį ir yra iš dalies lakūs, todėl gali ištrūkti iš malteno fazės ir ne tik pakeisti jo sudėtį, bet ir sumažinti jo kiekį bitume);
- molekulių jungimasis (dėl cheminių reakcijų tarp molekulinį komponentų, sukeliančių polimerizaciją ir atitinkamai bitumo struktūros keitimą, vadinamąją tiksotropiją).

Šis procesas vaizduojamas 1 paveiksle.



1 pav. Bitumo degradavimo ir atnaujinimo procesas

Filippi et al. (2018) teigia, kad trumpalaikis senėjimas dažniausiai vyksta dėl lengvesnių komponentų nepastovumo maišant ir klojant asfalto mišinius, o ilgalaikis senėjimas dėl oksidacijos eksploataavimo metu. Šie reiškiniai yra gerai žinomi ir išsamiai analizuojami per pastaruosius dešimtmečius, pavyzdžiui Petersen (2009), kuris tyrė senėjimo mechanizmus. Oksidacinis bitumo kietėjimas atsiranda dėl polinių, deguonies turinčių cheminių komponentų bitumo molekulėse ir sukelia padidėjusią molekulinę sąveiką, todėl bitumas kietėja (Girdler, 1965; Petersen, 2009). Dėl oksidacinio

senėjimo, keičiasi molekulinė sąveika, veikianti bitumo ir asfalto mišinių sąveiką (Petersen, 2009; Petersen & Harnsberger, 1998), kuriuos galima atpažinti iš cheminių funkcinių grupių: karbonilai, sulfoksidai, aromatiniai hidroksilai.

Bitumo savybės, kaip ir daugelio polimerų, laikui bėgant kinta. Kai bitumo savybės nesikeičia veikiant atmosferiniams faktoriams, šis reiškinys vadinamas atsparumu klimatiniams veiksniams. Karlsson ir Isacsson (2006) straipsnyje ypatingą dėmesį skiria bitumo senėjimui ir jo savybių atnaujinimui. Išsamūs tyrimai atlikti norint išsiaiškinti bitumo senėjimo priežastis ir to senėjimo pasekmes. Bitumo senėjimas ne tik didina šios medžiagos kietėjimą, bet ir fizikinius bei cheminius pokyčius – elastingumą ir adheziją. Vienas iš senėjimo procesų, tai oksidacija - negrįžtamas procesas, priklausomas nuo bitumo reaktyvumo ir deguonies kiekio, patenkančio difuzijos būdu. Oksidacijos metu kinta cheminė bitumo sudėtis. Pagrindinis senėjimo rezultatas yra polinių grupių atsiradimas, kuris daro įtaką bitumo klampumui.

Nustatyta, kad veikiant bitumą aukšta temperatūra, vyksta lakiųjų sudedamųjų dalių garavimas, o tai gali sukelti bitumo sudėties pokyčius. Be to, bitumo senėjimo fazes galima apibūdinti komponentine sudėtimi pagal molekulių poliškumo padidėjimą tarp asfaltenų, dervų, sočiųjų ir aromatinių angliavandenilių (Petersen, Harnsberger, 1998). Padarytos išvados, kad senstant bitumui mažėja jo sukibimas su akmens medžiagomis asfalto mišiniuose. Esant aukštai aplinkos temperatūrai ir intensyviai automobilių transporto eismui, padidėja plastinių deformacijų susidarymo tikimybė, o esant žemai temperatūrai – padidėja tikimybė susidaryti plyšiams ir duobėms. Dėl to, sutrumpėja asfalto naudojimo laikas. Bitumo senėjimą lemia daugybė įvairiausių išorinių poveikių (Traxler, 1963). Visos poveikio rūšys pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Bitumo senėjimą lemiantys veiksniai (Traxler, 1963)

Poveikis	Poveikio rūšis					Poveikio vieta	
	Laikas	Temperatūra	Deguonis	Saulės spinduliai	B ir γ spinduliai	Paviršius	Vidus
Oksidacija (tamsoje)	+	+	+	-	-	+	-
Fotooksidacija (tiesioginiai spinduliai)	+	+	+	+	-	+	-
Garavimas	+	+	-	-	-	+	+
Fotooksidacija (netiesioginiai spinduliai)	+	+	+	+	-	+	-
Fotocheminis (tiesioginiai spinduliai)	+	+	-	+	-	+	-
Fotocheminis (netiesioginiai spinduliai)	+	+	-	+	-	+	+
Polimerizacija	+	+	-	-	-	+	+
Vidinės struktūros tobulinimas	+	-	-	-	-	+	+
Tepalų sunkimasis	+	+	-	-	-	+	-
Vandens poveikis	+	+	+	+	-	+	-
Kietėjimas	+	+	-	-	-	+	+
Dalelių, esančių ant paviršiaus, sugertis	+	+	-	-	-	+	-
Cheminės reakcijos	+	+	-	-	-	+	+
Mikrobiologinis nusidėvėjimas	+	+	+	-	-	+	+

Bitumas yra pagrindinė asfalto rišančioji medžiaga, „suklijuojanti“ mineralinių medžiagų grūdelius į vieną monolitą, kuris sugeba atsispirti išorinių jėgų poveikiui (Sakalauskas et al., 1983). Dažnai automobilių kelių dangose pastebimi defektai dėl bitumo. Nors bitumo kiekis asfalto mišiniuose dažniausiai sudaro tik 5–7 % visų sudėtinių mišinio dalių, jis vaidina labai svarbų vaidmenį užtikrinant dangos stiprumą bei ilgaamžiškumą. Todėl keliams tiesti bei taisyti naudojami bitumai turi turėti visą kompleksą fizikinių ir mechaninių savybių plačiame temperatūrų intervale. Bitumai turi pasižymėti geromis kohezinėmis ir adhezinėmis savybėmis, būti termiškai pastovūs esant aukštomis temperatūroms, išsaugoti savo deformacines ir plastines savybes esant žemoms aplinkos temperatūroms, būti atsparūs senėjimui veikiant įvairiems klimato veiksniams bei automobilių transporto eismui (Kristinavičiūtė, 2010).

Kelių bitumas turi užtikrinti keletą svarbių eksploatacinių reikalavimų. Šalant kelių dangai ir mažėjant temperatūrai bitumas gali pasidaryti trapus, tai yra ištisinė bitumo danga gali įtrūkti. Būtent tai labai aktualu bitumui, naudojamam labai sudėtingomis Lietuvos meteorologinėmis sąlygomis. Šiuo atveju labai svarbu ne kokia minimali temperatūra pasiekama, bet kiek temperatūros svyravimo ciklų atlaiko bitumo danga. Skirtingai nuo šalto klimato zonų, kur nėra didelių ir dažnų temperatūrų svyravimų (temperatūrai nukritus atlydžio tikimybė maža), pajūrio zonoje per metus būna daugiau kaip 200 svyravimo ciklų, kurių metu temperatūra iš minusinės pereina į plusinę ir atvirkščiai. Toks dažnas temperatūrų svyravimas ardo kelio dangą. Susidarius plyšiams, į juos patenka vanduo, kuris užšalęs plečiasi ir vis giliau ardo kelio dangą.

Vasaros metu asfalto danga įkaista ir bitumo klampa mažėja. Ženkliai padidėjus dangos apkrovai (pavyzdžiui, dėl sunkiasvorio transporto), kelio dangoje įsispaudžia takas – provėžos. Todėl labai svarbu, kad bitumo savybės, didėjant temperatūrai, minimaliai keistųsi, t. y. minimaliai sumažėtų jo tankis. Tam tikslui naudojami specialūs priedai, pagerinantys asfalto kokybę. Tačiau, minėti priedai ne tik pagerina asfalto kokybę, bet ir stipriai padidina jo kainą. Kai asfalto danga įrengta pagal technologinius reikalavimus, pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos asfalto dangos tvarumui yra kietėjimas ir drėgnis. Bituminio rišklio senėjimas pasireiškia standumo (klampumo) padidėjimu, o veikiant drėgniui – kohezijos sumažėjimu asfalto mišinyje bei prasta adhezija tarp bitumo ir mineralinių medžiagų (Petersen, Harnsberger, 1998).

Siekiant pagerinti bitumo savybes ir ilgaamžiškumą, bitumas modifikuojamas pridedant įvairių rūšių ir kiekių polimerų, elastomerų, epoksidų ir (arba) nano molio priedų (Birgisson & Kringos, 2014; Yao et al., 2012; Petersen & Harnsberger, 1998). Asfalto mišinių, kurių gamybai naudojamas polimerais modifikuotas bitumas, yra geresnės mechaninės savybės bei padidėja atsparumas

deformacijų susidarymui, lyginant su tais mišiniais, kurių gamybai naudojamas įprastas kelių bitumas. Todėl viršutinių dangos sluoksnių asfalto mišinių gamybai būtina naudoti modifikuotą bitumą (Šernas, 2018). Modifikuoti bitumai pasižymi dideliu elastingumu, ko neturi paprasti bitumai. Ši savybė įgalina sumažinti provėžų gylį asfalto dangoje. Platus modifikuotų bitumų elastingumo spektras didina asfalto atsparumą provėžoms vasarą ir sutrūkinėjimams žiemą. Modifikuotieji bitumai turi geresnę adheziją skaldoms, negu įprastiniai bitumai. Modifikuotų bitumų panaudojimo dėka prailgėja laiko tarpas tarp kelio dangos remontų, o tai reiškia bendros kelių eksploatacijos išlaidų sumažinimą. Modifikuotų bitumų panaudojimo asfalto mišiniams gaminti pagrindiniai tikslai:

- 1) pagerinti bitumo sukibimą su akmens medžiagomis asfalto mišiniuose;
- 2) sumažinti plastinių deformacijų atsiradimo galimybę asfalto dangose, esant aukštoms aplinkos temperatūroms ir intensyviai automobilių transporto eismui;
- 3) sumažinti plyšių ir duobių atsiradimo galimybę asfalto dangose, esant žemai temperatūrai;
- 4) pratęsti asfalto dangų tarnavimo laiką ir kt.

Modifikuotas bitumas funkcionuoja ir sensta skirtingai nei paprastas bitumas (Lu & Isacson, 1997), tačiau pasikeitę bitumo komponentai gali privesti prie polimerų degradacijos (Wu et al., 2009). Polimerais modifikuoto bitumo (toliau – PMB) senėjimo metu keičiasi ir bitumo struktūra, kadangi asfaltenai ir polimerai nesimaišo tarpusavyje, įvyksta fazių atsiskyrimas, vienoje pusėje polimeras išsipučia dėl maltenų aromatinių komponentų, o iš kitos pusės – likusiuose matlenuose asfaltenai (Bouldin, Collins, & Berker, 1991). Dėl didelio aromatinių dalelių kiekio, reikalingo polimerui išsipūsti, matrica išaikvoja maltenus ir prisidodrina asfaltenų. Taigi padidėjusi asfaltenų koncentracija sukuria visuotinį matricos sukietėjimą, t. y. padidina SBS modifikuoto bitumo aukštos temperatūros modulį (Rodriguez et al., 2014). Tiriama skirtingi atnaujinančių medžiagų tipai, kad bitumas ir polimerai galėtų būti atsparesni senėjimui (Liu et al., 2015).

SBS polimerų senėjimas asfalte sukelia neigiamą poveikį visai asfalto dangai (Xiaohu Lu & Isacson, 1997), todėl atliekami tyrimai, kurių metu siekiama nustatyti senėjimo poveikį SBS polimerams. Gao, Gu, & Zhao (2013) analizavo SBS modifikuoto asfalto terminį ir oksidacinį senėjimo procesą. Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopijos ir gelio prasiskverbimo chromatografijos bandymais nustatyta, kad senstant SBS polimerai degraduoja. Be to, po ilgalaikio senėjimo SBS modifikuotas asfaltas gali tapti netinkamas naudojimui. Larsen et al. (2009) skirtingomis eksperimentinėmis sąlygomis sumaišė du bitumus su dviem skirtingais SBS polimerais ir nustatė, kad didelis maišymo greitis ir aukšta temperatūra sukėlė SBS polimerų degradaciją. Mokslininkai pateikia išvadą, kad SBS polimerų skilimas sumažina bitumo klampumą. Cortizo et al. (2004) ištyrė trijų tipų SBS polimerus, naudodamas trumpalaikį bitumo sendinimą (toliau – RTFOT) ir pagreitintą ilgalaikį

bitumo sendinimą naudojant slėginį sendinimo indą. Rezultatai parodė, kad struktūrinės polimerų savybės ir senėjimo sąlygos turi įtakos fizikinėms ir reologinėms SBS modifikuoto asfalto savybėms. Lucena et al. (2004) tyrime pasendino SBS polimerus inertiškų dujų aplinkoje ir nustatė, kad oksidacijos metu padidėjo karbonilo, hidroksido ir sulfoksido grupės. Wang et al. (2015) išanalizavo SBS modifikuoto asfalto senėjimo mechanizmą su cheminės reakcijos kinetika. Analizės rezultatai parodė, kad SBS polimero tinklo struktūra palaipsniui buvo prarasta, nes trumpalaikio senėjimo metu polimerai skilo ir aktyvavimo energija sumažėjo. Kitame tyrime Wang et al. (2015) nustatė, kad paprasti bitumai dėl oksidacijos (kietėjimo) tampa standesni ir elastingesni, o polimerų skilimas rodo visiškai priešingą efektą. Polimerais modifikuotas rišiklis po ilgesnio senėjimo tampa dar standesni ir mažiau elastingi. Atsižvelgiant į tai, padaryta išvada, kad asfalto oksidacija turi didesnę įtaką rišiklio standumui, o polimerų skilimas – didesnę įtaką rišiklio elastingumui.

Dėl temperatūros ir aplinkos reakcijos skirtumų (pavyzdžiui, užpildų, vandens, ultravioletinės spinduliuotės buvimo ar nebuvimo), cheminės reakcijos asfalto gamybos ir eksploatavimo metu nebūtinai yra tokios pačios kaip ir vykstančios laboratorijoje sendinimo bandymų metu. Oksidacinį bitumo senėjimą lauko sąlygomis taip pat veikia asfalto oro tuštymės, sluoksnio storis ir padėtis. Asfalto viršutinis ir apatiniai sluoksniai sensta labiau, nei esantys žemiau. Dėl šių veiksnių gana sudėtinga imituoti lauko sąlygų senėjimą laboratoriniu būdu, ypač polimerais modifikuotiems rišikliams. Nepaisant to, siekiant užtikrinti ilgalaikį asfalto dangų patvarumą, laboratoriniai tyrimai yra labai svarbūs parenkant senėjimui atsparius bituminius rišiklius (Lu et al., 2017).

Wang et al. (2019) tyrime analizavo skirtingų dangos konstrukcijos sluoksnių bitumo senėjimo charakteristikas pagal jų cheminę sudėtį ir mikrostruktūrą. Nustatyta, kad bitumo senėjimo laipsnis iš trijų sluoksnių asfalto dangos neženkliai skyrėsi. Remiantis gelio skvarbos chromatografijos rezultatais, bitumas iš viršutinio sluoksnio turi mažiausią molekulinę masę ir stipriausį senėjimą, bitumas iš apatinio sluoksnio sensta mažiau, o iš pagrindo sluoksnio turi mažiausią senėjimo laipsnį. Pagal infraraudonųjų spindulių spektroskopiją, taikant Furje transformaciją, dinaminio šlyties reometro (toliau – DSR) ir fluorescencinio mikroskopo rezultatus, bitumas iš pagrindo sluoksnio turi mažiausią senėjimo laipsnį, kurį rodo mažiausias kompleksinis šlyties modulis prie skirtingų dažnių ir nenutrūkstama fazės struktūra. Po senėjimo pasikeitė bitumo mikrostruktūra ir sudėtis, o tai gali paveikti dangos konstrukcijos savybes. Kai atsiranda tokios pažaidos kaip išilginiai plyšiai, priežiūros priemonės turi būti taikomos iškart, kad išvengtų tolimesnio senėjimo gilyn. Dėl neišvengiamo ankstyvojo viršutinio sluoksnio senėjimo, rekomenduojama atlikti tolimesnius viršutinio bituminės dangos sluoksnio struktūros ir medžiagų tyrimus ir optimizavimą.

Ilgalaikis bitumo senėjimas asfalto dangos konstrukcijoje gali atsirasti ne tik dėl atmosferos deguonies, bet ir reaktyvių dujų (pavyzdžiui, azoto oksidai, ozonas). Šios dujos yra daug mažesnės koncentracijos, tačiau turi žymiai didesnę oksidacijos potencialą nei atmosferos deguonis, kai temperatūra lauke neviršija +65 °C, todėl vandenyje tirpūs oksidatoriai (pavyzdžiui, HNO₃, H₂SO₄, H₂O₂) gali prasiskverbti į rišiklį ir paskatinti senėjimą. Mikrofizinis senėjimo modelis, pagrįstas micelės modeliu, paaiškina, kad ilgalaikis senėjimas oksidacijos būdu pakeičia matricos, dangos ir micelės poliškumo pasiskirstymą (angl. *matrix, mantle, and micelle*). Didėjantys poliškumo tarpai dėl oksidacijos paaiškina didėjančią bitumo trapumą, susijusį su rišiklio senėjimu ir makroskopiniu poveiku (Hofko et al., 2015).

Bitumo senėjimo prognozavimui yra atliekami laboratoriniai tyrimai, imituojuantys trumpalaikio bei ilgalaikio senėjimo procesus. Pasaulyje plačiausiai naudojami metodai yra atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, bandymas (RTFOT) ir pagreitintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (toliau – PAV). Filippi et al. (2018) pabrėžia, kad sendinimo procedūrų kiekis yra nepakankamas modifikuotiems bitumams (toliau – PMB). Didelis tokių rišiklių klampumas trukdo patikimai naudoti dinamines procedūras (atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas RTFOT metodu), nes nepakankamai įkaitęs rišiklis gali prilipti prie stiklinės sienelių. Šias problemas siūloma spręsti alternatyviomis procedūromis – moduliniu sukamuoju testu (angl. *modular rolling film door test*) arba greito atsistatymo bandymu (Airey, 2003). Kiti autoriai siūlo pagreitintą ilgalaikį sendinimą (PAV) pratęsti iki 25 valandų (Lesueur, Teixeira, Lázaro, Andaluz, & Ruiz, 2016). Ši procedūra yra statinė, nes nenaudojamos jokios besisukančios fazės, todėl lengviau išvengti nesklandumų, susijusių su didele rišiklio klampa. Ashok et al. (2012) eksperimentiniu tyrimu nustatė, kad polimeru modifikuoto bitumo penetracija po RTFOT sendinimo sumažėja nuo 14,7 % iki 38,2 %, po PAV sendinimo – nuo 32,4 % iki 56,7 %. Minkštėjimo temperatūros rezultatais nustatyta, kad atlikus RTFOT sendinimą, minkštėjimo temperatūra padidėja nuo 7,8 % iki 12,4 %, po PAV sendinimo – nuo 10,3 % iki 26,0 %. Per 16–26 metų bitumo eksploatacijos laikotarpį, bitumo penetracija sumažėja nuo 26,3 % iki 60,0 %, o minkštėjimo temperatūra padidėja nuo 12,4 % iki 24,6 % (Ashok et al., 2012; Jacobson, Hornwall, 1999).

Asfalto eksploatacinėms savybėms didelę reikšmę turi bitumo reologinės savybės – deformacijos ir takumas (Mubarak et al., 2016). Bitumo reologija studijuojama jau kelis dešimtmečius, todėl reologinių savybių nustatymas yra vienas iš pagrindinių tyrimų, apibūdinančių medžiagos deformaciją ir takumą (Goodrich, 1988). Dinaminis šlyties reometras yra naudojamas norint nustatyti bitumo reologines savybes esant vidutinei ir aukštai temperatūrai, atsižvelgiant į kompleksinį šlyties modulį G^* ir fazės kampą δ . Šie parametrai gali būti naudojami charakterizuojant rišiklių klampią ir tamprią

būsenas. Kompleksinis šlyties modulis G^* , nusakantis medžiagos atsparumą deformacijai, susideda iš klampių ir tamprių (negrįžtamų) komponentų. Kadangi bitumo būseną priklauso nuo temperatūros ir laiko, tai šis prietaisas geriausiai atskleidžia bitumo reologines savybes, kurios turi įtakos asfalto dangos konstrukcijos tvarumui (Paliukaitė, 2014). Fazės kampas δ yra santykinis klampaus ir tampraus komponentų dydžių rodiklis. Fazės kampas tarp šlyties įtempių ir šlyties deformacijų esant visiškai tampriai medžiagai lygus 0° , esant visiškai klampiai medžiagai – fazės kampas lygus 90° , klampiai tampriai medžiagai (kaip bitumas) – nuo 0° iki 90° priklausomai nuo bitumo rūšies ir tipo bei temperatūros ir dažnio (Li et al., 2011; Read, Whiteoak, 2003). Rišiklių G^* ir fazės kampo δ reikšmės labai priklauso nuo bandymo temperatūros ir apkrovos dažnio. Pagrindinis DSR bandymo principas yra sinusoidiškai ir svyruojamaisiais virpesiais užkrauti apkrovą ir tokiu būdu paveikti bitumo bandinį, esantį tarp dviejų lygiagrečių plokštelių (Goodrich, 1988; Pink et al., 1980; Read, Whiteoak, 2003).

1.2. Bitumo regeneravimas atnaujinančiomis medžiagomis

Atnaujinančios medžiagos apibrėžiamos, kaip medžiagos galinčios atkurti pirmines bitumo reologines savybes. Todėl daroma prielaida, kad pagrindinis atnaujinančios medžiagos poveikis turėtų būti mažesnis bitumo standumas ir didesnis elastingumas. Pirmasis žingsnis siekiant atkurti pirmines bitumo reologines savybes yra grąžinti santykį tarp asfaltenu ir maltenų (Durante, 2020). Pagal Karlsson ir Isacson (2006), atnaujinančios medžiagos turėtų atstatyti panaudoto rišiklio savybes iki tinkamų statybai ir kelio dangos charakteristikoms, bei tuo pačiu metu ir gerinti bitumo chemines savybes, atsižvelgiant į kelio dangos patvarumą. Atnaujintojas taip pat turi suteikti pakankamai papildomos rišamosios medžiagos, siekiant pagerinti bet kurį naują užpildą, pridėtą į panaudotą mišinį, ir atitikti mišinio konstrukcijos reikalavimus. Be to, atnaujinančios medžiagos turėtų lengvai išsiskirstyti sename rišiklyje tolygiai nuo maišymo iki maišymo ir būti patogios naudojimui. Pažymėtina tai, kad kiekviena atnaujinamoji medžiaga gali bitumą paveikti skirtingai.

Elkashaf (2017) išskyrė dvi rūšis atnaujinančių medžiagų: biologinės bei pagamintos naftos pagrindu. Biologinės atnaujinančios medžiagos neturi maltenų, o cheminė reakcija tarp biologinių produktų ir asfalto sustiprina maltenų ir asfalto atsiskyrimą, kuris jau vyksta dėl senstančios asfalto dangos oksidacijos. Biologinės atnaujinančios medžiagos tiesiog sukelia jau išekvotų maltenų, likusių sendintame asfalto rišiklyje, tirpinimo procesą, o ne papildo juos tikra atstatomąja chemija. Naftos pagrindu pagamintos atnaujinančios medžiagos gali atkurti tinkamą cheminę pusiausvyrą tarp molekulinį komponentų, nes jose yra maltenų. Moksliniais tyrimais įrodytas atnaujinančios medžiagos poveikis mišinyje funkciškai priklauso nuo regeneruoto asfalto tipo (Little et al., 1981; Lin et al., 2011; Mogawer et al., 2013; Zaumanis & Mallick, 2015; Xie et al., 2017; Tran et al., 2017). Martin et al.

(2015) išskyrė atnaujintojus į penkias kategorijas: parafininiai aliejai, aromatiniai ekstraktai, nafteniniai aliejai, trigliceridai ir riebalų rūgštys bei talio aliejai. De Bock et al. (2020) bitumą atnaujinančias medžiagas pagal jų tipą ir kilmę išskirstė į šešias grupes:

1. Aromatiniai ekstraktai, nafteninė alyva gauta iš naftos.

Tai alyva, distiliuota iš naftos, kitaip dar žinoma kaip aromatiniai ekstraktai arba lengvoji ar sunkioji nafteninė alyva. Vėliau šios medžiagos gali būti chemiškai apdorojamos, pavyzdžiui hidrinant (redukuojant vandenilius) aromatinius junginius, tuomet gaunamas didesnis sočiųjų angliavandenilių kiekis ir sumažinamas aromatinių medžiagų kiekis. Taip pat reiktų pažymėti, kad aromatinuose ekstraktuose arba nafteninėje alyvoje gali būti ne maža dalis aromatinių junginių (tokių kaip naftalenas).

Oksidacinio senėjimo metu keičiasi bitumo cheminė sudėtis, pasikeičia asfalteno ir malteno santykis bei dervų ir aromatinių medžiagų santykis. Dėl bitumo senėjimo asfalteno kiekis padidėja, taip sumažinamas maltenų kiekis (pavyzdžiui, aromatinių medžiagų kiekis), todėl išbalansuojama bendra bitumo sudėtis. Šios atnaujinančios medžiagos skirtos atkurti bendrą rišiklio sudėties balansą. Šios grupės atnaujinančios medžiagos plačiai naudojami įvairiuose pasaulio regionuose. Iš visų atnaujinančių medžiagų grupių, ši išsiskiria didžiausia mokslininkų patirtimi, turėdama ilgą istoriją asfalto pramonėje (daugiau nei penkiasdešimt metų sukaupę žinių (Vallerga, 1963)).

2. Perdirbta naudota alyva (automobilių alyva).

Automobilių alyvos eksploataciniu laikotarpiu prikaupia teršalų, ir praėjus naudojimo laikotarpiui yra utilizuojamos kaip atliekos. Tačiau šioje medžiagoje dar lieka dalelių, kurias būtų galima perdirbti. Alyvos atliekos surenkamos profesionaliais prietaisais ir tuomet perdirbamos (atskiriamos medžiagos) distiliuojant (įskaitant distiliavimą vakuume). Po distiliavimo likusios sunkiosios dalelės gali būti panaudojamos kaip bitumo pakaitalas.

Dėl rinkoje esančių įvairių automobilių alyvų, dažniausiai nėra aiški ir nuspėjama tiksli jų cheminė sudėtis. Tačiau ši alyva visuomet yra skirtingų automobilių alyvos ir jose esančių teršalų mišinys. Perdirbtoje automobilių variklių alyvoje gali būti parafino, atsiradusio iš parafino alyvos komponentų. Teršalai, esantys alyvų atliekose (pavyzdžiui, sunkieji metalai, tokie kaip nikelis ir chromas), susikaupia šioje nedistiliuotoje medžiagoje ir kenkia aplinkos savybėms. Sunkieji metalai pat keičia medžiagos sudėtį, todėl keičiasi ir jos poveikis.

Šio tipo atnaujinančios medžiagos veikia kaip minkštintojai, ir gali būti alternatyva minkštajam bitumui, o į bitumą pridėdant tokio tipo perdirbtos alyvos gaunama mažesnė rišiklio klampa (didesnė penetracijos reikšmė). Cheminės sudėties pusiausvyros atstatymui šios atnaujinančios medžiagos nėra

tinkamos. Tai įdomus ir ekonomiškai būdas perdirbti atliekas, tačiau panaudojimas asfalto gamyboje yra abejotinas.

Šios grupės atnaujinančių medžiagų įvairovė yra labai didelė. Nacionalinės alyvos perdirbimo asociacija teigia, kad septyniolika Šiaurės Amerikos perdirbimo įmonių kiekvienais metais pagamina apie 16 000 tonų perdirbtų alyvų, kurios atitinka apie 0,5 % visos bitumo produkcijos. Tačiau nežinoma, kiek šios medžiagos galiausiai panaudojama asfalto atnaujinimui, nes kita dalis naudojama stogo dangų gamybai. Jungtinių Amerikos Valstijų (toliau – JAV) asfalto instituto mokslininkai atliko mokslinės literatūros analizę, kurioje analizavo 26 tyrimus, susijusius su perdirbtos automobilių alyvos panaudojimu bitumo atnaujinimui (Asphalt Institute, 2016). Analizė parodė, kad negalima daryti vienareikšmiškos išvados apie šių medžiagų pranašumus ar trūkumus. Beveik pusėje nagrinėtų tyrimų nustatytas neženklus teigiamas (arba jokio neigiamo) poveikis bitumo atnaujinimui, kitoje pusėje – neigiamas. Nieko keisto, turint omenyje didelius skirtumus tarp šių produktų tipų ir kilmės įvairovės.

3. Perdirbtas maisto pramonės aliejus (augalinės arba gyvulinės kilmės aliejus arba riebalai).

Tai gali būti saulėgrąžų, rapsų, riešutų aliejus arba įvairūs riebalai. Kadangi šios grupės atnaujinančios medžiagos gali būti iš įvairių gamybos atliekų, galima tikėtis skirtingų cheminių sudėčių. Dažniausiai tai riebalų rūgščių, tokių kaip palmitino, oleino ar linolo rūgščių mišiniai, papildyti įvairiomis atliekomis, gautomis naudojimo procese (Ahmed & Hossain, 2020). Šios riebalų rūgštys susidaro kepant maistą aliejuje, nes jame esantis vanduo nėra visiškai išgarinamas. Tai veda prie hidrolizės, kurios metu riebalų rūgščių esteriai virsta riebalų rūgštimis. Tačiau šios rūgštys yra labai kenksmingos antrojo panaudojimo metu, nes rūgštis (ypač esant aukštai temperatūrai) gali sukelti pagreitintą koroziją (pavyzdžiui, metalinių mašinų dalių) ir labai dirgina (pavyzdžiui, akis, odą). Todėl pirmuoju perdirbimo žingsniu, šios riebalų rūgštys turi būti paverčiamos esteriais. Be to, daugelyje riebalų rūgščių grandinių yra vienas ar daugiau nesočiųjų junginių, todėl šie produktai tampa jautrūs oksidacijai (todėl ir temperatūrai). Pažymėtina tai, kad laikui bėgant šie produktai gali keisti savo savybes.

Šio tipo atnaujinančios medžiagos daugiausiai veikia kaip minkštintojai, o į bitumą pridėjus tokios medžiagos gaunama mažesnė rišiklio klampa. Šios grupės atnaujinančios medžiagos yra plačiai analizuojamos ir tiriamos Azijoje. Šiame žemyne maisto gamyboje naudojama itin daug aliejaus, todėl valstybė finansuoja daug tyrimų apie galimą jų panaudojimą pakartotinai. Pakartotino medžiagų panaudojimo atžvilgiu, tai ekonomiškai atliekų tvarkymas, tačiau šios medžiagos nauda asfalto sektoriuje yra abejotina.

4. Augaliniai žemės ūkio aliejai.

Šią grupę sudaro daugybė (bendrųjų) išteklų, daugiausiai iš žemės ūkio, pavyzdžiui, saulėgrąžų, sojų, palmių, ricinos, anakardžių riešutų, medvilnės sėklų, linų sėmenų aliejai ir kt. Šie produktai paprastai yra riebalų rūgščių (ir esterių) mišiniai, pavyzdžiui:

- saulėgrąžų aliejuje daugiausiai yra palmitino (angl. *palmitin*), stearino, oleino (angl. *olein*) ir linolo rūgščių;
- sojų aliejuje daugiausiai yra esterių ir kitų sojų aliejaus riebalų rūgščių;
- palmių aliejuje daugiausiai yra palmitino (angl. *palmitin*), ir oleino (angl. *olein*);
- ricinos aliejus (iš ricinos augalo) daugiausiai yra ricinolio rūgšties triglicerido;
- anakardžių riešutų aliejus (anakardžio medžio riešuto žievelės aliejus) daugiausiai yra fenolio (angl. *phenol*) dariniai su anakardinėmis rūgštimis, kardolis (angl. *cardol*), kardanolis (angl. *cardanol*);
- medvilnės sėklų aliejuje daugiausiai yra linolo (angl. *linoleic*) rūgšties ir oleino (angl. *olein*);
- sėmenų aliejuje daugiausiai yra linolo, linoleno rūgšties ir kiek mažiau oleino.

Žaliavos yra biologinės arba augalinės kilmės, todėl vadinamos biogeniniais (angl. *biogenic*) šaltiniais. Šie produktai veikia kaip minkštintojai, turintys bitumo klampumo mažinimo poveikį. Be to, kai kurie šios grupės produktai taip pat gali veikti kaip sendinto bituminio rišiklio dispergantai, kurie neleidžia bitume susidarantiems oksidacijos produktams jungtis, sulipti arba nusėsti ant trinties paviršių dervų pavidalu. Šių žaliavų perdirbimas asfalto regeneravimui ypatingai paplitęs JAV. Tačiau, pastaraisiais metais šiems produktams nemažas dėmesys skiriamas tiek Europoje, tiek ir visame pasaulyje.

5. Biologiniai inžineriniai aliejai.

Šioje grupėje daugiausiai yra aliejų, kurie specialiai gaunami transformuojant biologines žaliavas, daugiausiai spygliuočių medžių medieną. Šio proceso metu gaunamas sunkusis talio aliejus. Neapdorotas talio aliejus yra spygliuočių medžių rūšių dervos produktas. Tai dervos, riebalų, abietos rūgščių ir kitų sudedamųjų dalių (terpenai ir kanifolija) mišinys, gautas spygliuočių medieną apdorojant rūgštimi. Tai yra šalutiniai popieriaus pramonės produktai. Neapdorotas talio aliejus rafinuojamas biologinėje perdirbimo gamykloje siekiant pagaminti įvairiausių cheminius produktus. Talio aliejus veikia ir kaip minkštintojas, ir kaip dispergantas. Talis priklauso tai pačiai cheminių medžiagų šeimai, kaip ir skystos, nuo praslydimo saugančios medžiagos ar emulsikliai. Įvairių šalių gamintojai, tiek JAV, tiek ir Europos, turi plačią patirtį tiriant tokio tipo atnaujinančias medžiagas. Mokslinėje literatūroje pateikiami laboratoriniai tyrimai bei praktinės patirtys asfalto pramonėje.

Vienas didžiausių išsūkių naftos ir dujų produktų yra atkūrimas iš netradicinių išteklių, tokių kaip sunkioji nafta, skalūnų dujos ir skysčiai, suspaustos dujos ir nafta, anglies sluoksnio metanas (*CMB – coal bed methane*) ir bituminiai angliavandeniliai dėl fizikinių ir cheminių jų savybių, taip pat ir geologinių (Oluwasanu et al., 2019). Mazzoni, Bocci, & Canestrari (2018) tyrė atnaujinančių medžiagų poveikį bitumo senėjimui iš karštai regeneruotų asfalto mišinių. Tyrimui naudotas 50/70 bitumas ir trijų tipų atnaujinančios medžiagos. Pirmoji, neapdorota alyva, gauta iš medienos, naudotos popieriaus pramonėje, ir sudaryta iš riebalų rūgščių ir dervos rūgščių. Antroji atnaujinančioji medžiaga buvo skirtingų cheminių medžiagų mišinys, sudarytas iš modifikuotų poliaminų ir augalinių aliejų (poliaminai yra organiniai junginiai, turintys dvi ar daugiau pirminių amino grupių – NH_2). Trečioji, organinis rafinuotas priedas, sudarytas iš alkilatų (angl. *alkylates*) ir riebalų rūgščių. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad dėl bitumo senėjimo padidėja kompleksinis šlyties modulis $|G^*|$, o tai rodo bitumo kietėjimą ir fazės kampo δ sumažėjimą. Be to, pagrindinės kreivės parametrų analizė rodo formos indekso S sumažėjimą, kuris nusako didesnę bitumo jautrumą dažnio pokyčiams ir didesnę elastingumą. Atlikus bitumo atnaujinimą sumažėjo kompleksinis šlyties modulis ir padidėjo fazės kampas. Visos atnaujinančios medžiagos pakeitė bitumo cheminę sudėtį ir reologiją, sustiprindami bitumo klampos atsistatymą.

Zhang et al. (2020a) atnaujino bitumą 50/70. Pirminį atnaujinantį mišinį sudarytė trys medžiagos: aromatinės alyvos, plastifikatoriaus ir rišamosios medžiagos masės santykiu 100:10:2. Tuomet atnaujinanti medžiaga papildyta 110 penetracijos minkštuoju bitumu skirtingais procentiniais kiekiais: 8, 10, 12, 14, 17. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad sendinto rišiklio standumas (klampumas, kompleksinis šlyties modulis ir fazės kampas), esant ganėtinai aukštai temperatūrai gali būti atkurtas iki pirminio lygio pridedant atnaujinančias medžiagas. Tačiau bitumo elastingumas, atsparumas nuovargiui ir atsparumas drėgmei labai priklauso nuo atnaujinančios medžiagos klampumo. Taip pat nustatyta, kad pridedant atnaujinančių medžiagų sumažėja asfaltenų ir dervų kiekis bitume ir padidėja aromatinių angliavandenilių. Pabrėžiama, kad nei viena iš tirtų atnaujinančių medžiagų neatkūrė sendinto rišiklio komponentinės sudėties iki tokio lygio kaip pirminio bitumo (Zhang et al., 2020a).

Tabatabaee ir Kurth (2017) siekdami geriau suprasti augalinio ir aromatinio aliejų atnaujinimo poveikį bitumui atliko komponentinės sudėties tyrimą. Eksperimentams naudotas bitumas 50/70. Nustatyta, kad pridedant aromatinio aliejaus daugiausiai pakito aromatinių angliavandenilių kiekis, o kitos malteno dalys išliko nepakitusios. Pridėjus augalinio aliejaus malteno fazėje padidėjo ir aromatinių angliavandenilių ir dervų kiekis. Mansourkhaki, Ameri & Daryae (2019) tyrė 60/70 bitumo regeneravimą su naftos pagrindu pagaminta atnaujinančia medžiaga RAPIOL. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad atnaujinanti medžiaga sumažina asfaltenų procentą ir tuo pačiu padidina

aromatinių medžiagų kiekį. Matolia et al. (2020) atliktas VG40 bitumo atnaujinimo tyrimas su panaudotu augaliniu aliejumi, kuris gautas iš kepatos žuvies. Komponentinės sudėties tyrimas parodė, kad aromatinių medžiagų dalis padidėja nuo 22,5 % bitumui pasendintam 48 valandų trukmės pagreitintu ilgalaikiu sendinimu iki 30,3 % pridėjus 6 % atnaujinančios medžiagos. Aromatinių medžiagų dalis padidėja ir didinant atnaujinančios medžiagos kiekį. Nors nežymiai, tačiau didinant atnaujinančios medžiagos kiekį taip pat padidėjo sočiųjų angliavandenilių kiekis. Analogiškai didėjant šių medžiagų dalims, nustatytas dervų ir asfaltenu kiekio sumažėjimas. Zhang et al. (2019) ištyrė bitumo 60/70 atnaujinimą su komercinės paskirties naftos pagrindo atnaujinančia medžiaga (R1) ir sukūrė atnaujinančią medžiagą sudarytą iš gumos alyvos, plastifikatoriaus ir paviršiaus aktyviųjų medžiagų (R2). Pridėjus 10 % atnaujinančios medžiagos nuo bitumo masės, nustatytas aromatinių medžiagų kiekio padidėjimas atitinkamai nuo 36,07 % iki 40,34 % – su R1 atnaujinančios medžiagos ir atitinkamai iki 37,97 % – su R2. Atnaujinančios medžiagos pridėjimas gali atkurti lengvųjų komponentų kiekį regeneruotame bitume. Palyginimui, regeneruotame bitume su R1 nustatytas didesnis aromatinių medžiagų ir mažesnis asfaltenu kiekis nei su R2.

Dažniausiai naudojamos regeneravimo priemonės yra pagamintos naftos pagrindu. Siekiant sukurti biologines atnaujinančias medžiagas, mokslininkai ištyrė biologinių aliejų poveikį sendinto bitumo mechaninėms savybėms (Forton et al., 2019; Ganter et al., 2019; Joni, Al-Rubae, & Al-zerkani, 2019; Mazzoni et al., 2018a; Nciri et al., 2020; Zhang et al., 2020b). 2 lentelėje pateikiami įvairių mokslininkų atliktų tyrimų rezultatai. Atnaujinimo poveikis priklauso nuo naudoto bitumo, atnaujinančios medžiagos bei jų santykio mišinyje. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad atnaujinus bitumą, sumažinama jo klampa ir minkštėjimo temperatūra, taip pat sumažėja senėjimo poveikis regeneruotam mišiniui. Zaumanis et al. (2014) teigia, kad biologinės atnaujinančios medžiagos gali pralengti naftos pagrindu pagamintas atnaujinančias medžiagas.

2 lentelė. Skirtingų atnaujinančių medžiagų ir jų kiekių įtaka bitumo regeneravimui

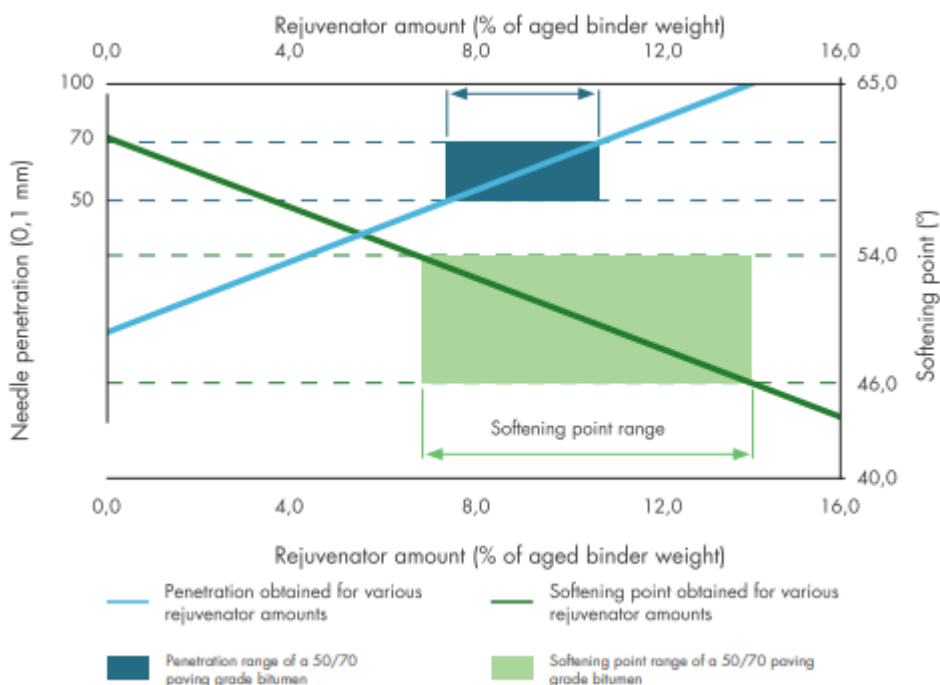
Bitumas	Atnaujinanti medžiaga	Atnaujinančios medžiagos kiekis nuo bitumo masės	Poveikis	Literatūros šaltinis
Regeneruotas 50/70	Gyvulių riebalai. Sudaryti iš riebalų, liekamosios odos ir mėsos, kurie lėtai kaitinami ir filtruojami per audinį, kad būtų pašalintos netirpios dalelės.	3%, 6%, 9%	Riebalai gali padidinti atnaujintos asfalto dangos patvarumą atkuriant pirminės cheminės sudėties balansą. Šis išskirtinis termiškai stabilus biologinis produktas taip pat gali sumažinti rišiklio maišymo ir tankinimo temperatūrą, tokių būdu sumažindamas energijos išteklius. Taip pat sureguliuojamos rišiklio fizikinės ir reologinės savybės, nes sumažinama klampa ir minkštėjimo temperatūra bei padidėja skvarba ir atitinkamos DSR vertės, kurios prailgina dangos gyvavimo ciklą.	Nciri et al., 2020
50/70	Aromatinės alyva, kurią sudaro 78 % aromatinio angliavandenilio ir dervų junginiai su nedideliu kiekiu sočiųjų riebalų rūgščių.	15%	Po ilgalaikio sendinimo atlikus atnaujinimą pilnai atkuriamos pirminės bitumo savybės.	Hong et al., 2020
PMB 45/80-55	Junginys sudarytas iš 77 % aromatinės alyvos ir 23 % SBS polimero.	15%	Sumažina nuovargio parametrus ($G^*\sin\delta$) ir nuovargio temperatūrą (temperatūrą prie kurios $G^*\sin\delta = 5000$ kPa). Dėl polimerų tinklų susidarymo regeneruotas rišiklis išlaiko pusiausvyrą tarp aukštos ir žemos temperatūros.	
50/70	Lengvai maišoma neapdorota alyva, gaunama perdirbant pušies medieną popieriaus pramonėje (A).	6%	Naudojant A ir B tipo atnaujinančias medžiagas garantuojamas mažesnis senėjimo poveikis platesniame temperatūrų diapazone (iki 58 °C (o tokiame pačiame temperatūros diapazone regeneruotas C tipu bitumas turi panašias standumo vertes prieš ir po sendinimo. Aukštesnėje temperatūroje) $T >48$ °C) įvyksta panašus, šiek tiek didesnis ar net dvigubai didesnis kietėjimas, kai atitinkamai pasirenkamas A, B, arba C priedas.	
	Įvairių cheminių medžiagų mišinys, sudarytas iš modifikuotų poliaminų ir augalinių aliejų (B).	6%		
	Organinis rafinuotas priedas, susidedantis iš alkilatų ir riebalų rūgščių (C).	3%		
Regeneruotas 50/70	Polangos aliejus. Šis aliejus gaunamas iš medžio vadinamo Punna sėklų. Šie medžiai auga smėlėtoje žemėje, pakrantėse Indijoje.	5%, 10%, 15%	Didinant priedo kiekį, sumažėjo bitumo klampumas. Kompleksinis šlyties modulis taip pat sumažėjo didinant priedo kiekį. Nustatyta, kad 5 % priedo regeneruotas bitumas yra efektyvus norint gauti reikiamas reologines pirminio bitumo savybes. 5 % regeneruotas bitumas taip pat parodė geresnį atsparumą provėžoms ir nuovargiui, net geresnį nei pirminio bitumo.	Pradhan & Sahoo, 2019
20/30 40/50	Augalinio aliejaus atliekos (WVO) gautos iš maisto pramonės. Panaudota variklių alyva (WEO) gauta iš automobilių servisų.	1%, 2%, 3%	Padidėja penetracijos ir standumo vertės, tuo pačiu sumažėja klampumas ir minkštėjimo taškas. Abiejų priedų panaudojimas sumažina asfaltenų kiekį taip sumažindamas sendinto asfalto kietumą, kas patvirtina penetracijos padidėjimą ir klampumo sumažėjimą. Optimalus kiekis WVO ir WEO atitinkamai 1 % ir 3 %. Visi regeneruoti bitumai pasižymi didesniu atsparumu senėjimui, palyginti su originaliu bitumu, o jų sugrąžintos penetracijos ir elastingumo vertės buvo didesnės nei pirminio bitumo. WVO poveikis bitumui didesnis nei WEO.	Joni et al., 2019
PMB 25/55-55	Biologiniai priedai gaminami iš pušies medienos perdirbimo (R1) ir anakardžių riešutų aliejus (R2). Distiliuota perdirbta variklių alyva (R3)	4%, 6%, 8%	Atnaujinančio priedo poveikis bitumo reologinėms savybėms labai priklauso nuo bitumo ir atnaujinančio priedo kiekio santykio. Šlyties reologinės savybės parodė, kad visi naudoti priedai daro įtaką didinant klampių komponentų kiekį, gerinant panaudojimą ir išlaikant eksploatacines savybes prie aukštų temperatūrų. Be to, tempiamosios reologinės charakteristikos parodė, kad R1 ir R2 gali sumažinti riboto tamprumo modulį ir tamprumo-plastiškumo perėjimo greitį sendintam rišikliui.	Ganter et al., 2019

1.3. Bitumo atnaujinimo metodikų apžvalga

Bitumo atnaujinimo procesas yra aktuali tema, susijusi su karšto regeneravimo kelyje ir pakartotino asfalto panaudojimo technologijomis, kur sendinto bitumo savybės gali būti daugiau arba mažiau atkurtos pridendant atitinkamą kiekį cheminės – atnaujinančios medžiagos. Įvairios medžiagos naudojamos bitumo atnaujinimui siekiant sumažinti klampumą ir standumą. Kadangi bitumo senėjimas yra susijęs su skirtingais fizikiniais ir cheminiais mechanizmais (oksidacija, garavimas, struktūriniai pokyčiai), įvairios atnaujinančios medžiagos naudojamos, bitumo minkštėjimo temperatūros pagerinimui, struktūros savybių atkūrimui (Loise et al., 2019).

Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimas yra esminis žingsnis siekiant efektyviai atkurti sendinto bitumo savybes. Jei priedo kiekis bus per mažas, atkurti bitumo savybes gali nepavykti, o jei per didelis, bitumas taps per minkštas ir padidės provėžų atsiradimo tikimybė. Todėl labai svarbu nustatyti optimalų atnaujinančios medžiagos kiekį, kad pasiekti reikalingas bitumo savybių charakteristikas (Pradhan & Sahoo, 2019). Siekiant nustatyti atnaujinančios medžiagos kiekį, kad pasiekti atitinkamas reikšmes (penetraciją, minkštėjimo temperatūrą, klampumo laipsnį, eksploatacinį laipsnį) taikomi įvairūs kriterijai, tokie kaip klampumas aukštoje temperatūroje (Romera et al., 2006; Zaumanis, Mallick, Poulikakos, & Frank, 2014), eksploatacinės savybės (Im, Zhou, Lee, & Scullion, 2014; Mogawer, Booshehrian, Vahidi, & Austerman, 2013). Shen, Amirkhanian, & Lee, (2005) ir Chen, Leng, Wu, & Sang, (2014) atliko tyrimus, naudodami fizikines ir reologines regeneruotų ir pirminių bitumų savybes, kad nuspręstų, koks atnaujinančios medžiagos kiekis yra efektyvus.

Pagal Europos asfalto dangų asociaciją (2018), kiekvienu konkrečiu atveju reikia nuspręsti ar bitumo penetracija ir minkštėjimo temperatūra turi pasiekti tam tikras vertes, kad atitiktų standartines rišiklio kategorijas ar pirmenybė turėtų būti teikiama atsižvelgiant į galutinio mišinio bandymų rezultatus. Europoje penetracijos reikšmės ir minkštėjimo temperatūra yra naudojami apibūdinti bituminius rišiklius. Taip pat šios charakteristikos gali būti naudojamos nustatyti atnaujinančios medžiagos kiekį. Norint nustatyti atnaujinančios medžiagos poveikį, pagrindinis dėmesys skiriamas tam, kad būtų pasiektas elastingumas, o po to reikia patikrinti konsistenciją aukštoje temperatūroje (atsparumą nuovargiui). Taigi pirmiausia reikia nustatyti atnaujinančios medžiagos kiekį, reikalingą atstatyti penetracijos reikšmei ir po to reikia patikrinti minimalų minkštėjimo temperatūros tašką. Pavyzdys, iliustruojantis atnaujinančios medžiagos kiekio įtaką empiriniams parametrų palyginti su skirtingu atnaujinančios medžiagos kiekiu pateikiamas 2 paveiksle. Atnaujinančios medžiagos kiekis taip pat priklauso nuo jo ir bitumo rūšies.



2 pav. Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo numatomi bitumo penetracijai ir minkštėjimo temperatūrai schema (Koudelka, Porot, Coufalik & Varaus, 2018)

2 paveiksle pateikiamas atnaujinančios medžiagos kiekio diapazonas, kai atnaujinantis rišiklis atitinka 50/70 rūšies bitumą. Optimalus kiekis skiriasi priklausomai nuo pasirinktos savybės. Todėl svarbu pasirinkti tinkamą parametą, kad atitiktų *LST EN 1259:2009* nustatytus bituminių rišiklių reikalavimus po atnaujinimo (European Asphalt Pavement Association, 2018). Penetracijos sistema nepateikia išsamios asfalto rišiklių eksploatacinių savybių vizijos, tačiau leidžia nustatyti optimalią atnaujinimo priemonės dozę, atkuriant standumą nepakenkiant aukšta temperatūra (Wang, Falchetto, Riccardi, & Hugener, 2020). Taigi, net ir empirinių savybių atveju reikia ieškoti parametru interpretavimo paaiškinimų. Labai svarbu pasirinkti parametrus, pagal kuriuos bus parenkamas optimalus atnaujinimo priemonės kiekis.

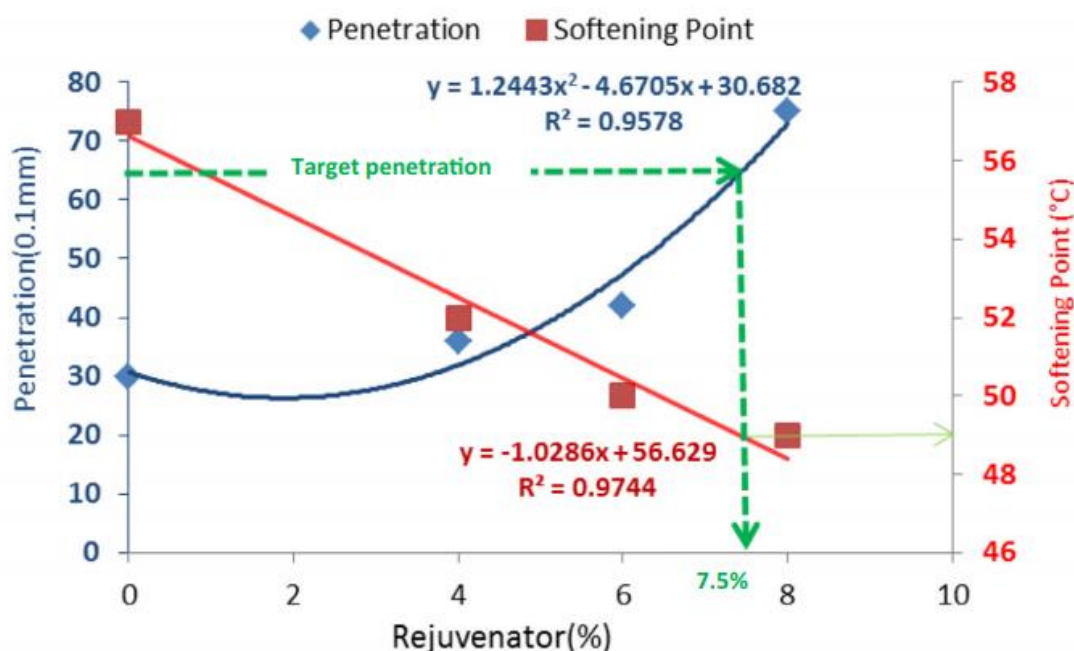
Ameri, Mansourkhaki, & Daryaei (2018) norėdami nustatyti optimalų atnaujinančios medžiagos kiekį, palaipsniui pridėdinėjo po 2 % regeneruoto asfalto rišiklio masės priedo. Tyrimams naudotas bitumo modifikatorius „RAPIOL“, kuris yra skystos formos ir palengvina bitumo naudojimą sumažindamas jo klampumą. Tuomet bandiniams buvo atlikti penetracijos ir minkštėjimo temperatūros bandymai. 3 paveiksle vaizduojama kaip keičiasi penetracija ir minkštėjimo temperatūra, kai didinamas atnaujinančios medžiagos kiekis mišinyje. Padidėjus „RAPIOL“ kiekiui, mišinio penetracija padidėjo, o jo minkštėjimo temperatūra sumažėjo. Priedo kiekis buvo nustatytas siekiant gauti tokią pačią

penetraciją kaip ir pirminio bitumo (t. y. 60/70). Remiantis 3 paveiksle pateiktomis regresijos lygtimis, buvo nustatyta, kad regeneruoto asfalto rišikliui reikia 7,5 % atnaujinančios medžiagos, kad pasiekti tą pačią penetraciją ir minkštėjimo temperatūrą, kaip pirminio bitumo.

Zaumanis, Mallick, & Frank, (2013) bandinių paruošimui taikė metodiką atsižvelgiant, kad:

- 1) regeneruoto mišinio penetracija prie 25 °C temperatūros turi būti panaši į originalaus bitumo, ir jeigu įmanoma, nepridedant per didelio atnaujinančios medžiagos kiekio;
- 2) visi bandiniai turi būti vienodo tūrio ir storio.

Siektina bitumo penetracija regeneruotuose bandiniuose nustatyta kaip 90 dmm, kuri yra artima Nustar PG 64-22 penetracijai. Atnaujinančios medžiagos kiekis buvo apskaičiuotas atlikus papildomus penetracijos matavimus. Reikalingas atnaujinančios medžiagos kiekis, kad pasiekti norimą penetraciją buvo pasirinktas 18,26 % rišiklio masės. Toks rišiklio kiekio normalizavimas iki 6,03 % (5,1 % regeneruotas riškis + 0,93 % pirminis riškis) gali nebūti optimaliausia procedūra pagal mišinių projektavimo principus. Tačiau siekiant tiesiogiai palyginti skirtingų atnaujinančių medžiagų poveikius, šis metodas tinkamiausias, nes galima palyginti skirtingų medžiagų bandymų rezultatus nepridedant naujų kintamųjų (pavyzdžiui, pirminų medžiagų, kad sumažinti bitumo kiekį) (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2013).



3 pav. Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo numatomi bitumo penetracijai ir minkštėjimo temperatūrai grafikas (Ameri et al., 2018)

Zhang et al. (2020) atnaujinančios medžiagos kiekį apskaičiavo pagal 1 formulę, remiantis Kinijos standartu „JTG F41-2008 Asfalto dangų perdirbimo techninės specifikacijos“. Tuomet atnaujinančios medžiagos optimalus kiekis nustatytas remiantis dviem eksperimentiniais parametrais (penetracija ir klampa prie 90 °C) regeneruoto bitumo. Nustatyti atnaujinančios medžiagos kiekiai pateikiami 3 lentelėje.

$$lg\lg\eta_{mix} = (1 - \alpha)lg\lg\eta_{old} + lg\lg\eta_{new} \quad (1)$$

čia η_{mix} – regeneruoto bitumo klampumas prie 60 °C temperatūros (Pa·s); η_{old} – sendinto bitumo klampumas prie 60 °C temperatūros (Pa·s); η_{new} – atnaujinančios medžiagos klampumas prie 60 °C temperatūros (Pa·s); α – atnaujinančios medžiagos kiekis.

3 lentelė. Optimalus atnaujinančios medžiagos kiekis bitumo atnaujinimui (Zhang et al., 2020b)

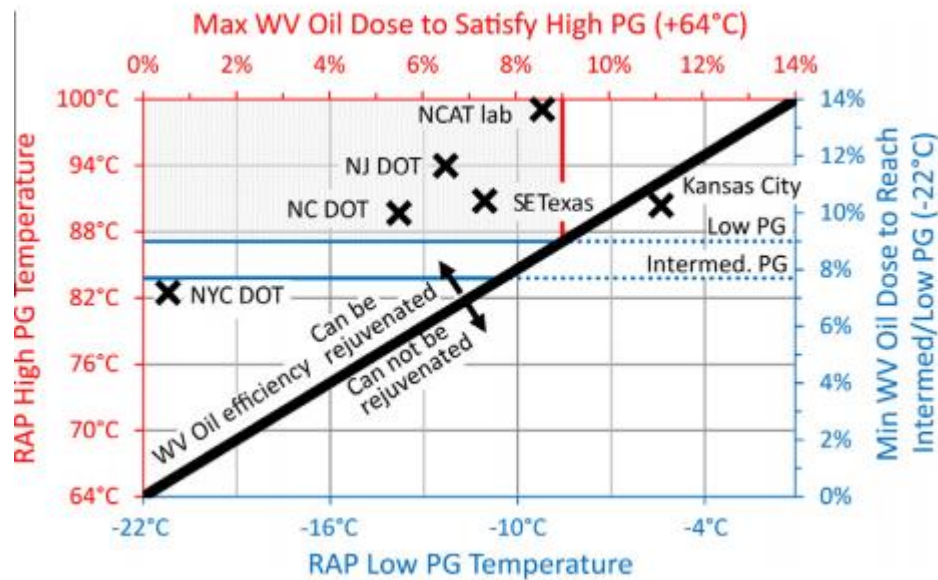
Atnaujinanti medžiaga	R1	R2	R3	R4	R5
Optimalus kiekis (%)	8	10	12	14	17

Bitumo klasifikavimo sistemoje pagal Superpave, tradicinės bitumo fizikinės savybės, kaip penetracija ir minkštėjimo temperatūra, nebuvo laikomi kaip svarbiausi parametrai, didžiausias dėmesys buvo skiriamas bitumo funkcionavimo temperatūrų riboms, kurios priskiriamos eksploatacinių charakteristikų (PG) sistemai. Bitumo klasifikavimas pagal PG sistemą remiasi bitumo bandymais prie įvairių temperatūrų, imituojančiais kritiškiausias bitumo eksploataavimo sąlygas. Pirmoje stadijoje bandymai atliekami su natūraliu bitumu, imituojant jo transportavimą, laikymą ir saugojimą. Antroje bandymų stadijoje imituojamas bitumo trumpalaikis senėjimas asfalto maišymo ir klojimo metu. Trečia stadija apibūdina bitumo ilgalaikį senėjimą asfalto dangos konstrukcijos eksploatacijos metu (Paliukaitė, 2014).

Kitame, Zaumanis, Mallick, & Frank, (2014) atliktame tyrime buvo įvertintas šešių skirtingų atnaujinančių medžiagų efektyvumas regeneruojant bitumą. Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais sukurta procedūra atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimui norint pasiekti atitinkamas eksploatacines charakteristikas (PG angl. *performance grade*). Procedūrą sudaro šie žingsniai:

- 1) pradinio kiekio nustatymas, kad pasiekti regeneruoto bitumo penetracijos reikšmę;
- 2) sendinto bitumo bandymai aukštų, žemų ir vidutinių funkcionavimo temperatūrų riboms nustatyti prieš ir po atnaujinimo;

- 3) maksimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio nustatymas, kad būtų patenkinama (angl. *satisfy*) aukšta PG temperatūra (2 formulė);
- 4) minimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio nustatymas, kad būtų patenkinta žemo ir vidutinio PG reikalavimai (3 ir 4 formulės) ir pasirinkite didesnę, kaip minimumo reikšmę;
- 5) po to kai atliekamas statistinis PG įvertinimas atsižvelgiant į vietovę ir atsargumą pasirenkamas optimalus kiekis tarp maksimalios ir minimalios reikšmės. Tokių grafikų kaip 4 paveiksle panaudojimas, gali padėti pasirinkti kiekį, kad užtikrinti reikiamas PG reikšmes skirtingas savybes turintiems bitumams ir identifikuoti bitumus kurie negali būti regeneruoti pasirinkta atnaujinančia medžiaga ir jos kiekiu.



4 pav. Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo schema atsižvelgiant į kritinę aukščiausią ir žemiausią PG temperatūrą

$$\text{Maksimalus kiekis, \%} = \frac{(\text{high } PG_{\text{target}} - \text{high } PG_{\text{RAP}}) \cdot (-\%_{\text{trial}})}{\text{high } PG_{\text{RAP}} - \text{high } PG_{\text{trial}}} \quad (2)$$

$$\text{Minimalus kiekis, \%}_{\text{low PG}} = \frac{(\text{low } PG_{\text{target}} - \text{low } PG_{\text{RAP}}) \cdot (-\%_{\text{trial}})}{\text{low } PG_{\text{RAP}} - \text{low } PG_{\text{trial}}} \quad (3)$$

$$\text{Min dose, \%}_{\text{intermed PG}} = \frac{(5000 - \text{intermed } PG_{\text{RAP}}) \cdot (-\%_{\text{trial}})}{\text{intermed } PG_{\text{RAP}} - \text{intermed } PG_{\text{trial}}} \quad (4)$$

Čia *maksimalus kiekis, %* – yra maksimalus atnaujinančios medžiagos kiekis, kad atitiktų aukštus PG reikalavimus, % nuo bitumo masės; *Minimalus kiekis, %_{low PG}* – minimalus atnaujinančios medžiagos kiekis, kad atitiktų žemus PG reikalavimus, % nuo bitumo masės; *%_{trial}* – atnaujinančios

medžiagos kiekis bandomajam maišymui %; *high PG_{target}* – nurodyta aukšta PG temperatūra, °C; *high PG_{RAP}* – regeneruoto asfalto mišinio aukšta PG temperatūra C; *high PG_{trial}* – aukšta PG temperatūra bandomajam maišymui, °C; *low PG_{target}* – nurodyta žema PG temperatūra, °C; *low PG_{RAP}* – regeneruoto asfalto mišinio žema PG temperatūra, °C; *low PG_{trial}* – žema PG temperatūra bandomajam maišymui, °C; *intermed PG_{RAP}* – regeneruoto asfalto mišinio G* $\sin\delta$ „Superpave“ tarpinėje temperatūroje, kPa; *intermed PG_{trial}* – yra G* $\sin\delta$ bandomajam mišiniui „Superpave“ tarpinėje temperatūroje, kPa.

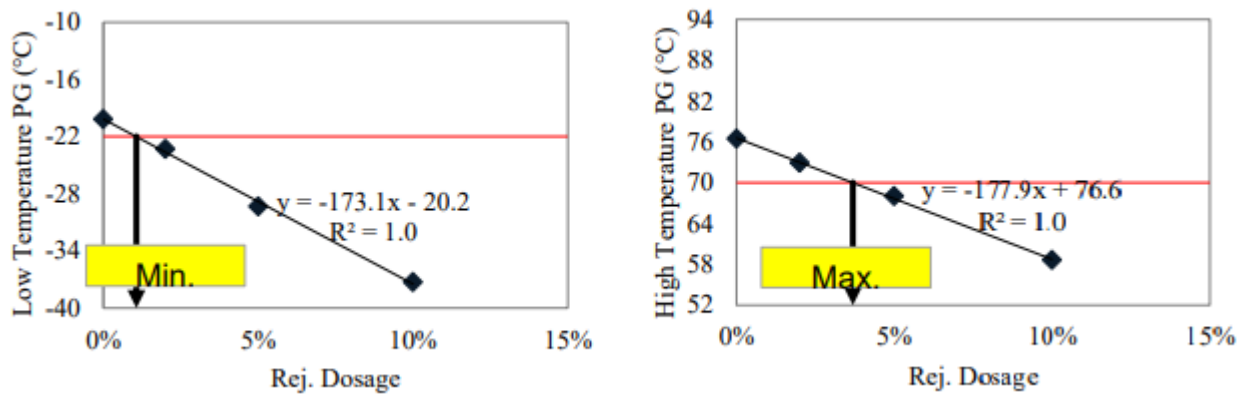
Remiantis Romera et al. (2006), sendinto bitumo atnaujinimo medžiagai parinkti taikomi reologiniai metodai. Asfaltų glaustos struktūros suirimą nulemianti terminė tranzicija yra nustatoma dinamine mechanine šilumos analize. Sendintam bitumui šis perėjimas vyksta prie aukštesnės temperatūros, tačiau pridėdant atnaujinamųjų medžiagų, perėjimas sugrįžta į pradinę vertę. Vadinamasis „provėžų koeficientas“ G*/ $\sin\delta$ leidžia nustatyti maksimalią temperatūrą, kurią rišiklis gali pasiekti be liekamųjų deformacijų. Pagal klampumo rezultatus mokslininkai nustatė, kad sendintam bitumui reikalinga aukšta maišymo temperatūra (>200 °C), kad jis taptų skysta medžiaga ir galėtų prikibti ir suklijuoti mineralines medžiagas.

Barborak (2018) išskiria tris aspektus optimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimui:

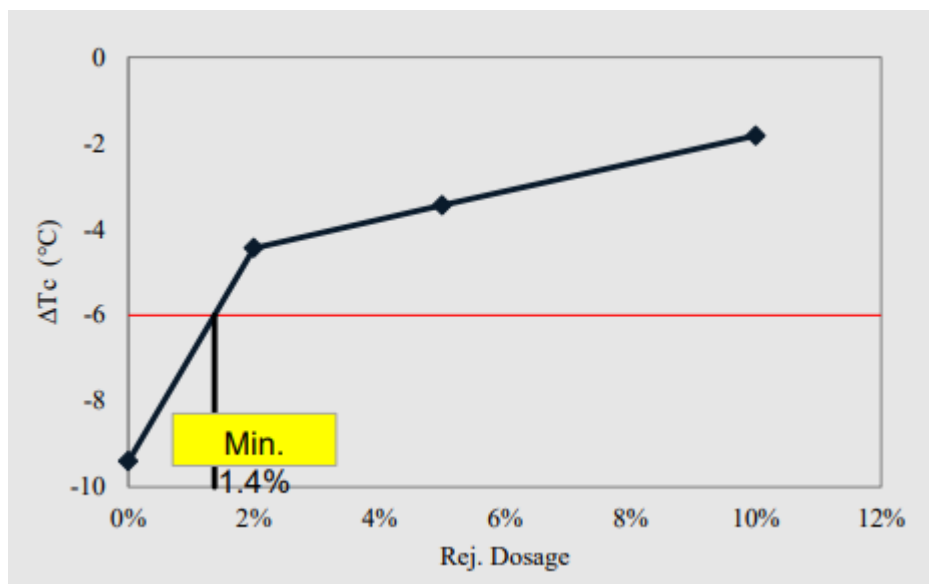
- Reologinės savybės:
 - PG aukšto laipsnio reikalavimai,
 - PG žemo laipsnio reikalavimai;
- Rišiklio kokybės reikalavimai:
 - ΔT_c reikalavimai;
- Senėjimo charakteristikos bitumo mišinio:
 - Panašios (arba geresnės) senėjimo charakteristikos nei paprasto bitumo.

Tyrimai atlikti su pirminiu bitumu PG 70-22. Buvo siūloma sumaišyti 30 % RAP (PG 94-10) ir PG 64-22. Atnaujinančios medžiagos kiekis buvo didinamas tol, kol pasiekė DSR aukštos temperatūros laipsnį ir BBR žemos temperatūros laipsnį, kad atitiktų originalias bitumo PG 70-22 savybes (žr. 5 pav.).

Nustatytos atnaujinančios medžiagos kiekio ribos yra nuo 1,1 % iki 3,7 %. Bitumo kokybės reikalavimas $\Delta T_c \geq -6$ °C (žr. 6 pav.).



5 pav. Bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio minimali ir maksimali riba, kad atitiktų PG reikalavimus (Barborak, 2018)

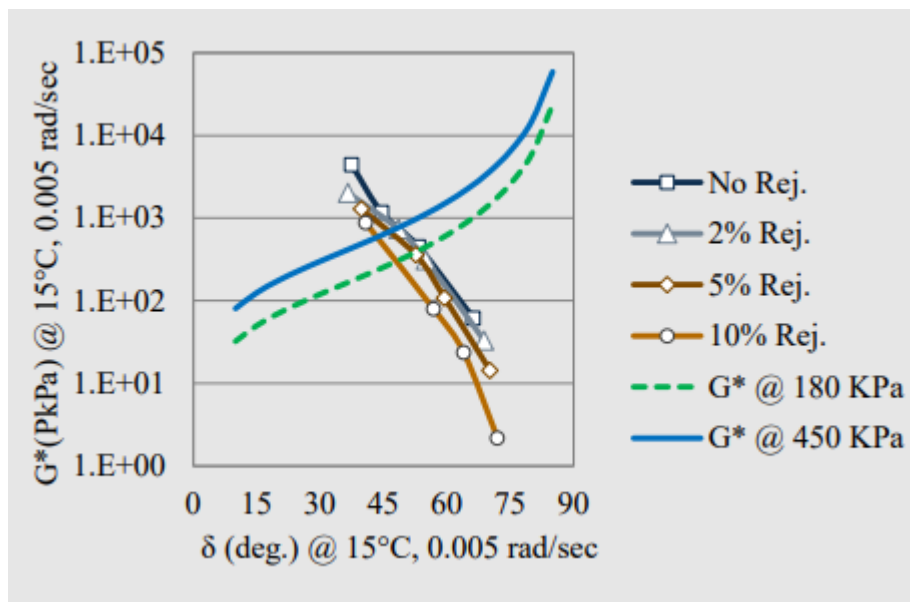


6 pav. Minimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio nustatymas pagal rišiklio kokybės reikalavimą (Barborak, 2018)

Minimalus atnaujinančios medžiagos kiekis, kad patenkintų bitumo kokybės reikalavimą yra 1,4 %. Kitas žingsnis yra senėjimo charakteristikų tikrinimas (žr. 7 pav.):

- „Glover-Rowe“ parametras;
- tikslas pasiekti pirminio bitumo senėjimo savybes.

Taigi, kokį atnaujinančios medžiagos kiekį parinkti, priklauso nuo inžinieriaus sprendimo. Didesnis atnaujinančios medžiagos kiekis reikalingas toms vietoms, kuriose dažniau susidaro plyšiai, o mažesnis, kurios rečiau.



7 pav. Bitumo senėjimo charakteristikų tikrinimas (Barborak, 2018)

Atliekant asfalto dangos regeneravimą kelyje, turi būti atliktas regeneruoto mišinio projektas (tipo bandymas), kad gautas mišinys atitiktų nustatytus reikalavimus, taikomus įprastiems mišiniams. Epps, Little & Holmgreen (1980) rekomenduoja sukurti apie penkis mišinius su skirtingais regeneruoto asfalto ir priedų deriniais (atnaujinančiomis medžiagomis, neapdorotais užpildais ir karšto asfalto mišinio priemaišomis), rezultatus lyginant su specifikacijų reikalavimais. Regeneruoto asfalto projektų (tipo bandymų) skaičius priklauso nuo objekto, kelio kategorijos, pažaidų masto ir rūšies.

Pasak Russell et al. (2010), pagrindinis mišinio projektavimo metodas yra pagaminti perdirbtą mišinį su kuo artimesnėmis savybėmis karšto mišinio asfaltui. Įvardijami tokie žingsniai mišinio projekto kūrimui:

- esamos dangos vertinimas;
- perdirbamos medžiagos poreikio nustatymas;
- priedų poreikio nustatymas;
- mėginių mišinių gamyba ir bandymas;
- optimalaus mišinio parinkimas.

Projektuojant regeneruoto asfalto mišinį, būtina remtis esamos dangos sluoksnių mišiniais, išgręžtais objekte ne mažesniu gyliu nei numatyta regeneruoti. Gręžiniai turėtų būti iš tipinės kelio dalies arba atsitiktinai imami visame kelyje. Rekomenduojama, kad reprezentacinis pjūvis būtų gręžiamas iki perdirbamo gylio, kad būtų parūpintas pakankamas kiekis medžiagos mišinio projektavimui. Pagal *Automobilių kelių asfalto dangų priežiūrai skirtų medžiagų ir medžiagų mišinių*

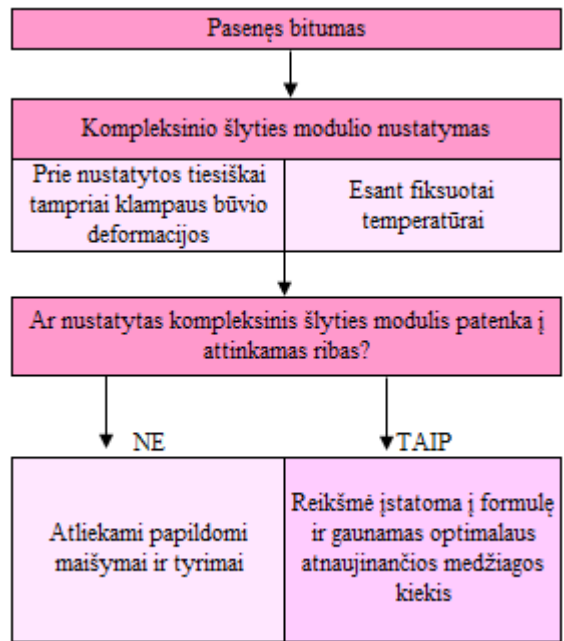
panaudojimo ir jų sluoksnių įrengimo taisyklės IT APM 10 (VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2010), gręžtiniai kernai imami ne rečiau kaip kas 250 m. Gręžtinių kernų kiekis vienoje vietoje priklauso nuo tinkamumui įrodyti reikalingų bandymų apimtys. Tačiau vienoje vietoje imami ne mažiau kaip du 150 mm diametro gręžtiniai kernai. Vienas dalinis ėminys skiriamas numatyto regeneruoti asfalto mišinio savybėms nustatyti. Kiti daliniai ėminiai, kurie yra vienodų savybių, skiriami sudaryti reprezentatyvų ėminių tolesniems tinkamumo įrodymo bandymams. Jeigu dalinių ėminių savybės nėra vienodos, reikia imti papildomus gręžtinius kernus mažesniais atstumais, kad būtų galima nustatyti skirtingų dalinių plotų ribas. Kelyje paimti ėminiai paruošiami pagal *LST EN 12697-28:2020* standartą. Nustatoma kiekvieno ėminio rišiklio kiekis pagal *LST EN 12697-1:2020* ir granulimetrinė sudėtis pagal *LST EN 12697-2:2015*. Bandant regeneruotą rišiklį mažiausiai turi būti nustatoma minkštėjimo temperatūra pagal standartą *LST EN 1427:2015*. Vėliau, atsižvelgiant į numatomas transporto eismo apkrovas, yra parenkama galutinio asfalto mišinio projekcinė sudėtis.

Papildomo mišinio kiekis nustatomas atsižvelgiant į planuojamą galutinio mišinio sluoksnio storį ir prireikus – į tūrinį tankį. Turi būti remiamasi iš gręžtinių kernų atrinktų asfalto dalinių ėminių sudėties nustatymo vidurkio vertėmis. Papildomo mišinio sudėtis nustatoma atsižvelgiant į regeneruoti numatyto sluoksnio asfalto mišinio sudėtį ir į papildomo mišinio priedamą kiekį. Detaliai yra pateikiama:

- mineralinių medžiagų rūšis ir kiekis;
- rišiklio kiekis masės % (t. y. skaičiuojant nuo asfalto mišinio masės);
- rišiklio rūšis ir markė.

Papildomo mišinio sudėtis parenkama atsižvelgiant į tai, kad ji būtų įmanoma pagaminti gamykloje ir transportuoti. Jeigu papildomo mišinio kiekis galutiniame asfalto mišinyje sudarys daugiau kaip 30 %, turėtų būti numatyta atlikti bandymus su trimis skirtingais rišiklio kiekiais.

Atsižvelgiant į atliktą literatūros analizę sukurtas teorinis kelių bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo modelis, kad nustatyti mechaninėmis savybėmis paremtą algoritmą, kuris pateikiamas 8 paveiksle.



8 pav. Mechaninėmis savybėmis paremtas teorinis atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas

1.4. Skyriaus išvados

1. Kelio eksploatacijos metu bitumas asfalto sluoksniuose kietėja ir praranda elastingumą. Šias pasekmes lemia: saulės UV radiacija, temperatūra, aplinkos deguonis, kurie bitumą veikia visu kelio eksploatacijos laikotarpiu. Šis neigiamas aplinkos veiksnių poveikis didžiausias asfalto viršutiniame sluoksniui. Modifikuotas bitumas funkcionuoja ir sensta ne taip kaip paprastas bitumas, tačiau pasikeitę bitumo komponentai gali nulemti polimerų degradaciją.
2. Įvairių šalių mokslininkai charakterizuoja atnaujinančias medžiagas ir skirsto į skirtingas grupes. Plačiausios yra biologinės bei pagamintos naftos pagrindu. Atnaujinančios medžiagos apibūdinamos pagal kilmę, cheminę sudėtį ir poveikį. Dauguma atnaujinančių medžiagų veikia kaip minkštinančios, kurios sumažina klampumą (maltenų kiekį). Kitos gali nutraukti ar suardyti sąveiką ar molekulinis ryšius tarp asfaltenų (dėl oksidacijos), todėl skirtos pagerinti dalelių atskyrimą ir užkirsti kelią jų nusėdimui ar susikaupimui. Cheminės sudėties balansą gali atkurti tik naftos pagrindu pagamintos atnaujinančios medžiagos.
3. Bitumo atnaujinimas yra sudėtingas procesas, kurio metu vienas iš svarbiausių veiksnių yra nustatyti optimalų priedo kiekį. Jei priedo kiekis bus per mažas, atkurti bitumo savybių gali nepavykti, o jei per didelis, bitumas tampa per minkštas ir padidina provėžų atsiradimo tikimybę. Dauguma tyrėjų naudoja metodiką, paremtą penetracijos ir minkštėjimo temperatūros rezultatais, kiti mokslininkai naudoja penetracijos ir klampos bandymų rezultatus, kur iš gautų rezultatų apskaičiuojamas optimalus atnaujinančios medžiagos kiekis. Kita dalis tyrėjų atlieka bandymus su skirtingais kiekiais atnaujinančios medžiagos, kol pasiekiamos reikalingos bitumo savybės (priartėjimo būdu). Atliekant asfalto dangos regeneravimą kelyje, turi būti atliktas regeneruoto mišinio projektas (tipo bandymas), kad gautas mišinys atitiktų nustatytus reikalavimus, taikomus įprastiems mišiniams.
4. Remiantis literatūros analize sukurtas teorinis kelių bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo modelis, kuriuo siekiama optimizuoti atnaujinančios medžiagos parinkimo schemą. Mechaninėmis savybėmis grindžiamas polimerais modifikuoto bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas efektyvesnis (mechaninės savybės turi realų poveikį funkcionavimui kelyje) ir ekonomiškesnis (laiko bei sąnaudų atžvilgiu) už fizikinėmis savybėmis (penetracija ir minkštėjimo temperatūra) paremtą metodiką.

2. BITUMO ATNAUJINIMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

2.1. Tyrimo objektas

Bandymai atlikti su PMB 45/80-55 bitumu, kurio reglamentuojamos charakteristikos pateikiamos 4 lentelėje. Bitumo atnaujinimui naudotos dvi medžiagos minkštasis kelių bitumas V12000 (žr. 9 pav.) ir aromatinė alyva Nygen 910 (žr. 10 pav.).

Minkštasis kelių bitumas naudojamas minkštojo asfalto gamyboje ir leidžia sumažinti asfalto tankinimo temperatūrą iki 115 ± 5 °C. Minkštasis bitumas klasifikuojamas pagal kinematinę klampą esant 60 °C, reikalavimai reglamentuojami pagal *LST EN 12591 2009* standartą „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai“. Šio bitumo kinematinė klampa esant 60 °C temperatūrai reglamentuojama tarp 8000–16000 mm²/s, o klampos koeficientas $\leq 2,0$. Tuo tarpu pliūpsnio temperatūra didesnė arba lygi 180 °C, tirpumas ne mažesnis 99,0 %, masės pokytis (absoliutus dydis) mažesnis arba lygus 1,0 %.

Nygen 910 yra angliavandenilių alyva, pagaminta iš naftos distiliatų ir hidrintų sunkiųjų naftenų, naudojama asfalto perdirbimui ir bitumo reologinių savybių atstatymui. Panaudojus šią medžiagą perdirbimo metu galima didinti panaudoto asfalto kiekį neprarandant kokybės. Gamintojų deklaruojamos techninės specifikacijos: tankis – 0,910–0,925 kg/dm³, klampa esant 0 °C – 3000–5000 mm²/s, 20 °C – 450–600 mm²/s, 60 °C – 30–40 mm²/s, pliūpsnio temperatūra – 206–212 °C.

4 lentelė. Bitumo charakteristikos (LST EN 12591 2009)

Charakteristikos	PMB 45/80-55
Penetracija esant 25 °C	45–80
Minkštėjimo temperatūra	≤ 55 °C
Atsparumas kietėjimui esant 163 °C:	
likutinė penetracija esant 25 °C	≥ 50 %
minkštėjimo temperatūros padidėjimas	≤ 2 °C
masės pokytis	$\leq 0,5$ %



9 pav. Minkštasis bitumas V12000

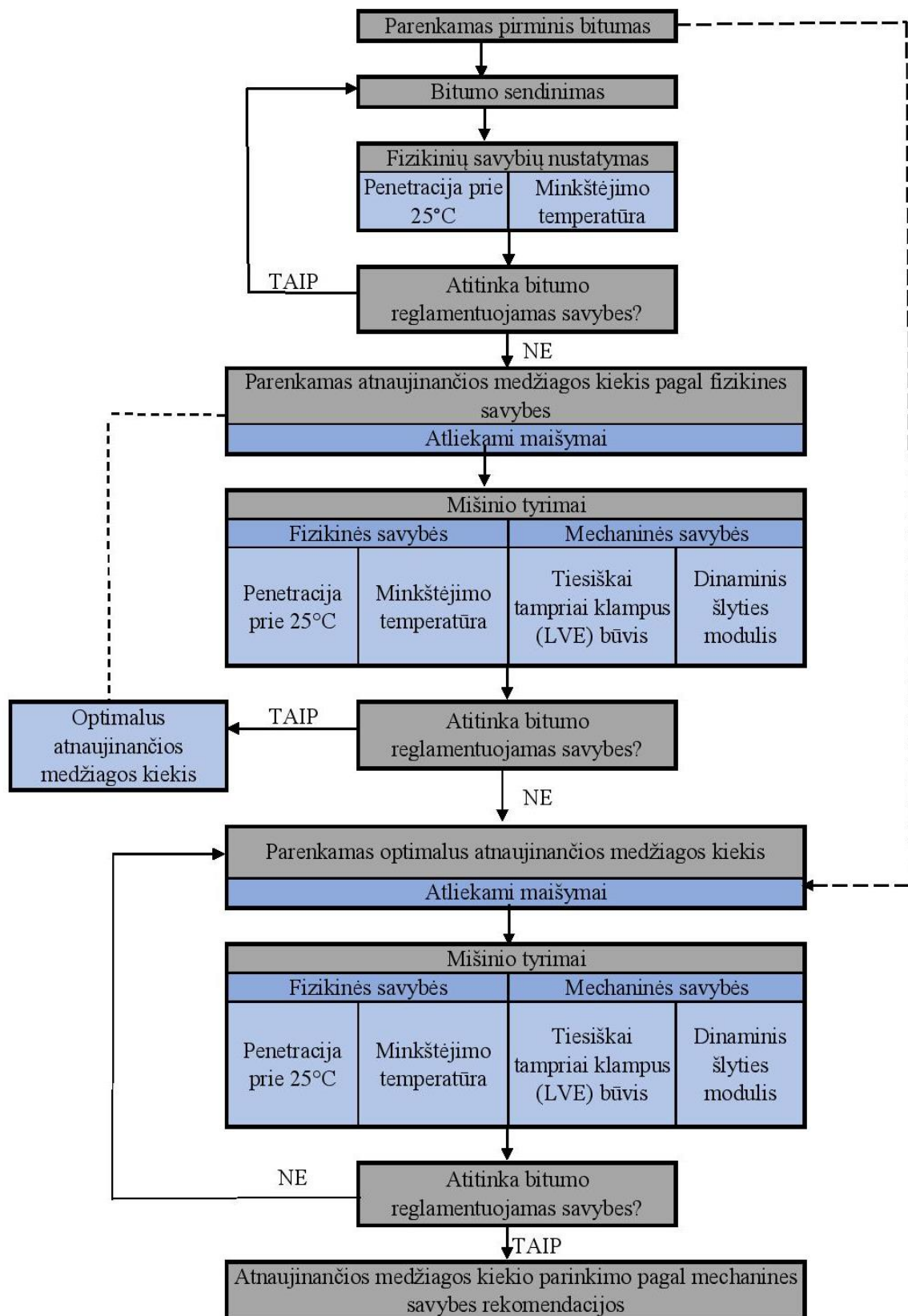


10 pav. Aromatinė alyva Nygen 910

2.2. Tyrimo metodai

Eksperimentiniam tyrimui atlikti sudarytas planas (žr. 11 pav.), kurio įgyvendinimui nustatytos bitumo fizikinės ir mechaninės savybės. Eksperimentinio tyrimo metu atlikta:

- bitumo sendinimas:
 - trumpalaikis bitumo sendinimas (*LST EN 12607-1 2015* „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas“);
 - pagreitintas ilgalaikis bitumo sendinimas (*LST EN 14769:2012* „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (PAV)“);
- fizikinių savybių tyrimai:
 - 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“);
- mechaninių savybių tyrimai:
 - tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos, kompleksinis šlyties modulis (*LST EN 14770:2012* „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR)“).



11 pav. Eksperimentinio tyrimo planas bitumo atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimui

2.2.1. Bitumo bandinių paruošimas

RTFOT sendinimas.

Trumpalaikis bitumo sendinimas RTFOT atliekamas pagal *LST EN 12607-1 2015* standartą. Trumpalaikiu sendinimu imituojamas senėjimo poveikis asfalto mišinio gamybos, klojimo bei tankinimo metu. Bandymo principas – judančio bituminio rišiklio plėvelė tam tikrą laiką kaitinama orkaitėje iki nustatytos temperatūros su pastoviu oro -tiekimu. Šio kondicionavimo etaloninė temperatūra yra 163 °C.

Šiuo atsparumo kietėjimui metodu imituojamas trumpalaikis bitumo senėjimo procesas. Pirmiausia bitumas įkaitinamas ir išpilstomas į 8 stiklines talpyklas po (35,0±0,5) g. Stiklinės talpyklos patalpinamos į RTFOT prietaisą išlaikant pusiausvyrą (galima talpinti ir tuščius indelius). Bandymo temperatūra (163±1) °C turi būti pasiekta per 15 minučių, kitu atveju bandymas turi būti sustabdytas. Kaitinama (75±1) minutę. Bandymo laikas matomas prietaiso ekrane ir pradedamas fiksuoti įjungus visus parametrus ir uždarius krosnį. Procedūros metu turi būti užtikrintas karšto oro srautas 4000±200 ml/min, kad šis skaičius nekistų reikia nuolat patikrinti pagrindinio oro kompresoriaus slėgį. Pasibaigus bandymo laikui prietaise išjungiami visi parametrai, užsukamas slėgis pagrindiniame kompresoriuje. Buteliukai išimami iš prietaiso ir leidžiama atvėsti 1 valandą laiko, tuomet stiklinės pasveriamos ir nustatomas masės nuostolis. Talpyklos pakaitinamos ir bitumas išpilamas į skardines, sumaišoma, kad mišinys būtų vienalytis, vengiant oro burbuliukų atsiradimo.

PAV sendinimas.

Pagreitintas ilgalaikis bitumo sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą atliekamas pagal *LST EN 14769:2012* standartą. Ilgalaikis sendinimas imituoja 5–10 metų eksploatacinį laikotarpį, o ilgalaikis 45 valandų trukmės sendinimas 10–15 metų eksploatacinį laikotarpį. Pagreitinto ilgalaikio bitumo sendinimo principas – plonas sluoksnis statinio rišiklio tam tikrą laiką kaitinamas iki nustatytos temperatūros atitinkamu oro slėgiu. Tai atliekama, kad imituoti rišiklio pakeitimus esančiu dangoje eksploatacijos metu. Rišiklio senėjimą eksploatacijos metu veikia aplinkos temperatūra ir oro slėgis, taip pat susijęs kintamas mišinys, pavyzdžiui, turinės mišinio proporcijos, mišinių pralaidumas, medžiagų savybės ir kiti veiksniai. Šiuo testu siekiama įvertinti rišamųjų medžiagų santykinį senėjimo pobūdį nurodytomis sąlygomis, tačiau jis negali visiškai atitikti bitumo naudojimo kintamųjų arba užtikrinti santykinį atsparumą senėjimui eksploataavimo sąlygomis.

Pagreitintas ilgalaikis sendinimas atliekamas tik po trumpalaikio sendinimo. Iš anksto pašildomas PAV prietaisas (žr. 12 pav.) iki senėjimo temperatūros. Bitumas supilamas į įkaitintas lėkšteles (žr. 13 pav.), kurių skersmuo – 140 mm, po (50±0,5) g. Bitumo sluoksnio storis apie 3,2 mm.

Plokštelės su bitumu sudedamos į PAV prietaisą, kuriame nustatyta temperatūra 90 °C, oro slėgis 2,1±0,1 MPa ir sendinimo trukmė 45 valandos.



12 pav. Pagreitinio ilgalaikio sendinimo prietaisas



13 pav. Lėkštelės naudojamos PAV sendinimui

Pasibaigus senėjimo laikui, slėgis PAV lėtai išleidžiamas naudojant oro slėgio išleidimo vožtuvą. Atsukami slėgio indo varžtai, atidaromas slėgio indas ir atsargiai išimami konteineriai su laikikliu. Bitumas mentelės pagalba iš lėkštelių supilamas į apvalius indelius (užpildoma ne daugiau kaip pusė indelio) ir patalpinami į vakuumo prietaisą, kuris turi būti įjungtas 2 valandos prieš naudojimą, kad įkaistų. Vakuumo prietaise nustatyta 170±5 °C temperatūra ir palaikomas 15±2,5 kPa slėgis. Vakuumo prietaise konteineriai (10±1) minučių stovi krosnyje be vakuumo. Po 10 minučių atidaromas vakuuminis vožtuvas ir greitai sumažinamas slėgis iki (15±2,5) kPa ir palaikomas slėgis (30±1) minutę. Po 30 minučių išjungiamas vakuumas ir iš prietaiso išimami konteineriai. Bitumas supilstomas į indelius su dangteliais po 45±1 g.

Maišymai

Maišymams naudotos dvi atnaujinančios medžiagos minkštasis bitumas ir Nyno aromatinė alyva. Maišymai atlikti prie 45±1 g bitumo pridedant 8, 10 ir 14 % nuo bitumo masės atnaujinančios medžiagos. Modifikavimui naudotas įrenginys Silverson L5M-A (žr. 14 pav.). Tolygiam bitumo ir naudojamų priedų išmaišymui užtikrinti naudotas specialus maišymo antgalis (žr. 15 pav.), kuris maišymo metu gali sukurti net iki 8000 rpm greičiu.

Pirmiausia bitumas įkaitinamas iki 140 °C krosnyje, paskaičiuojamas reikiamas atnaujinančios medžiagos kiekis ir bitumui pasiekus reikiamą temperatūrą įdedamas priedas ir bitumas vėl įkaitinamas iki 140 °C įdėjus indelį su laikikliu į įkaitintą gruzdinimo aliejų „RPA“. Maišymas atliktas 5000 rpm

greičiu, kuris išlaikomas pastovus viso modifikavimo proceso metu. Maišymo trukmė 20 minučių, palaikant bitumo temperatūrą 140 °C (matuojant bitumo ir aliejaus temperatūrą kas 5 minutes). Siekiant užtikrinti pastovią temperatūrą maišymo metu metalinis indas į kurį statomas laikiklis su bandiniu laikomas ant įkaitintos kaitlentės ir yra uždengiamas folija. Po maišymo skardinė uždengiama ir užrašomas bandinio kodas.



14 pav. Maišytuvas Silverson L5M-A



15 pav. Maišymo antgalis

2.2.2. Fizikinių savybių nustatymo metodai

Minkštėjimo temperatūros nustatymas

Bitumo minkštėjimo temperatūros nustatymas žiedo ir rutulio metodu (*LST EN 1427:2015*). Minkštėjimo temperatūrai nustatyti naudotas automatizuotas minkštėjimo temperatūros nustatymo prietaisas, kuriame įmontuoti lazeriai, fiksuojantys bandinio ištįsimą iki apatinės rėmelio plokštelės. Pabrėžtina, kad minkštėjimo temperatūros nustatymas atliekamas vandenyje, jeigu tiriamojo bitumo minkštėjimo temperatūra yra ne aukštesnė kaip 80 °C. Priešingu atveju bandymui atlikti naudojamas glicerinas.

Išskaitus bitumui žiedai padedami ant metalinės plokštelės padengtos nelipniu paviršiumi (pavyzdžiui, kepimo popieriumi). Žiedai pripilami su bitumo pertekliumi ir paliekami ataušti. Bandinio aušinimo laikas 30 minučių, po ataušinimo laiko bitumo perteklius nuo žiedų pašalinamas pakaitintu

peiliu. Žiedai su bitumu įstatomi į rėmelį, ant žiedų uždedami metaliniai žiedų gaubtai. Į stiklinį indą įdedamas magnetas, įstatomas rėmelis su bandiniu ir viskas panardinama į vandens vonelę (15–20) minučių. Bandymui naudojamo vandens temperatūra $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$. Praėjus (15–20) minučių indas su vandeniu ir bandiniu statomas į prietaisą (žr. 16 pav.). Vandens paviršiaus lygis turi sutapti su nurodytu lygiu rėmelyje. Metaliniai rutuliukai tvirtinami prie magnetinių įleidimo mechanizmų ir įstatomi į rėmelį. Minkštėjimo temperatūra nustatoma, kai metaliniai rutuliai su nutįsusi bitumu pasiekia apatinę rėmelio plokštelę. Temperatūra fiksuojama prietaiso ekrane. Išmatuotų rezultatų skirtumas negali būti didesnis nei 1°C , kai minkštėjimo temperatūra $< 80^\circ\text{C}$, ir 2°C , kai $> 80^\circ\text{C}$.



16 pav. Indas su vandeniu ir bandiniu minkštėjimo temperatūros nustatymui

Adatos penetracijos nustatymas

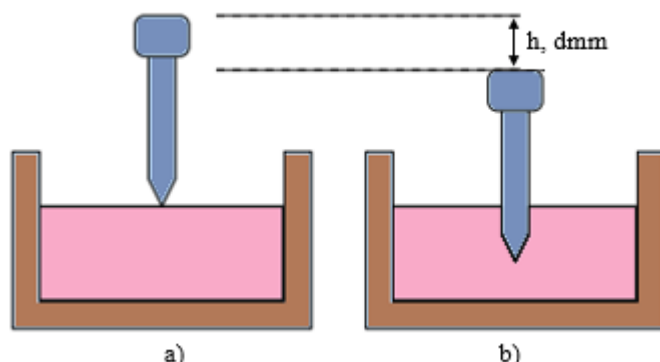
Adatos penetracijos nustatymas (*LST EN 1426:2015*). Penetracija – konsistencija išreikšta kaip standartinis adatos vertikalus įsmigimas į medžiagos bandinį milimetrais, kai yra nustatyta bandymo temperatūra, apkrova ir apkrovos trukmė. Pirmiausia iškaitintas bandymui reikalingas bitumas pilamas į penetracijos indelį. Bandinys ataušinamas ore $15\text{--}30^\circ\text{C}$ temperatūroje 30 min. Praėjus aušinimo laikui ore bandinys panardinamas į vandens vonelę, kurioje vandens temperatūra 25°C , tam pačiam laikui, kaip ir aušinant jį ore. Praėjus aušinimo laikui vandenyje, bandinys statomas po švaria penetracijos adata (žr. 17 pav.). Adatos smaigalys turi būti prie pat bitumo paviršiaus (žr. 18 pav.). Tai nustatoma

penetracijos prietaiso pagalbinių rankenėlių pagalba. Įjungus prietaisą 100 g apkrova kris į bitumą 5 s. Pasirodęs skaičius ekrane fiksuojamas ir užrašomas kaip penetracijos rezultatas 0,1 mm tikslumu.

Atliekami ne mažiau kaip 3 dūriai į tą patį bandinį skirtingose vietose (10 mm nuotoliu nuo indo sienelės ir 10 mm nuotoliu vienas nuo kito) kaskart švariai nuvalant penetracijos adatą. Galimi nuokrypiai tarp skirtingų penetracijos reikšmių pateikti 5 lentelėje.



17 pav. Prietaisas adatos penetracijai nustatyti



18 pav. Adatos pozicija: a) prieš bandymą; b) po bandymo

5 lentelė. Leidžiami skirtumai tarp penetracijos reikšmių pagal *LST EN 1426:2015*

Penetracija, dmm	< 49	50–149	150–249	> 250
Skirtumas tarp mažiausios ir didžiausios reikšmės	2	4	6	8

2.2.3. Funkcinių savybių nustatymo metodai

Bandymai dinaminio šlyties reometru (DSR)

Bitumo mechaninės savybės nustatytos atliekant du bandymus: tiesiškai tampriai klampaus (LVE) būvio sąlygų nustatymą, dinaminio šlyties modulio nustatymą.

Prieš atliekant bandymus su DSR (žr. 19 pav.), nustatyta nulinė plokštelių pozicija prie vidutinės bandymo temperatūros. Bitumo bandinio ir plokštelių sukibimas užtikrintas pakeliant temperatūrą iki 70 °C prieš bandinio kirpimą. Bitumo bandinys kerpamas viršutinei plokštei nusileidus iki fiksuoto bandinio aukščio (su 25 mm geometrija prie 1,05 mm, 8 mm geometrija prie 2,1 mm) su įkaitinta mentele.



19 pav. Dinaminis šlyties reometras

Bituminio rišiklio tiesiškai tampriai klampaus (LVE) būvio nustatymas

Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose deformacijos ir įlinkiai atsistato (grįžta į pradinį būvį) tiesiškai ir proporcingai po apkrovos nukrovimo. Bituminių rišiklių viskoelastinės charakteristikos paprastai tiriamos tiesiškai tampriai klampaus būvio diapazone, esant deformacijų ir įlinkių dydžiui, kai bitumo elgsena priklauso tik nuo laiko ir temperatūros, o ne nuo įlinkio ir (arba) deformacijos dydžio (Fecarotti et al., 2012). Bitumo klampa kinta priklausomai nuo temperatūros. Bitumo šlyties modulio tiesiškai tampriai klampios (LVE) ribos yra daugiau teorinės. Anderson (1994) pasiūlė LVE ribą traktuoti kaip deformacijas arba įtempimus prie kurių bituminio rišiklio šlyties modulio vertė sumažėja 5 %. Šis metodas yra visuotinai pripažintas ir plačiai taikomas užsienio šalių mokslininkų (Airey et al., 2003; Marasteanu & Anderson, 2000). Kompleksinis šlyties modulis yra linijinė viskoelastinė savybė, apibrėžta tobulai sinusoidiniams apkrovos ir atsako signalams. Taip yra tuo atveju, kai įvesties signalas yra sinusinis, o medžiagos elgesys yra tiesinis (Babadopulos, Orozco, Mangiafico, Sauzéat, & Di Benedetto, 2019). Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos nustatomos tam, kad apskaičiuoti deformacijos vertes, kurios bus taikomos dinaminio šlyties modulio nustatymui. *LST EN 14770:2012* nurodoma, kad daugumai bitumų nustatyta, kad įtempių ribos nuo 0,005 iki 0,100 patenka į tiesinį diapazoną. Tačiau polimerais modifikuotų rišiklių ir chemiškai modifikuotų rišiklių linijinis diapazonas gali būti daug mažesnis.

Bituminio rišiklio LVE riboms nustatyti atliktas pakopinis deformacijų bandymas (angl. *strain sweep test*). Bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio bandymai atlikti prie didžiausio dinaminio šlyties modulio bandymo dažnio – 15,92 Hz (100 rad/s). LVE bandymas atliktas pakopomis palaipsniui didinant kampinės (šlyties) deformacijas nuo 0,01 % iki 64,0 %. Viena deformacijos pakopa – 10 s, tarp deformacijos pakopų nustatytos 2 s pertraukos medžiagai grįžti į pirminę būklę. Kiekvienam bitumui LVE ribos nustatytos atliekant po 1 bandymą prie 2 °C ir 44 °C temperatūrų su 8 mm diametro bei prie 38 °C ir 82 °C temperatūrų su 25 mm diametro plokštelėmis.

Dinaminio šlyties modulio nustatymas (LST EN 14770:2012)

Dinaminis šlyties modulis, tai santykis tarp bandymo metu bitumą veikiančių maksimalių įtempių ir deformacijų, charakterizuojantis bitumo atsparumą deformacijoms. Šlyties modulis nusako medžiagos atsparumą deformacijai ir susideda iš klampių ir tamprių (negrįžtamų) komponentų. Kuo didesnės bitumo kompleksinio šlyties modulio reikšmės G^* , tuo bitumas yra kietesnis (standesnis) ir atsparesnis deformacijų susidarymui (provėžų) veikiant tam tikrai apkrovai. Fazės kampo sumažėjimas apibūdina bitumo tamprumo savybes, t. y. mažėjant fazės kampui, bitumas tampa tampresnis (Pink et al., 1980; Goodrich, 1988; Read ir Whiteoak, 2003). Dickinson & Witt (1974) teigė, kad dinaminio šlyties modulio kompleksinė kreivė nustatyta esant mažoms deformacijų amplitudėms prie skirtingų temperatūros ir dažnio sąlygų yra artimiausia bituminio rišiklio elgsenai asfalto dangos sluoksnyje. Bituminio rišiklio šlyties modulio kompleksinė kreivė modeliuoja bitumo reologines savybes bei yra tiesiogiai taikoma asfalto mišinių tamprumo modulio apskaičiavimui bei dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimams bei funkcionavimo prognozavimui.

Bitumo dinaminiam šlyties moduliui nustatyti atliktas osciliacinis dažnio diapazono bandymas kontroliuojant deformacijas. Dinaminio šlyties modulio nustatymo bandymai atlikti su 8 mm plokšte nuo 44 °C iki 2 °C temperatūrose. Temperatūra keičiama kas 6 °C siekiant užtikrinti, kad analizuojant duomenis termolinijos visiškai persidengtų. Po kiekvieno temperatūros pokyčio, temperatūra sumažinama arba padidinama ne didesniu kaip 5 °C/min greičiu. Nusistovėjus kitai temperatūrai bandinys kondicionuojamas ne mažiau kaip 10 min, siekiant užtikrinti tolygias temperatūros sąlygas bandinyje. Vienoje temperatūroje prie deformacijų, kurios yra LVE ribose, atliekama nuo 15,85 Hz (100 rad/s) iki 0,159 Hz (1 rad/s) be pauzių. Bandymo metu taikytos fiksuotos deformacijų vertės, kurios apskaičiuotos tiesinės interpoliacijos metu pagal nustatytas LVE ribas.

Temperatūra, kurios metu buvo išbandytos abi bandymo geometrijos, yra žinoma kaip persidengiančioji temperatūra ir naudojama nustatant priimtino kriterijus. Išnagrinėjus kompleksinio šlyties modulio ($|G^*|$) ir fazės kampo (δ) vertes, gaunamas temperatūros persidengimo temperatūroje,

naudojant dvi skirtingas bandymo geometrijas ir taikomi tinkamumo kriterijai taip (*LST EN 14770:2012*):

a) $|G^*|$ dydžiai bandymo dažnyje neturi skirtis nuo vidurkio $|G^*|$ iš dviejų geometrijų daugiau nei 15 %;

b) δ vertės bandymo dažnyje neturi skirtis nuo δ vidurkio iš dviejų geometrijų daugiau nei 3°.

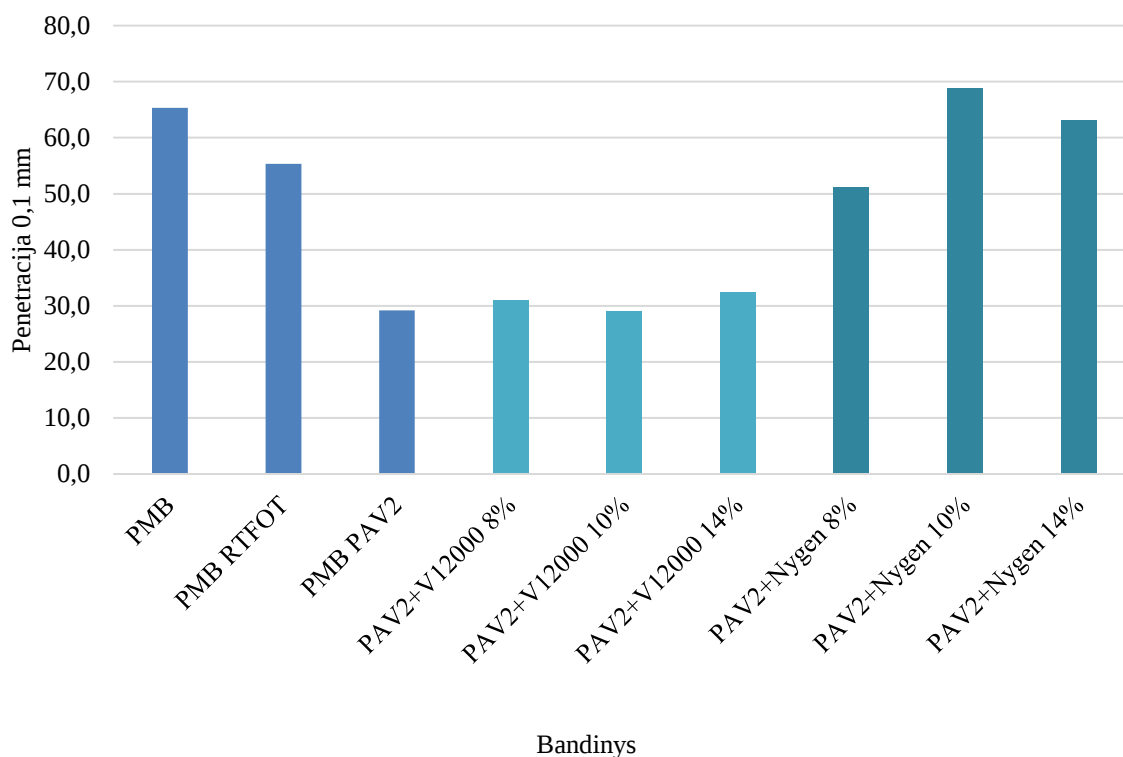
2.3. Bandymų rezultatai

Bitumo penetracija nustatyta kiekvieno eksperimentinio tyrimo etapo bandiniams. Penetracijos rezultatai pateikiami 6 lentelėje. Rezultatų tinkamumas įvertintas pagal *LST EN 1426:2015* standartą. Bandymus reikėtų pakartoti, jei vieno bandinio didžiausios ir mažiausios reikšmių skirtumas yra didesnis nei 2 dmm, kai penetracija iki 49 dmm arba 4 dmm, kai penetracija yra nuo 50 dmm iki 149 dmm. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas didžiausias 1,9 dmm reikšmių skirtumas, todėl visų bandymų rezultatai yra tinkami tolimesnei analizei. Bitumo penetracijos vidurkio vertė nustatyta iš trijų kiekvieno bitumo bandinių. Penetracijos bandymų vidurkių rezultatai pateikti 20 paveiksle.

Didžiausia penetracijos reikšmė nustatyta bandiniui su 10 % Nygen 910 (68,9 dmm), o mažiausia – bandiniui po 45 valandų trukmės PAV sendinimo (29,2 dmm). Lyginant penetracijos bandymų rezultatus su bandinio po ilgalaikio sendinimo nustatyta, kad regeneruojant bitumą su 10 % minkštojo kelių bitumo penetracija sumažėjo 0,5 % (iki 29,0 dmm), su 8 % padidėjo 6,4 % (iki 31,0 dmm), su 14 % – 11,1 % (iki 32,4 dmm). Regeneruojant bitumą aromatine alyva nustatyta, kad su 8 % atnaujinančios medžiagos penetracija padidėja 75,0 % (iki 51,0 dmm), su 10 % – 136,1 % (iki 68,9 dmm), su 14 % – 217,2 % (iki 63,0 dmm).

6 lentelė. Penetracijos bandymų rezultatai skirtingiems bandiniams

Bandinys	Penetracija, dmm			Skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios reikšmės, dmm
PMB	65,4	65,2	65,4	0,2
PMB RTFOT	55,1	55,5	55,5	0,4
PMB PAV2	28,6	28,9	30,0	1,4
PAV2+V12000 8%	30,3	31,4	31,4	1,1
PAV2+V12000 10%	29,3	28,2	29,6	1,4
PAV2+V12000 14%	32,8	31,7	32,7	1,1
PAV2+Nygen 8%	51,4	51,0	50,7	0,7
PAV2+Nygen 10%	69,6	68,3	68,7	1,3
PAV2+Nygen 14%	62,1	63,0	64,0	1,9



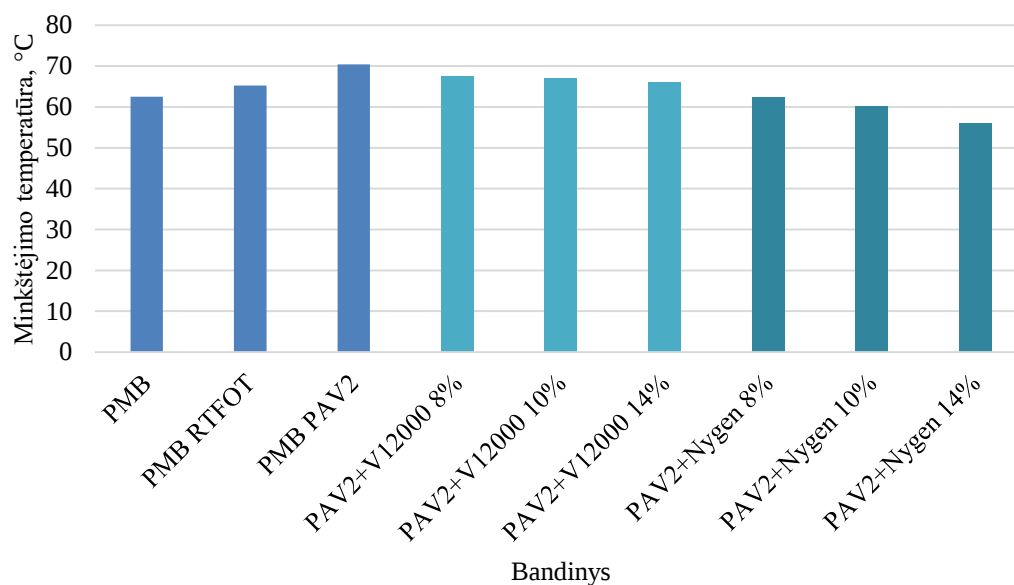
20 pav. Skirtingų bandinių penetracijos vidutinių reikšmių pasiskirstymas

Bitumo minkštėjimo temperatūros rezultatai pateikti 7 lentelėje. Rezultatų tinkamumas įvertintas remiantis *LST EN 1427:2015* standartu, kuriame nurodoma, kad polimerais modifikuoto bitumo dviejų bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai neturi skirtis daugiau nei 2 °C. Didžiausias vieno bandinio minkštėjimo temperatūrų skirtumas nustatytas 0,4 °C, todėl ir šio ir kitų bandinių rezultatai yra tinkami tolimesnei analizei.

Bitumo minkštėjimo temperatūra nustatyta iš dviejų bitumo bandinių. Minkštėjimo temperatūros rezultatų vidurkiai pateikti 21 paveiksle. Didžiausia minkštėjimo temperatūra nustatyta bandiniui po 45 valandų trukmės PAV sendinimo (70,6 °C), o mažiausia bandiniui su 14 % aromatinės alyvos (56,0 °C). Lyginant minkštėjimo temperatūros bandymų rezultatus su bandinio po ilgalaikio sendinimo nustatyta, kad atlikus bitumo atnaujinimą minkštuoju kelių bitumu temperatūra sumažėjo 4,2 % (iki 67,6 °C) su 8 % atnaujinančios medžiagos, 4,8 % (iki 67,2 °C) su 10 % ir 6,4 % (iki 66,1 °C). Regeneruojant bitumą su 8 % aromatinės alyvos minkštėjimo temperatūra sumažėjo 11,7 % (iki 62,4 °C), su 10 % – 14,9 % (iki 60,1 °C), su 14 % – 20,1 % (iki 56,0 °C).

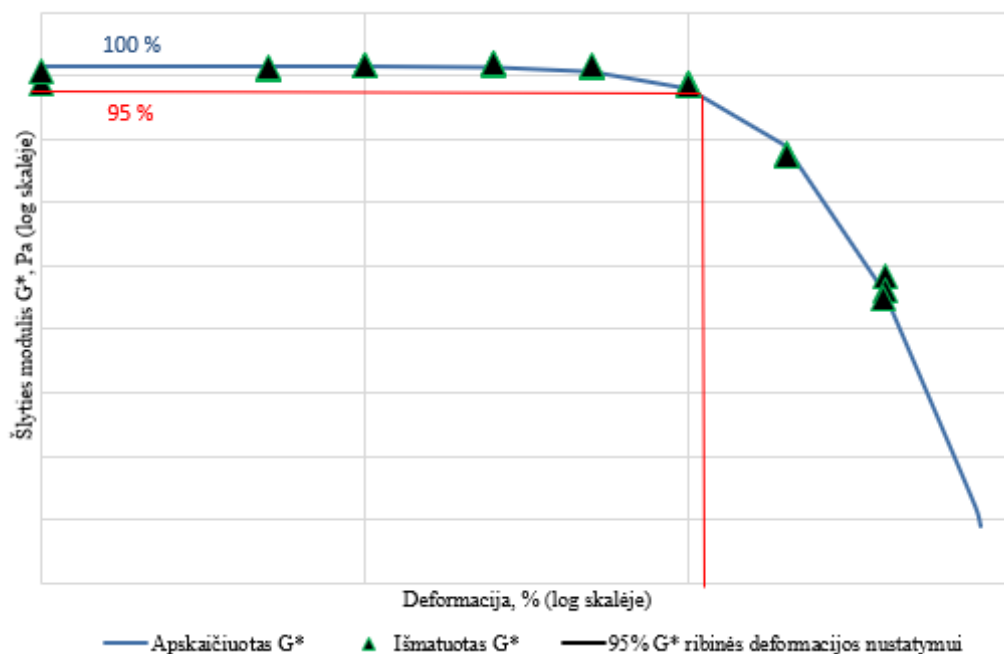
7 lentelė. Minkštėjimo temperatūros bandymų rezultatai skirtingiems bandiniams

Bandinys	Minkštėjimo temperatūra, °C		Skirtumas, °C
PMB	62,5	62,5	0
PMB RTFOT	65,3	65,2	0,1
PMB PAV2	70,8	70,4	0,4
PAV2+V12000 8%	67,7	67,5	0,2
PAV2+V12000 10%	67,3	67,1	0,2
PAV2+V12000 14%	66,1	66	0,1
PAV2+Nygen 8%	62,4	62,3	0,1
PAV2+Nygen 10%	60,1	60,1	0
PAV2+Nygen 14%	56,1	55,9	0,2



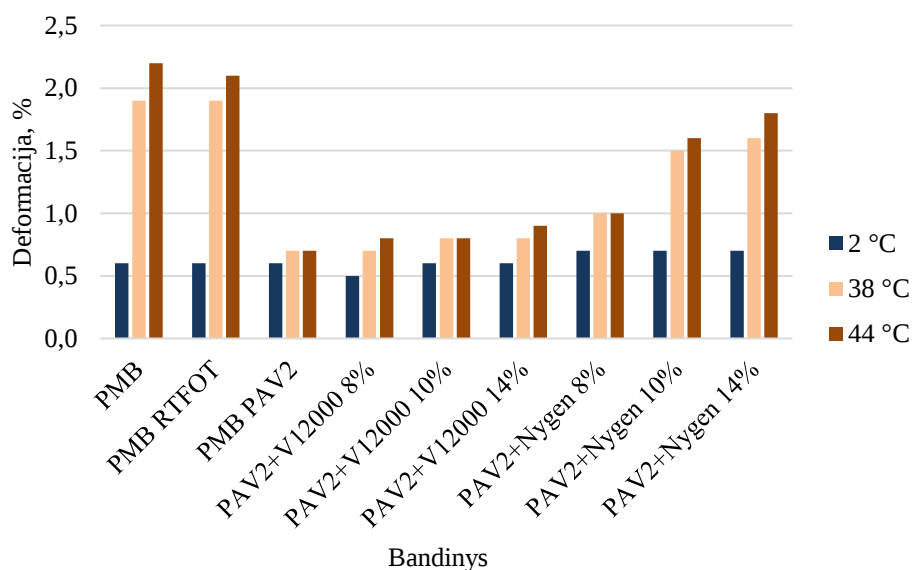
21 pav. Skirtingų bandinių minkštėjimo temperatūros reikšmių pasiskirstymas

LVE riba bituminiam rišikliui nustatyta deformacijų diapazono bandymo būdu palaipsniui didinant deformacijas. 22 paveiksle pateiktame grafike matyti, kaip buvo nustatytos LVE deformacijos. Esant mažoms ir didelėms deformacijoms dinaminio šlyties modulio vertės netolygios ir išsibarsčiusios. Pirmuoju atveju bandymo metu nustatytas sūkio momentas yra per mažas tiksliai išmatuoti kampinę deformaciją. Antruoju atveju bitumas nebeatlaiko sūkio momento apkrovos ir funkcionuoja netiesiškai. Taigi, bandymais išmatuotoms G^* vertėms pritaikoma trijų kintamųjų sigmoidinė funkcija. Sigmoidinės funkcijos pritaikymas atliktas Excel SOLVER minimizuojant šlyties modulio matavimo ir funkcijos standartinę kvadratinės paklaidos sumą. Pagal sigmoidinės funkcijos kitimą apskaičiuojamas 5 % mažesnis šlyties modulis ir ribinės deformacijos.



22 pav. Deformacijų diapazono bandymo duomenų analizė ir LVE ribų nustatymas

Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad tirtasis bitumas funkcionuoja tiesiškai tampriai klampiose ribose esant 2 °C, 38 °C ir 44 °C temperatūrai. Bandymų rezultatais nustatyta, kad PMB 45/80-55 bitumas esant 82 °C temperatūrai funkcionuoja ne tiesiškai tampriai klampiose ribose, todėl šie rezultatai neįtraukiami į tolimesnę analizę. Remiantis kiekvieno bandinio rezultatais apskaičiuotos deformacijų vertės pateikiamos 23 paveiksle. Mažiausios deformacijos, kuriose bitumas funkcionuos tiesiškai tampriai klampiam būvyje nustatytos bandiniui po 45 valandų trukmės PAV sendinimo (0,6–0,7 %), taip pat ryškiai išsiskiria bandinių su minkštuoju kelių bitumu rezultatai, čia deformacijos nustatytos nuo 14 % iki 50 % mažesnės, nei bandiniams regeneruotiems aromatine alyva. Su šia atnaujinančia medžiaga užfiksuotos ir didžiausios deformacijos esant 2 °C temperatūrai, esant 38 °C ir 44 °C temperatūroms didžiausios reikšmės nustatytos paprastam PMB 45/80-55 bitumui ir atlikus RTFOT sendinimo procedūrą. 8 lentelėje pateikiamos kompleksinio šlyties bandymo metu taikytos fiksuotos deformacijų vertės, kurių tarpinės reikšmės apskaičiuotos tiesinės interpoliacijos metu pagal nustatytas LVE ribas.



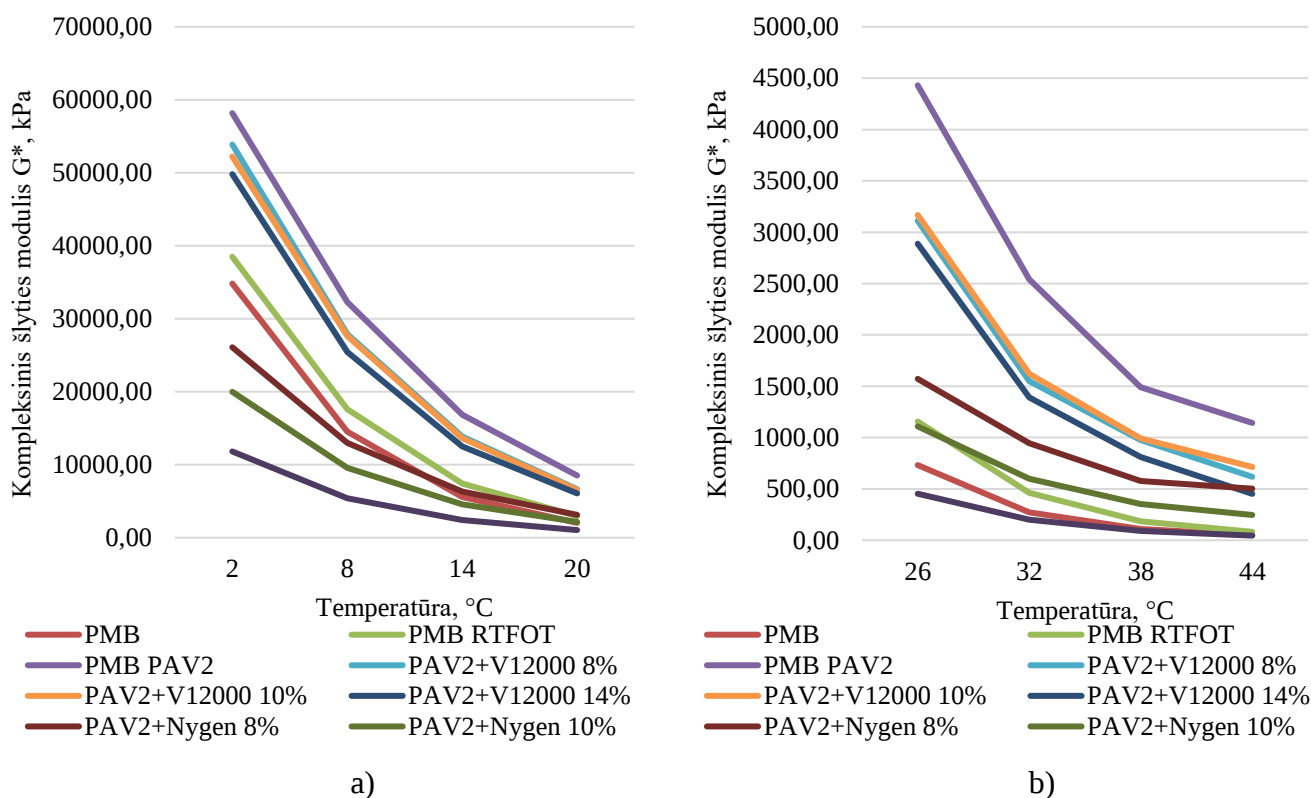
23 pav. Tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose nustatytos deformacijos

8 lentelė. Bitumo mechaninių savybių nustatymui naudotos deformacijos kiekvienai temperatūrai

Temperatūra Bandinio kodas	2 °C	8 °C	14 °C	20 °C	26 °C	32 °C	38 °C	44 °C
PMB	0,6	0,8	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2
PMB RTFOT	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1
PMB PAV2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
PAV2+V12000 8%	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
PAV2+V12000 10%	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
PAV2+V12000 14%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9
PAV2+Nygen 8%	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1
PAV2+Nygen 10%	0,7	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
PAV2+Nygen 14%	0,7	0,8	1	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8

Kompleksinis šlyties modulis yra standumo arba atsparumo deformacijai rodiklis esant apkrovai. Kompleksinis šlyties modulis ir fazės kampas apibrėžia atsparumą asfalto rišiklio šlyties deformacijai tiesinėje viskoelastinėje srityje. Bitumo mechaninės savybės (kompleksinis šlyties modulis ir fazės kampas) nustatytos kiekvienam bandiniui temperatūros intervale nuo 2 °C iki 44°C. Mechaninių savybių bandymų rezultatai pateikti 24-25 paveiksluose. Didžiausias bitumo vidutinis standumas nustatytas prie visų temperatūrų bandiniui atlikus 45 valandų trukmės PAV sendinimą (nuo 1142,7 kPa prie 44 °C iki 58167,3 kPa prie 2 °C), o mažiausias bandiniui su 14 % aromatinės alyvos (nuo 45,57 kPa prie 44 °C iki 11811,1 kPa prie 2 °C). Bandinių su 8 % ir 10 % minkštojo kelių bitumo rezultatai nustatyti labai panašūs ir skiriasi nuo 1 % iki 4,5%, tik esant aukščiausiai bandymo temperatūrai matomas ženklesnis skirtumas (15,5 %). Bandiniui atlikus RTFOT sendinimą

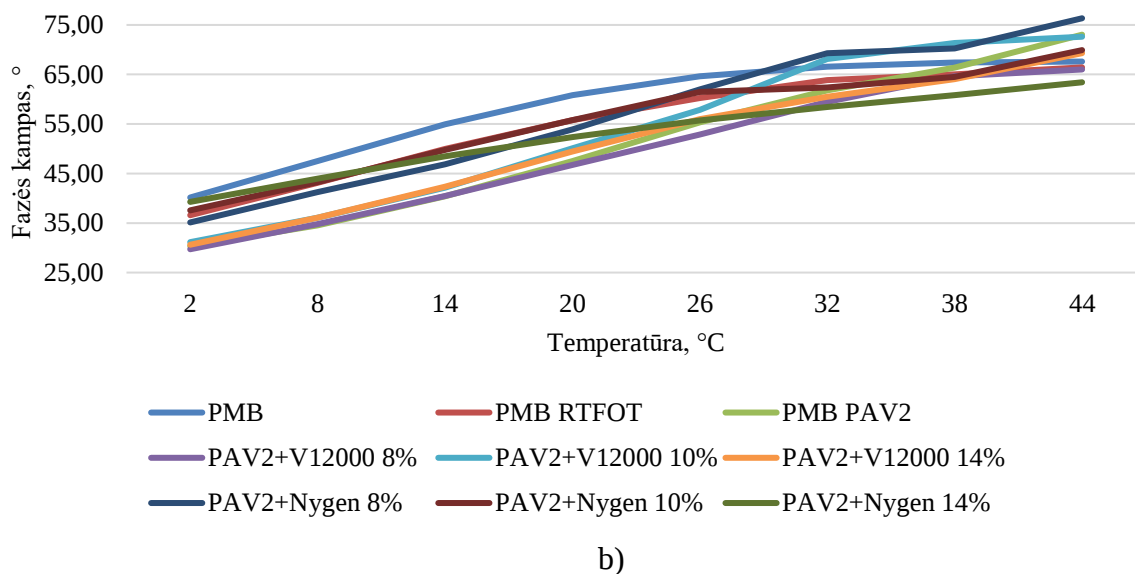
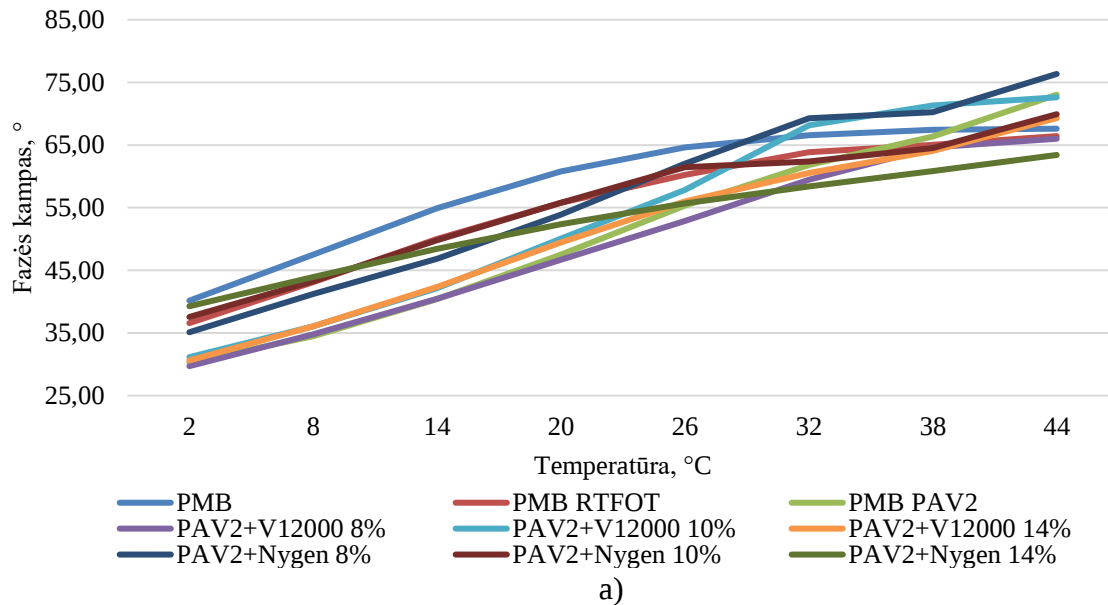
kompleksinis šlyties modulis pradinėse temperatūrose užfiksuotas didesnis nei su 8 % aromatine alyva, tačiau ties 20 °C laipsnių riba jie susikerta ir toliau fiksuojamos didesnės vertės su aromatine alyva. Analogiška situacija nustatyta ties 26 °C temperatūra, kur RTFOT bandinio rezultatai susikerta su 10 % tos pačios atnaujinančios medžiagos. Pirminio bitumo rezultatų sankirtos nustatytos su 8 % aromatine alyva prie 11 °C ir su 10 % aromatinės alyvos esant 18 °C. Didžiausias kompleksinio šlyties modulio pokytis per visą temperatūrų intervalą nustatytas pirminiam bitumui, jo didžiausia reikšmė palyginti su mažiausia skiriasi net per 99,9 %, o mažiausias pokytis užfiksuotas atlikus ilgalaikį 45 valandų trukmės PAV sendinimą.



24 pav. Išmatuotų kompleksinių šlyties modulių vidutinių reikšmių pasiskirstymas skirtingais temperatūrų intervalais: a) nuo 2 °C iki 20 °C; b) nuo 26 °C iki 44 °C

Fazės kampas δ yra santykinis klampaus ir tampraus komponentų dydžių rodiklis (Read, Whiteoak, 2003). Bandinių rezultatai kinta tiesiškai temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C. Šiame intervale ryškiai išsiskiria pirminio bitumo rezultatai, kurie užfiksuoti didžiausi (nuo 40,16 ° iki 67,61 °). Bandinio po RTFOT sendinimo ir bandinio su 10 % aromatinės alyvos kreivės persidengia ir skiriasi nuo 0,01 % iki 2,7 %. Vos 0,1–1,7 % skiriasi bandinių su 10 % ir 14 % minkštojo bitumo fazės kampo reikšmės. Mažiausios fazės kampo vertės užfiksuotos atlikus ilgalaikį 45 valandų trukmės PAV

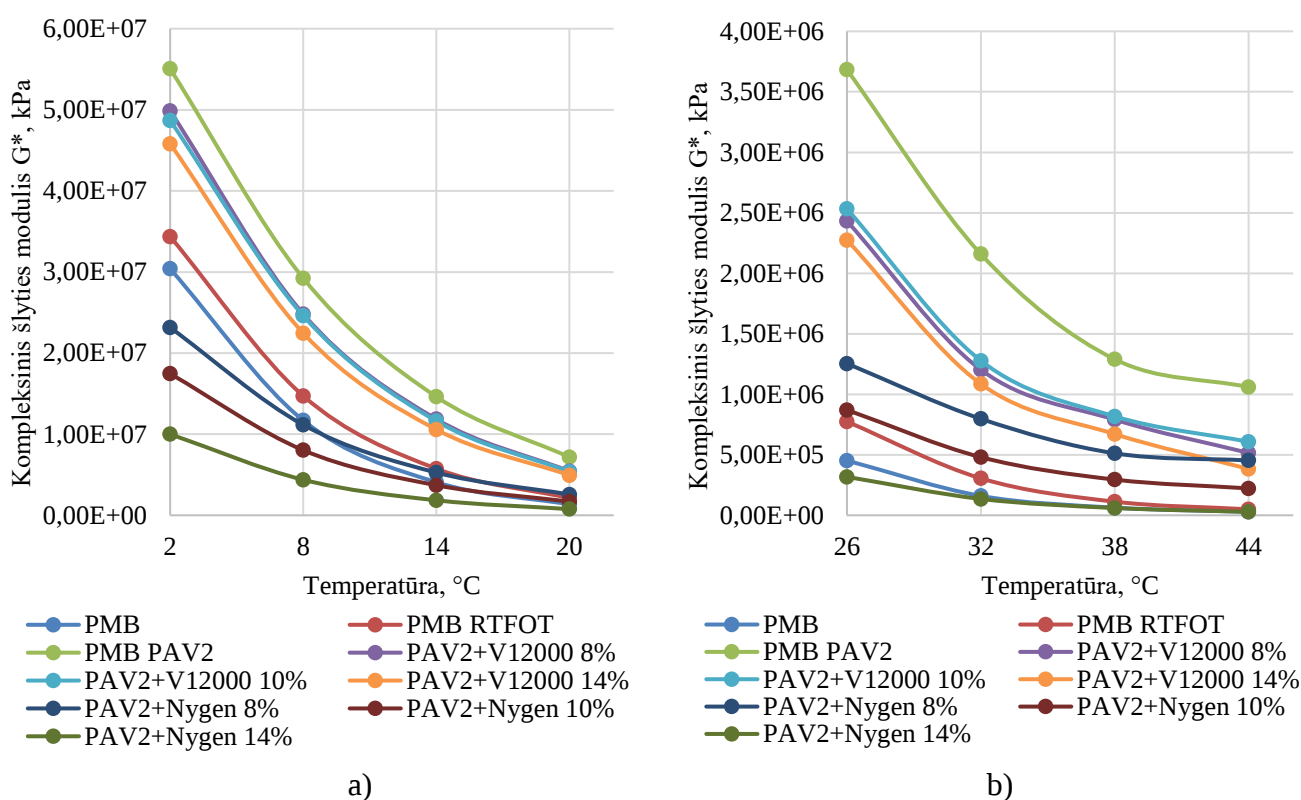
sendinimą ir su 8 % minkštojo bitumo tarp šių bandinių reikšmių nustatytas nuo 0,2 % iki 2,1 % skirtumas. Temperatūros intervale nuo 26 °C iki 44 °C nustatytas nebe tolygus reikšmių pasiskirstymas ir grafike matomos kreivių lūžių vietos.



25 pav. Išmatuotų fazės kampų priklausomybė nuo temperatūros: a) temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C; b) temperatūros intervale nuo 26 °C iki 44 °C)

Asfalto dangos eksploatacinės savybės gali būti siejamos su bitumo savybėmis, t. y. atsparumu provėžoms, nuovargiui ir temperatūriniais plyšiams (Kennedy et al., 1990; Lytton et al., 1993). Superpave specifikacijose bitumas klasifikuojamas pagal dinaminį šlyties modulį ir fazės kampą nustatytus prie 10 rad/s (1,589 Hz) dažnio, kuris atspindi 90 km/h greičiu judančių transporto priemonių

poveikį. Šiuo tikslu 26-27 paveiksluose pateikiamos išmatuotos kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo reikšmės prie skirtingų bandymų temperatūrų, kai kampinis dažnis 10 rad/s. Visose bandymo temperatūrose kompleksinis šlyties modulis su abiem atnaujinančiomis medžiagomis nustatytas mažesnis, nei bandiniui po ilgalaikio 45 valandų trukmės PAV sendinimo. Kompleksinio šlyties modulio vertės su 8 % minkštojo kelių bitumo, kurios temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C vidutiniškai 1,6 % didesnės už bandinio su 10 % minkštuoju kelių bitumu, tačiau nuo 26 °C bandinio su didesniu kiekiu atnaujinančios medžiagos vertės tampa vidutiniškai 7,9 % didesnės. Mažiausios kompleksinio šlyties vertės užfiksuotos bandiniui su 14 % aromatinės alyvos, tik prie 44 °C temperatūros PMB 45/80-55 bandinio vertė nustatyta 0,5 % mažesnė.

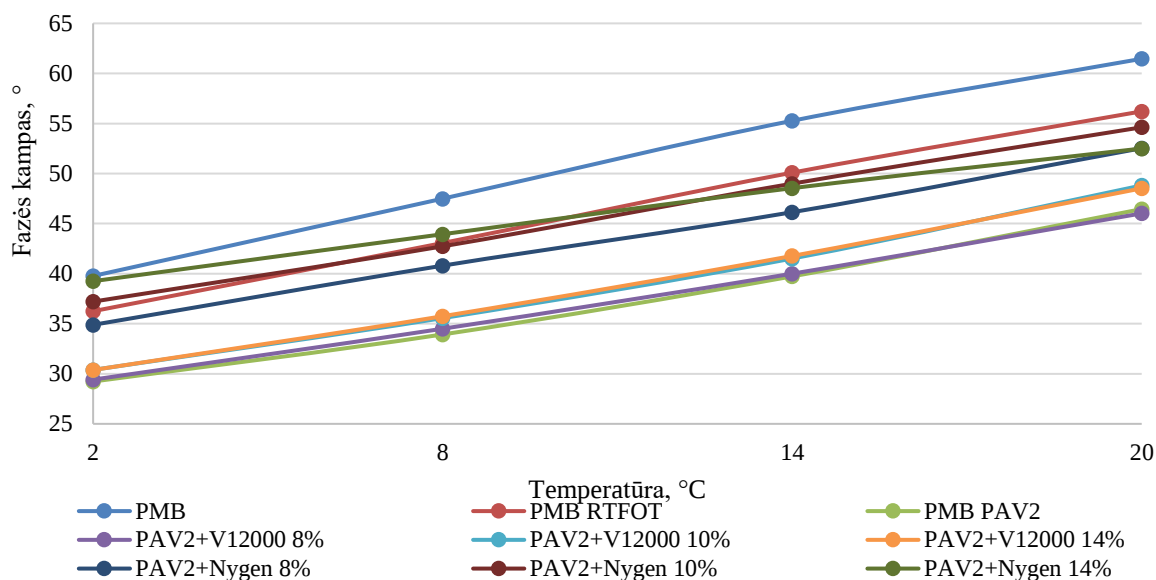


26 pav. Išmatuotų kompleksinių šlyties modulių pasiskirstymas pagal temperatūrą:

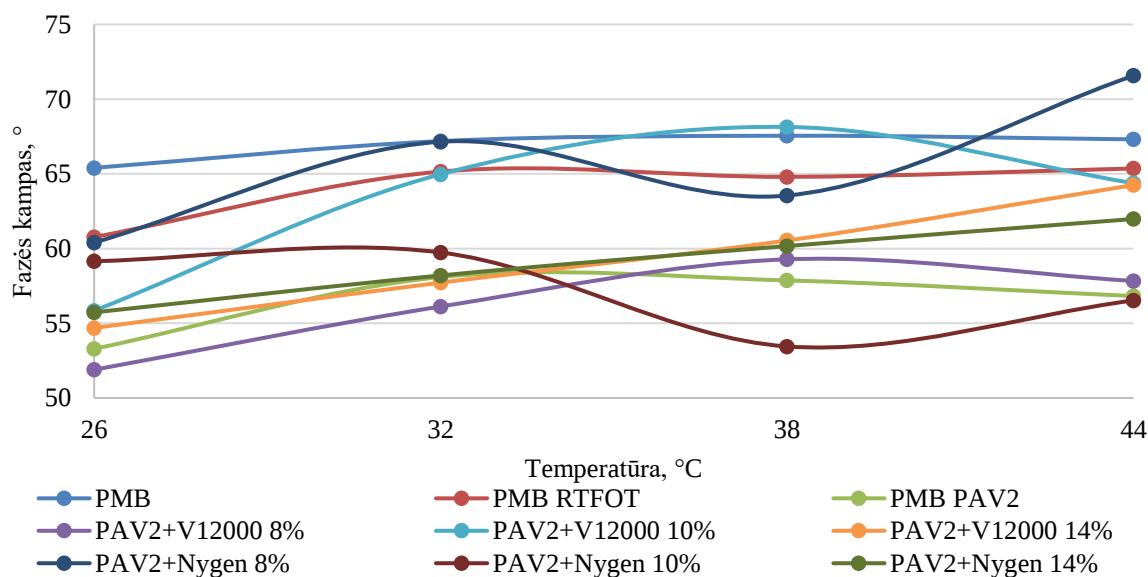
a) temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C; b) nuo 26 °C iki 44 °C prie 10 rad/s dažnio

Temperatūros intervale nuo 2 °C iki 20 °C fazės kampo bandymų rezultatai nustatyti didžiausi PMB 45/80-55 bandiniui. Regeneruotų bandinių mažiausios fazės kampo reikšmės užfiksuotos su 8 % minkštojo kelių bitumo. Aukštesnių temperatūrų intervale dviejų bandinių su 8 % ir 10 % aromatinės alyvos rezultatai išsiskiria fazės kampo sumažėjimu prie 38 °C temperatūros. Didžiausio ir mažiausio

fazės kampo rezultatų vienam bandiniui išskirti negalima, kadangi šios reikšmės varijuoja skirtingai priklausomai nuo temperatūros.



a)

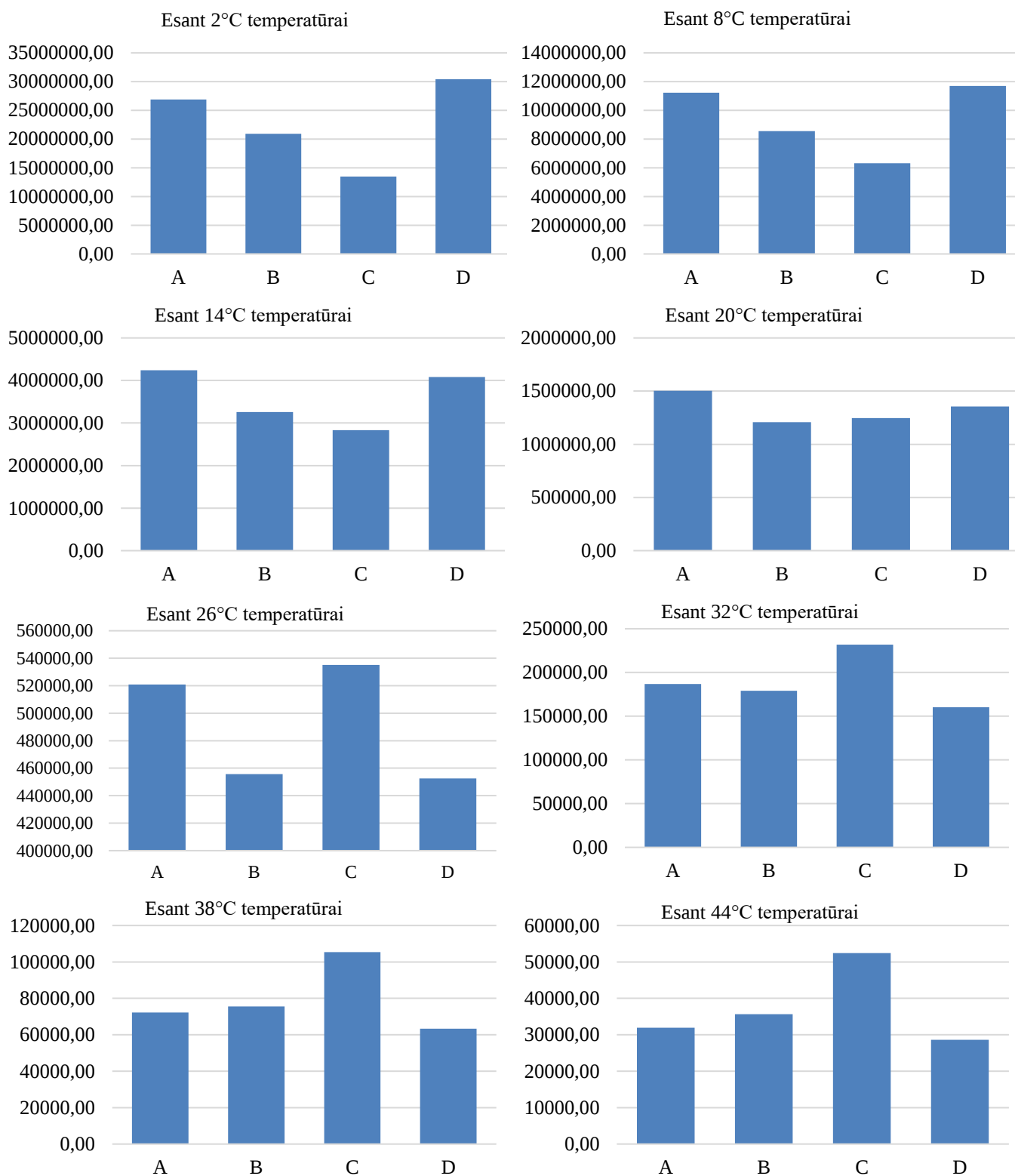


b)

27 pav. Išmatuotų fazės kampų priklausomybė nuo temperatūros: a) temperatūros intervale nuo 2 iki 20 °C; b) nuo 26 iki 44 °C prie 10 rad/s dažnio

Kompleksinio šlyties modulio bandymai atlikti 4 skirtingų gamintojų bandiniams, kurie užkoduoti A-D raidėmis. 28 paveiksle pateikiamos visų gamintojų kompleksinio šlyties modulio rezultatų vertės esant 2–44 °C temperatūroms. Ddžiausias kompleksinis šlyties modulis temperatūros intervale nuo 2 iki 8 °C temperatūros nustatytas D gamintojo bitumui (30401000,0 ir 11701000 Pa), nuo 14 iki 20 °C A gamintojo bitumui (4242800,00 ir 1503100 Pa), nuo 26 iki 44 °C C gamintojo

bitumui (nuo 535180,00 iki 52411,0 Pa). Mažiausias kompleksinis šlyties modulis temperatūros intervale nuo 2 iki 20 °C temperatūros nustatytas C gamintojo bitumui (nuo 13472000 iki 1245800,0 Pa), nuo 26 °C iki 44 °C D gamintojo bitumui (nuo 452570,0 iki 28610 Pa).



28 pav. Skirtingų gamintojų kompleksinio šlyties modulio rezultatai pagal bandymų temperatūras

2.4. Skyriaus išvados

1. Atlikus trumpalaikę bitumo sendinimo procedūrą minkštėjimo temperatūra padidėjo nuo 62,5 °C iki 65,3 °C (4,4 %), atlikus pagreintą ilgalaikę 45 valandų trukmės sendinimo procedūrą ši temperatūra dar padidėjo iki 70,6 °C (13,0 %). Penetracijos bandymais nustatyta, kad atlikus trumpalaikę sendinimo procedūrą penetracija sumažėjo nuo 65,3 mm⁻¹ iki 55,4 mm⁻¹ (15,3 %), o atlikus ilgalaikio sendinimo procedūrą iki 29,2 mm⁻¹ (55,4 %). Penetracijos rezultatų sumažėjimas atlikus trumpalaikio sendinimo procedūrą patenka į kitų mokslininkų nustatytų intervalų ribas 14,7–38,2 %, atlikus ilgalaikio sendinimo procedūrą taip pat 32,4–56,7 %. Minkštėjimo temperatūros padidėjimas atlikus trumpalaikę sendinimo procedūrą nustatytas 3,4 % mažesnis nei kitų mokslininkų 7,8–12,4 %, o atlikus ilgalaikio sendinimo procedūrą atitinka nustatytas ribas 10,3–26,0 %. Atlikus ilgalaikę 45 valandų trukmės PAV sendinimo procedūrą eksperimentinių tyrimų rezultatai atitinka po 16–26 metų eksploatacijos kelyje naudotų bitumų rezultatus.
2. Lyginant penetracijos bandymų rezultatus su bandinio po ilgalaikio sendinimo procedūros nustatyta, kad regeneruojant bitumą su 10 % minkštojo kelių bitumo penetracija sumažėjo 0,5 % (iki 29,0 dmm), su 8 % padidėjo 6,4 % (iki 31,0 dmm), su 14 % – 11,1 % (iki 32,4 dmm). Regeneruojant bitumą aromatine alyva nustatyta, kad su 8 % atnaujinančios medžiagos penetracija padidėja 75,0 % (iki 51,0 dmm), su 10 % – 136,1 % (iki 68,9 dmm), su 14 % (iki 63,0 dmm).
3. Minkštėjimo temperatūros bandymais nustatyta, kad atlikus bitumo regeneravimą minkštuoju kelių bitumu temperatūra sumažėjo 4,2 % (iki 67,6 °C) su 8 % atnaujinančios medžiagos, 4,8 % (iki 67,2 °C) su 10 % ir 6,4 % (iki 66,1 °C). Regeneruojant bitumą su 8 % aromatinės alyvos minkštėjimo temperatūra sumažėjo 11,7 % (iki 62,4 °C), su 10 % – 14,9 % (iki 60,1 °C), su 14 % – 20,1 % (iki 56,0 °C).
4. Tiesiškai tampriai klampaus būvio deformacijos nustatytos esant 2 °C, 38 °C ir 44 °C temperatūrai. Pagal sigmoidinės funkcijos kitimą apskaičiuotos 5 % mažesnis šlyties modulis ir ribinės deformacijos. PMB 45/80-55 bitumo reikšmės temperatūros intervale nuo 2 °C iki 44 °C kinta nuo 0,6 iki 2,2 %, bandinių po trumpalaikio sendinimo procedūros nuo 0,6 iki 2,1 %, po ilgalaikio 45 valandų trukmės PAV sendinimo procedūros nuo 0,6 iki 2,2 %. Bandinių su minkštuoju kelių bitumu ribinės deformacijos kinta nuo 0,5 iki 0,7 %, su aromatine alyva nuo 0,7 iki 1,8 %.

5. Kompleksinio šlyties modulio vidutinės vertės polimeru modifikuotam bitumui nustatytas nuo 50,8 kPa esant 2 °C iki 34817,6 kPa esant 44 °C. Atlikus trumpalaikę bitumo sendinimo procedūrą kompleksinis šlyties modulis atitinkamai padidėjo iki 82,3 kPa ir 38490,3 kPa. Atlikus pagreitiną ilgalaikio sendinimo procedūrą šios reikšmės dar padidėjo iki 1142,7 kPa ir 58167,3 kPa. Nustatyti keturių skirtingų gamintojų PMB 45/80-55 bitumo kompleksiniai šlyties moduliai, kurių vidurkis nuo 2 iki 44 °C temperatūros atitinkamai kinta nuo 22914500 iki 37146 Pa.
6. Regeneravus pasendintą rišiklį su minkštuuju kelių bitumu nustatyta, kad kompleksinio šlyties modulio vertė pasiekia nuo 452,1 iki 618,3 kPa reikšmę esant 44 °C temperatūrai (kuo didesnis kiekis atnaujinančios medžiagos tuo mažesnė vertė), nuo 49808,2 iki 53863,3 kPa esant 2 °C temperatūrai. Regeneravus bitumą aromatine alyva nustatytos dar mažesnės kompleksinio šlyties modulio vertės nuo 45,6 iki 502,8 kPa esant 44 °C temperatūrai, nuo 11811,13 iki 26091,2 kPa esant 2 °C temperatūrai.

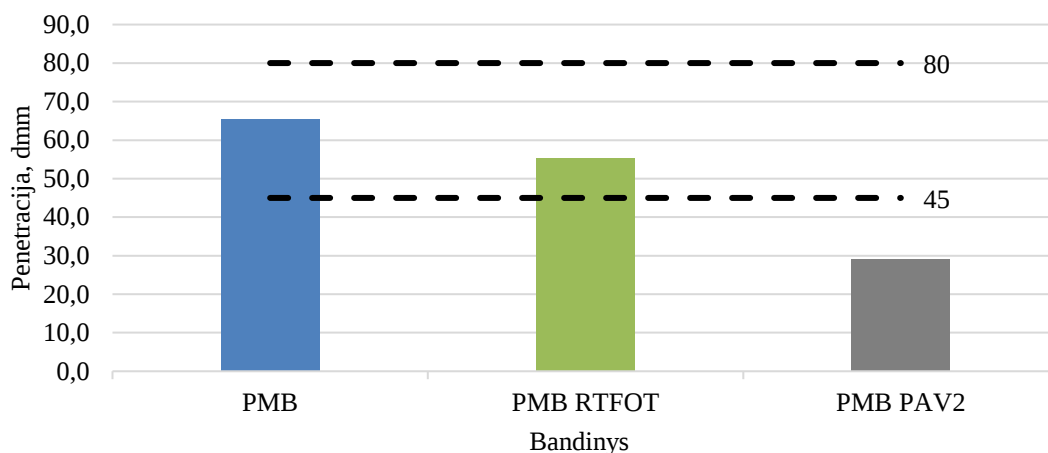
3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ INTERPRETAVIMAS

3.1. Bitumo savybių atitikimas normatyvinių techninių dokumentų reikalavimams

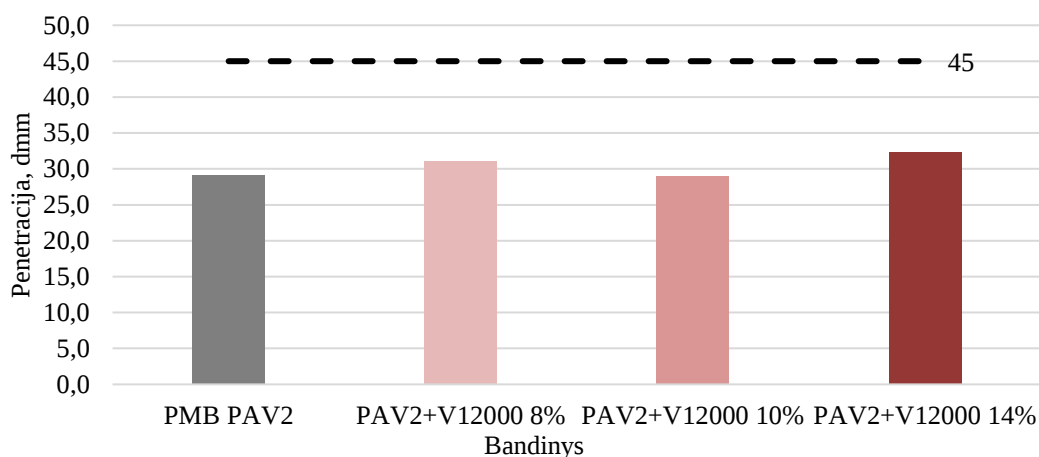
Tirtų bandinių penetracijos vertės palygintos su *LST EN 14023:2010* standarte apibrėžtomis vertėmis. Analizuojant pirminio bitumo ir atlikus sendinimo procedūras adatos penetraciją prie 25 °C (žr. 29 pav.) nustatyta, kad atlikus RTFOT sendinimo procedūrą penetracijos reikšmė sumažėja 15 % (55,4 dmm) ir tenkina reglamentuojamas savybes, ji yra 23,0 % (10,4 dmm) virš reglamentuojamos minimalios ribos (45 dmm). Po RTFOT sendinimo atlikus 45 valandų trukmės PAV sendinimą penetracijos reikšmė lyginant su pradinio bandinio reikšme sumažėja 55 % (29,2 dmm) ir yra 35,2 % (15,8 dmm) žemiau reglamentuojamos minimalios penetracijos reikšmės (45 dmm).

Visų bandinių su minkštuuju kelių bitumu penetracijos rezultatai (žr. 30 pav.) netenkina reglamentuojamos minimalios penetracijos reikšmės. Bandinio su 8 % atnaujinančios medžiagos penetracijos reikšmė nustatyta 31 % (31,0 dmm) mažesnė už minimalią ribą, su 10 % – 35 % (29,0 dmm), o su 14 % – 28 % (32,4 dmm). Mažiausia penetracijos vertė gauta pridėjus 10 % šios atnaujinančios medžiagos. Lyginant penetracijos rezultatus su pirminio bitumo rezultatais (65,3 dmm), nustatyta, kad bandinio su 8 % atnaujinančios medžiagos reikšmė 34,3 % (52,5 dmm) mažesnė, su 10 % – 55,6 % (36,3 dmm), o su 14 % – 50,4 % (32,9 dmm).

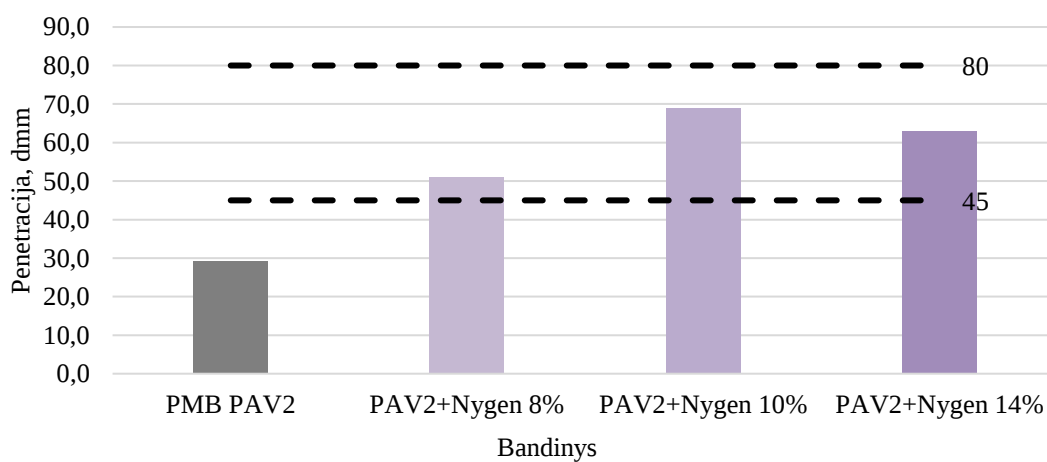
Visų bandinių su aromatine alyva penetracijos rezultatai (žr. 31 pav.) patenka į reglamentuojamų rezultatų ribas (45–80 dmm). Bandinio su 8 % atnaujinančios medžiagos penetracijos reikšmė nustatyta 13,4 % (51,0 dmm) didesnė už minimalią ribą, su 10 % – 53,0 % (68,9 dmm), o su 14 % – 40,1 % (63,0 dmm). Lyginant penetracijos rezultatus su pirminio bitumo rezultatais, nustatyta, kad bandinio su 8 % atnaujinančios medžiagos vertė 21,9 % (14,3 dmm) mažesnė, su 10 % – 5,4 % (3,5 dmm) didesnė, o su 14 % – 3,5 % (2,3 dmm) mažesnė. Didžiausia penetracijos reikšmė nustatyta su 10 % aromatinės alyvos, vienintelio šio bandinio penetracijos rezultatas nustatytas didesnis nei pradinio bitumo.



29 pav. Pirminio, po RTFOT ir PAV2 bandinių penetracijos rezultatai (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal *LST EN 14023*)



30 pav. Bandinių su V12000 penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal *LST EN 14023*)

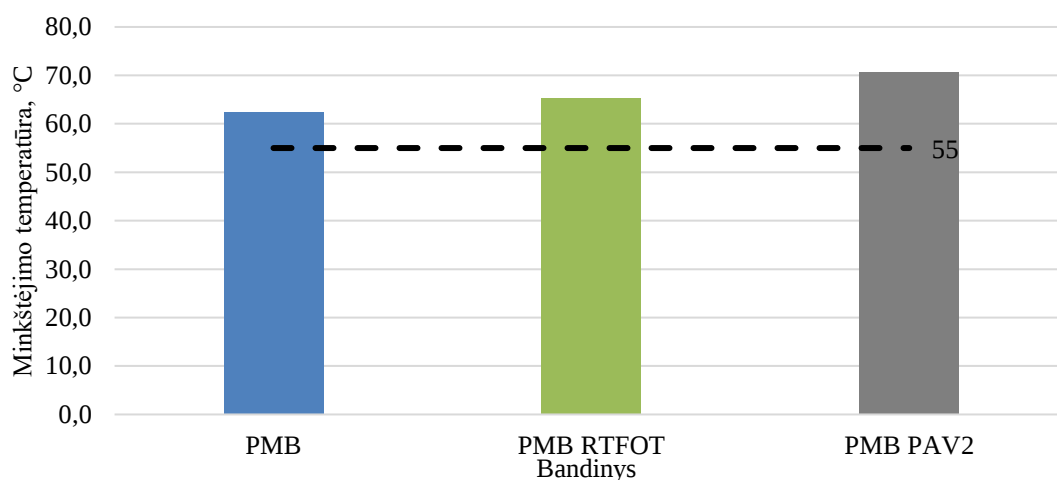


31 pav. Bandinių su Nygen penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal *LST EN 14023*)

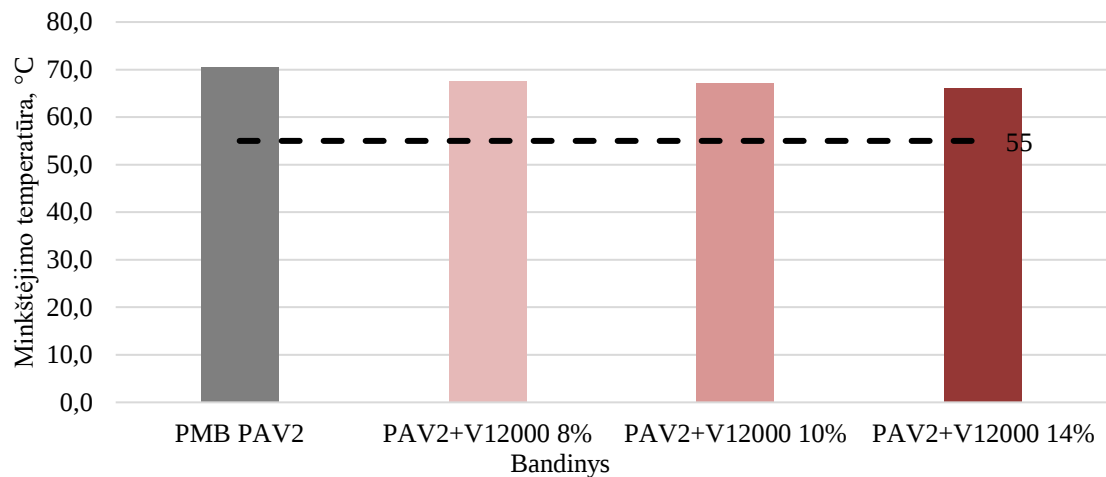
Analizuojant pirminio (62,5 °C) ir pasendintų bandinių minkštėjimo temperatūrą (žr. 32 pav.) nustatyta, kad atlikus RTFOT sendinimą minkštėjimo temperatūra padidėjo 4 % (65,3 °C), o atlikus 45 valandų trukmės PAV sendinimą 13 % (70,6 °C). Visų bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai viršija reglamentuojamą minimalią ribą. Pradinio bitumo minkštėjimo temperatūra 13,6 % (7,5 °C) didesnė už minimalią ribą, bandiniui atlikus RTFOT sendinimo procedūrą 18,6 % (10,3 °C), o atlikus ilgalaikį 45 valandų trukmės PAV sendinimo procedūrą 28,4 % (15,6 °C).

Visų bandinių su minkštuoju kelių bitumu minkštėjimo temperatūros rezultatai (žr. 33 pav.) tenkina reglamentuojamą minimalią reikšmę (55 °C). Didinant atnaujinančios medžiagos kiekį nustatytos minkštėjimo temperatūros neženkiai skiriasi ir atitinkamai yra didesnės už minimalią reikšmę 22,9 % (67,6 °C), 22,2 % (67,2 °C) ir 20,1 % (66,1 °C). Lyginant pirminio ir regeneruoto bitumo rezultatus, nustatyta, kad bandinio su 8 % atnaujinančios medžiagos vertė 8,2 % (5,1 °C) didesnė, su 10 % – 7,5 % (4,7 °C), o su 14 % – 5,7 % (3,6 °C).

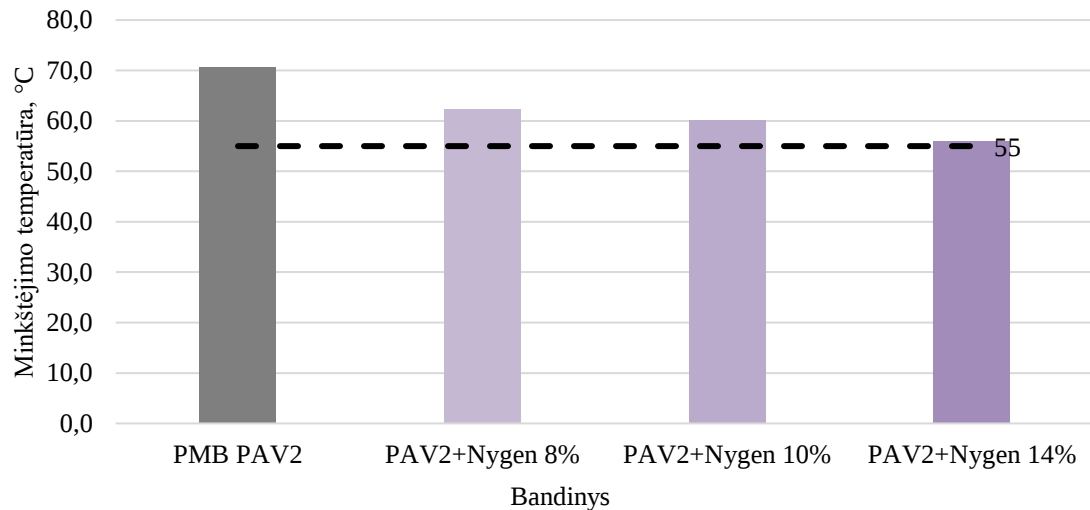
Visų bandinių su aromatine alyva minkštėjimo temperatūros rezultatai (žr. 34 pav.) tenkina reglamentuojamą minimalią reikšmę. Didinant atnaujinančios medžiagos kiekį nustatytas minkštėjimo temperatūros mažėjimas. Bandinių su 8 % aromatinės alyvos minkštėjimo temperatūros vertė 13,4 % (62,4 °C) didesnė už minimalią reglamentuojamą reikšmę, o su 10 % atnaujinančios medžiagos – 9,3 % (60,1 °C). Bandinio su 14 % aromatinės alyvos minkštėjimo temperatūros vertė taip pat tenkina minimalaus reikalavimo ribą ir ją viršija 1,8 % (56,0 °C). Lyginant pirminio ir regeneruoto bitumo rezultatus, nustatyta, kad bandinio su 8 % atnaujinančios medžiagos vertė 0,2 % (0,2 °C) mažesnė, su 10 % – 3,8 % (2,4 °C), o su 14 % – 10,4 % (6,5 °C).



32 pav. Pirminio, po RTFOT ir PAV2 bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal *LST EN 14023*)



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

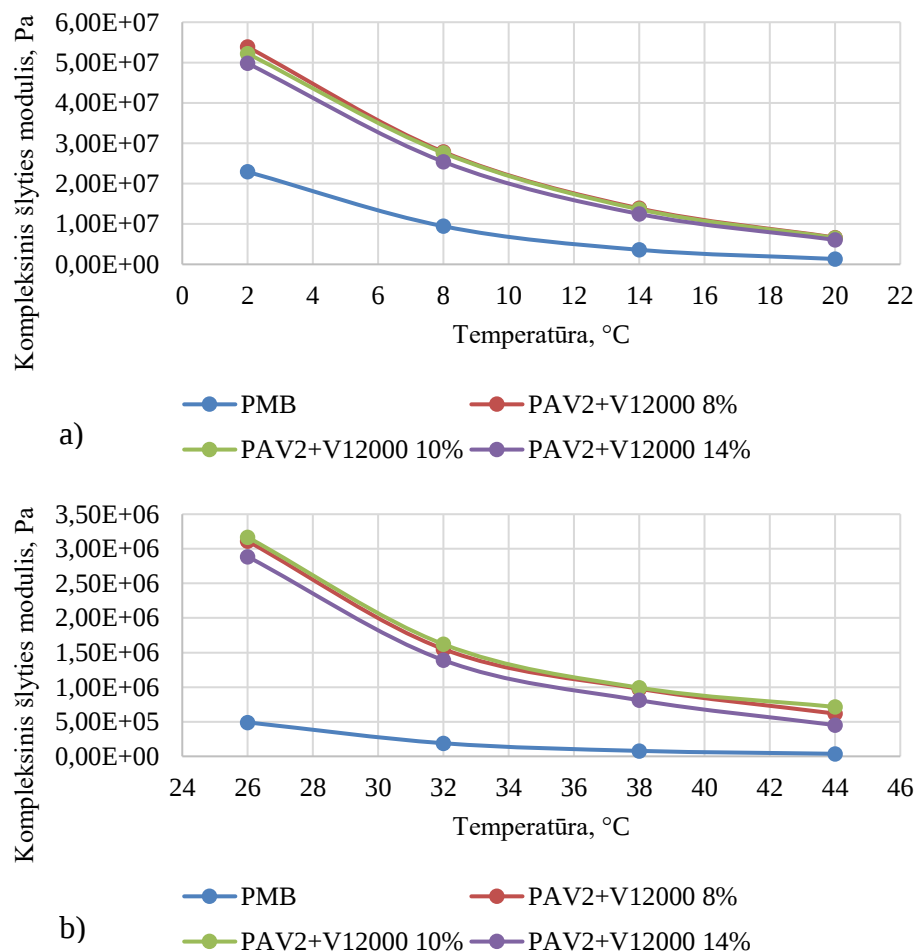


34 pav. Bandinių su Nygen minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal *LST EN 14023*)

Penetracijos rezultatais nustatyta, kad PMB 45/80-55 bitumo atnaujinimas su minkštuoju kelių bitumu neženkiai padidina arba netgi sumažina (su 10 % priedo -0,2 dmm) penetraciją ir bitumas nebetenkina reglamentuojamų savybių. Aromatinės alyvos pridėjimas ženkliai padidina penetracijos reikšmes ir netgi viršija nustatytas su pradiniu bitumu. Minkštėjimo temperatūros rezultatai parodė, kad minkštasis kelių bitumas nežymiai sumažina minkštėjimo temperatūrą, o aromatinė alyva sumažina temperatūrą iki pradinio bandinio vertės ir labiau (su 14 % beveik pasiekama minimali riba).

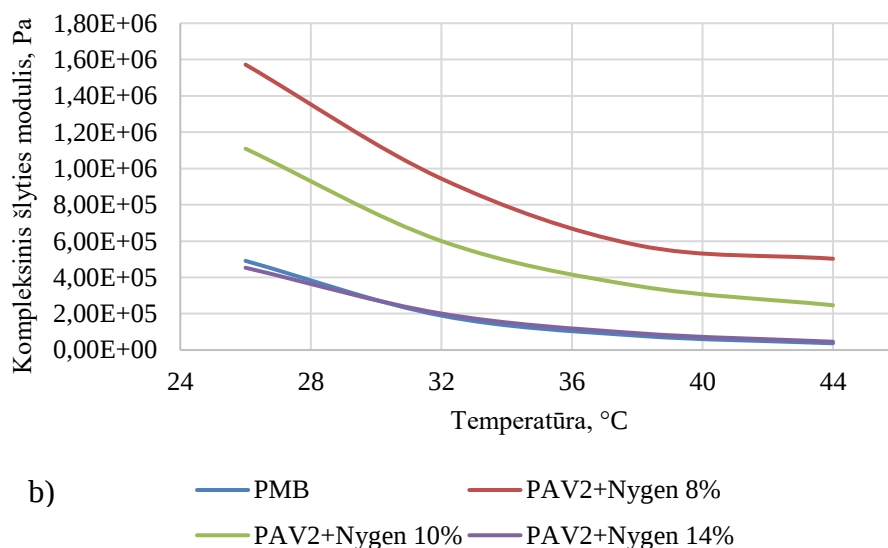
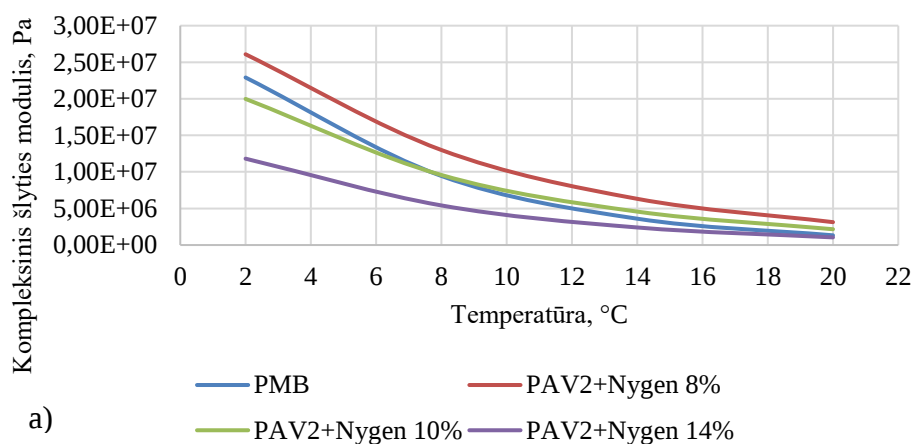
3.2. Regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio atitikimas referenciniam

Referencinis šlyties modulis priimamas keturių skirtingų gamintojų rezultatų vidurkis. 35 paveiksle pateikiamas grafinis kompleksinio šlyties modulio palyginimas referencinio ir skirtingais minkštojo kelių bitumo kiekiais paveikto bitumo. Regeneravus bitumą 8 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 53863,3 iki 618,3 kPa, tai yra nuo 2,4 iki 16,7 kartų didesnis už referencinio bitumo. Bandinio su 10 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 52227,6 iki 714,2 kPa, tai yra nuo 2,3 iki 19,2 kartų didesnis už referencinio bitumo. Bandinio su 14 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 49808,2 iki 452,1 kPa, tai yra nuo 2,2 iki 12,7 kartų didesnis už referencinio bitumo.



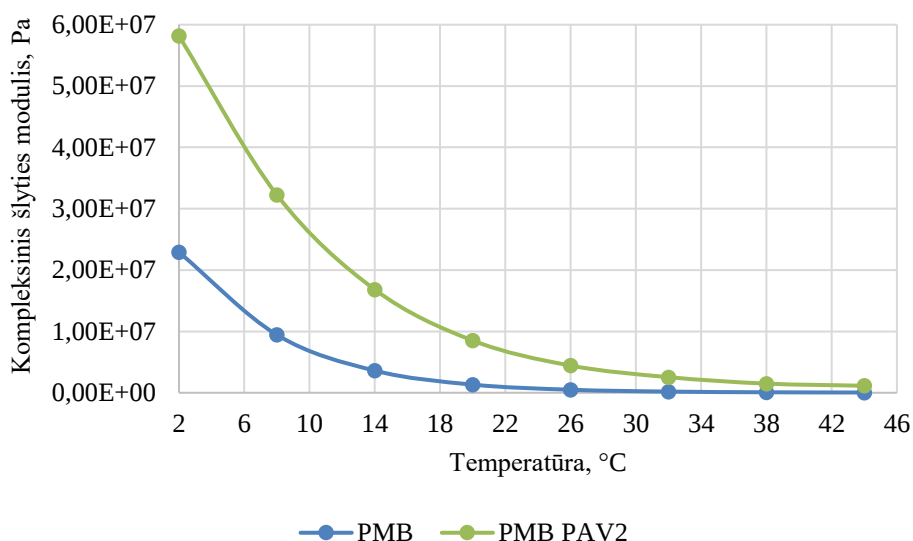
35 pav. Referencinio ir minkštuoju kelių bitumu regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio palyginimas: a) 2–20 °C temperatūrose; b) 26–44 °C temperatūrose

36 paveiksle pateikiamas grafinis kompleksinio šlyties modulio palyginimas referencinio ir skirtingais aromatinės alyvos kiekiais regeneruoto bitumo. Regeneravus bitumą 8 % aromatinės alyvos kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 26091,2 iki 502,8 kPa, tai yra nuo 1,1 iki 13,5 kartų didesnis už referencinio bitumo. Bandinio su 10 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis esant 2 °C temperatūrai nustatytas 19987,0 kPa, tai yra 12,8 % mažesnis už referencinio bitumo. 8–44 °C temperatūros intervale su 10 % aromatinės alyvos kompleksinis šlyties modulis kinta nuo 9580,1 iki 246,7 kPa, atitinkamai nuo 1,4 % iki 6,6 kartų didesnis už referencinio. Su 14 % šios medžiagos esant 2–26 °C nustatytas nuo 11811,1 iki 453,4 kPa, atitinkamai nuo 48,5 iki 7,7 % mažesnis už referencinio, esant 32–44 °C nuo 200,9 iki 45,6 kPa, atitinkamai nuo 6,0 iki 22,7 % didesnis už referencinio.



36 pav. Referencinio ir aromatine alyva regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio palyginimas: a) 2–20 °C temperatūrose; b) 26–44 °C temperatūrose

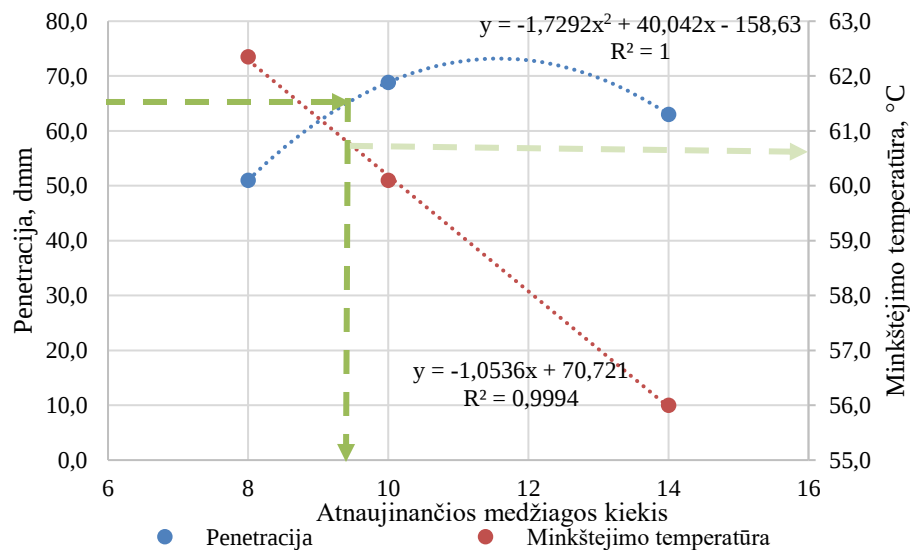
Referencinio ir ilgalaikiu 45 valandų trukmės PAV sendinimu pasenusio bitumo rezultatų palyginimas pateikiamas 37 paveiksle. Atlikus ilgalaikę 45 valandų trukmės PAV sendinimo procedūrą kompleksinis šlyties modulis temperatūros intervale 2–44 °C nustatytas nuo 2,5 (skirtumas 35252772,7 Pa) iki 30,8 (skirtumas 1105574,0 Pa) kartų didesnis. Didžiausias procentinis skirtumas nustatytas esant 44 °C temperatūrai.



37 pav. Referencinio ir 45 valandų trukmės PAV sendinimu pasendinto bitumo kompleksinio šlyties modulio palyginimas

3.3. Polimerais modifikuoto bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas

Optimalus aromatinės alyvos kiekis nustatytas pagal penetracijos ir minkštėjimo temperatūros rezultatus (žr. 38 pav.). Eksperimentinių bandymų rezultatai pateikiami sklaidos diagramoje, kurioje reikšmės sujungtos krypties linija, siekiant gauti R reikšmę kuo artimesnę 1. Nustatytos siekiamos penetracijos ir minkštėjimo temperatūros reikšmės, atitinkamai 65,3 dmm ir 62,5 °C. Grafike pateikiamose lygtyse įrašius siekiamas rezultatų vertes apskaičiuota, kad optimalus aromatinės alyvos kiekis yra 10 %. Minkštėjimo temperatūros ir penetracijos rezultatais nustatytų verčių su minkštuoju kelių bitumu pasiekti nepavyko, reikėtų tęsti eksperimentą didinant atnaujinančios medžiagos kiekį, todėl šiame tyrime tolimesniuose skaičiavimuose ši medžiaga neįtraukiama.

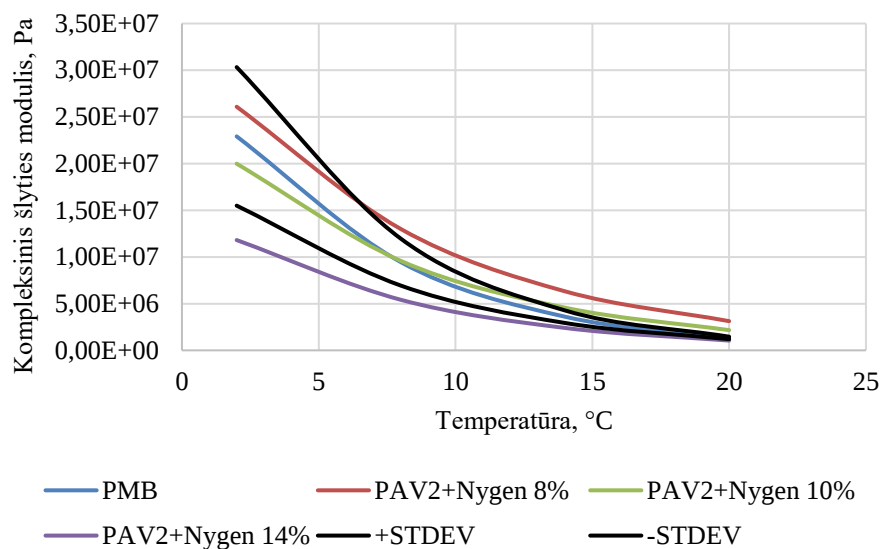


38 pav. Optimalus aromatinės alyvos kiekis pagal siekiamas penetracijos ir minkštėjimo temperatūros vertes

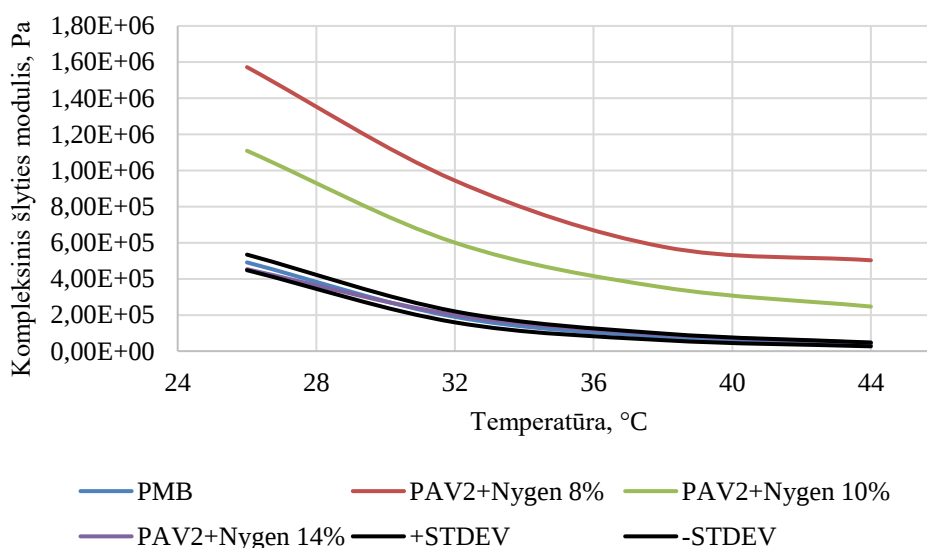
Optimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio įvertinimui pagal kompleksinį šlyties modulį kiekvienai bandymo temperatūrai apskaičiuotas standartinis skirtingų gamintojų kompleksinio šlyties modulio nuokrypis (9 lentelė). Prie kompleksinio šlyties modulio vidurkio pridėjus ir atėmus standartinį nuokrypį, nustatytos ribos į kurias turi patekti regeneruoto bitumo kompleksinio šlyties modulio rezultatai (žr. 39 pav.–40 pav.). Nuo 2 iki 8,1 °C bandinio su 8 % aromatinės alyvos kompleksinis šlyties modulis patenka į tinkamumo ribas, esant aukštesnėms temperatūroms ribos yra viršijamos. Su 10 % atnaujinančios medžiagos kompleksinis šlyties modulis patenka į tinkamumo ribas nuo 2 iki 11,0 °C. Tik su 14 % aromatinės alyvos kompleksinio šlyties modulio rezultatai nuo 2 iki 44,0 °C temperatūrų patenka į tinkamumo ribas. Kompleksinio šlyties modulio rezultatų analizė parodė, kad fizikinėmis savybėmis nustatytas atnaujinančios medžiagos kiekis esant aukštesnėms temperatūroms netenkina referencinių ribų.

9 lentelė. Skirtingų gamintojų bitumo kompleksinio šlyties modulio standartinis nuokrypis

Temperatūra, °C	2	8	14	20	26	32	38	44
Standartinis nuokrypis, Pa	7417176,9	2511866,2	671432,8	132670,9	43077,4	30359,1	18268,7	10572,0

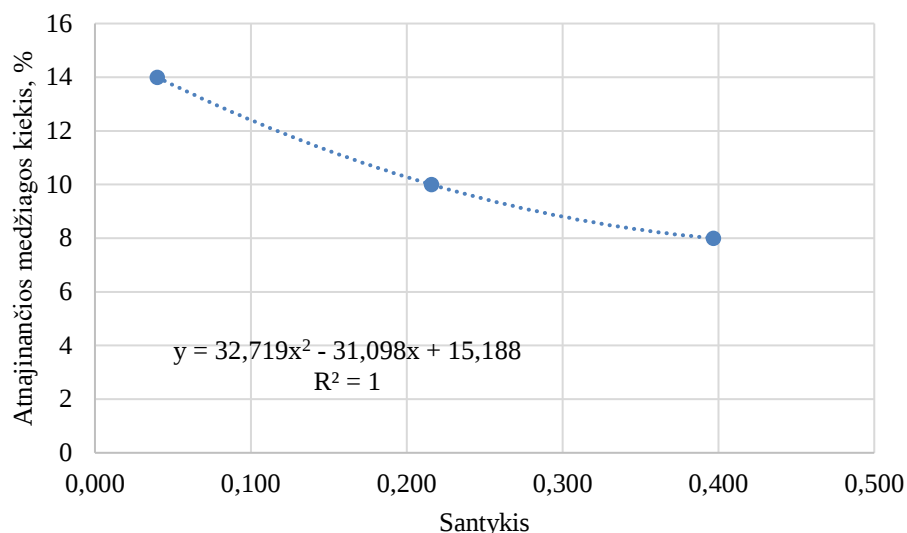


39 pav. Kompleksinio šlyties modulio tinkamumo ribos pagal standartinę nuokrypį esant 2–20 °C



40 pav. Kompleksinio šlyties modulio tinkamumo ribos pagal standartinę nuokrypį esant 26–44 °C

Didžiausias kompleksinio šlyties modulio skirtumas tarp pirminio ir ilgalaikiu 45 valandų trukmės PAV sendinimu pasendinto bitumo nustatytas esant 44 °C, todėl ši temperatūra pasirenkama algoritmo kūrimui. Iš kompleksinio šlyties modulio bandymų rezultatų apskaičiuoti regeneruoto skirtingais kiekiais aromatinės alyvos bitumo ir po 45 valandų trukmės ilgalaikio sendinimo bitumo santykiai, kurie pateikiami 41 paveiksle. Iš šių duomenų sudaryta sklaidos diagrama, kurios taškai sujungti krypties linija ir pateikiama lygtis su koreliacijos koeficientu.



41 pav. Bandinių su skirtingais kiekiais aromatinės alyvos ir po 45 valandų trukmės PAV sendinimo kompleksinių šlyties modulių santykiai prie 44 °C

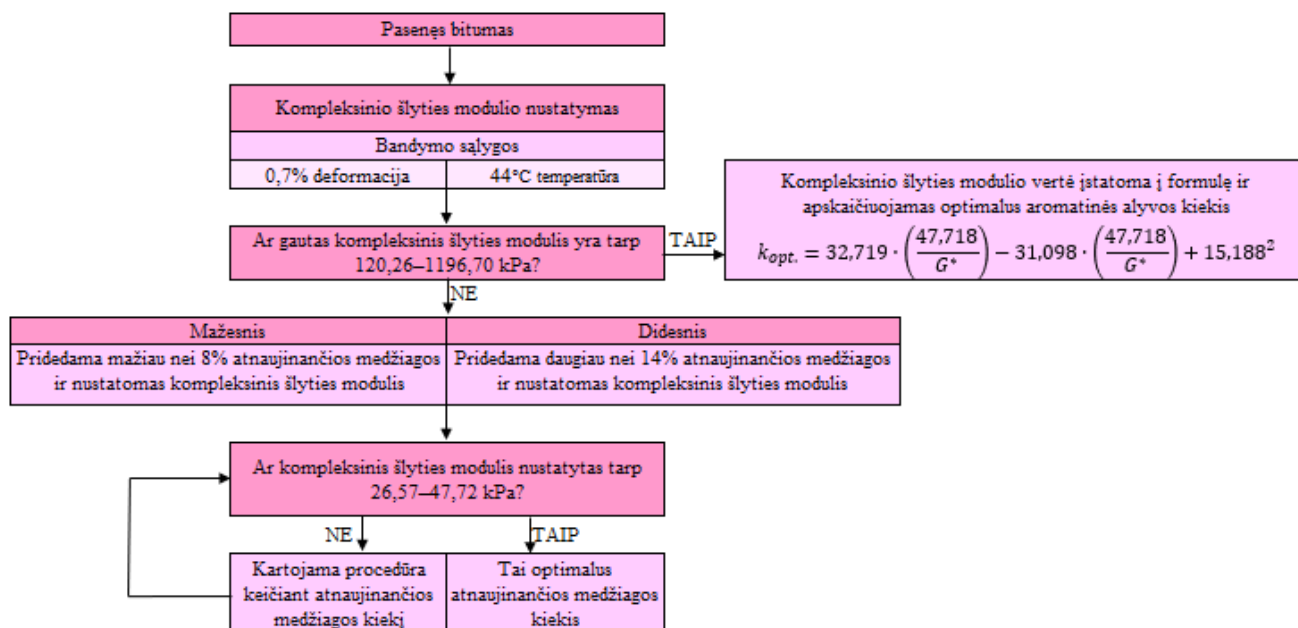
Pasinaudojus šia lygtimi, sudaryta 5 formulė, atnaujinančios medžiagos kiekiui nustatyti. 5 formulėje vietoje kintamojo x reikia įstatyti referencinio ir iš asfalto dangos paimto bitumo kompleksinio šlyties modulių santykį. Prie keturių skirtingų gamintojų kompleksinių šlyties modulių vidurkio pridėdamas šių matavimų standartinis nuokrypis ir priimama, kad tai referencinis kompleksinis šlyties modulis, kuris yra lygus 47,718 kPa, tuomet optimalus atnaujinančios medžiagos kiekis yra:

$$k_{opt.} = 32,719 \cdot \left(\frac{47,718}{G^*}\right)^2 - 31,098 \cdot \left(\frac{47,718}{G^*}\right) + 15,188 \quad (5)$$

čia $k_{opt.}$ – optimalus aromatinės alyvos kiekis bitumo atnaujinimui, %; G^* – bitumo iš asfalto dangos kompleksinis šlyties modulis prie 44 °C temperatūros, kPa.

Į 5 formulę įstačius kompleksinio šlyties modulio vertę (1142,72 kPa) po 45 valandų trukmės PAV sendinimo nustatytas optimalus atnaujinančios medžiagos kiekis 13,9 %. Funkcinėmis savybėmis paremtame algoritme išmatuojamas kompleksinis šlyties modulis esant 44 °C temperatūrai ir 0,7 % deformacijai. Įvertinama ar kompleksinio šlyties modulio rezultatas patenka į ribas nuo 120,26 kPa iki 1196,70 kPa, Jeigu patenka į formulę įstatomas kompleksinio šlyties modulio rezultatas ir nustatomas atnaujinančios medžiagos optimalus kiekis (tarp 8–14 %). Jeigu kompleksinis šlyties modulis nustatomas didesnis arba mažesnis už esamas ribas reikia atlikti papildomus tyrimus atitinkamai su

didesniu arba mažesniu kiekiu atnaujinančios medžiagos. Remiantis šiais rezultatais patikslintas optimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio nustatymo algoritmas (žr. 42 pav.).



42 pav. Patikslintas atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimo bitumo atnaujinimui algoritmas

Laiko ir žmogiškųjų išteklių sąnaudos įvertintos tiek funkcinėmis, tiek fizikinėmis savybėmis paremtais metodais atsižvelgiant į tai: kokius eksperimentinius tyrimus reikia atlikti, kiek laiko užtrunka atlikti visą tyrimą, kiek laiko užtrunka darbuotojas, koks sunaudojamas bitumo kiekis (žr. 10 lentelė). Efektyvumo įvertinimui priimtos tokios prielaidos:

- bandinių perdėjimui po aušinimo priimama 1 minutė;
- bitumo kiekiai suapvalinami iki pilno skaičiaus;
- nėra įtraukiamas bitumo kaitinimas ir bandinių išpilstymas.

Funkcinėmis savybėmis paremtame metode skaičiuojama, kad atliekami du kompleksinio šlyties modulio bandymai, apskaičiuota darbo trukmė 22 minutės, o sunaudojamo bitumo kiekis 2 g. Fizikinėmis savybėmis paremtame metode skaičiuojami pirminiai bandymai, penetracijos ir minkštėjimo temperatūros, maišymai su atnaujinančiu priedu ir pakartotini penetracijos ir minkštėjimo temperatūros bandymai. Apskaičiuota darbo trukmė 74 minutės, o sunaudojamas bitumo kiekis 174 g. Nors funkcinėmis savybėmis paremtame metode bendra trukmė yra didesnė, beveik 14 val. 30 min užtrunka bandinio aušinimas ir bandymo atlikimas (paleidus programą prietaisas viską atlieka pats),

todėl darbuotojas yra laisvas atlikinėti kitus darbus. Laborantui reikalingos tik 22 minutės atlikti reikalingus darbus, o fizikinėmis savybėmis paremtame metode kiek daugiau nei valandos (74 min). Sunaudojamo bitumo kiekis skiriasi 172 gramais. Vertinant tai, kad bitumas yra ne tik brangi, bet ir iš neatsinaujinančių šaltinių išgaunama medžiaga, o darbuotojas per tokį pat laiką gali atlikti daugiau užduočių, galima teigi, kad funkcinėmis savybėmis paremtas algoritmas yra efektyvesnis už fizikinėmis savybėmis paremtą algoritmą.

10 lentelė. Atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimo skirtingais metodais bitumo kiekio ir laiko sąnaudų palyginimas

Metodas	Bandymas	Darbas	Trukmė, min	Darbo trukmė, min	Laukimo trukmė, min	Reikalingas bitumo kiekis, g	Viso darbo trukmė, min	Viso, g
Funkcinėmis savybėmis paremtas	Kompleksinis šlyties modulis	Bandinio aušinimas prieš bandymą	720	2	719	2	22	2
		Bandymas	300	20	280			
Fizikinėmis savybėmis paremtas	Penetracija	Bandinio aušinimas ore	60	1	59	80	74	174
		Bandinio aušinimas vandenyje	60	1	59			
		Bandymas	3	3	0			
	Minkštėjimo temperatūra	Aušinimas ore	30	1	29	4		
		Temperatūros stabilizavimas vandenyje	15	1	14			
		Bandymas	10	10	0			
	Maišymai su atnaujinančia medžiaga		40	40	0	90		
	Penetracija	Bandinio aušinimas ore	60	1	59	Naudojamas bitumas po maišymo		
		Bandinio aušinimas vandenyje	60	1	59			
		Bandymas	3	3	0			
	Minkštėjimo temperatūra	Aušinimas ore	30	1	29			
		Temperatūros stabilizavimas vandenyje	15	1	14			
		Bandymas	10	10	0			

3.4. Skyriaus išvados

1. Analizuojant pirminio ir atlikus sendinimo procedūras bitumo bandinių adatos penetraciją esant 25 °C nustatyta, kad atlikus trumpalaikį RTFOT sendinimą penetracijos reikšmė tenkina reglamentuojamas savybes, ji yra 23,0 % (55,4 dmm) virš reglamentuojamos minimalios ribos (45 dmm). Atlikus ilgalaikį 45 valandų trukmės PAV sendinimą penetracijos reikšmė yra 35,2 % (29,2 dmm) žemiau reglamentuojamos minimalios penetracijos reikšmės. Pirminio ir pasendintų bitumo bandinių minkštėjimo temperatūros rezultatai viršija reglamentuojamą minimalią ribą. Pradinio bitumo minkštėjimo temperatūra 13,6 % (62,5 °C) didesnė už minimalią ribą, bandiniui atlikus RTFOT sendinimą 18,6 % (65,3 °C), o atlikus 45 valandų PAV sendinimą 28,4 % (70,6 °C).
2. Visų bitumo bandinių atnaujintų minkštuoju kelių bitumu penetracijos rezultatai netenkina reglamentuojamos minimalios penetracijos reikšmės (45 dmm): su 8 % atnaujinančios medžiagos penetracijos reikšmė nustatyta 31 % (31,0 dmm) mažesnė už minimalią ribą, su 10 % – 35 % (29,0 dmm), o su 14 % – 28 % (32,4 dmm). Visų bandinių su aromatine alyva penetracijos rezultatai patenka į reglamentuojamų rezultatų ribas su 8 % penetracijos reikšmė nustatyta 13,4 % (51,0 dmm) didesnė už minimalią ribą, su 10 % – 53,0 % (68,9 dmm), o su 14 % – 40,1 % (63,0 dmm).
3. Visų bitumo bandinių atnaujintų minkštuoju kelių bitumu minkštėjimo temperatūros rezultatai tenkina reglamentuojamą minimalią reikšmę (55 °C). Didinant atnaujinančios medžiagos kiekį nustatytos minkštėjimo temperatūros neženkliai skiriasi ir atitinkamai yra didesnės už minimalią reikšmę 22,9 % (67,6 °C), 22,2 % (67,2 °C) ir 20,1 % (66,1 °C). Bandinių su 8 % aromatinės alyvos minkštėjimo temperatūros vertė nustatyta 13,4 % (62,4 °C) didesnė už minimalią reglamentuojamą reikšmę, o su 10 % atnaujinančios medžiagos – 9,3 % (60,1 °C), su 14 % – 1,8 % (56,0 °C).
4. Referencinis šlyties modulis priimtas keturių skirtingų gamintojų tos pačios markės bitumo rezultatų vidurkis, kuris nuo 2 iki 44 °C atitinkamai kinta nuo 2291,5 iki 37,1 kPa. Skirtingų gamintojų PMB 45/80-55 bitumo kompleksinio šlyties modulio standartinis nuokrypis nuo 2 iki 44 °C nustatytas nuo 7417,2 iki 10,6 kPa. Atlikus 45 valandų trukmės PAV sendinimą kompleksinis šlyties modulis temperatūros intervale 2–44 °C kinta nuo 58167,3 iki 1142,7 kPa, tai yra nuo 2,5 iki 30,8 kartų didesnis rezultatas už referencinį.
5. Regeneravus bitumą 8 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 53863,3 iki 618,3 kPa, tai yra nuo 2,4 iki 16,7 kartų didesnis už referencinio

bitumo. Bandinio su 10 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 52227,6 iki 714,2 kPa, tai yra nuo 2,3 iki 19,2 kartų didesnis už referencinio bitumo. Bandinio su 14 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 49808,2 iki 452,1 kPa, tai yra nuo 2,2 iki 12,7 kartų didesnis už referencinio bitumo.

6. Regeneravus bitumą 8 % aromatinės alyvos kompleksinis šlyties modulis 2–44 °C intervale kinta nuo 26091,2 iki 502,8 kPa, tai yra nuo 1,1 iki 13,5 kartų didesnis už referencinio bitumo. Bandinio su 10 % minkštojo kelių bitumo kompleksinis šlyties modulis esant 2 °C temperatūrai nustatytas 19987,0 kPa, tai yra 12,8 % mažesnis už referencinio bitumo. 8–44 °C temperatūros intervale su 10 % aromatinės alyvos kompleksinis šlyties modulis kinta nuo 9580,1 iki 246,7 kPa, atitinkamai nuo 1,4 % iki 6,6 kartų didesnis už referencinio. Su 14 % šios medžiagos esant 2–26 °C nustatytas nuo 11811,1 iki 453,4 kPa, atitinkamai nuo 48,5 iki 7,7 % mažesnis už referencinio, esant 32–44°C nuo 200,9 iki 45,6 kPa, atitinkamai nuo 6,0 iki 22,7 % didesnis už referencinio.
7. Nustatytas optimalus aromatinės alyvos kiekis, reikalingas atnaujinti PMB bitumą, fizikinių savybių vertinimo metodu – 10,0 %. Vertinant funkcinių savybių vertinimo metodu bitumą atnaujinant minkštuoju kelių bitumu nepavyko nustatyti reikiamo atnaujintojo kiekio bitumo savybėms atkurti.
8. Didžiausias kompleksinio šlyties modulio skirtumas tarp 45 valandų PAV sendinimu pasendinto ir pirminio bitumo bandinių nustatytas esant 44 °C temperatūrai, todėl ji parinkta algoritmo kūrimui. Funkcinių savybių vertinimo metodas sukurtas pagal kompleksinio šlyties modulio kitimo funkciją priklausančią nuo atnaujinančios medžiagos kiekio. Optimalaus atnaujinančios medžiagos kiekis nustatomas atliekant kompleksinio šlyties modulio bandymą tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose (0,7 % deformacija). Nustatytam kompleksiniam šlyties moduliui patenkant į ribas (120,26–1196,70 kPa) optimalus polimerais modifikuoto bitumo atnaujinimui reikalingas medžiagos kiekis (8–14 %) apskaičiuojamas nustatyta priklausomybe. Kompleksinio šlyties modulio vertėms nepatenkant į nustatytas ribas turi būti atliekami papildomi dinaminio šlyties modulio bandymai keičiant atnaujinančių medžiagų kiekį, kad rezultatas patektų į siekiamas ribas (26,57–47,0 kPa). Optimalus aromatinės alyvos kiekis funkcinių savybių vertinimo metodu nustatytas 13,9 %.
9. Atnaujinančios medžiagos optimalaus kiekio parinkimui funkcinėmis savybėmis paremtu metodu reikalingos 22 minutės ir 2 gramai bitumo, o fizikinėmis savybėmis 74 minučių ir 174 gramų bitumo. Taikant funkcinių savybių vertinimo metodą sunaudojamas žymiai mažesnis

bitumo kiekis, bandymų trukmė skiriasi beveik 4 kartus. Didesnis bitumo kiekis reikalauja didesnių resursų bandymų įrangos ir matavimo priemonių išvalymui po bandymo. Visais atvejais funkcinių savybių įvertinimas leidžia gautus duomenis panaudoti empirinių dangų konstravimo metodų analizei.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Kelio eksploatacijos metu bitumas asfalto sluoksniuose kietėja ir praranda elastingumą. Šias pasekmes lemia: saulės UV radiacija, temperatūra, aplinkos deguonis, kurie bitumą veikia visu kelio eksploatacijos laikotarpiu. Šie veiksniai labiausiai veikia viršutinį asfalto sluoksnį. Polimerais modifikuotas bitumas funkcionuoja ir sensta ne taip kaip paprastas bitumas, tačiau pasikeitę bitumo komponentai gali nulemti polimerų degradaciją.
2. Mokslininkai charakterizuoja bitumo atnaujinančias medžiagas ir skirsto į biologines ir naftos pagrindu atnaujinančias medžiagas. Atnaujinančios medžiagos apibūdinamos pagal kilmę, cheminę sudėtį ir poveikį. Dauguma atnaujinančių medžiagų veikia kaip minkštinančios, kurios sumažina klampumą. Kitos gali nutraukti ar suardyti sąveiką arba molekulinis ryšius tarp asfaltenu (dėl oksidacijos), todėl skirtos pagerinti bitumo molekulių atskyrimą ir užkirsti kelią jų nusėdimui ar susikaupimui. Cheminės sudėties balansą gali atkurti tik naftos pagrindu pagamintos atnaujinančios medžiagos. Bitumo atnaujinimas yra sudėtingas procesas, kurio metu vienas iš svarbiausių uždavinių yra nustatyti optimalų atnaujinančios medžiagos kiekį. Dauguma tyrėjų naudoja metodiką, pagrįstą penetracijos ir minkštėjimo temperatūros rezultatais, kiti mokslininkai naudoja penetracijos ir klampos bandymų rezultatus, kur iš gautų rezultatų apskaičiuojamas optimalus atnaujinančios medžiagos kiekis.
3. Sukurtas teorinis kelių bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas pagrįstas funkcinėmis savybėmis. Atnaujinančios medžiagos kiekis nustatomas atliekant kompleksinio šlyties modulio bandymą tiesiškai tampriai klampaus būvio ribose, esant fiksuotai temperatūrai. Nustatytam kompleksiniam šlyties moduliui patenkant į eksperimentiniu tyrimu nustatytas ribas, optimalus polimerais modifikuotam bitumui atnaujinti reikalingas medžiagos kiekis apskaičiuojamas pagal nustatytą priklausomybę (tarp kompleksinio šlyties modulio reikšmės ir atnaujinančios medžiagos kiekio). Kompleksinio šlyties modulio vertėms nepatenkant į nustatytas ribas, turi būti atliekami papildomi dinaminės šlyties modulio bandymai keičiant atnaujinančių medžiagų kiekį.
4. Atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio metu bitumas pasendintas trumpalaikiu ir pagreintu ilgalaikiu 45 valandų trukmės sendinimu. Nustatytos bitumo penetracijos ir minkštėjimo vertės, parinktas pirminis atnaujinančios medžiagos kiekis. Atlikus bitumo maišymus su atnaujinančia medžiaga, nustatytos fizikinės (penetracija, minkštėjimo temperatūra) ir funkcinės (tiesiškai tampriai klampaus būvio ribos, kompleksinis šlyties modulis temperatūros intervale nuo 2 °C iki 44 °C) savybės.

5. PMB 45/80-55 bitumą regeneravus panaudojant tris atnaujinančios medžiagos (minkštojo kelių bitumo) kiekius (8 %, 10 % ir 14 %) nustatyta, kad penetracijos reikšmės (kinta nuo 29,0 iki 32,4 dmm) yra nuo 28 iki 35 % mažesnės už minimalią reglamentuojamą reikšmę (45,0 dmm). Minkštėjimo temperatūros vertės (kinta nuo 66,1 iki 67,6 °C) nustatytos didesnės už minimalią reglamentuojamą reikšmę (55 °C).
6. PMB 45/80-55 bitumą regeneravus minkštuoju kelių bitumu, kompleksinio šlyties modulio vertės nuo 2,2 iki 19,2 kartų didesnės už referencinio nesendinto bitumo. Mažiausias skirtumas nustatytas su 14 % minkštojo kelių bitumo, esant 2 °C (nustatytas kompleksinis šlyties modulis 49808,2 kPa), didžiausias su 10 %, esant 44 °C temperatūrai (nustatytas kompleksinis šlyties modulis 714,2 kPa). Įvertinus visų eksperimentinių tyrimų rezultatus nustatyta, kad 8 %, 10 % ir 14 % minkštojo kelių bitumo kiekis yra nepakankamas eksploatacines savybes praradusio bitumo savybėms atkurti.
7. Nustatyta, kad PMB 45/80-55 bitumui regeneruoti panaudojant tris atnaujinančios medžiagos (aromatinės alyvos) kiekius (8 %, 10 % ir 14 %), penetracijos reikšmės (kinta nuo 51,0 iki 68,9 dmm) atitinka reglamentuojamas (45,0–80,0 dmm). Be to, nustatyta, kad minkštėjimo temperatūros vertės (kinta nuo 56,0 iki 62,4 °C) yra didesnės už minimalią reglamentuojamą reikšmę (55 °C).
8. PMB 45/80-55 bitumą regeneravus aromatine alyva, kompleksinio šlyties modulio vertės nuo 1,1 iki 13,5 kartų didesnės už referencinio nesendinto bitumo. Mažiausias skirtumas nustatytas su 10 % aromatinės alyvos, esant 8 °C (nustatytas kompleksinis šlyties modulis 9580,1 kPa), didžiausias – su 8 %, esant 44 °C temperatūrai (nustatytas kompleksinis šlyties modulis 502,8 kPa). Naudojant 10 % atnaujinančios medžiagos, esant 2 °C temperatūrai, nustatytas 19987,0 kPa kompleksinis šlyties modulis, o naudojant 14 %, esant 2–26 °C, šlyties modulis kinta nuo 1811,1 iki 453,4 kPa. Taigi šie moduliai yra mažesni už referencinius, esant atitinkamoms temperatūros sąlygoms. Nustatyta, kad bandinių su 14 % aromatinės alyvos kompleksinio šlyties modulio vertės yra artimiausios referenciniam bitumui.
9. Pagal eksperimentinio tyrimo rezultatus patikslintas teorinis kelių bitumo atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimo algoritmas. Algoritmas pagrįstas funkcinėmis savybėmis ir apima optimalaus atnaujinančios medžiagos kiekio nustatymą atliekant kompleksinio šlyties modulio bandymą tiesiškai tamptariai klampaus būvio ribose (0,7 % deformacija) esant 44 °C temperatūrai. Nustatytam kompleksiniam šlyties moduliui patenkant į ribas (120,26–1196,70 kPa) optimalus polimerais modifikuoto bitumo atnaujinimui reikalingas medžiagos kiekis (8–14 %) apskaičiuojamas nustatyta priklausomybe. Kompleksinio šlyties modulio vertėms nepatenkant į

nustatytas ribas, turi būti atliekami papildomi dinaminio šlyties modulio bandymai. Keičiamas atnaujinančių medžiagų kiekis, kad šlyties modulio rezultatas patektų į siekiamas ribas (26,57–47,0 kPa).

10. Taikant funkcinėmis savybėmis pagrįstą metodą sunaudojamas žymiai mažesnis bitumo kiekis, bandymų trukmė skiriasi beveik 4 kartus. Didesnis bitumo kiekis reikalauja didesnių resursų, būtinų bandymų įrangai ir matavimo priemonėms po bandymo išvalyti. Visais atvejais funkcinų savybių įvertinimas leidžia gautus duomenis panaudoti dangos konstrukcijos sluoksnių empirinei analizei.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Ahmed, R. B., & Hossain, K. (2020). Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 230, 116985. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116985>
- Airey, G. D. (2003). State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165–176. <https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- Airey, G., Rahimzadeh, B., & Collop, A. (2003). Linear Viscoelastic Performance of Asphaltic Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 4(3), 269–292. <https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689949>
- Ameri, M., Mansourkhaki, A., & Daryaei, D. (2018). Evaluation of fatigue behavior of high reclaimed asphalt binder mixes modified with rejuvenator and softer bitumen. *Construction and Building Materials*, 191, 702–712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.182>
- Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E., & Button, J. (1994). Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC*.
- Ashok, Gupta, T., & Ravi, S. K. (2012). Performance of Polymer Modified Bitumen for Flexible Pavement. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 1(1), 1–10.
- Asphalt Institute. (2016). *The Use of REOB / VTAE in Asphalt: State of the Knowledge*. Lexington, Kentucky.
- Babadopulos, L., Orozco, G., Mangiafico, S., Sauzéat, C., & Di Benedetto, H. (2019). Influence of loading amplitude on viscoelastic properties of bitumen, mastic and bituminous mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup2), S780–S796. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1628428>
- Barborak, R. (2018). *Impacts of mix rejuvenators on performance*.
- Bouldin, M. G., Collins, J. H., & Berker, A. (1991). Rheology and microstructure of polymer/asphalt blends. *Rubber Chemistry and Technology*, 64(4), 577–600. <https://doi.org/10.5254/1.3538574>
- Boutin, G., & Lupien, C. (2000). Thermal cracking of asphalt pavement. In *Eurasphalt and Eurobitume Congress, 2nd, 2000, Barcelona, Spain*.
- Brownridge, J. (2010, April). The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation: use and need for asphalt rejuvenation. In *First 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>
- Cortizo, M. S., Larsen, D. O., Bianchetto, H., & Alessandrini, J. L. (2004). Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts. *Polymer Degradation and Stability*, 86(2), 275-282. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.006>
- De Bock, Luck, Pierard, Nathalie, Vansteenkiste, Stefan, Vanelstraete, A. (2020). *Categorisation and analysis of rejuvenators for asphalt recycling*.
- Dickinson, E. J., & Witt, H. P. (1974). The dynamic shear modulus of paving asphalts as a function of frequency. *Transactions of the Society of Rheology*, 18(4), 591-606. <https://doi.org/10.1122/1.549349>
- Durante, M. (2020). Asphalt road bio-based rejuvenators - functionality review. *Pavement Technology*. <https://www.pavetechinc.com/bio-based-rejuvenators-a-review-of-functionality/>
- Elkashaf, M. E. (2017). Using soybean-derived materials to rejuvenate reclaimed asphalt pavement (RAP) binders and mixtures. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-5131>
- Epps, J. A., Little, D. N., Holmgren, R. J., & Terrel, R. L. (1980). Guidelines for recycling pavement materials. *NCHRP Report*, (224).
- European Asphalt Pavement Association. (2018). *Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production*.
- Fecarotti, C., Celauro, C., & Pirrotta, A. (2012). Linear VISCOELastic (LVE) behaviour of pure bitumen via fractional model. *Procedia-social and Behavioral Sciences*, 53, 450-461. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.896>
- Filippi, S., Cappello, M., Merce, M., & Polacco, G. (2018). Effect of nanoadditives on bitumen aging resistance: a critical review. *Journal of Nanomaterials*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2469307>
- Forton, A., Di Benedetto, H., Mangiafico, S., Sauzéat, C., & Marc, P. (2019). Rheological properties of fresh and RAP bitumen blends with or without regenerating agent. *Bituminous Mixtures and Pavements VII*, 13–19. <https://doi.org/10.1201/9781351063265-2>
- Ganter, D., Mielke, T., Maier, M., & Lupascu, D. C. (2019). Bitumen rheology and the impact of rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 222, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.177>
- Gao, Y., Gu, F., & Zhao, Y. (2013). Thermal oxidative aging characterization of SBS modified asphalt.

- Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 28(1), 88–91.
<https://doi.org/10.1007/s11595-013-0646-0>
- Girdler, R. (1965). Constitution of asphaltenes and related studies. In *Assoc Asphalt Paving Technol Proc*, 45–79.
- Goodrich, J. L. (1988). Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphalt concrete mixes (with discussion). In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 57).
- Pink, H. S., Merz, R. E., & Bosniack, D. S. (1980). Asphalt rheology: experimental determination of dynamic moduli at low temperature. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (Vol. 49).
- Hofko, B., Handle, F., Eberhardsteiner, L., Hospodka, M., Blab, R., Füssl, J., & Grothe, H. (2015). Alternative approach toward the aging of asphalt binder. *Transportation Research Record*, 2505(1), 24-31. <https://doi.org/10.3141/2505-04>
- Hong, W., Mo, L., Pan, C., Riara, M., Wei, M., & Zhang, J. (2020). Investigation of rejuvenation and modification of aged asphalt binders by using aromatic oil-SBS polymer blend. *Construction and Building Materials*, 231, 117154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117154>
- 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>
- Jacobson, T., Hornwall, F. (1999). Study of Polymer Modified Binders in Skeleton Asphalt and Dense Asphalt Concrete. *VTI Notat* 79.
- Kristinavičiūtė, J. (2010). *Bitumo kiekio įtakos asfalto kokybės rodikliams ir bitumo savybių tyrimai* (Doctoral dissertation, Vilnius Gediminas Technical University).
- Joni, H. H., Al-Rubae, R. H. A., & Al-zerkani, M. A. (2019). Rejuvenation of aged asphalt binder extracted from reclaimed asphalt pavement using waste vegetable and engine oils. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00279. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00279>
- Karlsson, R., & Isacsson, 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))
- Kennedy, T. W., Cominsky, R. J., Harrigan, E. T., & Leahy, R. B. (1990). Hypotheses and models employed in the SHRP asphalt research program. *Strategic Highway Research Program*, Washington DC.
- Koudelka, T., Porot, L., Coufalik, P., & Varaus, M. (2018). The use of rejuvenators as an effective way

to restore aged binder properties.

- Larsen, D. O., Alessandrini, J. L., Bosch, A., & Cortizo, M. S. (2009). Micro-structural and rheological characteristics of SBS-asphalt blends during their manufacturing. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2769–2774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.008>
- Lesueur, D., Teixeira, A., Lázaro, M. M., Andaluz, D., & Ruiz, A. (2016). A simple test method in order to assess the effect of mineral fillers on bitumen ageing. *Construction and Building Materials*, 117, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.003>
- Li, X., Sun, W., Wu, G., He, L., Li, H., & Sui, H. (2011). Ionic liquid enhanced solvent extraction for bitumen recovery from oil sands. *Energy & fuels*, 25(11), 5224-5231. <https://doi.org/10.1021/ef2010942>
- Lietuvos Respublikos Vyriausybė. (2021). *Dėl kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšų naudojimo 2021 metų sąmatos patvirtinimo*.
- Lin, P. S., Wu, T. L., Chang, C. W., & Chou, B. Y. (2011). Effects of recycling agents on aged asphalt binders and reclaimed asphalt concrete. *Materials and structures*, 44(5), 911-921. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9675-8>
- Little, D.N., Holmgreen, R., Epps, J. (1981). Effect of ras on the structural performance of recycled asphalt concrete materials. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 50, 32–63.
- Liu, X., Wu, S., Liu, G., & Li, L. (2015). Effect of ultraviolet aging on rheology and chemistry of LDH-modified bitumen. *Materials*, 8(8), 5238-5249.
- Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., & Oliviero Rossi, C. (2019). A review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives. *Applied Sciences*, 9(20), 4316. <https://doi.org/10.3390/app9204316>
- LST EN 1259:2009. (2009). *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai*.
- LST EN 12697-1:2020. (2020). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 1 dalis. Tirpiojo rišiklio kiekis*.
- LST EN 12697-2:2015. (2015). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 2 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas*.
- LST EN 12697-28:2020. (2020). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 28 dalis. Ėminių paruošimas rišiklio kiekiui, vandens kiekiui ir granulimetrinei sudėčiai nustatyti*.
- LST EN 14023:2010. (2010). *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų sistema*.
- LST EN 1426:2015. (2015). *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Adatos penetracijos nustatymas*.
- LST EN 1427:2015. (2015). *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas*.

- LST EN 14770:2012. (2012). *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR)*.
- Lu, X., Soenen, H., & Laukkanen, O. V. (2017). Aging of bituminous binders in asphalt pavements and laboratory tests. In *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields* (pp. 273-280). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315100333-40>
- Lu, X., & Isacsson, U. (1997). Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 11(1), 23–32. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(96)00033-5)
- Lu, Xiaohu, & Isacsson, U. (1997). Influence of styrene-butadiene-styrene polymer modification on bitumen viscosity. *Fuel*, 76(14–15), 1353–1359. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00144-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00144-0)
- Lucena, M. da C. C., Soares, S. de A., & Soares, J. B. (2004). Characterization and thermal behavior of polymer-modified asphalt. *Materials Research*, 7(4), 529–534. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000400004>
- Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltunen, D., & Stoffels, S. M. (1993). *Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes. SHRP-A-357*. 552.
- Mansourkhaki, A., Ameri, M., & Daryaei, D. (2019). Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 203, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.086>
- Marasteanu, M. O., & Anderson, D. A. (2000). Establishing Linear Viscoelastic Conditions for Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, 1728(1), 1–6. <https://doi.org/10.3141/1728-01>
- Martin, A. E., Kaseer, F., Arambula-Mercado, E., Bajaj, A., Cucalon, L. G., Yin, F., ... & King, G. (2019). Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios. *NCHRP Research Report*, (927).
- Matolia, S., Guduru, G., Gottumukkala, B., & Kuna, K. K. (2020). An investigation into the influence of aging and rejuvenation on surface free energy components and chemical composition of bitumen. *Construction and Building Materials*, 245, 118378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118378>
- Mazzoni, G., Bocci, E., & Canestrari, F. (2018a). Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.01.001>
- Mazzoni, G., Bocci, E., & Canestrari, F. (2018b). Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot

- recycled asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.01.001>
- 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(sup2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812836>
- Mubaraki, M., Ali, S. I. A., Ismail, A., & Yusoff, N. I. M. (2016). Rheological evaluation of asphalt cements modified with ASA polymer and Al₂O₃ nanoparticles. *Procedia engineering*, 143, 1276–1284.
- Nciri, N., Shin, T., Kim, N., Caron, A., Ismail, H. Ben, & Cho, N. (2020). Towards the use of waste pig fat as a novel potential bio-based rejuvenator for recycled asphalt pavement. *Materials*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/ma13041002>
- Oluwasanu, A. A., Oluwaseun, F. A. P. O. H. U. N. D. A., Teslim, J. A., Isaiah, T. T., Olalekan, I. A., & Chris, O. A. (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>
- Paliukaitė, M. (2014). *Bitumo savybių kitimo įtaka asfalto dangos funkcionavimui* [daktaro disertacija]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Petersen, J. C. (2009). A review of the fundamentals of asphalt oxidation. *Transportation Research Circular*, 1–78.
- Petersen, J. C., & Harnsberger, P. M. (1998). Asphalt aging: dual oxidation mechanism and its interrelationships with asphalt composition and oxidative age hardening. *Transportation Research Record*, 1638(1), 47–55.
- 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.). London: 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 edition.
- Rodriguez, F., Cohen, C., Ober, C. K., & Archer, L. (2014). *Principles of polymer systems*. CRC Press.

- 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>
- Russell, M., Uhlmeier, J. S., DeVol, J., Johnson, C., & Weston, J. (2010). *Evaluation of hot in-place recycle* (No. WA-RD 738.1). Washington (State). Dept. of Transportation. <http://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/738.1.pdf>
- Sakalauskas, K. A., Stankus, E. A., & Rokas, S. J. (1983). *Asfaltbetonio mišinių gaminimo technologinio proceso tikslumo ir stabilumo tyrimas* [Mokslinio tiriamojo darbo ataskaita]. Vilnius.
- Šernas, O. (2018). Panaudotų padangų gumos įtaka asfalto dangos atsparumui provėžoms ir plyšiams [daktaro disertacija]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Shen, J., Amirkhanian, S., & Lee, S. J. (2005). The effects of rejuvenating agents on recycled aged CRM binders. *The International Journal of Pavement Engineering*, 6(4), 273-279. <https://doi.org/10.1080/10298430500439319>
- Tabatabaee, H. A., & Kurth, T. L. (2017). Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 18, 131–140. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1304257>
- Tran, N., Xie, Z., Julian, G., Taylor, A., Willis, R., Robbins, M., & Buchanan, S. (2017). Effect of a Recycling Agent on the Performance of High-RAP and High-RAS Mixtures: Field and Lab Experiments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(1), 04016178. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001697](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001697)
- Traxler, R. N. (1963). Durability of Asphalt Cement. *Association of Asphalt Paving Technologist*, 32: 44-58.
- Vallerga, B. A. (1963). Emulsified petroleum oils and resins in reconstituting asphalts in pavements. *Highway Research Record*, (24).
- VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2021). Valstybinės reikšmės keliai. <https://lakd.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/lietuvos-keliai/valstybines-reiksmes-keliai>
- VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2010). *Dėl automobilių kelių asfalto dangų priežiūrai skirtų medžiagų ir medžiagų mišinių panaudojimo ir jų sluoksnių įrengimo taisyklių ĮT APM 10 patvirtinimo*. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.376213>
- Wang, D., Koziel, M., Falchetto, A. C., Riccardi, C., Hugener, M., Porot, L., ... & Wistuba, M. P. (2020). Experimental Investigation on the Effect of Rejuvenator on the Use of a High Amount of Recycled Asphalt Binder. In *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and*

Rehabilitation of Pavements (pp. 321-330). Springer, Cham.

- Wang, Y., Sun, L., & Qin, Y. (2015). Aging mechanism of SBS modified asphalt based on chemical reaction kinetics. *Construction and Building Materials*, 91, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.014>
- Wei, H., Bai, X., Qian, G., Wang, F., Li, Z., & Jin, J. (2019). *Aging Mechanism and Properties of SBS Modified*.
- Wu, S., Pang, L., Mo, L., Chen, Y., & Zhu, G. (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1005–1010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.004>
- www.nynas.com. (n.d.). No Title.
- Xie, Z., Tran, N., Julian, G., Taylor, A., & Blackburn, L. D. (2017). Performance of asphalt mixtures with high recycled contents using rejuvenators and warm-mix additive: field and lab experiments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017190.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S. W., Mills-Beale, J., & Wingard, D. (2012). Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay. *Construction and Building Materials*, 35, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.056>
- Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2013). Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2370(1), 17–25. <https://doi.org/10.3141/2370-03>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, 69, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035>
- 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>
- Zhang, J., Sun, C., Li, P., Jiang, H., Liang, M., Yao, Z., ...& Airey, G. (2020a). Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. *Construction and Building Materials*, 239, 117755.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>

Zhang, J., Sun, C., Li, P., Jiang, H., Liang, M., Yao, Z., ... & Airey, G. (2020b). Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. *Construction and Building Materials*, 239, 117755.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>

Zhang, J., Sun, H., Jiang, H., Xu, X., Liang, M., Hou, Y., & Yao, Z. (2019). Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 215, 660–669.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.202>

Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18–38.

<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>

A PRIEDAS

ATNAUJINANČIŲ MEDŽIAGŲ POVEIKIS PASENDINTO POLIMERU MODIFIKUOTO KELIŲ BITUMO PENETRACIJAI IR MINKŠTĖJIMO TEMPERATŪRAI

Audrius Vaitkus, Indrė Palionytė, Rita Kleizienė

*Kelių katedra, Aplinkos inžinerijos fakultetas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, Lietuva*

E-paštas: audrius.vaitkus@vilniustech.lt, indre.palionyte@stud.vgtu.lt, rita.kleiziene@vilniustech.lt

Santrauka. Straipsnyje aprašomas polimeru modifikuoto kelių bitumo regeneravimo dviejų rūšių atnaujinančiomis medžiagomis efektyvumas. Pasirinktos dvi alternatyvios atnaujinančios 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 atnaujinančios medžiagos kiekį eksperimentai atlikti su 8 %, 10 % ir 14 % atnaujinančios medžiagos nuo bitumo masės. Atnaujinančių 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 minkštas bitumas.

Raktiniai žodžiai: Asfalto mišinys, atnaujinančios medžiagos, bitumas, fizikinės savybės, Nygen 910, regeneravimas, V12000

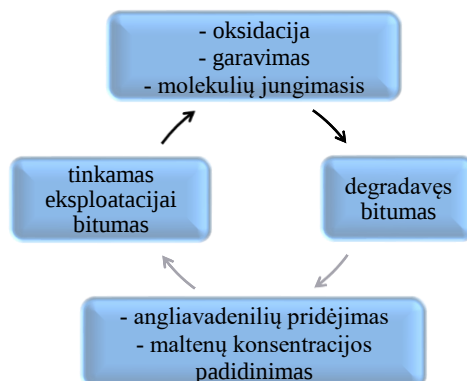
Įvadas

Lietuvoje yra 15 418,056 km valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga (LAKD, 2021). Šiomis dienomis viena iš sunkiausių problemų, su kuria susiduria miestų ir kelių inžinieriai, yra asfalto eksploatacinių savybių praradimas, kurios sudaro didelę dalį išlaidų. 2021 metų Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimu kelių priežiūros ir plėtros programa 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 cm asfalto dangos 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 atnaujinančių medžiagų poveikį polimeru modifikuoto kelių bitumo savybių pokyčiui. Tyrimo objektas – polimeru modifikuoto kelių bitumo savybių atstatymas panaudojant atnaujinančias 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 eksploataciniu metu. Bitumą eksploataciniu 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 prie nustatytos temperatūros. Tuo metu temperatūra yra aukščiausia ir bitumo plėvelė yra ploniausia. Lengviausios 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, J.; Whiteoak 2003, J.C. Petersen, 1984). Bitumo komponentinę sudėtį galima išskirti į dvi plačias grupes: maltenus ir asfaltenus (Read, J.; Whiteoak, 2003). Maltenai suteikia takumo ir plastiškumo, o asfaltenas 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 eksploatacinio laikotarpio metu. Pirmasis senėjimo apibūdinimas yra pateikiamas atsižvelgiant į bendrą procesą (*angl. mechanism*), kai dalis malteno virsta asfalteno faze, todėl asfaltenų 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 benziną ir žibalas. Asfaltenų junginiai yra kitas pirminis asfalto komponentas (Brownridge, 2010). Šio proceso metu dėl stipresnės poliarinės ir polinės sąveikos tarp asfaltenų didėja klampumas ir mažėja elastingumas (Loise et al., 2019). Kai asfalteno molekulės nėra pakankamai

judrios, kad veikiamos apkrovos galėtų prasilenkti, bituminio rišiklio atsparumas įtrūkimams mažėja (J. Claine Petersen, 1984). Tačiau senėjimas remiantis Loise ir kt. (2019), yra sudėtingesnis ciklas, apimantis skirtingus procesus, paprastai vykstančius skirtingais laiko tarpais. Ilgalais senėjimas remiantis Brown, Kandhal, Kennedy, Lee & Roberts, (1996) yra skirtingų procesų padarinys (žr. 1 pav.):



1 pav. Bitumo degradavimo ir atnaujinimo procesas

Remiantis Adeola Adedapo Oluwasanu ir kt. (2019) vienas didžiausių iššūkių naftos ir dujų produktų atkūrimas iš netradicinių išteklių, tokių kaip sunkioji nafta, skalūnų dujos ir skysčiai, suspaustos dujos, anglies sluoksnio metanas ir bituminiai angliavandeniliai dėl fizikinių, cheminių bei geologinių jų savybių. Atnaujinanti medžiaga apibrėžiama, kaip medžiaga galinti atkurti pirmines bitumo reologines savybes. Todėl daroma prielaida, kad pagrindinis atnaujinančios medžiagos poveikis turėtų būti mažesnis standumas ir didesnis elastingumas. Pirmasis žingsnis siekiant atkurti pirmines bitumo reologines savybes yra grąžinti santykį tarp asfaltėnų ir maltenų (Durante, 2020). Išskiriamos dvi rūšys atnaujinančių medžiagų biologiniai bei pagaminti naftos pagrindu. Biologinės atnaujinančios medžiagos neturi maltenų, o cheminė reakcija tarp biologinių produktų ir asfalto sustiprina maltenų ir asfaltėnų atsiskyrimą, kuris jau vyksta dėl senstančios asfalto dangos oksidacijos. Biologinės atnaujinančios medžiagos tiesiog sukelia jau išeikvotų maltenų, likusių sendintame asfalto rišiklyje, tirpinimo procesą, o ne papildo juos tikra atstatomąja chemija. O pagamintos naftos pagrindu atnaujinančios medžiagos gali atkurti tinkamą cheminę pusiausvyrą tarp molekulinį komponentų, nes juose yra maltenų. Pagal Karlsson ir Isacsson (2006) atnaujinančios medžiagos turėtų atstatyti panaudoto rišiklio savybes iki tinkamų statybai ir kelio dangos charakteristikoms, bei tuo pačiu metu gerinti chemines savybes atsižvelgiant į patvarumą. Atnaujintojas taip pat turi suteikti pakankamai papildomos rišamosios medžiagos pagerinant, bet kuri naują užpildą, pridėtą į panaudotą mišinį, ir atitikti mišinio konstrukcijos reikalavimus. Be to, atnaujinančios medžiagos turėtų lengvai išsiskirstyti sename rišiklyje tolygiai nuo maišymo iki maišymo ir būti patogus naudojimui. Tačiau kiekviena atnaujinamoji medžiaga gali veikti skirtinguose procesuose.

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

Atnaujinančios medžiagos kiekio parinkimas yra esminis žingsnis siekiant efektyviai atkurti sendinto bitumo savybes. Jei priedo kiekis bus per mažas, atkurti bitumo savybes gali nepavykti, o jei per didelis, bitumas tampa per minkštas ir padidina provėžų atsiradimo tikimybę. Todėl labai svarbu nustatyti optimalų atnaujinančios medžiagos kiekį, kad pasiekti reikalingas bitumo savybių charakteristikas (Pradhan & Sahoo, 2019). Siekiant nustatyti atnaujinančios medžiagos kiekį, kad pasiekti atitinkamas reikšmes (penetracijos indeksą, klampumo laipsnį, eksploatacinį laipsnį) taikomi įvairūs kriterijai, tokie kaip klampumas aukštoje temperatūroje (Romera et al., 2006; Zaumanis, Mallick, Poulikakos, & Frank, 2014), eksploatacinės savybės (Im, Zhou, Lee, & Scullion, 2014; Mogawer, Booshehrian, Vahidi, & Austerman, 2013), o Shen, Amirkhanian, & Lee, (2005) ir Chen, Leng, Wu, & Sang, (2014) atliko tyrimus naudodami fizikines ir reologines atnaujintų ir pirminių bitumų savybes, kad nuspręstų, koks priedo kiekis yra efektyvus.

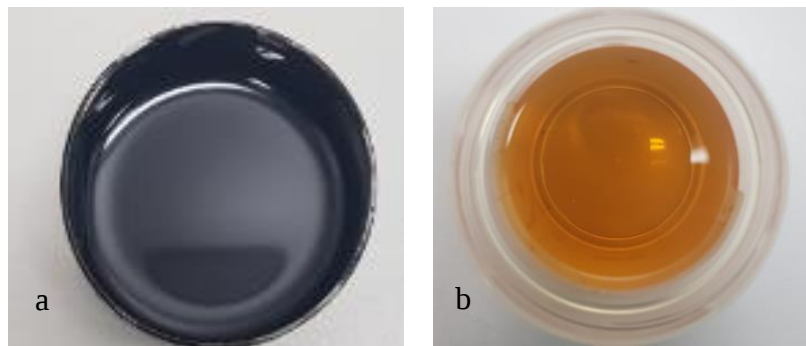
Didžioji dalis tyrimų susijusių su bitumo atnaujinimu atliekami nemodifikuotam bitumui. Trūksta tyrimų ir informacijos apie polimerais modifikuoto bitumo atnaujinimo procesus, todėl šiuo tyrimu siekiama nustatyti polimerais modifikuoto bitumo atnaujinimo efektyvumą. Oksidacijos procesų paveikto naudoto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

2. Tyrimo objektas ir metodai

Bandymai atlikti su PMB 45/80-55 bitumu, kurio reglamentuojamos charakteristikos pateikiamos 1 lentelėje. Bitumo atnaujinimui naudotos dvi medžiagos: minkštasis bitumas V12000 ir aromatinė alyva Nygen 910 (žr. 2 pav.). Bitumo ir atnaujinančios medžiagos maišymui 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 atnaujinančios medžiagos: 8 %, 10 %, 14 %.

1 lentelė. Bitumo charakteristikos (LST EN 12591 2009)

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



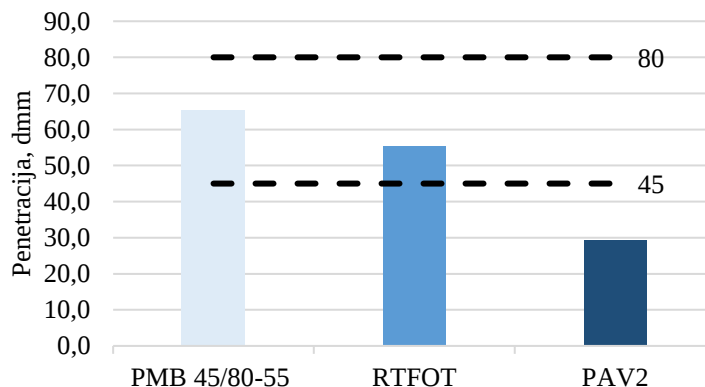
2 pav. Naudotos bitumą atnaujinančios medžiagos a) minkštasis bitumas V12000, b) aromatinė alyva Nygen 910

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) pagreitintas ilgalaikis sendinimas (LST EN 14769:2012 1 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitintas 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

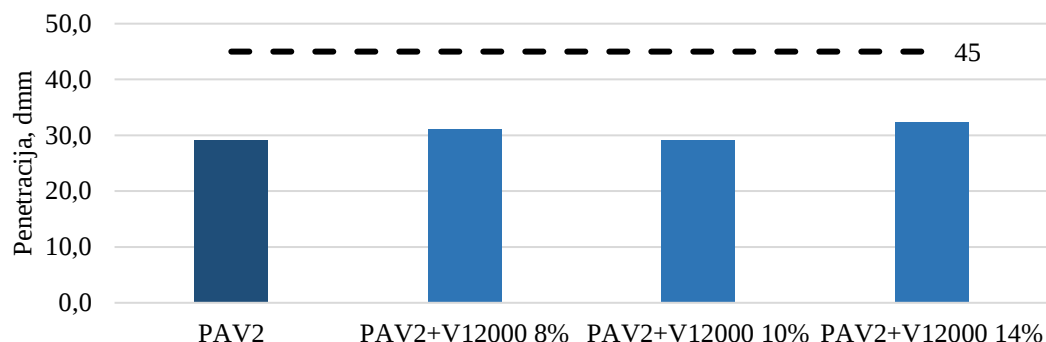
3.1. Penetracijos rezultatai

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



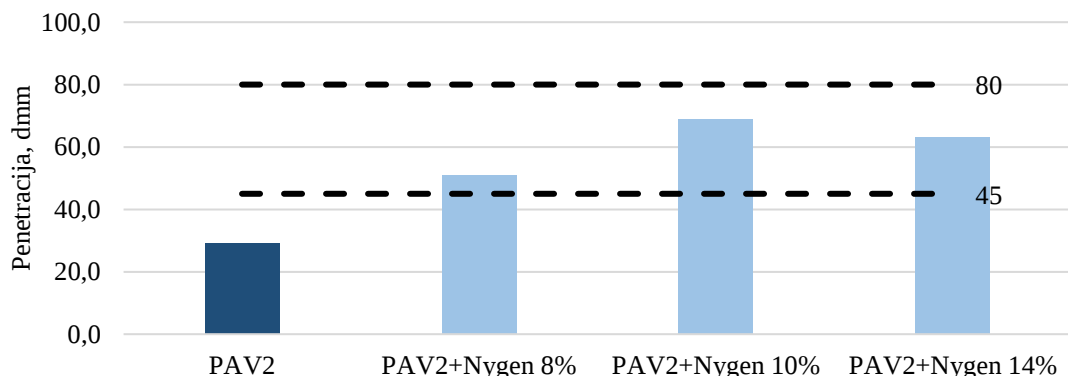
3 pav. Pirminio, po RTFOT ir PAV2 bandinių penetracijos rezultatai (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal LST EN 14023)

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



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

Visų bandinių su Nygen 910 penetracijos rezultatai (žr. 5 pav.) patenka į reglamentuojamų rezultatų ribas. Bandinio su 8 % atnaujinančios 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 % atnaujinančios medžiagos vertė padidėjo 1,7 karto, su 10 % – 2,4 karto, su 14 % – 2,2 karto. Didžiausia penetracijos reikšmė nustatyta su 10 % Nygen 910, vienintelio šio bandinio penetracijos rezultatas nustatytas didesnis nei pradinio bitumo.

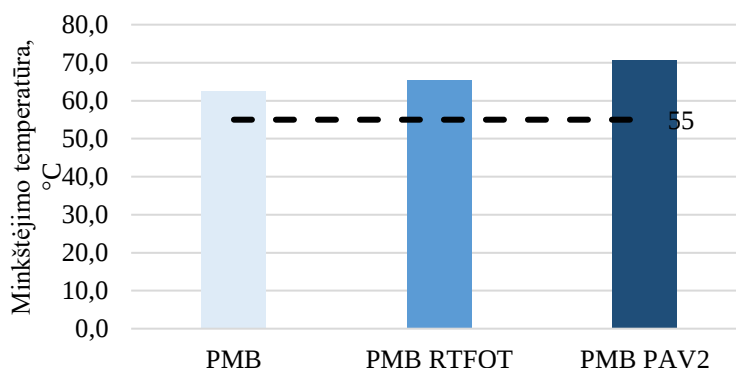


5 pav. Bandinių su Nygen penetracijos reikšmių pasiskirstymas (horizontalios punktyrinės linijos rodo reikalavimų ribas pagal LST EN 14023)

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

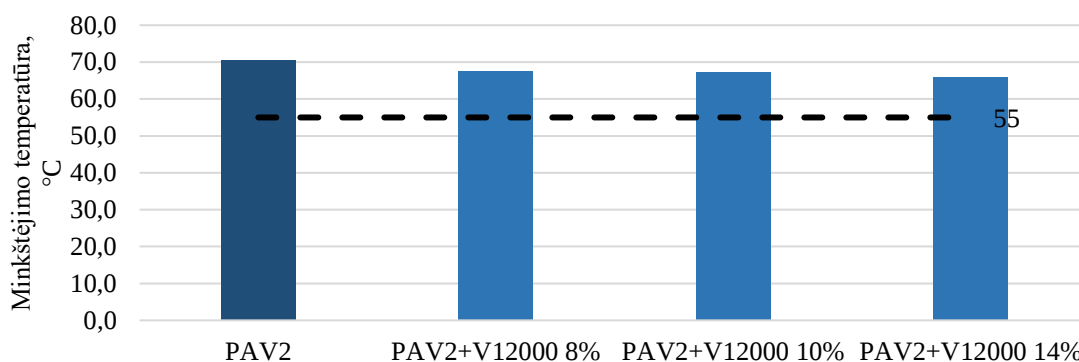
3.2. Minkštėjimo temperatūros rezultatai

Analizuojant pirminio ir pasendintų bandinių minkštėjimo temperatūrą (žr. 6 pav.) 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 %.



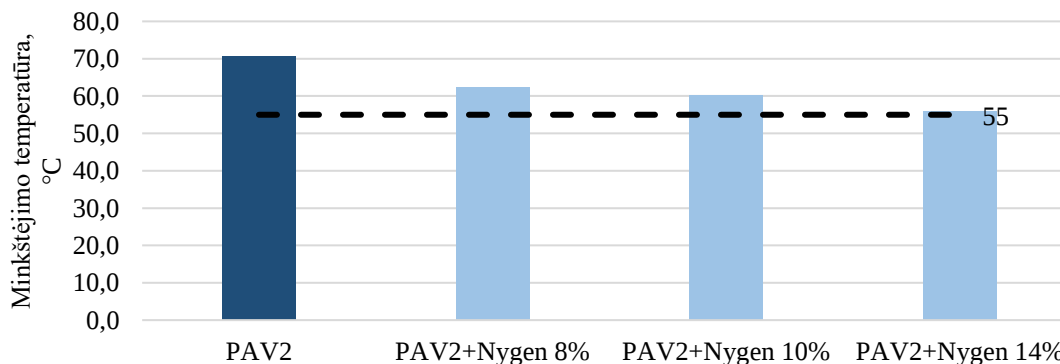
6 pav. Pirminio, po RTFOT ir PAV2 bandinių minkstėjimo temperatūros rezultatai (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal LST EN 14023)

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



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

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



8 pav. Bandinių su Vygen minkstėjimo temperatūros pasiskirstymas (horizontali punktyrinė linija rodo minimalaus reikalavimo ribą pagal LST EN 14023)

4. 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 asfaltenų kiekis didėja, o maltenų sumažėja.
2. Siekiant iki pradinių regeneruoti bitumo fizikines ir mechanines savybes būtina nustatyti faktines pasenusio bitumo savybes ir parinkti tinkamą atnaujinančios medžiagos kiekį. Atnaujinančios medžiagos kiekis visai atvejais priklauso nuo pasenusio bitumo faktinių ir regeneruoto bitumo siektinųjų savybių.
3. Atlikus trumpalaikį bitumo sendinimą minkštėjimo temperatūra padidėjo nuo 62,5 °C iki 65,3 °C, atlikus pagreintą 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 % atnaujinančios 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 atnauja 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 atnaujinančios medžiagos: minkštasis kelių bitumas ir aromatinė alyva. Su visais minkštojo kelių bitumo kiekiais penetracijos ir minkštėjimo temperatūros rezultatai neatsistatė iki pradinių reikšmių. Aromatinės alyvos optimalus kiekis nustatytas 10 %, kai pasiekiamos pirminės penetracijos ir minkštėjimo temperatūros reikšmės.

Literatūra

- ADEOLA, A. O., FAPOHUNDA, O., JIMOH, A. T., TOLUWALOJU, T. I., IGE, A. O., & OGUNYELE, 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. *1st Int Conf on Pavement Preservation*, 351–364.
- 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*. Retrieved from <https://www.pavetechinc.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>
- Lietuvos automobilių kelių direkcija prie susisiekimo ministerija. (2021). Valstybinės reikšmės keliai. Retrieved from <https://lakd.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/lietuvos-keliai/valstybines-reiksmes-keliai>
- Lietuvos Respublikos Vyriausybė. *Kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšų naudojimo 2021 metų sąmata*. , (2021).
- 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 (Switzerland)*, 9(20), 1–44. <https://doi.org/10.3390/app9204316>
- LST EN 1259:2009. (2009). Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai [Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens]. *Lietuvos Standartizacijos Departamentas*.
- LST EN 14023:2010. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų sistema*. , (2010).
- 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(sup2), 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 art. *Transportation Research Board*, 13–30.
- Petersen, J. Claine. (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.). London: 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. SECOND EDITION. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 57.
- 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., Amirkhanian, 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>