

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ovidijus ŠERNAS

PANAUDOTŲ PADANGŲ GUMOS ĮTAKA
ASFALTO DANGOS ATSPARUMUI
PROVĖŽOMS IR PLYŠIAMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2018

Disertacija rengta 2013–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Donatas ČYGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Virgaudas PUODŽIUKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

doc. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

dr. Viktors HARITONOVŠ (Rygos technikos universitetas, Latvija, statybos inžinerija – 02T),

doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. kovo 22 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2018 m. vasario 21 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-006-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-094-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018

© Ovidijus Šernas, 2018

ovidijus.sernas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ovidijus ŠERNAS

THE EFFECT OF CRUMB RUBBER ON
ASPHALT PAVEMENT RESISTANCE TO
RUTTING AND THERMAL CRACKING

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2013–2018.

Supervisor

Prof. Dr Donatas ČYGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Virgaudas PUODŽIUKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Members:

Assoc. Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Dr Viktors HARITONOVŠ (Riga Technical University, Latvia, Civil Engineering – 02T),

Assoc. Prof. Dr Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 22 March 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 21 February 2018.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziუმэ

Siekiant užtikrinti tvarų ir ilgalaikį asfalto dangos funkcionavimą, būtina naudoti aukščiausios kokybės mineralines medžiagas ir modifikuotą bitumą. Įprastai Lietuvoje bitumas modifikuojamas naudojant polimerus, kurie yra brangūs. Panaudotų padangų gumos sudėtyje yra daugiau kaip 50 % polimerų, todėl nekyla abejonų, kad panaudotų padangų guma gali būti tinkama kelių bitumo modifikavimui. Tačiau būtina nustatyti tinkamas kelių bitumo modifikavimo sąlygas, kurios užtikrintų tvarų ir ilgalaikį įrengtų asfalto dangų funkcionavimą.

Disertacijos tikslas – nustatyti ir moksliskai pagrįsti kelių bitumo modifikavimui pakankamus panaudotų padangų gumos kiekius užtikrinant kelio dangos atsparumą provėžų bei plyšių susidarymui. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas, santrauka anglų kalba ir aštuoni priedai. Įvade formuluojama problema, aprašomas darbo aktualumas, tyrimų objektas, pateikiamas darbo tikslas ir uždaviniai, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė, pateikiama darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai bei darbo struktūra. Pirmame skyriuje apžvelgta mokslinė literatūra. Atlikta asfalto mišinio komponentų įtakos kelio dangos funkcionavimui analizė, panaudotų padangų gumos paruošimo technologijų analizė, bitumo modifikavimui modifikavimo technologijų analizė, išnagrinėti moksliniai tyrimai kelių bitumo ir asfalto mišinių modifikavimo panaudotų padangų guma tematika. Siekiant nustatyti ir moksliskai pagrįsti kelių bitumo modifikavimui pakankamus panaudotų padangų gumos kiekius užtikrinant atsparumą provėžoms bei plyšiams, atliktas eksperimentinis tyrimas, aprašytas antrame skyriuje. Skyriuje analizuojama gumos kiekio įtaka bitumo savybėms aukštoje bei žemoje temperatūroje. Įvertinta modifikuoto bitumo valkšnioji atstata. Aprašytas eksperimentinio tyrimo objektas, tyrimo metodika, naudotos medžiagų savybės. Pateikta modifikuoto bitumo fizinių ir mechaninių savybių nustatymo rezultatų analizė. Trečiame skyriuje atliktas modifikuoto bitumo eksploatacinių savybių vertinimas pagal Superpave (PG) sistemą, nustatytas asfalto mišinio su guma modifikuotu bitumu atsparumas provėžoms, atliktas bitumo ir asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės vertinimas, bitumo modifikavimo guma ekonominio efekto skaičiavimas, racionaliausio bitumo modifikavimo panaudojant gumą varianto parinkimas taikant daugiakriterį SAW metodą.

Disertacijos tema yra atspausdinti 14 mokslinių straipsnių: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, du – recenzuojamame mokslo žurnale, penki – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics* duomenų bazėje Proceedings, keturi – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų leidiniuose.

Abstract

To ensure sustainable and long-term asphalt pavement performance, it is necessary to use the highest quality materials and modified bitumen. Usually in Lithuania expensive polymers are used for bitumen modification. Because of fact, that crumb rubber composition contains more than 50% polymers, there is no doubts about crumb rubber can be used for bitumen modification. However, it is necessary to comprehensively test and determine bitumen modification conditions and characteristics of modified bitumen, which would ensure sustainable and long-term road pavement performance.

The aim of the dissertation is to determine and scientifically justify sufficient amount of crumb rubber fo bitumen modification to ensure long-term road pavement rutting resistance and low temperature impact. The dissertation consist of introduction, three chapers, general conclusions, recommendations, the list of references, the list of author's publications on the topic of the dissertation, summary in English and eight annexes. Introduction describes the studied problem, topicality of the work and the object of research, the formulated aim and tasks, reseach methodology, scientific novelty, practical value of results, the defendend propositions and the scope of the scientific work. Chapter 1 contains a review of research works, gives the analysis of the influence of asphalt mixture components on road pavement performance, technologies and materials of bitumen modification, technologies of crumb rubber preparation, experience of bitumen and asphalt mixture modification using crumb rubber. Chapter 2 describes experimental research of sufficient crumb rubber amount for bitumen modification. The chapter gives the analysis of the effect of crumb rubber amount on bitumen physical and mechanical properties at high and low temperature. The chapter presents the object of experimental research, also plan, equipment used in the experiment and methodology. Moreover, evaluated crumb rubber modified bitumen multiple stress creep recovery. Chapter 3 presents evaluation of modified bitumen properties according to Superpave (PG) system, gives results and analysis of the crumb rubber and polymer modified bitumen and asphalt mixtures with these bitumens rutting resistance. Relationship between bitumen and asphalt mixture rutting resistance paremeters was carried out. Economical effect of bitumen modification using crumb rubber was calculated. Moreover, the most rational bitumen modification conditions were determined by multi-criteria SAW method.

On the topic of the dissertation, 14 scientific articles were published: three – in scientific journals included in the *Clarivate Analytics Web of Science*, two – in reviewed scientific journals, five – in the *Clarivate Analytics Proceedings* data base publications, four – in the scientific conferences material.

Sąvokos

Asfalto mišinys (angl. *Asphalt Mixture*) – bituminis mišinys, susidedantis iš mikroužpildo, smulkiosios bei stambiosios mineralinės medžiagos ir bituminio rišiklio. Prireikus gali būti dedama priedų.

Atsparumas provėžoms (angl. *Rutting Resistance*) – atsparumas liekamųjų deformacijų susidarymui asfalto dangoje veikiant sunkiojo transporto apkrovoms karštuoju metų laikotarpiu.

Bitumas (angl. *Bitumen*) – klampi arba pusiau kieta, nelaki, rišioji, nelaidi vandeniui organinė medžiaga, gaunama perdirbant natūralią naftą arba išgaunant natūraliuoju būdu.

Dinaminis šlyties reometras (angl. *Dynamic Shear Rheometer*) – prietaisas, skirtas charakterizuoti bitumo klampią ir elastinę elgseną vidutinėje ir aukštoje temperatūroje, atsižvelgiant į kompleksinį šlyties modulį ir fazės kampą.

Fazės kampas (angl. *Phase Angle*) – kampas tarp bandinio deformacijų ir bandinį veikiančių įtempių, išreikštas laipsniais, charakterizuojantis bitumo tamprumą.

Fizinės savybės (angl. *Physical Properties*) – apibrėžia medžiagų reakciją į jėgų veikimą, šios reakcijos intensyvumą. Skiriamos šios pagrindinės bitumo fizinės savybės: penetracija, minkštėjimo temperatūra, dinaminė klampa, atsparumas kietėjimui ir kt.

Guma (angl. *Crumb Rubber*) – panaudotų padangų guma, gaunama susmulkinant panaudotas automobilių ir sunkvežimių padangas, prieš tai pašalinus metalus, tekstilę ir kt.

Ilgalaikis senėjimas (angl. *Long-Term Aging*) – tai bitumo senėjimas kelio eksploatacijos laikotarpiu.

Kartotinio naudojimo medžiaga (angl. *Recycled Material*) – susmulkinta, perdirbta pradinė medžiaga, po perdirbimo panaudojamas toje pačioje arba kitoje srityje.

Klampa (angl. *Viscosity*) – medžiagos vidinė trintis, priešinimasis tekėjimui, deformavimui.

Kompleksinis šlyties modulis (angl. *Complex Shear Modulus*) – santykis tarp bandymo metu bitumą veikiančių maksimalių įtempių ir deformacijų, charakterizuojantis bitumo atsparumą deformacijoms.

Kritinė aukščiausia temperatūra (angl. *Critical High Temperature*) – temperatūra, kurioje bitumas yra atsparumas provėžoms.

Kritinė žemiausia temperatūra (angl. *Critical High Temperature*) – temperatūra, kurioje bitumas yra atsparus plyšių susidarymui.

Lenkiamiojo strypelio reometras (angl. *Bending Beam Rheometer*) – prietaisas, skirtas nustatyti bitumo atsparumą plyšių susidarymui žemoje temperatūroje atsižvelgiant standumą ir *m*-vertę.

Mechaninės savybės (angl. *Mechanical Properties*) – apibrėžia medžiagos savybę priešintis išorinėms jėgoms, priklausomai nuo apkrovos ir bandymo pobūdžio skiriamos šios pagrindinės mechaninės savybės: kompleksinis šlyties modulis, fazės kampas, valkšnioji atstata ir kt.

***m*-vertė** (angl. *m-value*) – apibrėžia temperatūrinių įtempių atsistatymą.

Polimerai (angl. *Polymers*) – stireno-butadieno-stireno polimerai.

Stabilumas sandėliuojant (angl. *Storage Stability*) – bitumo savybė išlikti homogeniškam aukštoje temperatūroje tam tikrą nustatytą sandėliavimo laikotarpį.

Standumas (angl. *Stiffness*) – lenkimo įtempių ir lenkimo deformacijų santykis.

Šlyties deformacija (angl. *Shear Strain*) – kampinė deformacija, kampo tarp dviejų statmenų nykstamai trumpų atkarpų pokytis, kuri apibrėžiama šlyties kampu.

Trumpalaikis senėjimas (angl. *Short-Term Ageing*) – tai bitumo senėjimas asfalto mišinių maišymo ir klojimo metu.

Valkšnumas (angl. *Creep Compliance*) – kietojo kūno savybė deformuotis esant arba pastoviai apkrovai arba pastoviai deformacijai.

Žymėjimai

Simboliai

E – tampros modulis, MPa;

ε – santykinė tamprioji deformacija, %;

φ – fazės kampas, °;

G^* – kompleksinis šlyties modulis, MPa;

G_k – gumos kiekis, %;

J_{nr} – bitumo valkšnioji atstata, kPa⁻¹;

$J_{nr\text{diff}}$ – skirtumas tarp liekamųjų šlyties deformacijų bandinį veikiant 0,1 kPa⁻¹ ir 3,2 kPa⁻¹ apkrova, %;

η – klampumas, mPa×s;

Pen – bitumo penetracija, dmm;

P_k – polimerų kiekis, %;

R – bitumo tamprioji atstata po valkšnumo ir atsikūrimo bandymo veikiant kartotinais įtempiais, %;

$R_{nr\text{diff}}$ – bandinio šlyties deformacijų atsistatymo pokytis dėl bandymo apkrovos (0,1 kPa⁻¹ ir 3,2 kPa⁻¹), kPa⁻¹;

S – standumas, MPa;
 σ – įtempiai, Pa;
 T – temperatūra, °C;
 T_a – bitumo tamprioji atstata, %;
 T_m – bitumo minkštėjimo temperatūra, °C.

Santrumpos

BBR – lenkiamojo strypelio reometras (angl. *Bending Beam Rheometer*);
CR – panaudotų padangų guma (angl. *Crumb Rubber*);
DSR – dinaminis šlyties reometras (angl. *Dynamic Shear Rheometer*);
EVA – etileno vinilacetatas (angl. *Ethylene Vinyl Acetate*);
LVE – tiesiškai tamprus būvis (angl. *Linear Viscoelastic Behavior*);
PAV – metodas, imituojantis ilgalaikį bitumo sendinimo procesą (angl. *Pressure Ageing Vessel*);
PE – polietilenas (angl. *Polyethylene*);
PMB – polimerais modifikuotas bitumas (angl. *Polymer Modified Bitumen*);
PP – polipropilenas (angl. *Polypropylene*);
PRD_{AIR} – santykinis vėžės gylis (angl. *Proportional Rut Depth*);
PS – polistirenas (angl. *Polystyrene*);
PVC – polivinilchloridas (angl. *Polyvinyl Chloride*);
RD – vėžės gylis (angl. *Rut Depth*);
RTFOT – metodas, imituojantis trumpalaikį bitumo sendinimo procesą (angl. *Rolling Thin Film Oven Test*);
SAW – daugiakriteris paprastojo sudėtinio įvertinimo metodas (angl. *Simple Additive Weighing*);
SBS – stireno butadieno stireno polimerai (angl. *Styrene-Butadiene-Styrene*);
SMA – skaldos ir mastikos asfaltas (angl. *Stone Mastic Asphalt*);
VGTU AIF KTI – Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo institutas (angl. *Road Research Institute of Faculty of Environmental Engineering of Vilnius Gediminas Technical University*);
WTS_{AIR} – vėžės formavimosi greitis (angl. *Wheel Tracking Slope*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka	6
1. ASFALTO MIŠINIŲ FIZINIŲ IR MECHANINIŲ CHARAKTERISTIKŲ PAGERINIMO PANAUDOJANT GUMĄ TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ	7
1.1. Asfalto mišinio sudėties komponentų įtaka kelio dangos funkcionavimui.....	8
1.2. Bitumo modifikavimui naudojamos medžiagos ir modifikavimo technologijos	12
1.2.1. Termoplastiniai plastomerai	15
1.2.2. Termoplastiniai elastomerai.....	16
1.2.3. Bitumo modifikavimo polimerais technologinio proceso analizė	18
1.3. Asfalto mišinių ir bitumo modifikavimas panaudotų padangų guma	20

1.3.1. Panaudotų padangų gumos perdirbimo technologijos	21
1.3.2. Bitumo modifikavimo panaudojant gumą technologijos	24
1.3.3. Atliktų asfalto mišinių ir bitumo modifikavimo guma tyrimų analizė	31
1.3.3.1. „Mažos klampos“ modifikavimo metodas.....	32
1.3.3.2. „Hibridinis“ modifikavimo metodas.....	41
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	44
2. GUMA MODIFIKUOTO BITUMO EKSPERIMENTINIO TYRIMO	
REZULTATAI	47
2.1. Eksperimentinio tyrimo seka ir metodika.....	47
2.1.1. Eksperimentinio tyrimo priemonės ir medžiagos	47
2.1.2. Eksperimentinio tyrimo seka	51
2.1.3. Eksperimentinio tyrimo metodika	58
2.1.3.1. Bitumo fizinių savybių nustatymo metodika	58
2.1.3.2. Bitumo mechaninių savybių nustatymo metodika.....	60
2.2. Guma modifikuoto bitumo eksperimentinio tyrimo rezultatai	64
2.2.1. Minimalaus pakankamo gumos kiekio nustatymo rezultatai	64
2.2.2. Minimalaus gumos ir polimerų kiekio nustatymo rezultatai	70
2.2.3. Bitumo atsparumo provėžų ir plyšių susidarymui nustatymo rezultatai ..	76
2.2.3.1. Nesendinto bitumo atsparumo provėžų susidarymui nustatymo	
rezultatai	77
2.2.3.2. Bitumo po trumpalaikio sendinimo atsparumo provėžų	
susidarymui rezultatai.....	83
2.2.3.3. Bitumo valkšniosios atstatos rezultatai.....	89
2.2.3.4. Bitumo atsparumo plyšių susidarymui nustatymo rezultatai	90
2.3. Antrojo skyriaus išvados	91
3. BITUMO MODIFIKAVIMO GUMA ĮTAKOS ASFALTO DANGOS	
FUNKCIONAVIMUI VERTINIMAS	93
3.1. Modifikuoto bitumo eksploatacinių savybių vertinimas pagal Superpave	
(PG) sistemą.....	93
3.2. Asfalto mišinių su guma bei polimerais modifikuotu bitumu atsparumo	
provėžoms nustatymas.....	100
3.2.1. Asfalto mišinių atsparumo provėžoms nustatymo metodika	100
3.2.2. Asfalto mišinių atsparumo provėžoms nustatymo rezultatai	100
3.3. Guma modifikuoto bitumo ir asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklių	
priklausomybės įvertinimas	103
3.4. Bitumo modifikavimo guma ekonominio efekto vertinimas.....	105
3.5. Racionaliausių bitumo modifikavimo sąlygų panaudojant gumą ir polimerus	
parinkimas taikant daugiakriterį SAW metodą.....	111
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	114
BENDROSIOS IŠVADOS	117
REKOMENDACIJOS	119

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	121
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	131
SUMMARY IN ENGLISH.....	133
PRIEDAI ¹	149
A priedas. Bitumo kritinės aukščiausios temperatūros nustatymo kreivės.....	151
B priedas. Bitumo kritinės žemiausios temperatūros nustatymo kreivės	156
C priedas. Bitumo ir asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės nustatymo grafikai	161
D priedas. Guma modifikuoto bitumo eksperimentinio tyrimo rezultatai	175
E priedas. Asfalto mišinio su guma modifikuotu bitumu atsparumo provėžoms nustatymo rezultatai	189
F priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija.....	193
G priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	194
H priedas. Mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	216

¹ Priedai pateikiami pridėtoje elektroninėje laikmenoje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
The object of the thesis.....	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
The research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	4
Defendend statements	4
Approval of the research findings	5
The structure of the thesis	5
Acknowledgements	6
1. ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS ENCHANCING TECHNOLOGIES USING CRUMB RUBBER	7
1.1. Influence of asphalt mixtures components on asphalt pavement performance ...	8
1.2. Technologies and materials of bitumen modification	12
1.2.1. Thermoplastic plastomers	15
1.2.2. Thermoplastic elastomers	16
1.2.3. Analysis of the bitumen modification using polymers process	18

1.3. Modification of asphalt mixtures and bitumen using crumb rubber.....	20
1.3.1. Technologies of crumb rubber recycling	21
1.3.2. Technologies of modification using crumb rubber	24
1.3.3. Analysis of conducted researches on asphalt mixtures and bitumen modification using crumb rubber	31
1.3.3.1. Wet process-no agitation method	32
1.3.3.2. “Hybrid” modification method.....	41
1.4. The first chapter conclusions, tasks formulation of the thesis.....	44
2. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE BITUMEN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES ENCHANCING USING CRUMB RUBBER	47
2.1. Sequence and methodology of experimental research	47
2.1.1. Materials and tools of experimental research	47
2.1.2. Sequence of experimental research.....	51
2.1.3. Methodology of experimental research	58
2.1.3.1. Methodology of bitumen physical properties	58
2.1.3.2. Methodology of bitumen mechanical properties	60
2.2. Results of modified bitumen experimental research	64
2.2.1. Results of the minimum sufficient crumb rubber amount research	64
2.2.2. Results of the minimum sufficient crumb rubber and polymer amount research.....	70
2.2.3. Results of bitumen resistance to rutting and thermal cracking research..	76
2.2.3.1. Results of unaged bitumen resistance to rutting research	77
2.2.3.2. Results of bitumen after short ageing resistance to rutting research	83
2.2.3.3. Results of bitumen creep recovery research	89
2.2.3.4. Results of bitumen resistance to thermal cracking	90
2.3. Second chapter conclusions.....	91
3. EVALUATION OF EFFECT OF BITUMEN AND ASPHALT MIXTURES ENCHANCING USING CRUMB RUBBER ON ASPHALT PAVEMENT PERFORMANCE	93
3.1. Evaluation of modified bitumen properties according to Superpave (PG) system	93
3.2. Determination of asphalt mixtures with crumb rubber and polymer modified bitumen rutting resistance.....	100
3.2.1. Methodology of asphalt mixture rutting resistance research	100
3.2.2. Results of asphalt mixture rutting resistance research	100
3.3. Evaluation of bitumen and asphalt mixtures rutting resistance relationship ...	103
3.4. Evaluation of bitumen modification using crumb rubber economical effect...	105
3.5. Determination of the most rational bitumen modification conditions using Multi- Criteria method.....	111
3.6. Third chapter conclusions	114
GENERAL CONCLUSIONS	117

RECOMMENDATIONS	119
REFERENCES	121
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	131
SUMMARY IN ENGLISH.....	133
ANNEXES ²	149
Annex A. Graphs of determination of bitumen critical high temperature	151
Annex B. Graphs of determination of bitumen critical low temperature.	156
Annex C. Graphs of bitumen and asphalt mixture rutting resistance parameters relationship.	161
Annex D. Result of crumb rubber modified bitumen	175
Annex E. Results of rutting resistance of asphalt mixture with crumb rubber modified bitumen.....	189
Annex F. Declaration of academic integrity.....	193
Annex G. The authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation defense.....	194
Annex H. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	216

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Didėjantis automobilių skaičius kasmet generuoja milijonus panaudotų padangų, kurios dėl savo ilgo irties laikotarpio ir užimamo tūrio yra didelė ekologinė problema. Europos padangų gamintojų asociacijos duomenimis, kiekvienais metais Europos Sąjungoje (ES) pagaminama daugiau kaip 300 mln. padangų ir kasmet šis skaičius vis didėja. Dėl savo vertingų sudėtinių medžiagų vis daugiau panaudotų padangų perdirbama. Per paskutinius 20 metų ES perdirbamų panaudotų padangų kiekis pasiekė 98 %. Remiantis statistiniais duomenimis, Lietuvoje perdirbama 78 % panaudotų padangų. 49 % panaudotų padangų yra naudojama energijos išgavimo tikslams (91 % iš jų yra deginama cemento gamyklų krosnyse), 46 % yra perdirbama, o 5 % nežinomas panaudojimas. Perdirbta panaudotų padangų guma naudojama triukšmą mažinančiuose, antivibraciniuose sprendiniuose, betono gamyboje, liejamų sporto aikštynų dangų įrengimui, bituminių stogų dangų gamybai, dirbtinės žolės užpildui stadionams. Vienas iš sėkmingiausių panaudotų padangų taikymo būdų yra kelių bitumo modifikavimas. JAV ir kitose Vakarų šalyse, panaudotų padangų guma kelių bitumo ir asfalto mišinių modifikavimui naudojama jau daugiau kaip 50 metų. Mokslininkai yra paskelbę daug mokslo darbų, kurių rezultatai iš pirmo žvilgsnio atrodo yra universalūs ir visuotinai tinkami. Tačiau kiekviena šalis ar nedidelis regionas turi specifinių, tik

jam būdingų aplinkybių, kurios ir nulemia modifikavimo technologijų tinkamumą bei efektyvumą. Pvz., tokios šalys kaip JAV, turinčios didžiulę rinką, gali taikyti bitumo modifikavimo technologijas, reikalaujančias didelių investicijų. Lyderiaujančios šalys didesnę dėmesį taip pat kreipia ne į mažiausios kainos kriterijų, o į ekologinių problemų sprendimą ar ekonominį efektą naudojamo sprendinio taikymo laikotarpiu. Tačiau, esant ribotam finansavimui ir siekiant efektyviai panaudoti kelių tiesybai ir remontui skiriamas lėšas, būtina taikyti pigesnes asfalto mišinių ir bitumo modifikavimo technologijas, užtikrinant tvarų iš jų įrengtų funkcionavimą net ir kasmet didėjant transporto eismo apkrovoms. Taigi, tokiose nedidelėse šalyse kaip Lietuva, vis dar svarbiausias kriterijus yra mažiausia kaina. Todėl siekiant tinkamai ir efektyviai bitumo modifikavimui taikyti panaudotų padangų gumą, kyla būtinybė pritaikyti mažiausiai sąnaudų turinčias modifikavimo technologijas.

Šioje disertacijoje analizuojama asfalto mišinių sudėtinių dalių įtaka kelio dangos funkcionavimui, bitumo modifikavimo metodai bei technologijos, bandymo metodai. Atlikti bitumo modifikavimo panaudojant padangų gumą eksperimentiniai tyrimai, nustatant tinkamus ir efektyvius modifikavimui panaudotos gumos kiekius atsparumo provėžų ir plyšių susidarymui poveikio aspektu.

Darbo aktualumas

Disertaciniame darbe aprašyti atlikti bitumo modifikavimo tyrimai panaudojant kartotinio naudojimo medžiagą – panaudotų padangų gumą. JAV ir kitose Vakarų šalyse guma bitumo ir asfalto mišinių modifikavimui naudojama jau daugiau kaip 50 metų. Nepaisant to, taikant žinomas technologijas, būtina modernizuoti bitumo modifikavimo gamyklas, – tai reikalauja didžiulių investicijų. Taip pat toks bitumas dažnai naudojamas tik tam tikrų asfalto mišinių gamybai, jis turi būti nedelsiant panaudojamas po pagaminimo. Gumos ir polimerų kombinacijos panaudojimas yra pati naujausia technologija. Tačiau yra aiškios tik šios technologijos gairės, o konkrečios proceso sąlygos nėra viešai prieinamos. Be to, kiekviena šalis asfalto mišinių gamybai naudoja skirtingos kilmės ir savybių mineralines medžiagas, skirtingų rūšių bitumus ir priedus. Klimatinės sąlygos kiekvienoje šalyje taip pat yra skirtingos. Taigi ir keliama reikalavimai asfalto mišiniams bei bitumui skiriasi priklausomai nuo šalies. Įprastai Lietuvoje kelių bitumas modifikuojamas naudojant polimerus, kurie yra brangūs. Kadangi panaudotų padangų gumos sudėtyje yra daugiau kaip 50 % polimerų, ji gali būti tinkama bitumo modifikavimui. Tačiau būtina nustatyti tinkamus ir efektyvius modifikavimui panaudotos gumos kiekius, kurie užtikrintų asfalto mišinių su šiuo modifikuotu bitumu atsparumą provėžų ir plyšių susidarymui.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – modifikavimui taikyto panaudotų padangų gumos kiekio įtaka modifikuoto bitumo atsparumo provėžų ir plyšių susidarymo rodikliams bei asfalto mišinių su šiais bitumais atsparumui provėžoms.

Darbo tikslas

Moksliskai pagrįsti ir nustatyti kelių bitumo modifikavimui pakankamus panaudotų padangų gumos kiekius užtikrinant kelio dangos atsparumą provėžų bei plyšių susidarymui.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliami šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinius tyrimus asfalto mišinių komponentų įtakos asfalto dangos funkcionavimui tematika, bitumo modifikavimo metodus bei modifikavimui naudojamų medžiagų rūšis ir kiekius, nustatyti modifikavimo proceso gaires.
2. Eksperimentiniu tyrimu nustatyti pakankamus gumos kiekius, reikalingus bitumo modifikavimui ir įvertinti modifikuoto bitumo savybes.
3. Eksperimentiniu tyrimu nustatyti ir įvertinti asfalto mišinių su guma modifikuotu bitumu atsparumą provėžoms.
4. Apskaičiuoti bitumo ir asfalto mišinių modifikavimo guma ekonominį efektą lyginant su bitumo modifikavimu vien SBS polimerais.
5. Nustatyti racionaliausią bitumo modifikavimo variantą daugiakriteriu SAW metodu.
6. Pateikti rekomendacijas bitumo modifikavimui guma.

Tyrimų metodika

Disertacijos tikslo pasiekimui buvo naudoti eksperimentiniai – bitumo fizinių (penetracijos, minkštėjimo temperatūros, klampos, stabilumo sandėliuojant) ir mechaninių (dinaminio šlyties modulio aukštoje temperatūroje ir standumo žemoje

temperatūroje, valkšniosios atstatos) savybių tyrimų metodai. Taip pat panaudotas daugiakriteris sprendimo priėmimo SAW metodas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji ir reikšmingi rezultatai:

1. Sukurta bitumo modifikavimo guma seka, apibrėžianti efektyvią laboratorinio modifikavimo technologiją, užtikrinančią modifikuoto bitumo atsparumą provėžų ir plyšių susidarymui taip sprendžiant panaudotų padangų gumos utilizavimo problemą.
2. Nustatytas bitumo valkšniosios atstatos sąryšis su asfalto mišinio atsparumu provėžoms, leidžiantis greičiau ir efektyviau įvertinti modifikuoto bitumo tinkamumą provėžoms atsparaus asfalto mišinio gamybai.
3. Standartizuota modifikuoto bitumo stabilumo sandėliuojant nustatymo metodika patobulinta vietoje minkštėjimo temperatūros ir penetracijos bandymų atliekant klampos bandymus. Tai leidžia tiksliau įvertinti modifikuoto bitumo stabilumą sandėliuojant.
4. Nustatyti kelių bitumo modifikavimui pakankami panaudotų padangų gumos kiekiai, užtikrinantys ne prastesnes guma modifikuoto bitumo savybes lyginant su vien polimerais modifikuotu kelių bitumu.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurta kelių bitumo modifikavimo panaudojant gumą seka ir nustatyti pakankami gumos kiekiai, gali būti taikomi praktikoje projektuojant modifikuoto bitumo sudėtis. Gumos panaudojimas užtikrina iki 21 % mažesnes išlaidas bitumo modifikavimui lyginant su įprastų polimerų naudojimu. Tyrimų rezultatai taip pat gali būti naudojami praktikoje bitumo modifikavimo panaudojant gumą rekomendacijoms parengti.

Ginamieji teiginiai

1. Guma modifikuoto bitumo savybės skiriasi priklausomai nuo modifikavimo proceso parametrų – modifikavimui panaudoto gumos kiekio, maišymo temperatūros ir trukmės.

2. Tinkamomis sąlygomis guma modifikuoto bitumo atsparumo provėžoms ir plyšiams rodikliai yra lygiaverčiai polimerais modifikuoto bitumo rodikliams. Tai leidžia užtikrinti pakankamą kelio dangos atsparumą provėžoms bei plyšiams.
3. Guma modifikuoto bitumo panaudojimas asfalto mišinių gamyboje vietoje įprasto SBS polimerais modifikuoto bitumo leidžia gauti teigiamą ekonominį efektą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 14 mokslinių straipsnių: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Vaitkus *et al.* 2014; Cihackova *et al.* 2015; Vaitkus *et al.* 2017), du – periodiniame recenzuojamame mokslo žurnale (Vaitkus *et al.* 2016; Cihackova *et al.* 2016), penki – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics* duomenų bazėje *Proceedings* (Žiliūtė *et al.* 2014; Šernas *et al.* 2014; Šernas *et al.* 2016; Šernas *et al.* 2017; Vorobjovas *et al.* 2017), keturi – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų leidiniuose (Šernas, Skrodenis 2014; Varaneckas *et al.* 2015; Kunčys, Šernas 2015; Šernas *et al.* 2016).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2014 m. ir 2015 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2014 m. ir 2017 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Transport Research Arena TRA2016*“ 2016 m. Varšuvoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*CETRA 2016*“ 2016 m., Šibernik.
- Jaunųjų mokslininkų seminare „*Young Researcher Seminar 2017*“ 2017 m. Berlyne.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Pabaigoje pateikiami aštuoni priedai.

Darbo apimtis yra 149 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 24 numeruotos formulės, 58 paveikslai ir 27 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 125 literatūros šaltiniai.

Padėka

Disertacijos autorius pirmiausia dėkoja moksliniam vadovui prof. dr. Donatui Čygui už kantrybę, vertingas mokslines konsultacijas ir patarimus, visokeriopą pagalbą. Taip pat dėkoja prof. dr. Audriui Vaitkui už mokslines išvalgas, idėjas, taiklias pastabas disertacijos rengimo metu bei už suteiktas tobulėjimo galimybes mokslinėje ir darbinėje aplinkoje. Autorius reiškia padėką disertacijos ekspertams už vertingas pastabas ir komentarus, kantrybę bei supratingumą. Už visokeriopą palaikymą doktorantūros studijų metu autorius dėkingas VGTU Kelių tyrimo instituto kolegoms. Taip pat autorius dėkingas Lietuvos mokslo tarybai už skirtą finansinę paramą doktorantūros studijų metu. Ne mažiau dėkingas šeimai už visokeriopą palaikymą, supratimą bei paskatinimą sunkiausiais momentais nesustoti.

Asfalto mišinių fizinių ir mechaninių charakteristikų pagerinimo panaudojant gumą technologijų analizė

Šiame skyriuje pateikiama literatūros apžvalga. Analizuojama ir apibendrinama asfalto mišinių sudėties komponentų įtaka asfalto dangos funkcionavimui, analizuojama bitumo sudėtis ir funkcionavimą laiduojančios savybės, nagrinėjamos bitumo ir asfalto mišinių modifikavimo technologijos bei modifikavimui naudojamos medžiagos, analizuojami naujausi panaudotų padangų perdirbimo ir taikymo bitumo ir asfalto mišinių modifikavimui moksliniai tyrimai.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta dvylikoje autoriaus mokslinių publikacijų: Vaitkus *et al.* (2014); Šernas, Skrodenis (2014); Šernas *et al.* (2014); Žiliūtė *et al.* (2014); Cihackova *et al.* (2015); Kunčys, Šernas (2015); Varaneckas *et al.* (2015); Šernas *et al.* (2016); Cihackova *et al.* (2016); Vaitkus *et al.* (2016), Vaitkus *et al.* (2017); Vorobjovas *et al.* (2017).

1.1. Asfalto mišinio sudėties komponentų įtaka kelio dangos funkcionavimui

Asfalto mišinys – tai asfalto dangos medžiaga, susidedanti iš rišiklio, mineralinių medžiagų užpildo ir oro tuštymių (Xu, Huang 2012; Jenks *et al.* 2011). Rišiklio paskirtis yra surišti mineralines medžiagas į tankų ir vandeniui atsparų mišinį. Taip pat naudojami nedideli kiekiai priedų, kurie pagerina asfalto mišinio savybes. Asfalto mišinio charakteristikoms turi įtakos tiek atskirų komponentų savybės, tiek bendros asfalto mišinio, kaip sistemos, savybės. Pagrindinės asfalto mišinio savybės tiesiogiai susietos su struktūra, todėl daugelis mokslininkų, tyrinėjusių jo savybes, siekė nustatyti priklausomybę nuo sudedamųjų medžiagų rodiklių (Arasan *et al.* 2011; Singh *et al.* 2012; Lee *et al.* 2007; Kassem *et al.* 2011; Al-Rousan *et al.* 2007; Sivilevičius *et al.* 2011). Asfalto mišinio granulometrinė sudėtis ir bitumo kiekis veikia asfalto fizines-mechanines savybes, kurios savo ruožtu lemia šlyties deformacijų asfalto sluoksniuose susidarymą. Optimaliai parinktas bitumo kiekis ir granulometrinė sudėtis pagerina fizines mechanines mišinio savybes, taip pat ir asfalto sluoksnių atsparumą šlyties įtempimams (Neubauer, Partl 2002). Mineralinių medžiagų forma ir kilmė asfalto mišinių charakteristikoms turi didelės įtakos – naudojant daugiabriaunio paviršiaus, artimos kubui formos bei geresnės kokybės medžiagas, susiformavusių provėžų gylis yra mažesnis. Taip pat pagerėja tokios charakteristikos: dinaminis standumas, pastovumas, ilgaamžiškumas (Topal, Sengoz 2005). Nuo bitumo savybių asfalto mišinio atsparumas provėžoms priklauso 40 % (Sybilski *et al.* 2013).

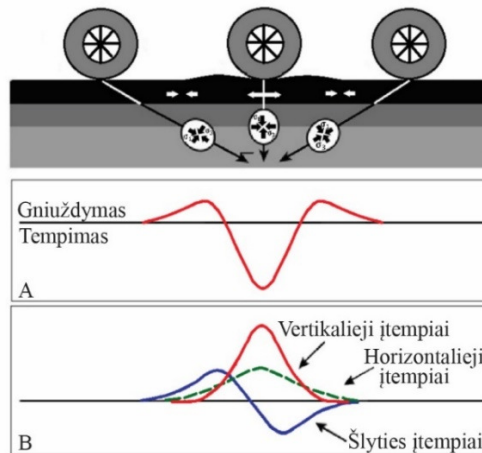
Asfalto dangos provėžos yra išskiriamos į du tipus: asfalto dangos paviršiaus provėžos ir nesurištųjų sluoksnių provėžos. Nesurištųjų sluoksnių provėžos susidaro dėl šių sluoksnių šlyties ir susitankinimo eksploatacijos laikotarpiu. Tačiau, vandeniui nepatenkant į nesurištuosius sluoksnius, didžioji dalis (85–95 %) susidaro asfalto dangos sluoksniuose (Coleri *et al.* 2008).

Asfaltas yra tampriai-klampis medžiaga, todėl veikiant skirtingoms aplinkos sąlygoms, gali būti skirtingos fizinės būsenos (Huang 1993), t. y.:

- klampiosios būsenos;
- tampriai-klampiosios būsenos;
- tampriai-plastinės būsenos;
- tampriosios-trapiosios būsenos.

Asfalto dangą veikiant transporto eismo apkrovoms, asfalto dangoje susidaro horizontalieji, vertikalieji ir šlyties įtempiai (1.1 pav). Šlyties įtempiai verčia asfalto mišinio mineralinių medžiagų daleles judėti viena kitos atžvilgiu, o bitumas priešinasi šiam judėjimui. Tačiau bitumas yra medžiaga, kurios savybės labai priklauso nuo temperatūros, todėl didėjant temperatūrai, mažėja bitumo standumas, taip pat mažėja ir tarp mineralinės medžiagos mišinio dalelių esantis ryšių

stiprumas, mineralinės medžiagos mišinio dalelės pradeda judėti viena kitos atžvilgiu. Šlyties įtempių skaitinės vertės priklauso nuo veikiamos apkrovos dydžio ir veikiamos apkrovos ploto. Asfalto mišinio mineralinių medžiagų dalelės iš apkrovos poveikio zonos juda į tas asfalto dangos dalis, kurios nėra taip intensyviai veikiamos apkrovų (Oginskas 2006).



1.1 pav. Nuo besisukančio automobilio rato asfaltbetonio dangoje susidarantys įtempiai (Doré, Zubeck 2008)

Fig. 1.1. Stresses caused by a turning vehicle wheel in asphalt concrete pavement (Doré, Zubeck 2008)

Šlyties įtempiai asfalto dangoje tiesiogiai priklauso nuo veikiančios apkrovos dydžio – kuo apkrova didesnė, tuo didesni ir įtempiai (Oginskas 2006). Transporto priemonei judant tiesia kryptimi, šlyties įtempiai yra gana nedideli ir sudaro apie 0,1 vertikaliųjų įtempių verčių, tačiau jie yra pakankami, kad asfalto dangoje susiformuotų šlyties deformacijos. Ženkliai didesnės šių įtempių vertės asfalto dangos ruožuose, kur keičiasi judėjimo kryptis (mažo spindulio posūkiai sankryžose, troleibusų ir autobusų sustojimai) ir keičiasi transporto srauto judėjimo greitis (stabdomo ir greitėjimo zonos), siekiantis net iki 0,6 vertikaliųjų įtempių verčių. Zonose ir eismo juostose, kuriose vyksta intensyvus sunkiasvorių transporto priemonių eismas, šlyties deformacijos yra ženkliai didesnės nei kituose ruožuose.

Šlyties įtempiai asfalto dangose susidaro dėl tokių apkrovų:

- stovinčių ar stacionarių (ilgalaikių ar statinių) apkrovų;
- pasikartojančių eismo apkrovų (didelis pasikartojimų skaičius);
- stabdomo ar greitėjimo apkrovų.

Eksplotacijos periodu asfalto dangų funkcionavimą lemia daug faktorių (Nilson 2001):

- asfalto mišinio kintamieji (bitumo rūšis, bitumo kiekis asfalto mišinyje, asfalto mišinio mineralinių medžiagų savybės, asfalto mišinio oro tuštymių kiekis ir kt.);
- aplinkos kintamieji (aplinkos temperatūra, drėgmė ir kt.);
- transporto eismo apkrovos kintamieji (apkrovos pobūdis, apkrovos laikas, apkrovos kampas, atsistatymo laikas ir kt.).

Karštuoju metų periodu asfalto dangos temperatūra Lietuvoje pakyla iki +53 °C temperatūros, tačiau 8–10 cm gylyje, asfalto dangos temperatūra yra apie 10 °C mažesnė (Vaitkus *et al.* 2012). Viršutiniai asfalto sluoksniai yra intensyviau veikiami temperatūros pokyčių, todėl šiems sluoksniams turi būti naudojamas asfaltas turi būti ne tik atsparus provėžoms, bet ir pakankamo plastiškumo, kad šaltuoju metų periodu nesudarytų temperatūriniai plyšiai. Lietuvoje didžiausias leistinas asfalto dangos provėžos gylis yra 20 mm (Sivilevičius, Vansauskas 2013). Provėžų susidarymo asfalto dangoje pavyzdys pateiktas 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Provėžų susidarymo asfalto dangoje pavyzdys
Fig. 1.2. Example of rutting in the asphalt pavement

Siekiant sumažinti asfalto dangos atsparumo provėžoms problemą, Kandhal *et al.* (1998) rekomenduoja:

- sumažinti bitumo kiekį asfalto mišiniuose (didesnis bitumo kiekis padeda padidinti atsparumą nuovargiui ir ilgalaikiškumą, tačiau sumažina atsparumą provėžoms, todėl turi būti rastas kompromisas);
- naudoti stambesnę mineralinių medžiagų mišinį (smulkesnės granulometrinės sudėties asfalto mišiniai yra mažiau atsparūs provėžoms);
- naudoti daugiabriaunes skaldytas mineralines medžiagas (tai yra ypač taikoma smulkiajai frakcijai);
- padidinti oro tuštymių kiekį (asfalto mišiniai, turintys mažesnę mineralinių medžiagų mišinio oro tuštymių kiekį ir didesnę bitumo kiekį, nuo transporto eismo apkrovų poveikio dar labiau sutankėja. Tokie asfalto mišiniai praranda stabilumą pasiekus kritinį sutankinimo laipsnį ir pradeda formuotis provėžos);

- naudoti didesnės klampos bitumą (bitumas, kuris esant 60 °C temperatūrai yra klampesnis, taip pat atsparesnis provėžoms, nei bitumas, kurio klampa yra mažesnė);
- padidinti mineralinių miltelių kiekį (mineralinių miltelių kiekio padidinimas padidina bitumo klampą);
- sumažinti sluoksnio storį;
- pagerinti sukibimą tarp sluoksnių.

Asfalto mišinio sudėties komponentų įtaka asfalto dangos atsparumui provėžoms pateikta 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Asfalto mišinio sudėties komponentų įtaka asfalto dangos atsparumui provėžoms (Doré, Zubeck 2008)

Table 1.1. The effect of asphalt mixture component on asphalt pavement resistance to rutting (Doré, Zubeck 2008)

Komponentas	Veiksny	Veiksni pasikeitimas	Veiksni pasikei- timo poveikis pro- vėžų susidarymui
Mineralinė me- džiaga	Paviršiaus tekstūra	Iš lygaus į šiurkštų	Sumažėja
	Granuliometrinė su- dėtis	Iš netolydžios į to- lydžią	Padidėja/sumažėja
	Forma	Iš apvalios į dau- giabriaunę	Sumažėja
	Stambumas	Padidėja iki didžiau- sio	Padidėja/sumažėja
Riškis	Standumas	Padidėja	Sumažėja
Mišinys	Bitumo kiekis	Padidėja	Padidėja
	Oro tuštymių kiekis	Padidėja	Padidėja
	Mineralinių me- džiagų oro tuštymių kiekis	Padidėja	Padidėja
Bandymų sąlygos	Temperatūra	Padidėja	Padidėja
	Apkrovos/deforma- cijų santykis	Padidėja padangos slėgis	Padidėja
	Apkrovų pasikarto- jimas	Padidėja	Padidėja
	Vanduo	Iš sauso į šlapią	Padidėja, jei mišinys yra jautrus vandeniui

Baltijos šalių regione vyrauja specifinės klimatinės sąlygos – didelis skirtumas (≥ 70 °C) tarp aukščiausios ir žemiausios temperatūros asfalto dangos paviršiuje bei dažnas temperatūros perėjimas iš teigiamos į neigiamą ir atvirkščiai (40–90 užšalimo-atšilimo ciklą) (Vaitkus *et al.* 2012). Atsižvelgiant į tai, asfalto mišinių gamybai pavojinga naudoti kietą nemonifikuotą bitumą – tokiu atveju labai tikėtinas temperatūrinių plyšių susidarymas asfalto dangoje.

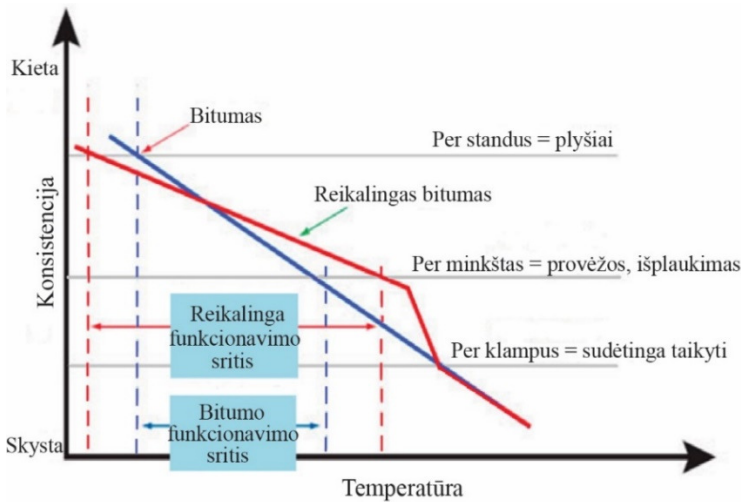
Taigi, siekiant padidinti asfalto mišinių atsparumą provėžoms, asfalto mišinių gamybai naudojamos mineralinės medžiagos turi būti daugiabriauniu paviršiumi, artimos kubo formai, granulimetrinė sudėtis turi būti optimali. Taip pat asfalto mišinių, kurių gamybai naudojamas polimerais modifikuotas bitumas, 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.

1.2. Bitumo modifikavimui naudojamos medžiagos ir modifikavimo technologijos

Bitumas yra medžiaga, sudaryta iš organinių junginių, kurie yra įvairūs didelės masės angliavandeniliai, turintys aromatinių angliavandenilių fragmentus ir likusias frakcines grupes, kuriose be anglies ir vandenilio aptinkami tokie heteratomai kaip siera, azotas ir deguonis. Bitume taip pat aptinkamas nedidelis kiekis metalų (vanadis, nikelis, geležis, magnis ir kalcis), kurie yra neorganinių druskų ir oksidų arba porfyrinėje struktūroje. Bitumo elementinė sudėtis yra tokia (Asphalt Institute 2011; Jenks *et al.* 2011; Read, Whiteoak 2003):

- anglis 82–88 %;
- vandenilis 8–11 %;
- siera 0–6 %;
- deguonis 0–1,5 %;
- azotas 0–1 %.

Asfalto dangos atsparumas dėvėjimuisi ir liekamosioms deformacijoms priklauso nuo bitumo savybių. Nemonifikuotas standus bitumas gali atlaikyti apkrovas aukštoje temperatūroje, bet yra jautrus plyšių susidarymui žemoje temperatūroje (1.3 pav.). Nemonifikuotas minkštas bitumas yra atsparus plyšių susidarymui žemoje temperatūroje, tačiau yra neatsparus deformacijoms aukštoje temperatūroje. Siekiant tinkamo asfalto dangos funkcionavimo esant plačiai temperatūros amplitudei bei norint prailginti eksploatacinį laikotarpį, turi būti naudojamas modifikuotas bitumas. Bitumas modifikuojamas jau daugiau kaip 50 metų. Modifikavimui naudojami įvairūs priedai, kurie parenkami atsižvelgiant į modifikuojamo ir pageidaujamo bitumo savybes, taikomą technologinį procesą ir kt.



1.3 pav. Nemodifikuoto bitumo elgsena (Bitumina Group 2017)

Fig. 1.3. Unmodified bitumen behavior (Bitumina Group 2017)

Bitumo modifikavimui naudojami užpildai, polimerai, panaudotų padangų guma, oksidantai, antioksidantai, angliavandeniliai, plaušai ir kt. Dažniausiai bitumo modifikavimui naudojamų priedų ir jų įtakos funkcionavimui suvestinė pateikta 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Bitumo modifikavimui naudojamų priedų suvestinė (Bahia *et al.* 2001; Asphalt Institute 2011)

Table 1.2. Summary of bitumen modifiers (Bahia *et al.* 2001; Asphalt Institute 2011)

Modifikatoriaus tipas	Klasė	Pagerinama bitumo savybė				
		PD	FC	LTD	MD	AG
1	2	3	4	5	6	7
Užpildai	Anglis	x				x
	Gesintos kalkės	x				x
	Portlancementis	x				
	Mineralinių medžiagų dulkės	x				
Išplėtikliai	Siera	x	x	x		
	Medienos ligninas				x	

1.2 lentelės tęsinys

1	2	3	4	5	6	7
Polimerai- elastomerai	Stirenas butadienas (SB)			x	x	
	Stirenas butadienas stirenas (SBS)	x	x	x		x
	Stirenas izoprenas stirenas (SIS)	x				
	Stirenas etilbutilenas (SEBS)					
	Stirenas butadieno kaučiukas (SBR)	x		x		
	Chloropreninis kaučiukas	x		x		
	Natūralioji guma	x				
	Akrinolis butadienas stirenas (ABS)	x				
Polimerai- plastomerai	Etileno vinilacetatas (EVA)	x	x			
	Propileno ir dieninio monomero plastomeras (EPDM)	x				
	Etileno akrilatas (EA)	x				
	Polizobutilenas	x				
	Polietilenas	x		x		
	Polipropilenas	x				
Panaudotų padangų guma	Skirtingi dydžiai, apdorojimai ir paruošimai	x	x	x		
Oksidantai	Mangano junginiai	x				
Angliavandėniliai	Aromatiniai			x		
	Parafinas/vaškas			x		
	Asfaltenai (ROSE proceso dervos)	x				
	Asfaltenai (SDA)	x				
	Asfaltenai (DEMEX)					
	Skalūnai					x
Sukibimą gerinantys priedai	Amido aminai				x	
	Poliaminai				x	
	Poliamidai				x	
	Gesintos kalkės				x	

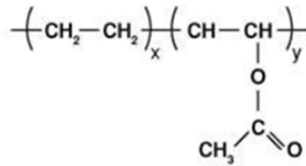
1.2 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7
Plaušai	Polipropilenas	x	x	x		
	Poliesteris	x		x		
	Plienas	x	x	x		
	Armatūra	x	x	x		
Antioksidantai	Švinas			x		x
	Cinkas			x		x
	Anglis	x				x
	Kalcio karbonatas					x
	Gesintos kalkės				x	x
	Fenolis					x
	Aminai				x	x
<i>Paaiškinimai:</i> PD – liekamosios deformacijos; FC – atsparumas nuovargiui; LTC – atsparumas plyšių susidarymui; MD – atsparumas vandens poveikiui; AG – atsparumas oksidaciniam senėjimui.						

Kaip dažniausiai bitumo modifikavimui naudojamą priedą galima išskirti polimerus. Polimerai yra sudaryti iš molekulių (monomerų), kurie tarpusavyje chemiškai sujungti suformuoja ilgas polimerų grandines. Polimerai pagal elgseną tempimo metu klasifikuojami į elastomerus ir plastomerus. Ištempus plastomerą ir nuėmus tempimo jėgą, plastomeras lieka ištemptoje pozicijoje ir nebesugrįžta į pradinę padėtį. Ištempus elastomerą ir nuėmus tempimo jėgą, elastomeras grįžta į pradinę poziciją. Apskritai, poliolefinai yra termoplastiniai plastomerai, o stireno-butadieno-stireno polimerai yra termoplastiniai elastomerai (Zhu *et al.* 2014).

1.2.1. Termoplastiniai plastomerai

Termoplastiniai plastomerai, priešingai nei termoplastiniai elastomerai, labiau pakietina bitumą (sumažina penetraciją), nei padidina minkštėjimo temperatūrą (Read, Whiteoak 2003; Asphalt Institute 2011; McNally 2011). Taip pat modifikuojant bitumą šiais polimerais, padidinama bitumo klampa. Tačiau nėra pastebimas reikšmingas elastinių savybių pagerinimas bei modifikuotas bitumas yra linkęs į nestabilumą.



1.4 pav. Etileno vinilacetato polimero struktūra (Lo Presti 2011)

Fig. 1.4. Structure of ethylene vinyl acetate polymer (Lo Presti 2011)

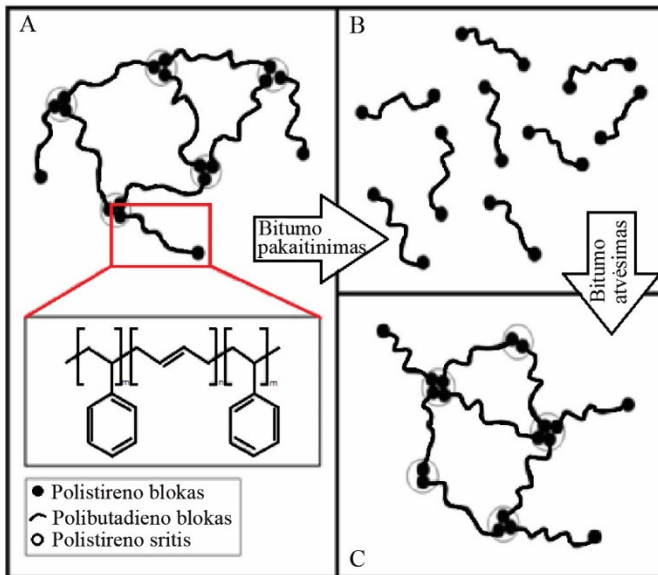
Etileno vinilacetatas (EVA) yra vienas iš dažniausiai naudojamų termoplastinių plastomerų, naudojamų bitumo modifikavimui. EVA polimerai lengvai įmaišomi į bitumą naudojant net mažo intensyvumo maišytuvus (Lo Presti 2011). Polietilenas (PE), polipropilenas (PP), polivinylchloridas (PVC), polistirenas (PS) ir kiti plastomerai gali būti taikomi bitumo modifikavimui (Zhu 2015).

1.2.2. Termoplastiniai elastomerai

Stireno-butadieno-stireno (SBS) polimerai yra patys populiariausi ir dažniausiai naudojami bitumo modifikavimo termoplastiniai elastomerai. SBS polimeras yra trijų blokų kopolimeras, turintis stireno segmentus, prijungtus prie butadieno segmentų. Susijungusios stireno ir butadieno molekulės sukuria vientisą erdvinį tinklą, – tai užtikrina stiprį ir elastiškumą. Galiniai polistireno segmentai suteikia stiprį, o viduriniai butadieno segmentai – elastingumą. Stiprio ir elastingumo kombinacija suteikia SBS polimerais modifikuotam bitumui atsparumą liekamosioms deformacijoms bei sumažina nuovargio plyšių formavimąsi ir plyšių susidarymą esant žemai temperatūrai.

Didesnėje nei 100 °C temperatūroje polistirenas minkštėja, atsilaisvina molekuliniai ryšiai, todėl aukštoje temperatūroje yra lengvai apdorojamas. Tačiau žemėjant temperatūrai, polimerų molekulinis ryšių tinklas yra atkuriamas, – tai vėl užtikrina stiprį ir elastiškumą (Read, Whiteoak 2003; Asphalt Institute 2011; McNally 2011). Termoplastinio elastomero struktūra pavaizduota 1.5 paveiksle.

Rinkoje yra daugybė SBS polimerų rūšių, kurios tarpusavyje skiriasi stireno ir butadieno santykiais, struktūra ir kt. (pvz., Kraton D1101, Kraton D1184, Kraton D1186 (Kraton Polimers, JAV); Finaprene 411, (Total, Prancūzija); Europrene Sol T 161B (Eni, Italija); Calprene 411 (Dynasol, Ispanija); DST 30-01 and DST-30R-01 (Voronežo gamykla, Rusija). SBS polimerai gali būti linijinės arba radialinės struktūros (Pyshyev *et al.* 2016).



1.5 pav. Stireno-butadieno-stireno polimero struktūra (Zhu *et al.* 2014)

Fig. 1.5. Structure of styrene-butadiene-styrene polymer (Zhu *et al.* 2014)

Apibendrinant galima teigti, kad bitumo modifikavimas termoplastiniais elastomerais suteikia didesnę elastingumą, padidina minkštėjimo temperatūrą bei mažina penetraciją. Modifikuojant bitumą, būtina naudoti vidutinio arba didelio intensyvumo maišytuvus, leidžiančius gerai susmulkinti bitume polimerus ir tolygiai juos paskirstyti bitume, taip užtikrinant homogeniškumą ir stabilumą. Tačiau ne mažiau svarbu ir modifikuojamo bitumo komponentinė sudėtis – kuo didesnis aromatinių angliavandenilių kiekis, tuo geresnė cheminė reakcija tarp elastomerų ir bitumo.

Polimerų pasiskirstymo bitume kokybė priklauso nuo šių faktorių:

- bitumo sudėties;
- polimerų tipo ir kiekio;
- modifikavimo proceso intensyvumo.

Nepaisant neabejotinų privalumų, SBS polimerai taip pat turi ir trūkumų. Pavyzdžiui, suderinamumas tarp bitumo ir SBS polimerų ne visada yra geras (Galooyak *et al.* 2010). Jeigu į bitumą dedami polimerai, kurių molekulinė masė yra lygi ar net didesnė nei asfaltenu, asfaltenai su polimerais konkuruoja, kurie absorbuos lengvuosius bitumo komponentus. Jeigu išlieka neabsorbuotų lengvųjų bitumo komponentų, gali įvykti bitumo fazių atsiskyrimas, t. y. bitumo ir polimerų sistema yra nesuderinama (Airey 2003; Asphalt Institute 2011; Read, Whiteoak 2003).

Modifikuoto bitumo stabilumas yra labai svarbu, tačiau praktikoje galima naudoti ir nestabilių bitumą. Tačiau tokiu atveju, būtinos sandėliavimo talpos, turinčios maišytuvus arba cirkuliacinę funkciją, – tai sumažintų polimerų atsiskyrimo nuo bitumo riziką (Asphalt Institute 2011; Read, Whiteoak 2003).

Idealiu atveju, polimerais modifikuotas bitumas turi būti suprojektuotas taip (Zhu *et al.* 2014):

- turi būti standus aukštoje temperatūroje ir minkštas žemoje temperatūroje;
- turi būti užtikrinamas sukibimas su mineralinėmis medžiagomis;
- technologiškas;
- stabilus sandėliuojant;
- ilgalaikis (atsparus senėjimui ir nuovargiui);
- perdirbamas;
- ekonomiškai efektyvus;
- nekenksmingas aplinkai.

Realybėje praktiškai neįmanoma užtikrinti visų aukščiau paminėtų savybių vienu metu. Praktikoje turi būti siekiama kompromisų. Dažniausiai svarstomi 2 variantai: pagaminamas brangus modifikuotas bitumas su puikomis savybėmis arba pigesnis, tačiau su atitinkamai prastesnėmis savybėmis.

Siekiant pagerinti bitumo bitumo ir modifikavimo priedų suderinamumą, fizinės sąveikos pagerinimas atrodo lengviau pasiekiamas ir labiau kontroliuojamas nei cheminės sąveikos pagerinimas. Taip yra dėl to, kad bitumas ir modifikavimo priedai chemiškai nesąveikauja po dirbtinio apdorojimo aukštoje temperatūroje. Būtina pabrėžti, kad per mažas ar labai geras suderinamumas nėra pageidaujamas, todėl, kad esant mažam suderinamumui atsiranda fazių atsiskyrimo problema, o esant labai geram suderinamumui, ženkliai sumažėja bitumo modifikavimo efektas.

Ne ką mažiau svarbus yra ekonominis aspektas – modifikuotas bitumas turi būti ekonomiškai naudingas, t. y. modifikavimo efektas turi būti toks, kad atsipirktų. Siekiant sumažinti modifikuoto bitumo kainą, galima naudoti pigesnes polimerines medžiagas, ypač kartotinio naudojimo medžiagas (gumą, plastiką). Šios kartotinio naudojimo medžiagos turi didžiulį potencialą, tačiau siekiant tinkamų modifikuoto bitumo savybių, būtina naudoti ir kitus priedus, t. y. galima modifikuoti bitumą skirtingų polimerų kombinacijomis (pvz., SBS polimerais ir panaudotų padangų guma). Tokiu būdu būtų gaunamas tinkamas ar net geresnių savybių produktas už prieinamą kainą.

1.2.3. Bitumo modifikavimo polimerais technologinio proceso analizė

Bitumo modifikavimui gali būti taikomos skirtingos technologijos: modifikavimas taikant didelio ar mažo intensyvumo maišytuvus, modifikavimas gamykloje

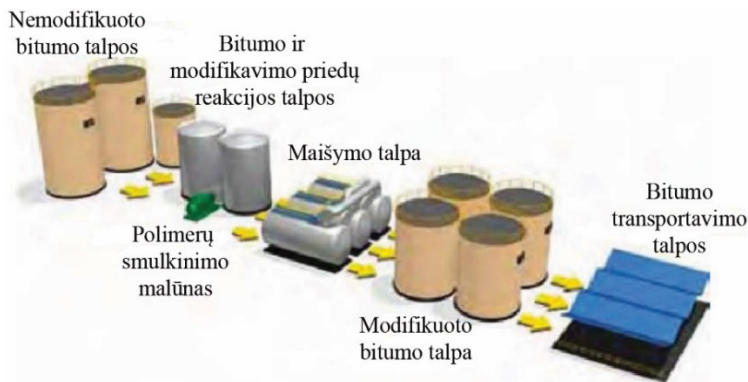
arba objekte ir kt. Nepaisant skirtingų modifikavimo technologijų, visos jos apima pagrindinius etapus:

- bitumo, priedų ir polimerų dozavimas;
- modifikavimo priedų ištirpinimas bitume;
- reakcijos tarp modifikavimo priedų ir bitumo užtikrinimas;
- modifikuoto bitumo sandėliavimas, transportavimas arba padavimas į asfalto maišyklę.

Šiuolaikinės modifikavimo gamyklos yra visiškai kompiuterizuotos, joms valdyti pakanka kelių operatorių.

Dažniausiai taikoma modifikavimo technologija, kai nmodifikuotas bitumas paduodamas į modifikavimo talpą, tada iki numatytos pakeliama bitumo temperatūra, įmaišomi priedai, kurie ištirpdomi ir išmaišomi naudojant cirkuliaciją ir maišytuvus, – taip gaunamas homogeniškas produktas, kuris yra tiekiamas į sandėliavimo talpą. Sandėliavimo talpa privalo turėti specialius maišytuvus. Nepaisant to, modifikuotas bitumas turi atitikti stabilumo sandėliuojant reikalavimus, todėl sandėliavimo talpoje būtina periodiškai maišyti modifikuotą bitumą ir naudoti cirkuliaciją. Modifikuotas bitumas talpoje gali būti sandėliuojamas iki 7 parų 160–180 °C temperatūroje. Tačiau po 5 parų turi būti iš naujo atliekami modifikuoto bitumo bandymai (Blazejowski *et al.* 2014).

Modifikuotas bitumas iš sandėliavimo talpos yra paduodamas tiesiai į asfalto mišinio maišymo bunkerį arba į autocisternas, kuriomis gabenamas klientams. Šios technologijos schema pateikta 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Principinė bitumo modifikavimo technologinė schema (Blazejowski *et al.* 2014)

Fig. 1.6. The principled bitumen modification system (Blazejowski *et al.* 2014)

Modifikavimo talpoje esantys maišytuvai užtikrina talpoje esančių polimerų išsimaišymą bitume, sumažina nestabilumo sandėliuojant riziką. Cirkuliacija dar pagerina polimerų ir bitumo persimaišymą.

Apibendrinant galima teigti, kad dažniausiai naudojamas bitumo modifikavimo priedas yra polimerai. Bitumo modifikavimui būtina naudoti pažangiausias technologines linijas, kurios yra visiškai kompiuterizuotos. Kadangi nėra nei vieno idealaus bitumo modifikatoriaus, kuris lengvai ištirptų bitume, o modifikuotas bitumas būtų itin stabilus, modifikavimui būtina naudoti homogenizatorius, kurie padeda ištirpdyti ir tolygiai paskirstyti bitume modifikavimo priedus, o sandėliavimui naudoti talpas, turinčias specialius maišytuvus ir cirkuliacijos funkciją.

Modifikuotas bitumas turi būti ekonomiškai naudingas, t. y. modifikavimo efektas turi būti toks, kad atsipirktų per tinkamą laikotarpį. Siekiant sumažinti modifikuoto bitumo kainą, galima naudoti pigesnes polimerines medžiagas, ypač kartotinio naudojimo medžiagas (gumą, plastiką). Šios kartotinio naudojimo medžiagos turi didžiulį potencialą, tačiau siekiant tinkamų modifikuoto bitumo savybių, būtina naudoti ir kitus priedus, t. y. galima modifikuoti bitumą skirtingų polimerų kombinacijomis (pvz. SBS polimerais ir panaudotų padangų guma). Tokiu būdu būtų gaunamas tinkamas ar net geresnių savybių produktas už prieinamą kainą.

1.3. Asfalto mišinių ir bitumo modifikavimas panaudotų padangų guma

Siekiant, kad ekonomika augtų tvariai, o ištekliai būtų naudojami išmoningai ir taupiai, 2015 metais Europos Komisija priėmė ilgai lauktą Žiedinės ekonomikos paketą. Žiedinėje ekonomikoje siekiama kuo ilgiau išlaikyti produktų ir medžiagų vertę, išmesti kuo mažiau atliekų ir naudoti kuo mažiau išteklių, o produktams praradus reikalaujamas savybes, išteklius išlaikyti ekonomikos cikle, kad jie galėtų būti dar ne kartą naudojami naujai vertei sukurti. Bet kokio produkto gyvavimo ciklas susideda iš 5 pagrindinių etapų: žaliavos, projektavimas, gamyba, su naudojimas, surinkimas ir perdirbimas (ETRMA 2015).

Kiekvienais metais, JAV sukaupiama 280 mln. vienetų panaudotų padangų, iš kurių 87,9 % yra surenkama. 41,9 % 2015 metais surinktų padangų panaudota energijos išgavimo tikslais, o 3,3 % panaudota bitumo modifikavimui (U. S. Tire Manufacturers Association 2017).

Europos Sąjungoje yra 13 padangų gamintojų (Bridgestone, Cooper, Pirelli ir kt.), kurie 86-iose gamyklose kasmet pagamina daugiau kaip 300 mln. vienetų naujų padangų. Tai sudaro ketvirtadalį visų pasaulyje pagaminamų padangų (ETRMA 2016). Skaičiuojama, kad ES panaudotų padangų kiekis kasmet padidėja 3,2 mln. tonų. Pastaruosius 20 metų ES itin sparčiai išaugo panaudotų padangų perdirbimo lygis, kuris siekia net 98 %. Deklaruojama, kad Lietuvoje kaip ir visoje Europoje, 49 % panaudotų padangų yra naudojama energijos išgavimo

tikslams (91 % iš jų yra deginama cemento gamyklų krosnyse), 46 % yra perdirbama, o 5 % panaudojimas nežinomas (ETRMA 2015).

Panaudotų padangų tvarkymas tapo kritine problema viso pasaulio mastu – didėjantis automobilių skaičius kasmet generuoja didžiulius panaudotų padangų kiekius. Nuo tada, kai atliekų laidojimas/užkasimas yra uždraustas, nuolat yra ieškoma efektyviausių panaudotų padangų panaudojimo sričių, taip gaunant didžiausią energijos potencialą. Remiantis Europos padangų perdirbimo asociacijos duomenimis, panaudotų padangų guma sėkmingai naudojama sporto aikščių dangų gamybai, kaip triukšmo sienučių užpildas, įvairių stogų dangų ir izoliacinių medžiagų gamybai, traukinių ir tramvajų sukeliama triukšmo mažinimo sprendinių įrengimui (ETRA 2016). Mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad panaudotų padangų guma gali būti sėkmingai naudojama betono gamyboje, nors betono stipruminės charakteristikos ir sumažėja (Atahan, Yücel 2012; Grinys, Sivilevičius & Daukšys 2012; Azevedo *et al.* 2012). Praktinė patirtis ir atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad panaudotų padangų guma gali būti sėkmingai panaudota bitumo modifikavimui arba kaip sudėtinis asfalto mišinių komponentas (Zanetti *et al.* 2015; ETRA 2016).

Panaudotų padangų guma asfalto mišinių ir bitumo modifikavimui pradėta naudoti 6-ojo dešimtmečio viduryje JAV. Technologija buvo patentuota, turėjo nemažai trūkumų, todėl platesnis jos taikymas buvo ribotas. Technologija praktiškai buvo nebenaudojama. 1991 metais JAV išleistas Intermodalinio sausumos ir jūros transporto efektyvumo aktas ir 1992 metais pasibaigusi McDonald'o proceso patentinė apsauga paskatino iš naujo apsvarstyti panaudotų padangų gumos panaudojimo asfalto mišinių ir bitumo modifikavimui klausimą. Nuo tada prasidėjo spartus modifikavimo technologijų progresas bei panaudojimo geografijos išplitimas (Lo Presti 2013).

Šiuo metu panaudotų padangų guma modifikuoto bitumo naudojimas yra plačiai paplitęs visame pasaulyje. Ši technologija jau daugiau kaip 30 metų taikoma bitumo modifikavimui, įtempis mažinančių sluoksnių įrengimui, stogų dangų medžiagų gamybai ir kt. srityse.

1.3.1. Panaudotų padangų gumos perdirbimo technologijos

Struktūriniu požiūriu, padangas sudaro šie pagrindiniai elementai: protektorius, karkasas, šoninė sienelė ir apsauginė juosta. Medžiagų požiūriu, padangos susideda iš natūralios gumos, sintetinės gumos, metalo, tekstilės ir priedų (Lo Presti 2013).

Atsižvelgiant į naudojimo paskirtį, padangų sudėtis šiek tiek skiriasi – sunkvežimių padangose yra daugiau natūralios gumos ir metalo bei visiškai

naudojama tekstilė. Automobilių ir sunkvežimių padangų sudėties palyginimas 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Lengvųjų automobilių ir sunkvežimių padangų sudėties palyginimas (ETRMA 2015)

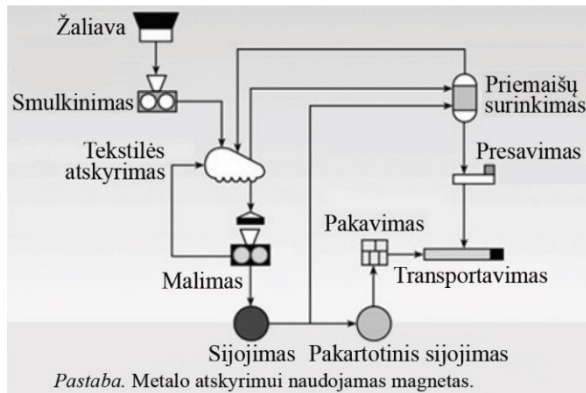
Table 1.3. Comparison of cars and trucks tyres composition (ETRMA 2015)

Medžiaga	Automobilio padanga, %	Sunkvežimio padanga, %
Guma/elastomerai	47	45
Anglies monoksidas	21,5	22
Metalas	16,5	25
Tekstilė	5,5	0
Cinko oksidas	1	2
Siera	1	1
Priedai	7,5	5

Kaip matyti iš 1.3 lentelės, didžiausią dalį padangos struktūros sudaro guma (47 % lengvųjų automobilių padangos ir 45 % – sunkvežimių padangos), anglies monoksidas (21,5 % lengvųjų automobilių padangos ir 22 % – sunkvežimių padangos) ir metalas (16,5 % lengvųjų automobilių padangos ir 25 % – sunkvežimių padangos).

Pasaulyje taikomi 2 pagrindiniai panaudotų padangų paruošimo asfalto mišinių modifikavimui būdai: malimas aplinkos temperatūroje (angl. *ambient grinding*) arba azote atšaldytos gumos malimas (angl. *cryogenic grinding*). Pirmuoju metodu padangų gumą smulkinama aplinkos temperatūroje. Šiuo metodu paruošiama panaudotų padangų guma, kurių dalelių forma yra netaisyklinga, gumos dalelių paviršius yra dalinai plėšytas, todėl užtikrinamas geras sukibimas su bitumu. Tai yra mechaninis malimas, atliekamas besisukančiais ašmenimis, kurio metu atskiriama tekstilė ir metalai. Šia technologija guma susmulkinama iki 0,5–5 mm dydžio. Šis metodas yra ekonomiškai efektyviausias ir dažniausiai naudojamas (Lo Presti 2011; Norhidayah Abdul Hassan *et al.* 2014; Taylor *et al.* 2012; Sulyman *et al.* 2014; Formela *et al.* 2016). Panaudotų padangų smulkinimo aplinkos temperatūroje supaprastinta technologinė schema pateikta 1.7 paveiksle.

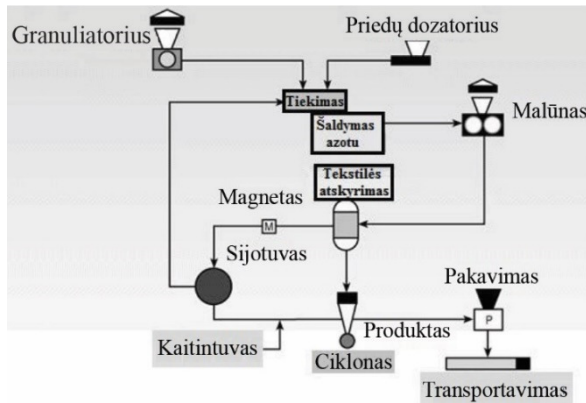
Azote atšaldytos gumos smulkinimas (angl. *cryogenic grinding*) yra sudėtingesnis procesas – guma atšaldoma azote nuo $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros iki tol, kol tampa trapi, tada naudojamas smūginis malūnas, kuris sutrupina sušalusią gumą į smulkias daleles su santykinai mažu paviršiaus plotu. Šiuo metodu guma susmulkinama iki 0,2–10 mm dydžio (Hassan *et al.* 2014; Sulyman *et al.* 2014; Hicks, Gary *et al.* 2013; Han *et al.* 2016).



1.7 pav. Tipinė panaudotų padangų smulkinimo aplinkos temperatūroje metodu proceso technologinė schema (Recycling Research Institute 2017)

Fig. 1.7. Typical ambient grinding system (Recycling Research Institute 2017)

Azote atšaldytos gumos malimo technologinio procesas: pirmiausia guma plėšoma į gabalus, vėliau apdorojama azotu, smūginiu malūnu sutrupinamos gumos dalelės, pašalinamas metalas ir tekstilė. Po to guma išdžiovinama, klasifikuojama, permalama ir sandėliuojama. Tipinė panaudotų padangų smulkinimo azote atšaldytos gumos metodu proceso technologinė schema pateikta 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Tipinė panaudotų padangų smulkinimo azote atšaldytos gumos metodu proceso technologinė schema (Recycling Research Institute 2017)

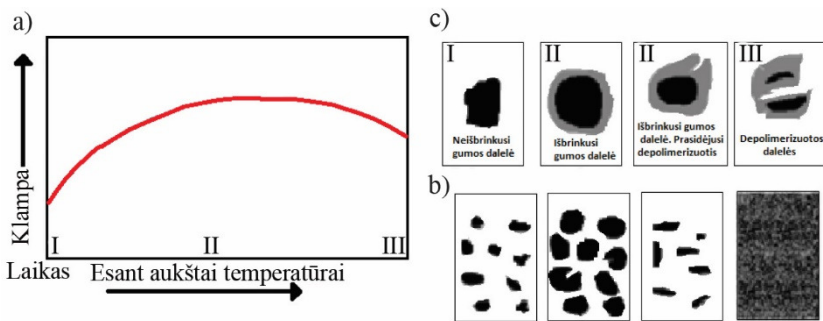
Fig. 1.8. Typical ambient grinding system (Recycling Research Institute 2017)

Apibendrinant literatūros analizę galima teigti, kad populiariausia panaudotų padangų gumos perdirbimo technologija – malimas aplinkos temperatūroje. Ši technologija yra ekonomiškai efektyviausia, gaunamas šiurkštesnis produkto paviršius, – tai pagerina sukibimą su bitumu.

1.3.2. Bitumo modifikavimo panaudojant gumą technologijos

Panaudotų padangų gumos panaudojimas asfalto mišinių modifikavimui turi 2 skirtingus požiūrius – sausasis (angl. *dry process*) ir drėgnasis (angl. *wet process*) modifikavimo metodai (technologijos). Oficialiai drėgnasis metodas papildomai dar išskiriamas į „didelės klampos“ (angl. *wet process-high viscosity*) ir „mažos klampos“ (angl. *wet process-no agitation*) (Hicks, Gary *et al.* 2013; Fornai *et al.* 2016; Subhy *et al.* 2015; Han *et al.* 2016; Wu *et al.* 2015). Tačiau naujausia bitumo modifikavimo panaudojant gumą technologija yra drėgnasis „hibridinis“ metodas – modifikavimas panaudojant tiek gumą, tiek SBS polimerus. Šio metodo privalumas – sumažinamas bitumo modifikavimui reikalingas brangių polimerų kiekis pakeičiant juos panaudotų padangų guma. Bet to, taip sprendžiama panaudotų padangų utilizavimo problema. Kadangi perspektyviausios modifikavimo technologijos yra drėgnasis „mažos klampos“ ir „hibridinis“, toliau nagrinėjamos tik jos.

Modifikuojant bitumą „mažos klampos“ metodu, nereikalinga papildoma įranga ar įprastos bitumo modifikavimo įrangos modifikacijos todėl, kad slėgio, temperatūros, maišymo reikalingi parametrai yra panašūs kaip ir bitumą modifikuojant vien SBS polimerais (Lo Presti 2013). Bitumo ir gumos sąveika aukštoje temperatūroje laikui bėgant pavaizduota 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Bitumo ir gumos sąveika aukštoje temperatūroje: a) bitumo klampa; b) bitumo matrica; c) dalelių dydžiai (Lo Presti *et al.* 2012)

Fig. 1.9. Bitumen-crumb rubber interaction phenomenon at elevated temperatures: a) bitumen viscosity; b) bitumen matrix; c) particles size (Lo Presti *et al.* 2012)

Kaip matyti iš 1.9 paveikslo, gumos dalelės iš pradžių įgeria bitumą, išbrinksta ir tik po tam tikro laiko aukštoje temperatūroje pradeda tirpti bitume. Bitumo sudėtis yra pagrindinis faktorius, nulemiantis bitumo ir gumos dalelių sąveiką. Bitumą modifikuojant guma, gumos dalelės absorbuoja aromatinių angliavandenilių frakciją iš bitumo, todėl išbrinksta. Toliau tęsiant modifikavimo procesą, gumos dalelių išbrinkimas pasiekia maksimalią ribą, todėl gumos dalelės susiskaido į mažesnes daleles. Toliau tęsiant procesą, gumos dalelės vis tirpsta

bitume, o modifikuojamo bitumo klampa pradeda mažėti (Lo Presti *et al.* 2012; Jensen, Abdelrahman 2006; Ould-Henia, Dumont 2006, Peralta *et al.* 2010).

Putman, Amirkhanian (2006) išskiria bitumo modifikavimo efekto priežastis į du tipus: bitumo ir gumos sąveikos efektas bei gumos dalelių efektas. Bitumo ir gumos sąveikos efektas yra sukliamas bitumo lengvųjų frakcijų (aromatinių angliavandenilių) difuzijos į gumą, o gumos dalelių efektas – tai gumos dalelės, veikiančios bitume kaip užpildas. Bitumo ir gumos sąveikos efektas priklauso nuo bitumo rūšies – kuo minkštesnis bitumas, tuo jis turi daugiau lengvųjų frakcijų, kurias absorbuoja guma, tuo toks bitumas yra labiau tinkamas modifikavimui. Taip pat šis efektas priklauso nuo gumos kiekio – didinant gumos kiekį, bitumo ir gumos sąveikos efektas didėja. Gumos dalelių efektas pasireiškia didinant modifikavimui naudojamą gumos kiekį (Putman, Amirkhanian 2006).

Dong *et al.* (2012) nustatė, kad gumos dalelių išbrinkimas itin priklauso nuo maišymo temperatūros – didinant temperatūrą, gumos dalelės absorbuoja daugiau aromatinių angliavandenilių ir daugiau išbrinksta. Nustatyta, kad gumos dalelės absorbuoja tik lengvuosius bitumo komponentus. Be to, ilgai taikant ilgos trukmės modifikavimo procesą, pasireiškia gumos dalelių senėjimo procesas (Dong *et al.* 2012). Šie mokslininkai pateikia formulę, pagal kurią galima apskaičiuoti maksimalų teorinį galimą gumos kiekį bitume:

$$\frac{m_a}{\rho_a} = 2,05 \times \frac{m_r}{\rho_r}, \quad (1.1)$$

čia ρ_a – bitumo tankis, g/cm^3 ; ρ_r – gumos tankis, g/cm^3 ; m_a – bitumo masė, g; m_r – gumos masė, g.

Kai bitumo tankis (ρ_a) yra $1,092 \text{ g/cm}^3$, gumos tankis ρ_r yra $1,15 \text{ g/cm}^3$, o bitumo masė (m_a) yra 100 g., tai pagal formulę (1.1) apskaičiuota maksimalus teorinis galimas gumos kiekis (m_r) yra 51,4 g. Praktikoje tokio didelio gumos kiekio panaudojimas bitumo modifikavimui yra sunkiai įmanomas, todėl modifikavimui naudojami ženkliai mažesni gumos kiekiai (Dong *et al.* 2012).

Katman (2016) taikydama Arenijaus lygtį (1.2 formulė), nustatė, kad didinant maišymo temperatūrą, reakcijos lygis tarp gumos ir bitumo didėja.

$$\eta = A \times e^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (1.2)$$

čia η – bitumo klamos vertės temperatūroje T ; A – Arenijaus konstanta (dažniau faktorius); E_a – aktyvacijos energija ($\text{J} \times \text{mol}^{-1}$); R – idealiųjų dujų būsenos konstanta ($8,314 \text{ J} \times \text{K}^{-1} \times \text{mol}^{-1}$); T – absoliutinė temperatūra (K).

Taip pat taikant Arenijaus lygtį, nustatyta, kad didinant gumos kiekį, didėja energija tarp gumos ir bitumo, todėl siekiant pakeisti gumos būseną, reikalingas mažesnis energijos kiekis (Katman 2016).

„Mažos klampos“ bitumo modifikavimo technologija pirmą kartą panaudota Floridoje ir Teksase 1980-ųjų viduryje, tačiau iki šiol naudojama tik nedidelėje JAV dalyse – Kalifornijos, Kolorado, Luizianos, Arizonos ir Nevados valstijose. Šio metodo idėja buvo pagaminti produktą, kuriame gumos dalelės būtų visiškai ištirpusios ir tolygiai pasiskirsčiusios bitume. Tai reiškia, kad neturi būti reikalingas joks papildomas nuolatinis bitumo maišymas siekiant išlaikyti modifikuotos medžiagos homogeniškumą. Tai pasiekama naudojant aukštą modifikavimo proceso temperatūrą (200–260 °C) ir didelį modifikavimo propelerių sukimosi intensyvumą (3000–4000 aps./min) (Han *et al.* 2016; Lo Presti *et al.* 2012; Zhou *et al.* 2014). Šiuo metu ši bitumo modifikavimo technologija yra taikoma JAV, Vokietijoje, Lenkijoje, Ispanijoje ir kt. šalyse. Tačiau skirtingose šalyse taikomos skirtingos bitumo modifikavimo specifikacijos. Atsižvelgiant į tai kitose šalyse taikomos bitumo modifikavimo specifikacijos apžvelgtos žemiau.

Bennert (2013) teigia, kad modifikavimo metu bitumas su guma yra „kepamas“ apie 16 valandų veikiant dideliame slėgiui ir maišant dideliu intensyvumu virš 220 °C temperatūroje. Esant šioms sąlygoms, guma beveik visiškai ištirpsta, todėl gaunamas homogeniškas, stabilus produktas, kuris yra lygiavertis polimerais modifikuotam bitumui. Šis bitumas nebeturi kenksmingo gumos kvapo. Atlikus tyrimą, praktiškai visi bitumai buvo linkę į nestabilumą sandėliuojant, todėl būtinas nuolatinis maišymas (Bennert 2013). Siekiant pagerinti modifikuoto bitumo stabilumą, siūloma naudoti nedidelį kiekį polimerų. Taip pat nustatyta, kad laikymo temperatūros sumažinimas padidina modifikuoto bitumo stabilumą (Attia *et al.* 2009).

2015 metais Caltrans (JAV) išleido atnaujintą guma modifikuoto bitumo specifikacijų dokumentą „Standartinės specifikacijos“ (angl. *Standard Specifications*), kuriame modifikuotas bitumas apibrėžiamas kaip panaudotų padangų guma ir/arba polimerais modifikuoti bitumas (Caltrans 2015). Vadinasi, kad guma modifikuotam bitumui (angl. *rubber modified bitumen*) keliami tie patys reikalavimai kaip ir įprastam polimerais modifikuotam bitumui. Panaudotų padangų gumai kaip bitumo modifikavimo priedui keliami tokie reikalavimai:

- minimalus gumos kiekis 10 %;
- guma turi susidaryti iš sunkvežimių ir lengvųjų automobilių padangų bei turi būti be priemaišų (audinys, metalas, mineralai ir kitos ne guminės medžiagos);
- guma modifikuotas bitumas turi būti homogeniškas bei neturi vizualiai matytis neištirpusių gumos dalelių.

Čia taip pat teigiama, kad modifikavimas, maišymas, asfalto mišinių reikalavimai, asfalto dangos sluoksnių įrengimas yra tokie patys, kaip ir naudojant įprastą bitumą. 1.4 lentelėje pateikti reikalavimai, keliami modifikuotam bitumui. Kadangi nėra išskirti guma modifikuoti bitumai, jiems galioja tie patys reikalavimai kaip ir polimerais modifikuotam bitumui (Caltrans 2015).

1.4 lentelė. Modifikuotiems bitumams keliami reikalavimai JAV (Caltrans 2015)**Table 1.4.** Requirements for modified bitumen in USA (Caltrans 2015)

Charakteristika	Metodas	Reikalavimai		
		PG 58-34 M	PG 64-28 M	PG 76-22 M
1	2	3	4	5
Bitumas				
Pliūpsnio temperatūra (min, °C)	AASHTO T 48	230	230	230
Ištirpimas (min, %)	AASHTO T 44	97,5	97,5	97,5
Klampa 135 °C (max, Pa×s)	AASHTO T 316	3,0	3,0	3,0
Dinaminė šlytis Bandymo temperatūra prie 10 rad/s (°C) $G^*/\sin\delta$ (min, kPa)	AASHTO T 315	58 1,00	64 1,00	76 1,00
RTFOT Masės pokytis (max, %)	AASHTO T 240	1,00	1,00	1,00
RFTO sendintas bitumas				
Dinaminė šlytis Temperatūra 10 rad/s (°C) $G^*/\sin\delta$ (min, kPa)	AASHTO T 315	58 2,20	64 2,20	76 2,20
Dinaminė šlytis Temperatūra 10 rad/s (°C) Fazės kampas δ (max, laipsniai)	AASHTO T 315	80	80	80
Tamprioji atstata Temperatūra (°C) Atstata (min, %)	AASHTO T 301	25 75	25 75	25 65
PAV, temperatūra (°C)	AASHTO R 28	100	100	100

1.4 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5
RFTOT ir PAV sendintas bitumas				
Dinaminė šlytis Temperatūra 10 rad/s (°C) $G^*/\sin\delta$ (min, kPa)	AASHTO T 315	16 5000	22 5000	31 5000
Standumas, Temperatūra (°C) S -vertė (max, MPa) m -vertė (min)	AASHTO T 313	-24 300 0,300	-18 300 0,300	-12 300 0,300

Vokietijoje modifikavimui naudojami kelių bitumai 50/70 ir 70/100. Modifikuojant drėgnuoju metodu, taikoma temperatūra apie 180 °C. Į bitumą dedama 10–20 % gumos nuo bitumo masės. Siekiant, kad gumos dalelės absorbuotų bitumo alyvinius komponentus, modifikuotas bitumas laikomas maišymo talpoje 1–2 valandas ir maišomas 2000–3000 aps./min intensyvumu (intensyvumas ir maišymo antgaliai turi būti parenkami tokie, kad būtų išvengta dalelių segregacijos). Taigi, guma modifikuotas bitumas yra riboto panaudojimo laiko. Jei reikalingas ilgesnis sandėliavimo laikotarpis, modifikuotas bitumas turi būti sandėliuojamas talpose su maišymo antgaliais ar cirkuliacine funkcija. Modifikuoto bitumo sandėliavimo temperatūra 160–180 °C. Negalima aukštesnėje temperatūroje sandėliuoti ilgiau kaip 3 paras – bitumo savybės gali pakisti, todėl reikia iš naujo tikrinti guma modifikuoto bitumo savybes. Maksimali asfalto mišinio maišymo temperatūra – 170 °C. Guma modifikuotas bitumas yra analogiškas polimerais modifikuotam bitumui (FGSV 2012).

Modifikavimui dažniausiai naudojama guma yra $\leq 0,8$ mm dydžio. Bitumo modifikavimas guma be priedų nerekomenduojamas. Remiantis FGSV (2012) dokumentu, galima naudoti šiuos priedus:

- aliejus, palengvinančius bitumo absorbciją į gumą;
- polimerus, pagerinančius technologiškumą ir apsaugančius nuo modifikuoto bitumo lipnumo prie įrangos;
- klampą keičiantys priedus, leidžiantys sumažinti temperatūrą ar pagerinti apdirbamumą.

1.5 lentelėje pateikti drėgnuoju metodu modifikuotam bitumui keliami reikalavimai.

1.5 lentelė. Drėgnuoju metodu modifikuotam bitumui keliami reikalavimai (FGSV 2012)
Table 1.5. Requirements of wet process modified bitumen (FGSV 2012)

Drėgnasis procesas	Viene- tai	GmB 25/55-50	GmB 25/55-55	GmB 25/55-65	Metodas
Sausasis procesas		GmBT 25/55-50	GmBT 25/55-55	GmBT 25/55-65	
1	2	3	4	5	6
Penetracija 25 °C (8 matavimai)	dmm	25-55	25-55	25-55	DIN EN 1426
Minkštėjimo tempera- tūra	°C	≥50	≥55	≥65	DIN EN 1427
Tankis 25 °C	g/cm ³	1,0–1,1			DIN EN ISO 3838
Pliūpsnio temperatūra	°C	≥235			DIN EN ISO 2592
Tamprioji atstata (20 cm, 25 °C)	%	≥50		≥60	DIN EN 13398
Charakteristikos žė- moje temperatūroje Standumas <i>S</i> (–16 °C) <i>m</i> -vertė (–16 °C)	MPa	≤200 ≥0,3	≤150 ≥0,3	≤200 ≥0,3	DIN EN 14771
Reologinės savybės Dinaminė šlytis (60 °C, 1,59 Hz su 2 mm tarpu) Dinaminis modulis <i>G</i> (60 °C) Fazės kampas δ	Pa °	≥6,000 ≤65	≥8,000 ≤65	≥10,000 ≤65	DIN EN 14770
Atsparumas kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, pagal DIN EN 12607-1 163 °C					
Masės pokytis	%	≤0,5			DIN EN 12607-1
Likutinė penetracija	%	≥60			DIN EN 1426
Minkštėjimo tempera- tūros padidėjimas	°C	≤8			DIN EN 1427

1.5 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6
Minkštėjimo temperatūros sumažėjimas	°C	\leq			DIN EN 1427
Tamprioji atstata (20 cm, 25 °C)	%	≥ 50			DIN EN 13398

Asfalto mišiniai su panaudotų padangų guma modifikuotu bitumu Vokietijoje taikomi net ir aukščiausios dangos konstrukcijos klasės dangų įrengimui. 1.6 lentelėje pateikta guma modifikuoto bitumo panaudojimas asfalto mišinių gamybai priklausomai nuo apkrovos klasės.

1.6 lentelė. Guma modifikuoto bitumo panaudojimas priklausomai nuo apkrovos klasės (FGSV 2012)

Table 1.6. The use of crumb rubber modified depending on load category

Apkrovos klasė	Asfalto mišiniai ir riškis		
	AC	SMA	PA
Bk 100-Bk32	GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55		
Bk 10-Bk3,2	GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55		GmB 25/55-55,
Bk 1,8-Bk0,3	GmB 25/55-50, GmBT 25/55-50		GmBT 25/55-55

Remiantis aukščiau pateiktomis 1.5 ir 1.6 lentelėmis galima teigti, kad guma modifikuoti bitumai yra lygiaverčiai polimerais modifikuotiems bitumams bei gali būti taikomi aukščiausios klasės asfalto mišiniams gaminti.

Itin svarbu paminėti, kad bitumą modifikuojant guma, būtini ir kiti priedai (vaškas, polimerai ir kt.). Taip pat po bitumo modifikavimo visos bitumo paviršiaus linijos turi būti išvalytos. Tai sukelia nepatogumų, papildomų sąnaudų. Turmpalaikis sandėliavimas gali būti taikomas be cirkuliacijos ir/arba maišymo. Ilgalaikiam sandėliavimui būtinas maišymas ir cirkuliacija (FGSV 2012).

Iš esmės „mažos klamos“ metodu modifikuoti bitumai yra panašūs į įprastai naudojamus bitumus, todėl projektavimo, specifikacijų ir įrengimo reikalavimai yra tokie patys kaip ir įprastai naudojamų bitumų (Schmalzer *et al.* 2014).

Ispanijoje bitumo modifikavimui „mažos klamos“ metodu, naudojama 10–11 % gumos, o modifikavimui naudojant „hibridinį“ modifikavimo metodą, naudojama 4–12 % gumos ir 2–4 % polimerų. Modifikavimui naudojamas bitumas 70/100 ir 110/120 bei guma fr. 0/0,8. Modifikavimui taikoma 185 °C temperatūra ir itin didelio intensyvumo spiralinės formos maišytuvai (maišymo greitis 4000–8800 aps./min) (Fornai *et al.* 2016).

„Didelės klampos“ bitumo taikymo asfalto mišinių įrengimo patirtis yra gerokai didesnė, todėl požiūris į „mažos klampos“ ar „hibridiniu“ metodu modifikuotą guma vis dar yra atsargus. Nepaisant to, tai yra naujausios ir perspektyviausios technologijos, leidžiančios išspręsti iškart 2 problemas; panaudojama perdirbtų padangų guma bei sumažinama modifikuoto bitumo kaina. Šios technologijos privalumai:

- nereikalinga jokia speciali papildoma įranga;
- modifikavimo, asfalto mišinių maišymo ir asfalto dangos sluoksnių klojimo temperatūros yra tokios pat kaip ir polimerais modifikuoto bitumo;
- šia technologija modifikuotas bitumas gali būti naudojamas visų tipų asfalto mišiniuose;
- ekonomiškai naudinga technologija.

1.3.3. Atliktų asfalto mišinių ir bitumo modifikavimo guma tyrimų analizė

Kitose šalyse panaudotų padangų guma modifikuotas bitumas asfalto mišinių gamybai naudojamas jau daugelį metų. Mokslininkai yra paskelbę daugybę mokslo darbų, kurių rezultatai iš pirmo žvilgsnio atrodo yra universalūs. Tačiau kiekviena šalis ar nedidelis regionas turi specifinių, tik jam būdingų aplinkybių, kurios ir nulemia modifikavimui naudojamų medžiagų ir sąlygų tinkamumą bei efektyvumą.

Panaudotų padangų guma modifikuoto bitumo savybėms turi įtaką modifikavimui naudojamos gumos sudėtis, dalelių dydis, modifikavimo trukmė, temperatūra, modifikavimo metu suteikiamų įtempių dydis ir kt. 1.7 lentelėje pateikta užsienio šalių mokslininkų bitumo modifikavimui naudojamos padangų gumos sudėties suvestinė.

1.7 lentelė. Užsienio šalių mokslininkų naudojamos padangų gumos sudėties suvestinė
Table. 1.7. Summary of other scientists used crumb rubber composition

Komponento pavadinimas Šaltinis	Polimerai (guma), %	Anglis, %	Pelenai, %	Plastifikatoriai ir kiti priedai, %	Gumos dalelių dydis, mm
1	2	3	4	5	6
(Rodríguez-Alloza <i>et al.</i> 2014)	57,41	32,22	6,02	4,67	–
(González <i>et al.</i> 2012)	40–55	30–38	3–7	–	<0,8
(Moreno <i>et al.</i> 2012)	50–55	20–38	<18	–	–

1.7 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6
(Manosalvas-Paredes <i>et al.</i> 2016)	57,41	32,22	6,02	4,67	–
(Plemons 2013)	54,84	30,05	5,96	–	–
(Hicks, Gary <i>et al.</i> 2013)	40–55	20–40	<8	–	0,150; 0,3; 0,6; 1,18
(Cao 2007)	49,0	29,5	6,0	–	–
(Wang <i>et al.</i> 2013)	56,5	28,4	3,6	–	–
(Mashaan <i>et al.</i> 2014)	46,6	25,08	5,2	–	<0,4

Kaip matyti iš 1.7 lentelėje pateiktos užsienio šalyse bitumo modifikavimui naudojamos gumos sudėties suvestinės, gumos sudėtis kinta nežymiai. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad mokslininkai tyrimams naudoja panašios/lygiavertės sudėties ir dydžio gumą. Taigi, gumos sudėties įtakos modifikuoto bitumo savybėms tyrimams ir gilesnei analizei nėra pagrindo.

1.3.3.1. „Mažos klampos“ modifikavimo metodas

Skirtingai nei asfalto mišinių modifikavimo guma sausuoju metodu ar bitumo modifikavimo panaudotų padangų guma drėgnuoju „didelės klampos“ metodu, „mažos klampos“ metodu modifikuotų bitumų mokslinių tyrimų nėra daug. Taip yra todėl, kad tai pati yra viena naujausių bitumo modifikavimo guma technologija.

Putman, Amirkhanian (2006) ir Jeong *et al.* (2010) nustatė, kad gumos panaudojimas bitumo modifikavimui pagerina bitumo reologines charakteristikas, o modifikavimo efektas didėja naudojant didesnę gumos kiekį. Modifikavimo guma efektas taip pat priklauso nuo gumos dalelių dydžio – modifikuoto bitumo klampa didėja mažinant gumos dalelių dydį, o kompleksinis šlyties modulis didėja didinant gumos dalelių dydį (Putman, Amirkhanian 2006).

Peralta *et al.* (2012) nustatė, kad modifikavimo metu bitumo senėjimas priklauso nuo temperatūros ir modifikavimo trukmės. Be to, senėjimo efektas labiau pastebimas modifikavimui naudojant minkštesnę bitumą. Nustatyta, kad guma modifikuoto bitumo savybės labiau priklauso nuo modifikavimui naudoto bitumo nei nuo gumos (Peralta *et al.* 2012).

Jeong *et al.* (2010) nustatė, kad didėjant modifikavimo temperatūrai ir ilgėjant trukmei, guma absorbuoja daugiau bitumo, todėl pagerėja modifikuoto bitumo kritinės aukščiausia temperatūra ir klampa.

Celauro *et al.* 2012 nustatė, kad didinant gumos kiekį, optimali modifikavimo proceso trukmė ilgėja – modifikavimui naudojant 6 % gumos nustatyta optimali trukmė yra 45 min, o naudojant 24 % gumos optimali modifikavimo trukmė yra 180 min. Nustatyta, kad gumos panaudojimas bitumo modifikavimui padidina bitumo standumą bei elastiškumą. Tai paaiškinama suformuotu elastomerų tinklu, kurio dėka bitumo elastingos savybės išryškėja aukštoje temperatūroje. Taip pat modifikavimo efektas didėja kartu su naudojamu gumos kiekiu. Mokslininkai išskiria modifikavimo trukmės svarbą – modifikuojant per ilgai prastėja modifikuoto bitumo elastingos savybės (Celauro *et al.* 2012).

Hosseinezhad *et al.* (2014) nustatė, kad guma fr. 0,074/0,177 mm bitume ištirpsta po 3 val., maišant 1600 aps./min intensyvumu, 150 °C temperatūroje.

Ragab *et al.* (2016) nagrinėjo bitumo modifikavimo intensyvumo ir temperatūros įtaką modifikuoto bitumo stabilumui. Nustatyta, kad optimalios modifikavimo sąlygos yra 190 °C temperatūra ir 3000 aps./min maišymo intensyvumas.

Mandal *et al.* (2016) nustatė, kad bitumą modifikuojant panaudotų padangų guma fr. 0/0,6 mm, pakankamos modifikavimo sąlygos yra 180 °C temperatūra, 2 val. trukmė ir 4000–4500 aps./min modifikavimo propelerių sukimosi greitis (Mandal *et al.* 2016). Atlikus klampos tyrimus, nustatyta, kad didinant gumos kiekį klampa didėja. Taip pat nustatyta, kad maišymo laikas labai svarbus naudojant 15–20 % panaudotų padangų gumos, kurių grūdelių dydis 0,075 mm. Naudojant gumą fr. 0/0,6 mm, modifikuoto bitumo klampa praktiškai nepriklauso nuo maišymo laiko ir gumos kiekio (vertinant 10 %, 15 % ir 20 % gumos maišant 2 val. bei 4–5 val.). Nustatyta, kad didesnis kiekis gumos pagerina modifikuoto bitumo atsparumą provėžoms. Nustatyta, kad smulkia panaudotų padangų guma modifikuotas bitumas jautresnis tiek trumpalaikiam, tiek ilgalaikiam sendinimui. Modifikuotas bitumas su stambesne panaudotų padangų guma po trumpalaikio sendinimo parodė geresnes charakteristikas nei prieš sendinimą. Taip pat bitumas su stambesne guma ir atsparesnis nuovargiui. Teigiama, kad svarbiausi faktoriai yra gumos dydis ir koncentracija, o modifikavimo trukmė nėra tokia svarbi (Mandal *et al.* 2016).

Hossain *et al.* (2016) nustatė, kad smulkios gumos (fr. 0/0,6) naudojimas bitumo modifikavimui padidina standumą, atsparumą provėžoms ir jautrumą vandeniui. Teigiama, kad panaudotų padangų guma gali būti polimerų alternatyva.

Tu *et al.* (2016) nustatė, kad naudojant 0,5 % velano gumos akivaizdžiai pagerinamas modifikuoto bitumo stabilumas sandėliuojant.

Ghavizaboo *et al.* (2013) nustatė, kad modifikuojant 160 °C ir 190 °C temperatūroje, modifikavimo intensyvumo ir trukmės padidinimas pagerina modifikuoto bitumo stabilumą. Taip pat gumos koncentracijos padidinimas modifikuojant 190 °C temperatūroje prie 1800 aps./min. intensyvumo pablogina modifikuoto bitumo stabilumą. Tačiau, modifikuojant bitumą 220 °C temperatūroje, gumos

koncentracijos padidėjimas pablogina modifikuoto bitumo stabilumą. Modifikavimas 190 °C temperatūroje taip pat pagerina modifikuoto bitumo stabilumą, nes tokiose sąlygose padidėja bitumo klampa, o gumos dalelių dydis mažėja. Šie du parametrai yra pagrindiniai, nulemiantys modifikuoto bitumo stabilumą (gumos dalelių nusėdimą bitume). Be to, ≤ 20 % gumos ištirpimas bitume (160 °C arba 190 °C temperatūroje per pirmas 15 min.) yra tik gumos alyvinės dalies išskyrimas į bitumo matricą. Akivaizdu, kad guma įgeria bitumo lengvasias frakcijas, išbrinksta ir gumos dalelių dydis šioje fazėje yra didesnis lyginant su pradinėmis gumos dalelėmis. Tačiau padidinus energijos sąnaudas (temperatūra, laikas ar greitis), gumos dalelės pradeda išskirti polimerinius komponentus į bitumo matricą. Šie komponentai apibūdina gumos dalelių tūrį, todėl jų išskyrimas į bitumą nulemia gumos dalelių sumažėjimą. Atlikus termo-gravimetrinę analizę, nustatyta, kad modifikuojant 190 °C temperatūroje 1800 aps./min. intensyvumu po 240 min, gumos dalelė savyje dar turi polimerinių komponentų ir gumos dalelių sudėtis dar nėra pasikeitusi. Modifikuojant bitumą 220 °C temperatūroje 3000 aps./min. intensyvumu, po 240 min modifikavimo trukmės, gumos dalelės jau yra išskyrusios į bitumą visus polimerinius komponentus, likę tik tokie komponentai kaip juodoji anglis. Jei bitumo modifikavimui naudojami nedideli kiekiai gumos, didinant temperatūrą, modifikuoto bitumo stabilumas gerėja. Tačiau jei gumos koncentracija didelė, aukštoje temperatūroje neištirpsta juodoji anglis, kurios tankis yra 1,8–2,1 g/cm³. Kadangi bitumo tankis yra apie 1,02 g/cm³, o gumos dalelių tankis yra 1,15 g/cm³, tai nulemia modifikuoto bitumo nestabilumą. Kadangi modifikuoto bitumo stabilumo pokytis modifikuojant bitumą 190 °C ir 220 °C temperatūroje, nėra labai reikšmingas, kaip optimalios bitumo modifikavimo sąlygos naudojant 10 % gumos dalelių, rekomenduojamos 190 °C modifikavimo temperatūra, 240 min trukmė ir 3000 aps./min.

Mokslininkai Ghavibazoo *et al.* (2014) nagrinėjo panaudotų padangų gumos ištirpimo įtaką bitumo funkcionavimui ir senėjimui žemoje temperatūroje. Bitumas modifikuotas 10 % ir 20 % fr. 0,422/0,599 mm gumos. Eksperimento kintamieji: temperatūra, maišymo greitis, trukmė. Atlikus gumos ištirpimo bitume bandymą, nustatyta, kad ištirpimo lygį labiausiai nulemia temperatūra, taip pat maišymo greitis ir laikas. Modifikuoto bitumo bandymų lenkiamojo strypelio reometeru (angl. *Bending Beam Rheometer*) rezultatai parodė, kad gumos naudojimas sumažina bitumo standumą labai žemoje temperatūroje ir esant didesniam gumos ištirpimo lygiui bitume standumas sumažėja dar labiau. Taip pat kuo didesnis bitumo modifikavimui panaudotas gumos kiekis, tuo labiau pasireiškia šis efektas. Esant dideliame bitume neištirpusios gumos kiekiui (≤ 40 % nuo modifikavimui panaudotos gumos kiekio), modifikuoto bitumo mažesnis standumas yra grindžiamas elastiška gumos elgsena trapijoje terpėje (sumažėja bitumo standumas ir *m*-vertė). Be to, bitumo aromatiniai junginiai įsigeria į neištirpusią gumą, – tai pablogina *m*-vertę. Vadinasi elastiškų gumos dalelių buvimas bitume sumažina jo

atsparumą įlinkiams bei pablogina įtempių relaksaciją. Esant dideliame gumos ištirpimo bitume lygiui ($\geq 40\%$) nuo modifikavimui panaudotos gumos kiekio), mažesnis modifikuoto bitumo standumas grindžiamas dėl ištirpusios gumos pasikeitusia bitumo sudėtimi. Taip pat ištirpusios gumos aromatiniai junginiai padidina bitumo m -vertę iki nemodifikuoto bitumo ar net dar labiau. Atlikus bandymą po bitumo ilgalaikio sendinimo procedūros (angl. *Pressure Aging Vessel*), nustatyta, kad modifikuotas bitumas su 20% gumos, parodė geresnius rezultatus žemoje temperatūroje lyginant su nemodifikuotu bitumu (Ghavibazoo *et al.* 2014).

Ghavibazoo (2013) teigia, kad bitumą modifikuojant 160 °C temperatūroje prie 600 aps./min modifikavimo intensyvumo, gumos dalelės įgeria bitumo aromatinis komponentus ir išbrinksta. Bitumą modifikuojant 220 °C temperatūroje 3000 aps./min intensyvumu, gumos dalelės ištirpsta bitume ir išsiskirsto į juodosios anglies, užpildo, polimerinius ir alyvinius komponentus. Nustatyta, kad modifikavimo temperatūra yra pagrindinis faktorius, nulemiantis gumos dalelių ištirimą bitume. Remiantis dinaminio šlyties reometro (angl. *Dynamic Shear Rheometer*) bandymo rezultatais, teigiama, kad modifikuojant bitumą vidutinėje temperatūroje (190 °C), atsiskyrę gumos komponentai yra žymiai efektyvesni bitumo savybių pagerinimo atžvilgiu, nei gumos komponentai, atsiskyrę aukštoje temperatūroje (220 °C). Atlikus bitumo, modifikuoto 190 °C temperatūroje bandymus lenkiamojo strypelio reometeru, nustatyta, kad didėjant ištirpusios gumos dalelių kiekiui, bitumo standumas žemoje temperatūroje mažėja, kai m -vertė lieka pastovi. O esant 220 °C temperatūrai modifikuoto bitumo savybės žemoje temperatūroje blogėja. Taip pat nustatyta, kad modifikuojant bitumą 160 °C temperatūroje, modifikavimo greitis ir trukmė neturi įtakos gumos dalelių ištirpimo lygiui. Tačiau didinant temperatūrą, šių kintamųjų įtaka didėja. Kitaip sakant, modifikavimo greitis ir trukmė yra priklausomi nuo modifikavimo temperatūros. Vertinant gumos dalelių koncentraciją, mokslininkas teigia, kad taikant didelį kiekį gumos ($\geq 20\%$), bitume nepakanka aromatinių komponentų, todėl guma negali visiškai ištirpti. Kiti mokslininkai pataria naudoti papildomus priedus. Rekomenduojama bitumą modifikuoti guma 190 °C temperatūroje 3000 aps./min intensyvumu, nes tokiomis sąlygomis gaunamas homogeniškas, padidinto atsparumo aukštai temperatūrai bitumas. Tačiau modifikuoto bitumo stabilumas sandėliuojant, jautrumas sendinimui ir funkcionavimas žemoje temperatūroje turėtų būti detalčiau išnagrinėtas.

Willis *et al.* (2013) atliko gumos charakteristikų bitumo savybėms įtakos tyrimą, kurio metu iširta 12 guma modifikuotų bitumų: bitumas PG 70–22 buvo modifikuotas 10% 0,05–0,6 mm dydžio guma (viso 12 variantų), susmulkinta skirtingose temperatūrose. Papildomai paruošti 2 variantai, dedant 15% gumos. Nustatyta, kad gumos malimo metodas ir gumos dalelių dydis neturi reikšmingos įtakos aukščiausiai kritinei temperatūrai – visų 14 guma modifikuotų bitumų aukš-

čiausia kritinė temperatūra ≥ 76 °C, o 5 iš jų (įskaitant ir abu 15 % guma modifikuotus bitumus), aukščiausia kritinė temperatūra ≥ 82 °C. Tyrimo metu nustatyta, kad naudojant 15 % gumos, žemiausia kritinė temperatūra sumažėja nuo -22 °C iki -16 °C. Tai pat, galima įžvelgti tendenciją, kad aplinkos temperatūroje malta guma šiek tiek pablogina atsparumą šalčiui. Reikšminga gumos dalelių dydžio ir žemiausios kritinės temperatūros priklausomybė nenustatyta. Tačiau nustatyta, kad stambesnės nei 0,150 mm gumos dalelės gali turėti tendenciją atsiskirti nuo bitumo. Tai reiškia, kad siekiant bitumo modifikavimui naudoti stambesnę gumą, būtinas modifikuoto bitumo nuolatinis maišymas ir/arba cirkuliacija (Willis *et al.* 2013).

Korėjos mokslininkai Kim *et al.* (2014) bitumo PG 64-22 modifikavimui panaudojo 8 %, 10 % ir 12 % gumos. Naudota bitumo modifikavimo procedūra: guma lėtai įberta į 180 °C temperatūros bitumą, kuris maišytas 5000 aps./min intensyvumu 30 min. Nustatyta, kad guma daugiausiai turi įtakos bitumo atsparumui nuovargiui 20 °C temperatūroje, vidutiniškai turi įtakos atsparumui deformacijoms 60 °C temperatūroje ir mažiausiai – jautrumui vandeniui 25 °C temperatūroje. Nustatyta, kad 10 % gumos yra optimalus kiekis bitumo modifikavimui (Kim *et al.* 2014).

Sybilski *et al.* (2011) atliko eksperimentinį tyrimą, kurio metu 10 % gumos “TechRoad” modifikuoti kelių bitumai 50/70 ir 70/100. Panaudojant šiuos modifikuotus bitumus, pagaminti 2 tipų asfalto mišiniai – viršutinio sluoksnio asfalto mišinys SMA 11 S ir pagrindo sluoksnio asfaltbetonis AC 16. Nustatyta, kad asfalto mišinių su guma modifikuotu bitumu atsparumas provėžoms, jautrumas vandeniui, standumas ir atsparumas šalčiui yra geresnis lyginant su asfalto mišiniais panaudojant polimerais modifikuotą bitumą. Taip pat nustatytas nežymiai prastesnis asfalto mišinių su guma modifikuotu bitumu atsparumas nuovargiui. Ši problema turi būti išsprędžiama projektuojant asfalto mišinius remiantis JAV patirtimi – turėtų būti naudojama 15–20 % gumos nuo mišinio masės (Sybilski *et al.* 2011).

Sulyman (2013) modifikavimo bitumą 70/100 skirtingais kiekiais gumos fr. 0/0,8 – 3 %, 5 %, 10 % ir 15 %. Nemodifikuoto bitumo penetracija – 65 dmm, minkštėjimo temperatūra – 47,7 °C. Nustatyta, kad bitumo modifikavimas iki 3 % gumos neturi reikšmingos įtakos bitumo savybėms. Modifikavus bitumą 5 % gumos, nustatyta penetracija 48 mm⁻¹, 10 % – dmm, 15 % – 40 dmm. Modifikavus bitumą 5 % gumos, nustatyta minkštėjimo temperatūra – 51 °C, 10 % – 57 °C, 15 % – 59 °C. Atsižvelgiant į šiuos rezultatus, galima teigti, kad didinant gumos kiekį, penetracija mažėja, o minkštėjimo temperatūra didėja (Sulyman 2013).

Skotnicki *et al.* (2012) metais pristatė guma modifikuotų skaldos ir mastikos asfalto (SMA) mišinių eksperimentinį tyrimą, kuriame įvertintas atsparumas nuovargiui, provėžoms ir jautrumas vandeniui. Eksperimentinio tyrimo pradžioje kelių bitumai 35/50 ir 50/70 modifikuoti 10 %, 12 %, 14 % ir 16 % gumos nuo bitumo masės. Nustatytas ženklus bitumo minkštėjimo temperatūros padidėjimas – kelių bitumui 35/50 nuo 51 °C iki 57 °C, o kelių bitumui 50/70 nuo 55 °C iki 63 °C naudojant 10 %

gumos. Taip pat nustatytas ženklus bitumo penetracijos sumažėjimas – kelių bitumui 35/50 nuo 24 dmm iki 20 dmm, o kelių bitumui 50/70 nuo 40 dmm iki 32 dmm naudojant 10 % gumos. Be to, modifikavus kelių bitumą guma, nustatytas ženklus modifikuoto bitumo dinaminės klampos padidėjimas. Kadangi per didelė bitumo klampa gali sukelti problemų maišant ir klojant asfalto mišinius, optimaliu gumos kiekiu parinktas 10 % nuo bitumo masės. Vėliau su 10 % gumos modifikuotais bitumais 35/50 ir 50/70 suprojektuoti ir pagaminti du SMA mišiniai. Šių mišinių granulimetrinės sudėties kreivė parinkta tokia, kad atitiktų Lenkijos norminių dokumentų reikalavimus. Asfalto mišinių tyrimų rezultatai pateikti 1.8–1.9 lentelėse.

1.8 lentelė. Skaldos ir mastikos asfalto mišinio su guma modifikuoto bitumu 35/50 tyrimų rezultatai

Table 1.8. Results of stone mastic asphalt mix with crumb rubber modified bitumen 35/50

Savybė	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas	Reikalavimai
Oro tuštymių kiekis	V_m	%	3,56	3,0÷4,0
Santykinis vėžės gylis	PRD_{AIR}	%	2,78	≤5,0
Vėžės formavimosi greitis	WTS_{AIR}	mm/10 ³ ciklą	0,026	≤0,30
Jautrumas vandeniui ir šalčiui	$ITSR$	%	103,51	≥90
Rišiklio nusidrenavimas	D	%	0,01	≤0,30

1.9 lentelė. Skaldos ir mastikos asfalto mišinio su guma modifikuoto kelių bitumu 50/70 tyrimų rezultatai

Table 1.9. Results of stone mastic asphalt mix with crumb rubber modified bitumen 50/70

Savybė	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas	Reikalavimai
Oro tuštymių kiekis	V_m	%	3,40	3,0÷4,0
Santykinis vėžės gylis	PRD_{AIR}	%	4,28	≤5,0
Vėžės formavimosi greitis	WTS_{AIR}	mm/10 ³ ciklą	0,052	≤0,30
Jautrumas vandeniui ir šalčiui	$ITSR$	%	91,96	≥90
Rišiklio nusidrenavimas	D	%	0,03	≤0,30

Papildomai atlikti asfalto mišinių atsparumo nuovargiui ir standumui bandymai 4 taškų lenkimo metodu (angl. *4 Point Bending*) metodu 10 °C temperatūroje ir taikant 10 Hz dažnį. Nustatyta, kad asfalto mišinių su guma modifikuotu bitumu standumas yra lygiavertis aukšto modulio asfalto mišinių (angl. *High Modulus Asphalt Concrete*) standumui – SMA 11 S su 35/50 + 10 % gumos – 13482 MPa, o SMA 11 S su 50/70 + 10 % gumos – 12857 MPa. SMA 11 S guma modifikuotu bitumu atsparumas nuovargiui taip pat ženkliai geresnis nei įprasto mišinio – $\varepsilon_6 = 167 \mu\text{m}$. Taigi, SMA 11 S asfalto mišinys su guma (10 %) modifikuotu bitumu, standumo ir atsparumo nuovargiui požiūriu yra lygiavertis HMAC mišiniams (Skotnicki *et al.* 2012).

Valentin *et al.* (2014) atliko guma modifikuoto bitumo tyrimus. Tyrimo metu naudoti kelių bitumai 50/70 ir 70/100, kurie modifikuoti 10 % ir 15 % gumos. Iš viso ištirti 28 skirtingi guma modifikuoto bitumo variantai atliekant minkštėjimo temperatūros, penetracijos, tampriosios atstatos ir dinaminės klampos bandymus. Nustatyta, kad smulkesnė guma nulemia geresnį atsparumą nuovargiui, o stambesnė – atsparumą provėžoms ir plyšių susidarymui žemoje temperatūroje. Bitumo modifikavimo poveikis priklauso tiek nuo gumos dalelių dydžio, tiek nuo gumos smulkinimo metodo. Šiurkščia stambia guma (daugiau kaip 0,5 mm) modifikuoto bitumo atsparumas provėžoms panašus kaip PMB modifikuoto bitumo, tačiau guma modifikuotas bitumas sunkiau apdirbamas. Smulkesnė guma (mažiau kaip 0,5 mm) modifikuotas bitumas pasižymi 50 % mažesne klampa 150 °C temperatūroje. Taip pat nustatyta, kad cheminių priedų (TOR Vestenamer, Zycotherm ir Polyol) naudojimas pagerina modifikuotų bitumo stabilumą (Valentin *et al.* 2014).

Yousefi Kebria *et al.* (2015) nagrinėjo gumos įtaką modifikuoto bitumo reologinėms savybėms. Bitumas 60/70 modifikuotas 5 skirtingais gumos kiekiais: 4 %, 8 %, 12 %, 16 % ir 20 %. Bitumo modifikavimo guma procesas susidarė iš 2 etapų: iš pradžių guma įdėta į bitumą 160–180 °C temperatūroje ir maišyta 10 min 200 aps./min intensyvumu. Po to modifikuotas bitumas maišytas 30 min 4500 aps./min intensyvumu. Modifikuoto sendinto ir nesendinto bitumo atsparumas provėžoms ir nuovargiui įvertintas naudojant DSR (naudotos 2 bandymų geometrijos: 25 mm – atsparumui provėžoms įvertinti ir 8 mm – atsparumui nuovargiui įvertinti). Taip pat atlikti standartiniai penetracijos, minkštėjimo temperatūros, tampriosios atstatos ir klampos nustatymo bandymai. Nustatyta, kad didinant gumos kiekį bitume, minkštėjimo temperatūra ir tamprioji atstata didėja, o penetracija mažėja. Taip pat bitumo modifikavimas guma pagerina modifikuoto bitumo atsparumą provėžoms. Be to, didėjant temperatūrai, gumos įtaka modifikuoto bitumo savybėms didėja. Atkreiptinas dėmesys į tai, kad 4 % gumos praktiškai nepagerina modifikuoto bitumo atsparumo nuovargiui. Be to, nustatyta, kad gumos

kiekio pokytis nuo 16 % iki 20 % pernelyg padidina klampą 135 °C temperatūroje. Remiantis tyrimo rezultatais, nustatytas optimalus gumos kiekis yra 16 % (Yousefi Kebria *et al.* 2015).

Zeinali *et al.* (2014) įvertino asfalto mišinių su guma ir polimerais modifikuotu bitumų savybes. Kaip parodė tyrimo rezultatai ir jų analizė, asfalto mišinys su guma modifikuotu bitumu yra atsparesnis provėžoms nei asfalto mišinys su polimerais modifikuotas bitumu. Abu asfalto mišiniai atsparūs nuovargiui. Autoriai teigia, kad tinkamas modifikuotas ir pagaminti asfalto mišiniai su guma modifikuotu bitumu gali būti lygiaverčiai arba geresnių charakteristikų nei asfalto mišiniai su polimerais modifikuotų bitumu (Zeinali *et al.* 2014).

Kjosavik (2013) atliko eksperimentinį tyrimą, kuriame įvertinta bitumo ir gumos sąveika modifikuojant bitumą skirtingomis trukmėmis. Modifikuoto bitumo 100/150 ir 160/220 savybės buvo įvertintos DSR ir BBR prietaisais atliekant bandymus su nesendintu ir sendintu bitumu. Bitumas prieš modifikavimą maišytas 10 min 150 °C temperatūroje 5000 aps./min intensyvumu. Į bitumą įdėjus 10 % gumos, bitumas buvo maišomas 5 min, 15 min, 30 min ir 60 min. Tyrimo rezultatai parodė, kad guma modifikuotas bitumas yra atsparesnis provėžoms aukštoje temperatūroje lyginant su nemodifikuotu bitumu. Nustatyta, kad modifikavimo trukmė reikšminga tik nesendintam bitumui, kurio rezultatai kito priklausomai nuo modifikavimo trukmės. Kaip ir buvo tikėtasi, ilgėjant modifikavimo trukmei, padidėjo modifikuoto bitumo standumas (Kjosavik 2013).

Literatūroje išskiriama, kad gumos smulkinimo būdas turi didelę įtaką modifikuoto bitumo savybėms aukštoje temperatūroje, tačiau nežymią įtaką savybėms žemoje temperatūroje (Lee *et al.* 2008).

Apibendrinant galima teigti, kad įvairių šalių mokslininkai laikosi skirtingų nuomonių ir pozicijų bitumo modifikavimo guma tematika. Analizuojant literatūrą pastebėta, kad kai kurie mokslininkai neigiamai vertina bitumo modifikavimą guma – šios technologijos priešininkai net parašė studijas, įrodančias šio proceso trūkumus.

Skirtingi bitumo modifikavimo metodai skirtingai veikia modifikavimui naudojama gumą – nuo visiško gumos ištirpimo bitume iki visiško gumos neištirpimo bitume (Asphalt Research Group 2011). Modifikuojant bitumą drėgnuoju „didelės klampos“ metodu, guma tik dalinai ištirpsta bitume, per tam tikrą laiko tarpą sukurdamą į gelį panašią kompoziciją. Modifikuojant bitumą drėgnuoju „mažos klampos“ metodu, guma visiškai ištirpsta bitume. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad yra didelis pavojus dėl per didelio gumos ištirpimo, tai gali eliminuoti modifikuoto bitumo standumą ir elastingumą. Taip pat, pats efektyviausias bitumo modifikavimo metodas yra tada, kai guma ne visai ištirpsta bitume. Gumos ištirpimas nėra susijęs su eksploatacinėmis bitumo savybėmis, tačiau susijęs su modifikuoto bitumo stabilumu sandėliuojant. Autoriai neigiamai žiūri į bitumo modifikavimą drėgnuoju „mažos klampos“ metodu, nes modifikavimui panaudojamas mažas kiekis

gumos arba dar net papildomai naudojami polimerai. Modifikuojant drėgnuoju „mažos klampos“ metodu, vyksta pirolizės procesas: guma, veikiamą karščio ir slėgio išsiskaido į juodąją anglį, dujas ir nesočiuosius komponentus. Šis procesas pablogina modifikuoto bitumo elastines savybes. Nustatyta, kad bitumą modifikuojant 25 % gumos 260 °C temperatūroje, gumos įtaka bitumo savybėms praktiškai yra eliminuojama. Taip pat modifikuojant bitumą kelias dienas 500 aps./min intensyvumu, gumos ištirpimo greitis toks pat, kaip maišant 1500 aps./min intensyvumu maišant mažiau kaip 4 val. (Asphalt Research Group 2011).

Glover *et al.* (2000) nustatė, kad bitumo modifikavimo temperatūros, trukmės ir intensyvumo padidėjimas, padeda pasiekti didesnę gumos ištirpimo bitume lygį, – tai pagerina modifikuoto bitumo reologines savybes žemoje ir vidutinėje temperatūroje. Taip pat po pradinio klampos padidėjimo aukštoje temperatūroje, modifikuoto bitumo klampa mažėja didėjant gumos ištirpimo bitume lygiui. Mokslininkai teigia, kad 3 kartus padidinus modifikavimo greitį, reikiamas modifikavimo laikas sutrumpėja 9 kartus. Bitumo, modifikuoto mažesniu intensyvumu ilgesnį laiką, savybės yra tokios pat, kaip ir modifikuoto didesniu intensyvumu trumpesnį laiką. Teigiama, kad taikant aukštą modifikavimo temperatūrą, greitį ir prailgintą trukmę, guma ištirpsta bitume ir gaunamas homogeniškas, elastiškas produktas. Nustatyta, kad taikant itin aukštą temperatūrą, gaunamas homogeniškas ir stabilus bitumas, kurio klampa nedidelė, didesnis atsparumas provėžų bei plyšių susidarymui. Bitumo, modifikuoto 260 °C temperatūroje klampa aukštoje temperatūroje ir fazės kampas yra mažesni nei bitumo, modifikuoto 232 °C temperatūroje, t. y. elastiškumas yra didesnis. Tačiau kompleksinė klampa yra mažesnė modifikuojant aukštesnėje temperatūroje bei mažėja laikui bėgant iki tol, kol stabilizuojasi. Nustatyta, kad padidinus modifikavimo greitį nuo 4000 aps./min iki 8000 aps./min, sumažėja modifikuoto bitumo kompleksinė klampa, tačiau padidėja elastiškumas. Bitumo klampa aukštoje temperatūroje nuo modifikavimo intensyvumo nesikeičia, tačiau sumažėja gumos nusėdimas. Modifikuojant bitumą 260 °C temperatūroje ir 8000 aps./min intensyvumu, gumos dalelių nusėdimas mažėja didėjant modifikavimo trukmei. Bitumo, modifikuoto 260 °C temperatūroje standumas žemoje temperatūroje didėja modifikavimo trukmei ilgėjant, o bitumo, modifikuoto 232 °C temperatūroje, standumas žemoje temperatūroje mažėja ilgėjant modifikavimo trukmei. Nepasaint to, bitumo standumas po 6,5 val modifikavimo 260 °C temperatūroje yra mažesnis nei nmodifikuoto bitumo. Taip pat nustatyta, kad bitumo modifikavimo temperatūros pakėlimas nuo 232 °C iki 260 °C, ženkliai padidina gumos ištirpimo bitume lygį, o modifikavimo intensyvumo padidėjimas nuo 4000 aps./min iki 8000 aps./min pagerina stabilumą, sumažina gumos nusėdimą bitume. Nustatyta, kad modifikuojant bitumą 260 °C temperatūroje, 20 % gumos ištirpsta greičiau nei 10 % gumos

232 °C temperatūroje. Padidinus modifikavimui naudojamos gumos kiekį, padidėja bitumo kompleksinė klampa ir klampa aukštoje temperatūroje, o bitumo fazės kampas sumažėja. Tačiau bitumo fazės kampas didėja ilgėjant modifikavimo trukmei. Fazės kampo sumažėjimas ir klamos padidėjimas nulemia atsparumo provėžoms padidėjimą. Bitumo standumas žemoje temperatūroje mažėja didinant gumos kiekį. Teigiama, kad bitumo modifikavimas 4–6 val. 230–260 °C temperatūroje ženkliai pagerina bitumo stabilumą (Glover *et al.* 2000).

Glover *et al.* (2000) nustatė, kad bitumą modifikuojant 232 °C temperatūroje 3,5 val., bitumo atsparumo provėžoms parametras $G^*/\sin\delta$ sumažėja iki nemodifikuoto bitumo. Tai dar kartą patvirtina, kad per ilgas modifikavimo procesas nepagerina bitumo savybių. Taip pat mokslininkai nustatė, kad per ilgas modifikavimo procesas neigiamai veikia funkcionavimą žemoje temperatūroje. Be to, nustatyta, kad per ilgas modifikavimo procesas neigiamai veikia fazės kampą – jis padidėja, kas rodo sumažėjusį elastingumą. Mokslininkai teigia, kad per ilgo modifikavimo metu ištirpsta polimerų grandinės ir skersiniai ryšių struktūros. Tokiomis sąlygomis mažėja klampa, tačiau vis tiek išlieka didesnė nei nemodifikuoto bitumo (Asphalt Research Group 2011).

Atsižvelgiant į aukščiau pateiktą analizę, galima teigti, kad bitumo modifikavimas vien panaudotų padangų guma negali vienu metu užtikrinti stabilumo sandėliuojant, klamos, ženklaus kritinės aukščiausios ir žemiausios temperatūros padidėjimo. Todėl mokslininkai nuolat ieško esamų technologijų patobulinimų. Pati naujausia technologija – bitumo modifikavimas guma ir SBS polimerais. Kitame poskyryje yra pateikta bitumo modifikavimo guma ir SBS polimerais atliktų mokslinių tyrimų analizė.

1.3.3.2. „Hibridinis“ modifikavimo metodas

Sienkiewicz *et al.* (2017) teigia, kad 6 % panaudotų padangų gumos ir SBS polimerų užtikrina modifikuoto bitumo stabilumą sandėliuojant net 7 paras minkštėjimo temperatūros ir penetracijos atžvilgiu.

Krol *et al.* (2014) paskelbė asfalto mišinių su guma ir polimerais modifikuotais bitumais tyrimų rezultatus. Tyrimo metu naudotas bitumas PMB 45/80-55 CR (~10 % gumos ir SBS polimerų), įprastas PMB 45/80-55 ir kelių 50/70. Mokslininkai teigia, kad modifikavimas guma kartu su polimerais užtikrina bitumo sandėliavimo ir transportavimo stabilumą aukštoje temperatūroje. Taip pat gumos panaudojimas padeda sumažinti bitumo modifikavimui reikalingą SBS polimerų kiekį iki 50 %. Nustatyta, kad bitumo PMB 45/80-55 CR dinaminė klampa 60 °C temperatūroje yra 3 kartus didesnė nei įprastų bitumų, tačiau padidinus temperatūrą iki 150 °C ar iki 165 °C, klampa nustatyta vienoda lyginant su bitumu PMB

45/80-55, atitinkamai 0,5–0,6 Pa \times s 150 °C ir 0,2 Pa \times s 165 °C temperatūroje. Atlikus modifikuoto bitumo kritinės žemiausios temperatūros nustatymo bandymą BBR metodu, nustatyta, kad –24 °C temperatūroje kelių bitumo 50/70 standumas didžiausias, o bitumo PMB 45/80-55 CR – mažiausias. Tai paaiškinama mažesniu polimeru kiekiu ir mažesniu bitumo standumu dėl modifikavimui panaudotos gumos. Kelių bitumo 50/70 kompleksinis modulis G^* sumažėja didėjant fazės kampui. Vadinasi kelių bitumas 50/70 darosi klampus proporcingai didėjančiai temperatūrai. Modifikuotas bitumas elgiasi kitaip, ypač tada, kad kompleksinis šlyties modulis $G^* \leq 1$ kPa. Nuo šio taško fazės kampas nebesikeičia, kas reiškia, kad bitumas išlaiko pastovias tampriai-klampias savybes net didėjant temperatūrai (Krol *et al.* 2014).

Sybilski *et al.* (2014) pristatė guma modifikuotų bitumų, naudojamų HMAC mišinių gamybai, eksperimentinį tyrimą. Tyrimo metu atlikti bitumo PMB 25/55-60 CR kritinės aukščiausios ir žemiausios temperatūros nustatymo bandymai. Gauti tyrimo rezultatai atskleidė, kad asfalto mišiniai su guma ir polimerais modifikuotu bitumu yra atsparesni nuovargiui ir plyšių susidarymui. Taip pat bitumas PMB 25/55-60 CR yra atsparesnis sendinimui nei įprastas bitumas PMB 25/55-60. Antroje tyrimo dalyje mokslininkai nagrinėjo HMAC su bitumu PMB 25/55-60 CR savybes. Tyrimo metu atliktas asfalto mišinių trumpalaikis ir ilgalaikis sendinimas. Trumpalaikio sendinimo metu metalinė vonelė padengta 1,5 cm storio asfalto mišinio sluoksniu, laikyta 4 valandas 135 °C temperatūroje kas 50 min permaišant. Ilgalaikis asfalto mišinių sendinimas atliktas su jau trumpalaikiu metodu pasendintais bandiniais: 85 °C temperatūroje sutankinti bandiniai laikyti 120 valandų. Atlikus atsparumo nuovargiui bandymą, nustatyta, kad nesendintų asfalto mišinių su bitumu PMB 25/55-60 CR atsparumas nuovargiui yra prastesnis nei su įprastu bitumu PMB 25/55-60, tačiau po ilgalaikio sendinimo procedūros, asfalto mišinių su PMB 25/55-60 CR bitumu atsparumas nuovargiui gerokai didesnis nei asfalto mišinių su įprastu bitumu PMB 25/55-60. Nustatyta, kad asfalto mišinys su bitumu PMB 25/55-60 CR pasižymi atsparumu provėžoms, nuovargiui, nedideliu jautrumu vandeniui, atsparumu plyšių susidarymui, dideliu standumu. Būtina pabrėžti, kad asfalto mišinio su bitumu PMB 25/55-60 CR charakteristikų pagerėjimas labiau išryškėja po asfalto mišinio ilgalaikio sendinimo (Sybilski *et al.* 2014).

Radziszewski *et al.* (2016) pristatė guma ir polimerais modifikuoto bitumo tyrimą. Tyrimui naudotas kelių bitumas 50/70 ir ~7 % gumos su polimerais. Polimerų panaudojimas guma modifikuotame bitume leidžia sandėliuoti ir transportuoti modifikuotą bitumą. Taip pat modifikavimui naudojant gumą, sumažinamas polimerų kiekis. Įrengus asfalto dangų su guma ir polimerais modifikuotu bitumu eksperimentinį ruožą, po 4 metų nepastebėta jokių defektų (Radziszewski *et al.* 2016).

Zurek *et al.* (2016) atliko SMA mišinių su bitumu PMB 45/80-55 CR riedėjimo pasipriešinimo ir triukšmo mažinimo atžvilgiu tyrimą. Mokslininkų teigimu,

šis bitumas yra itin vertas dėmesio dėl kainos ir pagerintų savybių. Nuo 2012 iki 2014 metų daugiau kaip 120 km asfalto dangos dėvimųjų sluoksnių buvo įrengta naudojant bitumą PMB 45/80-55 CR. Nustatyta, kad asfalto mišinių su guma ir polimeriais modifikuotu bitumu atsparumas temperatūrinių plyšių susidarymui yra geresnis nei asfalto mišinių su įprastu PMB 45/80-55 bitumu.

Kok ir Colak (2011) pristatė SBS polimeriais ir guma modifikuoto bitumo ir asfalto mišinių su šiais bitumais eksperimentinį tyrimą. Tyrimo metu naudotas bitumas 160/220 su SBS polimeriais Kraton D-1101 (2 %, 3 %, 4 %, 5 % ir 6 %) bei guma (3 %, 6 %, 9 %, 12 % ir 15 %). Bitumas modifikuotas 180 °C temperatūroje, 1000 aps./min intensyvumu. Nustatyta, kad didinant modifikatoriaus (gumos arba polimerų) kiekį bitume, bitumo jautrumas temperatūrai mažėja. Tačiau SBS polimeriais modifikuotas bitumas parodė geresnius rezultatus nei guma modifikuotas bitumas. Remiantis penetracijos indekso nustatymo rezultatais, 12 % gumos atitinka 4 % SBS polimerų. DSR bandymu nustatyta, kad guma modifikuoto bitumo fazės kampas taikant žemą dažnį mažesnis nei SBS polimeriais modifikuoto bitumo. Nustatyta, kad reikalingas gumos kiekis skiriasi priklausomai nuo bandymo metodo – 4 % SBS polimero atitinka 6,3–12,1 % gumos. Atlikus asfalto mišinių su guma ir polimeriais modifikuotu bitumu nuovargio bandymus, nustatyta, kad naudojant 8 % gumos, gaunamas didesnis atsparumas nuovargiui nei modifikuojant 4 % SBS polimeriais ir 5 kartus didesnis nei nmodifikuoto asfalto mišinio. Atlikus standumo bandymus, nustatyta, kad naudojant 8 % gumos gaunami panašūs rezultatai kaip ir su 4 % SBS polimerų bei 50 % didesnis standumas nei nmodifikuoto bitumo. Apibendrinant mokslinių tyrimų rezultatus galima teigti, kad optimalus gumos kiekis yra 8 % (Kok *et al.* 2011).

Gonzalez *et al.* (2012) atliko bitumo modifikavimo guma ir polimeriais proceso sąlygų įtakos bitumo savybėms tyrimą. Tyrimo metu naudotas bitumas 80/100, kurio minkštėjimo temperatūra yra 44 °C. Bitumas modifikuotas 12 % gumos ir kai kuriais atvejais 1 % polimerų 8200 aps./min intensyvumu, 60 min, 120 min ir 180 min 180 °C, 200 °C ir 210 °C temperatūroje. Išanalizavus eksperimentinio tyrimo rezultatus, formuluojamos tokios išvados:

- SBS įdėjimas į guma modifikuotą bitumą pagerina elastines bitumo savybes;
- temperatūros padidinimas užtikrina didesnę gumos ištirpimą bei padidina senėjimo procesą;
- SBS polimero naudojimas ilgėjant modifikavimo procesui pagerina bitumo elastiškumą taikant žemą dažnį, kai bitumas vien su guma neparodė priklausomybės nuo modifikavimo proceso trukmės.
- bitumo modifikavimas 200 °C temperatūroje dėl padidėjusios klampos pablogina modifikuoto bitumo mechanines savybes.

Iš atliktų mokslinių tyrimų analizės matyti, kad modifikuoto bitumo charakteristikoms įvertinti dažniausiai naudojami penetracijos, minkštėjimo temperatūros,

klampos, kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo, atsparumo plyšių susidarymui bandymai. Tačiau siekiant įvertinti modifikuoto bitumo atsparumą provėžų susidarymui, taip pat turėtų būti taikomas valkšniosios atstatos bandymas, kuriuo gauti rezultatai turi stiprų ryšį su asfalto mišinio atsparumo provėžų susidarymui rezultatais (Blazejowski *et al.* 2014; Anderson 2014; Moreno-Navarro *et al.* 2015; Bastos *et al.* 2017, Zhang *et al.* 2015; DuBois *et al.* 2014).

Apibendrinant aukščiau išanalizuotus atliktus mokslinius tyrimus, galima teigti, kad bitumo modifikavimas vien panaudotų padangų guma negali vienu metu užtikrinti stabilumo sandėliuojant, priimtinos klampos, ženklaus kritinės aukščiausios ir žemiausios temperatūros padidėjimo. Guma drėgnuoju „mažos klampos“ metodu modifikuotas bitumas pasižymi atsparumu provėžų susidarymui, nuovargiui ir plyšių susidarymui. Nustatyta, kad didinant gumos kiekį, modifikavimo efektas didėja. Dažniausios naudojamos modifikavimo sąlygos yra: temperatūra 180–200 °C, modifikavimo intensyvumas 3000–8000 aps./min, gumos kiekis 3–15 %. Pati pažangiausia tendencija – bitumo modifikavimas gumos ir SBS polimerų kombinacija. Tai leidžia sutaupyti iki 50 % SBS polimerų bei naudojant mažesnę gumos kiekį, pagerinti stabilumą sandėliuojant ir palengvinti modifikavimo procedūrą.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Išanalizavus kitų autorių mokslinius tyrimus, susijusius su asfalto mišinių komponentų įtaka asfalto mišinio funkcionavimui, modifikavimui naudojamus priedus ir technologijas, formuluojamos tokios išvados:

1. Siekiant padidinti asfalto mišinių atsparumą provėžų susidarymui, mineralinės medžiagos turi būti daugiabriaunio paviršiaus, dalelės artimos kubo formai, optimalios granulimetrinės sudėties, kad užtikrintų tinkamą užpildo dalelių sankibą.
2. Asfalto mišinių, kurių gamybai naudojamas polimerais modifikuotas bitumas, geresnės mechaninės savybės bei didesnis atsparumas deformacijų susidarymui, lyginant su tais mišiniais, kurių gamybai naudojamas kelių bitumas.
3. Modifikuotas bitumas turi būti ekonomiškai naudingas, t. y. modifikavimo efektas turi būti toks, kad atsipirktų per tinkamą laikotarpį. Siekiant sumažinti modifikuoto bitumo kainą, galima naudoti pigesnes polimerines medžiagas, ypač kartotinio naudojimo medžiagas (gumą, plastiką).
4. Bitumo modifikavimas guma padidina dangos iš asfalto mišinių ilgalaikiškumą, atsparumą nuovargiui ir provėžų susidarymui, sumažina bitumo

oksidaciją, jautrumą plyšių susidarymui, reikalingos mažesnės sąnaudos dangų priežiūrai.

5. Bitumo modifikavimas vien panaudotų padangų guma negali vienu metu užtikrinti stabilumo sandėliuojant, priimtinos klampos, ženkliausios kritinės aukščiausios ir žemiausios temperatūros padidėjimo – didinant gumos kiekį didėja kritinė aukščiausia ir žemiausia temperatūra, tačiau kartu didėja klampa bei nestabilumas sandėliuojant. Todėl būtina nustatyti modifikavimui pakankamą gumos kiekį užtikrinant reikiamas modifikuoto bitumo savybes.

Darbo tikslui pasiekti formuluojami šie uždaviniai:

1. Eksperimentiniu tyrimu nustatyti pakankamus gumos kiekius, reikalingus bitumo modifikavimui ir įvertinti modifikuoto bitumo savybes.
2. Eksperimentiniu tyrimu įvertinti asfalto mišinio su guma modifikuotu bitumu atsparumą provėžų susidarymui.
3. Apskaičiuoti bitumo ir asfalto mišinių modifikavimo guma ekonominį efektą lyginant su bitumo modifikavimu vien SBS polimerais.
4. Nustatyti racionaliausią bitumo modifikavimo variantą daugiakriteriu metodu.
5. Pateikti rekomendacijas bitumo modifikavimui guma.

2

Guma modifikuoto bitumo eksperimentinio tyrimo rezultatai

Šiame skyriuje analizuojama gumos ir SBS polimerų kiekio įtaka modifikuoto bitumo fizinėms bei mechaninėms savybėms. Pateikta eksperimentinio tyrimo metodika, objektas, naudotos medžiagos ir įranga. Pateikti nemodifikuoto, guma ir polimerais modifikuoto bitumo fizikinių ir mechaninių savybių rezultatai bei jų analizė.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta vienoje autoriaus mokslinėje publikacijoje: Šernas *et al.* (2016).

2.1. Eksperimentinio tyrimo seka ir metodika

2.1.1. Eksperimentinio tyrimo priemonės ir medžiagos

Siekiant nustatyti ir mokliškai pagrįsti kelių bitumo modifikavimui pakankamus panaudotų padangų gumos kiekius užtikrinant kelio dangos atsparumą provėžų bei plyšių susidarymui, VGTU AIF KTI Automobilių kelių mokslo laboratorijoje atliktas eksperimentinis tyrimas.

Ekspperimentiniam tyrimui laboratorijoje ištirti ir modifikavimui parinkti vieno gamintojo dviejų rūšių kelių bitumas 50/70 ir 70/100, atitinkantys „Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų aprašo TRA BITUMAS 08/14“ reikalavimus. Siekiant palyginti guma modifikuoto bitumo savybes su įprastai Lietuvoje naudojamais polimerais modifikuotais bitumais, į tyrimą įtraukti polimerais modifikuoti bitumai PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60. Modifikavimui naudotos gumos tiekėjo deklaruojamos savybės pateiktos 2.1 lentelėje, o modifikavimui panaudoto kelių bitumo ir į eksperimentinį tyrimą įtraukto polimerais modifikuoto bitumo nustatytų savybių vidurkių iš trijų bandinių vertės pateiktos 2.2 lentelėje.

2.1. lentelė. Bitumo modifikavimui naudotos gumos savybės

Table 2.1. Properties of crumb rubber used for bitumen modification

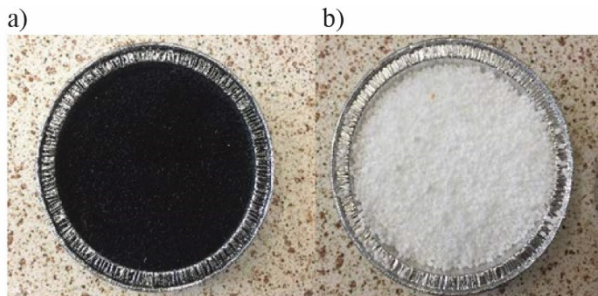
Sudėtinė medžiaga	Vertė	Vienetai	Bandymo metodas
Polimerai	>55	%	ASTM E1131
Anglis	30±3	%	ASTM E1131
Aliejai ir priedai	8±2	%	ASTM E1131
Pelenai	5±2	%	ASTM E1131
Metalai	<0,1	%	CEN/TS 14243
Tekstilė	<0,1	%	CEN/TS 14243

2.2. lentelė. Kelių bitumo ir SBS polimerais modifikuoto bitumo savybės

Table 2.2. Properties of road bitumen and polymer modified bitumen

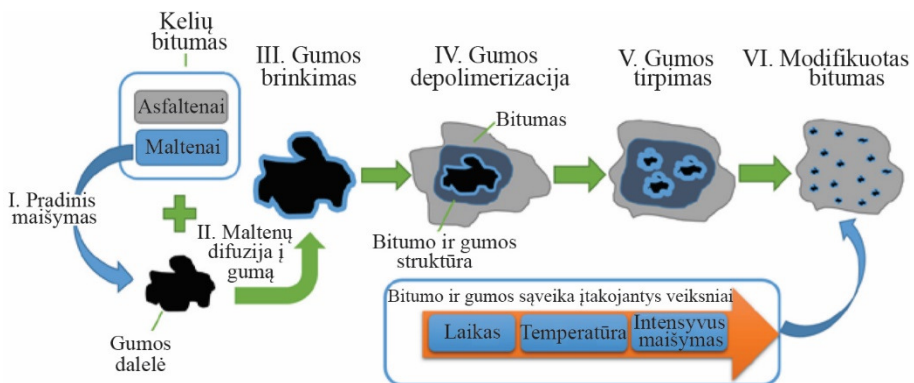
Bitumas	Penetracija, dmm	Minkštėjimo temperatūra, °C	Klampa, mPa×s
70/100	91,1	45,9	658
50/70	60,8	50,5	767
PMB 45/80-55	60,5	64,7	2675
PMB 25/55-60	39,6	68,1	3383

Kelių bitumo modifikavimui naudota guma ir polimerai pavaizduoti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Modifikavimui naudotos medžiagos: a) guma; b) SBS polimerai
 Fig. 2.1. Materials used for bitumen modification: a) crumb rubber; b) SBS polymer

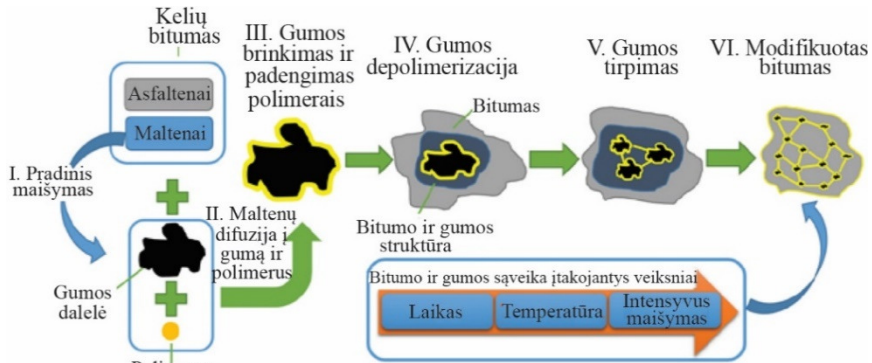
Bitumo modifikavimo guma procesą disertacijos autorius išskiria į šešis etapus. Pirmiausia gumos dalelės dozuojamos į bitumą, gumos dalelės absorbuoja maltenus (lengvuosius bitumo komponentus) ir brinksta. Po tam tikro laiko guma po truputį pradeda tirpti bitume. Toliau tęsiant modifikavimo procesą, gumos dalelių išbrinkimas pasiekia ribą, po kurios gumos dalelės pradeda skaidytis į mažesnes daleles. Tęsiant procesą, gumos dalelės vis tirpsta bitume, o modifikuojamo bitumo klampa pradeda mažėti. Gumos tirpimo bitume proceso greitis priklauso nuo trijų pagrindinių faktorių – modifikavimo temperatūros, trukmės ir modifikavimo proceso intensyvumo. Kiekvienu iš šių faktorių galima dalinai kompensuoti kitą faktorių, pvz. padidinus modifikavimo temperatūrą ar intensyvumą galima sutrumpinti modifikavimo trukmę. Disertacijos autoriaus požiūris į bitumo ir gumos sąveiką modifikavimo proceso metu pavaizduotas 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Bitumo ir gumos sąveika modifikavimo proceso metu
 Fig. 2.2. Bitumen and crumb rubber interaction during modification process

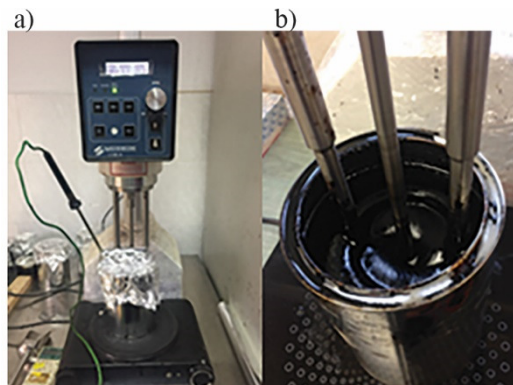
Bitumo modifikavimo gumos ir polimerų kombinacija procesas yra labai panašus į pavaizduotą 2.2 paveiksle, tačiau skiriasi tuo, kad gumos dalelės bitume yra apveliamos polimerais, kurie tarpusavyje susijungdami suformuoja polimerų

tinklą. Gumos dalelėms pradėdant tirpti ir skaidytis į mažesnes daleles, polimerų ir gumos tinklas taip pat smulkėja. Polimerai, sujungdami gumos daleles į vieną tinklą, neleidžia joms „nusėsti“, taip pagerina modifikuoto bitumo stabilumą sandėliuojant bei elastiškumą. Autoriaus požiūris į bitumo, gumos ir polimerų sąveiką modifikavimo proceso metu pavaizduotas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Bitumo, gumos ir polimerų sąveika modifikavimo proceso metu
Fig. 2.3. Bitumen, crumb rubber and polymer interaction during modification process

Taigi, modifikuojant bitumą guma itin svarbu naudoti intensyvų maišytuvą, kuris leistų tirpdyti gumą bitume taikant ne aukštesnę kaip 200 °C temperatūrą ar ilgesnę nei įprasta modifikavimo trukmę, modifikavimui naudojant polimerus. Maišytuvus taip pat turi užtikrinti homogenišką modifikavimui naudojamų priedų išsimašymą. Todėl bitumo modifikavimo laboratoriniam procesui pasirinktas naudoti moderniausias šiuo metu rinkoje esantis tokio tipo įrenginys Silverson L5M-A (2.4 pav.).



2.4 pav. Bitumo modifikavimo įranga: a) maišytuvus; b) maišymo antgalis
Fig. 2.4. Equipment used for bitumen modification: a) high shear mixer; b) mixing head

Modifikuojamo kelių bitumo ir naudojamų priedų tolygus išsimaišymas užtikrinamas specialiu dvigubu maišymo antgaliu (2.5 pav.), kuris maišymo metu gali sukurti net iki 8000 aps./min intensyvumą. Nustatytas maišymo intensyvumas išlaikomas pastovus viso modifikavimo proceso metu.



2.5 pav. Bitumo modifikavimo maišytuvo antgalis (Silverson 2017)

Fig. 2.5. Duplex assembly of bitumen modification mixer (Silverson 2017)

Kaip matyti iš 2.5 paveikslo, šis dvigubas maišymo antgalis yra ypatingas tuo, kad abi jo dalys sukasi į priešingas puses: viršutinė besisukanti dalis traukia medžiagas iš viršaus į apačią, o apatinė besisukanti dalis traukia medžiagas iš apačios. Viršutinė antgalio dalis sukapoja stambesnes medžiagas į smulkesnes ir išstumia jas žemyn, kur apatinė besisukanti antgalio dalis įtraukia jas ir smulkina toliau. Todėl, naudojant šią modifikavimo įrangą, užtikrinamas tolygus bitumo ir modifikavimui naudojamų medžiagų išsimaišymas.

2.1.2. Eksperimentinio tyrimo seka

Išanalizavus užsienio šalių patirtį bitumo modifikavimo panaudotų padangų guma tematika, aiškiai matyti, kad dar nėra atsakyti visi klausimai, susiję su modifikavimui pakankamu minimaliu gumos kiekiu, modifikavimui naudojamu kelių bitumo markėmis, modifikavimui naudojamų gumos ir polimerų kiekiais. Siekiant parengti efektyvią eksperimentinio tyrimo seką, susistemintos bitumo modifikavimo guma gairės, pateiktos 2.6 paveiksle. Šiomis gairėmis aprašomi bitumo modifikavimo etapai – autorius manymu, siekiant greitai ir efektyviai nustatyti modifikavimui pakankamą gumos ar gumos ir polimerų kiekį, modifikavimo procesas turi susidaryti iš keturių etapų.

Kadangi nėra aišku, koks konkrečiai kelių bitumas yra tinkamas modifikavimui guma ir koks gumos kiekis yra pakankamas, pirmajame etape turi būti atsakyta į šiuos klausimus, t. y. kokį bitumą modifikuojant su koku gumos kiekiu yra

užtikrinamos modifikuoto bitumo savybės (penetracija, minkštėjimo temperatūra, stabilumas sandėliuojant ir klampa), atitinkančios alternatyviems polimerais modifikuotiems bitumams keliamus reikalavimus. Standartiškai stabilumas sandėliuojant įvertinamas atliekant penetracijos ir minkštėjimo temperatūros bandymus. Bandymai šiais metodais atliekami pakankamai kietoje tiriamos medžiagos (bitumo) fazėje (atitinkamai 25 °C ir apie 50–60 °C temperatūroje), kas autoriaus manymu nulemia tai, kad nepakankami tiksliai įvertinamas bitumo stabilumas. Todėl, papildomai turi būti atliekami ir klampos nustatymo bandymai 135 °C temperatūroje – taip greičiau ir tiksliau įvertinamas modifikuoto bitumo stabilumas sandėliuojant.

Antrajame etape tyrimai turi būti tęsiami jau tik su pirmajame etape nustatytais tinkamais ir racionaliais modifikavimo variantais (tinkamu bitumu ir pakankamu kiekiu gumos), tačiau papildomai pridedant SBS polimerų ir taip pagerinant modifikuoto bitumo elastines savybes bei stabilumą sandėliuojant. Siekiant greitai ir efektyviai įvertinti modifikuoto bitumo savybes, pirmajame ir antrajame etapuose turėtų būti taikomi tik penetracijos, minkštėjimo temperatūros, stabilumo sandėliuojant ir klampos nustatymo bandymai, kuriais įvertinamas modifikuoto bitumo atitikimas standartinių norminių dokumentų reikalavimams. Jei modifikuotas bitumas netenkina keliamų reikalavimų, modifikavimo procedūra turi būti pradėdama nuo etapo pradžios modifikuojant kitą kelių bitumą arba taikant kitas gumos ir polimerų proporcijas. Jei modifikuoto bitumo rezultatai tenkina užsibrėžtą tikslą, tolimesniems tyrimams parenkami modifikuoti bitumai atsižvelgiant į modifikavimui panaudotą gumos ar polimerų kiekį ir gautus rezultatus. Pavyzdžiui, jei naudojant skirtingus kiekius gumos gaunami lygiaverčiai rezultatai ar panaudojus didelį kiekį modifikatoriaus, rezultatai nėra ženkliai geresni, tolimesniam etapui parenkami bitumai, kurių modifikavimui panaudotas mažiausias kiekis gumos, o modifikuoto bitumo savybės tenkina keliamus reikalavimus.

Trečiajame etape, atsižvelgiant į antrojo etapo bandymų rezultatus, tolimesniems tyrimams atrenkami modifikuoti bitumai, kuriems dinaminio šlyties reometru nustatomas modifikuoto bitumo kompleksinis šlyties modulis, fazės kampas ir valkšnioji atstata, o ir lenkiamojo strypelio reometru – standumas ir m -vertė. Šiais inovatyviais bandymo metodais įvertinami modifikuoto bitumo atsparumo provėžų ir plyšių susidarymui rodikliai.

Kadangi asfalto mišinių atsparumas provėžų susidarymui yra itin sudėtingas procesas, iki šiol dar nepavyko rasti modelių, kurie leistų tiksliai pagal bitumo ir asfalto mišinių sudėtinųjų komponentų rodiklių vertes prognozuoti asfalto mišinio atsparumą provėžų susidarymui. Todėl, ketvirtajame etape, siekiant įvertinti asfalto mišinių su guma ar guma ir polimerais modifikuotų asfalto mišinių ats-

parumą provėžų susidarymui, turi būti atrinkti geriausių savybių bitumai, su kuriais pagaminami asfalto mišiniai ir kuriems nustatomas atsparumas provėžų susidarymui.

Išanalizavus bitumo ir asfalto mišinių bandymų rezultatus, nustatomos racionali bitumo modifikavimo sąlygos (modifikavimui tinkamas kelių bitumas, pakankamas gumos ir SBS polimerų kiekis), užtikrinančios asfalto mišinio atsparumą provėžų ir plyšių susidarymui. Vadovaujantis šiomis gairėmis, parengta ir disertacijos eksperimentinio tyrimo seka.

I etapas. Minimalaus pakankamo CR kiekio parinkimas

TRA BITUMAS 08 reikalaujamų savybių nustatymas: minkštėjimo temperatūra; penetracija, stabilumas sandėliuojant; tamprioji atstata

II etapas. Racionalių CR ir SBS polimerų kombinacijų nustatymas

TRA BITUMAS 08 reikalaujamų savybių nustatymas: minkštėjimo temperatūra; penetracija, stabilumas sandėliuojant; tamprioji atstata

III etapas. Bitumo atsparumo provėžoms ir pleišėjimui rodiklių įvertinimas

Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas, standumo ir m -vertės nustatymas, valkšniosios atstatos nustatymas

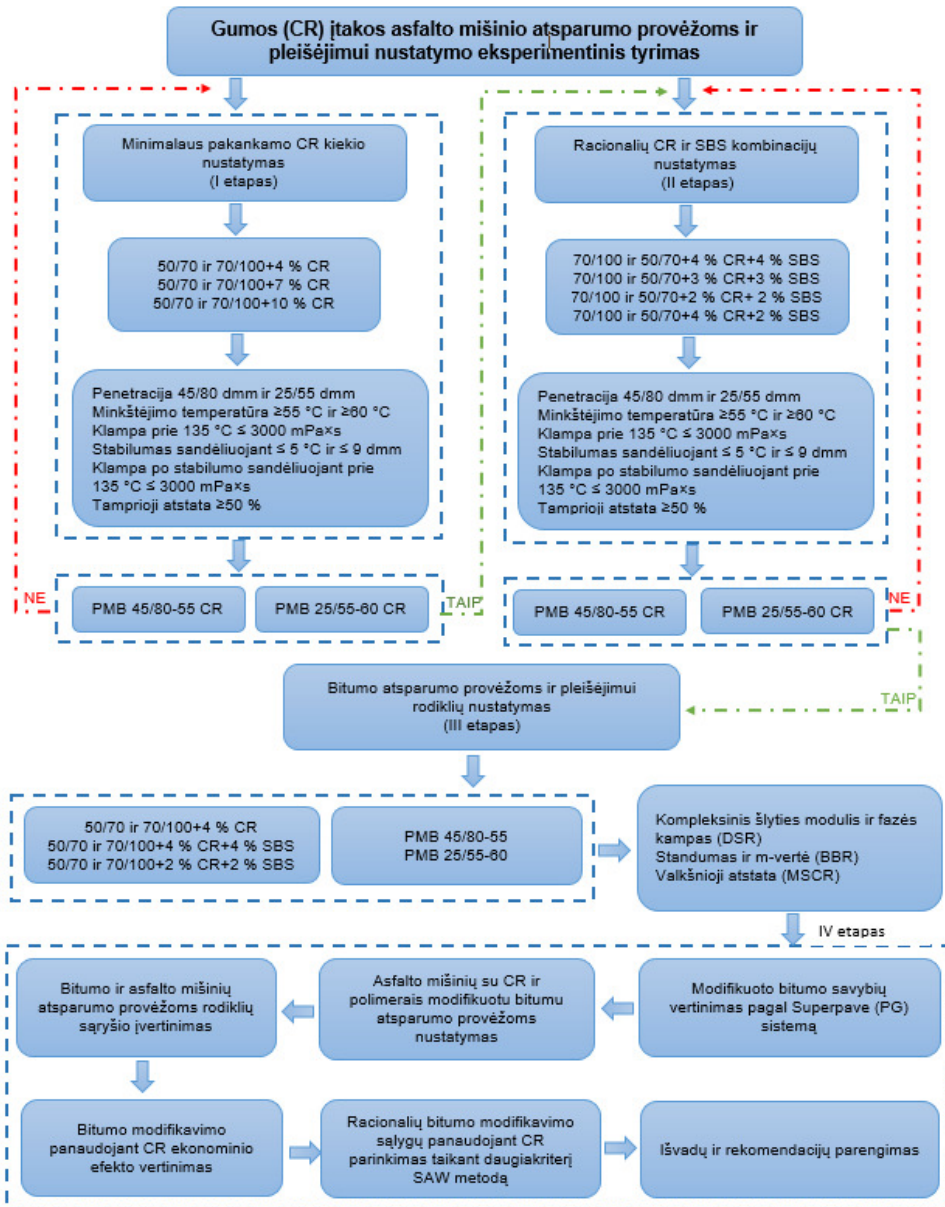
IV etapas. Asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių įvertinimas

Asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklių PRD_{AIR} ir WTS_{AIR} nustatymas

2.6 pav. Bitumo modifikavimo guma gairės

Fig. 2.6. Guidelines of bitumen modification using crumb rubber

Vadovaujantis 2.6 paveikslu, parengta disertacijos eksperimentinio tyrimo seka, susidaranti iš trijų pagrindinių etapų. Ši seka pateikta 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Eksperimentinio tyrimo vykdymo seka

Fig. 2.7. Experimental research sequence

Pagal literatūros analizę ir bitumo modifikavimo gamyklų rinkos duomenis, modifikavimui dažniausiai yra naudojamas kelių bitumas, kurio penetracija yra

50–150 dmm ribose. Toks bitumas turi didesnę kiekį lengvųjų komponentų, kuriuos absorbuoja guma, todėl yra tinkamesnis modifikavimui. Lietuvoje naudojamas kelių bitumas 50/70, 70/100 ir 100/150, kurio penetracijos vertė yra 50–150 dmm ribose. Kadangi yra žinoma, kad SBS polimerais modifikuojamas kelių bitumas 50/70 arba 70/100, o modifikuojant guma, savybės tikrai nėra geresnės nei modifikuojant vien SBS polimerais, kelių bitumas 50/70 ir 70/100 pasirinktas modifikavimui, o kelių bitumo 100/150 nuspręsta atsisakyti. Disertacijos eksperimentinio tyrimo pirmojo etapo metu nustatytos kelių bitumo 50/70, 70/100, skirtingais gumos kiekiais modifikuoto kelių bitumo 50/70 bei 70/100 fizinės ir mechaninės savybės. Modifikavimui pasirinkti vieno panaudotų padangų gumos tiekėjo trys skirtingi gumos kiekiai – 4 %, 7 % ir 10 % nuo bitumo masės. Atlikti bitumo penetracijos, minkštėjimo temperatūros, klampos, stabilumo sandėliuojant (tik modifikuotam bitumui), tampriosios atstatos (tik modifikuotam bitumui), klampos po stabilumo sandėliuojant bandymai. Šio etapo tikslas – nustatyti minimalų pakankamą panaudotų padangų gumos kiekį, užtikrinantį modifikuoto bitumo savybes, lygiavertes polimerais modifikuotam bitumui. Čia taip pat tiriama ar abu pasirinkti kelių bitumai yra tinkami modifikavimui.

Antrojo etapo tikslas – nustatyti racionalias panaudotų padangų gumos ir polimerų kombinacijas, užtikrinančias savybes, lygiavertes arba geresnes įprastai naudojamam polimerais modifikuotam bitumui. Šiame etape tyrimai tęsiasi jau tik su pirmajame etape nustatytais tinkamais ir efektyviais modifikavimo variantais (tinkamu bitumu ir pakankamu kiekiu gumos), tačiau papildomai pridėdant SBS polimerų ir taip pagerinant modifikuoto bitumo elastines savybes bei stabilumą sandėliuojant. Kadangi pirmajame etape nustatyta, kad modifikuojant kelių bitumą 50/70 ir 70/100 minimalus pakankamas gumos kiekis yra 4 % nuo bitumo masės, antrajame etape šie kelių bitumai modifikuoti pridėdant tokį patį kiekį SBS polimerų, t. y. 4 % nuo bitumo masės. Taip pat siekiant nustatyti minimalų reikalingą gumos ir polimerų kiekį, užtikrinantį modifikuoto bitumo atitinkamą alternatyviam polimerais modifikuotam bitumui, pasirinktos ir kitos gumos bei polimerų kombinacijos, pateiktos 2.3 lentelėje.

Kelių bitumui, modifikuotam šiomis pasirinktomis šešiomis kombinacijoms, nustatyta penetracija, minkštėjimo temperatūra, klampa, stabilumas sandėliuojant (tik modifikuotam bitumui), tamprioji atstata (tik modifikuotam bitumui), klampa po stabilumo sandėliuojant bandymo.

Kadangi bitumo 50/70 + 3 % CR + 3 % SBS ir 70/100 + 3 % CR + 3 % SBS bandymai parodė, kad šių bitumų savybės patenka į tarpinį intervalą tarp atitinkamai PMB 25/55-60 ir PMB 25/55-80 bei PMB 45/80-55 ir PMB 45/80-80, t. y. modifikavimui naudojant šias gumos ir polimerų kombinacijas, savybės viršija minimalius reikalavimus, tačiau nesiekia maksimalių reikalavimų. Todėl nėra racionalu taikyti šiuos gumos ir polimerų kiekius. Trečiajame etape, likusiems bitumams įvertintas atsparumas provėžų ir plyšių susidarymui. Siekiant palyginti

guma ar guma ir polimerais modifikuoto bitumo rezultatus su kelių bitumo bei polimerais modifikuoto bitumo rezultatai, bandymai atlikti ir su šiais bitumais. Trečiojo etapo bandymų rezultatai panaudoti modifikuoto bitumo klasifikavimui pagal Superpave (PG) metodiką (3.1 poskyris).

2.3. lentelė. Eksperimentinio tyrimo antrojo etapo gumos ir polimerų kombinacijos

Table 2.3. Combinations of crumb rubber and SBS polymers used in the experimental research second stage

Kelių bitumas	Gumos kiekis nuo bitumo masės, %	SBS polimerų kiekis nuo bitumo masės, %	Guma ir SBS polimerais modifikuotas bitumas	Alternatyvus SBS polimerais modifikuotas bitumas
50/70	4	4	50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	PMB 25/55-60
	3	3	50/70 + 3 % CR + 3 % SBS	
	2	2	50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	
70/100	4	4	70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	PMB 45/80-55
	3	3	70/100 + 3 % CR + 3 % SBS	
	2	2	70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	

Paskutiniuoju etapu įvertintas asfalto mišinių su guma bei guma ir polimerais modifikuotu bitumu atsparumas provėžoms. Kadangi bitumo savybės ženkliai skyrėsi atsižvelgiant į nuo modifikavimui panaudotą gumos ir polimerų kiekį, nuspręsta asfalto mišinių atsparumą provėžoms nustatyti asfalto mišiniams su visais pirmajame ir antrajame etape atrinktais modifikuotais bitumais: 50/70 + 4 % CR, 70/100 + 4 % CR, 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS, 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS, 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS ir 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Taip pat siekiant palyginti gautus atsparumo provėžoms rezultatus su asfalto mišinių panaudojant kelių bitumą 50/70 ir 70/100 bei polimerais modifikuotą bitumą PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60, atsparumo provėžoms bandymai atlikti ir su šiais asfalto mišiniais.

Visuose eksperimentinio tyrimo etapuose bandymų atlikimui naudota po 3 bandinius, o susijusiuose grafikuose pateiktos vidurkių vertės. Visuose eksperimentinio tyrimo etapuose racionalių modifikavimo variantų parinkimas detalizuotas susijusiose poskyriuose.

Bitumo minkštėjimo temperatūra, tamprioji atstata, kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykis, valkšnioji atstata yra rodikliai, apibūdinantys bitumo funkcionavimą aukštoje temperatūroje, t. y. pagal šiuos rodiklius daromos prielaidos apie asfalto mišinių su šiais bitumais atsparumą provėžoms. Kadangi

nėra aišku, ar pagal visus išvardintus rodiklius galima spręsti apie jau sumaišyto asfalto mišinio atsparumą provėžoms, atliktas bitumo ir asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės vertinimas. Šiuo vertinimu nustatyta, kurie bitumo rodikliai turi didžiausią sąryšį su asfalto mišinių atsparumo provėžoms rezultatais.

Siekiant pritaikyti mokslines naujoves praktikoje yra labai svarbios tos naujovės savybės. Tačiau ne ką mažiau svarbus kriterijus yra ir kaina, todėl atliktas bitumo modifikavimo guma ir polimerais ekonominio efekto įvertinimas. Šiuo vertinimu nustatyta, kuris modifikavimo variantas yra ekonomiškiausias bei palygintos guma modifikuoto bitumo, kelių bitumo ir polimerais modifikuoto bitumo kainos.

Siekiant pateikti išvadą, kuris modifikavimo variantas racionaliausias vien ekonominio vertinimo nepakanka, dar labai svarbu asfalto mišinio su šiais bitumais atsparumas provėžoms bei atsparumas plyšių susidarymui. Todėl atliktas racionaliausio bitumo modifikavimo varianto daugiakriteriu SAW metodu parinkimas.

Eksperimentinio tyrimo metu bandymai atlikti pagal standartus, kurie išvardinti 2.1.3 poskyryje bei disertacijos literatūros sąrašė.

Visų bitumo tyrimo rezultatai pateikti 2.2 poskyryje, o asfalto mišinių tyrimo rezultatai pateikti 3.2 poskyryje.

Bitumo savybių grafiniam vaizdavimui, visiems bitumams suteikti atitinkami kodai, kuriais bitumai identifikuojami rezultatų analizėje 2.2.1 ir 2.2.2 poskyriuose.

2.4. lentelė. Bitumams suteikti identifikaciniai kodai

Table 2.4. Identification codes of bitumen

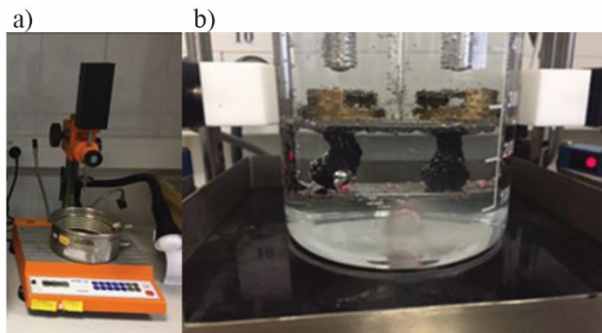
Bitumas	Suteiktas kodas	Bitumas	Suteiktas kodas
50/70	1-1	70/100	1-9
50/70 + 4 % CR	1-2	70/100 + 4 % CR	1-10
50/70 + 7 % CR	1-3	70/100 + 7 % CR	1-11
50/70 + 10 % CR	1-4	70/100 + 10 % CR	1-12
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	1-5	70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	1-13
50/70 + 3 % CR + 3 % SBS	1-6	70/100 + 3 % CR + 3 % SBS	1-14
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	1-7	70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	1-15
50/70 + 4 % CR + 2 % SBS	1-8	70/100 + 4 % CR + 2 % SBS	1-16
PMB 25/55-60	1-17	PMB 45/80-55	1-18

Tekstinėje bitumo tyrimų rezultatų analizėje, pateiktoje 2.2.1 ir 2.2.2 poskyriuose, naudoti pradiniai bitumo pavadinimai.

2.1.3. Eksperimentinio tyrimo metodika

2.1.3.1. Bitumo fizinių savybių nustatymo metodika

Bitumo penetracijos nustatymo bandymai atlikti pagal standarto LST EN 1426:2015 reikalavimus 25 °C temperatūroje. Bandymai atlikti su automatinio adatos penetracijos prietaisu (2.8 pav. a), nustatant 100 g svorio adatos įsmigimo į bitumą gylį 3 kartus. Bitumo minkštėjimo temperatūros nustatymo bandymai atlikti pagal standarto LST EN 1427:2015 reikalavimus. Paruošti bitumo bandiniai metaliniuose žieduose dėti į stovą, ant bandinio viršaus uždėtas standartinio dydžio ir svorio metalinis rutuliukas. Stovas su bandiniais panardintas į 5±1 °C temperatūros vandens indą, kurio temperatūra kilo pastoviu 5 °C/min greičiu iki tol, kol rutulys deformuojantis bitumui pasiekė apatinę rėmo plokštelę (2.8 pav. b). Temperatūra, prie kurios rutulys pasiekia apatinę plokštelę yra vadinama minkštėjimo temperatūra.



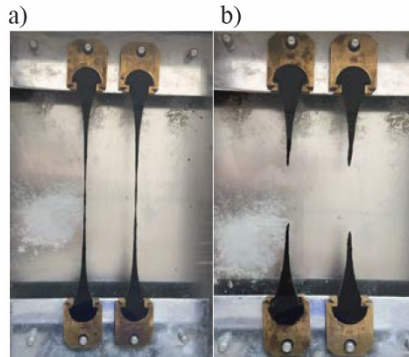
2.8 pav. Bitumo fizinių savybių nustatymas: a) penetracijos nustatymo bandymas;
b) minkštėjimo temperatūros nustatymo bandymas

Fig. 2.8. Determination of bitumen physical properties: a) penetration test;
b) softening point test

Bitumo klampos nustatymo bandymai atlikti pagal LST EN 13302:2010 standarto reikalavimus 135 °C temperatūroje. Bitumas supilamas į specialų konteinerį, kuris pakaitinamas iki bandymo temperatūros, į konteinerį su bitumu įmerkiamas nustatytu pastoviu greičiu besisukantis cilindras. Išmatuojamas bitumo pasipriešinimas cilindro sukimuisi, išreiškiamas mPa×s.

Modifikuoto bitumo tampriosios atstatos bandymai (2.9 pav.) atlikti pagal standarto LST EN 13398:2010 reikalavimus 25 °C temperatūroje. Bitumas supiltas į specialią formelę, atvėsintas iki aplinkos temperatūros pamerktas į 25 °C temperatūros vandenį, duktilometru temptas pastoviu 50 mm/min greičiu 200 mm atstumą. Pasiekus 200 mm atstumą, ištempto bitumo bandinys perkirptas pusiau.

Praėjus 30 min nuo bandinio perkirpimo, išmatuotas bandinio atsistatymas bei nustatyta bitumo tamprioji atstata, išreikšta %.



2.9 pav. Bitumo tampriosios atstatos nustatymas: a) 200 mm ištemptas bandinys;
b) perkirtas pusiau bandinys
Fig. 2.9. Bitumen elastic recovery test: a) 200 mm elongated specimen;
b) specimen after cut in the middle

Modifikuoto bitumo stabilumo sandėliuojant bandymas (2.10 pav.) atliktas pagal standartą LST EN 13399:2010. Modifikuotas bitumas supiltas į nustatytų matmenų folijos cilindą, laikytas 72 valandas 180 °C temperatūroje. Po to, iki aplinkos temperatūros atvėsintas bitumo cilindras padalintas į 3 lygias dalis, vidurinė dalis atmesta, o su viršutine ir apatine dalimis atlikti penetracijos, minkštėjimo temperatūros ir klampos bandymai. Pagal TRA BITUMAS 08/14, po stabilumo sandėliuojant turi būti atliekamas minkštėjimo temperatūros bandymas. Maksimalus leistinas minkštėjimo temperatūros skirtumas tarp apatinės ir viršutinės dalies bandinių yra 5 °C. Tačiau autoriaus nuomone, šio bandymo nepakanka, todėl po stabilumo sandėliuojant bandymo, eksperimento metu papildomai atlikti penetracijos ir klampos nustatymo bandymai.

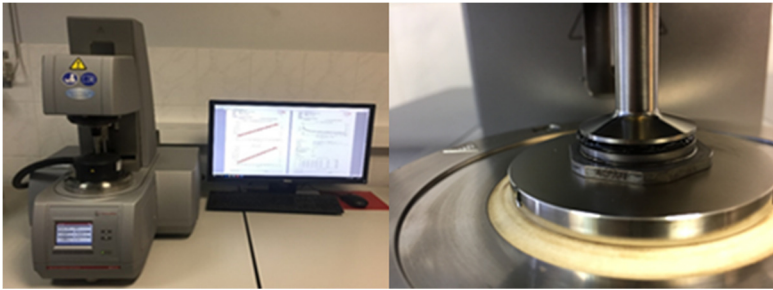


2.10 pav. Stabilumo sandėliuojant nustatymo bandinys
Fig. 2.10. Specimen of storage stability test

Bituminių rišiklių fizikinių savybių nustatymo rezultatai pateikti 2.2.1. ir 2.2.2 poskyriuose.

2.1.3.2. Bitumo mechaninių savybių nustatymo metodika

Dinaminis šlyties reometras yra universalus prietaisas, leidžiantis nustatyti reologines bitumo savybes skirtingose temperatūrose, apkrovos pobūdžio, įtempimų arba deformacijų, dažnio arba laiko sąlygų. Eksperimentinio tyrimo metu nemodifikuoto ir modifikuoto bitumo tiesiškai tampriai klampios ribos (LVE), dinaminio šlyties modulio nustatymo bandymas bei bitumo valkšniosios atstatos nustatymo bandymas atliktas Anton Paar MCR 302 (2.11 pav.) dinaminio šlyties reometru (DSR).



2.11 pav. Bitumo dinaminio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas
Fig. 2.11. Bitumen dynamic shear modulus and phase angle test

Bitumo LVE riboms nustatyti atliktas pakopinis deformacijų bandymas (angl. *strain sweep test*) arba kitaip osciliacinis sūkių laiko atžvilgiu (angl. *oscillation time sweep*) bandymas kontroliuojant deformacijas (angl. *control strain mode*) pagal standarto AASHTO 315:2012 X1 priedo reikalavimus. Bandymai atlikti prie 1,59 Hz dažnio pakopomis palaipsniui didinant kampinės (šlyties) deformacijas nuo 2 % iki 12 %. Kiekvienam bitumui LVE ribos nustatytos atliekant po du bandymus 70 °C ir 76 °C temperatūroje su 25 mm diametro plokštelėmis.

Bitumo dinaminiam šlyties moduliui nustatyti atliktas osciliacinis dažnio diapazono (angl. *oscillation frequency sweep*) bandymas kontroliuojant deformacijas 58–94 °C temperatūroje ir 1,59 Hz dažniu pagal AASHTO T315:2012 standarto reikalavimus. Dinaminio šlyties modulio nustatymo bandymai atlikti standartuose apibrėžtose temperatūrose su 25 mm skersmens ir 1 mm aukščio bandiniais (2.12 pav.). Temperatūra keičiama kas 6 °C siekiant užtikrinti, kad analizuojant duomenis termolinijos visiškai persidengtų. Po kiekvieno temperatūros pokyčio,

temperatūra sumažinama arba padidinama ne didesniu kaip $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ greičiu. Nustovėjęs kitai temperatūrai bandinys kondicionuojamas ne mažiau kaip 10 min, siekiant užtikrinti tolygias temperatūros sąlygas bandinyje.



2.12 pav. Dinaminio šlyties reometro bandiniai
Fig. 2.12. Dynamic shear rheometer specimens

Bitumo valkšniosios atstatos nustatymo bandymas (angl. *MSCR – Multiple Stress and Creep Recovery test*) atliktas pagal standartus AASHTO TP 70:2013 ir LST EN 16659:2016 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje taikant $0,1\text{ kPa}$ ir $3,2\text{ kPa}$ apkrovas. Bandymui atlikti naudotas dinaminis šlyties reometras. Šio bandymo tikslas – nustatyti bitumo valkšniąją atstatą. Bandymo esmė – bitumas po trumpalaikio sendinimo procedūros dinaminio šlyties reometru yra veikiamas $0,1\text{ kPa}$ ir $3,2\text{ kPa}$ apkrova 10 apkrovimo ciklų. Po kiekvieno apkrovimo ciklo, nustatoma liekamoji šlyties deformacija, o po visų 10-ies apkrovimo ciklų nustatoma suminė liekamoji šlyties deformacija ir elastiškumas. Taip pat įvertinamas bitumo elastiškumas bei šlyties deformacijų ir elastiškumo pokytis priklausomai nuo apkrovos pokyčio.

Bitumo atstata prie $0,1\text{ kPa}$ ir $3,2\text{ kPa}$ apkrovų po kiekvieno ciklo apskaičiuojama pagal 2.1 ir 2.2 formules (LST EN 16659 2016):

$$\%R_{0,1\text{ kPa}}^N = 100 \times \left(\varepsilon_1^N - \varepsilon_{10}^N \right) / \varepsilon_1^N, \quad (2.1)$$

čia $\%R_{0,1\text{ kPa}}^N$ – šlyties deformacijų atsistatymas prie $0,1\text{ kPa}$ bandymo apkrovos po n -tojo bandymo ciklo, %; ε_1^N – atsistatančios šlyties deformacijos po n -tojo bandymo ciklo, kPa^{-1} .

$$\%R_{3,2 \text{ kPa}}^N = 100 \times \left(\varepsilon_1^N - \varepsilon_{10}^N \right) / \varepsilon_1^N, \quad (2.2)$$

čia $\%R_{3,2 \text{ kPa}}^N$ – šlyties deformacijų atsistatymas prie 3,2 kPa bandymo apkrovos po n -tojo bandymo ciklo, %; ε_1^N – atsistatančios šlyties deformacijos po n -tojo bandymo ciklo, kPa^{-1} .

Bitumo vidutinis elastiškumas prie 0,1 kPa ir 3,2 kPa apkrovų po 10-ies ciklų apskaičiuojamas pagal 2.3 ir 2.4 formules (LST EN 16659 2016):

$$\%R_{0,1 \text{ kPa}}^N = \frac{1}{10} \sum_{N=1}^{10} \left(\%R_{0,1 \text{ kPa}}^N \right); \quad (2.3)$$

$$\%R_{3,2 \text{ kPa}}^N = \frac{1}{10} \sum_{N=1}^{10} \left(\%R_{3,2 \text{ kPa}}^N \right). \quad (2.4)$$

Bandymo apkrovos pasikeitimo įtaka bitumo elastiškumui įvertinama pagal 2.5 formulę (LST EN 16659 2016):

$$R_{\text{diff}} = 100 \times \left(\%R_{0,1 \text{ kPa}} - \%R_{3,2 \text{ kPa}} \right) / \left(\%R_{0,1 \text{ kPa}} \right), \quad (2.5)$$

čia R_{diff} – bandinio šlyties deformacijų atsistatymo pokytis dėl bandymo apkrovos pasikeitimo, %.

Po kiekvieno ciklo susidariusios liekamosios šlyties deformacijos apskaičiuojamos pagal 2.6 ir 2.7 formules (LST EN 16659 2016):

$$J_{\text{nr } 0,1 \text{ kPa}}^N = \frac{\varepsilon_{10}^N}{0,100}; \quad (2.6)$$

$$J_{\text{nr } 3,2 \text{ kPa}}^N = \frac{\varepsilon_{10}^N}{0,100}, \quad (2.7)$$

čia $J_{\text{nr } 0,1 \text{ kPa}}^N$ – liekamosios šlyties deformacijos bandinyje po n -tojo bandymo ciklo prie 0,1 kPa apkrovos, kPa^{-1} ; $J_{\text{nr } 3,2 \text{ kPa}}^N$ – liekamosios šlyties deformacijos bandinyje po n -tojo bandymo ciklo prie 3,2 kPa apkrovos, kPa^{-1} .

Vidutinė susidariusi liekamoji šlyties deformacija po bandymo prie 0,1 kPa ir 3,2 kPa apkrovų apskaičiuojama pagal 2.8 ir 2.9 formules (LST EN 16659 2016).

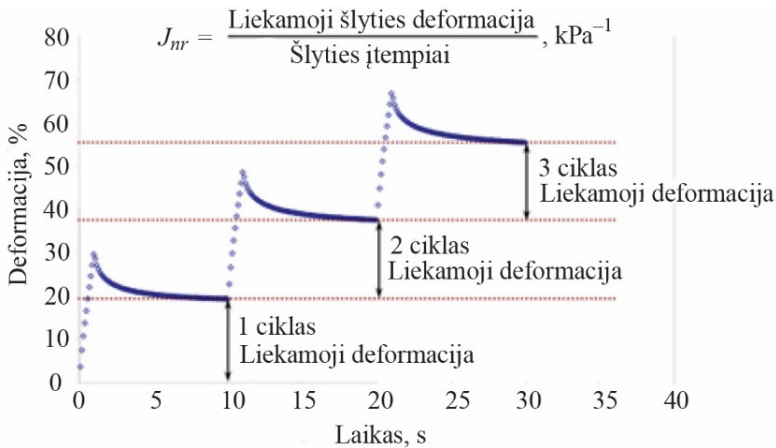
$$J_{\text{nr } 0,1 \text{ kPa}} = \frac{1}{10} \sum_{N=1}^{10} \left(J_{\text{nr } 0,1 \text{ kPa}}^N \right); \quad (2.8)$$

$$J_{nr\ 3,2\ kPa} = \frac{1}{10} \sum_{N=1}^{10} (J_{nr\ 3,2\ kPa}^N). \quad (2.9)$$

Procentinis skirtumas tarp liekamųjų šlyties deformacijų prie 0,1 kPa ir 3,2 kPa apkrovų apskaičiuojamas pagal 2.10 formulę (LST EN 16659 2016):

$$J_{nr-diff} = 100 \times (J_{nr\ 3,2\ kPa} - J_{nr\ 0,1\ kPa}) / J_{nr\ 0,1\ kPa}. \quad (2.10)$$

Tipiniai bitumo valkšniosios atstato nustatymo bandymo ciklai pavaizduoti 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Tipiniai bitumo valkšniosios atstato nustatymo bandymo ciklai (LST EN 16659 2016)

Fig. 2.13. Typical bitumen multiple stress creep and recovery test cycles (LST EN 16659 2016)

Bitumo atsparumas plyšių susidarymui įvertintas pagal standartą LST EN 14771:2012 naudojant lenkiamojo strypelio reometrą (BBR). Po trumpalaikio sendinimo pagal LST EN 12607-1:2015 ir ilgalaikio sendinimo pagal LST EN 14769:2012, iškaitintas bitumas išpilstytas į metalines formules (125×12,5×6,25 mm), aplinkos temperatūroje atvėsus bitumui, nupjautas paviršius ir bitumas išimtas iš formelės. Bitumo sijelės 60 min laikytos bandymo temperatūros skystyje, tada reometru apkrautos 100 g apkrova. Nustatytas standumas ir m -vertė po 60 s bandymo.

Standumas apskaičiuojamas pagal 2.11 formulę (LST EN 14771:2012):

$$S_m(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)}, \quad (2.11)$$

čia $S_m(t)$ – lenkiamasis standis laiko momentu t , MPa; P – apkrova, N; L – atstumas tarp bandinio laikiklio atramų, mm; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio aukštis, mm; $\delta(t)$ – bandinio įlinkis laiku t , mm.



2.14 pav. Bitumo kritinės žemiausios temperatūros nustatymo įranga ir bandinys
Fig. 2.14. Equipment and specimen of bitumen critical low temperature test

m -vertė apskaičiuojama pagal formulę 2.12 (LST EN 14771:2012):

$$m(t) = \left| \frac{d \log[S(t)]}{d \log(t)} \right| = |B + 2 \times C \times \log(t)|, \quad (2.12)$$

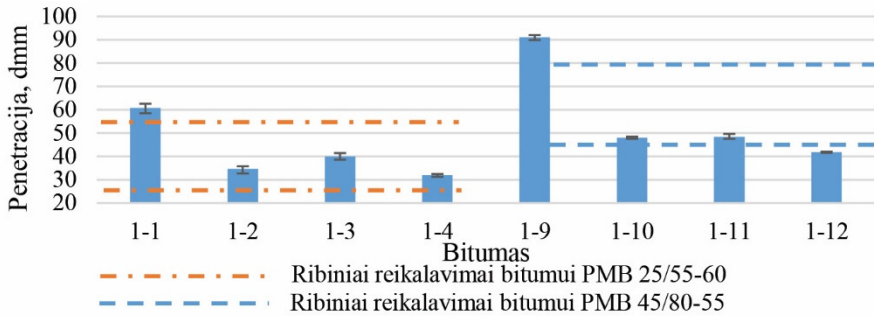
čia $S(t)$ – lenkiamasis standis laiko momentu t , MPa; B ir C – regresijos koeficientai; t – apkrovos laikas, s.

Bitumo mechaninių savybių nustatymo rezultatai ir jų analizė pateikta 2.2.3 poskyryje.

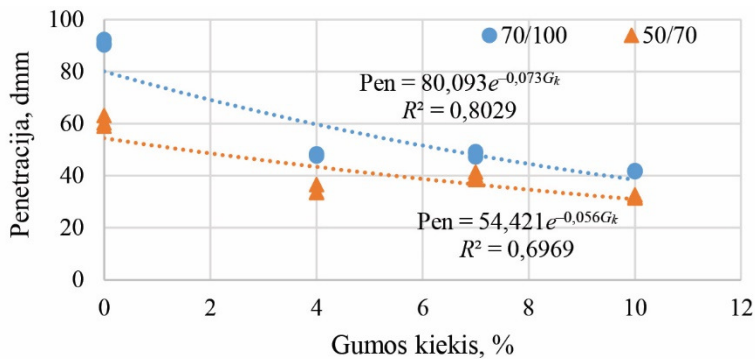
2.2. Guma modifikuoto bitumo eksperimentinio tyrimo rezultatai

2.2.1. Minimalaus pakankamo gumos kiekio nustatymo rezultatai

Šio etapo tikslas – nustatyti minimalų panaudotų padangų gumos kiekį, užtikrinantį modifikuoto bitumo savybes, lygiavertes polimerais modifikuotam bitumui. Eksperimentinio tyrimo, kurio metu kelių bitumas 50/70 ir 70/100 modifikuotas 4 %, 7 % ir 10 % gumos nuo bitumo masės, rezultatai yra pateikti 2.15–2.22 paveiksluose.

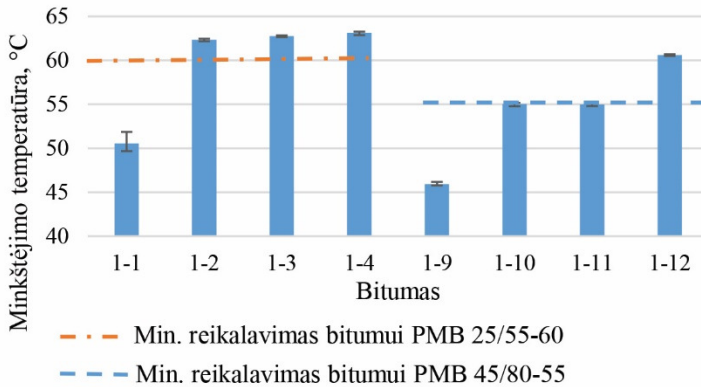


2.15 pav. Guma modifikuoto bitumo penetracijos nustatymo rezultatai
Fig. 2.15. Results of crumb rubber modified bitumen penetration test

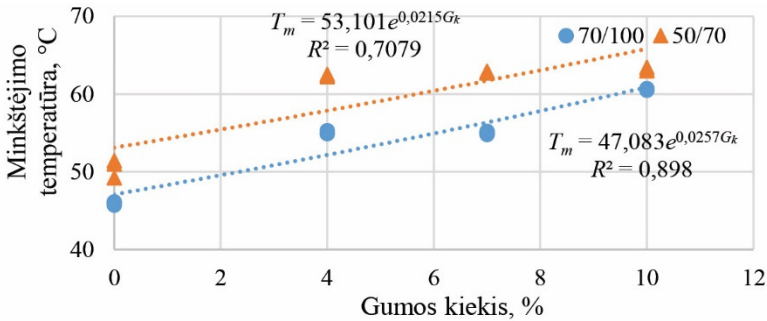


2.16 pav. Penetracijos priklausomybė nuo gumos kiekio
Fig. 2.16. Correlation of penetration and crumb rubber amount

Modifikavimas guma standina bitumą, t. y. bitumo penetracija sumažėja. Pastebėta, kad minkštesnis bitumas (70/100) yra jautresnis modifikavimui guma – penetracija naudojant 4–10 % gumos sumažėjo 42,7–49,4 dmm. Kietesnio kelių bitumo (50/70) penetracijos vertės sumažėjo 20,8–28,9 dmm, kas rodo, kad kietesnis bitumas yra mažiau jautrus modifikavimui guma. Tai paaiškinama, tuo, kad minkštesnio bitumo sudėtyje yra daugiau lengvųjų komponentų, kurias guma absorbuoja ir bitumo penetracijos vertė sumažėja. Taip pat nustatyta, kad minkštesnio bitumo (70/100) penetracijos vertės turi didesnę priklausomybę nuo gumos kiekio ($R^2 = 0,9485$) nei kietesnio bitumo (50/70), kurio priklausomybė nuo gumos kiekio $R^2 = 0,8398$. Tačiau naudojant skirtingus gumos kiekius, penetracijos vertės kinta santykinai nežymiai. Nustatyta, kad kelių bitumo 50/70 modifikuoto guma penetracijos vertės patenka į 25–55 dmm intervalą, o bitumo 70/100 – patenka į 45–80 dmm intervalą. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad guma modifikuoto bitumo penetracijos vertės tenkina atitinkamai įprastam polimerais modifikuotam bitumui PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 keliamus reikalavimus.



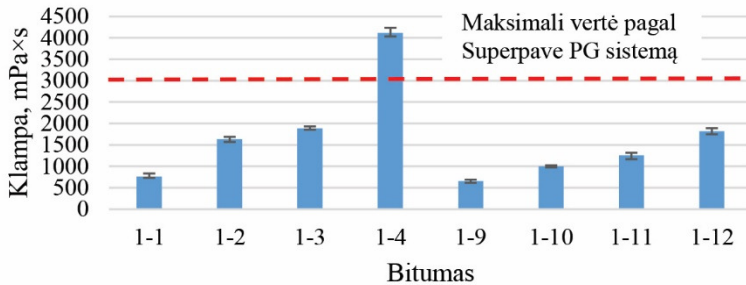
2.17 pav. Guma modifikuoto bitumo minkštėjimo temperatūros nustatymo rezultatai
Fig. 2.17. Results of crumb rubber modified bitumen softening point test



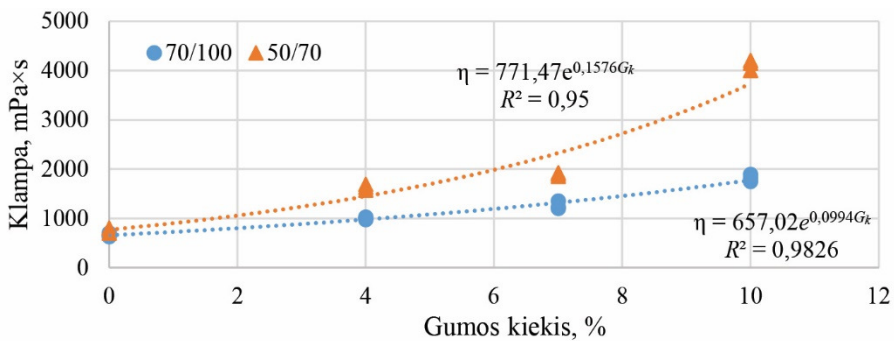
2.18 pav. Minkštėjimo temperatūros priklausomybė nuo gumos kiekio
Fig. 2.18. Correlation of softening point and crumb rubber amount

Didinant gumos kiekį, minkštėjimo temperatūros vertės didėja. Nustatyta, kad naudojant 4 % gumos bitumo 70/100 minkštėjimo temperatūra padidėjo 9,1 °C, o bitumo 50/70 – 11,8 °C lyginant su kelių bitumu. Naudojant 7 % gumos bitumo 70/100 minkštėjimo temperatūra padidėjo 9,1 °C, bitumo 50/70 – 12,2 °C, o naudojant 10 % gumos – atitinkamai 14,7 °C ir 12,6 °C. Bitumo minkštėjimo temperatūros padidėjimas paaiškinamas tuo, kad guma absorbuoja bitumo lengvuosius komponentus, bitume lieka santykinai didesnis dervų kiekis, todėl padidėja bitumo standumas. Nustatyta, kad bitumo 70/100 minkštėjimo temperatūros vertės yra lygios arba didesnės kaip 55 °C, o bitumo 50/70 – yra didesnės kaip 60 °C. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad guma modifikuoto bitumo minkštėjimo temperatūros vertės tenkina atitinkamai įprastam polimerais modifikuotam bitumui PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 keliamus reikalavimus. Taip pat galima daryti išvadą, kad didinant gumos kiekį, minkštėjimo temperatūra didėja

santykinai nežymiai, todėl didesnis kaip 4 % gumos panaudojimas bitumo modifikavimui būtų neefektyvus minkštėjimo temperatūros atžvilgiu.

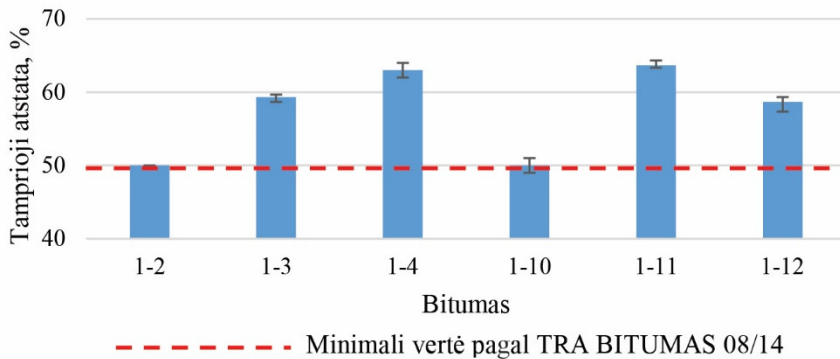


2.19 pav. Guma modifikuoto bitumo klamos nustatymo rezultatai
Fig. 2.19. Results of crumb rubber modified bitumen viscosity test

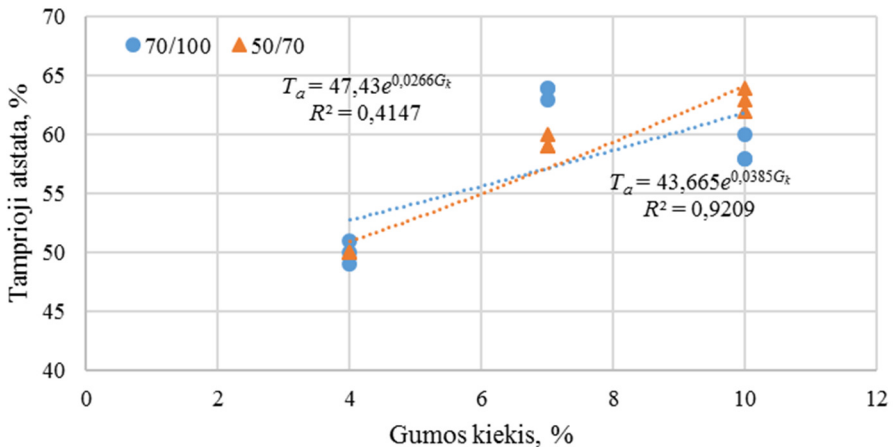


2.20 pav. Klamos priklausomybė nuo gumos kiekio
Fig. 2.20. Correlation of viscosity and crumb rubber amount

Analizuojant bitumo klamos nustatymo rezultatus, aiškiai matyti, kad didinant gumos kiekį, klamos vertės didėja. Tai paaiškinama tuo, kad išbrinkusios gumos dalelės sunkiau teka bitume, t. y. bitumo klampa padidėja. Nustatyta, kad bitumų 70/100 ir 50/70 su 4 % ir 7 % gumos, bei bitumo 70/100 su 10 % gumos klamos vertės yra mažesnės nei maksimali leistina vertė pagal dokumento AASHTO M 320 reikalavimus – 3000 mPa·s. Tačiau bitumo 50/70 su 10 % gumos klamos vertė viršija šį reikalavimą. Atsižvelgiant į penetracijos, minkštėjimo temperatūros ir klamos nustatymo rezultatus, galima teigti, kad 4 % gumos yra pakankamas kiekis, užtikrinantis guma modifikuoto bitumo atitikimą įprastiems PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60.



2.21 pav. Guma modifikuoto bitumo tampriosios atstatos nustatymo rezultatai
Fig. 2.21. Results of crumb rubber modified bitumen elastic recovery test



2.22 pav. Tampriosios atstatos priklausomybė nuo gumos kiekio
Fig. 2.22. Correlation of elastic recovery and crumb rubber amount

Analizuojant tampriosios atstatos nustatymo rezultatus, aiškiai matyti, kad didinant gumos kiekį, tamprioji atstata didėja, t. y. bitumas tampa elastiškesnis. Taip pat nustatyta, kad 4 % yra minimalus gumos kiekis, užtikrinantis tampriosios atstatos atitikimą minimaliam reikalavimui (50 %) pagal TRA BITUMAS 08/14. Taip pat pastebėta, kad SBS polimerais modifikuoto bitumo tamprioji atstata yra ženkliai didesnė (SBS polimerai suteikia bitumui elastiškumo). Siekiant pagerinti guma modifikuoto bitumo elastiškumą nepabloginant technologinių savybių, būtina modifikavimui panaudoti ir SBS polimerus.

2.3 lentelė. Bitumo stabilumo sandėliuojant nustatymo rezultatai**Table 2.3.** Results of the bitumen storage stability determination experimental research

Bitumas	Penetracija po stabilumo bandymo (V)	Penetracija po stabilumo bandymo (A)	Minkštėjimo temperatūra po stabilumo bandymo (V)	Minkštėjimo temperatūra po stabilumo bandymo (A)	Klampa po stabilumo bandymo (V)	Klampa po stabilumo bandymo (A)
70/100	–	–	–	–	–	–
70/100 + 10 % CR	35,2	51,2	59,3	65,1	1672	10724
70/100 + 7 % CR	36,8	62,4	55,5	59,7	850	7500
70/100 + 4 % CR	42,2	51,5	55,0	58,5	1200	4500
50/70	–	–	–	–	–	–
50/70 + 10 % CR	30,3	39,2	68,1	74,5	2483	16920
50/70 + 7 % CR	32,6	35,1	62,5	64,5	1525	3250
50/70 + 4 % CR	40,5	55,4	62,0	65,0	1775	6300

Paaiškinimai: (V) – bandinys, paimtas iš stabilumo sandėliuojant bandinio viršutinės dalies;

(A) – bandinys, paimtas iš stabilumo sandėliuojant bandinio apatinės dalies.

Analizuojant modifikuoto bitumo penetracijos vertes po stabilumo sandėliuojant bandymo nustatyta, kad guma modifikuotas bitumas nėra stabilus sandėliuojant penetracijos atžvilgiu (pagal TRA BITUMAS 08/14, modifikuotas bitumas laikomas stabilu sandėliuojant, kai rezultatai po 3 parų sandėliavimo 175 °C temperatūroje skiriasi ne daugiau kaip 9 dmm).

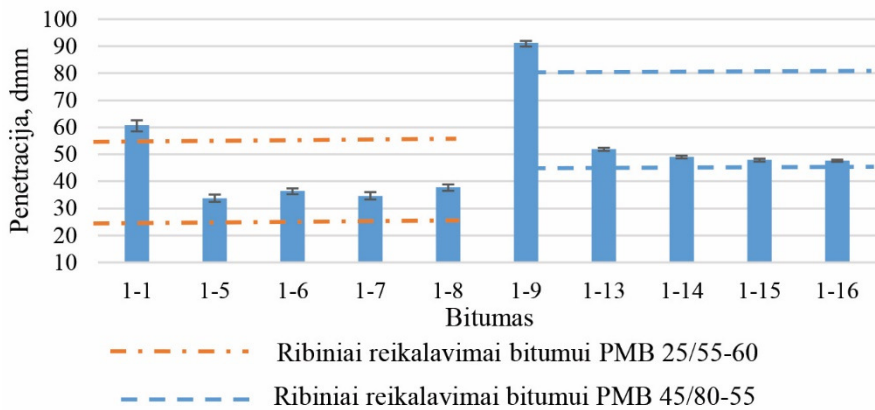
Analizuojant modifikuoto bitumo minkštėjimo temperatūros vertes po stabilumo sandėliuojant bandymo, nustatyta, kad abu bitumai naudojant 4 % ir 7 % gumos, yra stabilūs sandėliuojant minkštėjimo temperatūros požiūriu (pagal TRA BITUMAS 08/14, modifikuotas bitumas laikomas stabilu sandėliuojant kai rezultatai po 3 parų sandėliavimo 175 °C temperatūroje skiriasi ne daugiau kaip 5 °C).

Reikalavimų modifikuoto bitumo klampai po stabilumo sandėliuojant bandymo nėra, tačiau šis bandymas yra labai svarbus techniniu požiūriu – penetracijos ir minkštėjimo temperatūros nustatymo bandymai nėra labai jautrūs metodai, todėl netiksliai įvertinama bitumo konsistencija. Klampos nustatymo metodas yra labai jautrus bandymo temperatūrai ir tiriamo bitumo konsistenci-

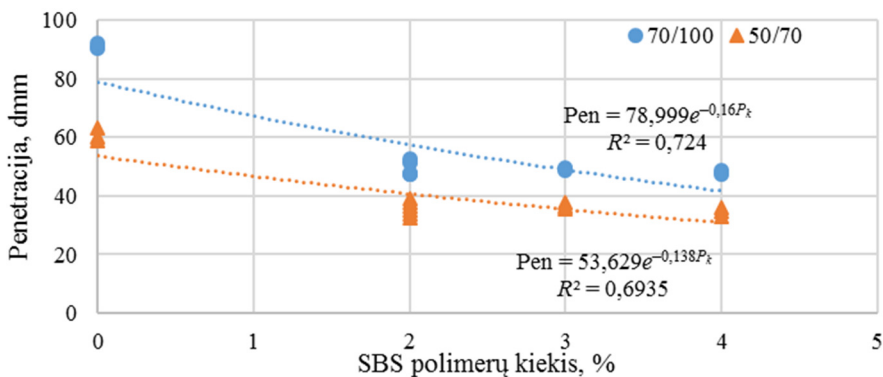
jai, todėl pasirinktas kaip papildomas greitas ir efektyvus bitumo stabilumo sandėliuojant įvertinimo bandymas. Analizuojant klampos po stabilumo sandėliuojant bandymo rezultatus, aiškiai matyti, kad didinant gumos kiekį, modifikuoto bitumo stabilumas ženkliai blogėja. Taip pat visų modifikuotų bitumų bandinių, paimtų iš dugno, klampos vertės viršija maksimalią leistiną vertę (3000 mPa×s), todėl galima teigti, kad visi šie bitumai yra nestabilūs sandėliuojant. Siekiant sandėliuoti šiuos bitumus, turi būti naudojamos talpos, turinčios cirkulatorius ir maišytuvus. Remiantis polimerais modifikuoto bitumo gamintojų sandėliavimo rekomendacijomis, šis bitumas sandėliuojant taip pat turi būti nuolat maišomas. Taigi, galima daryti išvadą, kad nors ir guma modifikuotas bitumas yra nestabilus sandėliuojant, tačiau nėra prastesnis už polimerais modifikuotą bitumą.

2.2.2. Minimalaus gumos ir polimerų kiekio nustatymo rezultatai

Šiame etape tyrimai tęsiami tik su pirmajame etape nustatytais tinkamais ir racionaliais modifikuoto bitumo bandiniais (tinkamu bitumu ir pakankamu kiekiu gumos), tačiau papildomai pridedant SBS polimerų ir taip pagerinant modifikuoto bitumo elastines savybes bei stabilumą sandėliuojant. Kadangi pirmajame etape nustatytas minimalus pakankamas gumos kiekis 4 %, šiame etape kelių bitumas 50/70 ir 70/100 modifikuotas 4 % gumos ir 4 % SBS polimerų kombinacija. Taip pat siekiant nustatyti pakankamą mažiausią gumos ir polimerų kiekį, pasirinktos pasirinktos šios papildomos gumos ir SBS polimerų kombinacijos – 2 % CR + 2 % SBS, 3 % CR + 3 % SBS ir 4 % CR + 2 % SBS. Šio etapo tikslas – nustatyti minimalų gumos ir SBS polimerų kiekį, reikalingą užtikrinti guma modifikuoto bitumo savybių atitikimą vien SBS polimerais modifikuoto bitumo savybėms ir norminio dokumento TRA BITUMAS 08/14 reikalavimams. Šio eksperimentinio tyrimo etapo bandymų rezultatai bei nustatytų bitumo savybių priklausomybė nuo modifikavimui panaudotų polimerų kiekio pateikta 2.23–2.30 paveiksluose.



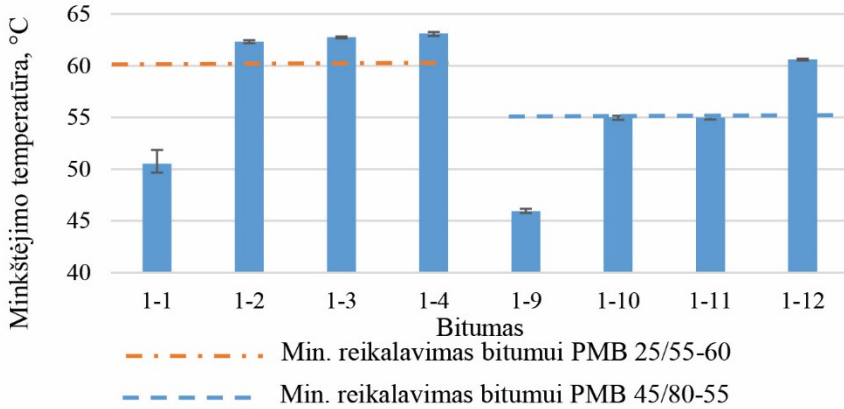
2.23 pav. Guma ir polimeriais modifikuoto bitumo penetracijos nustatymo rezultatai
Fig. 2.23. Results of crumb rubber and polymer modified bitumen penetration test



2.24 pav. Penetracijos priklausomybė nuo polimerų kiekio
Fig. 2.24. Correlation of penetration and polymers amount

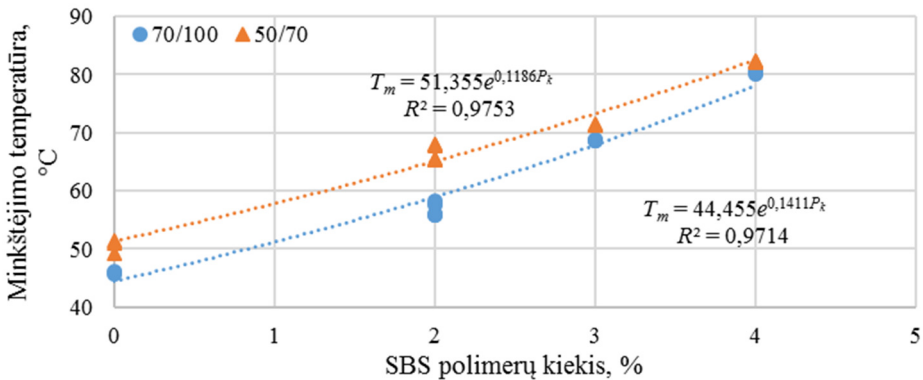
Kelių bitumo modifikavimas guma ir SBS polimeriais standina bitumą, t. y. bitumo penetracija sumažėja. Tai paaiškinama tuo, kad guma absorbuoja bitumo lengvuosius komponentus ir bitume lieka santykinai didesnė dalis dervų. Taip pat guma, apvelta polimeriais sukuria tinklą, kuris sujungia gumos daleles tarpusavyje. Pastebėta, kad minkštesnis bitumas (70/100) yra jautresnis modifikavimui guma ir SBS polimeriais – penetracija sumažėjo 39,2–43,5 dmm. Kietesnio bitumo (50/70) penetracijos vertės sumažėjo 23,1–27,0 dmm, kas rodo, kad kietesnis bitumas yra mažiau jautrus modifikavimui guma ir SBS polimeriais. Tačiau naudojant skirtingas gumos ir SBS polimerių kombinacijas, penetracijos vertės kinta santykinai nežymiai. Nustatyta, kad bitumo 50/70 modifikuoto su guma ir SBS polimeriais penetracijos vertės patenka į 25–55 dmm intervalą, o bitumo 70/100 –

patenka į 45–80 dmm intervalą. Taigi, guma ir SBS polimeriais modifikuoto bitumo penetracijos vertės tenkina įprastam SBS polimeriais modifikuotam bitumui PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 keliamus reikalavimus.



2.25 pav. Guma ir polimeriais modifikuoto bitumo minkštėjimo temperatūros nustatymo rezultatai

Fig. 2.25. Results of crumb rubber and polymer modified bitumen softening point test

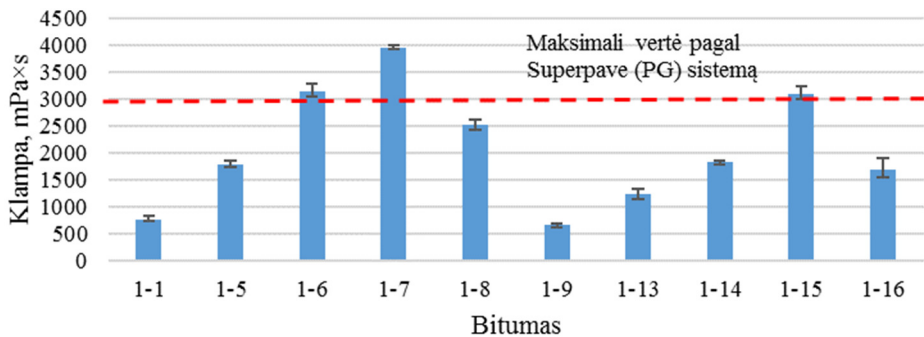


2.26 pav. Minkštėjimo temperatūros priklausomybė nuo polimerų kiekio

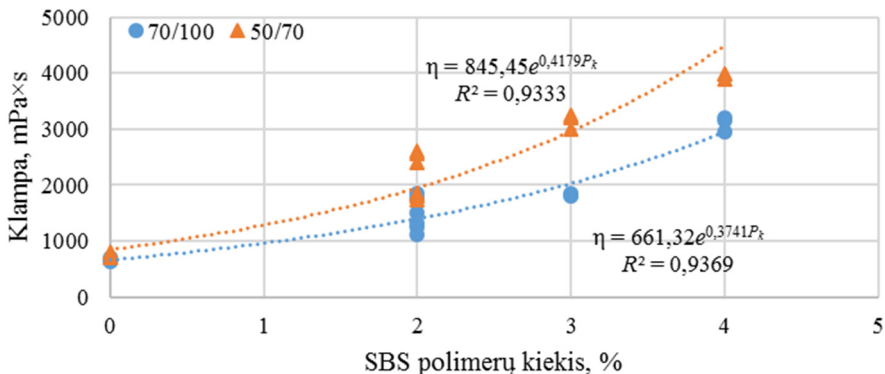
Fig. 2.26. Correlation of softening point and polymers amount

Didinant gumos ir SBS polimerų kiekį, minkštėjimo temperatūros vertės didėja. Analizuojant modifikavimo guma ir SBS polimeriais įtaką skirtingiems bitumams, naudojant 4 % gumos ir 2 % SBS polimerų, nustatyta, kad bitumo 70/100 minkštėjimo temperatūra padidėjo 11,9 °C, o bitumo 50/70 –17,3 °C. Naudojant kombinaciją 2 % CR + 2 % SBS nustatyta, kad bitumo 70/100 minkštėjimo temperatūra padidėjo 10,0 °C, o bitumo 50/70–14,9 °C, naudojant kombinaciją 3 % CR + 3 % SBS – atitinkamai 22,8 °C ir 20,8 °C, o naudojant kombinaciją

4 % CR + 4 % SBS – atitinkamai 34,3 °C ir 31,8 °C. Minkštėjimo temperatūros vertė labiau didėja priklausomai nuo SBS polimerų kiekio nei nuo gumos kiekio. Nustatyta, kad modifikuotų bitumų 70/100 minkštėjimo temperatūros vertės yra didesnės kaip 55 °C, o bitumų 50/70 – yra didesnės kaip 60 °C. Taigi, guma modifikuoto bitumo minkštėjimo temperatūros vertės tenkina atitinkamai įprastam SBS polimerais modifikuotam bitumui PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 keliamus reikalavimus. Taip pat naudojant 2 % gumos galima dvigubai sumažinti SBS polimerų kiekį užtikrinant lygiavertes modifikuoto bitumo minkštėjimo temperatūros vertes. Be to, modifikavimui naudojant 4 % CR + 4 % SBS minkštėjimo temperatūros vertės viršija 80 °C, t. y. guma ir SBS polimerais modifikuotas bitumas yra lygiavertis PMB 25/55-80 ir PMB 45/80-80 bitumams.



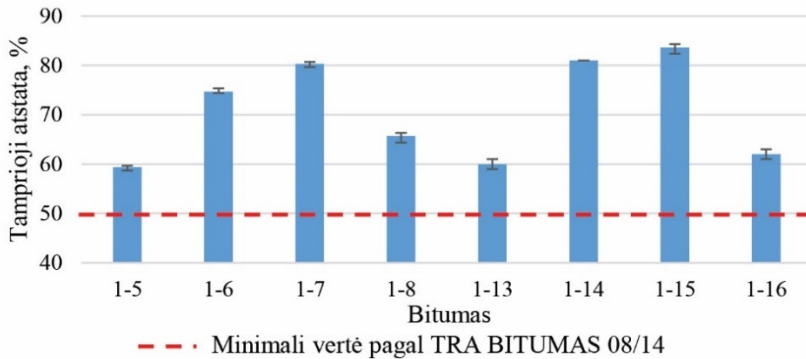
2.27 pav. Guma ir polimerais modifikuoto bitumo klamos nustatymo rezultatai
Fig. 2.27. Results of crumb rubber and polymer modified bitumen viscosity test



2.28 pav. Klamos priklausomybė nuo polimerų kiekio
Fig. 2.28. Correlation of viscosity and polymers amount

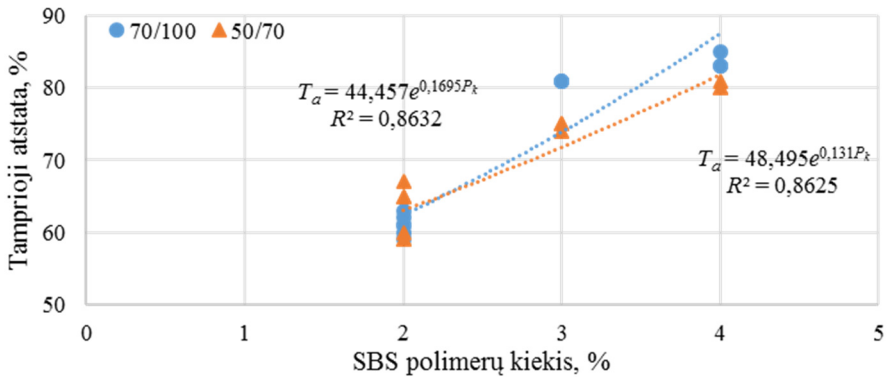
Didinant gumos ir polimerų kiekį, klamos vertės didėja. Nustatyta, kad bitumo 70/100 su 2 % CR + 2 % SBS, 3 % CR + 3 % SBS ir 4 % CR + 2 % SBS

klampos vertės yra mažesnės nei leistina maksimali leistina vertė – 3000 mPa×s. Taip pat nustatyta, kad bitumo 50/70 su 2 % CR + 2 % SBS ir 4 % CR + 2 % SBS, klampos vertės yra mažesnės nei maksimali leistina vertė – 3000 mPa×s. Nors bitumo 50/70 ir 70/100 su 4 % CR + 4 % SBS klampos vertės viršija maksimalią leistiną vertę, lyginant klampą su alternatyviais bitumais PMB 25/55-80 ir PMB 45/80-80, guma ir SBS kombinacija modifikuotų bitumų klampa yra netgi mažesnė. Todėl šiuos bitumus vertinant kaip alternatyvą itin polimeriais modifikuotam bitumui, nustatytos klampos vertės yra priimtinos.



2.29 pav. Guma ir polimeriais modifikuoto bitumo tampriosios atstatos nustatymo rezultatai

Fig. 2.29. Results of crumb rubber and polymer modified bitumen elastic recovery test



2.30 pav. Tampriosios atstatos priklausomybė nuo polimerų kiekio

Fig. 2.30. Correlation of elastic recovery and polymers amount

Analizuojant bitumo tampriosios atstatos nustatymo rezultatus, aiškiai matyti, kad didinant gumos ir polimerų kiekį, bitumo elastiškumas didėja. Tamprio-

sios atstatos vertės labiau priklauso nuo SBS polimerų kiekio nei nuo gumos kiekio. Nustatyta, kad visų modifikuotų bitumų tampriosios atstatos vertės ženkliai viršija TRA BITUMAS 08/14 keliamą reikalavimą ($\geq 50\%$). Atsižvelgiant į gautus rezultatus, galima teigti, kad guma ir polimerais modifikuoto bitumo tampriosios atstatos vertės tenkina atitinkamai įprastam polimerais modifikuotam bitumui PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 keliamus reikalavimus. Taip pat galima daryti išvadą, kad naudojant 2 % gumos galima dvigubai sumažinti polimerų kiekį užtikrinant modifikuoto bitumo tampriosios atstatos verčių atitikimą reikalavimams.

2.5 lentelė. Bitumo stabilumo sandėliuojant nustatymo rezultatai

Table 2.5. Results of the bitumen storage stability determination experimental research

Bitumas	Penetracija po stabilumo bandymo (V)	Penetracija po stabilumo bandymo (A)	Minkštėjimo temperatūra po stabilumo bandymo (V)	Minkštėjimo temperatūra po stabilumo bandymo (A)	Klampa po stabilumo bandymo (V)	Klampa po stabilumo bandymo (A)
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	66,0	38,6	74,3	78,4	2000	5000
70/100 + 3 % CR + 3 % SBS	39,0	47,0	63,0	65,0	1800	6500
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	45,3	44,3	59,6	60,6	1250	2575
70/100 + 4 % CR + 2 % SBS	45,6	53,5	62,1	66,4	1800	8850
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	83,0	26,0	78,0	91,0	1700	8600
50/70 + 3 % CR + 3 % SBS	34,0	39,0	71,0	77,0	2525	9400
50/70 + 4 % CR + 2 % SBS	33,6	38,7	68,1	71,8	2550	10850
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	36,9	36,4	67,7	68,4	2400	2850

Paaiškinimai: (V) – bandinys, paimtas iš stabilumo sandėliuojant bandinio viršutinės dalies; (A) – bandinys, paimtas iš stabilumo sandėliuojant bandinio apatinės dalies.

Visi guma ir polimerais modifikuoti bitumai yra stabilūs sandėliuojant penetracijos požiūriu, išskyrus bitumus 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS ir 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS, kurie netenkina TRA BITUMAS 08/14 keliamų reikalavimų, t. y. penetracijos vertės skiriasi >9 dmm. SBS polimerų sukurtas tinklas padeda išlaikyti gumos daleles nenusėdusias.

Visi guma ir polimerais modifikuoti bitumai yra stabilūs sandėliuojant minkštėjimo temperatūros požiūriu, išskyrus bitumus 50/70 + 3 % CR + 3 % SBS ir

50/70 + 4 % CR + 4 % SBS, kurie netenkina TRA BITUMAS 08/14 keliamų reikalavimų, t. y. minkštėjimo temperatūros vertės po 3 parų sandėliavimo 175 °C temperatūroje skiriasi >5 °C. Stabiliausias sandėliuojant minkštėjimo temperatūros atžvilgiu yra bitumas 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS, kurio minkštėjimo temperatūros vertės po 3 parų sandėliavimo 175 °C temperatūroje skiriasi tik 0,7 °C.

Reikalavimų modifikuoto bitumo klampai po stabilumo sandėliuojant bandymo nėra, tačiau šis bandymas yra labai svarbus techniniu požiūriu – penetracijos ir minkštėjimo temperatūros nustatymo bandymai nėra labai jautrūs, todėl netiksliai įvertinama bitumo konsistencija. Analizuojant klampos po stabilumo sandėliuojant bandymo rezultatus, aiškiai matyti, kad didinant gumos ir polimerų kiekį, modifikuoto bitumo stabilumas ženkliai blogėja. Taip pat visų modifikuotų bitumų, išskyrus 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS ir 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS, apatinių bandinių klampos vertės viršija maksimalią leistiną vertę (3000 mPa×s), todėl galima teigti, kad visi šie bitumai yra nestabilūs sandėliuojant. Bitumai 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS ir 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS parodė gerus stabilumo sandėliuojant rezultatus klampos atžvilgiu, todėl šiuos bitumus galima vadinti stabiliais sandėliuojant.

Siekiant sandėliuoti guma ir polimerais modifikuotus bitumus, turi būti naudojamos talpos, turinčios cirkulatorius ir maišytuvus. Remiantis polimerais modifikuoto bitumo gamintojų sandėliavimo rekomendacijomis, šis bitumas sandėliuojant taip pat turi nuolat maišomas. Taigi, galima daryti išvadą, kad guma ir polimerais modifikuotas bitumas nėra stabilus sandėliuojant, bet nėra prastesnis nei vien polimerais modifikuotas bitumas, todėl gali būti naudojamas kaip lygiavertė alternatyva.

Atsižvelgiant į šiame etape gautus rezultatus, nustatyta, kad bitumą modifikuojant 3 % gumos ir 3 % SBS polimerų bei 4 % gumos ir 2 % SBS polimerų kombinacijomis, bitumo stabilumas sandėliuojant netenkina reikalavimų, o kitos tirtos bitumo savybės pagerinamos santykinai nežymiai, tolimesniems tyrimams parinkti bitumai 70/100 + 4 % CR, 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS, 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS, 50/70 + 4 % CR, 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS ir 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS.

2.2.3. Bitumo atsparumo provėžų ir plyšių susidarymui nustatymo rezultatai

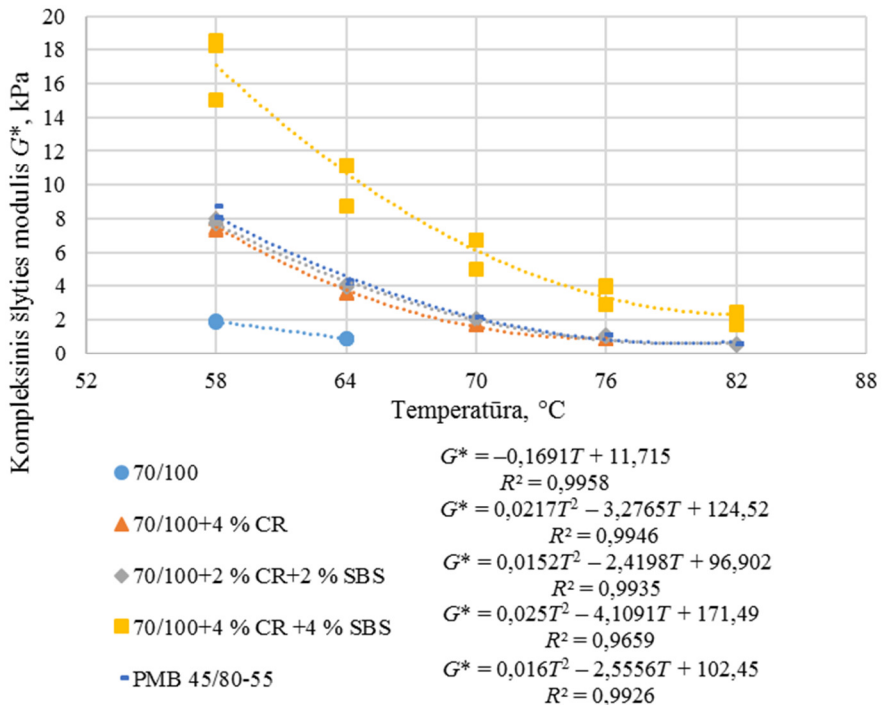
Atsižvelgiant į 2.2.1 ir 2.2.2 poskyriuose pateiktus tyrimo rezultatus, tolimesniems tyrimams atrinkti guma ir polimerais modifikuoti bitumai 70/100 + 4 % CR, 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS, 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS, 50/70 + 4 % CR, 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS ir 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Šiems bitumams nustatytas kompleksinis šlyties modulis ir fazės kampas (nesendintiems ir po trumpalaikio sendinimo bandiniams) bei standumas ir *m*-vertė (po trumpalaikio ir ilgalaikio sendinimo). Šio etapo tikslas – inovatyviais bandymo metodais įvertinti panaudotų pa-

dangų guma ir polimerais modifikuoto bitumo atsparumo provėžų ir plyšių susidarymui rodiklius. Taip pat gautus rezultatus palyginti su alternatyvių vien polimerais modifikuotų bitumų PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 rezultatais. Norint palyginti, šie alternatyvūs bitumai taip pat ištirti analogiškėmis bandymų sąlygomis.

Bandymų metu gauti rezultatai pateikti 2.31–2.42 paveiksluose.

2.2.3.1. Nesendinto bitumo atsparumo provėžų susidarymui nustatymo rezultatai

Nesendinto bitumo kompleksinio šlyties modulio, fazės kampo bei kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo rezultatai pateikti 2.31–2.36 paveiksluose.



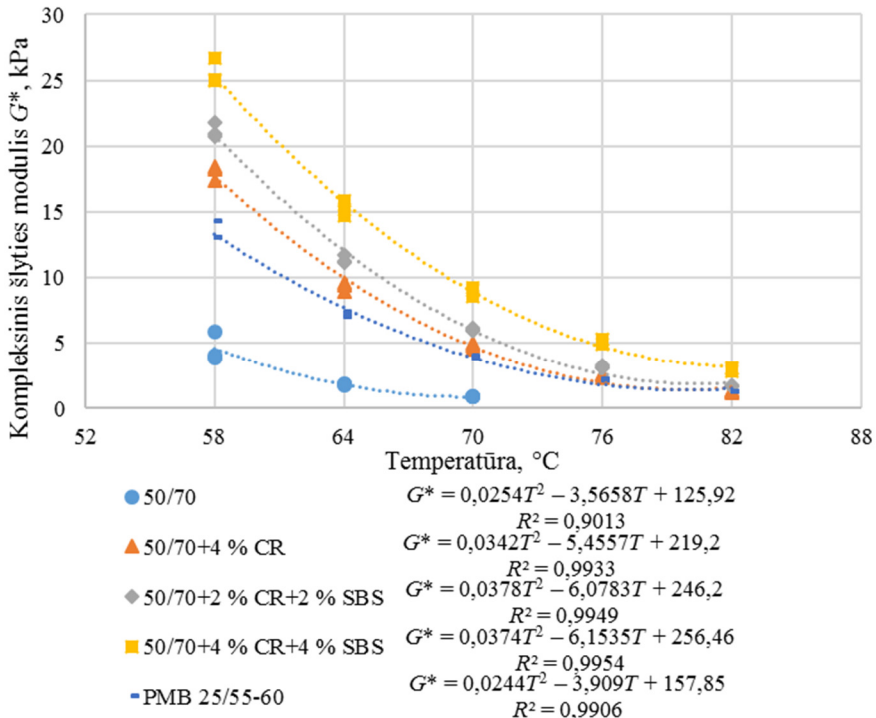
2.31 pav. Modifikuoto bitumo 70/100 kompleksinio šlyties modulio G^* nustatymo rezultatai

Fig. 2.31. Results of modified bitumen 70/100 complex shear modulus G^* determination test

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad didėjant temperatūrai kompleksinis šlyties modulis mažėja. Kadangi bitumas yra tampriai klampi medžiaga, didėjant

temperatūrai, darosi vis klampesnis, t. y. mažėja jo tamprumas. Todėl, žemesnėje temperatūroje bitumas pasižymi didesniu atsparumu deformacijoms bei atsistatymu nuėmus apkrovą.

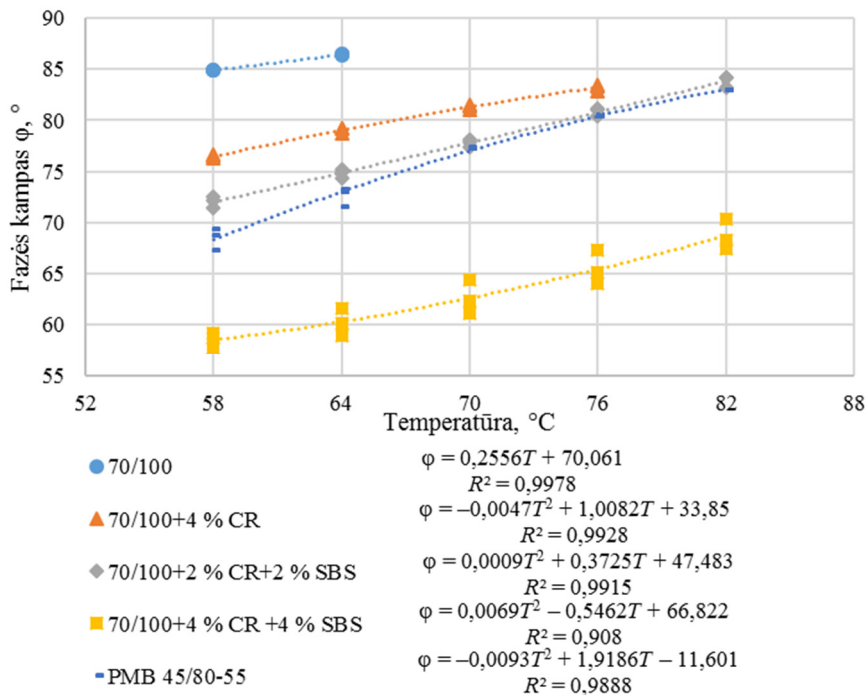
Nustatyta, kad bitumo 70/100+4 % CR kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 3,1 % ir 17,0 % nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose temperatūrose – nustatytas kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 56,1 % ir 76,1 % didesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei 54,7 % ir 71,1 % didesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma ir polimeriais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra prastesni atitinkamai 5,6 % ir 3,8 %, o bitumo 70/100 + 4 % CR – prastesni atitinkamai 8,6 % ir 20,2 % nei bitumo PMB 45/80-55.



2.32 pav. Modifikuoto bitumo 50/70 kompleksinio šlyties modulio G^* nustatymo rezultatai

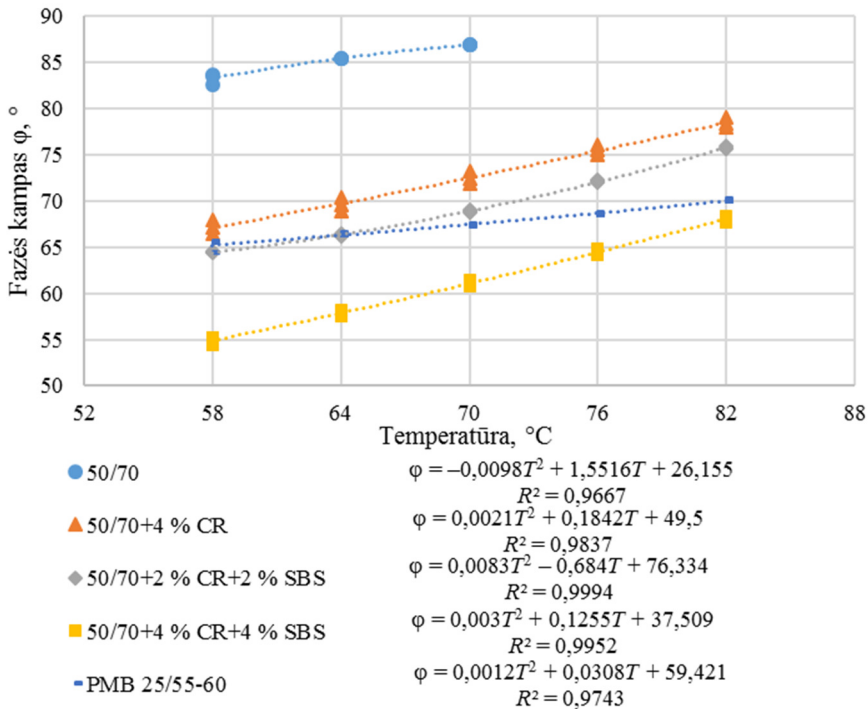
Fig. 2.32. Results of modified bitumen 50/70 complex shear modulus G^* determination test

Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 15,1 % ir 22,5 % nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose temperatūrose – nustatytas kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 29,5 % ir 51,9 % didesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 16,9 % ir 37,9 % didesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimeriais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra geresni atitinkamai 36,4 % ir 30,6 %, o bitumo 50/70 + 4 % CR – geresni atitinkamai 25,0 % ir 10,5 % nei bitumo PMB 25/55-60. Taigi, lyginant įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimeriais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad visi guma ir polimeriais modifikuoti bitumai parodė netgi geresnius kompleksinio šlyties modulio rezultatus nei vien polimeriais modifikuotas bitumas.



2.33 pav. Modifikuoto bitumo 70/100 fazės kampo nustatymo rezultatai
 Fig 2.33. Results of modified bitumen 70/100 phase angle determination test

Didėjant bandymo temperatūrai bitumo fazės kampas didėja. Tai paaiškinama tuo, kad bitumas yra tampriai klampi medžiaga, didėjant temperatūrai darosi vis klampesnis, o tamprumas mažėja. Fazės kampas apibūdina bitumo tamprumą, taigi, didėjant temperatūrai, bitumo fazės kampas didėja, t. y. elastiškumas blogėja.



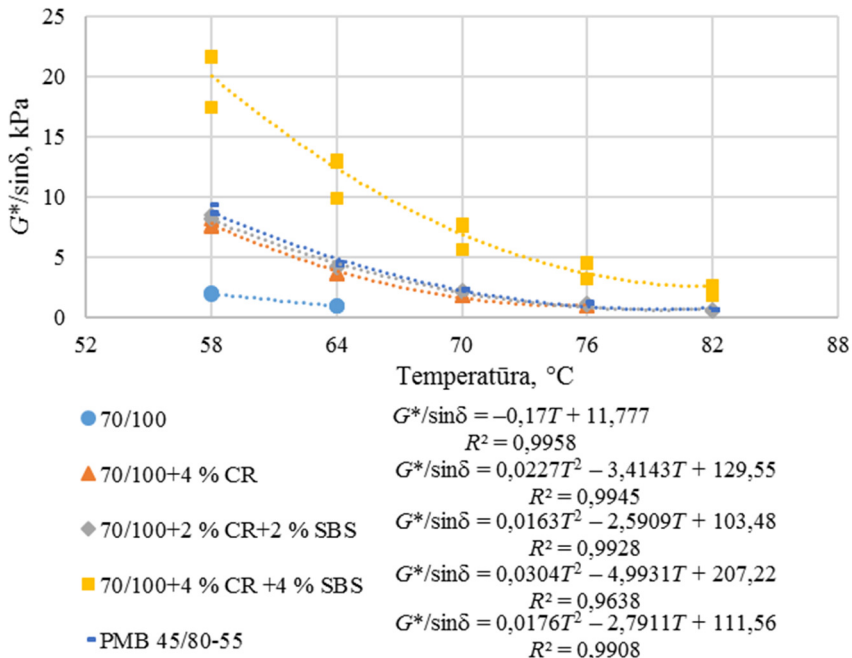
2.34 pav. Modifikuoto bitumo 50/70 fazės kampo nustatymo rezultatai

Fig 2.34. Results of modified bitumen 50/70 phase angle determination test

Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 4 % CR fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra didesnis atitinkamai 5,8 % ir 2,8 % nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose temperatūrose – nustatytas fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 23,4 % ir 21,3 % mažesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei 18,7 % ir 19,0 % mažesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra prastesni atitinkamai 4,9 % ir 0,5 %, o bitumo 70/100 + 4 % CR – prastesni atitinkamai 10,4 % ir 3,3 % nei bitumo PMB 45/80-55. Bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS ir PMB 70/100 + 4 % CR fazės kampas yra didesnis nei alternatyvaus bitumo PMB 45/80-55, tačiau rezultatų skirtumas mažėja kartu su bandymo temperatūra. Taigi, bitumo 70/100 + 2 %

CR + 2 % SBS fazės kampas 70 °C ir aukštesnėje temperatūroje yra lygiavertis bitumo PMB 45/80-55 fazės kampui.

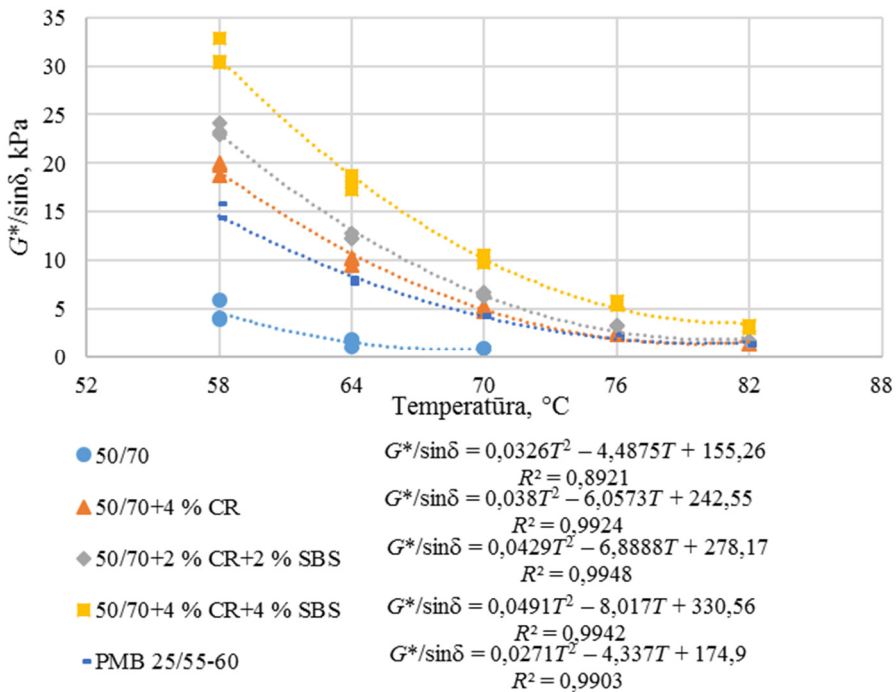
Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra didesnis atitinkamai 4,0 % ir 4,5 % nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose temperatūrose – nustatytas fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūrose yra atitinkamai 18,2 % ir 14,5 % mažesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 14,7 % ir 10,5 % mažesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C temperatūroje yra geresni 1,1 %, o 76 °C prastesni 4,8 %. Bitumo 50/70 + 4 % CR rezultatai prastesni atitinkamai 2,9 % ir 9,1 % nei bitumo PMB 25/55-60. Taigi, bitumas 50/70 + 4 % CR parodė šiek tiek prastesnius fazės kampo rezultatus nei PMB 25/55-60 bitumas ir rezultatų skirtumas didėja kartu su bandymo temperatūra, o bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS fazės kampas iki 70 °C temperatūros yra lygiavertis bitumo PMB 25/55-60 fazės kampui, tačiau didėjant temperatūrai, skirtumas tarp rezultatų didėja.



2.35 pav. Modifikuoto bitumo 70/100 kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo rezultatai

Fig 2.35. Results of modified bitumen 70/100 complex shear modulus and phase angle ratio $G^*/\sin\delta$ determination test

Didėjant bandymo temperatūrai bitumo atsparumo provėzoms parametras $G^*/\sin\delta$ mažėja. Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 4 % CR parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 5,2 % ir 17,5 % nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 70/100+4 % CR+4 % SBS funkcionavo geriausiai visose bandymo temperatūrose – nustatytas parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 61,5 % ir 78,1 % didesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei 59,4 % ir 73,5 % didesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma ir polimeriais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra prastesni atitinkamai 7,7 % ir 9,7 %, o bitumo 70/100 + 4 % CR – prastesni atitinkamai 12,5 % ir 25,5 % nei bitumo PMB 45/80-55.



2.36 pav. Modifikuoto bitumo 50/70 kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo rezultatai

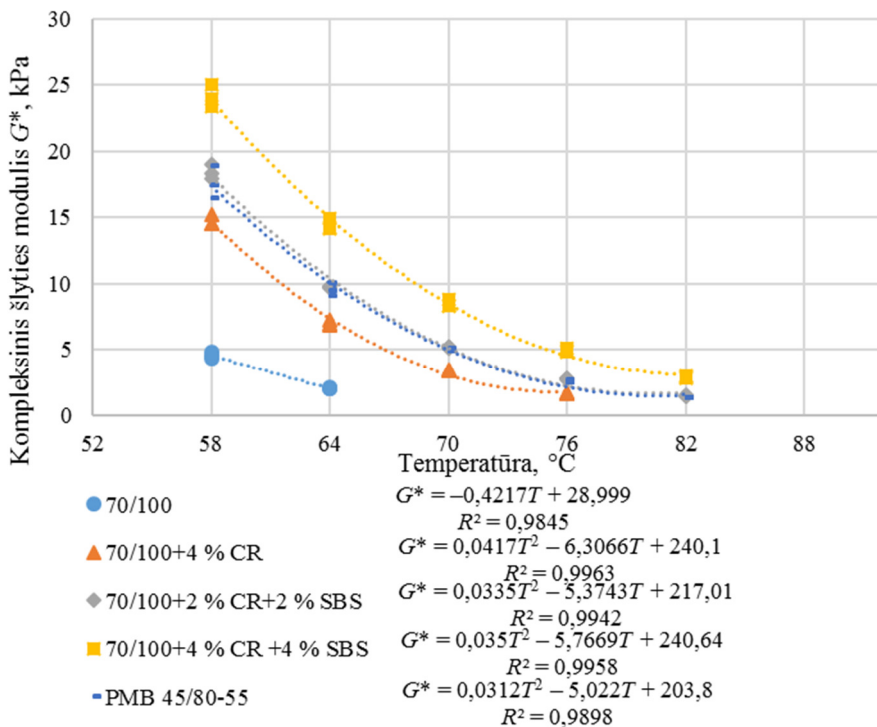
Fig 2.36. Results of modified bitumen 50/70 complex shear modulus and phase angle ratio $G^*/\sin\delta$ determination test

Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 16,9 % ir 23,8 % nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose

temperatūrose – nustatytas parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 37,3 % ir 55,1 % didesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 24,6 % ir 41,1 % didesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimeriais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra geresni atitinkamai 36,9 % ir 29,0 %, o bitumo 50/70 + 4 % CR – geresni atitinkamai 24,1 % ir 6,9 % nei bitumo PMB 25/55-60.

2.2.3.2. Bitumo po trumpalaikio sendinimo atsparumo provėžų susidarymui rezultatai

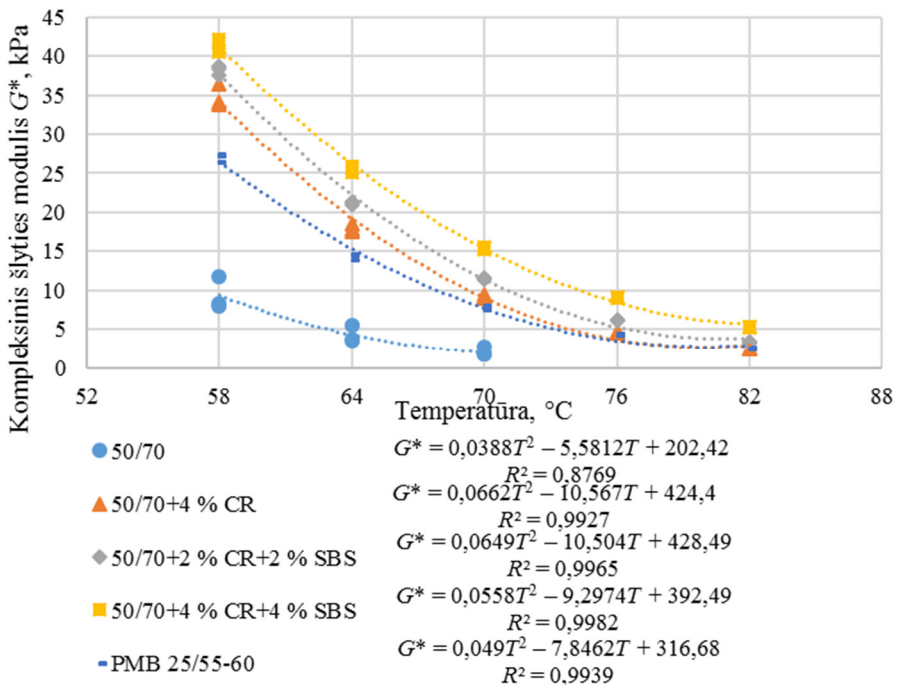
Bitumo po trumpalaikio sendinimo kompleksinio šlyties modulio, fazės kampo bei kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo rezultatai pateikti 2.37–2.42 paveiksluose.



2.37 pav. Modifikuoto bitumo 70/100 kompleksinio šlyties modulio G^* nustatymo rezultatai

Fig. 2.37. Results of modified bitumen 70/100 complex shear modulus G^* determination test

Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 4 % CR kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C bandymo temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 19,7 % ir 39,8 % nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose temperatūrose – nustatytas kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 38,8 % ir 66,4 % didesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei 23,8 % ir 44,2 % didesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra geresni atitinkamai 4,4 % ir 7,5 %, o bitumo 70/100 + 4 % CR – prastesni atitinkamai 16,1 % ir 34,9 % nei bitumo PMB 45/80-55.

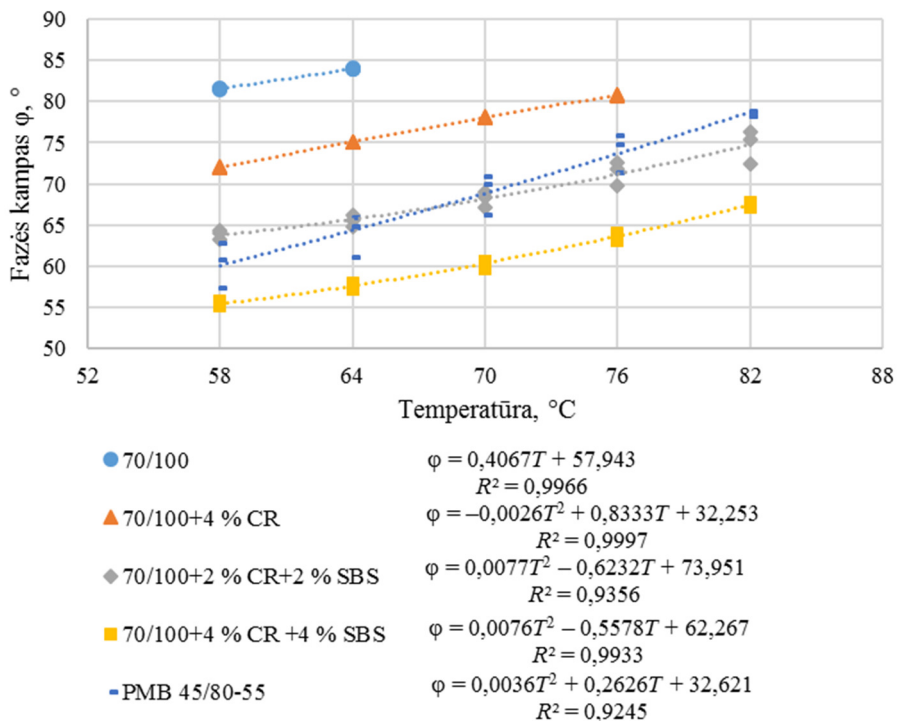


2.38 pav. Modifikuoto bitumo 50/70 kompleksinio šlyties modulio G^* nustatymo rezultatai

Fig. 2.38. Results of modified bitumen 50/70 complex shear modulus G^* determination test

Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR kompleksinis šlyties modulis 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 9,0 % ir 24,4 % nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose bandymo temperatūrose – nustatytas kompleksinis šlyties modulis

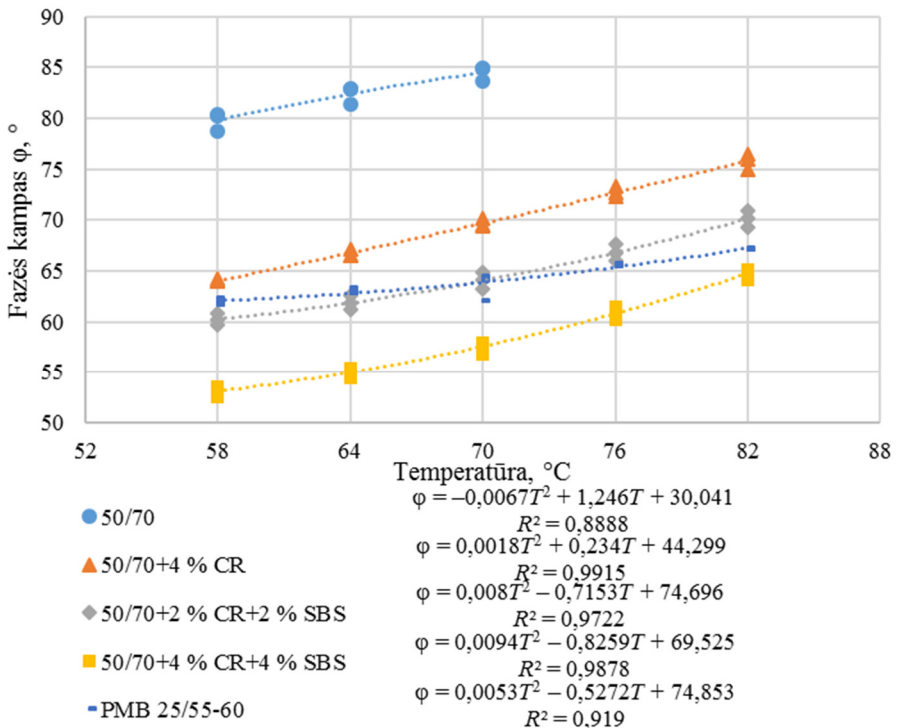
58 °C ir 76 °C temperatūros yra atitinkamai 16,1 % ir 48,2 % didesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 7,8 % ir 31,5 % didesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra geresni atitinkamai 29,4 % ir 30,3 %, o bitumo 50/70 + 4 % CR – geresni atitinkamai 22,4 % ir 7,8 % nei bitumo PMB 25/55-60. Taigi, lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad visi guma ir polimerais modifikuoti bitumai parodė netgi geresnius kompleksinio šlyties modulio rezultatus nei vien polimerais modifikuotas bitumas.



2.39 pav. Modifikuoto bitumo 70/100 fazės kampo nustatymo rezultatai
Fig 2.39. Results of modified bitumen 70/100 phase angle determination test

Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 4 % CR fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra didesnis atitinkamai 11,3 % ir 11,7 % nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose bandymo temperatūrose – nustatytas fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 23,0 % ir 21,2 % mažesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei

13,2 % ir 10,7 % mažesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C bandymo temperatūroje yra prastesni 5,5 %, o 76 °C temperatūroje – geresni 3,5 %. Bitumo 70/100 + 4 % CR rezultatai prastesni atitinkamai 16,2 % ir 8,5 % nei bitumo PMB 45/80-55. Remiantis gautais rezultatais, galima teigti, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS fazės kampas 70 °C ir aukštesnėje temperatūroje yra lygiavertis bitumo PMB 45/80-55 fazės kampui.

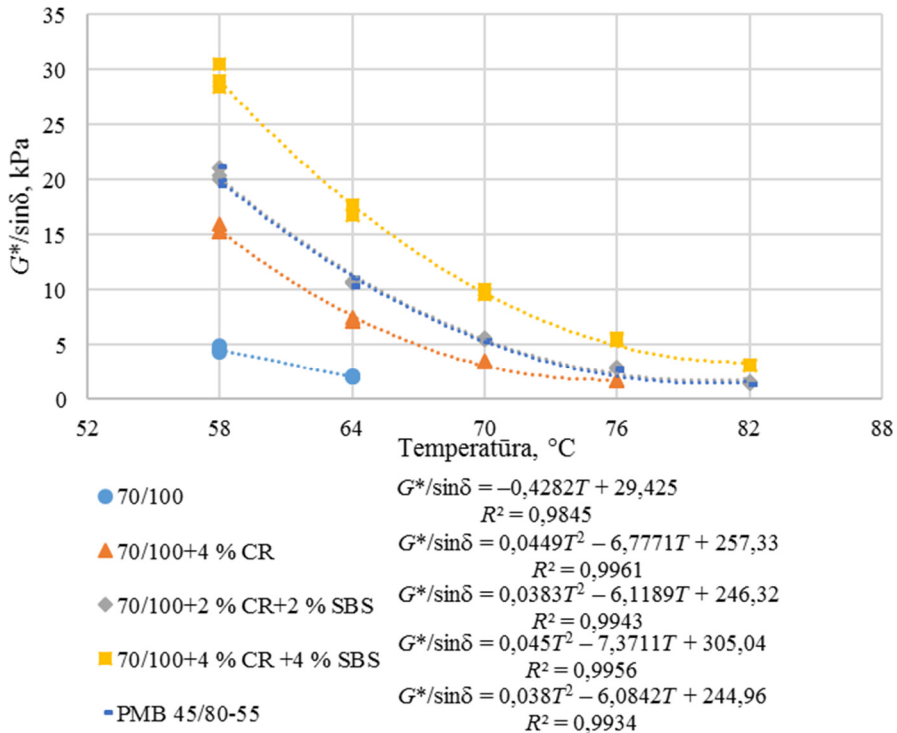


2.40 pav. Modifikuoto bitumo 50/70 fazės kampo nustatymo rezultatai

Fig 2.40. Results of modified bitumen 50/70 phase angle determination test

Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra didesnis atitinkamai 6,0 % ir 8,2 % nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose bandymo temperatūrose – nustatytas fazės kampas 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 17,1 % ir 16,2 % mažesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 11,8 % ir 8,7 % mažesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C temperatūroje yra

geresni 2,9 %, o 76 °C – prastesni 1,8 %. Bitumo 50/70 + 4 % CR rezultatai prastesni atitinkamai 3,2 % ir 9,8 % nei bitumo PMB 25/55-60. Remiantis gautais rezultatais, galima teigti, kad bitumas 50/70 + 4 % CR parodė šiek tiek prastesnius fazės kampo rezultatus nei PMB 25/55-60 bitumas ir rezultatų skirtumas didėja kartu su bandymo temperatūra, o bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS fazės kampas iki 70 °C yra lygia-vertis bitumo PMB 25/55-60 fazės kampui, tačiau didėjant temperatūrai, skirtumas tarp rezultatų didėja.

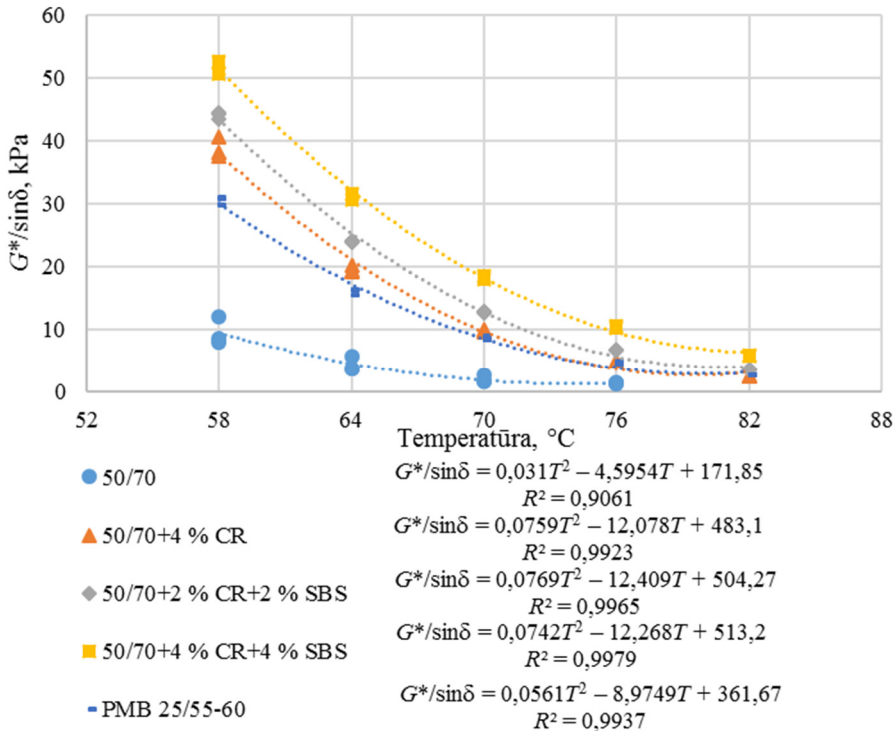


2.41 pav. Modifikuoto bitumo 70/100 kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo rezultatai

Fig 2.41. Results of modified bitumen 70/100 complex shear modulus and phase angle ratio $G^*/\sin\delta$ determination test

Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 4 % CR parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 24,2 % ir 42,3 % nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose temperatūrose – nustatytas parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 47,0 % ir 69,5 % didesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei 30,1 % ir 47,2 % didesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma ir polimeriais modifikuotų bitumų

rezultatais, nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra prastesni atitinkamai 1,2 % ir 8,8 %, o bitumo 70/100 + 4 % CR – prastesni atitinkamai 23,3 % ir 36,7 % nei bitumo PMB 45/80-55.



2.42 pav. Modifikuoto bitumo 50/70 kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo rezultatai

Fig 2.42. Results of modified bitumen 50/70 complex shear modulus and phase angle ratio $G^*/\sin\delta$ determination test

Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra mažesnis atitinkamai 12,1 % ir 27,2 % nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumas 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS funkcionavo geriausiai visose bandymo temperatūrose – nustatytas parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 25,3 % ir 52,6 % didesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 15,0 % ir 34,9 % didesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 rezultatus su guma ir polimerais modifikuotų bitumų rezultatais, nustatyta, kad bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS rezultatai 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra geresni atitinkamai 30,7 % ir 29,7 %, o bitumo 50/70 + 4 % CR – geresni atitinkamai 21,1 % ir 3,3 % nei bitumo PMB 25/55-60.

2.2.3.3. Bitumo valkšniosios atstatos rezultatai

Skyriaus ankstesniuose poskyriuose nustatytas panaudotų padangų gumos kiekis, užtikrinantis modifikuoto bitumo savybes, lygiavertes polimerais modifikuotam bitumui, nustatytos pakankamos gumos ir polimerų kombinacijos, užtikrinančios modifikuoto bitumo atsparumą provėžų ir plyšių susidarymui. Nepaisant to, kad bitumo atsparumas provėžoms įvertintas tradiciniais bandymo metodais (minkštėjimo temperatūros nustatymas ir atsparumo provėžoms parametro $G^*/\sin\delta$ nustatymas), gautų rezultatų sąryšis su realiu asfalto mišinių atsparumu provėžoms iki šiol vis dar nėra visiškai pagrįstas. Atsižvelgiant į tai, bitumo atsparumas provėžoms papildomai įvertintas valkšniosios atstatos bandymu. Bitumo bitumo valkšniosios atstatos bandymo rezultatai pateikti 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Bitumo valkšniosios atstatos bandymo rezultatai (60 °C)

Table 2.6. Results of the multiple stress creep recovery test (at 60 °C)

Bitumas	$J_{nr 0,1}$, kPa ⁻¹	$J_{nr 3,2}$, kPa ⁻¹	$J_{nr diff}$, %	$R_{0,1}$, %	$R_{3,2}$, %	R_{diff} , %	Kategorija ¹⁾
70/100	2,475	2,890	16,8	4,8	0,1	101,4	S
70/100 + 4 % CR	0,241	0,289	20,1	34,2	21,5	37,1	E
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	0,065	0,085	30,5	64,7	55,2	14,8	E
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	0,195	0,258	32,6	45,2	30,4	32,8	E
50/70	1,276	1,454	9,9	7,6	1,6	79,1	H
50/70 + 4 % CR	0,131	0,156	19,1	43,3	32,7	24,7	E
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	0,015	0,021	37,8	80,6	73,7	8,5	E
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	0,021	0,026	25,0	73,9	68,3	8,0	E
PMB 25/55-60	0,060	0,083	36,8	77,4	69,9	9,6	E
PMB 45/80-55	0,170	0,241	42,5	57,1	43,4	24,2	E

Pastabos: E – atsparus provėžoms veikiant ypatingoms apkrovoms ($J_{nr 3,2, \max 0,5 \text{ kPa}^{-1}}$); H – atsparus provėžoms veikiant sunkioms apkrovoms ($J_{nr 3,2, \max 2,0 \text{ kPa}^{-1}}$); S – atsparus provėžoms veikiant standartinėms apkrovoms ($J_{nr 3,2, \max 4,0 \text{ kPa}^{-1}}$).

¹⁾ Kategorijos parinktos pagal Federalinės Greitkelių asociacijos parengtą techninį dokumentą (Federal Highway Administration 2011)

Bitumo atsparumas provėžoms vertinamas pagal parametą $J_{nr 3,2}$ – kuo mažesnė $J_{nr 3,2}$ vertė ir kuo didesnė $R_{3,2}$ vertė, tuo bitumas yra atsparesnis provėžoms.

Kaip matyti iš 2.6 lentelėje pateiktų rezultatų, bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS, 50/70 + 2 % CR + 2 %, 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS ir PMB 25/55-60 yra atspariausias provėžų susidarymui.

2.2.3.4. Bitumo atsparumo plyšių susidarymui nustatymo rezultatai

Bitumo atsparumo plyšių susidarymui nustatymo rezultatai pateikti 2.7 lentelėje.

2.7 lentelė. Bitumo standumo ir *m*-vertės nustatymo rezultatai

Table 2.7. Results of bitumen stiffness and *m*-value test

Bitumas	-30 °C		-24 °C		-18 °C		-12 °C	
	Standumas, MPa	<i>m</i> -vertė	Standumas, MPa	<i>m</i> -vertė	Standumas, MPa	<i>m</i> -vertė	Standumas, MPa	<i>m</i> -vertė
70/100	506,3	0,247	265,6	0,378	–	–	–	–
70/100 + 4 % CR	–	–	370,4	0,263	179,3	0,331	–	–
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	–	–	286,5	0,267	155,2	0,322	–	–
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	–	–	361,2	0,278	183,3	0,323	–	–
50/70	–	–	360,5	0,303	198,2	0,408	–	–
50/70 + 4 % CR	–	–	380,5	0,216	195,8	0,325	–	–
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	–	–	–	–	159,2	0,298	95,8	0,311
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	–	–	–	–	192,3	0,291	112,9	0,317
PMB 25/55-60	–	–	400,5	0,273	206,9	0,343	–	–
PMB 45/80-55	–	–	311,4	0,329	170,1	0,378	–	–

Analizuojant nemodifikuoto ir modifikuoto bitumo 70/100 atsparumo plyšių susidarymui rezultatus, matyti, kad modifikavimui naudojant 4 % gumos arba 2 % gumos ir 2 % polimerų, bitumo standumas padidėja, kas reiškia prastesnį ats-

parumą šalčio poveikiui. Tačiau modifikavimui naudojant 4 % gumos ir 4 % polimerų, bitumo standumas padidėja nežymiai lyginant su nemodifikuotu bitumu, kas reiškia, kad modifikuojant bitumą 70/100 didesniu polimerų ir gumos kiekiu, nenustatytas reikšmingas atsparumo šalčiui pablogėjimas standumo atžvilgiu. Analizuojant m -vertės nustatymo rezultatus, nustatyta, kad bitumo modifikavimas sumažina m -vertę, kas reiškia pablogėjusį temperatūrinių įtempių atsistatymą. Tačiau šis reiškinys nėra būdingas vien guma modifikuotam bitumui – modifikuojant aukštos penetracijos (minkšta) bitumą visada pablogėja atsparumas šalčio poveikiui. Tai paaiškinama tuo, kad bitumas modifikavimo metu sensta, darosi kietesnis. Be to, guma absorbuoja bitumo lengvuosius komponentus, todėl bitume santykinai padidėja dervų kiekis. Pagal m -vertės nustatymo rezultatus, galima teigti, kad bitumas 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS yra atspariausias plyšių susidarymui, o bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS yra neatspariausias.

Analizuojant nemodifikuoto ir modifikuoto bitumo 50/70 atsparumo plyšių susidarymui rezultatus, matyti, kad modifikavimas guma ar gumos ir polimerų kombinacija sumažina bitumo standumą, kas reiškia padidėjusį atsparumą plyšių susidarymui. Taip pat pastebėta, kad modifikavimui naudojant gumą kartu su polimerais, atsparumas plyšių susidarymui padidėja. Nustatyta, kad bitumo modifikavimas sumažina m -vertę, kas reiškia pablogėjusį temperatūrinių įtempių atsistatymą. Pagal m -vertės nustatymo rezultatus, galima teigti, kad bitumas 50/70 + 4 % CR yra atspariausias plyšių susidarymui, o bitumas 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS yra neatspariausias.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

Disertacijoje iškeltam tikslui pasiekti atliktas kelių bitumo modifikavimui minimalaus pakankamo gumos ir polimerų kiekio nustatymo eksperimentinis tyrimas. Apibendrinant antrajame skyriuje pateiktus eksperimentinio tyrimo ir analizės rezultatus galima teigti, kad:

1. Didinant gumos kiekį, bitumo minkštėjimo temperatūra didėja santykinai nežymiai, todėl didesnis kaip 4 % gumos naudojimas bitumo modifikavimui yra neefektyvus minkštėjimo temperatūros atžvilgiu. Naudojant 2 % gumos galima dvigubai sumažinti SBS polimerų kiekį užtikrinant lygiavertes analogiškiems vien SBS polimerais modifikuotų bitumo minkštėjimo temperatūros vertes.
2. Vien guma modifikuotas bitumas netenkina stabilumo sandėliuojant reikalavimų, tačiau sumažinus gumos kiekį iki 2 % ir modifikavimui panaudojant 2 % SBS polimerų, stabilumas sandėliuojant yra pagerinamas ir atitinka keliamus reikalavimus.

3. Bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS atsparumo provėžoms parametro $G^*/\sin\delta$ rezultatai 58 °C ir 76 °C bandymo temperatūroje yra geresni atitinkamai 4,4 % ir 7,5 %, o bitumo 70/100 + 4 % CR – prastesni atitinkamai 16,1 % ir 34,9 % nei bitumo PMB 45/80-55.
4. Bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS atsparumo provėžoms parametro $G^*/\sin\delta$ rezultatai 58 °C ir 76 °C bandymo temperatūroje yra geresni atitinkamai 30,7 % ir 29,7 %, o bitumo 50/70 + 4 % CR – geresni atitinkamai 21,1 % ir 3,3 % nei bitumo PMB 25/55-60.
5. Bitumas 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS nustatytas parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 47,0 % ir 69,5 % didesnis nei bitumo 70/100 + 4 % CR bei 30,1 % ir 47,2 % didesnis nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS. Bitumo 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS nustatytas parametras $G^*/\sin\delta$ 58 °C ir 76 °C temperatūroje yra atitinkamai 37,3 % ir 55,1 % didesnis nei bitumo 50/70 + 4 % CR bei 24,6 % ir 41,1 % didesnis nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS.
6. Bitumo 70/100 modifikavimas guma ar gumos ir polimerų kombinacija pablogina atsparumą šalčio poveikiui 3,8–4,5 °C lyginant su nemodifikuotu bitumu, o bitumo 50/70 – 2,4–5,9 °C. Tačiau lyginant su alternatyviais vien SBS polimerais modifikuotais bitumais, atsparumas plyšių susidarymui nėra reikšmingai prastesnis.

3

Bitumo modifikavimo guma įtakos asfalto dangos funkcionavimui vertinimas

Šiame skyriuje atliktas guma modifikuoto bitumo eksploatacinių savybių vertinimas pagal Superpave (PG) sistemą, asfalto mišinių su guma ir polimerais modifikuotu bitumu atsparumo provėžoms tyrimas, asfalto mišinių ir bitumo atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės vertinimas. Įvertinta bitumo modifikavimo guma ir polimerais ekomominė nauda. Daugiakriteriu SAW metodu parinktas racionaliausias bitumo modifikavimo variantas ir pateiktos išvados. Skyriaus medžiaga paskelbta vienoje autoriaus mokslinėje publikacijoje: Šernas *et al.* (2017).

3.1. Modifikuoto bitumo eksploatacinių savybių vertinimas pagal Superpave (PG) sistemą

Eksperimentinio tyrimo tikslas – įvertinti guma ir SBS polimerais modifikuoto bitumo atsparumą provėžų susidarymui pagal bitumo eksploatacinių savybių Superpave (PG) sistemos (angl. *Superpave Performance Grading*) reikalavimus, pateiktus AASHTO M320:2016.

Bitumo eksploatacinių savybių vertinimui eksperimentinio tyrimo metu gauti guma ir SBS polimerais modifikuoto bitumo mechaninių savybių tyrimo rezultatai. Bitumo eksploatacinių savybių vertinimas apima nesendinto, bitumo po trumpalaikio ir ilgalaikio sendinimo rezultatų analizę.

Klasifikuojant bitumą pagal Superpave (PG) sistemą, naudojami reologinių bitumo bandymų rezultatai. Kritinės aukščiausios temperatūros nustatymui naudotas dinaminis šlyties reometras (2.11 pav.), o žemiausios kritinės temperatūros nustatymui – lenkiamojo strypelio reometras (2.14 pav.).

Tyrimo metu siekta įvertinti guma ir SBS polimerais modifikuoto bitumo atsparumą provėžų susidarymui prieš ir po trumpalaikio sendinimo (RTFOT), remiantis Superpave (PG) sistemos reikalavimais. Bandymas atliktas pagal standartą AASHTO T315:2012 (pasirinktas DSR bandymo dažnis 10 rad/s, atspindintis 90 km/h greičiu judančių transporto priemonių poveikį, temperatūrose: 58 °C, 64 °C, 70 °C, 76 °C, 82 °C ir 88 °C). Šios temperatūros parinktos pagal faktinę maksimalią asfalto dangos temperatūrą įvertinant tai, kad asfalto dangą veikiant sunkioms apkrovoms, maksimali dangos temperatūra turi būti padidinama 6–12 °C.

Reikalavimai kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio (atsparumo provėžų susidarymui parametro) $G^*/\sin\delta$ yra pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Bitumo eksploatacinių savybių (PG) atsparumo provėžoms susidaryti reikalavimai pagal dinaminio šlyties reometro reikšmes (AASHTO M. 320-10:2016)
Table 3.1. Requirements for performance grade bitumen (AASHTO M. 320-10:2016)

Bitumas	Reikšmė	Ribinė mažiausia vertė, kPa
Nesendintas	$G^*/\sin\delta$	1,0
Po trumpalaikio sendinimo (RTFOT)	$G^*/\sin\delta$	2,2

Pagal AASHTO M 320:2016, bitumo kritinė aukščiausia temperatūra nustatoma ekstrapoliuojant temperatūros vertes, prie kurių nustatytas atsparumo provėžoms parametras $G^*/\sin\delta$ atitinka 3.1 lentelės reikalavimus. Kritinės aukščiausios temperatūros ekstrapoliacijos būdu nustatymo pavyzdys pateiktas 3.1 paveiksle, o visų bitumų kritinių aukščiausių temperatūrų suvestinė pateikta 3.2 lentelėje. Bitumo PG vertė klasifikuojama kas 6 °C (46–82 °C intervale). Kaip matyti iš 3.2 lentelės, nesendinto bitumo 70/100 + 4 % CR kritinė aukščiausia temperatūra yra 74,87 °C, todėl šio bitumo PG kategorija yra 70. Tai reiškia, kad bitumas 70/100 + 4 % CR yra atsparus provėžoms 70 °C temperatūroje veikiant mažiau kaip 0,3 mln. ekvivalentinių 80 kN standartinių ašių skaičiui. Jei bitumas naudojamas itin sunkiomis sąlygomis, pvz., veikiant daugiau kaip 30 mln. lėtai judančių ekvivalentinių 80 kN standartinių ašių skaičiui, bitumo kritinė temperatūra turi

būti 6 °C didesnė, nei maksimali 7-dienų vidutinė projektuojamos asfalto dangos temperatūra (Manolis 2014).

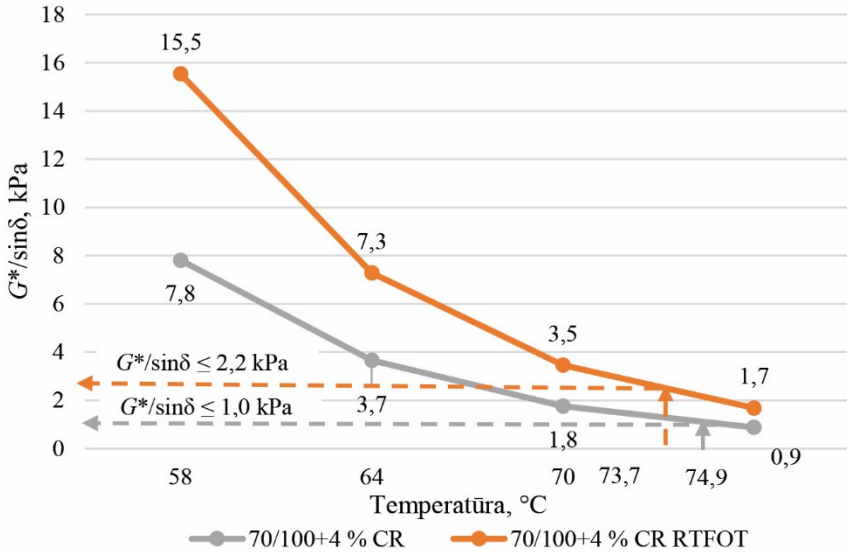
Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo santykio $G^*/\sin\delta$ nustatymo duomenys bitumo klasifikavimui paimti iš 2.2.3 poskyrio.

3.2 lentelė. Modifikuotų bitumų kritinių aukštų temperatūrų suvestinė
Table 3.2. Summary of modified bitumen critical high temperature results

Bitumas	Kritinė temperatūra, °C			Vidurkis	PG kategorija
70/100	63,0	63,1	63,2	63,1	58
70/100 RTFOT	63,2	63,2	63,6	63,3	58
70/100 +4% CR	74,9	74,8	74,9	74,9	70
70/100 +4 % CR RTFOT	74,0	73,6	73,6	73,7	70
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	92,4	88,2	92,6	91,1	88
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS RTFOT	85,3	85,4	85,8	85,5	82
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	76,8	76,4	76,4	76,5	76
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS RTFOT	78,5	78,9	78,4	78,6	76
50/70	68,9	68,9	68,8	68,9	64
50/70 RTFOT	68,1	71,8	67,9	69,3	64
50/70 + 4 % CR	84,1	84,5	84,9	84,5	82
50/70 + 4 % CR RTFOT	83,2	82,9	83,1	83,1	82
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	95,1	94,1	94,6	94,6	94
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS RTFOT	91,9	91,8	92,2	92,0	88
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	87,0	87,4	87,0	87,1	82
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS RTFOT	86,2	86,6	86,4	86,4	82
PMB 45/80-55	77,2	76,7	76,9	76,9	76
PMB 45/80-55 RTFOT	77,5	78,3	77,8	77,9	76
PMB 25/55-60	85,5	85,8	85,7	85,7	82
PMB 25/55-60 RTFOT	84,4	84,3	83,7	84,1	82

Kaip matyti iš 3.2 lentelės, praktiškai visais atvejais nesendinto bitumo kritinės temperatūros nustatytos aukštesnės lyginant su bitumų po trumpalaikio sendinimo rezultatais. Taip pat modifikuojant bitumą gumos ir polimerų kombinacija,

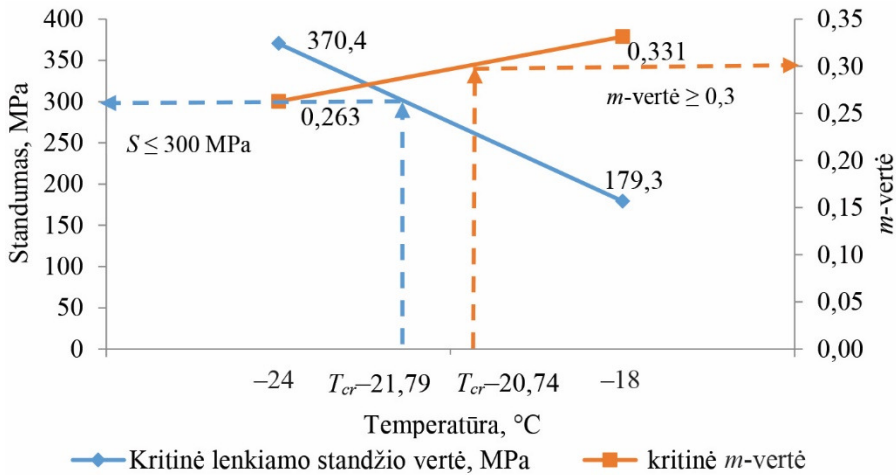
nustatytos aukštesnės kritinės temperatūros. Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS kritinė aukščiausia temperatūra yra tokia pati kaip ir alternatyvaus bitumo PMB 45/80-55 (76 °C), o bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS kritinė aukščiausia temperatūra yra tokia pati kaip ir alternatyvaus bitumo PMB 25/55-60 (82 °C).



3.1. pav. Bitumo 70/100 + 4 % CR kritinės aukščiausios temperatūros ekstrapoliacijos būdu nustatymo pavyzdys
Fig. 3.1. Example of bitumen 70/100 + 4% CR critical high temperature determination by extrapolation method

Kaip matyti iš 3.1 paveiksle pateikto pavyzdžio, nesendinto bitumo 70/100 + 4 % CR kritinė temperatūra yra 74,9 °C (parametro $G^*/\sin\delta$ vertė šioje temperatūroje yra 1,0 kPa), o šio bitumo kritinė temperatūra po trumpalaikio sendinimo yra 73,7 °C (parametro $G^*/\sin\delta$ vertė šioje temperatūroje yra 2,2 kPa).

Apskaičiavus bitumo standumo ir m -vertes skirtingose bandymo temperatūrose, ekstrapoliacijos būdu nustatytos kritinės temperatūros. Kritinės žemiausios temperatūros ekstrapoliacijos būdu nustatymo pavyzdys pateiktas 3.2 paveiksle, o visų bitumų kritinių žemiausių temperatūrų suvestinė pateikta 3.3 lentelėje. Duomenys kritinių temperatūrų nustatymui paimti iš 2.7 lentelės.



3.2 pav. Bitumo 70/100 + 4 % CR žemiausios kritinės temperatūros nustatymo ekstrapoliacijos būdu pavyzdys
Fig. 3.2. Example of bitumen 70/100 + 4% CR critical low temperature determination by extrapolation method

Kaip matyti iš 3.2 paveiksle pateikto pavyzdžio, bitumo 70/100 + 4 % CR kritinė temperatūra standumo atžvilgiu yra $-21,8$ °C (standumas šioje temperatūroje yra 300 MPa), o šio bitumo kritinė temperatūra m -vertės atžvilgiu yra $-20,7$ °C (m -vertė šioje temperatūroje yra 0,3). Kritinė žemiausia faktinė temperatūra dėl laiko-temperatūros superpozicijos principo yra 10 °C žemesnė nei nustatyta bandymo metu. Nustatyta bitumo 70/100 + 4 % CR kritinė žemiausia temperatūra yra $-20,7$ (parenkama aukštesnė kritinė temperatūra vertinant pagal standumą ir m -vertę), todėl faktinė kritinė žemiausia temperatūra yra $-30,7$ °C. Klasifikuojant bitumą pagal Superpave (PG) sistemą, kritinės žemiausios temperatūros PG kategorija klasifikuojam -6 °C. Taigi bitumo 70/100 + 4 % CR kritinė žemiausia PG kategorija yra -30 °C. Tai reiškia, kad projektuojama asfalto danga negali būti veikiamą žemesnės temperatūros nei -30 °C.

Kaip matyti iš 3.3 lentelės, bitumo modifikavimas polimerais kartu su guma sumažina kritinę žemiausią temperatūrą. Taip pat modifikuojant bitumą 50/70 gauti prastesni atsparumo šalčiui rezultatai lyginant su bitumu 70/100.

Analizuojant modifikuoto bitumo 70/100 kritinės žemiausios temperatūros rezultatus, matyti, kad 4 % SBS polimero panaudojimas ženkliai sumažina modifikuoto bitumo standumą žemoje temperatūroje, t. y. padidinama kritinė žemiausia temperatūra standumo atžvilgiu. Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 4 % CR kritinė žemiausia temperatūra yra tik šiek tiek aukštesnė nei bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS ir 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS. Lyginant įprasto polimerais mo-

difikuoto bitumo PMB 45/80-55 rezultatus su guma modifikuotų bitumų rezultatais, galima teigti, kad bitumas PMB 45/80-55 yra tik šiek tiek atsparesnis plyšių susidarymui. Tačiau, skirtumai tarp rezultatų yra santykinai nedideli, todėl galima teigti, kad guma modifikuotas bitumas yra lygiavertis polimerais modifikuotam bitumui funkcionavimo žemoje temperatūroje aspektu.

3.3 lentelė. Modifikuotų bitumų kritinių žemiausių temperatūrų suvestinė

Table 3.3. Summary of modified bitumen critical low temperature

Bitumas	Kritinė temperatūra pagal standumą, °C	Kritinė temperatūra pagal <i>m</i> -vertę, °C	Pakoreguotoji kritinė temperatūra, °C	Kritinė temperatūra pagal Superpave (PG)
70/100	-24,9	-27,6	-34,9	-30
70/100 + 4 % CR	-21,8	-20,7	-30,7	-30
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	-24,6	-20,4	-30,4	-30
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	-21,9	-21,1	-31,1	-30
50/70	-21,8	-24,2	-31,8	-30
50/70 + 4 % CR	-21,4	-19,4	-29,4	-24
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	-31,1	-17,0	-27,0	-24
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	-26,2	-15,9	-25,9	-24
PMB 25/55-60	-20,9	-21,7	-30,9	-30
PMB 45/80-55	-23,5	-27,5	-33,5	-30

Analizuojant modifikuoto bitumo 50/70 kritinės žemiausios temperatūros rezultatus, matyti, kad 4 % polimero SBS panaudojimas ženkliai sumažina modifikuoto bitumo standumą žemoje temperatūroje, t. y. padidinama kritinė žemiausia temperatūra, tačiau ženkliai sumažinama elastiškumas. Nustatyta, kad bitumo 50/70 + 4 % CR kritinė žemiausia temperatūra pagal *m*-vertę yra ženkliai aukštesnė nei bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS ir 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS. Tačiau lyginant kritinės temperatūros nustatymo rezultatus pagal standumą, aiškiai matyti, kad didinant gumos ir polimerų kiekį, bitumo kritinė žemiausia temperatūra didėja. Lyginant įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60 standumo rezultatus su guma modifikuotų bitumų rezultatais, galima teigti, kad guma ir polimerais modifikuoti bitumai yra atsparesni plyšių susidarymui. Tačiau lyginant rezultatus pagal *m*-vertę, nustatyta priešinga tendencija – gumos ir polimerų panaudojimas pablogina rezultatus.

Bitumas klasifikuojamas pagal kritinę aukščiausią ir kritinę žemiausią temperatūrą. Pavyzdžiui, bitumo 70/100+4 % CR kritinė aukščiausia temperatūra yra 70 °C, o kritinė žemiausia temperatūra yra –30 °C, tai šio bitumo kategorija – PG 70-30. 3.4 lentelėje pateikta modifikuoto bitumo klasifikavimo pagal Superpave (PG) sistemą suvestinė.

3.4 lentelė. Modifikuoto bitumo klasifikavimo pagal Superpave (PG) sistemą suvestinė
Table 3.4. Summary of modified bitumen classification according to Superpave (PG) system

Bitumas	Kritinė aukščiausia temperatūra pagal Superpave (PG)	Kritinė žemiausia temperatūra pagal Superpave (PG)	PG kategorija
70/100	58	–30	58-30
70/100 + 4% CR	70	–30	70-30
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	82	–30	82-30
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	76	–30	76-30
PMB 45/80-55	76	–30	76-30
50/70	64	–30	64-30
50/70 + 4 % CR	82	–24	82-24
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	88	–24	88-24
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	82	–24	82-24
PMB 25/55-60	82	30	82-30

Kaip matyti iš 3.4 lentelės, visi gumos bei polimerų kombinacija modifikuoti bitumai yra lygiaverčiai vien polimerais modifikuotiems bitumams atsparumo provėžoms aspektu. Vien guma modifikuotų bitumų aukščiausios kritinės temperatūros yra viena klasifikacijos pakopa (6 °C) žemesnės nei vien polimerais modifikuoto bitumo. Visų guma ir polimerais modifikuotų bitumo 70/100 variantų kritinė žemiausios temperatūros kategorija yra –30 °C bei yra tokia pati kaip ir vien polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55. Visų guma ir polimerais modifikuotų bitumo 50/70 variantų kritinė žemiausios temperatūros kategorija yra –24 °C ir yra 6 °C aukštesnė nei polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55-60. Tai rodo, kad kietesnis modifikavimui naudojamas bitumas nulemia prastesnę modifikuoto bitumo atsparumą šalčio poveikiui.

3.2. Asfalto mišinių su guma bei polimerais modifikuotu bitumu atsparumo provėžoms nustatymas

3.2.1. Asfalto mišinių atsparumo provėžoms nustatymo metodika

Asfalto mišiniam SMA 11 S su nemodifikuotu bitumu, vien guma modifikuotu bitumu, gumos ir polimerų kombinacija modifikuotu bitumu bei vien polimerais modifikuotu bitumu VGTU AIF KTI Automobilių kelių mokslo laboratorijoje pagal standartą LST EN 12697-22 nustatytas atsparumas provėžų susidarymui. Siekiant įvertinti asfalto mišinių atsparumo provėžoms kitimą nuo apkrovimo ciklų skaičiaus ir vėžės formavimosi greitį, vėžės gylis nustatytas net tik standartinėmis sąlygomis (10 000 apkrovimo ciklų, 60 °C bandymo temperatūra), bet ir pasunkintomis sąlygomis (30 000 apkrovimo ciklų, 60 °C bandymo temperatūra).



3.3 pav. Asfalto mišinio atsparumo provėžoms nustatymo įrenginys

Fig. 3.3. Wheel tracking test device

Kiekvieno asfalto mišinio atsparumas provėžų susidarymui nustatytas naudojant po tris bandinius.

3.2.2. Asfalto mišinių atsparumo provėžoms nustatymo rezultatai

Asfalto mišinių su guma bei polimerais modifikuotu bitumu atsparumo provėžų susidarymui rezultatai pateikti 3.5 lentelėje. Rezultatai pateikti išvedus vidurkį iš trijų bandinių.

3.5 lentelė. Asfalto mišinių atsparumo provėžoms nustatymo rezultatai
Table 3.5. Results of asphalt mixture rutting resistance determination test

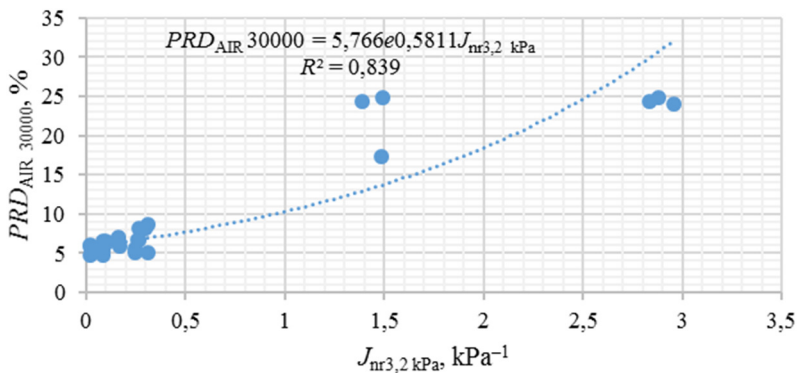
Asfalto mišinys	Santykinis vėžės gylis $PRD_{AIR10000}$ ciklų, %	Vėžės formavimosi greitis WTS_{AIR} , mm/1000 ciklų	Santykinis vėžės gylis $PRD_{AIR30000}$ ciklų, %	Vėžės formavimosi greitis WTS_{AIR} , mm/1000 ciklų
SMA 11 S 70/100	14,6	0,370	24,4	0,228
SMA 11 S 70/100 + 4 % CR	6,5	0,060	7,9	0,035
SMA 11 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	5,4	0,033	6,1	0,018
SMA 11 S 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	5,4	0,053	7,1	0,034
SMA 11 S 50/70	12,4	0,22	24,4	0,24
SMA 11 S 50/70 + 4 % CR	6,1	0,04	6,8	0,019
SMA 11 S 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	5,1	0,027	5,6	0,013
SMA 11 S 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	5,3	0,037	6,1	0,021
SMA 11 S PMB 25/55-60	5,0	0,023	5,5	0,012
SMA 11 S PMB 45/80-55	4,7	0,023	5,3	0,015

Kaip matyti iš 3.5 lentelės, atspariausi provėžoms yra asfalto mišiniai su vien SBS polimeriais modifikuotu bitumu bei asfalto mišiniai su guma ir polimeriais modifikuotu bitumu. Nustatyta, kad modifikavimui naudojant kietesnę bitumą (50/70), asfalto mišiniai su šiuo modifikuotu bitumu yra atsparesni provėžoms. Lyginant asfalto mišinių su skirtingais bitumais atsparumo provėžoms rezultatus, pastebėta, kad naudojant 4 % SBS polimerių ir 4 % gumos, atsparumas provėžoms yra padidinamas tik 0,0–0,2 % po 10 000 apkrovimo ciklų ir 0,5–1,0 % po 30 000 apkrovimo ciklų. Vadinasi, remiantis vien bitumo minkštėjimo temperatūros ir atsparumo provėžoms parametro $G^*/\sin\delta$ rezultatais, prognozuoti asfalto mišinių su guma ir polimeriais modifikuotu bitumu, negalima.

Gauti atsparumo provėžoms rezultatai palyginti su Lietuvoje dažniausiai naudojamų asfalto mišinių SMA 11 S rezultatais (3.4–3.5 pav.).

3.3. Guma modifikuoto bitumo ir asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės įvertinimas

Statistinio tyrimo metu siekta nustatyti priklausomybę tarp bitumo ir asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių. Statistinei analizei kaip bitumo atsparumo provėžoms rodikliai pasirinkti visų tirtų bitumų (70/100, 70/100 + 4 % CR, 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS, 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS, 50/70, 50/70 + 4 % CR, 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS, 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS, PMB 25/55-60, PMB 45/80-55) minkštėjimo temperatūra, kritinė aukščiausia temperatūra prieš sendinimą ir po trumpalaikio sendinimo, atsparumo provėžoms parametras $G^*/\sin\delta$, tamprioji atstata (tik modifikuotų bitumų), klampa ir liekamoji deformacija bandinyje po valksnumo ir atsikūrimo ciklo, padalinta iš bandinį veikusių įtempių. Kaip asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodikliai pasirinktas santykinis vėžės gylis PRD_{AIR} ir vėžės formavimosi greitis WTS_{AIR} po 10 000 ir 30 000 apkrovimo ciklų. Statistinės analizės metu nustatyta koreliacija tarp atskirų bitumo ir asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių. Asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklio $PRD_{AIR30000}$ ir bitumo atsparumo provėžoms rodiklio J_{nr} koreliacija pateikta 3.6 paveiksle. Visų asfalto mišinių ir bitumų atsparumo provėžoms rodiklių determinacijos koeficientų suvestinė pateikta 3.6 lentelėje, o koreliacijos koeficientų suvestinė pateikta 3.7 lentelėje.



3.6 pav. Asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklio $PRD_{AIR30000}$ ir bitumo atsparumo provėžoms rodiklio $J_{nr3,2} \text{ kPa}$ koreliacija

Fig. 3.6. Correlation of asphalt mixture rutting resistance index $PRD_{AIR30000}$ and bitumen rutting resistance index $J_{nr3,2} \text{ kPa}$

3.6 lentelė. Asfalto mišinio ir bitumo atsparumo provėžoms rodiklių determinacijos koeficientų suvestinė

Table 3.6. Summary of asphalt mixture and bitumen rutting resistance parameters determination coefficients

Bitumo atsparumo provėžoms rodiklis	Asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklis			
	$PRD_{AIR30000}$	$PRD_{AIR10000}$	$WTS_{AIR30000}$	$WTS_{AIR10000}$
Minkštėjimo temperatūra	0,527	0,485	0,581	0,559
J_{nr} 3,2 kPa	0,839	0,844	0,793	0,840
Tamprioji atstata	0,272	0,251	0,327	0,463
Klampa	0,462	0,429	0,531	0,527
$G^*/\sin\delta_{58^\circ\text{C}}$ (sendintas)	0,529	0,470	–	–
$G^*/\sin\delta_{64^\circ\text{C}}$ (sendintas)	0,479	0,442	–	–
$G^*/\sin\delta_{70^\circ\text{C}}$ (sendintas)	0,329	0,267	–	–
$G^*/\sin\delta_{76^\circ\text{C}}$ (sendintas)	0,168	0,069	–	–
$G^*/\sin\delta_{82^\circ\text{C}}$ (sendintas)	0,102	0,049	–	–
T_{crit} (sendintas)	0,638	0,684	–	–

3.7 lentelė. Asfalto mišinio ir bitumo atsparumo provėžoms rodiklių koreliacijos koeficientų suvestinė

Table 3.7. Summary of asphalt mixture and bitumen rutting resistance parameters correlation coefficients

Bitumo atsparumo provėžoms rodiklis	Asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodiklis			
	$PRD_{AIR30000}$	$PRD_{AIR10000}$	$WTS_{AIR30000}$	$WTS_{AIR10000}$
Minkštėjimo temperatūra	-0,696	-0,683	-0,699	-0,684
J_{nr} 3,2 kPa	0,934	0,950	0,931	0,987
Tamprioji atstata	-0,615	-0,580	-0,534	-0,641
Klampa	-0,627	-0,617	-0,625	-0,602
$G^*/\sin\delta_{58^\circ\text{C}}$ (sendintas)	-0,708	-0,684	–	–
$G^*/\sin\delta_{64^\circ\text{C}}$ (sendintas)	-0,682	-0,659	–	–
$G^*/\sin\delta_{70^\circ\text{C}}$ (sendintas)	-0,534	-0,511	–	–
$G^*/\sin\delta_{76^\circ\text{C}}$ (sendintas)	-0,428	-0,282	–	–
$G^*/\sin\delta_{82^\circ\text{C}}$ (sendintas)	-0,489	-0,354	–	–
T_{crit} (sendintas)	-0,836	-0,829	–	–

Determinacijos koeficientas parodo, kuri vieno požymio bendro kitimo dalis gali būti paaiškinta kito požymio reikšmių kitimo, o koreliacijos koeficientas parodo kintamųjų statistinį ryšį. Koreliacija apibūdinama taip:

- Labai stipri (–1; 1);
- Stipri (nuo 0,7 iki 1; nuo –1 iki –0,7);
- Vidutinė (nuo 0,5 iki 0,7; nuo –0,7 iki –0,5);
- Silpna (nuo 0,2 iki 0,5; nuo –0,5 iki –0,2);
- Labai silpna (nuo 0 iki 0,2; nuo –0,2 iki 0);
- Nėra ryšio (0).

Analizuojant determinacijos koeficiento nustatymo rezultatus (3.8 lentelė), gauta, kad šie asfalto mišinių ir bitumo atsparumo provėžoms rodikliai pasižymi didžiausiu sąryšiu:

- $PRD_{AIR10000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,844$);
- $WTS_{AIR10000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,840$);
- $PRD_{AIR30000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,839$);
- $WTS_{AIR30000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,739$).

Kaip matyti iš 3.9 lentelės, šie asfalto mišinių ir bitumo atsparumo provėžoms rodikliai pasižymi stipriausia koreliacija:

- $WTS_{AIR10000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($r = 0,987$);
- $PRD_{AIR10000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($r = 0,950$);
- $PRD_{AIR30000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($r = 0,934$);
- $WTS_{AIR30000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($r = 0,931$).

Remiantis determinacijos koeficiento nustatymo rezultatais, galima teigti, kad vieninteliu bitumo rodikliu $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ galima prognozuoti asfalto mišinių atsparumą provėžoms. Visi kiti bitumo rodikliai neturi tokio stipraus sąryšio.

3.4. Bitumo modifikavimo guma ekonominio efekto vertinimas

Atlikus guma ir polimerais modifikuoto bitumo bei asfalto mišinių eksperimentinį tyrimą, gauti šeši guma ir polimerais modifikuoti bitumai, kurie remiantis tyrimų rezultatais, tinkami naudoti asfalto mišinių gamybai kaip alternatyva vien polimerais modifikuotam bitumui: 70/100 + 4 % CR, 70/100 + 4 % CR + 4 % SBS, 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS, 50/70 + 4 % CR, 50/70 + 4 % CR + 4 % SBS ir 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS. 3.8 lentelėje pateikta suvestinė, kurioje pateiktas siūlomų taikyti panaudotų padangų guma ir polimerais modifikuoto bitumo atitikimas įprastiems vien polimerais modifikuotiems bitumams.

3.8 lentelė. Polimerais ir/arba guma modifikuoto bitumo atitikimas įprastiems bitumams
Table 3.8. Polymer and/or crumb rubber modified bitumen accordance to usual bitumen

Polimerais ir/arba guma modifikuotas bitumas	Polimerais modifikuotas bitumas	Siūlomas pavadinimas
70/100 + 4 % CR	PMB 45/80-55	45/80-55 CR
70/100 + 2 % CR + 2 % SBS	PMB 45/80-55	PMB 45/80-55 CR
70/100 + 4 % CR + 4 % SBS	PMB 45/80-80	PMB 45/80-80 CR
50/70 + 4 % CR	PMB 25/55-60	25/55-60 CR
50/70 + 2 % CR + 2 % SBS	PMB 25/55-60	PMB 25/55-60 CR
50/70 + 4 % CR + 4 % SBS	PMB 25/55-80	PMB 25/55-80 CR

Siekiant įvertinti bitumo modifikavimo panaudojant gumą ekonominį efektą, kaip modifikuoto bitumo kainos dedamosios parinkti šie komponentai: kelių bitumo kaina, panaudotų padangų gumos kaina, SBS polimerų kaina, vien polimerais modifikuoto bitumo kaina bei modifikavimo proceso kaina. Visos ekonominiam efektui skaičiuoti būtinų komponentų kainos nustatytos atsizvelgiant į rinkoje dalyvaujančių tiekėjų apklausą. Taigi, bitumo modifikavimui nustatytos šios naudojamų medžiagų kainos:

- kelių bitumas 70/100 – 320 Eur/t;
- kelių bitumas 50/70 – 320 Eur/t;
- panaudotų padangų guma (CR) – 200 Eur/t;
- SBS polimerai SBS – 3000 Eur/t;
- bitumas PMB 45/80-55 – 500 Eur/t;
- bitumas PMB 25/55-60 – 500 Eur/t;
- bitumas PMB 45/80-80 – 660 Eur/t;
- bitumas PMB 25/55-80 – 660 Eur/t;
- SMA 11 S mišinio su PMB 45/80-55 arba su PMB 25/55-60 – 68 Eur;
- SMA 11 S mišinio su PMB 45/80-80 arba su PMB 25/55-80 – 83 Eur.

1 tonos bitumo modifikavimo proceso kaina apskaičiuota pagal 3.1 formulę:

$$K_{\text{mod}} = K_{PMB} - K_B \times \left(1 - \frac{X}{100}\right) - K_{M2} \times \frac{X}{100}, \quad (3.1)$$

čia K_{mod} – 1 tonos bitumo modifikavimo kaina, Eur/t; PMB – PMB bitumo kaina, Eur; K_B – modifikavimui naudojamo kelių bitumo kaina, Eur/t; X – SBS polimerų, reikalingo 1 t PMB bitumo pagaminti kiekis, %; K_{M2} – SBS polimerų kaina, Eur/t.

Bitumo 1 tonos modifikavimo proceso kaina, apskaičiuota pagal 3.1 formulę:

$$K_{\text{mod}} = 500 - 320 \times \left(1 - \frac{4}{100}\right) - 3000 \times \frac{4}{100} = 72,80 \text{ Eur/t.}$$

Atsižvelgiant į modifikavimo priedų ir energijos kainų svyravimus, 1 tonos bitumo modifikavimo kaina suapvalinta iki 75 Eur/t.

Bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas įvertintas šiais aspektais:

- 1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur (lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu);
- 1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas, % (lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu);
- 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur (lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu);
- 1 tonai asfalto mišinio reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas, % (lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu);
- 1 m² asfalto dangai pakloti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur (lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu, priimant, kad asfalto dangos sluoksnio storis yra 4 cm).

1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas eurais lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu, apskaičiuotas pagal 3.2 formulę:

$$E_{TBEUR} = K_{PMB} - K_B \times \left(1 - \frac{X}{100}\right) - K_M \times \frac{X}{100} - K_{mod}, \quad (3.2)$$

čia E_{TBEUR} – 1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur; K_{PMB} – PMB bitumo kaina, Eur/t; K_B – modifikavimui naudojamo kelių bitumo kaina, Eur/t; K_M – gumos ar SBS polimero kaina, Eur/t.; X – gumos ar SBS polimero, reikalingų 1 t modifikuoto bitumo pagaminti kiekis, %; K_{mod} – 1 tonos bitumo modifikavimo kaina, Eur/t.

1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas (%) lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu, apskaičiuotas pagal 3.3 formulę:

$$E_{TB\%} = \frac{E_{TBEUR}}{K_{PMB}} \times 100, \quad (3.3)$$

čia $E_{TB\%}$ – 1 tonos bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas, %; E_{TBEUR} – 1 tonos bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas, Eur; K_{PMB} – PMB bitumo kaina, Eur/t.

1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S reikalingo bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas (Eur) apskaičiuotas pagal 3.4 formulę:

$$E_{TSMAEUR} = K_{PMB} \times \frac{X}{1000} - K_{CR} \times \frac{X}{1000}, \quad (3.4)$$

čia $E_{TSMAEUR}$ – 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S reikalingo bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas, Eur; K_{PMB} – PMB bitumo kaina, Eur/t; K_{CR} – guma

modifikuoto bitumo 1 tonos kaina, Eur, X – 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo kiekis, %.

Guma modifikuoto bitumo kaina (Eur) apskaičiuota pagal 3.5 formulę:

$$K_{CR} = K_B \times \left(1 - \frac{X}{100}\right) + K_M \times \frac{X}{100} + K_{\text{mod}}, \quad (3.5)$$

čia K_{CR} – 1 tonos bitumo modifikavimo guma kaina, Eur; K_B – modifikavimui naudojamų kelių bitumo kaina, Eur/t; K_M – gumos ar SBS polimero kaina, Eur/t.; X – gumos ar SBS polimero, reikalingų 1 t modifikuoto bitumo pagaminti kiekis, %; K_{mod} – 1 tonos bitumo modifikavimo kaina, Eur/t.

1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas (%) apskaičiuotas pagal 3.6 formulę:

$$E_{TSM\%} = \frac{E_{TSM\text{EUR}}}{K_{SMA}} \times 100, \quad (3.6)$$

čia $E_{TSM\%}$ – 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S reikalingo bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas, %; $E_{TSM\text{EUR}}$ – 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S reikalingo bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas, Eur; K_{SMA} – asfalto mišinio SMA 11 S kaina, Eur.

1 m² asfalto dangai pakloti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas (Eur) lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu, apskaičiuotas pagal 3.7 formulę:

$$E_{1\text{ m}^2} = \left(P \times h \times \rho \times X \times \frac{K_{PMB}}{1000}\right) - \left(P \times h \times \rho \times X \times \frac{K_{CR}}{1000}\right), \quad (3.7)$$

čia $E_{1\text{ m}^2}$ – 1 m² asfalto dangai pakloti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur; P – asfalto dangos plotas, m², h – asfalto dangos storis, cm; ρ – asfalto dangos tankis, Mg/m³; X – reikalingas bitumo kiekis, kg; K_{PMB} – PMB bitumo 1 tonos kaina, Eur; K_{CR} – guma modifikuoto bitumo kaina, Eur/t.

Skaičiavimo pavyzdys (lyginamas bitumas PMB 45/80-55 CR ir PMB 45/80-55):

1 tonos bitumo PMB 45/80-55 CR modifikavimo ekonominis efektas (Eur) lyginant su PMB 45/80-55, apskaičiuotas pagal 3.2 formulę:

$$E_{TBEUR} = 500 - 320 \times \left(1 - \frac{4}{100}\right) - 200 \times \frac{2}{100} - 3000 \times \frac{2}{100} - 75 = 53,80 \text{ Eur.}$$

1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas (%) lyginant su alternatyviu vien polimerais modifikuotu bitumu, apskaičiuotas pagal 3.3 formulę:

$$E_{TB\%} = \frac{53,80}{500,00} \times 100 = 10,76 \%$$

1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S reikalingo bitumo modifikavimo guma ekonominis efektas (Eur) apskaičiuotas pagal 3.4 formulę:

$$E_{TSM\text{EUR}} = 500 \times \frac{64}{1000} - 446,20 \times \frac{64}{1000} = 3,44 \text{ Eur.}$$

Guma modifikuoto bitumo kaina (Eur) apskaičiuota pagal 3.5 formulę:

$$K_{CR} = 320 \times \left(1 - \frac{4}{100}\right) + 200 \times \frac{2}{100} + 3000 \times \frac{2}{100} + 75 = 446,20 \text{ Eur.}$$

1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas (%) apskaičiuotas pagal 3.6 formulę:

$$E_{TSM\%} = \frac{3,44}{68} \times 100 = 5,06 \%$$

1 m² asfalto dangai pakloti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas (Eur) lyginant su alternatyviu vien polimeriais modifikuotu bitumu, apskaičiuotas pagal 3.7 formulę:

$$E_{1 \text{ m}^2} = \left(1 \times 0,04 \times 2,450 \times 64 \times \frac{500}{1000}\right) - \left(1 \times 0,04 \times 2,450 \times 64 \times \frac{445,20}{1000}\right) = 0,34 \text{ Eur.}$$

Visų tirtų bitumų modifikavimo guma ir polimeriais ekonominio efekto suvestinė pateikta 3.11 lentelėje.

Kaip matyti iš 3.11 lentelės, ekonomiškai naudingiausias variantas yra naudoti bitumą 45/80-55 CR arba 25/55-60 CR, kuomet 1 tonos bitumo kaina yra net 21,96 % mažesnė už įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 kainą. Šiuo atveju, 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo kaina yra 7,03 Eur mažesnė už įprasto polimeriais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60 kainą. Vertinant 1 m² asfalto dangai pakloti asfalto mišiniu SMA 11 S reikalingo bitumo ekonominį efektą, apskaičiuota, kad naudojant bitumą 45/80-55 CR arba 25/55-60 CR vietoje PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60, sutaupoma 0,69 Eur/m².

3.9 lentelė. Bitumo modifikavimo guma ir polimerais ekonominio efekto suvestinė
Table 3.9. Summary of economical effect of bitumen modification using crumb rubber and polymers

Polimerais ir/arba panaudotų padangų guma modifikuotas bitumas	Polimerais modifikuotas bitumas	1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur	1 tonos bitumo modifikavimo ekonominis efektas, %	1 tonai asfalto mišinio reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur ¹⁾	1 tonos asfalto mišinio taikant guma ir polimerais modifikuotą bitumą ekonominis efektas, %	1 m ² asfalto dangai pakloti reikalingo bitumo modifikavimo ekonominis efektas, Eur ²⁾
PMB 45/80-55 CR	PMB 45/80-55	53,80	10,76	3,44	5,06	0,34
PMB 25/55-60 CR	PMB 25/55-60	53,80	10,76	3,44	5,06	0,34
45/80-55 CR	PMB 45/80-55	109,80	21,96	7,03	10,33	0,69
25/55-60 CR	PMB 25/55-60	109,80	21,96	7,03	10,33	0,69
PMB 45/80-80 CR	PMB 45/80-55	2,60	0,39	0,17	0,24	0,02
PMB 25/55-80 CR	PMB 25/55-60	2,60	0,39	0,17	0,24	0,02
PMB 45/80-80 CR	PMB 45/80-80	162,60	24,64	10,41	12,54	1,02
PMB 25/55-80 CR	PMB 25/55-80	162,60	24,64	10,41	12,54	1,02

Pastabos: ¹⁾ Asfalto mišinys – SMA 11 S; ²⁾ asfalto dangos sluoksnio storis – 4 cm.

Bitumo PMB 45/80-55 CR arba PMB 25/55-60 CR 1 tonos bitumo kaina yra 10,76 % mažesnė už įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60 kainą. Šiuo atveju, 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo kaina yra 3,44 Eur mažesnė už įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60 kainą. Vertinant 1 m² asfalto dangai pakloti asfalto mišiniu SMA 11 S reikalingo bitumo ekonominį efektą, apskaičiuota, kad naudojant bitumą PMB 45/80-55 CR arba PMB 25/55-60 CR vietoje įprasto PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60, sutaupoma 0,34 Eur/m². Šis modifikavimo variantas yra 2-asis ekonomiškai naudingiausias variantas.

Bitumo PMB 45/80-80 CR arba PMB 25/55-80 CR 1 tonos bitumo kaina yra 0,39 % mažesnė už įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60 kainą. Šiuo atveju, 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo kaina yra 0,17 Eur mažesnė už įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60 kainą. Vertinant 1 m² asfalto dangai pakloti asfalto mišiniu SMA 11 S reikalingo bitumo ekonominį efektą, apskaičiuota, kad naudojant bitumą PMB 45/80-80 CR arba PMB 25/55-80 CR vietoje įprasto PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60, sutaupoma 0,02 Eur/m². Šis modifikavimo variantas yra 3-asis ekonomiškai naudingiausias variantas. Remiantis vien ekonominiu požiūriu, šis modifikavimo variantas praktiškai jokios ekonominės naudos neatneša.

Bitumo PMB 45/80-80 CR arba PMB 25/55-80 CR 1 tonos bitumo kaina yra net 24,64 % mažesnė už itin gausiai polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-80 arba PMB 25/55-80 kainą. Šiuo atveju, 1 tonai asfalto mišinio SMA 11 S pagaminti reikalingo bitumo kaina yra 10,41 Eur mažesnė už itin gausiai polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-80 arba PMB 25/55-80 kainą. Vertinant 1 m² asfalto dangai pakloti asfalto mišiniu SMA 11 S reikalingo bitumo ekonominį efektą, apskaičiuota, kad taikant bitumą PMB 45/80-80 CR arba PMB 25/55-80 CR vietoje įprasto PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60, sutaupoma 1,02 Eur/m². Atsižvelgiant į tai, kad bitumo PMB 45/80-80 CR arba PMB 25/55-80 CR kaina yra 24,2 % didesnė nei bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60, šis modifikavimo variantas yra mažiausiai ekonomiškai naudingas.

3.5. Racionaliausių bitumo modifikavimo sąlygų panaudojant gumą ir polimerus parinkimas taikant daugiakriterį SAW metodą

Racionaliausio varianto parinkimas iš daugelio variantų yra sudėtingas uždavinys, todėl jam išspręsti būtina taikyti daugiakriterius sprendimų priėmimo metodus. Yra naudojama daug ir įvairaus sudėtingumo daugiakriterių sprendimo priėmimo

metodų. Tipinis, žinomiausias ir dažniausiai taikomas metodas yra *SAW* (angl. *Simple Additive Weighting*) – kriterijų reikšmių ir jų reikšmingumų sandaugų sumų metodas (Ginevičius *et al.* 2008). Šiuo metodu nustatytas racionaliausias bitumo modifikavimo guma variantas.

Išėjimas duomenys taikant šį metodą yra sprendimų matrica P , kuri negali turėti neskaitinių reikšmių ir kiekvieno efektyvumo rodiklio reikšmingumai: $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. Sprendžiant šiuo metodu, visų reikšmingumų suma turi būti lygi vienetui (MacCrimmon 1968) (3.8 formulė).

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1 - \text{būtina sąlyga.} \quad (3.8)$$

Šiuo metodu sprendžiama taip: pirmiausia sprendimų priėmimo matrica yra normalizuojama. Sprendimų matricos normalizavimas – tai matricos perdirbimas, siekiant suvienodinti (panaikinti) rodiklių dimensijas arba kitaip pakeisti jų reikšmes, nepakeičiant santykio tarp atskirų rodiklių. Sprendimų priėmimo matricos visi nariai normalizuojami pagal 3.9, 3.10, 3.11 formules (MacCrimmon 1968):

$$\bar{\chi}_{ij} = \frac{\chi_{ij}}{\chi_{ij}^*} - \text{jei matricos nariai yra maksimizuojami;} \quad (3.9)$$

$$\bar{\chi}_{ij} = \frac{\chi_j^{\min}}{\chi_{ij}} - \text{jei matricos nariai yra minimizuojami,} \quad (3.10)$$

čia $\chi_j^* = \chi_{ij}^{\max}$.

Normalizuotos matricos, to paties varianto kiekvienas narys dauginamas iš jo reikšmingumo ir sudedamas su kitais taip pat gautais alternatyvos (eilutės) nariais. Gauta suma dalinama iš svorių (reikšmingumų) sumos. Pateikiama matematinė variantu racionalumo išraiška 3.11 formulė (MacCrimmon 1968):

$$A = \left\{ A_i / \max_i \sum_{j=1}^n q_j \bar{\chi}_{ij} / \sum_{j=1}^n q_j \right\}. \quad (3.11)$$

Racionaliausiam bitumo modifikavimo variantui parinkti kaip vertinimo kriterijai imamos šios savybės:

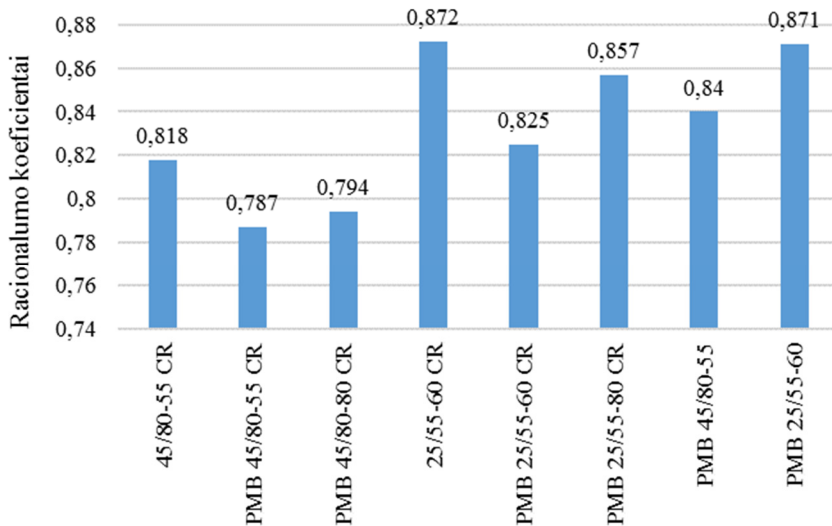
- santykinis vėžės gylis PRD_{AIR} po 30 000 apkrovimo ciklų, %;
- vėžės formavimosi greitis WTS_{AIR} po 30 000 apkrovimo ciklų, mm/1000 ciklų;
- bitumo kritinė žemiausia temperatūra, °C;
- modifikuoto bitumo kaina, Eur.

Kiekvienai iš šių savybių yra pagal pasirinktus kriterijus priskiriamas koeficientas, kuris nusako konkrečios savybės reikšmingumą. Kuo didesnis koeficientas, tuo reikšmingesnė yra savybė. Aštuoni modifikuoti bitumai ir jiems priskirti reikšmingumo rodikliai sudaro sprendimų matricą (3.10 lentelė). Disertacijos autoriaus nuomone, svarbiausia dėvimojo sluoksnio asfalto mišinio savybė yra atsparumas provėžoms, šiai savybei suteiktas 0,3 koeficientas. Tačiau, svarbiausias modifikuoto bitumo kriterijus yra jo kaina, todėl jai suteiktas 0,5 koeficientas. Atsparumas plyšių susidarymui ir vėžės formavimosi greitis yra svarbios, bet ne kritinės savybės, todėl joms suteikti mažiau reikšmingi koeficientai – po 0,1.

Turint sprendimų matricą su kiekvieno efektyvumo rodiklio reikšmingumais, matrica yra normalizuojama. Atlikus skaičiavimus pagal *SAW* metodą, nustatytas bitumo savybių pasiskirstymas pagal racionalumo koeficientą, nusakantis bitumo kokybę (3.7 pav.).

3.10 lentelė. Modifikuoto bitumo racionaliausio sprendimo priėmimo matrica
Table 3.10. Matrix of modified bitumen for decision making

Bitumas	Savybė			
	PRD_{AIR} po 30000 apkrovimo ciklą, %	WTS_{AIR} po 30000 apkrovimo ciklą, mm/1000	Bitumo kritinė žemiausia temperatūra, °C	Modifikuoto bitumo kaina, Eur
45/80-55 CR	7,9	0,04	-30,7	390,2
PMB 45/80-55 CR	7,1	0,03	-31,1	446,2
PMB 45/80-80 CR	6,1	0,02	-30,4	497,4
25/55-60 CR	6,8	0,02	-29,4	390,2
PMB 25/55-60 CR	6,1	0,02	-25,9	446,2
PMB 25/55-80 CR	5,6	0,01	-27,0	497,4
PMB 45/80-55	5,3	0,02	-33,5	500
PMB 25/55-60	5,5	0,01	-30,9	500
q	0,3	0,1	0,1	0,5



3.7 pav. Modifikuoto bitumo racionalumo koeficientai

Fig. 3.7. Coefficients of modified bitumen rationality

Atlikus aštuonių skirtingų bitumų modifikavimo racionalumo analizę, nustatyta, kad racionaliausias modifikavimo variantas yra bitumas 25/55-60 CR, o neracionaliausias – bitumas PMB 45/80-80 CR. Vertinant racionalumo nustatymo rezultatus, galima teigti, kad guma modifikuoti bitumą 70/100 yra neracionalu lyginant su kelių bitumu 50/70.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Modifikuojant bitumą guma ir SBS polimeriais, bitumo kritinė aukščiausia temperatūra padidinama mažiausiai 12 °C. Nustatyta, kad bitumo 70/100 + 2 % CR + 2 % SBS kritinė aukščiausia temperatūra yra tokia pati kaip ir alternatyvaus bitumo PMB 45/80-55 (76 °C), o bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS kritinė aukščiausia temperatūra yra tokia pati kaip ir alternatyvaus bitumo PMB 25/55-60 (82 °C).
2. Bitumas PMB 45/80-55 yra 2,4–3,1 °C atsparesnis šalčiui nei alternatyvus guma ir polimeriais modifikuotas bitumas, o bitumas PMB 25/55-60 yra 1,5–5,0 °C atsparesnis šalčiui nei alternatyvus guma ir polimeriais modifikuotas bitumas. Tačiau, skirtumai tarp rezultatų yra santykinai nedideli, todėl galima teigti, kad guma modifikuotas bitumas yra lygiavertis polimeriais modifikuotam bitumui atsparumo šalčiui aspektu.
3. Nustatyta, kad bitumai su kietesniu kelių bitumu (50/70) yra atsparesni provėžoms 0,3–3,5 % nei asfalto mišiniai su minkštesniu nemonifikuotu

bitumu (70/100). Asfalto mišinių su guma ir polimerais modifikuotu bitumu atsparumas provėžoms yra lygiavertis asfalto mišinių su įprastu PMB bitumu.

4. Atlikus statistinį asfalto mišinių ir bitumo atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės vertinimą, nustatyta, kad šie rodikliai pasižymi geriausiai sąryšiu:
 - $PRD_{AIR10000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,844$).
 - $WTS_{AIR10000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,840$);
 - $PRD_{AIR30000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,839$);
 - $WTS_{AIR30000}/J_{nr\ 3,2\ kPa}$ ($R^2 = 0,739$).
5. Remiantis determinacijos koeficientu, galima teigti, kad vieninteliu bitumo rodikliu $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ galima prognozuoti asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklius. Visi kiti bitumo rodikliai neturi tokio stipraus sąryšio su asfalto mišinio atsparumo provėžoms rodikliais. Taip pat pastebėta, kad bitumo po trumpalaikio sendinimo procedūros kritinės aukščiausios temperatūros T_{crit} ryšys su asfalto mišinio santykinio vėžės gylio PRD_{AIR} rodikliu yra stipresnis nei nesendinto bitumo.
6. Ekonomiškai naudingiausia yra naudoti bitumą 45/80-55 CR arba 25/55-60 CR, kuomet 1 tonos bitumo kaina yra net 21,96 % mažesnė už įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 ir PMB 25/55-60 kainą. Bitumo PMB 45/80-55 CR arba PMB 25/55-60 CR 1 tonos bitumo kaina yra 10,76 % mažesnė už įprasto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 arba PMB 25/55-60 kainą. Vertinant 1 m² asfalto dangos paklojimui asfalto mišiniu SMA 11 S reikalingo bitumo ekonominį efektą, apskaičiuota, kad sutaupoma atitinkamai 0,69 Eur/m² ir 0,34 Eur/m².
7. Atlikus bitumo modifikavimo racionalumo analizę daugiakriteriu SAW metodu, nustatyta, kad racionaliausias modifikavimo variantas yra bitumas 25/55-60 CR, o neracionaliausias – bitumas PMB 45/80-80 CR. Vertinant racionalumo nustatymo rezultatus, galima teigti, kad guma modifikuoti bitumą 70/100 yra neracionalu lyginant su kelių bitumu 50/70.

Bendrosios išvados

Apibendrinus disertacijos eksperimentinius tyrimų rezultatus formuluojamos šios išvados:

1. Atlikus taikomų bitumo ir asfalto mišinių modifikavimo technologijų analizę, nustatyta, kad modifikuotas bitumas turėtų ne tik tenkinti aukštus kokybės reikalavimus, bet ir turėtų būti ekonomiškai naudingas. Siekiant sumažinti modifikuoto bitumo kainą, galima naudoti pigesnes polimerines medžiagas, ypač karotinio naudojimo medžiagas (gumą, plastiką). Bitumo modifikavimas guma pagerina asfalto mišinių atsparumą nuovargiui, atsparumą provėžoms, sumažina bitumo oksidaciją, jautrumą plyšių susidarymui, sumažėja sąnaudos tokių dangų priežiūrai. Sukurta bitumo modifikavimo guma seka leidžia greitai ir efektyviai nustatyti racionalias bitumo modifikavimo guma sąlygas (modifikavimui tinkamas kelių bitumas, pakankamas gumos ir SBS polimerų kiekis), užtikrinančias asfalto mišinio atsparumą provėžoms ir plyšių susidarymui.

2. Atlikus modifikavimui pakankamo minimalaus gumos kiekio nustatymo eksperimentinį tyrimą nustatyta, kad didinant gumos kiekį bitumo minkštėjimo temperatūra didėja santykinai nežymiai (0,7–5,6 °C), todėl didesnis kaip 4 % gumos kiekis bitumo modifikavimui yra neefektyvus minkštėjimo temperatūros atžvilgiu. Siekiant pagerinti bitumo tampriąją atstatą, modifikavimui būtina naudoti ne tik gumos, bet ir SBS polimerų priedus. Taip pat, bitumo 70/100 + 2 % CR +

2 % SBS atsparumo provėžoms parametro $G^*/\sin\delta$ rezultatai yra geresni atitinkamai 4,4 % ir 7,5 % nei bitumo PMB 45/80-55, o bitumo 50/70 + 2 % CR + 2 % SBS – 30,7 % ir 29,7 %, geresni nei bitumo PMB 25/55-60. Bitumo modifikavimui naudojant 2 % gumos galima dvigubai sumažinti polimerų kiekį užtikrinant lygiavertes analogiškiems vien polimerais modifikuotų bitumo minkštėjimo temperatūros, penetracijos, klamos ir atsparumo provėžoms parametro $G^*/\sin\delta$ vertes.

3. Atspariausi provėžoms yra asfalto mišiniai su vien polimerais modifikuotu bitumu bei asfalto mišiniai su guma ir polimerais modifikuotu bitumu. Taip pat nustatyta, kad bitumai su kietesniu nemodifikuotu kelių bitumu (50/70) yra atsparesni provėžoms. Vien guma (4 %) ar gumos ir polimerų kombinacija (2 % CR + 2 % SBS) modifikuoti bitumai yra lygiaverčiai įprastiems polimerais modifikuotiems bitumams bei atsparesni provėžoms nei asfalto mišiniai su nemodifikuotu bitumu.

4. Atlikus bitumo modifikavimo panaudojant gumą arba gumą ir SBS polimerus kartu ekonominio efekto skaičiavimus, nustatyta, kad ekonomiškai naudingiausia modifikuoti bitumą panaudojant 4 % gumos – tokio bitumo kaina yra 21,96 % mažesnė nei alternatyvaus vien polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 ar PMB 25/55-60. Modifikavimui naudojant gumą kartu su SBS polimerais, ekonominis efektas sumažėja iki 10,76 %.

5. Įvertinus asfalto mišinių su guma arba guma ir polimerais modifikuotu bitumu atsparumą provėžų susidarymui, bitumo atsparumą žemos temperatūros poveikiui bei modifikuoto bitumo kainą, daugiakriteriu SAW metodu apskaičiuota, kad racionaliausia modifikuoti bitumą 50/70 panaudojant 4 % gumos (racionalumo koeficientas 0,872). Neracionaliausia modifikuoti bitumą 70/100 panaudojant 2 % gumos ir 2 % SBS polimero (racionalumo koeficientas 0,787).

Rekomendacijos

1. Modifikuojant bitumą guma arba guma ir SBS polimerais, rekomenduojama:

- naudoti kietesnę kelių bitumą (pvz. 50/70 arba kelių bitumo 70/100 ir 50/70 mišinį);
- naudoti kuo smulkesnę gumą ($\leq 0,6$ mm);
- naudoti mažiausią pakankamą kiekį gumos, taip palengvinant modifikavimo procesą bei pagerinant modifikuoto bitumo stabilumą sandėliuojant ilgesnį laiką;
- bitumą modifikuoti gumos (≤ 4 %) ir SBS polimerų (≤ 4 %) kombinacija;
- parenkant bitumo projektinę sudėtį, laboratorijoje naudoti didelio intensyvumo bitumo maišytuvus, kurių veikimo principas yra artimiausias bitumo modifikavimo gamyklos veikimo principui.

2. Rekomenduojama toliau tęsti mokslinius tyrimus modifikavimui panaudojant kitus nemodifikuotus bitumus bei taikant skirtingas gumos ir SBS polimerų įterpimo į bitumą technologijas.

3. Rekomenduojama atlikti skirtingų asfalto mišinių su guma modifikuotu bitumu tyrimus, įvertinant ne tik atsparumą provėžoms, bet ir jautrumą vandeniui, nuovargiui bei atsparumą plyšių susidarymui.

4. Rekomenduojama įrengti eksperimentinį ruožą panaudojant asfalto mišinius su guma modifikuotu bitumu bei vykdyti šio ruožo periodinę apžiūrą. Tokiu būtu gauti duomenys iš realiomis klimato ir eismo sąlygomis veikiamos kelio dangos.

Literatūra ir šaltiniai

AASHTO M320-10:2016. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt binder.*

AASHTO T315:2012. *Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR):33.*

AASHTO TP 70:2013. *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).*

Airey, G. D. 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel* 82(14): 1709–1719. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7)

Al-Rousan, T.; Masad, E.; Tutumluer, E.; Pan, T. 2007. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, *Construction and Building Materials* 21 (5): 978–990. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.03.005>

Anderson, M. 2014. Introduction to the Multiple-Stress Creep - Recovery (MSCR) Test and its Use in the PG Binder Specification, in *54th Annual Idaho Asphalt Conference.*

Arasan, S.; Yenera, E.; Hattatoglu, F.; Hınıslioglu, S. 2011. Correlation between Shape of Aggregate and Mechanical Properties of Asphalt Concrete, *Road Materials and Pavement Design* (April 2014): 37–41. <https://doi.org/10.3166/rmpd.12.239-262>

Asphalt Institute. 2011. *The Asphalt binder Handbook.* The first edition, MS-26.

Asphalt Research Group. 2011. *The Effects of Digesting Crumb Rubber in Modified Binders (MB)*, The University of Wisconsin-Madison, U.S.A.

Atahan, A. O.; Yücel, A. Ö. 2012. Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation, *Construction and Building Materials* 36:617–622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068>

Attia, M.; Abdelrahman, M. 2009. Enhancing the performance of crumb rubber-modified binders through varying the interaction conditions, *International Journal of Pavement Engineering* 10(6): 423–434. <https://doi.org/10.1080/10298430802343177>

Azevedo, F.; Pacheco-Torgal, F.; Jesus, C.; Barroso de Aguiar, J. L.; Camões, A. F. 2012. Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and Building Materials* 34:186–191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.062>

Bahia, H. U.; Hanson, D. I.; Zeng, M.; Zhai, H.; Khatri, M. A.; Anderson, R. M. 2001. *NCHRP Report 459. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*, Washington, D. C, USA.

Bastos, J.; Babadopulos, L. F. A. L.; Soares, J. B. 2017. Relationship between multiple stress creep recovery (MSCR) binder test results and asphalt concrete rutting resistance in Brazilian Roadways, *Construction and Building Materials* 145: 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.216>

Bennert, T. 2013. *NYS DOT SPR Project Number: C-08-20 Grade Determination of Crumb Rubber- Modified Performance Graded Asphalt*. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT) Rutgers University.

Bitumina Group. 2017 [Ineraktyvus]. Prieiga per internetą: <<http://www.bitumina.co.uk/polymer-modified-bitumen.html>>

Blazejowski, K.; Dolzycki, B. 2014. The relationships between asphalt mix rutting resistance and MSCR test results, *Design, Analysis, and Asphalt Material Characterization for Road and Airfield Pavements*: 202–209.

Blazejowski, K.; Olszacki, J.; Peciakowski, H. 2014. *Bitumen Handbook 2014*, ORLEN Asfalt sp. z o.o.

Caltrans 2015. *Standard Specifications*, California Department of Transportation.

Cao, W. 2007. Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process, *Construction and Building Materials* 21 (5): 1011–1015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004>

Celauro, B.; Celauro, C.; Lo Presti, D.; Bevilacqua, A. 2012. Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber, *Construction and Building Materials* 37:562–572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.034>

Coleri, E.; Tsai, B. W.; Monismith, C. L. 2008. Pavement rutting performance prediction by integrated Weibull approach, *Journal of the Transportation Research Board*. 2087: 120–130. <https://doi.org/10.3141/2087-13>

Dong, D.; Huang, X.; Li, X.; Zhang, L. 2012. Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt, *Construction and Building Materials* 29:316–322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.021>

- Doré, G., Zubeck, H. 2008. *Cold Regions Pavement Engineering*, McGrawHill. 401 p.
- DuBois, E.; Mehtam Y.; Nolan, A. 2014. Correlation between multiple stress creep recovery (MSCR) results and polymer modification of binder, *Construction and Building Materials* 65:184–190. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.111>
- ETRA 2016. *Introduction to Tyre Recycling 2016. Twenty Years of Tyre Recycling in the EU*.
- ETRMA 2015. *End-of-life Tyre Report 2015*.
- ETRMA 2016. *European Tyre and Rubber Industry. Statistics Edition 2016*.
- Federal Highway Administration. 2011. *The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure*, TechBrief, Office of Pavement Technology.
- FGSV Verlag. 2012. *Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten E GmBA [Recommendations for rubber-modified bitumen and asphalt: E GmBA]*.
- Formela, K.; Klein, M.; Colom, X.; Saeb, M. R. 2016. Investigating the combined impact of plasticizer and shear force on the efficiency of low temperature reclaiming of ground tire rubber (GTR), *Polymer Degradation and Stability* 125: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.12.022>
- Fornai, D.; Sangiorgi, C.; Mazzotta, F.; Bermejo, J. M.; Saiz, L. 2016. A New Era for Rubber Asphalt Concretes for the Green Public Procurement in Road Construction, in *1st European Road Infrastructure Congress*, 18–20 October 2016, Leeds, United Kingdom.
- Galooyak, S. S.; Dabir, B.; Nazarbeygi, A. E.; Moeini, A. 2010. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites, *Construction and Building Materials* 24(3): 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.032>
- Ghavibazoo, A. 2013. Mechanism of Crumb Rubber Modifier (CRM) dissolution into asphalt matrix and its effect on final physical properties of CRM binder, in *92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. <https://doi.org/10.3141/2370-12>
- Ghavibazoo, A.; Abdelrahman, M. 2014. Effect of Crumb Rubber Dissolution on Low Temperature Performance and Aging of Asphalt-Rubber Binder, in *93th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. January 12–16, Washington, D. C.
- Ghavibazoo, A.; Abdelrahman, M.; Ragab, M. 2013. Effect of CRM dissolution on storage stability of CRM modified asphalt, in *92th Annual Meeting of the Transportation Research Board* 6(13):1–14.
- Ginevičius R.; Podvezko, V. 2008. Daugiakriterinio vertinimo būdų suderinamumas, *Business: Theory and practice* 9: 73–80. <https://doi.org/10.3846/1648-0627.2008.9.73-80>
- Glover, C. J.; Davison, R. R.; Bullin, J. A.; Estakhri, C. K.; Williamson, S. A.; Billiter, T. C.; Chipps, J. F.; Chun, J. S.; Juristyarini, P.; Leicht, S. E.; Wattanacha, P. 2000. *A comprehensive laboratory and field study of high-cure crumb-rubber modified asphalt materials*, Texas Transportation Institute 7(2).
- González, V.; Martínez-Boza, F. J.; Gallegos, C.; Pérez-Lepe, A.; Páez, A. 2012. A study into the processing of bitumen modified with tire crumb rubber and polymeric additives, *Fuel Processing Technology* 95: 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.11.018>

Grinys, A.; Sivilevičius, H.; Daukšys, M. 2012. Tyre rubber additive effect on concrete mixture strength, *Journal of Civil Engineering and Management* (18(3)):393–401. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.693536>

Han, L.; Zheng, M.; Wang, C. 2016. Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt, *Construction and Building Materials* 128: 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.080>

Hassan, N. A.; Airey, G. D.; Jaya, R. P.; Mashros, N.; Aziz, M. A. 2014. A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures, *Jurnal Teknologi* 4: 127–134.

Heitzman, M. A. 1992. *State of the Practice – Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier*, FHWA-SA-92-022, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Hicks, G. R.; Tighe, S.; Tabib, S.; Cheng, D. 2013. *Rubber Modified Asphalt Technical Manual*, Ontario Tire Stewardship, Canada.

Hossain, Z.; Bairgi, B.; Zaman, M.; O’Rear, E. 2016. Viability Assessment of the Use of Ground Tire Rubber as a Modifier in Asphalt Binders, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Hosseinezhad, S.; Holmes, D.; Fini, E. H. 2014. Decoupling the Physical Filler Effect and the Time Dependent Dissolution Effect of Crumb Rubber on Asphalt Matrix Rheology, *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. January 12–16, Washington, D.C.

Huang, Y. H. 1993. *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Yousefi Kebria, D.; Moafimadani, S. R.; Goli, Y. 2015. Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behaviour of asphalt binder, *Road Materials and Pavement Design* 16(4): 946–956. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1042015>

Jenks, W. C.; Jencks, F. C.; Harrigan, T. E.; Adcock, M.; Delaney, P.E.; Freer, H. 2011. *NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*.

Jensen, W.; Abdelrahman, M. 2006. *Use of crumb rubber in performance graded binder*, Nebraska DoR, editor. Lincoln, NE: University of Nebraska; p. 157.

Jeong, K. D.; Lee, S. J.; Amirkhanian, S. N.; Kim, K. W. 2010. Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders, *Construction and Building Materials* 24: 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.024>

Kandhal, P. S.; Foo, K. Y.; Mallick, R. B. 1998. *A Critical Review of VMA Requirements in Superpave*, NCAT Report 98–1:19.

Kassem, E.; Masad, E.; Lytton, R.; Chowdhury, A. 2011. Influence of Air Voids on Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Influence of Air Voids on Mechanical Properties of Asphalt Mixtures, *Road Materials and Pavement Design* (April 2013): 37–41. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9695258>

Katman, H., Y., B. 2016. *Rutting Resistance of SMA Mixtures Incorporating Crumb Rubber*. Licentiate Thesis. Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur.

Kim, S.; Lee, S. J.; Yun, Y. B.; Kim, K. W. 2014. The use of CRM-modified asphalt mixtures in Korea: Evaluation of high and ambient temperature performance, *Construction and Building Materials* 67: 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.074>

Kjosavik, A. M. 2013. *Determining the Rheological Properties of Neat and Rubber Modified Soft Bitumen*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.

Kök, B. V., Kuloglu N. 2011. Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, *Road Materials and Pavement Design* (October 2013):37–41. <https://doi.org/10.3166/rmpd.12.721-738>

Krol, J. B.; Radziszewski P.; Kowalski, K. J.; Sarnowski, M.; Czajkowski, P. 2014. Laboratory and Field Investigations of Polymer and Crumb Rubber Modified Bitumen, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 8(10):1327–1334.

Lee, H. J.; Lee, J. H.; Park, H. M. 2007. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 21(5): 1079–1087. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.003>

Lee, S. J.; Akisetty, C. K.; Amirhanian, S. N. 2008. The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements, *Construction and Building Materials* 22(7): 1368–1376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.010>

LST EN 1426:2007. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Adatos penetracijos nustatymas [Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 1427:2007. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas [Bitumen and bituminous binders – Determination of softening point – Ring and Ball method], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14770:2012. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR) [Bitumen and bituminous binders – Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Rheometer (DSR)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12607-1:2015. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. I dalis. RTFOT metodas [Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air – Part 1:RTFOT method], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 13302:2010. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Bituminio rišiklio dinaminės klampės nustatymas naudojant sukujį klampomatį [Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 13399:2010. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Modifikuoto bitumo patvarumo sandėliuojant nustatymas [Bitumen and bituminous binders – Determination of storage stability of modified bitumen], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 16659:2016. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Valkšnumo ir atsikūrimo bandymas, veikiant kartotiniams įtempiais [Bitumen and Bituminous Binders – Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14771:2012. Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR) [Bitumen and bituminous binders – Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14769:2012. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (PAV) [Bitumen and bituminous binders – Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV)], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-22+A1:2007. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 22 dalis. Rato riedėjimo vėžė [Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt –Part 22: Wheel tracking], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

Lo Presti, D. 2013. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review, *Construction and Building Materials* 49: 863–881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>

Lo Presti, D. 2011. *Rheology and Curing of Tyre Rubber Modified Bitumens*, Università degli studi di Palermo.

Lo Presti, D.; Airey, G.; Partal, P. 2012. Manufacturing Terminal and Field Bitumen-Tyre Rubber Blends: The Importance of Processing Conditions, *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 53: 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.899>

Mandal, T.; Teymourpour, P.; Bahia, H. U. 2016. Study on Devulcanization and Rheological Properties of Crumb Rubber-Modified Binders, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Manolis, S. 2014. *Engineering Properties of Asphalt Cement Binders and their Relation to Pavement Performance Cement, Coco Asphalt Engineering*.

Manosalvas-Paredes, M.; Gallego, J.; Saiz, L.; Bermejo, J. M. 2016. Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber – SBS polymers in Stone Matrix Asphalt, *Construction and Building Materials* 121:727–732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.028>

Mashaan, N. S.; Karim, M. R.; Aziz, A. M.; Ibrahim, M. R.; Katman, H.Y.; Koting, S. 2014. Evaluation of fatigue life of CRM-reinforced SMA and its relationship to dynamic stiffness, *Scientific World Journal* 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/968075>

McNally, T. 2011. *Polymer modified bitumen. Properties and Characterisation*, 1st Edition, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093721>

Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gámez, M. C. 2015. The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature, *Journal of Materials & Design* 78: 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.04.018>

Moreno, F.; Rubio, M. C.; Martínez-Echevarria, M. J. 2012. The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage, *Construction and Building Materials* 26(1): 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.046>

Nilson, R. 2001. *Fatigue of asphalt Mixtures – Continuum Damage Mechanics applied to Data from laboratory Tests*. Licentiate Thesis. Department of technology and Society Lund Institute of Technology. 124 p.

Neubauer, O.; Partl, M. N. 2004. Impact of binder content on selected Properties of stone mastic asphalt, in *3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Vienna, p. 1614–1621.

Oginskas, R. 2006. *Provėžų, susijusių su šlyties deformacijomis automobilių kelių asfaltbetonio dangose, mažinimas naudojant geosintetines medžiagas*, Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. 84 p.

Ould-Henia, M.; Dumont A. G. 2006 Assessment of the rheological properties of asphalt rubber binder and its residual phases, in *Asphalt Rubber 2006 Conference*, Palm Springs, CA: Consulpav. p. 931–948.

Plemons, C. D. 2013. *Evaluation of the Effect of Rubber Properties on the Performance of Asphalt binder*, Auburn University.

Peralta, J.; Silva, H. M. R. D.; Hilliou, L.; Machado, A. V.; Pais, J.; Williams, R. C. 2012. Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders, *Construction and Building Materials* 36:557–565. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.030>

Peralta, J.; Silva H. M. R. D.; Machado, A. V.; Pais, J.; Pereira P. A. A.; Sousa J. B. 2010. Changes in rubber due to its interaction with bitumen when producing asphalt rubber, *Road Materials and Pavement Desing* 11(4):1009–31. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690317>

Pyshyev, S.; Gunka, V.; Grytsenko, Y.; Bratychak, M. 2016. Polymer Modified Bitumen: Review, *Chemistry & Chemical Technology*, Vol. 10, No. 4(s).

Putman, B.; Amirkhanian, S. 2006. Crumb rubber modification of binders: interaction and particle effects, in *Asphalt Rubber 2006 Conference*, Palm Springs, CA: Consulpav. p. 655–677.

Radziszewski, P.; Piłat, J.; Sarnowski, M.; Kowalski, K. J.; Krol, J. B. 2016. Polish Experience with Usage of the Innovative Asphalt Rubber to Construct Road Pavements, *Roads and Bridges* 1(17):30–35. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Ragab, M.; Abdelrahman, M. 2016. Effect of Crumb Rubber-Modified Asphalt Properties on Its Storage Stability, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Read, J.; Whiteoak, D. 2003. *The Shell Bitumen Handbook*, Fifth edit, London, UK: Thomas Telford.

Recycling Research Institute. 2017 [Ineraktyvus]. Prieiga per internetą: <<http://www.scraptirenews.com/crumb.php#prettyPhoto>>

Rodríguez-Alloza, A.M.; Gallego, J.; Pérez, I.; Bonati, A.; Giuliani, F. 2014. High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives, *Construction and Building Materials* 53: 460–466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.026>

Saboo, N.; Kumar, P. 2016. Analysis of Different Test Methods for Quantifying Rutting Susceptibility of Asphalt Binders Analysis of Different Test Methods for Quantifying Rutting Susceptibility of Asphalt Binders, *Journal of Materials in Civil Engineering* (January). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001553](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001553)

Schmalzer, P. N.; Leahy, R. B. 2014. *Background on Wet-Process Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Materials*, Quincy Engineering, Inc.

Silverson. 2017 [Ineraktyvus]. Prieiga per internetą: <<http://www.silverson.com/us/products/laboratory-mixers/>>

Sybilski, D.; Bankowski, W.; Mirski, K.; Horodecka, R.; Wrobel, A. 2011. Rubber-Bitumen Granulate for Asphalt Pavements – Laboratory Comparative Analysis, *5th International Conference Bituminous mixtures and pavements*.

Sybilski, D.; Bankowski, W.; Horodecka, R.; Czajkowski, P. 2014. Laboratoryjna ocena przydatności polimeroasfaltu z dodatkiem gumy do zastosowania w mieszance AC WMS – część 2 – Badania mieszanek, *Drogownictwo* [Laboratory evaluation of polymer modified bitumen with crumb rubber for use in high modulus asphalt concrete. Part 2, Tests on bituminous mixtures, *Road Engineering*] (9): 300–306.

Sybilski, D.; Soenen, H.; Gajewski, M.; Chailleux, E.; Bankowski, W. 2013. Binder testing, *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials*, Springer, Dordrecht, pp 15–83. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5104-0_2

Sienkiewicz, M.; Borz, K.; Wojtkiewicz, A.; Janik, H. 2017. Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: A review, *Fuel Processing Technology Journal* 159: 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.049>

Singh, D.; Zaman, M.; Commuri, S. 2012. Inclusion of aggregate angularity, texture, and form in estimating dynamic modulus of asphalt mixes, *Road Materials and Pavement Design* 13(2): 327–344. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.650088>

Sivilevičius, H.; Podvezko, V.; Vakrinienė, S. 2011. The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture, *Construction and Building Materials* 25(1): 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.050>

Skotnicki, L.; Koba, H.; Szydło, A. 2012. Rubber modified stone matrix asphalts, in *Asphalt-rubber 2012 Conference*.

Subhy, A.; Lo Presti, D.; Airey, G. 2015. An investigation on using pre-treated tyre rubber as a replacement of synthetic polymers for bitumen modification, *Road Materials and Pavement Design* 16 (July 2015): 245–264. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1030826>

Sulyman, M. 2013. New Study on Improved Performance of Paving Asphalts by Crumb Rubber and Polyethylene Modification, *Journal of Material Science & Engineering* 2(4). <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000133>

Sulyman, M.; Sienkiewicz, M.; Haponiuk, J. 2014. Asphalt Pavement Material Improvement: A Review, *International Journal of Environmental Science and Development* 5(5). <https://doi.org/10.7763/IJESD.2014.V5.525>

Świczko-Żurek, B.; Jaskula, P.; Ejsmont, J. A.; Kędzierska, A.; Czajkowski, P. 2016. Rolling resistance and tyre/road noise on rubberised asphalt pavement in Poland, *Road Materials and Pavement Design* 629: 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1159245>

Taylor, P.; Henderson, V.; Tighe, S. 2012. Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates, *International Journal of Pavement Engineering* (August): 37–41.

Topal, A.; Sengoz B. 2005. Determination of Fine Aggregate Angularity in Relation with the Resistance to Rutting of Hot-mix Asphalt, *Construction and Building Materials* Vol. 19, No. 2, p.155–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.004>

TRA BITUMAS 08/14. 2014. *Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų aprašas*. Vilnius: LAKD. 18 p.

Tu, L.; Wu, S.; Liu, G.; Zhou, X.; Ma, S. 2016. Effect of the Welan Gum Biopolymer on Rheological Properties and Storage Stability of Bitumens, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No. 6, pp. 2211–2218, ISSN 0090-3973. <https://doi.org/10.1520/JTE20150119>

U. S. Tire Manufacturers Association. 2017. U.S. *Scrap Tire Management Summary*.

Vaitkus, A.; Laurinavičius, A.; Oginskas, R.; Motiejūnas, A.; Paliukaitė, M.; Barvidienė O. 2012. The Road of Experimental Pavement Structures: Experience of Five Years Operation, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 7(3): 220–227. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.30>

Valentin, J.; Soukupova, L.; Beneš, J.; Miláčková, K. 2014. Characteristics of selected bituminous binders with high-speed grinded crumb rubber, in *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, Paris.

Wang, H.; Dang, Z.; Li, L.; You, Z. 2013. Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, (47) 1342–1349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.014>

Willis, J. R.; Turner, P.; Plemmons, C.; Rodezno, C.; Rosenmayer, T.; Daranga, C.; Carlson, D. 2013. Effect of rubber characteristics on asphalt binder properties, *Road Materials and Pavement Design* 14(S2): 214–230. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812845>

Wu, J. P.; Herrington, P. R.; Neaylon, K. 2015. *Removing barriers to the use of crumb rubber in roads November 2015*, NZ Transport Agency Research Report 578.

Xu, T.; Huang, X. 2012. Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement, *Construction and Building Materials* 28(1): 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.007>

Zanetti, M. C.; Fiore, S., Ruffino, B.; Santagata, E.; Dalmazzo, D.; Lanotte, M. 2015. Characterization of crumb rubber from end-of-life tyres for paving applications, *Waste Management* 45: 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.003>

Zeinali, A.; Blankenship, P. B.; Mahboub, K. C. 2014. Comparison of Performance Properties of Terminal Blend Tire Rubber and Polymer Modified Asphalt Mixtures, *T&DI Congress*. <https://doi.org/10.1061/9780784413586.023>

Zhang, J.; Walubita, L. F.; Faruk, A N. M.; Karki, P.; Simate, G. S. 2015. Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study, *Construction and Building Materials* 94:218–227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.044>

Zhou, H.; Holikatti, S.; Vacura, P. 2014. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition) 1(1): 39–48. [https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30087-8](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30087-8)

Zhu, J. 2015. *Towards a Viscoelastic Model for Phase Separation in Polymer Modified Bitumen*, Licentiate Thesis KTH Royal Institute of Technology School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering, SE-100 44 Stockholm, Sweden.

Zhu, J.; Birgisson, B.; Kringos, N. 2014. Postprint Polymer Modification of Bitumen : Advances and Challenges, *European Polymer Journal* 54: 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Gražulytė, J.; Kleizienė, R.; Šernas, O.; Tumavičė, A. 2014. Design solutions for pavements structure affected by static and impact load. *The Baltic journal of road and bridge engineering*. 9(4): 269–275. ISSN 1822-427X (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 0,519).

Cihackova, P.; Hyzl, P.; Stehlik, D.; Dasek, O.; Šernas, O.; Vaitkus, A. 2015. Performance characteristics of the open-graded asphalt concrete filled with a special cement grout. *The Baltic journal of road and bridge engineering*. 10(4): 316–324 ISSN 1822-427X. Clarivate Analytics Web of Science; IF: 0,519).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R.; Šernas, O.; Gražulytė, J. 2017. Modified asphalt mixtures for heavy duty pavement wearing layers. *Construction and building materials*. 131(2017):503–511. ISSN 0950-0618. Clarivate Analytics Web of Science; IF: 2,421).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Šernas, O.; Gražulytė, J.; Tumavičė, A.; Kleizienė, R. 2016. The algorithm for selection of asphalt mixture resistant to plastic deformation. *Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск: РУП "БелдорНИИ"*. 1(17): 36–42. ISSN 2225-9082.

Cihackova P.; Šernas O.; Pakalnis A.; Vaitkus A. Evaluation of the semi-rigid asphalt mix performance by mechanical approach. *Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск: РУП "БелдорНИИ". ISSN 2225-9082. 2016, No. 2(18), p. 36–40.*

Straipsniai kituose leidiniuose

Šernas, O., Čygas, D., Vaitkus, A., Gumauskaitė, V. The influence of crumb rubber on modified bitumen properties. 2017. *10th International conference „Environmental Engineering“*, 27–28 April. p. 1–6. ISSN 2029-7092.

Vorobjovas, V.; Šernas, O., Žilionienė, D.; Šneideraitienė, L., Filotenkovas, V. 2017. Evaluation of high-quality dolomite aggregate for asphalt wearing course. *10th International conference „Environmental Engineering“*, 27–28 April. p. 1–6. 2029-7092.

Šernas, O.; Strumskys, M.; Skrodenis, D. 2014. Possibility of use of granite fines in asphalt pavements. *9th International Conference „Environmental Engineering“*, May 22–23. p. 1–7. ISSN 2029-7092.

Šernas, O.; Čygas, D.; Vaitkus. 2016. The best practise of the recycled tyre rubber modified asphalt binders and mixes. *CETRA 2016*, 23–25 May. p. 165–171. ISSN 1848-9842.

Šernas, O.; Vorobjovas, V.; Šneideraitienė, L.; Vaitkus, A. 2016. Evaluation of asphalt mix with dolomite aggregates for wearing layer. *Transportation research procedia. Transport Research Arena TRA2016*, April 18–21. p. 14. 732-737. ISSN 2352-1465.

Varanekas, P.; Želvys, R.; Šernas, O. 2015. Dolomito skaldos panaudojimo automobilių kelių asfalto dangos viršutiniam sluoksniui įrengti vertinimas. *18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Transporto inžinerija ir vadyba“*, gegužės 6 d. p. 93–97. ISSN 2029-7149.

Kunčys, M.; Šernas, O. 2015. Mineralinių medžiagų adhezijos su skirtingos rūšies bituminėmis emulsijomis vertinimas. *18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Transporto inžinerija ir vadyba“*, gegužės 6 d., p. 107–112. ISSN 2029-7149.

Žiliūtė, L.; Paliukaitė, M.; Motiejūnas, A.; Šernas, O.; Čygas, D. 2014. Performance of asphalt pavement structures in test road sections. *9th International Conference „Environmental Engineering“*, May 22–23. P. 1–7. ISSN 2029-7092.

Šernas, O.; Skrodenis, D. 2014. Lietuvoje naudojamų dėvimojo sluoksnio asfalto mišinių atsparumo liekamosioms deformacijoms tyrimas ir analizė. *17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Transporto inžinerija ir vadyba“*, gegužės 8 d. p. 147–152. ISSN 2029-7157, ISBN 9786094577147.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The increasing number of cars generates millions of used tyres each year which poses a serious ecological issue due to long decomposition period and large volume. Data by the European Tyre & Rubber Manufacturers' Association shows that each year, more than 300 million tyres are produced in the European Union (the EU) and this number keeps growing every year. Due to the components, tyre recycling is becoming more popular. Over the last 20 years tyre recycling has significantly grown in the EU, having now reached 98% and increasing. Statistics show that 78% of used tyres are recycled in Lithuania. 49% of used tyres are used to produce energy (91% of these are burned in kilns in cement plants), 46% are recycled and the usage of the remaining 5% is unknown. The recycled crumb rubber is used for noise reduction and anti-vibration solutions, concrete production, constructing poured flooring in sport venues, production of bitumen roofing and artificial turf for stadiums. One of the most successful ways of employing used tyres is modifying road bitumen. In the US and other Western countries, crumb rubber has been used to modify road bitumen and asphalt mixtures for more than 50 years. Scientists have published a considerable number of papers, the results of which seem to be universal and widely applicable. However, certain specific circumstances exist in every country or region which determine the suitability and effectiveness of modification technologies. Leading countries also focus not on the lowest price criterion but on solving ecological issues or the economic effect the selected solution provides during its duration. However, where the

funding is limited, in order to efficiently use the funds allocated for constructing and maintaining roads, it is necessary to apply cheaper technologies of asphalt mixture and bitumen modification and also to ensure sustainable performance of roads constructed using them even as the traffic load increases each year. Thus, in small countries such as Lithuania, the lowest price criterion is still essential. Consequently, in order to use crumb rubber to modify bitumen appropriately and efficiently, it becomes necessary to apply lowest-cost modification technologies.

This thesis analyses the influence of components of asphalt mixtures on the performance of road pavement, the methods and technologies of bitumen modification and test methods. In order to determine sufficient and efficient amount of crumb rubber for modification in terms of resistance to rutting and thermal cracking, experimental research was conducted.

Relevance of the thesis

For this thesis, for the first time in Lithuania, tests on bitumen modification were carried out using recycled material – crumb rubber. In the US and other Western countries, road bitumen and asphalt mixtures have been modified for more than 50 years. Despite this, well-known and applied modification technologies require bitumen modification and asphalt plants to be modernised which in turn requires large investments. Modified bitumen is also often used to manufacture certain asphalt mixtures only and has to be used immediately after modification. The latest bitumen modification technology is modifying bitumen using the combination of crumb rubber and polymers. However, only the guidelines for such technology are clear but specific technologic conditions are not publicly available. In order to ensure sustainable and long lasting performance of asphalt pavement, it is necessary to use aggregates and modified bitumen of the best quality. In Lithuania, road bitumen is usually modified with polymers which are very expensive. Crumb rubber contains more than 50% polymers, thus, without any doubt, crumb rubber is suitable for modifying bitumen. This is necessary to determine sufficient and efficient amount of crumb rubber which would ensure the resistance of asphalt mixtures with such modified bitumen to rutting and thermal cracking.

The object of the thesis

The object of the research is the influence of the amount of crumb rubber used for bitumen modification on the resistance of modified bitumen to permanent deformation and thermal cracking as well as the resistance of asphalt mixtures containing these bitumens to permanent deformation.

The aim of the thesis

The aim of the thesis is to scientifically substantiate and determine sufficient amount of crumb rubber for the modification of road bitumen which would also ensure the resistance to permanent deformation and thermal cracking.

The tasks of the thesis

In order to meet the aim of the thesis, the following objectives have to be achieved:

1. To analyse the scientific research on the topic of the influence of the components of asphalt mixtures on the performance of asphalt pavement, methods of bitumen

modification as well as types and amount of materials used for modification; to determine the guidelines for the modification process.

2. By conducting experimental research to determine sufficient amount of crumb rubber, required to modify bitumen, and to assess the properties of modified bitumen.
3. By conducting experimental research to determine and assess the resistance of asphalt mixture containing crumb rubber modified bitumen to rutting.
4. To calculate the economic effect of crumb rubber modification of bitumen compared to usual polymer modification of bitumen.
5. To determine the most rational conditions of bitumen modification using the multi-criteria SAW method.
6. To provide recommendations for crumb rubber modification of bitumen.

The research methodology

In order to achieve the aim and objectives of the thesis the following methods were applied: experimental methods of testing the physical (penetration, softening point, viscosity, storage stability) and mechanical (dynamic shear modulus at high temperature and stiffness at low temperature, creep recovery) properties of bitumen. The multi-criteria SAW decision making method was also applied.

Scientific novelty of the thesis

When preparing the thesis, the following results, new and significant to the science of civil engineering, were obtained:

1. A sequence of modifying road bitumen with crumb rubber was developed, defining an efficient laboratory modification technology which ensures the resistance of modified bitumen to permanent deformation and thermal cracking, thus solving the issue of utilising crumb rubber.
2. The relationship between the creep recovery of bitumen and the resistance of asphalt mixture to rutting was established, allowing a quicker and more efficient assessment of the suitability of modified bitumen for the manufacture of rutting-resistant asphalt.
3. The standardised methodology of determining the storage stability of modified bitumen was improved, allowing a quicker, more accurate and more efficient assessment of the storage stability of modified bitumen.
4. Amount of crumb rubber, sufficient for road bitumen modification, were determined, ensuring that the properties of crumb rubber modified bitumen are at least the same as those of polymer modified road bitumen.

Practical value of the research findings

A sequence of modifying road bitumen using crumb rubber was developed and sufficient amount of crumb rubber to modify road bitumen were determined. These findings can be used in practice when designing the compositions of modified bitumen and modifying bitumen. Crumb rubber modification of bitumen ensures up to 21% lower costs for bitumen modification, compared to the usage of usual polymers. In addition to this, the results of the research can be used in practice when preparing recommendations for crumb rubber modification of bitumen.

Defended statements

1. The properties of crumb rubber modified bitumen vary depending on the parameters of the modification process: the amount of crumb rubber used for modification, mixing temperature and duration.
2. Bitumen modified with crumb rubber under the appropriate conditions is equivalent to polymer modified bitumen.
3. Using crumb rubber modified bitumen in manufacturing asphalt mixtures allows ensuring sufficient resistance of the road pavement to permanent deformations and thermal cracking and allows achieving a positive economic effect.

Approval of the research findings

14 scientific papers were published on the topic of the thesis: three in scientific journals, included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Vaitkus *et al.* 2014; Cihackova *et al.* 2015; Vaitkus *et al.* 2017), two – in a peer-reviewed scientific journal (Vaitkus *et al.* 2016; Cihackova *et al.* 2016), five – in international conference proceedings, listed in the Thomson Reuters Proceedings database (Žiliūtė *et al.* 2014; Šernas *et al.* 2014; Šernas *et al.* 2016; Šernas *et al.* 2017; Vorobjovas *et al.* 2017), four – in other publications on international and national conferences (Šernas, Skrodenis 2014; Varaneckas *et al.* 2015; Kunčys, Šernas 2015; Šernas *et al.* 2016).

The results of the research conducted in this thesis were published in seven scientific conferences in Lithuania and abroad:

1. Conference for Junior Researchers Science is the Future for Lithuania in 2014 and 2015, Vilnius;
2. International conference Environmental Engineering in 2014 and 2017, Vilnius;
3. International conference Transport Research Arena TRA2016 in 2016, Warsaw;
4. International conference CETRA 2016 in 2016, Šibenik;
5. Seminar for Junior Researchers Young Researcher Seminar 2017 in 2017, Berlin.

The structure of the thesis

The thesis consists of the introduction, three chapters and general conclusions. There are also eight annexes.

The volume of the thesis is 149 pages excluding annexes. 24 numbered formulae, 58 figures and 27 tables were used in the thesis. 125 sources were used when writing the thesis.

Acknowledgments

The first thanks from the author of the thesis goes to the thesis supervisor Prof Dr Donatas Čygas for his patience, valuable scientific consultations and advice as well as full assistance. He would also like to thank Prof Dr Audrius Vaitkus for his scientific insights, ideas, and accurate remarks during the presentation of the thesis as well as for opportunities to improve in scientific and professional environment. The author thanks the thesis experts for valuable remarks and comments, patience and understanding. The author is grateful to his colleagues at the Road Research Laboratory of the Road Research Institute at Vilnius Gediminas Technical University for their full support. He is also grateful to the Research Council of Lithuania for funding. Last but not least, the author would like to

thank his family for support, understanding and encouragement to continue in the most difficult moments.

1. Analysis of asphalt mixtures physical and mechanical characteristics enhancing technologies using crumb rubber

In order to achieve sustainable economic growth as well as rational and economical resource consumption, the European Commission adopted the long-awaited Circular Economy Package. Circular economy aims to preserve the value of products and materials for as long as possible, to reduce waste and resource consumption to the minimum and to retain the resources in the economic cycle at the end of the product lifecycle so that these resources can be reused to create new value (ETRMA 2015).

There are 13 tyre manufacturers in the European Union (Bridgestone, Cooper, Pirelli and others) that manufacture more than 300 million new tyres in 86 plants. This constitutes one fourth of tyres manufactured globally (ETRMA 2016). It is estimated that the amount of used tyres in the EU increases by 3.2 million tonnes each year. According to the data by the European Tyre & Rubber Manufacturers' Association, crumb tyre is successfully used to manufacture flooring in sport venues, as filler for sound barriers, to manufacture various roofing and insulation materials, to develop solutions that reduce noise caused by trains and trams (ETRA 2016). Scientific research has shown that crumb rubber can be successfully used in concrete production despite the drop in strength properties of the concrete (Atahan, Yücel 2012; Grinys *et al.* 2012; Azevedo *et al.* 2012). Practical experience and research has shown that crumb rubber can be successfully used to modify bitumen or as a component of asphalt mixtures (Zanetti *et al.* 2015; ETRA 2016). Currently crumb rubber modification of bitumen is popular all over the world. There are two different approaches to the use of crumb rubber in the modification of asphalt mixtures: the dry process and the wet process methods (technologies). Formally the wet process is additionally divided into wet process-high viscosity and wet process-no agitation methods (Hicks, Gary *et al.* 2013; Fornai *et al.* 2016; Subhy *et al.* 2015; Han *et al.* 2016; Wu *et al.* 2015). When bitumen is modified using the no agitation method, additional equipment or modifications of equipment are unnecessary due to the required pressure, temperature and mixing parameters being similar to those that are required when bitumen is modified using usual SBS polymers.

At first crumb rubber particles absorb the bitumen, then swell up and only after a certain period of time they start dissolving in the bitumen. The composition of the bitumen is the main factor determining the interaction between the bitumen and crumb rubber particles. When modifying bitumen with crumb rubber, crumb rubber particles absorb the light fraction from the bitumen and consequently swell up. As the modification process continues, the swelling of the crumb rubber particles reaches the maximum limit and the crumb rubber particles dissolve into smaller particles. The crumb rubber particles keep dissolving in the bitumen and the viscosity of the modified bitumen starts decreasing (Lo Presti *et al.* 2012; Jensen, Abdelrahman 2006; Ould-Henia, Dumont 2006, Peralta *et al.* 2010).

The newest technology of crumb rubber modification of bitumen is the “hybrid” wet method – modifying using both crumb rubber and SBS polymers. The advantage of this method is that it reduces the amount of expensive polymers needed to modify the bitumen. In

addition to this, it solves the issue of utilisation of used tyres. Since the no-agitation and hybrid methods are the most promising modification technologies, this thesis focuses solely on them.

The conducted analysis of scientific research shows that in order to assess the properties of modified bitumen, penetration, softening point, viscosity, complex shear modulus and phase angle as well as stiffness and m-value tests are used the most often. However, in order to assess the rutting resistance of modified bitumen, a creep recovery test should also be carried out. The results of such a test are strongly related to the results of rutting resistance of asphalt mixture (Blazejowski *et al.* 2014; Anderson 2014; Moreno-Navarro *et al.* 2015; Bastos *et al.* 2017, Zhang *et al.* 2015; DuBois *et al.* 2014).

Modification of bitumen using solely crumb rubber cannot simultaneously ensure storage stability, viscosity and a significant increase of critical high and low temperatures. Thus scientists continuously search for ways to improve current technologies. The newest technology is modifying bitumen with crumb rubber and SBS polymers.

To summarise the analysed scientific research, it can be stated that modification of bitumen using solely crumb rubber cannot simultaneously ensure storage stability, proper viscosity and a significant increase of critical high and low temperatures. Bitumen, modified with crumb rubber using the wet process-no agitation method, is distinguished by its resistance to rutting, fatigue and effects of low temperatures. It was determined that if the amount of crumb rubber is increased, the effect of modification grows. The most common conditions for modification are the following: the temperature of 180 °C to 200 °C, the intensity of modification: 3000 to 8000 revolutions per minute, the amount of crumb rubber: 3% to 15%. The most progressive trend is modifying crumb rubber using a combination of crumb rubber and SBS polymers. This allows to save up to 50% of SBS polymers and, by using a smaller amount of crumb rubber, to improve storage stability and facilitate the process of modification.

2. Experimental research of the bitumen physical and mechanical properties enhancing using crumb rubber

In order to scientifically substantiate and determine the amount of crumb rubber sufficient to modify road bitumen by also ensuring the resistance of road pavement to permanent deformations and thermal cracking, an experimental research was carried out in the Road Research Laboratory of the Road Research Institute in the Faculty of Environmental Engineering at Vilnius Gediminas Technical University.

For the experimental research, bitumens 50/70 and 70/100 made by the same manufacturer that fulfil the requirements of the “Description of technical requirements for road bitumen and polymer modified bitumen TRA BITUMAS 08/14” were chosen. To compare the properties of crumb rubber modified bitumen with polymer modified bitumen, most commonly used in Lithuania, polymer modified bitumens PMB 45/80-55 and PMB 25/55-60 were included in the research. The sequence of the experimental research is shown in Figure S.2.1.

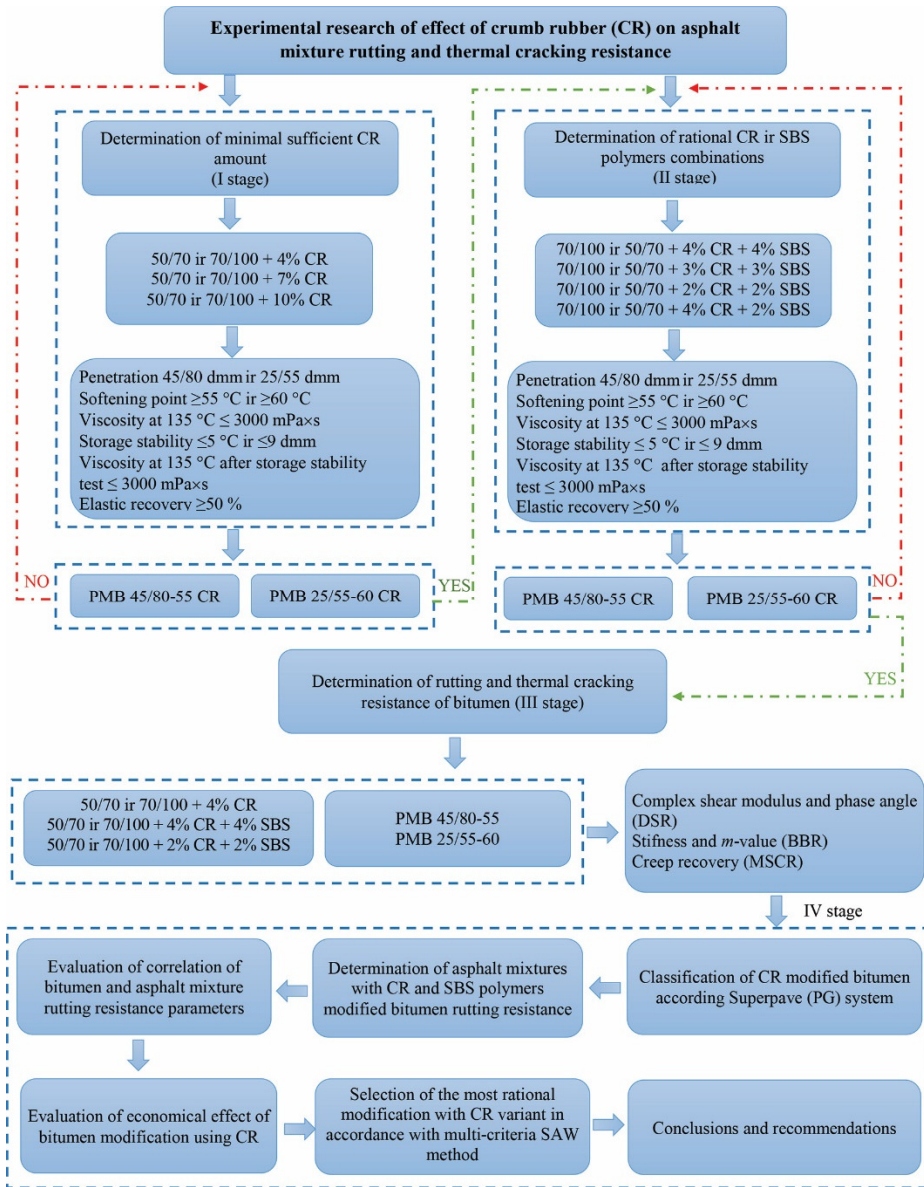


Fig. S.2.1. Experimental research sequence

During the first stage of the experimental research of the thesis, physical and mechanical properties of 50/70, 70/100 road bitumen as well as 50/70 and 70/100 road bitumen modified with different amounts of crumb rubber were determined. For the modification, three different amounts of crumb rubber – 4%, 7% and 10% of the mass of the bitumen – were selected from the same supplier. Tests on the penetration, softening point, viscosity,

storage stability (for modified bitumen only), elastic recovery (for modified bitumen only), viscosity after storage stability of the bitumen were carried out. The objective of this stage was to determine the minimum sufficient amount of crumb rubber that would ensure the properties of the modified bitumen that are equivalent to those of polymer modified bitumen. The objective of the second stage was to determine rational combinations of crumb rubber and polymers that would ensure properties equal or superior to those of polymer modified bitumen. In this stage the tests are continued only with the modification options that were determined as appropriate and effective (i.e. appropriate bitumen and a sufficient amount of crumb rubber) in the first stage, adding SBS polymers and thus improving the elastic properties and storage stability of the modified bitumen. In the third stage, the resistance to permanent deformations and thermal cracking was assessed for the most efficiently modified bitumens. In each stage of the experimental research, three specimens were used.

Crumb rubber modification increases the stiffness of bitumen, i.e. the bitumen penetration decreases. It was noticed that softer bitumen (70/100) is more sensitive to crumb rubber modification: using 4% to 10% of crumb rubber leads to penetration dropping by 42.7–49.4 dmm. The penetration values of harder road bitumen (50/70) dropped by 20.8–28.9 dmm, which shows that harder bitumen is less sensitive to crumb rubber modification. It is explained by softer bitumen containing more light components which the crumb rubber absorbs, reducing the penetration value of the bitumen. Results are given in Figure S.2.2.

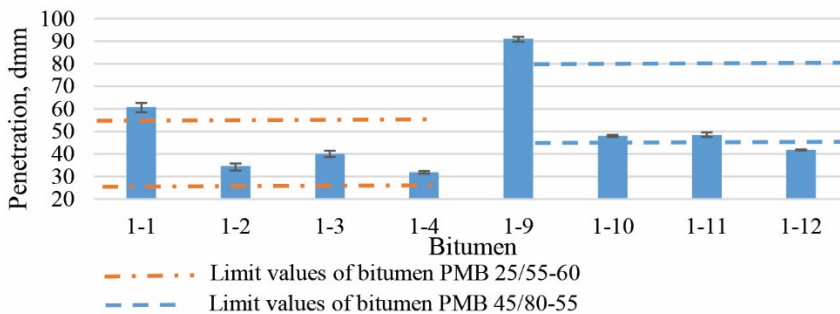


Fig. S.2.2. Results of crumb rubber modified bitumen penetration test

By increasing the amount of crumb rubber, softening point values grow. It was determined that when using 4% of crumb rubber, the softening point of bitumen 70/100 increased by 9.1 °C and the softening point of bitumen 50/70 increased by 11.8 °C compared to road bitumen. When using 7% of crumb rubber, the softening point of bitumen 70/100 and bitumen 50/70 increased by 9.1 °C and 12.2 °C, respectively, while using 10% of crumb rubber led to an increase of 14.7 °C and 12.6 °C, respectively. Results are given in Figure S.2.3.

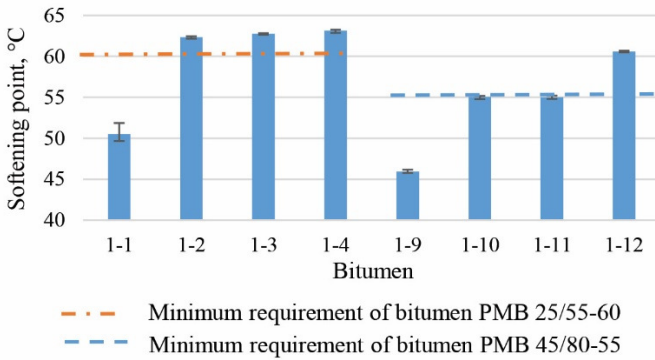


Fig. S.2.3. Results of the crumb rubber modified bitumen softening point test

Crumb rubber and polymer modification of road bitumen makes the bitumen stiffer, i.e. the penetration of the bitumen decreases. It is explained by crumb rubber absorbing the light components of the bitumen, leaving a relatively higher amount of resins in the bitumen. In addition to this, rubber covered in polymers creates a net that connects rubber particles. It was noticed that softer bitumen (70/100) is more sensitive to crumb rubber and SBS polymer modification: the penetration dropped by 39.2–43.5 dmm. The penetration values of harder bitumen (50/70) dropped by 23.1–27.0 dmm which shows that harder bitumen is less sensitive to crumb rubber and SBS polymer modification. Results are given in Figure S.2.4.

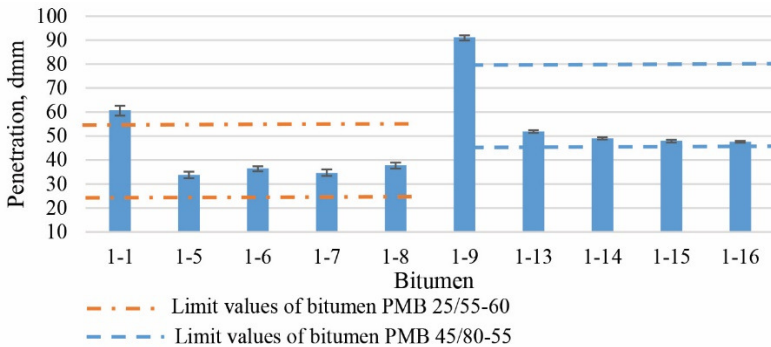


Fig. S.2.4. Results of the crumb rubber and polymer modified bitumen penetration test

When using 4% of crumb rubber and 2% of SBS polymers, it was determined that the softening point of bitumen 70/100 and bitumen 50/70 increased by 11.9 °C and 17.3 °C, respectively. When using the combination of 2% CR + 2% SBS it was determined that the softening point of bitumen 70/100 and bitumen 50/70 increased by 10.0 °C and 14.9 °C, respectively. When using the combination of 3% CR + 3% SBS it increased by 22.8 °C and 20.8 °C, respectively, and when using the combination of 4% CR + 4% SBS it increased by 34.3 °C and 31.8 °C, respectively. The increase of the value of the softening point depends more on the amount of SBS polymers than the amount of crumb rubber. Results are given in Figure S.2.5.

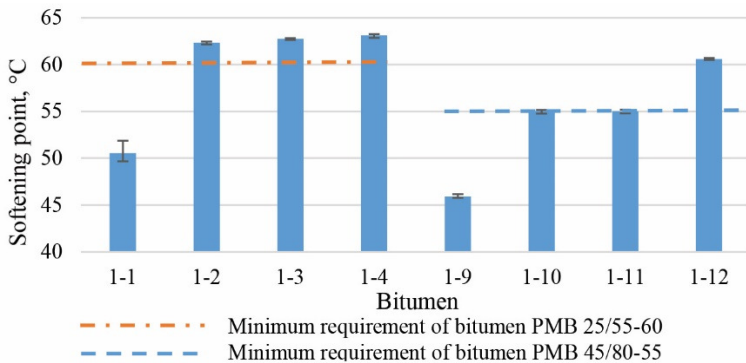


Fig. S.2.5. Results of crumb rubber and polymer modified bitumen softening point test

It was determined that the $G^*/\sin\delta$ parameter of bitumen 70/100 + 4% CR at 58 °C and 76 °C was 24.2% and 42.3% lower, respectively, than that of bitumen 70/100 + 2% CR + 2% SBS. Bitumen 70/100 + 4% CR + 4% SBS performed the best at all temperatures: the determined $G^*/\sin\delta$ parameter at 58 °C and 76 °C was 47.0% and 69.5% higher, respectively, than that of bitumen 70/100 + 4% CR and 30.1% and 47.2% higher than that of bitumen 70/100 + 2% CR + 2% SBS. It was determined that the $G^*/\sin\delta$ parameter of bitumen 50/70 + 4% CR at 58 °C and 76 °C was 12.1% and 27.2% lower, respectively, than that of bitumen 50/70 + 2% CR + 2% SBS. Bitumen 50/70 + 4% CR + 4% SBS performed the best at all testing temperatures: the determined $G^*/\sin\delta$ parameter at 58 °C and 76 °C was 25.3% and 52.6% higher, respectively, than that of bitumen 50/70 + 4% CR and 15.0% and 34.9% higher than that of bitumen 50/70 + 2% CR + 2% SBS.

The resistance of bitumen to rutting was additionally assessed by performing a multiple stress creep recovery test. The results of the multiple stress creep recovery test are listed in Table S.2.1.

The rutting resistance of bitumen is assessed on the basis of the $J_{nr3,2}$ parameter – the lower the value of $J_{nr3,2}$ and the higher the value of $R_{3,2}$, the more resistant the bitumen is to rutting. As the results listed in Table S2.1 show, bitumens 70/100 + 4% CR + 4% SBS, 50/70 + 2% CR + 2%, 50/70 + 4% CR + 4% SBS and PMB 25/55-60 are the most resistant to rutting.

When analysing the results of thermal cracking resistance of unmodified bitumen and modified bitumen 70/100, it becomes apparent that using 4% of crumb rubber or 2% crumb rubber and 2% of polymers for modification increases the stiffness of bitumen which means poorer resistance to the thermal cracking. However, using 4% of crumb rubber and 4% of polymers for modification increases the stiffness of bitumen only slightly when compared to unmodified bitumen which means that modifying bitumen 70/100 with a higher amount of polymers and crumb rubber does not lead to a significant decrease of resistance to thermal cracking in terms of stiffness. Modifying the bitumen reduces the m-value which means poorer thermal stress recovery. On the basis of the results of determining the m-value, it can be stated that bitumen 70/100 + 2% CR + 2% SBS is the most resistant to thermal cracking and bitumen 70/100 + 4% CR + 4% SBS is the least resistant. Crumb rubber or crumb rubber and polymer modification of bitumen 50/70 reduces the stiffness which means an increased resistance to thermal cracking. It was determined that modifying the bitumen reduces the m-value which

means poorer thermal stress recovery. On the basis of the results of determining the m-value, it can be stated that bitumen 50/70 + 4% CR is the most resistant to thermal cracking and bitumen 50/70 + 2% CR + 2% SBS is the least resistant. Results are given in Figures S.2.6, S.2.7.

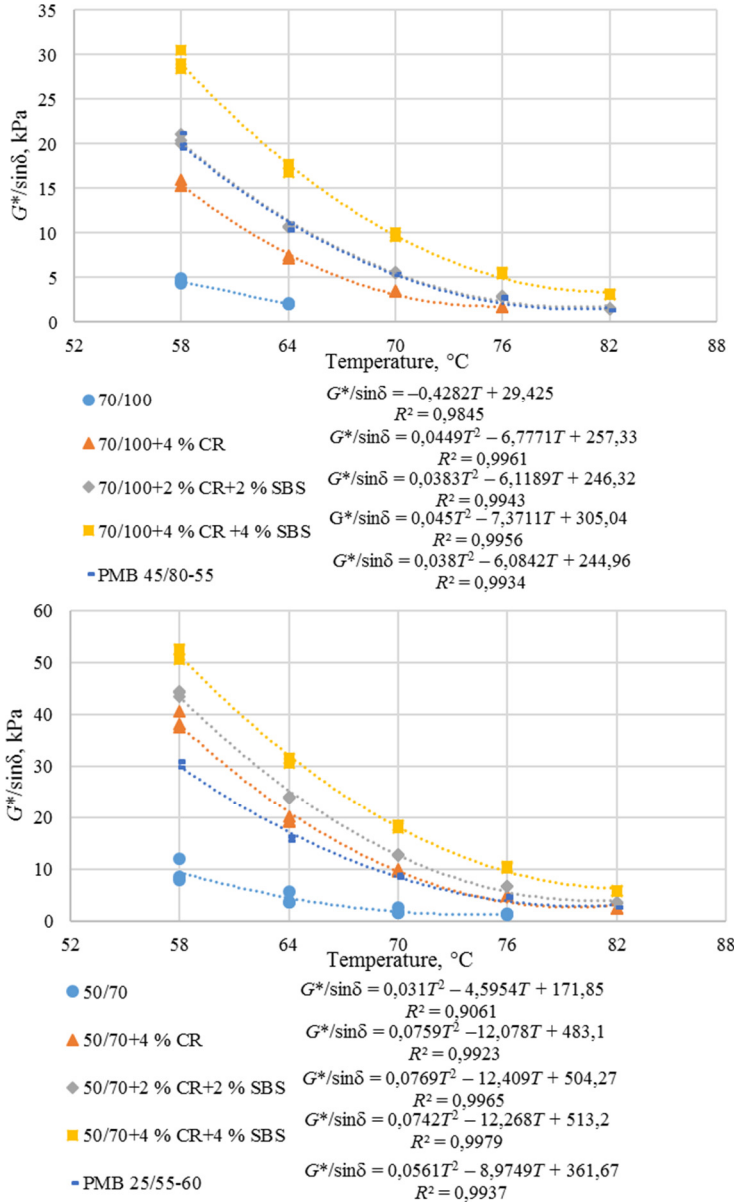


Fig S.2.6. Results of modified bitumen 70/100 and 50/70 complex shear modulus and phase angle ratio $G^*/\sin\delta$ determination test

Table S.2.1. Results of the multiple stress creep recovery test (at 60 °C)

Bitumen	$J_{nr\ 0,1}$, kPa ⁻¹	$J_{nr\ 3,2}$, kPa ⁻¹	$J_{nr\ diff}$, %	$R_{0,1}$, %	$R_{3,2}$, %	R_{diff} , %	Category ¹⁾
70/100	2.475	2.890	16.8	4.8	0.1	101.4	S
70/100 + 4% CR	0.241	0.289	20.1	34.2	21.5	37.1	E
70/100 + 4% CR + 4% SBS	0.065	0.085	30.5	64.7	55.2	14.8	E
70/100 + 2% CR + 2% SBS	0.195	0.258	32.6	45.2	30.4	32.8	E
50/70	1.276	1.454	9.9	7.6	1.6	79.1	H
50/70 + 4% CR	0.131	0.156	19.1	43.3	32.7	24.7	E
50/70 + 4% CR + 4% SBS	0.015	0.021	37.8	80.6	73.7	8.5	E
50/70 + 2% CR + 2% SBS	0.021	0.026	25.0	73.9	68.3	8.0	E
PMB 25/55-60	0.060	0.083	36.8	77.4	69.9	9.6	E
PMB 45/80-55	0.170	0.241	42.5	57.1	43.4	24.2	E

Notes: E – resistant to rutting under special loads ($J_{nr\ 3,2, \max\ 0.5\ kPa^{-1}}$); H – resistant to rutting under heavy loads ($J_{nr\ 3,2, \max\ 2.0\ kPa^{-1}}$); S – resistant to rutting under standard loads ($J_{nr\ 3,2, \max\ 4.0\ kPa^{-1}}$).

¹⁾ Categories selected in accordance with the technical document drafted by the Federal Highway Administration (Federal Highway Administration 2011)

Having summarised the results of the experimental research and analysis provided in the second chapter, it can be stated that increasing the amount of crumb rubber increases the softening point relatively slightly, thus using more than 4% of crumb rubber to modify bitumen would be inefficient in terms of the softening point. In addition to this, using 2% of crumb rubber can cut down the amount of SBS polymers in half and maintain the softening point values that are equal to those of solely SBS polymer modified bitumen. Also, crumb rubber modified bitumen is not storage-stable but reducing the amount of crumb rubber to 2% and using 2% of SBS polymers for modification improves storage stability which then complies with the requirements. The results of the $G^*/\sin\delta$ parameter of rutting resistance for bitumen 70/100 + 2% CR + 2% SBS at testing temperatures of 58 °C and 76 °C were 4.4% and 7.5% better, respectively, while the same results for bitumen 70/100+4% CR were 16.1% and 34.9% worse, respectively, when compared to bitumen PMB 45/80-55. The results of the $G^*/\sin\delta$ parameter of rutting resistance of bitumen 50/70 + 2% CR + 2% SBS at testing temperatures of 58 °C and 76 °C were 30.7% and 29.7% better, respectively, while the same results for bitumen 50/70 + 4% CR were 21.1% and 3.3% better, respectively, when compared to bitumen PMB 25/55-60. Bitumen 70/100 + 4% CR + 4% SBS and 50/70 + 4% CR + 4% SBS performed the best out of all tested bitumens at 58 °C and 76 °C in terms of complex shear modulus, phase angle and the $G^*/\sin\delta$ parameter of rutting resistance. Crumb rubber or crumb rubber and polymer modification of bitumen worsens thermal cracking resistance when compared to unmodified bitumen. However, when compared to alternative SBS polymer modified bitumen, thermal cracking resistance is not significantly poorer.

3. Evaluation of effect of bitumen and asphalt mixtures enhancing using crumb rubber on asphalt pavement performance

In this chapter, the assessment of the performance of crumb rubber modified bitumen in accordance with the Superpave (PG) classification system was performed. Tests on the rutting resistance of asphalt mixtures containing crumb rubber and polymer modified bitumen were conducted as well as the assessment of the dependence of rutting resistance parameters of asphalt mixtures on rutting resistance parameters of bitumen. In addition to this, the economic effect of crumb rubber and polymer modification of bitumen was assessed. The most rational bitumen modification option was selected in accordance with the multi-criteria SAW method.

Bitumen is classified on the basis of critical high temperature and critical low temperature. For example, critical high temperature of 70/100+4% CR bitumen is 70 °C and its critical low temperature is -30 °C, thus the category of this bitumen is PG 70-30. The summary of the classification of modified bitumen is listed in Table S.3.1.

Table S.3.1. Summary of the classification of modified bitumen in accordance with the Superpave (PG) system

Bitumen	Critical high temperature in accordance with Superpave (PG)	Critical low temperature in accordance with Superpave (PG)	PG category
70/100	58	-30	58-30
70/100 + 4% CR	70	-30	70-30
70/100 + 4% CR + 4% SBS	82	-30	82-30
70/100 + 2% CR + 2% SBS	76	-30	76-30
PMB 45/80-55	76	-30	76-30
50/70	64	-30	64-30
50/70 + 4% CR	82	-24	82-24
50/70 + 4% CR + 4% SBS	88	-24	88-24
50/70 + 2% CR + 2% SBS	82	-24	82-24
PMB 25/55-60	82	-30	82-30

In terms of rutting resistance, all bitumens, modified using a combination of crumb rubber and polymers, are equal to solely polymer modified bitumen. Critical high temperatures of solely crumb-rubber modified bitumen are one classification level (6 °C) lower than solely polymer modified bitumen. The category of critical low temperature of all variants of 70/100 crumb rubber and polymer modified bitumen is -30 °C and is the same as solely polymer modified bitumen PMB 45/80-55. The category of critical low temperature of all variants of 50/70 crumb rubber and polymer modified bitumen is -24 °C and

is 6 °C higher than that of polymer modified bitumen PMB 25/55-60. This shows that harder bitumen used for modification leads to poorer resistance to thermal cracking.

In order to determine the rutting resistance of asphalt mixtures containing crumb rubber and polymer modified bitumen, experimental research was conducted, the results of which are listed in Table S.3.2.

Table S3.2. Results of asphalt mixture rutting resistance determination test

Asphalt mixture	$PRD_{AIR10000}$, %	WTS_{AIR} , mm/1000 cycles	$PRD_{AIR30000}$, %	WTS_{AIR} , mm/1000 cycles
SMA 11 S 70/100	14	0.370	24.4	0.228
SMA 11 S 70/100 + 4% CR	6.5	0.060	7.9	0.035
SMA 11 70/100 + 4% CR + 4% SBS	5.4	0.033	6.1	0.018
SMA 11 S 70/100 + 2% CR + 2% SBS	5.4	0.053	7.1	0.034
SMA 11 S 50/70	12.4	0.22	24.4	0.24
SMA 11 S 50/70 + 4% CR	6.1	0.04	6.8	0.019
SMA 11 S 50/70 + 4% CR + 4% SBS	5.1	0.027	5.6	0.013
SMA 11 S 50/70 + 2% CR + 2% SBS	5.3	0.037	6.1	0.021
SMA 11 S PMB 25/55-60	5.0	0.023	5.5	0.012
SMA 11 S PMB 45/80-55	4.7	0.023	5.3	0.015

Asphalt mixtures containing solely SBS polymer modified bitumen and asphalt mixtures containing crumb rubber and polymer modified bitumen are the most rutting-resistant. It was determined that using harder bitumen (50/70) for modification leads to asphalt mixtures containing such modified bitumen being more resistant to rutting. The comparison of rutting resistance results for asphalt mixtures containing different bitumens shows that using 4% of SBS polymers and 4% of crumb rubber leads to a 0.0%–0.2% increase of rutting resistance after 10,000 load cycles and a 0.5%–1.0% increase after 30,000 load cycles.

The most economically efficient option is using bitumen 45/80 CR or 25/55-60 CR since the cost of 1 tonne of bitumen is as much as 21.96% lower than the cost of the usual polymer modified bitumen PMB 45/80-55 and PMB 25/55-60. In this case, the cost of bitumen needed to make 1 tonne of SMA 11 S asphalt mixture is EUR 7.03 lower than the cost of the usual polymer modified bitumen PMB 45/80-55 and PMB 25/55-60. When assessing the economic effect of the bitumen needed to cover 1 m² in SMA 11 S asphalt mixture, it was calculated that using bitumen 45/80-55 CR or 25/55-60 CR instead of bitumen PMB 45/80-55 and PMB 25/55-60, the savings are EUR 0.69 per 1 m².

The analysis of the rationality of bitumen modification using the multi-criteria SAW decision making method has shown that the most rational modification option is bitumen 25/55-60 CR while bitumen PMB 45/80-80 CR is the least rational. The assessment of the results of determining the rationality allow to conclude that it is irrational to use crumb rubber to modify 70/100 bitumen when compared to 50/70 road bitumen.

General conclusions

The following conclusions have been reached after summarising the results of experimental research of this thesis:

1. The analysis of bitumen and asphalt mixture modification technologies in use has shown that modified bitumen should not only comply with quality requirements, but should also be economically efficient. In order to reduce the cost of modified bitumen, cheaper polymeric materials can be used, especially recycled materials (crumb rubber, plastic). Crumb rubber modification of bitumen improves the fatigue and rutting resistance of asphalt mixtures, reduces the oxidation of bitumen, its sensitivity to the effect of low temperature and leads to lower costs of surface maintenance. Created experimental research sequence for crumb rubber modification of bitumen allow to quickly and efficiently determine the rational conditions for crumb rubber modification of bitumen (appropriate road bitumen, sufficient amount of crumb rubber and SBS polymers) that ensure rutting and thermal cracking resistance of bitumen.

2. The conducted experimental research on the determination of the minimum amount of crumb rubber sufficient for modification allowed the author to determine that increasing the amount of crumb rubber raises the softening point relatively slightly (0.7 to 5.6 °C), thus an amount of more than 4% of crumb rubber is inefficient when modifying bitumen in terms of the softening point. In addition to this, in order to improve the elastic recovery of bitumen, a combination of crumb rubber and polymers must be used for modification. The results of the parameter of rutting resistance $G^*/\sin\delta$ for bitumen 70/100 + 2% CR + 2% SBS were 4.4–7.5% better when compared to bitumen PMB 45/80-55, while the results of bitumen 50/70 + 2% CR + 2% SBS were 29.7–30.7% better when compared to bitumen PMB 25/55-60. Using 2% of crumb rubber to modify bitumen can cut down the amount of polymers in half and maintain the softening point, penetration, viscosity and rutting parameter $G^*/\sin\delta$ values that are equal to those of solely polymer modified bitumen.

3. Asphalt mixtures containing solely polymer modified bitumen and asphalt mixtures containing crumb rubber and polymer modified bitumen are the most resistant to rutting. It was also determined that bitumens containing harder road bitumen (50/70) are more rutting-resistant. Solely crumb rubber modified bitumen (4%) and crumb rubber and polymer modified bitumen (2% of CR + 2% of SBS) are equivalent to the usual polymer modified bitumen and are more rutting-resistant than asphalt mixtures containing unmodified bitumen.

4. After economical effect calculation of bitumen modification using crumb rubber or crumb rubber and SBS polymers together, it was determined that the most economical modification case is using 4% of crumb rubber. In this case the price of 1 tonne of crumb

rubber modified bitumen is lower by 21.96% when compared to bitumen PMB 45/50-55 or PMB 25/55-60. Using crumb rubber and SBS polymers together for bitumen modification, the economical effect decreases to the 10.76% for 1 tonne of bitumen.

5. Using one of the multi-criteria evaluation methods – Simple Additive Weighting (SAW) method, the most rational bitumen modification conditions were determined. Evaluating asphalt mixture resistance to rutting, bitumen resistance to thermal cracking and price, it was determined that the most rational is to modify bitumen 50/70 using 4% of crumb rubber (coefficient of the rationality is 0.872). The most irrational is to modify bitumen 70/100 using 2% of crumb rubber and 2% of SBS polymer (coefficient of the rationality is 0.787).

Recommendations

1. When modifying bitumen with crumb rubber or the combination of crumb rubber and SBS polymers, it is recommended to:

- a) use harder road bitumen (e.g. 50/70 or the mixture of 70/100 and 50/70 road bitumen);
- b) use as fine crumb rubber as possible (≤ 0.6 mm);
- c) use the minimum sufficient amount of crumb rubber, thus facilitating the modification process and improving the stability of modified bitumen when storing it for longer periods of time;
- d) modify the bitumen with the combination of crumb rubber (≤ 4 %) and SBS polymers (≤ 4 %);
- e) when selecting the designed composition, use high-intensity bitumen mixers in the laboratory, the operating principle of which should be as close as possible to the operating principle of a bitumen modification plant.

2. It is recommended to continue scientific research by using other unmodified bitumens and applying different technologies of incorporating crumb rubber and SBS polymers into bitumen.

3. It is recommended to perform tests on different asphalt mixtures containing crumb rubber modified bitumen and assess not only their rutting resistance but also their water sensitivity, fatigue and thermal cracking resistance.

4. It is recommended to construct an experimental area where asphalt mixtures containing crumb rubber modified bitumen are used and to regularly inspect this area. This way, data from a road surface exposed to actual climate and traffic conditions would be collected.

Priedai*

A priedas. Bitumo kritinės aukščiausios temperatūros nustatymo kreivės

B priedas. Bitumo kritinės žemiausios temperatūros nustatymo kreivės

C priedas. Bitumo ir asfalto mišinių atsparumo provėžoms rodiklių priklausomybės nustatymo grafikai

D priedas. Guma modifikuoto bitumo eksperimentinio tyrimo rezultatai

E priedas. Asfalto mišinio su guma modifikuotu bitumu atsparumo provėžoms nustatymo rezultatai

F priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

G priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

H priedas. Mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Ovidijus ŠERNAS

PANAUDOTŲ PADANGŲ GUMOS ĮTAKA
ASFALTO DANGOS ATSPARUMUI PROVĖŽOMS
IR PLYŠIAMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (02T)

THE EFFECT OF CRUMB RUBBER ON
ASPHALT PAVEMENT RESISTANCE TO
RUTTING AND THERMAL CRACKING

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2018 02 21. 14,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius