

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Justas BRAŽIŪNAS

ASFALTO MAIŠYTUVO BITUMO DOZAVIMO SISTEMOS TECHNOLOGINIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2222-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-612-6

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2013

© Justas Bražiūnas, 2013

justas.braziunas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Justas BRAŽIŪNAS

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BITUMEN BATCHING SYSTEM IN THE ASPHALT MIXING PLANT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)



Vilnius **TECHNIKA** 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T).

Reziumė

Asfalto maišytuvo (ASMA) bitumo dozavimo sistema (BDS) yra transporto technologinis įrenginys, skirtas priimti, laikyti, kaitinti, transportuoti ir dozuoti (sverti, matuoti) nustatytos masės (tūrio) bituminio rišiklio porcijas gaminant karštojo maišymo asfalto (KMA) mišinį. BDS, susidedanti iš talpyklų, šildymo įrenginių, siurblių, vamzdyno, dozatoriaus, yra priskiriama sudėtingam vamzdynų transportui, privalančiam ne tik perkelti skystą bituminį rišiklį iš vienos vietos į kitą, bet ir jį tiksliai dozuoti bei apsaugoti nuo galimo sugadinimo. Disertacijos tema priskiriama transporto inžinerijos kryptčiai ir dėl to, kad asfalto mišiniai išskirtinai naudojami tik transporto infrastruktūros statybai ir jai gerinti: kelių, miestų gatvių, automobilių stovėjimo aikštelių, oro uostų dangai, geležinkelių pobalastiniam sluoksniui tiesti.

Pirmasis svarbus BDS technologinis parametras yra išpilamo bitumo dozių masės procentinis nuokrypis nuo projekte nustatytos vertės – darbinės mišinio formulės (DMF). Dėl per mažo bitumo kiekio ne visi mineralinių medžiagų grūdėliai būna padengti ištisinėmis reikiamo storio plėvelėmis, mišinys labiau segreguoja (sluoksniuojasi), būna „sausas“, blogai sutankinamas. Esant per dideliui bitumo kiekiui asfalto mišinyje, dėl didelio tūrinio bitumo plėvelių storio pagaminamas silpnesnius struktūrinius ryšius turintis KMA mišinys. Racionalus bituminio rišiklio naudojimas yra svarbus ir todėl, kad bitumas yra brangiausias KMA mišinio komponentas.

Antrasis technologinis parametras – bitumo temperatūra, nuo kurios priklauso jo fizinės, cheminės, reologinės ir gaminamo asfalto mišinio mechaninės savybės. Bitumas būna standus ir trapus žemoje temperatūroje, skystas bei takus aukštoje temperatūroje ir pusiau kietas arba kietas vidutinėje temperatūroje. Bitumo dinaminis modulis dėl temperatūros pokyčio nuo –30 iki 50 °C pasikeičia net 37 000 kartų (Jenks *et al.* 2011)! Gaminant asfalto mišinį su per šaltu, o dėl to didelės klampos (konsistencijos) bitumu, jis sunkiai virsta plonomis plėvelėmis, privalančiomis ištisiniais tam tikro storio sluoksniais padengti visus mineralinius grūdėlius ir sudaryti stiprią sutankinto mišinio struktūrą. Kai naudojamas per karštas bitumas arba perkaitintos mineralinės medžiagos, tai bitumas gali „sudegti“: jis chemiškai degraduoja, garuoja lakiosios frakcijos, pakinta koloidinė sudėtis, pablogėja reologinės savybės.

Oksidacija – tai didžiausią įtaką bitumo trumpalaikiam senėjimui turintis veiksnys, kuris yra ypač žalingas aukštoje temperatūroje. Kai bitumo sąlyčio plotas su deguonimi yra didelis, sąveika trunka ilgai. Visose KMA gamybos technologinėse grandinėse randame, kur yra bitumo ir deguonies reakcijų galimybė, vyksta negrįžtamieji bitumo savybių pokyčiai, kurie blogina jo penetraciją, minkštėjimo ir trapumo temperatūrą.

Abstract

Bitumen Batching System (BBS) of Asphalt Mixing Plant (AMP) is transport technological equipment for intaking, storing, heating, transporting and batching (weighing and measuring) of a set mass (capacity) bitumen binder batches when producing hot mix asphalt (HMA) mixture. BBS consisting of containers, heating equipment, pumps, pipeline and a batcher is considered a complicated pipeline transport, which should not only transport liquid bitumen binder from one place to another, but batch it accurately and protect from possible damage. The subject of the dissertation belongs to transport engineering field as asphalt mixtures are used exclusively in transport infrastructure construction and its improvement for constructing roads, urban streets, parking lots, airport pavement, railway track underballast layer.

The first significant BBS technological parameter is percent deviation of discharged bitumen batches from the value set in the project, i.e. job-mix formula (JMF). Due to too small bitumen content not all mineral aggregate particles are coated with the film of required thickness and the mixture segregates (flakes) more, is dry and poorly compacted. When bitumen content in asphalt mixture is too high, weaker HMA mixture is produced due to high volumetric bitumen film thickness. The rational use of bitumen is important because bitumen is the most expensive component in HMA mixture.

The second technological parameter is bitumen temperature, which influences the physical, chemical, rheological and mechanical properties of the produced asphalt mixture. Bitumen may be rigid and friable at low temperature, liquid and fluid at high temperature and semi-rigid or rigid at medium temperature. Bitumen dynamic modulus due to temperature fluctuations from -30 to 50 °C change even 37,000 times (Jenks *et al.* 2011)! When asphalt mixture is produced of too cool and, therefore, too viscous (consistent) bitumen, it hardly turns into a thin film, which should coat all mineral particles with solid layers of appropriate thickness and make a strong compacted structure of the mixture. When too hot or overheated mineral aggregates are used, bitumen may *burn*: it degrades chemically, volatilizes, its colloidal composition changes and rheological properties deteriorate.

Oxidation is the factor influencing most on bitumen short-term ageing, which is extremely harmful at low temperature; when bitumen contact area with oxygen is huge, this interaction lasts for a long time. During the whole process of HMA production, when bitumen and oxygen reactions may occur, irreversible bitumen characteristics change, which worsens its penetration, softening point and friability temperature.

Žymenys

Simboliai

Pen_{25} – penetracija (angl. *Penetration*);

T_m – minkštėjimo temperatūra (angl. *Softening point*);

I_p – penetracijos indeksas;

t_m – maišymo trukmė;

E – KMA mišinio dinaminis modulis, MPa;

S – pastovumas pagal Maršalą, kN (angl. *Stability – S*);

F – takumas pagal Maršalą, mm (angl. *Flow – F*);

Q – Maršalo koeficientas (angl. *Marshall quotient*);

x_B – bitumo kiekis ėminyje, %;

x_{Bi} – bitumo kiekis i-jame ėminyje, %;

x_p – komponento projektinis kiekis, %;

x_{Bp} – projektinis bitumo kiekis, %;

Δx_{Bi} – bitumo kiekio nuokrypis nuo DMF i-jame ėminyje, %;

Δx_{Btol} – leidžiamoji bitumo kiekio nuokrypio toleranciją, % (priklausanti nuo ėminių skaičiaus (bandymų rezultatų skaičiaus) N ir turinti pluso arba minuso ženklą);

q_B – bitumo dozės masė, kg;

q_{Bi} – i-ios bitumo dozės masė, kg;

q_{Bp} – projektinė bitumo masė, kg;

Q_{ma} – mineralinių užpildų faktiškoji masė, kg;

σ_B^2 – bitumo kiekio KMA mišinio partijoje dispersija;

$\overline{\Delta x_B}$ – bitumo kiekio nuokrypių nuo DMF aritmetinis vidurkis, %;

$\overline{\Delta x_{MM}}$ – mineralinių miltelių kiekio nuokrypių nuo DMF aritmetinis vidurkis, %;
 $\overline{\Delta x_{SM}}$ – smėlio kiekio nuokrypių nuo DMF aritmetinis vidurkis, %;
 $\overline{\Delta x_{SK}}$ – skaldos kiekio nuokrypių nuo DMF aritmetinis vidurkis, %;
 $s_{\Delta x_B}$ – bitumo kiekio nuokrypių nuo DMF standartinis nuokrypis, %;
 $s_{\Delta x_{MM}}$ – mineralinių miltelių kiekio nuokrypių nuo DMF standartinis nuokrypis, %;
 $s_{\Delta x_{SM}}$ – smėlio kiekio nuokrypių nuo DMF standartinis nuokrypis, %;
 $s_{\Delta x_{SK}}$ – skaldos kiekio nuokrypių nuo DMF standartinis nuokrypis, %;
 M_{Bp} – bitumo procentinė masė KMA mišinyje, kg;
 R^2 – determinacijos koeficientas;
 ρ – medžiagos tankis, kg/m³;
 η – bitumo dinaminė klampa, Pa·s;
 v_{Bef} – efektyvusis bitumo kiekis, %;
 v_{oro} – oro tuštymių kiekis, %;
 P – slėgis, Pa;
 r_{CA} – karbonilų junginių kiekis, bedimensinis dydis;
 D – difuziškumas, m²/s;
 R – dujų konstanta;
 η_0^* – kompleksinė klampa, Pa·s arba P (puazais);
 T – temperatūra, K;
 C_{O_2} – deguonies koncentracija;
 r_{O_2} – deguonies suvartojimas (absorbavimas);
 $[N(\psi)]$ – formos funkcijų matrica;
 $\{q_e\}$ – baigtinio elemento nežinomieji;
 x – gylio bitumo plėvelėje koordinatė;
 L_e – BE ilgis;
 C_p – specifinė šiluma;
 k_x – šilumos laidumo koeficientas;
 T_∞ – aplinkos temperatūra, K;
 h – šilumos perdavimo koeficientas;
 q – šilumos srautas;
 $\{R_k\}$ – lygčių sistemos dešiniųjų pusių vektorius;
 $[H_k]$ – koeficientų matrica;
 σ_B^2 – bitumo kiekio KMA mišinio partijoje dispersija, %;
 B – Bartleto kriterijus;
 sk – asimetrijos koeficientas;
 ku – eksceso koeficientas.

Santrumpos

ASC – aukšto slėgio čiurkšlė;

ASMA – asfalto maišytuvas (angl. *Asphalt Mixing Plant – AMP*);

AMG – asfalto mišinio gamykla;

DDGS – didelio debito gravitacinis srautas;

B – bitumas;

BE – baigtiniai elementai;

BDS – bitumo dozavimo sistema (angl. *Bitumen Dosing System – BDS*);

CA – korbonilų junginiai;

DMF – darbinė mišinio formulė (angl. *Job-Mix Formula – JMF*);

ILS – ilgalaikis senėjimas (angl. *long-term ageing*);

KMA – karštojo maišymo asfaltas arba karštai maišytas asfaltas (angl. *Hot Mix Asphalt – HMA*);

MM – mineralinių miltelių komponentas (grūdeliai, mažesni už 0,063 mm) (angl. *mineral filler – MF*);

NAG – naudoto asfalto granulės (angl. *Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*);

PMB – polimerais modifikuotas bitumas;

SK – skaldos komponentas (grūdeliai, didesni už 2 mm) (angl. *coarse aggregates – CA*);

SM – smėlio komponentas (grūdeliai, didesni už 0,063 mm ir mažesni už 2 mm) (angl. *fine aggregate – FA*);

SMA – skaldos ir mastikos asfaltas;

TLS – trumpalaikis senėjimas (angl. *short-term ageing*);

VFB – oro tuštymės, užpildytos bitumu (angl. *Voids Filled Bitumen*);

VGK – vidinė gamybos kontrolė;

VMA – oro tuštymės mineralinėse medžiagose (angl. *Voids in the Mineral Aggregates*).

Terminai ir apibrėžimai

Adhezija – [lot. *adhaesio* – sukibimas]: priekiba – kietų kūnų, kieto kūno ar skysčio, nesimaišančių skysčių susiliečiančių paviršių sukibimas dėl kūnų dalelių sąveikos.

Asfalto mišinio gamybos kokybė vadinama asfalto mišinio gamybos technologinio proceso savybių, nuo kurių priklauso šio proceso parametrų ir jo rezultatų atitiktis nustatytiems reikalavimams, visuma.

Asfalto mišinio kokybė suprantama kaip savybių, nulemiančių mišinio tinkamumą tenkinti jo paskirties poreikius, visuma. Priklauso nuo panaudotų medžiagų kokybės, sudėties projekto kokybės ir gamybos asfalto maišytuve kokybės.

Asfalto mišinio maišinys – periodinio (nutrūkstamo, diskretinio) veikimo maišyklėje per vieną maišymo ciklą (vienu maišymu) sumaišytų mineralinių medžiagų ir bitumo (gali būti ir priedų) visuma, byranti arba išbyrėjusi į keltuvo kaušą arba transporto priemonės kėbulą.

Asfalto mišinio partija – vieno tipo pagal tą patį sudėties projektą (receptą) be pertrūkių arba trumpai sustabdant technologinį procesą per darbo pamainą arba trumpesnę laiko tarpą pagaminto KMA mišinio, suvartojamo ne didesnio kaip 7000–9000 m² ploto vieno sluoksnio dangai įrengti (apie 800–1200 t), kiekis.

Asfaltenai – didelės molekulinės masės organiniai junginiai, esantys naftoje (ar iš jos pagamintame bitume).

Asfalto mišinys (karštojo maišymo asfalto mišinys) (KAM) – mišinys, gaminamas specialiais įrenginiais, maišant suduotus įkaitintą skaldą (žvyrą) ir atsijas (gamtinį smėlį), šaltus mineralinius miltelius, mineralinę dulkę (arba be jo) ir karštą bitumą.

Atsitiktinė paklaida – paklaidos sandas, kuris to paties požymio tyrimų rezultatuose kinta nenuspėjamu būdu. Atsitiktinės paklaidos neįmanoma pašalinti.

Bandinys – ėminys arba jo dalis, skirta produkto, gaminio, žaliavos arba medžiagos parametrams nustatyti; KMA bandomosios dalies dalis, su kuria buvo atliktas vienas bandymas.

Bitumo dozavimo sistema (BDS) – tai asfalto maišytuvo (ASMA) technologinių įrenginių visuma, skirta priimti, laikyti, kaitinti, transportuoti ir dozuoti (sverti, matuoti) nustatytos masės (tūrio) bituminio rišiklio porcijas ir jas išpilti į maišyklę.

Darbinė mišinio formulė (DMF) (mišinio formuluoė) – bazinė mišinio sudėtis, išreikšta kaip tikslinė, t. y. asfalto mišinio sudėties išraiška sudedamųjų medžiagų santykiu kiekiu, granuliuotinės sudėties kreive (mineralinių komponentų kiekiu), bitumo kiekiu ir reikiamu priedų kiekiu, procentais, mišinyje.

Elementarusis ėminys (prieauginis ėminys) – vienkartinis medžiagos (KMA) kiekis, paimtas tyrimui iš didesnio medžiagos kiekio.

Ėmimas – ėminio ar imties ėmimo arba sudarymo procesas.

Ėminys – vienu ėmimu iš vienos vietos paimtos medžiagos kiekis.

Homogeniškumas – (gr. *homogenia*): panašumas, vienuodžiškumas, vienalytiškumas. KMA mišinio homogeniškumas – tai jo komponentų pasiskirstymo tolygumas.

Imtis – vienas ar daugiau ėmimo elementų, paimtų iš visumos (populiacijos), siekiant gauti informaciją apie visumą (populiaciją). Imtis paprastai suteikia informaciją apie visumą arba apie visumą sukuriantį gamybos procesą.

Kelių bitumas – bitumas, skirtas surišti mineralines medžiagas, daugiausia gaminant asfalto mišinius, naudojamus kelių dangoms įrengti ir taisyti.

Kohezija – (lot. *cohaesus* – surištas), sankiba – medžiagų dalelių (molekulių, atomų ar jonų) sukibimas dėl molekulių sąveikos ir cheminio ryšio jėgų.

Maišymo ciklas – laiko trukmė tarp dviejų gretimų to paties pavadinimo technologinių operacijų, atliekamų periodinio veikimo ASMA maišyklėje.

Mineralinė medžiaga (užpildas) – kelio konstrukciniams sluoksniams, asfalto ar kitiems mišiniams gaminti naudojama uolienu dažniausiai skirtingo dydžio grūdėlius turinti biri pagaminta arba gamtoje randama medžiaga, atskirai laikoma iki bus panaudota pagal paskirtį.

Mineralinis komponentas – mineralinės medžiagos arba mišinio mineralinės dalies tam tikro sutartinio skersmens grūdėlių visuma. Asfalto mišinyje būna iš visų panaudotų jo gamybai mineralinių medžiagų sudaryti mineralinių miltelių (<0,063 mm grūdėliai), smėlio (0,063–2 mm grūdėliai) ir skaldos (>2 mm grūdėliai) mineraliniai komponentai.

Polimerais modifikuotas bitumas (PMB) – vienu ar daugiau organiniais polimerais modifikuotas bitumas.

Reologija – technikos mokslas, tiriantis išorės jėgų veikiamų medžiagų deformaciją ir takumą.

Reprezentatyvusis ėminys – sudėtinis ėminys, susidedantis iš apibrėžto kiekio KMA mišinio elementariųjų ėminių, tikslingai paimtų reprezentuoti visą medžiagos kiekį ar plotą. Reprezentatyviuoju ėminiu laikomas ėminys, kuris yra tokios pat sudėties, kaip ir medžiaga, iš kurios šis ėminys paimtas, laikantis rezultatų glaudumo ribų, susijusių su ėminio ėmimo metodais.

Sisteminioji paklaida – to paties požymio tyrimų rezultatų paklaidos sandas, kuris nekinta arba kinta prognozuojamai. Sistemingosios paklaidos ir jų priežastys gali būti žinomos arba nežinomos.

Statistinė tolerancija – asfalto sluoksnio arba jo mišinio savybių rodiklio tyrimais gauto vidurkio arba atskirosios vertės leidžiamoji nuokrypa nuo projektinės (optimalios) vertės.

Techniniai reikalavimai, specifikacija – darnieji Europos standartai ir Europos techniniai liudijimai asfalto mišiniams, kuriuose išdėstyti su techniniais parametrais susiję reikalavimai. Dar vadinamos „vartotojui nurodomos gaminio charakteristikos“. Techniniams reikalavimams patikslinti galima vartoti tokius apibūdinimus: „produkto ar gaminio techninis reikalavimas“, „bandymų techninis reikalavimas“. Praktiniame darbe dažnai vartojami tokie termino „techniniai reikalavimai“ atitikmenys: sąlygos (gaminio techninės sąlygos), metodika (bandymų metodika) ir pan.

Techninių reikalavimų (sąlygų) riba – asfalto dangos sluoksnio arba jo mišinio savybių rodiklio normuotoji skaitinė vertė, kurią tenkinant labai tikėtina, kad bus laiduojamos kelio dangos sluoksnio tinkamos paviršiaus savybės (tekstūra), stiprumas, lygumas ir funkcionavimo trukmė (ilgalaikiškumas). Atskirų rodiklių būna viršutinė ir apatinė, tik apatinė arba tik viršutinė.

Technologinio proceso stabilumas – technologinio proceso savybė, lemianti jo parametrų tikimybių skirstinio pastovumą tam tikrame laiko ruože, kai neveikia išorės veiksniai.

Technologinio proceso tikslumas – technologinio proceso savybė, nulemianti gamamos produkcijos (asfalto mišinio) tikrųjų (faktiškųjų) parametrų artumą (atitiktį) nominaliosioms (reikiamoms) jų vertėms.

Tikimybių skirstinys – funkcija, rodanti tikimybę, su kuria atsitiktinis dydis įgyja nurodytąją vertę arba priklauso nurodytajai verčių visumai, aibei.

Tūrinis ėmimas – ėmimas iš nevienetinių medžiagų partijų, kuriuose ėmimo elementai nėra iš anksto atskirti.

Vidinė gamybos kontrolė – gamintojo vykdoma nuolatinė KMA mišinio gamybos vidaus kontrolė, kur visi elementai, reikalavimai ir sąlygos, priimti pagal gamintoją, turi būti patvirtinti dokumentais metodiškai aprašytose veiklos kryptyse ir procedūrose. Šios gamybos kontrolės sistemos patvirtinimas dokumentais skirtas garantuoti kokybės tikrumo bendrą supratimą ir leidžia kontroliuoti pasiektas reikiamas mišinio charakteristikas ir veiksmingą gamybos kontrolės sistemos veikimą.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	1
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodai ir įranga	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	6
1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ BITUMO SAVYBIŲ KITIMO TECHNOLOGINIUOSE ĮRENGINIUOSE IR ASFALTO DANGOS SLUOKSNYJE VEIKSNIAMS TIRTI, ANALIZĖ	7
1.1. Bitumo sudėties ir savybių įtaka asfalto struktūrai ir stiprumui	7
1.2. Bitumo savybių kaita ir jos priežastys	11
1.3. Reikiamo bituminio rišiklio kiekio asfalto mišinyje užtikrinimas	20
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	24
2. BITUMO SAVYBIŲ KAITOS PROCESŲ TECHNOLOGINIUOSE ĮRENGINIUOSE MODELIAVIMAS	27
2.1. Bitumo efektyvaus kiekio ir klampos įtaka asfalto mišinio dinaminiam moduliui	27
2.2. Reikalavimai bitumo dozavimo sistemai ir jos technologiniai parametrai	31
2.3. Bitumo savybių kaita ir oksidacijos technologiniuose įrenginiuose krantinčiame laše modeliavimas	36

2.4. Bitumo reikiamo kiekio užtikrinimo karšto maišymo asfalto mišinyje modeliavimas.....	46
2.4.1. Bitumo kiekio karšto maišymo asfalto mišinio partijoje dispersiją sudarančių dispersijų sietis.....	47
2.4.2. Medžiagų dozavimo proceso statistiniai parametrai ir karšto maišymo asfaltą sudarančių komponentų kiekio tolerancijos.....	53
2.5. Antrojo skyriaus išvados.....	61
3. BITUMO DOZAVIMO SISTEMOS TECHNOLOGINIŲ PARAMETRŲ ĮTAKOS KARŠTO MAIŠYMO ASFALTO MIŠINIO KOKYBEI TYRIMAS	63
3.1. Pagaminto KMA mišinio komponentų faktiškieji nuokrypiai	63
3.2. Bitumo temperatūros kaitos asfalto maišytuvo įrenginiuose eksperimentinis tyrimas	85
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	89
4. ASFALTO MAIŠYTUVO BITUMO DOZAVIMO SISTEMOS TECHNINIŲ IR TECHNOLOGINIŲ PARAMETRŲ TIKSLINIO KEITIMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	91
4.1. Bitumo dozavimo sistemos modernizavimas ir jo veiksmingumas	91
4.1.1. Bitumo dozavimo sistemos konstrukcinio keitimo pagrindimas	92
4.1.2. Prieš modernizavimą ir po jo pagaminto karšto maišymo asfalto mišinio sudėties tyrimas	97
4.2. Medžiagų maišymo trukmės ir temperatūros įtakos bitumo ir su juo pagaminto skaldos mastikos asfalto mišinio savybėms tyrimas	100
4.2.1. Gamykloje atlikto fizinio eksperimento metodika	102
4.2.2. Skirtingų bitumo dozavimo sistemų lyginamoji analizė	107
4.2.3. Iš pagaminto SMA mišinio regeneruoto bitumo savybės	109
4.2.4. Maišymo trukmės įtaka skaldos ir mastikos asfalto mišinio fiziniams ir mechaniniams rodikliams	114
4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados.....	121
BENDROSIOS IŠVADOS	123
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	125
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	137
PRIEDAI.....	139
A priedas. 2006 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtiniuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės	140
B priedas. 2007 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtiniuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės	164

C priedas. 2008 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtinuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės	190
D priedas. 2009 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtinuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės	195
E priedas. Aktyviojo eksperimento rezultatai	200

Contents

INTRODUCTION	1
The research problem	1
The relevance of the work	1
The object of the research.....	2
The aim of the work	2
The tasks of the work	2
The research methods	3
The scientific novelty	3
The practical value	4
Defended propositions.....	5
Approval of the work results	5
Dissertation structure.....	6
Acknowledgements	6
1. ANALYSIS OF RESEARCH WORKS INVESTIGATING THE VARIATION OF BITUMEN CHARACTERISTICS IN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND FACTORS OF ASPHALT PAVEMENT	7
1.1. Impact of bitumen composition and characteristics on asphalt structure and rigidity.....	7
1.2. Variation and causes of bitumen characteristics	11
1.3. Ensurance of required bitumen binder content in asphalt mixture	20
1.4. Conclusions of Chapter One and the Formation of the Dissertation Tasks	24
2. MODELLING OF BITUMEN CHARACTERISTICS VARIATION PROCESSES IN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT	27
2.1. Impact of bitumen effective content and viscosity on asphalt mixture dynamic modulus.....	27

2.2. Requirements set to bitumen batching system and its technological parameters.....	31
2.3. Simulation of bitumen oxidation in a falling drop in technological equipment	36
2.4. Simulation of ensuring bitumen content requirements in hot mix asphalt mixture.....	46
2.4.1. Interaction of dispersions comprising bitumen content dispersion in hot mix asphalt mixture lot.....	47
2.4.2. Statistical parameters of material batching process and component content in hot mix asphalt tolerances.....	53
2.5. Conclusions of Chapter Two	61
3. INVESTIGATION OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BITUMEN BATCHING SYSTEM ON THE QUALITY OF HOT MIX ASPHALT MIXTURE	63
3.1. Factual deviations of component content in the produced hot mix asphalt mixture.....	63
3.2. Experimental investigation of bitumen temperature change in asphalt mixing plant equipment	85
3.3. Conclusions of Chapter Three	89
4. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PURPOSIVE CHANGE OF BITUMEN BATCHING SYSTEM TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ASPHALT MIXING PLANT.....	91
4.1. Reconstruction and its effectiveness of bitumen batching system	91
4.1.1. Substantiation of bitumen batching structural change	92
4.1.2. Investigation of the produced hot mix asphalt mixture composition before and after reconstruction	97
4.2. Investigation of material mixing time and temperature impact on the properties of bitumen and stone mastic asphalt mixture produced from it	100
4.2.1. Methodology of the physical experiment conducted in the plant	102
4.2.2. Comparative analysis of various bitumen batching systems.....	107
4.2.3. Properties of bitumen recycled from the produced stone mastic asphalt mixture	109
4.2.4. Impact of mixing time on stone mastic asphalt mixture physical and mechanical parameters.....	114
4.3. Conclusions of Chapter Four	121
GENERAL CONCLUSIONS	123
REFERENCES AND SOURCES.....	125
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION.....	137
ANNEXES.....	139

Annex A. Determined component content deviations from job-mix formula values in the bulk samples of hot mix asphalt mixture of various types and grades, which were made during one work season in 2006	140
Annex B. Determined component content deviations from job-mix formula values in the bulk samples of hot mix asphalt mixture of various types and grades, which were made during one work season in 2007	164
Annex C. Determined component content deviations from job-mix formula values in the bulk samples of hot mix asphalt mixture of various types and grades, which were made during one work season in 2008	190
Annex D. Determined component content deviations from job-mix formula values in the bulk samples of hot mix asphalt mixture of various types and grades, which were made during one work season in 2009	195
Annex E. Results of active experiment	200

Įvadas

Problemos formulavimas

Skirtingų bitumo dozavimo sistemų, turinčių atlikti tas pačias funkcijas, konstrukcija veikiančiuose asfalto maišytuvuose skiriasi. Konstrukcijos skirtumai ir valdymo būdai turi nevienodą įtaką talpyklose, technologiniame vamzdyne ir dozatoriuje vykstantiems procesams ir ne visuomet atitinka keliamus reikalavimus gaminamo asfalto mišinio kokybei.

Reikia turėti arba sukurti tokią technologinių parametrų gerinimo (laidavimo) sistemą, kuri leistų užtikrinti, kad technologiniame įrenginyje transportuojamas skystis nesugestų (kokybės parametrai pablogėtų minimaliai), o dozatorius sver-
tų (matuotų) reikiamos masės bitumo dozes (dozavimo procesas vyktų maksima-
liai tiksliai ir stabiliai). Taip pat reikia, kad sistema būtų funkcionali, ekonomišk-
a energiniu požiūriu, ekologiška ir moderni.

Darbo aktualumas

Automobilių kelių asfalto dangai tiesti ir prižiūrėti Lietuvoje skiriamos didžiulės, tačiau vis dar nepakankamos lėšos, dėl to jų būklė labai negerėja. Nepalankios Lietuvos klimato sąlygos, kai aplinkos oro temperatūra kinta nuo minus 30 °C iki plus 30 °C ir iš teigiamos į neigiamą pasikeičia apie 60–80

kartų per metus, o vandens kiekis asfalto dangos sluoksnio atvirose oro tuštymėse svyruoja plačiame režyje, nulemia kelio dangos pažaidų ir deformacijos mastą ir didėjimo spartą. Karštojo maišymo asfalto mišinyje esančio bitumo reikiamo kiekio ir savybių užtikrinimas nulemia nutiestos asfalto kelio dangos ilgalaikį mechaninį stiprumą ir reikiamas kelio eksploatacines savybes. Gaminant karšto maišymo asfalto mišinį transporto technologiniame įrenginyje – asfalto maišytuve, bitumo dozavimo ir komponentų sumaišymo technologiniuose procesuose sudaryti mišinio struktūros ir sąveikos ryšiai užtikrina ilgalaikį iš jo įrengtos kelio dangos stiprį, tekstūrą, lygumą, mažą pažaidų skaičių ir reologines savybes.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – asfalto maišytuve transportuojamo bitumo dozavimo sistemos ir maišyklės technologiniai parametrai ir jų įtaka karšto maišymo asfalto mišinio gamybos kokybei.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – pateikti moksliskai pagrįstus periodinio veikimo asfalto maišytuve transportuojamo bitumo dozavimo sistemos technologinius parametrus, leisiančius pagerinti karšto maišymo asfalto mišinio gamybos kokybę.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo iškelti šie uždaviniai:

1. Ištirti bituminio rišiklio klampos, efektyviojo bitumo kiekio ir oro tuštymių kiekio kaitos įtaką karšto maišymo asfalto dinaminio modulio pokyčiui.
2. Ištirti bitumo dozavimo, išpylimo į maišyklę ir maišymo technologinėse operacijose vykstančios deguonies difuzijos į bitumą, karbonilų junginių susidarymo procesus ir jų įtaką karštojo rišiklio savybių kitimui trumpalaikio senėjimo laikotarpiu.
3. Nustatyti ir susisteminti svarbiausius veiksnius, lemiančius bitumo kiekio karšto maišymo asfalto mišinio partijoje dispersijos dydį. Ištirti faktiškąsias komponentų kiekio pagamintame karšto maišymo asfalto mišinyje nuokrypių nuo darbinės mišinio formulės vertes ir jas pritaikyti

šių komponentų kiekio sklaidos leidžiamiesiems parametrams skaičiuoti.

4. Tiriant bitumo dozavimo sistemos techninį modernizavimą ir gamybos valdymo pasikeitimus nustatyti, kiek pakito bitumo kiekio karšto maišymo asfalto mišinyje nuokrypiai nuo darbinės mišinio formulės.
5. Atlikti aktyvųjį eksperimentą gamybos sąlygomis, kai skirtingų bitumo dozavimo sistemų dviem periodinio veikimo asfalto maišytuvais gaminamas karšto maišymo asfalto mišinys keičiant medžiagų maišymo trukmę ir temperatūrą, leidžiantį nustatyti šių technologinių veiksnių įtaką bitumo savybių ir asfalto mišinio Maršalo bandinių fiziniams ir mechaniniams rodikliams.

Tyrimų metodai ir įranga

Darbe taikyti šie metodai: pasyvieji ir aktyvieji eksperimentiniai tyrimai realiomis gamybos sąlygomis, ėminių tyrimo laboratorijoje, matematinės statistikos, matematinio modeliavimo metodai. Tyrimams panaudoti *Statgraphics Centurion XVI*, *SPSS 16* programiniai paketai. Panaudoti šie duomenys: laboratorinių tyrimų duomenys iš trijų akredituotų laboratorijų; dviejų asfalto maišytuvų valdymo kompiuterių duomenys. Panaudota įranga: termografinių tyrimų infraraudonųjų spindulių kamera *IR-Flexcam Pro*; nekontaktinis termometras, bitumo ir asfalto mišinio ėmikliai, ekstraktorius, sukusis garintuvas, sijotuvai ir sietų komplektas, penetrometras *Humboldt H-2510*; minkštėjimo temperatūros nustatymo (žiedo ir rutulio) prietaisai, Maršalo bandinių gamybos, svėrimo, šildymo vandenyje ir gniuždymo įrenginiai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie transporto inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Teoriniu tyrimu apskaičiuota, kad bitumo dozavimo sistemos technologiniai parametrai – bitumo dozių masės procentiniai nuokrypiai, turintys įtakos efektyviojo bitumo kiekiui ir oro tuštymėms, temperatūra, nulemianti klampą, yra reikšmingi veiksniai, turintys įtakos pagaminto karšto maišymo asfalto mišinio dinaminiam moduliui.
2. Pateiktas matematinis modelis leidžia nustatyti deguonies slėgio pasiskirstymą bėgant laikui į maišyklę krįtančiame skirtingo dydžio bitumo laše, kai įvertinama deguonies difuzija, priklausanti nuo

temperatūros ir šilumos laidumas, priklausantis nuo temperatūros, tankio ir specifinės šilumos.

3. Pateiktas bitumo kiekio, pagaminto karšto maišymo asfalto mišinio partijoje (vienos dienos arba vieno sudėties projekto), sklaidos parametro (dispersijos) modelis, kuriame atskleista atskirų veiksmų dispersijų įtaka ir sietis.
4. Įrodyta, kad šiuo metu Lietuvoje galiojantys norminiai dokumentai, reglamentuojantys karšto maišymo asfalto mišinio bitumo ir mineralinių miltelių kiekio leidžiamuosius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės, yra pakankamai liberalūs ir ne visada atitinka realias nuolat tobulinamų asfalto maišytuvų technines galimybes.
5. Aktyviau eksperimentiniu tyrimu, atliktu realiomis gamybos sąlygomis, nustatyta, kad bituminio rišiklio, esančio pagamintame karšto maišymo asfalto mišinyje, savybėms įtakos turi bitumo išpylimo iš dozatoriaus į maišyklę būdas, medžiagų temperatūra ir maišymo su karštosiomis mineralinėmis medžiagomis trukmė.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Pateiktas karšto maišymo asfalto mišinio vidinės gamybos kontrolės įvertinimo ir pagerinimo būdas, leidžiantis iš atskirų rūšių ir tipų asfalto mišinių, pagamintų kiekviename asfalto maišytuve per darbų sezoną, komponentų kiekių faktiškųjų nuokrypių nuo darbinės mišinio formulės, kurių imtys būna mažos, apskaičiuoti dėl didelės imties patikimus šių komponentų padėties ir sklaidos parametrus.
2. Pasyvieji ir aktyvieji eksperimentiniai tyrimai atlikti trijuose Lietuvoje veikiančiuose asfalto maišytuvuose realiomis gamybos sąlygomis, todėl disertacinio darbo tyrimų rezultatai, įrodantys būtinybę mažinti medžiagų temperatūrą, yra aktualūs karšto maišymo asfalto mišinio gamybos įmonėms ir juos panaudojus leidžia gamyklų personalui gerinti KMA gamybos proceso kokybę.
3. Įrodyta, kad Lietuvoje galiojančiose įrengimo taisyklėse IT ASFALTAS 08 reglamentuojami karšto maišymo asfalto mišinio bitumo ir mineralinių miltelių kiekio leidžiamieji nuokrypiai nuo darbinės mišinio formulės gali būti mažinami. Komponentų kiekio karšto maišymo asfalto mišiniuose tolerancijų patikslintas skaitines vertes naujos redakcijos įrengimo taisyklėse bus galima pateikti tik atlikus papildomus kitų modelių ASMA pagamintų mišinių tyrimus.

Ginamieji teiginiai

1. Bitumo dozavimo sistemoje vykstančių technologinių bitumo maišymo su mineralinėmis medžiagomis procesų parametrai turi stochastinį pobūdį ir įtakos bituminio rišiklio sudėčiai bei gaminamo karšto maišymo asfalto mišinio fizinėms ir mechaninėms savybėms: oro tuštymių kiekiui, pastovumui, takumui, Maršalo koeficientui ir dinaminiam moduliui.
2. Dėl oksidacijos vykstanti bitumo savybių kaita priklauso nuo bituminio rišiklio dozavimo ir išpylimo į maišyklę technologijos. Išpurškiant bitumą aukšto slėgio čiurkšle ir išpilant jį didelio debito gravitaciniu srautu į maišyklę, jo penetracija sumažėja, o minkštėjimo temperatūra padidėja nevienodai.
3. Perkaitinus mineralines medžiagas bituminio rišiklio trumpalaikiam oksidaciniam senėjimui svarbiausiu veiksniu tampa ne bitumo dozavimo ir išpylimo technologija, o su juo maišomų mineralinių medžiagų temperatūra.
4. Kai kurie šiuolaikiniai asfalto maišytuvai geba kokybiškiau gaminti karšto maišymo asfalto mišinį nei to reikalauja normos. Įrengimo taisyklėse IT ASFALTAS 08 pateiktos statistinės tolerancijos, atlikus išsamesnius tyrimus su daugiau asfalto maišytuvų ir patvirtinus šiame darbe gautas išvadas, gali būti pagrįstai mažinamos. Mažesnės tolerancijos leistų pagerinti gamybos kokybę ir geriau išnaudoti asfalto maišytuvų konstrukcines galimybes.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra išspausdinti 5 moksliniai straipsniai: 1 – citavimo indeksą turinčiame Mokslinės informacijos instituto *Thomson Reuters ISI Web of Science* tarptautinėje duomenų bazėje referuojamame periodiniame mokslo žurnale; 1 – Mokslinės informacijos instituto *Thomson Reuters ISI Web of Science* tarptautinėje duomenų bazėje referuojamame periodiniame mokslo žurnale, neturinčiame citavimo indekso; 1 – tarptautinėje duomenų bazėje *IndexCopernicus* referuojamame mokslo žurnale; 1 – Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės *ISI Proceedings* leidinyje; 1 – recenzuojamame mokslo leidinyje (konferencijų pranešimų medžiagoje).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti 3 mokslinėse konferencijose:

Tarptautinėje konferencijoje *Asphalt Pavements 2013* 2013 m., Českė Budějovice, Čekijoje;

8-joje tarptautinėje konferencijoje *Environmental Engineering* 2011 m., Vilniuje, Lietuvoje;

10-joje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2010 m., Vilniuje, Lietuvoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, publikacijų sąrašas ir 5 priedai.

Darbo apimtis – 138 puslapiai be priedų. Tekste panaudota: 86 numeruotos formulės, 53 paveikslėliai ir 16 lentelių. Rašant disertaciją vadovautasi 142 mokslinės literatūros ir kitais šaltiniais.

Padėka

Prie šios disertacijos prisidėjo daug transporto ir kelių dangų tiesybos bei bituminių mišinių gamybos sričių specialistų, mokslininkų. Nuoširdžiai dėkoju:

- Kelių ir gatvių tiesimo įmonei „Fegda“ bei jos asfalto mišinių gamybos vadovui Alfredui Meslinui ir visam gamybos personalui už suteiktas galimybes geriau pažinti bitumo dozavimo sistemas, asfalto mišinių gamybos procesus. Laboratorijos vadovui Romualdai Virbickai ir visam UAB „Fegda“ laboratorijos kolektyvui už pagalbą atliekant eksperimentinius tyrimus realios gamybos sąlygomis.
- UAB „Lemminkainen Lietuva“ laboratorijos vadovui Irmantui Truskai, gamybos vadovui Vladimirui Ščerbakui ir visam įmonės personalui už pagalbą, vertingus praktinius patarimus ir konsultacijas.

Taip pat reiškiu padėką savo mokslinio darbo vadovui prof. habil. dr. Henrikui Sivilevičiui už palaikymą visą studijų laiką ir suteiktas neįkainojamas žinias, Transporto technologinių įrenginių katedros ir viso Transporto inžinerijos fakulteto vadovams, kolegoms, disertacijos ekspertams už vertingas ir tobulėti skatinančias pastabas, naudingus patarimus. Savo šeimai, artimiesiems, kolegoms ir draugams esu dėkingas už palaikymą rengiant disertacinį darbą.

Mokslo darbų, skirtų bitumo savybių kitimo technologiniuose įrenginiuose ir asfalto dangos sluoksnyje veiksniams tirti, analizė

Bitumas yra vienas iš svarbiausių karštojo maišymo asfalto (KMA) mišinio komponentų, kuris suriša mineralines medžiagas į stiprų sudėtingos struktūros konglomeratą. Geresnės bitumo savybės užtikrina aukštesnės kokybės KMA mišinį.

Skyriuje nagrinėjami moksliniai darbai, skirti svarbiausių bitumo dozavimo sistemų technologinių parametrų ir veiksnių, turinčių įtakos bitumo savybėms, tyrimams.

1.1. Bitumo sudėties ir savybių įtaka asfalto struktūrai ir stiprumui

Bitumas yra skystis, turintis neįprastų inžinerinių savybių, kurios turi būti atidžiai kontroliuojamos, siekiant užtikrinti geras eksploatacines kelio dangų savybes (Dehouche *et al.* 2012). Viena iš svarbiausių bitumo inžinerinių ypatybių yra

tai, kad pagrindinės jo charakteristikos labai priklauso nuo temperatūros. Esant žemoms temperatūroms, rišiklis yra standus ir trapus, skystas ir takus, esant aukštomis temperatūroms, ir pusiau kietas bei plastiškas, esant vidutinėms temperatūroms. Kardinalūs bituminio rišiklio savybių pokyčiai gali turėti reikšmingos įtakos kelio dangai (Vislavičius, Sivilevičius 2013). Esant aukštai temperatūrai, kelio dangoje, kur bitumas yra per minkštas, susidaro palankios sąlygos provėžoms, įlinkiams (Jenks *et al.* 2011). Esant žemai temperatūrai KMA mišinys dėl bitumo viskoelastiškumo ir fizinio senėjimo fenomeno yra ne toks atsparus didelėms tempimo apkrovoms. Cerni *et al.* (2011) tai ištyrė nustatinėjant trijų bitumų savybes keičiant režimus: apkrovos dydį, apkrovos laiką, temperatūrą.

Iš esmės patenkinamas bitumo savybių kelio dangoje lygis gali būti užtikrintas, jei yra kontroliuojamos pagrindinės keturios rišiklio charakteristikos: reologija, kohezija, adhezija ir patvarumas. Reologinės savybės, esant konkrečiai bitumo temperatūrai, yra nustatomos, remiantis jo chemine sudėtimi ir chemine struktūra, kurią apibūdina fizinis molekulių išsidėstymas medžiagos struktūroje. Nustatyta, kad cheminės sudėties pokytis nulemia ir reologinius pokyčius (Read, Whiteoak 2003). Daug dėmesio reologinių savybių kitimui aukštose temperatūrose savo tyrimuose skyrė Marasteanu (2005). Nemodifikuotų ir modifikuotų bitumų reologinėms savybėms modeliuoti taikomi įvairūs matematiniai modeliai ir lygtys, plačiausiai iš jų yra naudojamas apibendrintas modifikuotas sigmoidinis modelis (*Generalised Modified Sigmoidal Model*) (Yusoff *et al.* 2013, Yusoff *et al.* 2011).

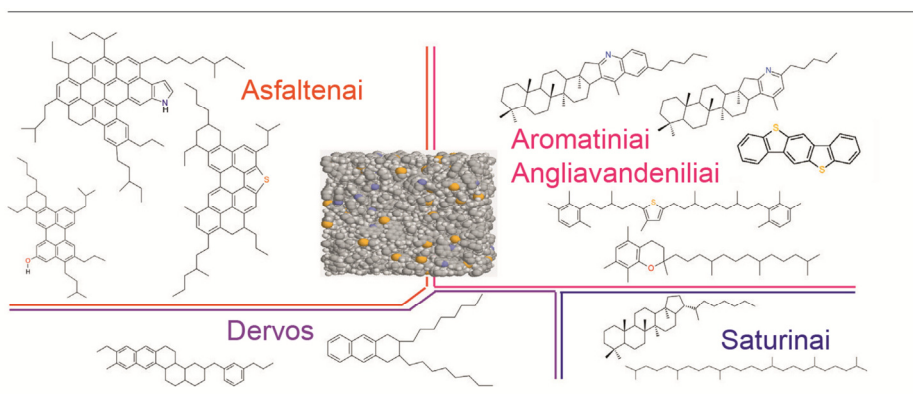
Visų bitumų cheminė sudėtis yra panaši, yra tik nežymių skirtumų, priklausančių nuo žalios naftos gavybos vietos ir rafinavimo bei maišymo procesų ypatumų. Bitumai apibūdinami kaip sudėtingi mišiniai, kuriuose yra daug ir įvairių santykinai didelės molekulinės masės cheminių junginių (Печеный 1990).

Bitumas yra labai kompleksiškos cheminės (Redelius 2009) sudėties. Vykdamas eksperimentinius tyrimus, jis yra skiriamas į dvi pagrindines frakcijas – asfaltenus ir maltenus. Maltenai skaidomi į saturinus, aromatinis angliavandenilius ir dervas. Keturios frakcinės grupės nėra visiškai aiškiai apibrėžiamos ir tarpusavyje persidengia, tačiau pagal šių grupių tarpusavio santykį galima nustatyti ir kontroliuoti bitumo reologines savybes pagal jo cheminę sudėtį. Bitumo cheminės frakcijos skirtinguose šaltiniuose aprašomos nevienodai. Klasikinis metodas bitumo separacijai (atskyrimui) į skirtingas funkcines grupes yra pagal jų tirpumą serijoje organinių tirpiklių papildytas chromatografinė analizė (Korbeto metodas). Šiuo metodu tipinis bituminis rišiklis gali būti išskaidytas į tris reprezentatyvias funkcines (koloidines) grupes: asfaltenus, dervas (kituose šaltiniuose gali būti įvardijami kaip nafteniniai angliavandeniliai, kitaip naftenai (angl. *naphthene aromatics*) arba poliniai angliavandeniliai (angl. *polar aromatics*)) ir saturinus (angl. *saturates*) (taip pat gali būti įvardijami kaip sotieji ang-

liavandeniliai arba alyvos). Dervos ir saturinai kartu vadinami maltenais arba petrolenais (angl. *maltenes* / *petrolenes*) (Tongyan *et al.* 2012). Nustatyta, kad koloidinis indeksas, skaičiuojamas iš keturių bitumo cheminių frakcijų santykių, turi tam tikrą koreliaciją su jo rišiklio savybėmis (Loeber *et al.* 1998). Tai leido teigti, kad koloidinė chemija taip pat siejasi ir su bitumo senėjimo savybėmis (Feng *et al.* 2012).

Asfaltenai bitume yra juodos amorfinės kietosios dalelės, kurių sudėtyje be anglies ir vandenilio dar yra azoto, sieros ir deguonies. Taip pat randami tokie mikroelementai, kaip nikelis, vanadis. Asfaltenai bitume sudaro nuo 5 iki 31 % masės. Jie yra labai poliarinės aromatinės medžiagos, turinčios didelę molekulinę masę.

Naujos kartos cheminės kompozicijos modelis (Li, Greenfield 2014) (1.1 pav.) leidžia atlikti molekulinės simuliacijos tam, kad būtų galima geriau suprasti bitumo cheminių, reologinių ir mechaninių savybių kitimą. Čia rišiklis skaidomas į keturias koloidines grupes: be asfaltenų ir saturinų prisideda naftėnai ir poliniai angliavandeniliai. Kitaip nei anksčiau, pasirenkamos didesnės molekulinės masės molekulės nei ankstesnėse bitumo sistemose ir rezultatai artimesni eksperimentiniams (Li, Greenfield 2014).



1.1 pav. Bitumo cheminių frakcijų kompozicija molekuliniam modeliavimui (Li, Greenfield 2014)

Fig. 1.1. Chemical compositions of bitumen for molecular simulations (Li, Greenfield 2014)

Kiekviena iš keturių bitumo cheminių frakcijų turi skirtingą temperatūrinį jautrumą. Visų šių cheminių frakcijų formavimasis skirtingai koreliuoja keičiantis rišiklio temperatūrai. Aromatinių angliavandenilių ir asfaltenų egzistavimas gali sumažinti temperatūrinį jautrumą, o saturinai ir dervos gali turėti neigiamą poveikį temperatūriniam jautrumui (Yongsheng 2010).

Kalbant apie koreliacijos laipsnį, dervos rodo artimesnį ryšį su temperatūriniu bitumo jautrumu nei asfaltenai ir aromatiniai angliavandeniliai. Saturinų ryšys su temperatūriniu jautrumu yra palyginti silpnas (Firoozifar *et al.* 2011, Liang *et al.* 2010).

Atlikus pagreitiną sendinimo apdorojimą, tiriamas cheminių, fizinių mechaninių ir reologinių savybių pokytis, paremtas savybių lyginimu prieš testavimą ir po jo (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Bitumo savybių testai po pagreitinto sendinimo (Fernández-Gómez 2013)

Table 1.1. Tests of bitumen characteristics after accelerated ageing (Fernández-Gómez 2013)

Savybės	Testas	Bandinys	Vertinamas charakteristika	Periodas
Fizinės	Penetracija	Bitumas (išekstrahuotas iš mišinio)	Senėjimas	TLS ir ILS
	Tąsumas (elastingumas)		–	TLS ir ILS
	Masės praradimas		Lakiųjų frakcijų garavimas	TLS
Cheminės	Funkcinės frakcijos (asfaltenai, dervos, saturinai, arom. angliavandeniliai)	Bitumas (išekstrahuotas iš mišinio)	Molekulinė struktūra	TLS ir ILS
	Furjė transformuotų infraraudonųjų spindulių spektroskopija – sugertis / pralaidumas (<i>Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)</i>)		Molekulinė sąveika – oksidacija	TLS ir ILS
Mechaninės / dinaminės	Dinaminis modulis	Asfalto mišinys (laboratoriniai mėginiai)	Savybė	TLS ir ILS
	Tamprumo (elastingumo) modulis		–	–
	Nuovargis		–	ILS
	Vėžėtumas		–	ILS
	Sluoksniavimasis		–	ILS
	Trūkinėjimas		–	ILS
Reologinės	Klampa	Bitumas (išekstrahuotas iš mišinio)	Senėjimas, sferinio senėjimo savybė	TLS ir ILS
	Kompleksinis modulis		–	TLS ir ILS
	Fazės kampas			TLS ir ILS

Fizinis testavimas ir funkcinių frakcijų testas leidžia nustatyti senėjimo poveikį. Penetracija ir tūsumas nors ir neapibūdina paties reiškinių, tačiau indikuoja sukietėjimo laipsnį. Cheminiai tyrimai paaikškina molekulinės struktūros pokyčius ir tarpmolekulinių ryšių pakitimą vykstant senėjimui (Fernández-Gómez 2013). Be to, taikant cheminės sudėties matematinius modelius, galima nustatyti bitumo viskoelastinių savybių kitimą, tai tyrė Behzadfar, Hatzikiriakos (2013) ir Greenfield (2011).

1.2. Bitumo savybių kaita ir jos priežastys

Nors bitumo faktiškasis kiekis gaminamame KMA mišinyje atitinka DMF reikalavimus ir neviršija tolerancijų, dėl senėjimo pasikeitus jo cheminei sudėčiai, pablogėja ir savybės. Васьковский, Порадек (2005), Порадек (2007) tyrimais įrodė, kad bitumo savybės pradeda kisti jį laikant talpyklose ir kaitinant. Bitumas senėja ne tik KMA gamybos, laikymo, transportavimo, klojimo technologiniuose procesuose, bet ir iš jo įrengtos kelio dangos ilgalaikės eksploatacijos metu (Sofwat 2005). Bituminiuose rišikliuose bei asfaltbetonio sluoksnyje nenutrūksta vyksta neigiami senėjimo procesai (Radziszewski 2007). Senėjimo procesus laboratorijoje modeliavo Huang *et al.* (1996). Nepasenusio ir pasenusio bituminio rišiklio viskoelastinės savybės labai skiriasi (Masad *et al.* 2008).

Bitumo cheminė struktūra, o dėl to ir jo fizinės bei reologinės savybės, blogėja rišiklį laikant talpyklose, transportuojant vamzdiniais, dozuojant į maišyklę ir maišant su mineralinėmis medžiagomis, o tai yra reikšmingas veiksnys, turintis įtakos KMA mišinio kokybei. Žalingiausiems veiksniams nustatyti simuliuojant laikymo talpyklose trukmę, laikymo temperatūra, tarša ir rišiklio modifikavimu buvo nustatyti skirtingi dinaminio šlyties reometro (*Dynamic shear rheometer* (DSR)) kokybės parametrai $G^*/\sin\delta$ po sendinimo naudojant besisukančios plonos plėvelės krosnį (*rolling thin film oven* (RTFO)) (Shalaby 2002; Mercado *et al.* 2005). Taikant tą patį 163 °C temperatūroje atliekamą laboratorinį tyrimų metodą, buvo nustatyta, kad trumpalaikio senėjimo (TLS) mastas gamybos metu labiausiai priklauso nuo bituminio rišiklio kilmės ir senėjimo laiko. Nustatyta, kad bitumo klampa, minkštėjimo temperatūra ir kietumas didėjo, o penetracija mažėjo (ArafatYero 2012). Klampos kitimą atsižvelgiant į temperatūrą ir slėgį tyrė Puttagunata *et al.* (1993). Daug mokslo darbų yra skiriama savybių išlaikymo tyrimams. Azari ir Mohseni (2013) savo paskelbtais tyrimais taip pat nustatė, kad mišinio mechaninių savybių kitimas gali būti nulemtas trumpalaikio ir ilgalaikio bitumo senėjimo.

Bitumas, kaip ir daugelis organinių medžiagų, yra veikiamas deguonies, ultravioletinių spindulių ir temperatūros poveikių (Zhang *et al.* 2011; Huang, Zeng 2007). Šie išoriniai veiksniai kietina bitumą (Radziszewski *et al.* 2003), dėl to mažėja jo penetracija (Pen_{25}), didėja minkštėjimo temperatūra (T_{sp}) ir dažniausiai didėja

penetracijos indeksas (I_p). Pfeiffer ir Van Doormaal (Read, Whiteoak 2003) 1936 m. sukūrė formulę temperatūriniam bitumo jautrumui apskaičiuoti. Gaunama reikšmė svyruoja apie nulį, dėl šios priežasties parametras buvo pavadintas penetracijos indeksu (I_p) (Galooyak *et al.* 2010):

$$I_p = \frac{1952 - 500 \cdot \log(\text{Pen}_{25}) - T_{sp}}{50 \cdot \log(\text{Pen}_{25}) - T_{sp} - 120}, \quad (1.1)$$

čia Pen_{25} – penetracija (adatos įsmigis) esant 25 °C temperatūrai, dmm; T_{sp} – minkštėjimo temperatūra, °C.

Penetracijos indeksas rodo bituminio rišiklio temperatūrinį jautrumą. Neigiamos (apie -3) I_p reikšmės rodo, kad bitumas yra labai jautrus temperatūrai, teigiamos (didelės) I_p reikšmės (apie +7) rodo mažą temperatūrinį jautrumą, kurį dažniausiai turi suputotas bitumas. Tokios pačios penetracijos bituminis rišiklis yra tuo kietesnis, kuo didesnis jo I_p . I_p didėjant nuo -0,5 iki 2, bitumo standumas dėl didėjančios klampos didėja 15 kartų. Nustatyta, kad penetracijos indeksas koreliuoja su kelio asfalto dangos provėžų gyliu. Atlikus tyrimus su bitumu iš 8 metus eksploatuotos asfalto dangos nustatyta, kad didesnis I_p parodė geresnį atsparumą provėžų susidarymui. I_p kintant nuo -2 iki 2, provėžos gylis mažėjo nuo 11 mm iki 4 mm. Penetracijos indekso sistemos naudojimo trūkumas yra tai, kad jis bitumą charakterizuoja tik nedidelėse temperatūros ribose, o ekstremumuose I_p gali būti klaidinantis (Haddadi *et al.* 2008). Patys svarbiausi bitumo senėjimo mechanizmai yra: oksidacija, lakusis garavimas (*volatilisation*), sferinis arba fizinis kietėjimas (*steric or physical factors*), eksudacinis kietėjimas (*exudative hardening*). Senėjimas dėl oksidacijos yra svarbiausias veiksnys, lyginant su visais kitais senėjimui įtakos turinčiais veiksniais. (Petersen, Glaser 2011; Morian *et al.* 2011). Oksidacijos intensyvumas daugiausia priklauso nuo temperatūros (De Moraes *et al.* 2010), taip pat nuo sąveikos su deguonimi trukmės, intensyvumo ir bitumo plėvelės, dengiančios mineralinių medžiagų grūdelius, storio (Herrington 2012). Kaitinimo trukmė ir temperatūra turi reikšmingos įtakos tokioms bitumo reologinėms savybėms, kaip klampa (Filippova *et al.* 2000) ar kompleksinis modulis (Dessouky *et al.* 2011). Tran *et al.* (2010) ir Huh, Robertson (1996) tyrė ir lygino bitumo kritinės aukštos temperatūros KMA mišinio savybės prognozavimo modelius.

Žymiausia senėjimo įtaka pastebima KMA mišinio maišymo proceso metu, mažiau senėjimas pastebimas vykstant mišinio saugojimui bunkeriuose ir transportuojant į klojimo vietą (Oliver 1989). Šie trumpalaikio senėjimo (TLS) laikotarpiai plačiai tiriama taikant įvairius metodus. Populiariausi riedančios (besisukančios) plonos plėvelės krosnelėje testas (*rolling thin film oven test (RTFOT)*) ir trumpalaikio senėjimo krosnelėje (*short-term oven aging (STOA)*) testas buvo palyginti taikant gelio prasiskverbimo chromatografijos (*gel permeation chromatography (GPC)*) metodą (Lee *et al.* 2008). Kaip bebūtų, senėjimas vyksta net

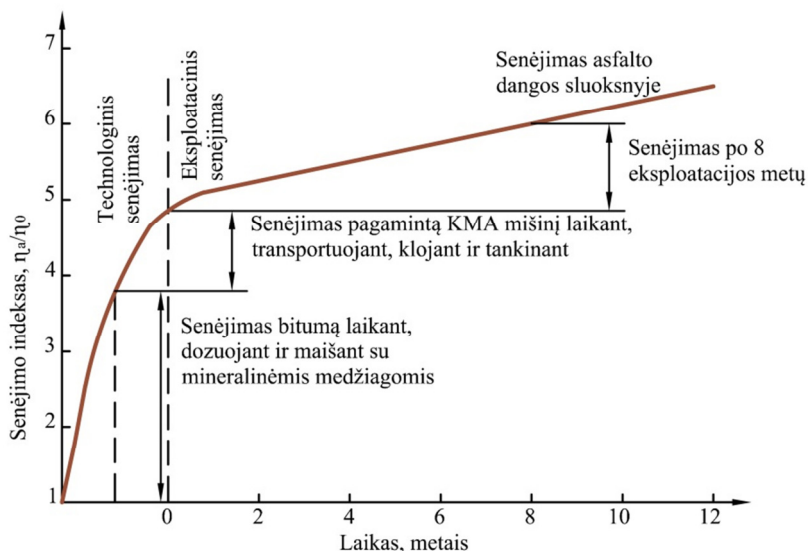
ir prasidėjus jau patiestos kelio dangos eksploatavimo laikotarpiui ir tęsiasi, kol pasiekama ribinė vertė. Tai vadinama ilgalaikiu senėjimu (ILS).

1.2 paveiksle matomas bitumo senėjimo indekso kitimas po mišinio sumaišymo, laikymo bunkeryje, transportavimo ir asfalto kelio dangos eksploatavimo laikotarpiu (Read, Whiteoak 2003; Apeagyei 2011).

Struktūros sudarymas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos bitumo reologinėms charakteristikoms. Todėl jo struktūros žinojimas labai svarbus vertinant eksploatacinę elgseną. Bitumų struktūrinė charakteristika daugelyje darbų apibūdinama (išreiškiama) dispersiškumo rodikliu D , rodančiu komponentų (sudedamųjų dalių) procentinį masės santykį (Колбановская, Михайлов 1973):

$$D = \frac{S + CA}{A + SA}, \quad (1.2)$$

čia S – dervos; CA – cikliniai angliavandeniliai; A – asfaltenai; SA – sotieji angliavandeniliai (saturinai). Jei yra asfaltenų ir sočiųjų junginių perteklius, tai dispersiškumo rodiklis žemas (0,49–0,55), bitumas blogai disperguoja. Jei dervos ir cikliniai angliavandeniliai dominuoja, dispersiškumo rodiklio reikšmė yra didelė, bitumas pasižymi maža vidine struktūra.



1.2 pav. Bitumo senėjimas jo dozavimo, KMA mišinio maišymo, saugojimo, transportavimo ir kelio dangos asfalto eksploatacijos metu (Read, Whiteoak 2003)

Fig. 1.2. Ageing of bitumen during mixing, subsequently during storage, transportation and application in service (Read, Whiteoak 2003)

Bitumas dėl sudėties ir struktūros sudėtingumo tik pastaraisiais metais, taikant tikslesnius fizinės ir cheminės analizės metodus, vis išsamiau ištiriamas. Įvairių medžiagų termooksidacinio senėjimo procesai aprašomi cheminių reakcijų kinetikos dėsniais. Šių procesų greičio lygtis gali būti pateikiama taip:

$$\frac{dc}{dt} = k \cdot c^u, \quad (1.3)$$

čia c – τ laikotarpį sendinimo veikiamos medžiagos koncentracija; k – greičio konstanta; u – reakcijos eilė. Lygtis tinka ir procesams, apibūdinamiems bet kurio parametro, susieto su medžiagos koncentracijos cheminėje reakcijoje, kitimu. Toks parametras gali būti bitumų pleišėjimų temperatūra T_p^B (Печёный 1990). Dėl to, kad oksidacijos procesų, vykstančių bitumo angliavandeniliuose ir deruose, rezultatas yra susidarę stambiamolekuliniai komponentai, bitumų cheminės sudėties kitimo sąlyginiu matu gali būti imamas padidėjęs juose asfaltenu kieki. Taikant *Arrhenius* (1887) lygtį:

$$v = k \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1.4)$$

arba

$$\ln v = \ln k - \frac{E}{RT}, \quad (1.5)$$

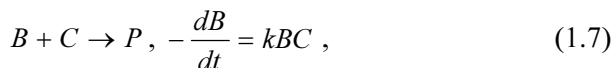
čia v – cheminės reakcijos greitis; k – reakcijos greičio konstanta; E – aktyvacijos sąlyginė energija; R – universalioji dujų pastovioji; T – absoliučioji temperatūra; e – natūrinių logaritmų pagrindas ($e = 2,3$). Pertvarkant į dešimtainius logaritmus:

$$\log_{10} v = B - \frac{A}{T}, \quad (1.6)$$

čia $B = 2,3 \ln k$, $E = AR$ asfaltenu susidarymo greičiui, gautam dviejose temperatūrose, buvo galima apskaičiuoti *Arrhenius* lygties konstantas ir asfaltenu susidarymo greitį kitose temperatūrose.

Modeliuojant bitumo oksidacijos – difuzijos procesus reikia žinoti (Herrington 2012):

- reakcijos rodiklį (lygio) bitumo ir deguonies reakcijai;
- deguonies bitume difuzijos koeficientą ir jo priklausomybę nuo klampos (Ghaderi *et al.* 2011; Karlsson *et al.* 2007);
- prisotinto deguonies (*saturation oxygen*) koncentraciją bitume;
- bitumo klampos priklausomybę nuo sureagavusio deguonies kiekio (Herrington 2005).

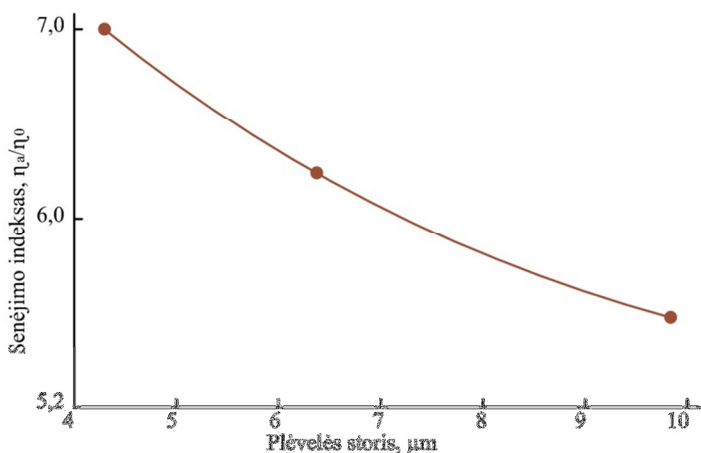


čia k – rodiklio (lygio) konstanta ($\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$); C – deguonies koncentracija (mol/l).

Bitumo senėjimo proceso rezultatą galima vertinti senėjimo indeksu I_a (Ap-eageyi 2011). Senėjimo indeksu I_a skaičiavimai yra grindžiami vieno taško ma-tavimu ir yra labai paplitusi procedūra, naudojama senėjimui nustatyti ir skirtin-giems bitumams reitinguoti. Senėjimo indeksas apibrėžiamas kaip prieš senėjį-mą buvusio ir jau senėjimo paveikto rišiklių konkrečios savybės santykis. Tiriant pagal klampą toks santykis būtų:

$$I_a = \frac{\eta_a}{\eta_0}. \quad (1.8)$$

Kai bitumas yra plonose plėvelėse arba lašų būsenos, vyksta aktyviausi ok-sidacijos ir lakiųjų frakcijų garavimo procesai. Nustatyta, kad mažėjant rišiklio plėvelės storiui, gerokai išauga jo klampa. Oksidacijos įtaką, priklausančią nuo plėvelės storio, galima aprašyti jau minėtu senėjimo indeksu, t. y. skaičiuojant pasenusio bitumo klampos η_a ir šviežio bitumo klampos η_0 santykį. Lubbers H. E. 1985 m. nustatė, kad jei plėvelės, gaubiančios mineralinių medžiagų grūde-lius, storis didėja nuo $4 \mu\text{m}$ iki $10 \mu\text{m}$, tai I_a mažėja nuo 7,0 iki 5,5 (1.3 pav.) (Read, Whiteoak 2003).



1.3 pav. Bitumo plėvelės storio įtaka senėjimo indeksui I_a (Read, Whiteoak 2003)

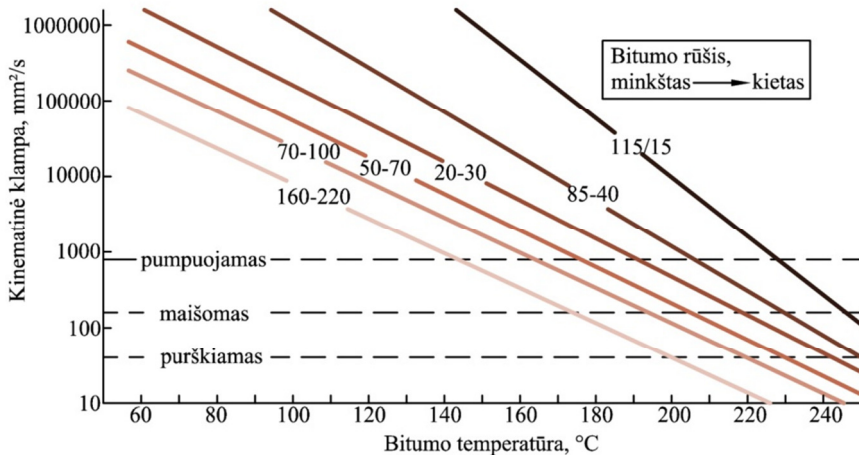
Fig. 1.3. Effect of bitumen thickness on ageing index I_a (Read, Whiteoak 2003)

Bituminio rišiklio fizinės savybės labai priklauso nuo temperatūros (Ander-son 2011). Klampa yra fundamentinė savybė, kuri apibūdina skysčio atsparumą

deformacijoms ar tekėjimui, remiantis to skysčio molekulių vidine trintimi. Vykstant asfalto mišinio gamybai ir dangos sutankinimui, bitumas turi būti optimalios klampos. Jei bitumo klampa maišant asfalto mišinį bus per didelė, mineralinės medžiagos nebus tinkamai apgaubtos rišikliu, o jei klampa bus per maža – bitumas padengs grūdelius, tačiau gali nudrenuoti mišinio saugojimo ar transportavimo metu. Patenkinamam mineralinių medžiagų apgaubimui bitumo klampa turi būti apie 0,2 Pa·s. Dinaminė klampa turi įtakos ir KMA mišinio dinaminiam moduliu E : didėjant klampai, modulis didėja (Bari, Witczak 1996). Yra įrodyta, kad dinaminis modulis E gali būti naudojamas kaip kriterijus kelio asfalto dangos atsparumo provėžoms susidaryti (Goh *et al.* 2011).

Dinaminė klampa yra pagrindinis veiksnys, kurį reikia vertinti pumpuojant, transportuojant ir saugant bitumą. Klampa priklauso nuo rišiklio temperatūros, jo rūšies ir markės. 1.4 paveiksle parodyti keturių markių kelių bitumų ir dviejų markių oksiduotų bitumų temperatūrų ir klampų santykiai. Taip pat yra trys linijos, apibrėžiančios, kokiose temperatūrose išlieka pumpavimo, maišymo ir purškimo galimybės (Sorensen, Wichert 2009; Yero, Hainin 2012).

Bitumui pumpuoti optimali yra aukštesnė temperatūra ir žemesnė klampa, o esant aukštesnei klampai ir žemesnei temperatūrai, siurbimo našumas mažėja labai sparčiai. Dėl šių priežasčių klampos kontrolė, keičiant temperatūrą, yra esminė aplinkybė vykdant visas transportavimo operacijas.



1.4 pav. Kinematinė klampa kaip kelių bitumų temperatūros funkcija. Pumpuojamo, maišomo ir purškiamo bitumo temperatūra (Sorensen, Wichert 2009)

Fig. 1.4. Kinematic viscosity as a function of temperature for paving grade bitumen. Design pumpability, mixability and sprayability (Sorensen, Wichert 2009)

Paviršių aktyvinančios medžiagos (PAV), veikdamos bitumo su mineralinių medžiagų paviršiumi molekulinės tarpusavio sąveikos procesus, palengvina bi-

tumo suvilgymą ir pasklidimą mineraliniu paviršiumi. Šie du procesai yra būtinosios išankstinės abiejų medžiagų sukibimo sąlygos. Vienas iš būdų, leidžiančių pagerinti bitumo suvilgymą ir pasklidimą mineralinės medžiagos paviršiumi, yra jo klampos sumažinimas didinant temperatūrą arba skystinant (atskiedžiant) jį plastifikatoriais. Sumažinus temperatūrą iki 100 °C, sulėtėja ir staigiai sumažėja mineralinės dispersinės medžiagos paviršiaus padengimas (apgaubimas, aptraukimas) bitumu.

Bitumo kietėjimas jį purškiant arba asfalto kietėjimas (standumo didėjimas) atsiranda dėl dozavimo ir maišymo metu vykstančio TLS (Said 2005; Lund, Wilson 1984). Visos mineralinės medžiagos yra apgaubiamos plonu 5 ir 15 µm bitumo sluoksniu (plėvele). Taigi, kada bitumas yra išpurškiamas į maišyklę mažų lašelių būvio ir maišomas su įkaitintomis mineralinėmis medžiagomis, susidaro idealios sąlygos sparčiai oksidacijai ir lakiųjų frakcijų garavimui (Portillo, Cebon 2013; Jemison *et al.* 1991; Trumbore 1999).

Bitumą maišant su mineralinėmis medžiagomis maišyklėje, jo penetracija sumažėja iki 30 %. Oksidacijos mastas priklauso nuo maišymo trukmės, mineralinių medžiagų ir bitumo temperatūrų, lašų dydžio ir plėvelių storio, antioksidacinių priedų įtakos, BDS veikimo ir bitumo išpylimo į maišyklę technologinių parametrų (Han *et al.* 2011). Senėjimo įtakos minimizavimas galimas tik atidžiai kontroliuojant visus šiuos veiksnus. Temperatūros kontrolė yra esminė (kritinė) sąlyga. Dėl senėjimo bitumo plėvelėse atsirandanti silpnėjimą, pasitelkiant laboratorinius tiesioginių įtempių testus įvairiomis sąlygomis, tyrė Poulikakos *et al.* (2012). Atliekant eksperimentą ir tiriant bitumą iš talpyklos prieš KMA mišinio gamybą, išekstrahuotą iš ką tik pagaminto KMA mišinio, išekstrahuotą iš pakloto nesutankinto KMA mišinio ir išekstrahuotą iš paklotos ir sutankintos kelio asfalto dangos buvo stebimas karštojo rišiklio savybių kitimas natūraliai senstant (vykstant trumpalaikiam ir ilgalaikiam senėjimui) (Behera *et al.* 2013). Gauti rezultatai parodė, kad bitumo penetracija per laikotarpį, kada mišinys buvo pagamintas, paklotos ir sutankintos, nukrito 23 %, o minkštėjimo temperatūra padidėjo 9 %.

Prapaitrakul, Han (2009) sukūrė bituminio rišiklio deguonies transporto modelį kelio dangoje veikiant ILS. Kelio dangos ar pagaminto, bet dar nepakloto KMA mišinio modeliai yra gerokai paprastesni nei KMA mišinio gamybos metu vykstančio TLS modeliai, kur procesas ne statinis, kaip kelio dangoje, o dinaminis. Be to, prisideda tokie modelio komponentai, kaip maišymo trukmė, medžiagų ir maišyklės temperatūra (ir ją sudarančios mineralinių miltelių, savųjų dulkių arba mineralinio dulquio, esančio ASMA rinktuvuose, karštųjų baigiamojo dozavimo frakcijų, bitumo, priedų ir maišyklės sienelių bei oro temperatūros). Kuriant tokį modelį, taip pat reiktų įvertinti medžiagų maišymosi parametrus, medžiagų (ne)homogeniškumą. Iki šiol mokslinėje literatūroje nepavyko rasti visa

tai apimančio išpilamo iš dozatoriaus bitumo TLS ir maišyklėje vykstančio senėjimo proceso modelio, o ILS modeliai pateikiami gana plačiai.

Bitumo TLS įtakai nustatyti Shahin (1977) sukūrė empirinį ryšį. Šis ryšys apibūdinamas penetracijos ir minkštėjimo temperatūros pokyčiu kaip laiko funkcija:

$$\begin{aligned} Pen(t) = & -48,258 - 2,561 \cdot \sqrt{t} + 0,1438 \cdot Pen(0) - 8,466 \cdot V_v \cdot X(t) + \\ & + 1,363 \cdot TFOT + 0,9225 \cdot Pen(0) \cdot X(t), \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$T_{R\&B}(t) = 7,826 + 1757 \cdot \sqrt{t} + 1,585 \cdot T_{R\&B}(0) - 0,516 \cdot TFOT, \quad (1.10)$$

čia t yra laikas mėnesiais, kurį bitumas buvo kelio dangoje; $Pen(0)$ ir $Pen(t)$ yra penetracija 25 °C atitinkamai šviežio ir pasenusio bitumo; $T_{R\&B}(0)$ ir $T_{R\&B}(t)$ yra minkštėjimo temperatūra °C atitinkamai šviežio ir pasenusio bitumo; $TFOT$ (*thin film oven test*) – plonos plėvelės deginimo krosnelėje testu nustatytas šviežio bitumo (pradinės) penetracijos procentas; $X(t) = (1/\sqrt{t} + 1)$ ir V_v yra oro tuštymių kiekis procentais asfalto mišinyje.

Kitoje studijoje (Dauzats *et al.* 1988), paremtoje 10 metų tyrimais su bitumu, išekstrahuotu iš asfaltbetonio kelio dangų Prancūzijoje, po 10 metų buvo atliktos korekcijos ir pateiktos patobulintos lygtys:

$$\begin{aligned} Pen(t) = & -11,9925 - 1,2578 \cdot \sqrt{t} + 0,3322 \cdot Pen(0) - 2,9965 \cdot V_v \cdot X(t) + \\ & + 0,765 \cdot Pen(0) \cdot X(t), \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$T_{R\&B}(t) = 64,448 + 1,5755 \cdot \sqrt{t} - 0,2531 \cdot Pen(0) + 0,5518 \cdot V_v. \quad (1.12)$$

Senėjimas turi žymią įtaką bitumo cheminėms ir reologinėms savybėms (Siddiqui 2010). Kaip bebūtų, cheminiai ir reologiniai pokyčiai nesuderinami, todėl bitumo jautrumas senėjimui turi būti klasifikuojamas skirtingai, kada taikomi skirtingi vertinimo metodai (Lu, Isacsson 2002).

Siekiant kiek galima labiau sumažinti bitumo savybių pablogėjimą ir taip pagerinti KMA mišinio savybes, naudojami bitumo priedai: antioksidantai (Apéagyei 2011), modifikatoriai (Haddadi *et al.* 2008), adheziją didinantys priedai. Įrodyta, kad bitumo priemaišų, tokių kaip siera, naudojimas taip pat padeda stabdyti oksidacinius procesus (Al-Dobouni *et al.* 2008). Viena iš pagrindinių bitumo modifikatorių funkcijų yra kelio asfalto dangos atsparumo liekamosioms deformacijoms didinimas esant aukštai dangos temperatūrai tuo pačiu išlaikant geras savybes ir kitose temperatūrose (Fuentes-Auden *et al.* 2012). Sumažinti reologinių charakteristikų blogėjimą galima panaudojant anglies nanodaleles. Tyrimai rodo, kad įdėjus anglies nanodalelių 0,5, 1,0 arba 1,5 % nuo bendros šviežio rišiklio masės, gaunama teigiama įtaka kompleksiniam moduliui G^* ,

bitumo savybėms, tuo pačiu ir atsparumui provėžų susidarymui yra aiškiai matoma (Eddhahak-Ouni *et al.* 2012, Xiao *et al.* 2011). Kaip priedas, mažinantis bitumo savybių blogėjimą, plačiai naudojamas ir kopolimeras etileno vinilacetatas (EVA) (Haddadi *et al.* 2008).

Tyrimais (Nien *et al.* 2008; Dogan, Bayramli 2009; Topal *et al.* 2011) įrodyta, kad įvairių polimerinių priedų naudojimas, siekiant pagerinti mišinio savybės, yra pagrįstas ir duoda teigiamų rezultatų (Cerreau *et al.* 2000). Lietuvoje techninius reikalavimus automobilių kelių bitumams ir polimerais modifikuotiems bitumams reglamentuoja aprašas TRA BITUMAS 08 (2008). Rišiklių polimerinis modifikavimas vis dažniau tampa norma projektuojant optimalių savybių mišinius kelio asfalto dangoms. Pagal polimerais modifikuoto bitumo (PMB) sunaudojimą pirmąją Jungtinės Amerikos Valstijos, Kanada, didžiosios Europos šalis (Yildirim 2007). Styreno-Butano-Styreno (SBS) triblokis kopolimeras dažnai naudojamas bitumo fizinėms, mechaninėms ir reologinėms savybėms gerinti (Slowik 2012).

Tipinio KMA mišinio tūrį sudaro apie 85 % mineralinių medžiagų, 10 % bitumo ir 5 % oro tuštymių. Skaldos ir mastikos asfaltas (SMA) susideda iš skaldos, smėlio, mineralinių miltelių, bituminio rišiklio ir rišiklį stabilizuojančio priedo. Skirtingi rišikliai turi skirtingą įtaką SMA savybėms (Al-Hadidy, Tan 2011). Skaldos grūdėliai susikabina ir suformuoja vadinamąjį „akmens skeletą“, o mastika užpildo tarpus tarp skaldos grūdelių. Bitumas, skirtas SMA mišiniams, dažniausiai modifikuojamas stabilizuojančiais priedais (polimerais, antioksidaciniais priedais, celiuliozės pluoštu). Dėl „akmens skeleto“ SMA mišiniai užtikrina labai stabilų, provėžų susidarymui ir dėvėjimuisi atsparų kelio dangos sluoksnį, dažniausiai naudojamą didelių apkrovų veikiamiems keliams įrengti (Lavin 2003).

Adhezijos mechanizmas tarp bitumo ir mineralinių medžiagų yra kelio dangos ilgaamžiškumo sąlyga. Esminė bitumo funkcija yra mineralinių medžiagų surišimas tarpusavyje ir ryšio su paviršiumi užtikrinimas (Boulangé, Sterczynski 2012). Keletas parametrų turi įtakos šiai adhezijai: mineralinių medžiagų aktyumas ir šiurkštumas, drėgmė tarp bitumo ir kitų medžiagų, cheminė rišiklio sudėtis ir struktūra jų tarpusavio ryšiuose (Bhasin, Little 2009; Horgnies *et al.* 2011). Gaminant mišinius su naudoto asfalto granulėmis (NAG), gamybos metu maišosi senas ir naujas bitumai. Siekiant išlaikyti mechanines ir fizines regeneruoto asfalto mišinio savybes, reikia atsižvelgti į NAG kiekį, homogeniškumą, seno ir naujo bitumų marke, jų penetraciją, šviežio bitumo kiekį (Čygas *et al.* 2011; Baptista *et al.* 2013).

1.3. Reikiamo bituminio rišiklio kiekio asfalto mišinyje užtikrinimas

Nuolat didėjant sunkiųjų automobilių skaičiui ir ašies apkrovai Lietuvos keliuose, atsiranda ir toliau plėtojasi asfalto dangų liekamosios deformacijos (Junevičius, Bogdevičius 2009; Sivilevičius, Šukevičius 2007, Beljatynskij *et al.* 2009), bloginančios važiavimo sąlygas (Vansauskas, Bogdevičius 2009). Dėl nepakankamo dangos stiprumo, nulemta ne tik padidėjusio viena vieta važiavusių ašių skaičiaus bei jų svorio, bet ir asfalto savybių pokyčių, atsiranda provėžų, bangų, slinkčių ir išdaužų. Netolygiai paskirstytos į transporto priemonės ašis apkrovos skirtingai veikia kelio dangą. Kelio asfalto dangos sluoksnių tarpusavio ryšys taip pat turi įtakos kelio stiprumui ir ilgalaikiškumui (Vaitkus *et al.* 2012). Atsparumas provėžų susidarymui tiesiogiai priklauso ir nuo bitumo savybių. Tai įrodyta nustačius, kad bitumo atsparumas šlyčiai esant nedideliems įtempiams yra savybė, leidžianti prognozuoti kelio asfalto dangos atsparumą provėžų susidarymui (Choi 2011). Kelio dangos nelygumai dar labiau išbalansuoja apkrovas į važiuojančios transporto priemonės ašis (Sriramula *et al.* 2007). Atliekami įvairūs tyrimai ir eksperimentai stengiantis rasti naujus atsparesnius ašinėms apkrovoms KMA mišinius, iš kurių nutiestos asfalto kelio dangos bus ilgaamžiškesnės (Čygas *et al.* 2008). Taip pat tyrimais siekiama surasti naujų nuoseklių ir patikimų metodų automobilių kelių infrastruktūros poveikiui vertinti transporto sąnaudų pasikeitimo požiūriu (Bazaras, Micevičienė 2010).

Dažnai asfalto dangos plastinės deformacijos ir ankstyvoji iirtis būna nulemtos per didelio ar per mažo bitumo kiekio, taip pat netinkamos markės naujame asfalto mišinyje panaudoto ir pasenusio bitumo (Witczak, Foncesa 1996). Taikant *Marshall*, *Hweem* (Asphalt Institute 1997) ar pagal mineralinių užpildų bitumo imlumą (Королёв 1986) KMA sudėties projektavimo metodą laboratorijoje arba skaičiuojant nustatytas optimalus jame panaudotoms mineralinėms medžiagoms bitumo kiekis turi būti išlaikytas ir pagamintoje ASMA KMA mišinio partijoje.

Bitumo kiekio gaminamame KMA mišinyje nuokryptai nuo gamybinio projekto – darbinės mišinio formulės (DMF) yra neišvengiami dėl KMA mišinio gamybos technologinių paklaidų, priklausančių nuo ASMA konstrukcijos, jo įrenginių būklės, valdymo sistemos netobulumo, operatoriaus veiksmų, KMA mišinio segregacijos, taip pat dėl KMA mišinio ėminių ėmimo ir bandymo paklaidų (Petkevičius, Sivilevičius 2008). JAV ištyrus skirtingais būdais ir skirtingose vietose paimtus ėminius nustatyta, kad rezultatų sklaida yra didelė ir ėminių ėmimo reglamentavimas turi būti koreguojamas. Tyrime išbandyti įvairūs rankiniai ir mechaniniai ėminių ėmimo prietaisai (Elseivi *et al.* 2011). Optimali asfalto mišinių granulimetrinė sudėtis nustatoma taikant stochastinius arba deterministinius optimizavimo modelius (Sterling 2011; Sivilevičius *et al.* 2011).

Dėl KMA mišinio segregacijos jo ėminiuose ir asfalto dangoje bitumo kiekis pasiskirsto netolygiai (Stroup – Gardiner, Brown 2000). Smulkesni mineralinių miltelių ir smėlio grūdėliai absorbuoja daugiau bitumo nei skaldos grūdėliai (Brown *et al.* 1989).

KMA mišinio skirtingo dydžio mineralinius grūdėlius dengiantis sudozuotas bitumas turi jų paviršiuje pasiskirstyti tam tikro storio (orientuoto ir tūrinio) vientisomis plėvelėmis. Toks atsvertos optimalų bitumo kiekį atitinkančios dozės, įpiltos į asfalto maišyklę, virtimas bitumo plėvelėmis vyksta dėl intensyvaus grūdelių vietos keitimo vienas kito atžvilgiu mechanškai maišant mineralines medžiagas ir jų adhezijos su bitumu (Колбановская, Михайлов 1973; Королёв 1986). Maišant KMA mišinio bituminį rišiklį ir mineralinius komponentus (skaldą, smėlį, mineralinius miltelius), dar siekiama, kad jų skirtingo dydžio grūdėliai maišyklės tūryje pasiskirstytų tolygiai per kiek galima trumpesnę maišymo laiką (The Asphalt Institute 1997, 2007; Hunter 1997). Mineralinių grūdelių padengimo bitumo kokybė priklauso ne tik nuo maišymosi trukmės ir menčių geometrinių parametrų, bet ir nuo rišiklio kilmės, mineralinio grūdėlio dydžio ir paviršiaus ploto, plėtimosi koeficientų, rišiklio klampos (Namutebi *et al.* 2011).

Gaminant KMA mišinį labai svarbu tiksliai ir glaudžiai sudozuoti mineralines medžiagas (karštąsias mineralinių medžiagų frakcijas, mineralinį dulklį bei mineralinius miltelius) ir organinį rišiklį – bitumą. Kiekvieno tipo KMA mišinio sudėtis ir savybės yra standartizuoti techninių reikalavimų apraše TRA ASFALTAS 08 (2008). Europoje skirtingose šalyse standartuose nurodomi leidžiamieji komponentų kiekio nuokrypiai (tolerancijos) skiriasi dėl tos šalies klimatinio sąlygų, leidžiamųjų apkrovų (Miljković 2012).

Gaminamos rūšies ir tipo KMA mišinį sudarančių medžiagų kiekiai yra nurodyti jo projektinėje sudėtyje, DMF. KMA mišinio gamyboje bitumo kiekis mišinyje yra vienas svarbiausių parametrų, padedančių įvertinti paties mišinio kokybę. Tačiau taip pat labai svarbu tiksliai dozuoti karštąsias mineralines medžiagas, mineralinius miltelius ir savąsias dulkes (tai yra dulkės, atsiradusios ASMA rinktuvuose gamybos proceso metu). Mineraliniai milteliai padidina grūdelių kontaktavimo tarpusavyje paviršių, padidina bitumo ir asfalto atsparumą šilumai, mažina rišančiosios medžiagos šiluminį plėtimąsi, mažina slankumą stabdant transporto priemonėms, didina mišinio ir asfalto tankį (Zeng ir Wu 2008; Sivilevičius *et al.* 2011). Mažesnę mineralinių miltelių kiekį turintį mišinį yra sunku sutankinti (Lavin 2003). Mineralinių miltelių kiekio nuokrypis nuo projekto kartu su bitumo kiekio nuokrypiu nuo projekto į teigiamą ar neigiamą pusę yra mažiau negatyvus gamybos kokybės pablogėjimas, negu gamybos procesas, kada dozuojama per daug mineralinių miltelių ir per mažai bitumo, arba atvirkščiai. Nagrinėjant bitumo dozių masės nuokrypius, būtina atsižvelgti, kaip tuose pačiuose asfalto mišinio maišiniuose buvo dozuojama daugiausiai smul-

kiausių dalelių, mažesnių kaip 0,063 mm turinti medžiaga – mineraliniai milteliai.

Smėlio komponento rūšis, gavybos vieta, granulimetrinė sudėtis ir kiekis asfalto mišinyje turi įtakos kelio dangos patvarumui (Jo 2010; Liu *et al.* 2011). Didžiausią įtaką turi smėlio kiekis ir rūšis (Breakah *et al.* 2011).

Taigi, norint laiduoti pramoniniu būdu gaminamo KMA mišinio projekcinę sudėtį, ASMA naudojami tinkami mineralinių medžiagų ir bitumo dozavimo įrenginiai – dozatoriai. Dozavimas – tai KMA mišinio gamybos technologinė operacija, kurios metu atsveriamas arba pagal tūrį atmatuojamas reikiamas medžiagos kiekis. Skystas bitumas gali būti dozuojamas pagal masę ar pagal tūrį. Dozatorius ir visa bitumo sistema (talpyklos, siurbliai, vamzdynas, filtrai, vožtuvai, čiaupai, šildytuvai) privalo užtikrinti šiuos reikalavimus:

- galėti atsverti tokios masės bitumo dozę, kuri nustatyta DMF, neviršijant leidžiamosios dozavimo paklaidos;
- leisti keisti bitumo dozės masę plačiame diapazone, išlaikant didelį dozavimo tikslumą ir glaudumą;
- leisti, esant būtinybei, tuoj pat ir tiksliai pakeisti bitumo dozės masę;
- galėti iš dozatoriaus bakelio išpilti visą atsvertą ar pagal tūrį atmatuotą bitumo dozę į maišyklę, t. y. grąžinti į nulinę padėtį (*zero return bituminous material* $\pm 0,1$ % *total batch weight of paving mix* – ASTM D 995-95b);
- neleisti karštam bitumui sistemoje atšalti iki žemesnės nei jo markei nustatytos temperatūros;
- neleisti karštam bitumui oksiduotis, senėti ir dėl perkaitimo keisti cheminę sudėtį ir savybes;
- užtikrinti priešgaisrinės saugos, darbų saugos ir aplinkosaugos reikalavimus.

Mokslo tyrimais, atliktais Lietuvoje (Sivilevičius, Vislavičius 2008) ir kitoje šalyse (Abdullah *et al.* 1998; Witczak, Fonseca 1996; Hunter 1997), įrodyta, kad nuo komponentų kiekio priklauso KMA mišinio struktūra ir savybės, lemiančios nutiestos kelio asfalto dangos patikimumą ir ilgalaikiškumą (Witczak, Fonseca 1996; Witczak 2005; Abdullah *et al.* 1998; Petkevičius, Sivilevičius 2008). Per didelis ir per mažas laisvojo bitumo kiekis blogina KMA mišinio struktūrą, iš jo įrengtos asfalto dangos sluoksnio fizines ir mechanines savybes. Dėl jo pertekliaus padidėja dangos takumas, sumažėja šiurkštumas, asfalto atsparumas provėžų atsiradimui, ypač esant aukštai vasaros temperatūrai, sumažėja stiprumas (Mogawer *et al.* 2011a; Park 2007). Nepakankamas bitumo kiekis didina asfalto liekamąjį akytumą (Obaidat *et al.* 1998), mažina jo atsparumą šalčiui ir paviršiaus lukštenimuisi (korozijai).

Kuo labiau bitumo (B), mineralinių miltelių (MM), skaldos (SK) ir smėlio (SM) komponentų procentinis kiekis pagamintame KMA mišinyje skiriasi nuo optimalaus (projektinio) kiekio, tuo blogesnė būna jo struktūra ir savybės (Sivi-

levičius *et al.* 2003). Bitumo kiekis pagaminto KMA mišinio partijoje visada turi tam tikrą variaciją, todėl pagaminto KMA mišinio kokybę galima pagerinti tiksliau ir stabiliau dozuoiant bitumą ir mineralines medžiagas, jas geriau sumaišant.

Bitumo pastovios deformacijos mikromechaninio modeliavimo metodą pateikė Dephand, Cebon (2004). Bitumo adheziją su mineralinėmis medžiagomis tyrė Bhasin, Little (2009), El Hussein, Abd El Halim (1993). Золотарев *et al.* (2007) teigia, kad bitume didėjant polimero kiekiui, jo (bitumo) adhezija didėja. Adhezinio priedo ir polimero įtaka skirtingai reiškiasi bitumo sukibimui su užpildais (mineralinėmis medžiagomis) ir asfalto atsparumui vandens poveikiui. Elastomerais modifikuotas bituminis rišiklis mažiau jautrus vidutinių ir aukštų temperatūrų poveikiui (Elseify *et al.* 2003).

Bitumo plėvelių, gaubiančių mineralinių medžiagų grūdelius, storio įtaką KMA savybėms tyrė Li *et al.* (2009). Airey *et al.* (2008) ištyrė mineralinių užpildų, mineralinių miltelių ir bitumo įtaką asfalto mišinyje drėgmės daromai žalai. Iš esmės neigiamas drėgmės poveikis atsiranda dėl adhezijos tarp užpildo ir bitumo praradimo ir / arba dėl kohezijos tarp bitumo ir bitumo netekimo, atsiradusio dėl drėgmės asfalto mišinyje. Kiek pakito bitumo savybės ir kokie veiksniai nulėmė pokyčių didumą regeneruojamoje asfalto dangoje, tyrė Lee *et al.* (2009 b); Mučinis *et al.* (2009); Doh *et al.* (2008). Bitumo ir mineralinių medžiagų mišinio (asfalto) savybių priklausomybę nuo temperatūrinių svyravimų analizavo Yi-qiu *et al.* (2010).

ASMA kokybės kompleksinio rodiklio (Sivilevičius *et al.* 2008; Sivilevičius 2011) vertė labiausiai priklauso nuo komponentų kiekio nuokrypių pagamintame KMA mišinyje, nulemiamų medžiagų dozavimo paklaidų (White, Brown 1977; Brown *et al.* 1989; Stroup-Gardiner, Brown 2000). KMA mišinio gamybos įmonėse laikui bėgant tobulinami medžiagų dozatoriai, leidžiantys ne tik sumažinti komponentų kiekio jame nuokrypius nuo DMF verčių, bet ir sumažinti bitumo oksidaciją bei padidinti įrenginių patikimumą ir ilgaamžiškumą, supaprastinti jų valdymą, priežiūros bei remonto procesus (Divinsky *et al.* 2003; Sivilevičius 2005).

KMA mišinys gaminamas įvairių tipų ir pajėgumų (Mogaver *et al.* 2012a), skirtingos sandaros, našumo, įvairių technologijos schemų asfalto maišytuvuose (ASMA – angl. *Asphalt Mixing Plant* – AMP), iš kurių populiariausi tapo periodinio veikimo (Sivilevičius, Šukevičius 2009; Brown *et al.* 1989). Energijos sąnaudos įsigyjant naują ASMA yra svarbus parametras, nulemiantis KMA mišinio savikainą ir gamyklos konkurencingumą (Лупанов, Гладышев 2013). Energijos suvartojimas įvertinus visus technologinius procesus periodinio veikimo ASMA yra didesnis už nuolatinio veikimo ASMA. Tą nulemia, kad nuolatinio veikimo ASMA medžiagos džiovinamos, kaitinamos ir maišomos tame pačiame būgne. Nepaisant to, šiuo metu populiariesni yra periodinio veikimo ASMA dėl savo universalumo, valdymo ir geresnės gamybos kokybės (Ang *et*

al. 1993). Be to, bituminio rišiklio penetracija po gamybos proceso periodinio veikimo ASMA sumažėja apie 14 % mažiau nei po gamybos nuolatinio veikimo ASMA (Chollar 1989). Naujausiuose mokslo tyrimuose (Howard *et al.* 2013) nustatyta, kad trumpalaikis bitumo senėjimas dėl oksidacijos pasireiškiantis karbonilų ir sulfoksidų junginių formavimusi yra nustatytas KMA mišinį gabenant į klojimo vietą. Tiriant bitumą iš 1–8 val. gabento KMA mišinio nustatyta, kad bitumo savybės iš karštai maišyto asfalto mišinio pablogėjo labiau, nei bitumo iš šiltai maišyto asfalto mišinio, tačiau skirtingo gabenimo trukmės ar skirtingų rišiklių įtaka senėjimui nenustatyta.

Dozatorių tobulinimas KMA mišinį gaminančiose įmonėse leidžia ne tik sumažinti medžiagų nuokrypius nuo DMF (Sivilevičius, Vislavičius 2008) nurodytų verčių, bet ir mažinti bitumo oksidaciją, didinti įrangos patikimumą ir ilgalaikiškumą, taip pat paprastinti jų valdymą ir priežiūrą bei remontą (Brock 1986).

Gaminant karštojo maišymo asfalto (KMA) mišinį, svarbu tiksliai ir stabiliai sudozuoti mineralines medžiagas ir organinį rišiklį – bitumą. Sudėties deterministinius ir stochastinius optimalios sudėties projektavimo metodus kūrė ir tobulino Ceylan *et al.* (2009); Sivilevičius, Vislavičius (2008); Sivilevičius *et al.* (2011). ASMA gaminant KMA mišinį dėl neišvengiamų sistemingųjų ir atsitiktinių paklaidų visada komponentų kiekis būna nukrypęs nuo darbinės mišinio formulės (DMF). Kuo komponento kiekio pagamintame KMA mišinyje nuokrypiai yra didesni, tuo blogesnės kokybės jis būna. Tam, kad komponentų kiekio nuokrypiai mišinyje būtų kiek galima mažesni, yra normuojamos jų statistinės tolerancijos, t. y. leidžiamieji nuokrypiai nuo DMF, kurių privalo paisyti asfalto mišinio gamintojai.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Kelių transporto tiesinių dangai rengti apie 60 pastarųjų metų naudojami karštai maišyti asfalto mišiniai, pagaminti iš skirtingų dydžių mineralinių medžiagų dalelių, padengtų tam tikro orientuoto ir tūrinio sluoksnių storio bituminio rišiklio ištisinėmis plėvelėmis. Bitumo orientuotų plėvelių, sudarytų iš kietosios, struktūrizuotos ir difuzinės zonų, storis kinta nuo mikrometrų iki kelių mikrometro dalių ir jis mažėja, o absorbcinės jėgos didėja mažėjant dalelių skersmeniui ir bitumo kiekiui asfalte. Šių zonų ryškios skiriamosios ribos nėra, nes jų storis kinta pagal bitumo temperatūros ir klampos, cheminę ir grupinę sudėtį, grūdelių petrografinę kilmę.

2. Nepakankamai išsamiai ištirta ir mažai publikuota darbų, rodančių, dėl kokių priežasčių ir kaip kinta transportuojamo bitumo savybės karšto maišymo

asfalto (KMA) mišinio gamybos procese, kai naudojami skirtingos konstrukcijos asfalto maišytuvai (ASMA) ir jų bitumo dozavimo sistemos (BDS). Publikacijose yra mažai tyrimų, kuriuose eksperimentai būtų atliekami ne laboratorinėmis, bet realiomis gamybos sąlygomis, o ypač aktyviųjų eksperimentų, atliktų ASMA, duomenų.

3. Mokslo darbų analizė rodo, kad mokslininkai įvairiose šalyse tyrinėja bitumo, kaip organinio rišiklio, savybių kaitą, kai jis dar nėra sumaišytas su mineralinėmis medžiagomis ir nutiestos kelio dangos asfalto sluoksnyje. Bitumo savybių kaita asfalto mišinio gamybos ASMA technologiniame procese mažai ištirta. Kelio dangos sluoksnio asfalto fizinių ir mechaninių savybių kaitai prognozuoti dėl bitumo trumpalaikio ir ilgalaikio senėjimo ir senėjimo eksperimentiniams tyrimams skirta pakankamai daug mokslo darbų. Tiriamos naujų priedų, gerinančių bitumo savybes ir lėtinančių jo oksidacijos reakcijas, panaudojimo galimybės.

4. Bitumo kiekio pagamintame asfalto mišinyje nuokrypiams nuo darbinės mišinio formulės (DMF), rodančios rišiklio optimalų projektinį kiekį, ir jo dideli svyravimai (sklaida apie vidurkį) blogina asfalto struktūrą ir savybes kelio dangos sluoksnyje. Bitumo trūkumas ir perteklius neleidžia užtikrinti tinkamo storio plėvelių ir tarpgrūdulinės erdvės tuštymų reikiamo tūrio, dėl to kelio dangos asfalto sluoksnis būna nestiprus, neatsparus plastinėms deformacijoms (provėžų susidarymui) ir šalčiui (dėl didelio vandens įmirkio). Dėl oksidacijos ir degradacijos padidėjusi klampa žemoje temperatūroje asfaltą daro trapų ir neatsparų pleišėjimui. Todėl visą KMA mišinio gamybos laikotarpį technologiniai įrenginiai privalo užtikrinti tokį bitumo kiekį jame, koks nustatytas DMF.

Bitumo savybių kaitos procesų technologiniuose įrenginiuose modeliavimas

Skyriuje analizuojama bitumo dozavimo sistemų (BDS) paskirtis, reikalavimai. Pateikiamas teorinis požiūris į BDS technologinius parametrus ir jų įtaką bituminio rišiklio savybėms. Pateikiamas bitumo kiekio karšto maišymo asfalto (KMA) mišinio partijoje dispersiją sudarančių dispersijų sieties modelis. Šio skyriaus medžiaga buvo publikuota straipsniuose: Bražiūnas, Sivilevičius (2013), Bražiūnas, Sivilevičius (2010).

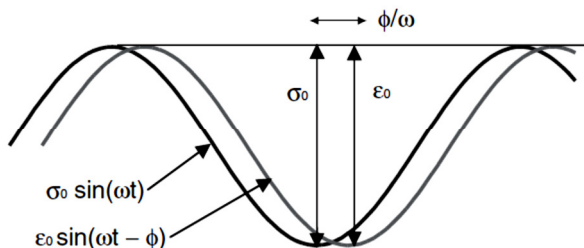
2.1. Bitumo efektyvaus kiekio ir klampos įtaka asfalto mišinio dinaminiam moduliui

Kintančios klampos ir elastingumo (viskoelastinių) medžiagų, tokių kaip KMA mišinys, apkrovos ir įtempių santykis veikiant medžiagą nustatytu dažniu nuolatinėmis sinusoidinėmis apkrovomis aprašomas kompleksiniu dinaminio moduliu E (Witeczak 2005). E – tai kompleksinis parametras, kuris priklauso nuo sinusoidinės apkrovos amplitudės (per nustatytą laiko vienetą t ir esant nustatytam apkrovos dažniui w)

$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$ ir sinusoidinių įtempių amplitudės $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$ (per tą patį laiko vienetą ir esant tam pačiam apkrovos dažniui) (2.1 pav.):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \sin(-\phi)}, \quad (2.1)$$

čia σ_0 – maksimali apkrova (piko metu); ε_0 – maksimalus įtempis (piko metu); ϕ – fazės kampas, laipsniais; ω – kampinis greitis; t – laikas, s.



2.1. pav. Dinaminio (kompleksinio) modulio E testas

Fig. 2.1. Dynamic (complex) modulus E test

Matematiškai dinaminis modulis aprašomas kaip kompleksinio modulio absoliučioji reikšmė:

$$E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}. \quad (2.2)$$

Bitumo dinaminė klampa η , Pa·s arba P (puazais) ir bitumo kiekis mišinyje x_{Bi} , % yra svarbūs parametrai, nulemiantys KAM mišinio dinaminio (kompleksinio) modulio E vertę. Kelio asfalto dangos charakteristikos ir elgsena eksploatuojant prognozuojama pasitelkiant pagaminto KMA mišinio dinaminio modulio E parametą. Bandinio gniuždymas nustatytu dažniu simuliuojant apkrovas leidžia prognozuoti būsimos kelio dangos mechanines savybes, atsparumą provėžų susidarymui, ilgaamžiškumą. Dinaminis modulis E šiuo metu yra vienas iš pagrindinių parametų, leidžiančių prognozuoti pažaidų atsiradimą dėl provėžų ir dangos nuovargio (Seo *et al.* 2013). Mogawer (2011 b) kelio asfalto dangos nuovargio tyrimams ir prognozavimui panaudojo bitumo elastiškumo parametrus, tačiau nustatė, kad tendencija nėra pastovi ir reikalingi papildomi tyrimai.

Taikydami ilgalaikių tyrimų rezultatus ir atsižvelgdami į pagrindinę bitumo reologinę savybę – dinaminę klampą Witczak, Mirza (1992) sukūrė TLS ir ILS prognozavimo modelius. TLS modeliu, (determinacijos koeficientas $R^2 = 0,9918$) turint pradinę bitumo klampą η_0 , galima nustatyti bituminio rišiklio klampą atlikus KMA mišinio dozavimą ir sumaišymą (po TLS) $\eta_{t=0}$:

$$\log \log \eta_{f=0} = 0,054405 + 0,972035 \cdot \log \log \eta_0. \quad (2.3)$$

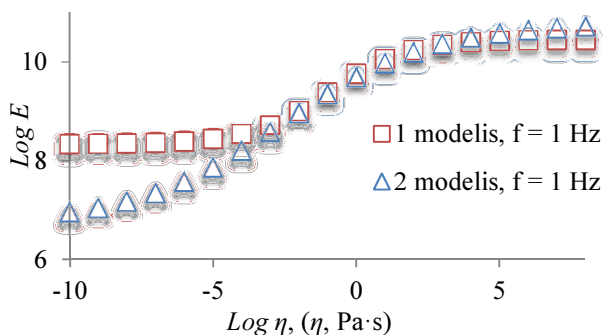
Dinaminio modulio prognozavimas – aktuali problema, ir mokslininkai šiems tyrimams skiria daug dėmesio. Vienas iš pagrindinių Witczak, Fonseca (1996) ir Bari, Witczak (2006) tyrimų tikslų – prognozuoti pagaminto mišinio dinaminį modulį E ir įvertinti bituminio rišiklio klampos, kiekio, mineralinių medžiagų granulometrinės sudėties ir oro tuštymių kiekio įtaką E . Ištyrus 1429 bandinius, iš 149 mišinių buvo sudarytas pradinis matematinis modelis:

$$\begin{aligned} \log E = & -0,261 + 0,008225 p_{200} - 0,00000101(p_{200})^2 + 0,00196 p_4 - \\ & - 0,03157 V_{oro} - 0,415 \frac{V_{Bef}}{(V_{Bef} + V_{oro})} + \\ & + \frac{[1,87 + 0,002808 p_4 + 0,0000404 p_{38} - 0,0001786(p_{38})^2 + 0,0164 p_{34}]}{1 + e^{(-0,716 \log f - 0,7425 \log \eta)}}, \quad (2.4) \end{aligned}$$

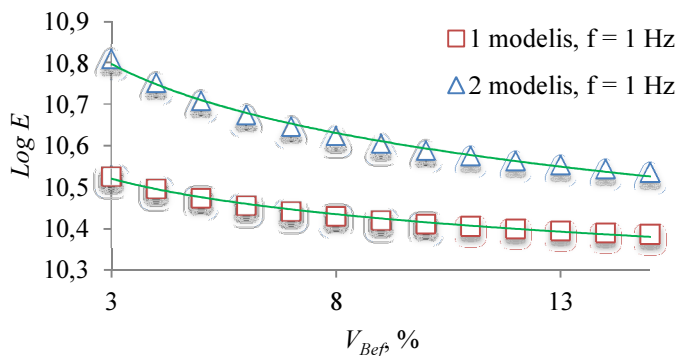
čia E – asfalto mišinio dinaminis modulis, 10^5 psi; η – bitumo dinaminė klampa 10^6 P; f – apkrovos dažnis, Hz; V_{oro} – oro tuštymių kiekis, tūrio procentais; V_{Bef} – efektyvaus bitumo kiekis, tūrio procentais; p_{34} – pilnutinė grūdelių liekana ant 3/4 colio (19,0 mm) sieto, masės procentais; p_{38} – pilnutinė grūdelių liekana ant 3/8 colio (9,5 mm) sieto, masės procentais; p_4 – pilnutinė grūdelių liekana ant Nr. 4 (4,75 mm) sieto, masės procentais; p_{200} – pilnutinė išbyra per Nr. 200 (0,075 mm) sieta, masės procentais. Šios lygties determinacijos koeficientas $R^2 = 0,930$ rodo, kad daugiau kaip 90 % dinaminio modulio kitimas yra nulemtas (2.4) modelį sudarančių veiksnių (kintamųjų). Bitumo efektyviojo kiekio V_{Bef} ir dinaminės bitumo klampos η parametrai nulemiami BDS technologinių parametrų. Todėl galima teigti, kad BDS technologiniai parametrai turi tiesioginę įtaką pagaminto KMA mišinio dinaminiam moduliiui E .

Patikslintas E nustatymo modelis parodė dar stipresnę koreliacinę ryšį tarp jį sudarančių kintamųjų ir dinaminio modulio (Garcia-Morales 2007):

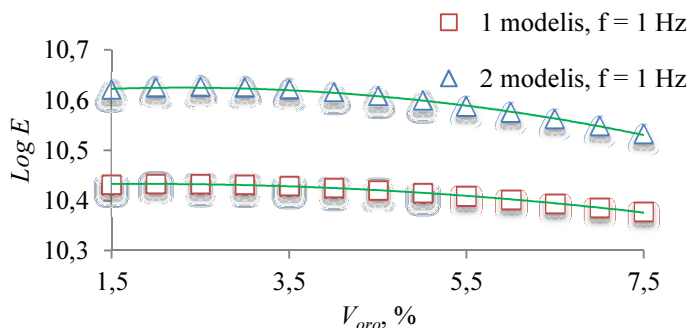
$$\begin{aligned} \log E = & -1,249937 + 0,029232 p_{200} - 0,001767(p_{200})^2 + 0,002841 p_4 - \\ & - 0,058097 V_{oro} - 0,802208 \frac{V_{Bef}}{(V_{Bef} + V_{oro})} + \\ & + \frac{[3,871977 + 0,0021 p_4 + 0,003958 p_{38} - 0,000017(p_{38})^2 + 0,00547 p_{34}]}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \log(f) - 0,393532 \log(\eta))}} \quad (2.5) \end{aligned}$$



a)



b)



c)

2.2. pav. KMA mišinio dinaminio modulio E priklausomybės pagal Witczak 1 ir 2 modelius nuo veiksnių, kuriuos nulemia bitumo dozavimo sistemos technologiniai parametrai: a – nuo dinaminės klampos η , b – nuo efektyviojo bitumo kiekio V_{Bef} , %; c – nuo tuštymėtumo V_{oro} , %

Fig. 2.2. Dependences of HMA mixture dynamic modulus E according to Witczak models 1 and 2 on factors which are influenced by bitumen batching system technological parameters: a – dynamic viscosity η , b – effective bitumen content V_{Bef} , %; c – voidness V_{oro} , %

Palyginus modelius matoma, kad veiksniai, kuriuos nulemia BDS technologiniai parametrai, turi reikšmingą įtaką KMA mišinio dinaminiam moduliui E . Modeliuodamas imu, kad KMA mišinio frakcinė sudėtis nekinta, o E nustatymo testo apkrovos dažnis 1 Hz. 2.2 paveiksle pateikiama $\log E$ (kada E matuojama MPa), priklausomybė nuo $\log \eta$ (kada η matuojama Pa·s). Gaunama patikslinta koreliacija, tačiau esant ypač kritinėms klampos vertėms (kada η $1 \cdot 10^{-10}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ ir $1 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^8$ Pa·s) skirtingais modeliais gaunamos skirtingos E vertės (2.2 a pav.). Efektyvusis bitumo kiekis V_{Bef} yra BDS technologinio parametro, dozės nuokrypio nuo DMF, nulemtas modelio veiksnys, kuris taip pat turi įtakos E kitimui. Priėmus parametrus, artimus šio darbo tyrimuose naudojamų KMA mišinių parametrus (2.1 lentelė), buvo modeliuojamas numatomas KMA mišinio dinaminis modulis E keičiant efektyvųjį bitumo kiekį V_{Bef} nuo 3 iki 15 % (2.2 b pav.). Nustatyta, kad naujesnis matematinis modelis pakoregavo tiriamą priklausomybę, tačiau proporciškai panaši įtaka, kad kuo didesnis V_{Bef} , tuo mažesnis E apskaičiuojamas.

2.1. lentelė. Dinaminiam moduliui E skaičiuoti naudotų parametų skaitinės vertės

Table 2.1. Digital values of parameters used for dynamic modulus E calculation

Kintantis parametras	Pastovūs parametrai							
	η , Pa·s	v_{Bef} , %	v_{oro} , %	p_{34} , %	p_{38} , %	p_4 , %	p_{200} , %	F , Hz
η , Pa·s	–	8,03	3,22	22	40	58	5	1
v_{Bef} , %	$6,6 \cdot 10^5$	–	3,22	22	40	58	5	1
v_{oro} , %	$6,6 \cdot 10^5$	8,03	–	22	40	58	5	1

Maišymo trukmė, visų šaltųjų ir karštųjų komponentų temperatūra ir komponentų kiekis nulemia KMA mišinio tuštymėtumą, todėl pateikta ir teorinė tuštymėtumo V_{oro} įtaka gaminamo KMA mišinio dinaminiam moduliui E (2.2 c pav.). Abiem modeliais gaunamos panašios kreivės, rodančios, kad V_{oro} didėjimas iki 3 % didina KMA mišinio E , o toliau didėjant tuštymėtumui dinaminis modulis pradeda mažėti.

2.2. Reikalavimai bitumo dozavimo sistemai ir jos technologiniai parametrai

Bitumo dozavimo sistema (BDS) – asfalto maišytuvo (ASMA) (2.3 pav.) technologinių įrenginių grupė, skirta laikyti, transportuoti, sverti (matuoti) ir dozuoti nustatytos masės (tūrio) dozės į karštojo maišymo asfalto (KMA) mišinio komponentams sumaišyti į vientisą mišinį skirtą maišyklę (2.3 pav. 3). Tam, kad KMA mišinio gamyba vyktų nepertraukiamu režimu, o pagamintas mišinys būtų

aukštos kokybės, BDS įrenginiai turi atitikti svarbiausius reikalavimus (2.4 pav.). BDS sudaro keturios pagrindinės technologinių įrenginių grupės: talpyklos, technologinis vamzdynas, svėrimo bakas ir BDS šildymo įrenginiai.

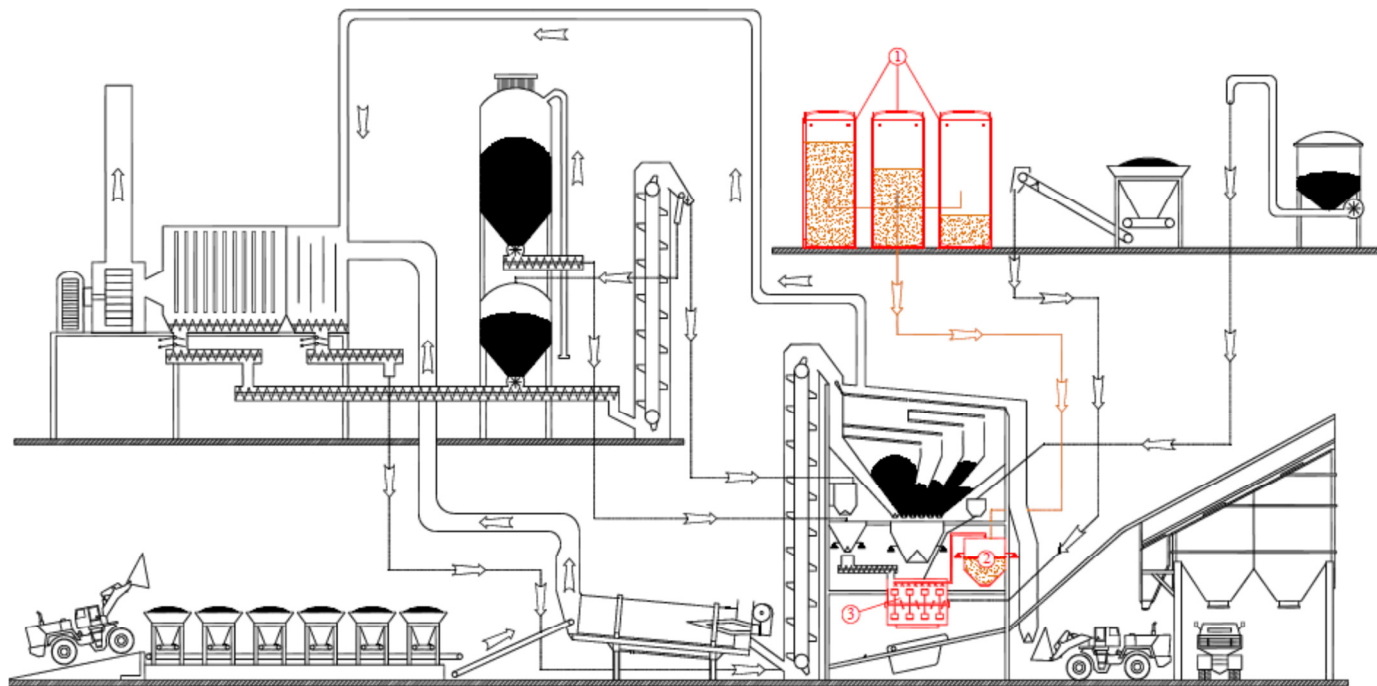
Talpyklos. Pirmoji BDS technologinė grandis yra bitumo laikymo talpyklos (2.3 pav. 1), kuriose saugomas skirtingų markių reikiamos temperatūros karštasis bitumas. Šią grandį sudaro 3–7 atskiros šildymo įrenginius turinčios, izoliuotos talpyklos, jas vieną su kita jungiantis savo šildymo elementus turintis vamzdynas ir bitumo siurblys, skirtas pumpuoti bitumą iš bitumvežio į talpyklas (2.4 pav. a). Skirtingų ASMA gamintojai siūlo tiek vertikalias, ties horizontalias, dažniausiai 60–120 m³ talpos talpyklas. Skirtingų KMA mišinių gamybai naudojami skirtingų markių bitumai, kurių fizinės savybės skiriasi, todėl prie kiekvieno ASMA paprastai būna įrengtos kelios į bendrą sistemą sujungtos talpyklos. Lietuvoje galiojančiame automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų apraše TRA ASFALTAS 08 (2008) nurodytos normos skirtingiems kelių ir polimerais modifikuotiems bitumams, kurių reikia laikytis parenkant bitumo šildymo režimus.

Vamzdynas. Technologinis vamzdynų transportas (2.3 pav. 2) ASMA naudojamas bituminiam rišikliui transportuoti iš bitumvežio į talpyklas, iš vienu talpyklų į kitas ir iš talpyklų į rišiklio svėrimo baką (2.4 pav. b). Šis vamzdynas ypatingas tuo, kad turi transportuoti skystį išlaikant technologinius reikalavimus: transportavimas turi vykti tokiu greičiu (debitu), kad būtų užtikrintas maksimalus ASMA projektinis našumas; vykstant transportavimui bitumo temperatūra turi išlikti kuo mažiau nukritusi dėl to, kad nepadidėtų jo klampa ir nebūtų atliktas nekokybiškas mišinio sumaišymas (mišinys būtų nehomogeniškas). Vamzdynas visame savo ilgyje yra izoliuotas ir šildomas.

Šildymo kabeliai, kurie yra suskaidyti į atskirus kontūrus, įjungiami, kai šilumos davikliai siunčia signalą apie nukritusią žemiau nustatyto lygio vamzdžio temperatūrą (dažniausiai nevykstant KMA mišinio gamybai). Transportavimui dažniausiai naudojami trifazių variklių sukami krumpliaratiniai bitumo siurbliai, kurie būna įvairaus našumo. Siurbliuose integruoti atskiri kontaktiniai kaitinimo elementai.

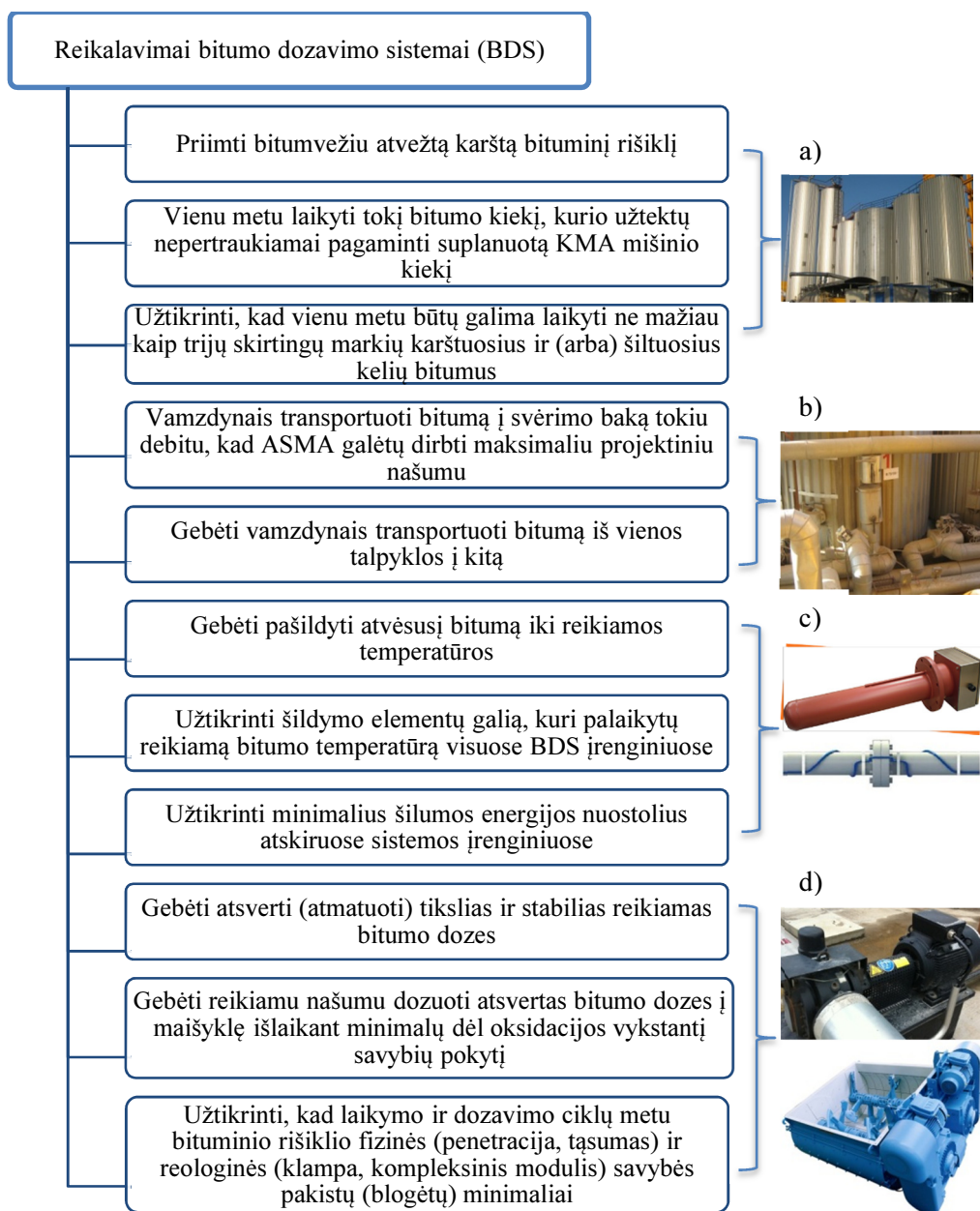
BDS šildymo įrenginiai ir termoizoliacija, kurie yra talpyklose, vamzdyne ir svėrimo bake, privalo užtikrinti, kad karštojo rišiklio temperatūra būtų vienoda visoje sistemoje, o energijos sąnaudos kuo mažesnės (2.4 pav. d).

Svėrimo bakas. Tai technologinis įrenginys, skirtas atmatuoti vienam periodinio veikimo ASMA KMA mišinio maišiniui reikalingą bituminio rišiklio dozę. Bitumo dozės procentinis nuokrypis nuo darbinėje mišinio formulėje (DMF) nurodytos vertės yra tikslumo (netikslumo) matas ir vienas svarbiausių BDS technologinių parametrų. Bakai dozes gali atsverti pagal masę arba atmatuoti pagal tūrį, atsižvelgiant į jo tankį. Vamzdynu į baką pripumpuota reikiama bitumo dozė išpylimo vamzdžiu patenka į KMA mišinio maišyklę (2.4 pav. d).



2.3. pav. Periodinio veikimo asfalto maišytuvo konstrukcijos ir mišinio gamybos technologinio proceso schema
(raudonai išskirtas tyrimų objektas)

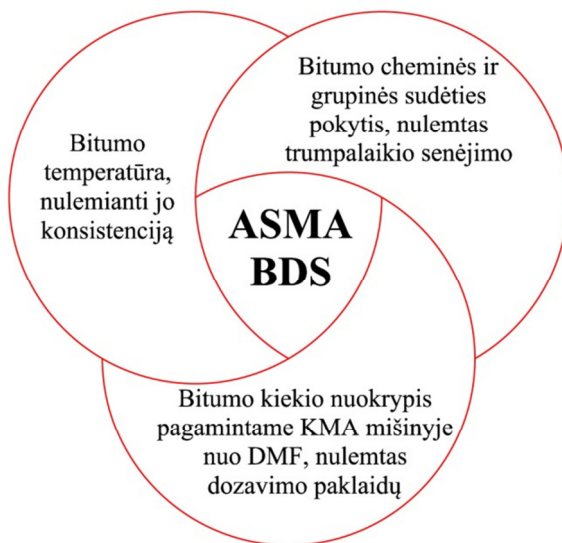
Fig. 2.3. Scheme of the mixture construction and production process of periodical asphalt mixing plant (red colour highlighted research object)



2.4. pav. Technologiniai reikalavimai bitumo dozavimo sistemai

Fig. 2.4. Technological requirements for bitumen batching system

Praktikoje naudojami du bituminio rišiklio dozavimo į maišyklę būdai: didelio debito gravitaciniu srautu (DDGS) ir aukšto slėgio čiurkšle (ASČ). Mokslininkai ir gamybininkai iki šiol neturi vieningos nuomonės, kuri dozavimo sistema yra geresnė. Nors ši technologinė operacija mokslininkų yra mažai ištirta, tačiau yra žinoma, kad didžiausias penetracijos pokytis įvyksta būtent dozuotant rišiklį į maišyklę ir jį maišant su mineralinėmis medžiagomis.



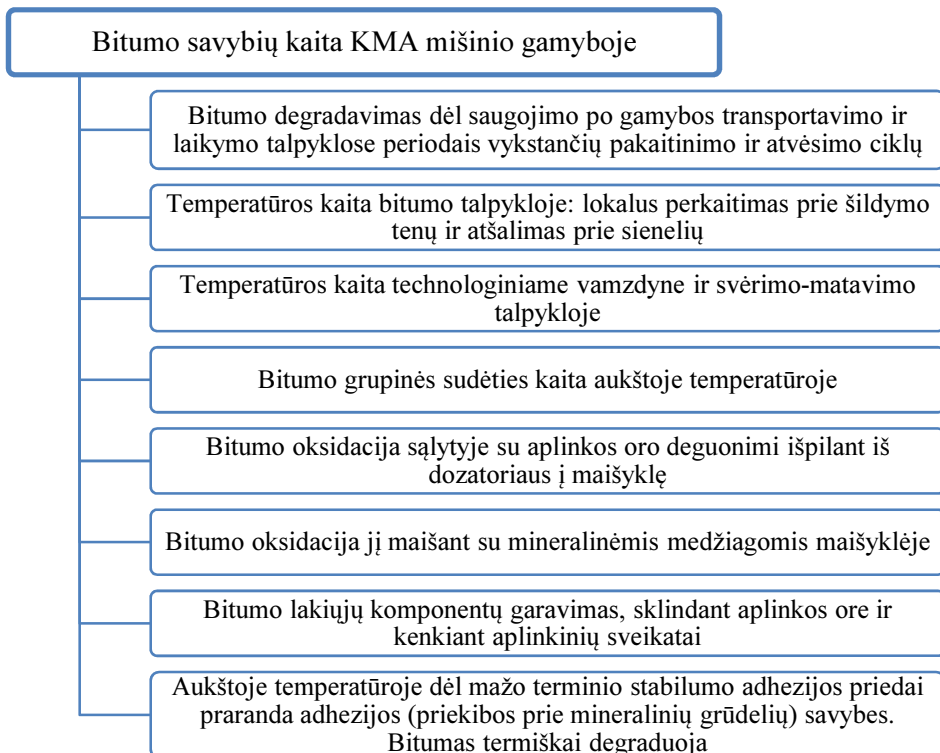
2.5. pav. Svarbiausi bitumo dozavimo sistemos technologiniai parametrai
Fig. 2.5. The main technological parameters of bitumen batching system

Siekiant, kad ASMA dirbtų maksimaliai našiai, o pagamintas KMA mišinys būtų kokybiškas, BDS technologiniai įrenginiai turi atitikti technologinius reikalavimus, iš kurių svarbiausi yra bitumo temperatūra, bitumo cheminės ir grupinės sudėties pokytis ir bitumo kiekio nuokrypis pagamintame KMA mišinyje nuo DMF (2.5 pav.).

Kituose poskyriuose pateikiu mokslškai pagrįstą periodinio veikimo ASMA BDS technologinių parametrų teorinį tyrimą ir aprašau kiekvieno technologinio parametro svarbą.

2.3. Bitumo savybių kaita ir oksidacijos technologiniuose įrenginiuose krintančiame laše modeliavimas

Geriausiais laikomi bitumai, kurie, esant tam tikrai penetracijai, turi maksimaliai įmanomą tįsumą ir aukštą minkštėjimo temperatūrą, taip pat geras adhezinės savybės. Kiti bitumų kokybės rodikliai: pliūpsnio temperatūra, klampa, trapumo temperatūra, tankis, kohezinės ir adhezinės savybės. Aukšta temperatūra, kurioje mineralinės medžiagos yra apgaubiamos bitumu, lemia rišiklio cheminės sudėties ir struktūros kitimą, t. y. bitumo senėjimą. Svarbiausi veiksniai, veikiantys bitumą, esantį ploname sluoksnyje, yra oro deguonis, aukšta temperatūra, vanduo ir mineralinės medžiagos paviršius (2.6 pav.).



2.6 pav. Veiksniai, turintys įtakos bitumo savybių kaitai karšti maišymo asfalto mišinio gamybos procese

Fig. 2.6. Factors influencing the properties of bitumen change in hot mix asphalt mixture production process

Pagaminto KMA mišinio struktūros susidarymui įtakos turi technologinio proceso parametrai: medžiagų temperatūra ir procentinis jų kiekis mišinyje; bitumo virsmo iš tūrinio būvio į plėveles proceso išbaigtumas; bitumo plėvelių, gaubiančių pačias smulkiausias daleles, storis ir vientisumas; maišymo ir bitumo sąlyčio su aplinkos oro deguonimi trukmė, jo paviršiaus plotas. Šiame darbe tiriamas bitumo savybių pokytis, kuris prasideda atvežus bitumą į ASMA ir jį perpumpavus į talpyklas ir baigiasi, kai KMA mišinys išvežamas iš gamyklos teritorijos. Tačiau bitumo (bitumo žaliavos) savybių kitimas prasideda dar tik pradėjus jį gaminti iš gudrono (likutinio žalios naftos vakuuminio distiliacijos proceso produkto). Oksidacinėje plieninėje kolonoje esantis gudronas iš apačios yra apipučiamas oru, susidaręs deguoninis junginys ir yra bitumas, kurio konsistencija reguliuojama nustatant reakcijos su deguonimi trukmę, taigi oksidacija, galima sakyti prasideda pradedant gaminti bitumą. Naftos perdirbimo gamyklos saugojimo cisternose, transportavimo bitumvežiuose ar geležinkelio cisternose dažniausiai palaikoma 140–160 °C temperatūroje, tačiau ne žemesnė nei minimali pumpavimo temperatūra – apie 120 °C (skirtingoms markėms ji šiek tiek skiriasi). Transporto priemonių dugne dažniausiai būna įrengti šildymo įrenginiai, leidžiantys išlaikyti darbinę bitumo temperatūrą transportavimo metu. Siekiama, kad bitumas būtų pristatytas darbinės temperatūros, nes jo pakaitinimas nuo žemesnės kaip 140 °C gali užtrukti net iki savaitės, priklausomai nuo šildymo bitumo kiekio, taip pat patiriama nuostolių dėl papildomų energinių sąnaudų, gaištamas laikas. Pašildymo ir atvėsimo ciklų skaičius taip turi įtakos karštojo rišiklio savybių pokyčiui. Naftos perdirbimo, transportavimo ir KMA mišinio gamybos technologiniais etapais bitumas atvėsinaamas iki aplinkos temperatūros būna retai, ir dažniausiai tai įvyksta tik naftos gamykloje ar ASMA atėjus žiemai ir pasibaigus kelių tiesimo darbų sezonui. Atėjus pavasariui ir prasidėjus kelių tiesimo darbų sezonui, toks bitumas vėl kaitinamas iki darbinės temperatūros. Tai užtrunka ilgai, o kelių 50 proc. užpildytoms 60 m³ bitumo talpykloms šildyti per parą gali būti sunaudojama net iki 4500 kWh elektros energijos. Trumpalaikio senėjimo talpyklose intensyvumas priklauso ir nuo ASMA talpyklose saugomo bitumo pašildymo ir atvėsimo ciklų skaičiaus. Senėjimas dėl lakiųjų frakcijų garavimo ir rišiklio, esančio prie šildymo elementų, frakcinės sudėties kitimo tuo didesnis, kuo ilgiau bitumas laikomas talpykloje.

Svarbiausias veiksnys, nulemiantis asfalto mišinio minimalią temperatūrą, yra būtinybė bitumui suteikti reikiamą klampą. Skystas bitumas leidžia juo gerai apvelti (padengti) mineralinius grūdelius ir užtikrinti reikiamą KMA mišinio slankumą skleidžiant (klojant) ir tankinant. Aukštesnė temperatūra už tą, kurioje pasiekiamas optimalus bitumo klampumas, yra nepateisinama, nes dažnai būna pavojinga ir turi įtakos asfaltbetonio eksploatacinių savybių blogėjimui. Tai pirmiausia siejama su bitumo struktūros ir savybių negrįžtamaisiais pokyčiais, vykstančiais dėl termooksidacinių procesų aukštoje temperatūroje. Šie procesai

staigiai sustiprėja bitume, paskleistame plonais sluoksniais ant mineralinių dalelių (grūdelių).

Nagrinėjant konkrečias BDS, galima teigti, kad oksidacijos procesus galima suskaidyti į dvi atskiras dalis. Pirmojoje dalyje bitumo lašeliai ar čiurkšlės, atsižvelgiant į jų paviršiaus plotą ir maišyklėje esančio aktyvaus deguonies kiekį, yra absorbuojami ir veikiami oksidacijos risikliui krintant iš dozavimo vamzdžio į maišyklę ant mineralinių medžiagų ir menčių. Antrajame etape oksidacija vyksta bitumui dengiant visas mineralines medžiagas maišymosi metu. Risiklis drenuoja tarp medžiagų, plėvelės per maišymosi ciklą įgauna projekcinį storį, o dauguma grūdelių yra padengiami bitumu.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai gali būti palyginti nustatant po eksperimento išekstrahuotame bitume nustatytą vykstant oksidacijai susidariusių karbonilo junginių (CA) kiekį ir jį lyginant su teoriškai apskaičiuotu CA kiekiu. Karbonilų junginių susidarymas r_{CA} vykstant oksidacijai yra aprašomas *Arrhenius* lygties išraiška:

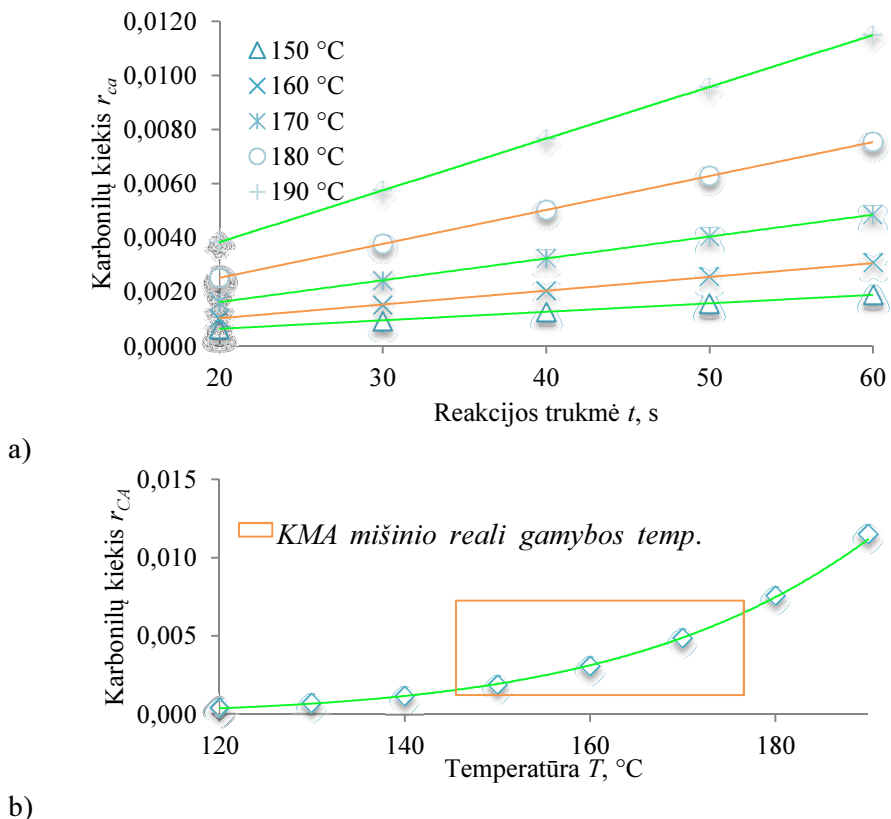
$$r_{CA} = \frac{\partial CA}{\partial t} = AP^{\alpha} e^{-E/RT}, \quad (2.6)$$

čia AP^{α} – dažnio veiksnys; P – slėgis; α – reakcijos dėl deguonies slėgio; E – aktyvacijos energija; R – dujų konstanta, T – absoliučioji temperatūra, K. Atliekant skaičiavimus AP^{α} ir E dydžiai kinta pagal risiklio rūšį ir savybes. Jie nustatomi eksperimentiškai (Liu *et al.* 1996). Tiriant, koks karbonilų kiekis susidaro esant aukštai temperatūrai, iš kreivės galima matyti, kad skirtingose temperatūrose, skirtingą laiką vykstant oksidacijai susiformuoja nevienodas karbonilų kiekis. Ypač CA formavimasis spartėja risikliui esant 180–190 °C ir daugiau (2.7 a pav.).

Atitinkamas santykis išlieka, jei imamas trumpesnis laikotarpis: per 1 minutę esant 160 °C teoriškai susidarantis karbonilų kiekis būna $r_{CA} = 0,0030$. Karbonilų formavimasis yra klampos didėjimo priežastis. Vykstant TLS, deguonies molekulės absorbuoja bitumo molekules ir veikdamos sendina (kietina) bitumą. Martin *et al.* (1990) nustatė, kaip koreliuoja PMB dinaminė klampa ir karbonilo junginių kiekis:

$$\ln \eta_0^* = HS \cdot CA + m, \quad (2.7)$$

čia η_0^* – kompleksinė klampa, P; CA ir m – koeficientai, priklausantys nuo PBM polimerizacijos. Šiame darbe tirama, kaip kinta klampa bitumą dozuojuojant skirtingomis BDS. Prieš teoriškai tiriant TLS oksidaciją kaip CA susidarymą, įvertinama, kaip CA kiekis bitume keičia jo konsistenciją. Nustatyta, kad klampa CA susiformavus iki 1 (nepriklausomas dydis) didėja lėtai, o nuo 1 iki 2 didėti pradeda labai sparčiai.



2.7 pav. Temperatūros įtaka karbonilų susidarymui bitume oksidacijos metu:

a – 20–60 s laikotarpį esant 150–190 °C temperatūroms; b – per 1 min.

Fig. 2.7. Effect of temperature on carbonyl formation in bitumen during oxidation:

a – period of 20–60 s at 150–190 °C temperatures; b – in 1 min.

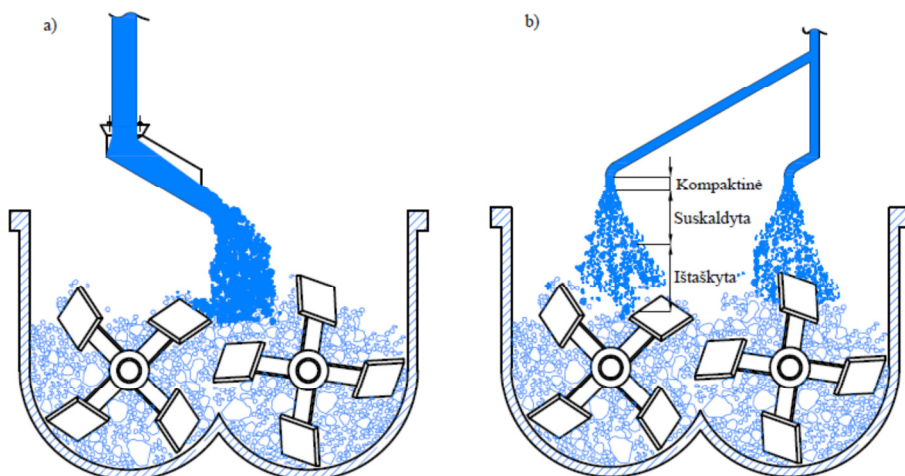
Ekspperimentiniame tyrime 4 skyriuje tiriamos dvi skirtingos BDS. Esminis jų skirtumas – skirtingas bitumo supylimo į maišyklę būdas (2.8 pav.). Dėl BDS techninių parametrų ir tėkmės parametrų (debito, slėgio, čiurkšlės charakteristikų) skirtumų, į maišyklės turį iš svėrimo bako nevienodai išpurškiamas arba išpilamas bituminis rišiklis. Skiriasi lašų (purslų) dydžiai, pasiskirstymas sraute, oro deguonies koncentracija sraute, oksidacijos paveikiamas lašų plotas.

Daroma prielaida, kad aukštu slėgiu išpurškiamas bitumas maišyklės tūryje skrieja ištaškytos čiurkšlės būsenos, todėl šiuo būdu dozuojuant bitumą didesnis jo plotas turi kontaktą su deguonimi ir yra labiau paveikiamas oksidacijos.

Oksidacijos difuzija ir reakcijos skirtingo tūrio bitumo plėvelėse aprašomos matematiniu modeliu (Han *et al.* 2013; Jin *et al.* 2013):

$$\left(\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial C_{O_2}}{\partial x}\right) + D\left(\frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial x^2}\right) - r_{O_2}, \quad (2.8)$$

čia C_{O_2} – deguonies koncentracija; r_{O_2} – deguonies suvartojimas (absorbavimas); x – gylis koordinatė; D – difuziškumas, kuris priklauso nuo lygmens, kuriame vyksta deguonies difuzija.



2.8 pav. Skirtingose BDS atsverto karšto bitumo išpylimo į maišyklę technologijos: a – išpylimas didelio debito gravitaciniu srautu; b – išpylimas aukšto slėgio čiuurkšle
Fig. 2.8. Technologies of discharging weighed hot bitumen into a mixer in various BBS: a – discharge at huge debit gravitation flow; b – discharge at high pressure jet

Modelio dėmuo r_{O_2} išreiškiamas karbonilo junginių kiekiu, susiformavusių suvartojus (absorbavus) r_{O_2} deguonies kiekį:

$$r_{O_2} = cr_{CA}, \quad (2.9)$$

čia c – koeficientas, priklausantis nuo medžiagos. Tyrimais (Liu *et al.* 1998) nustatyta, kas KMA mišiniui c yra tarp $2,75 \cdot 10^{-4}$ ir $4,59 \cdot 10^{-4}$ gmo O_2 /mL/CA. Tyrėjai, atlikdami skaičiavimus, paprastai naudoja šių verčių vidurkį. Kitame dėmenyje C_{O_2} išreiikiama priklausomybe nuo slėgio ir temperatūros:

$$C_{O_2} = (h_0((1 + 0,00215(T - T_r)))\left(\frac{P_{O_2}}{RT}\right), \quad (2.10)$$

čia h_0 – dimensinė Henrio (*Henry's*) konstanta T_r temperatūroje, R – dujų konstanta. Tada matematinis modelis išreiškiamas kaip difuzijos ir reakcijos procesas, įvertinus slėgį, temperatūrą ir karbonilų formavimąsi (Han *et al.* 2013):

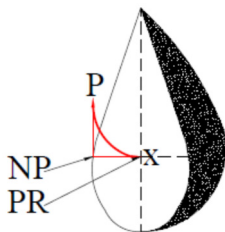
$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) + D\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}\right) - \left(\frac{cRT}{h}\right)r_{CA}. \quad (2.11)$$

Tiriamu skirtingų technologinių parametrų BDS atveju reikia įvertinti, kad deguonies difuzija skirtingo dydžio lašuose skiriasi dėl to, kad slėgis bitumo laše nėra vienodas. Priimu, kad BDS2 išpurškiamas bitumas yra lašų formos, tada galiu teigti, kad čiurkšlės lašuose slėgis nėra vienodas. Slėgis lašo pjūvyje (2.9 pav.) aprašomas išskiriant tris sąlygas: pradinė sąlyga $P = 0$, kada $t = 0$; neapsaugoto paviršiaus sąlyga (NP), kai slėgis veikia bitumo plėvelės paviršiaus plotą – tada $x = 0$, o $P = P_{NP}$ (dujose), kai slėgis veikia gylyje $x = L$, tada pagrindinis ryšys (PR) yra $x = 1$, o $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$. Tada *Arrhenius* (1887) išraiška išskiriama į dvi dalis (Jin *et al.* 2013): neapsaugotame paviršiuje r_{NP} (2.12) ir pagrindiniuose ryšiuose r_{PR} (2.13):

$$r_{NP} = AP_{NP}^{\alpha} e^{-E/RT}, \quad (2.12)$$

ir

$$r_{PR} = AP_{PR}^{\alpha} e^{-E/RT}. \quad (2.13)$$



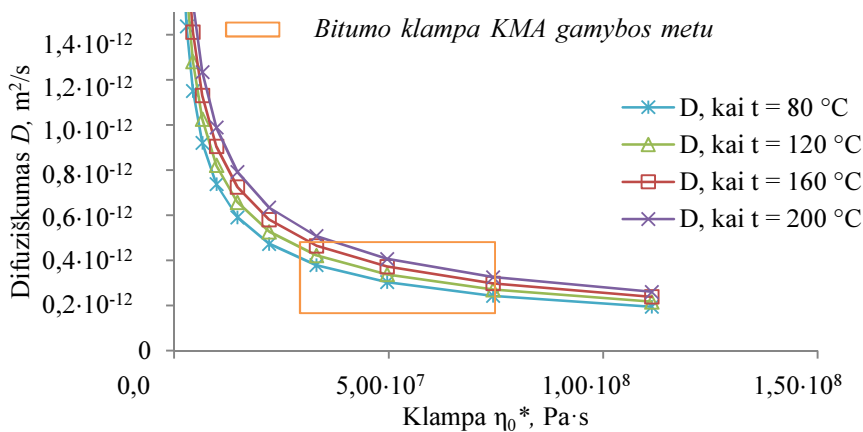
2.9 pav. Ribinės slėgio sąlygos krintančiame bitumo laše

Fig. 2.9. Marginal conditions of pressure in a falling drop of bitumen

Oksiduojantis bitumui susiformuojantys karbonilo junginiai lemia didėjančią bitumo klampą, o klampos didėjimas paviršiniame plėvelės sluoksnyje turi įtakos tolesnei oksidacijai (Domke *et al.* 1999). Kompleksinė klampa η_0^* kartu su temperatūra T yra veiksniai, keičiantys rišiklio difuziškumą:

$$\frac{D}{T} = 5,21 \cdot 10^{-11} (\eta_0^*)^{-0,55} . \quad (2.14)$$

Darbe, tiriamą temperatūrą yra 160 °C ir išreiškus difuziškumą kaip priklausomybę nuo kompleksinės klampos matoma, kad temperatūra didina difuziškumą. Esant žemai klampai η_0^* , difuziškumas yra artimas, kai yra skirtingos temperatūros, o nuo $6 \cdot 10^7$ Pa·s klampos temperatūros įtaka difuziškumui tampa labai žymi (2.10 pav.). Dėl temperatūros pokyčio nuo 140 °C ir 160 °C, esant tai pačiai klampai, difuziškumas yra beveik dvigubai didesnis. Teoriškai esant 160 °C ir klampai didėjant 428 kartais, difuziškumas atitinkamai mažėja 28 kartais.



2.10 pav. Bitumo difuziškumo D priklausomybė nuo kompleksinės klampos η_0^* ir temperatūros t

Fig. 2.10. Dependence D of bitumen diffusion on complex viscosity η_0^* and temperature t

Tam, kad būtų galima nustatyti deguonies koncentracijos C_{O_2} pasiskirstymą skirtinguose bitumo gyliuose (pagal vieną koordinatę x), pagal (2.08, 2.11) sudaromas matematinis modelis. Gautas rezultatas leis nustatyti oksidacijos mastą dėl koncentracijos C_{O_2} . Sprendžiamas uždavinys leis nustatyti slėgio P pasiskirstymą, ir pagal (2.08) išreikšti C_{O_2} kiekiu. Pradinė lygtis išreiškiama:

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} - D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + b(P) = 0 . \quad (2.15)$$

Tiriamą gylį L (pagal x koordinatę) suskaidome į baigtinius elementus (BE) naudodami pirmos eilės Ermito daugianarius. Slėgį baigtiniame elemente e apskaičiuojame:

$$P_e(t, x) = [N(\psi)] \{q_e\}, \quad (2.16)$$

čia $[N(\psi)]$ – formos funkcijų matrica; $\{q_e\}$ – baigtinio elemento nežinomieji. Naudojamas dviejų mazgų baigtinis elementas, kai nežinomasis vektorius lygus:

$$\{q_e\}^T = \left[P_1, \frac{\partial P_1}{\partial x}, P_2, \frac{\partial P_2}{\partial x} \right]. \quad (2.17)$$

Įvedama bedimensė koordinatė $\psi = x/L_e$, kai L_e – BE ilgis. Tada vektorius $\{q_e\}$ yra lygus:

$$\{q_e\}^T = \left[P_1, \frac{\partial P_1}{L_e \partial \psi}, P_2, \frac{\partial P_2}{L_e \partial \psi} \right]. \quad (2.18)$$

Tada pagal Galiorkino metodą užrašomas funkcionalas:

$$\int_0^L [N]^T \left(\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial D}{\partial T} \frac{\partial T}{L_e \partial \psi} \frac{\partial P}{L_e \partial \psi} - D \frac{\partial^2 P}{L_e \partial \psi^2} + b(P) \right) L_e d\psi = 0. \quad (2.19)$$

Įvedami tokie žymenys:

$$\begin{aligned} [M_e] &= \int_0^1 [N]^T [N] L_e d\psi; \\ [K_{e1}] &= \int_0^1 [N]^T \left(\frac{\partial D}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \psi} \right) \left[\frac{\partial N}{\partial \psi} \right] d\psi; \\ [K_{e2}] &= \int_0^1 [N]^T D \left[\frac{\partial^2 N}{\partial \psi^2} \right] d\psi; \\ \{B_e\} &= \int_0^1 [N]^T b(P) L_e d\psi. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Tada BE lygčių sistemai yra lygi:

$$[M_e] \{\dot{q}_e\} - ([K_{e1}] + [K_{e2}]) \{q_e\} = -\{B_e\}, \quad (2.21)$$

bendroji lygčių sistema yra lygi:

$$[M] \{\dot{q}\} - [K] \{q\} = -\{B(q)\}. \quad (2.22)$$

Kraštinės sąlygos: $x = 0$; $P_1 = P_m(t)$,

$$x = L ; \quad \frac{dP(x=L)}{dx} = \frac{1}{L_e} \frac{dP}{d\psi} = 0 ,$$

čia L – plėvelės storis; $P_m(t)$ – slėgis. Vektorių $\{B(q)\}$ taško $\{q_k\}$ aplinkoje išskleidus Teiloro eilute:

$$\begin{aligned} \{B(q)\} &= \{B(q_k)\} + \left[\frac{\partial \{B(q_k)\}}{\partial \{q\}} \right] \{\Delta q_k\} + \left[\frac{\partial \{B(q_k)\}}{\partial \{T\}} \right] \{\Delta T_k\} = \\ &= \{B(q_k)\} + [J_k] \{\Delta q_k\} + [J_{TK}] \{\Delta T_k\}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Pritaikius trapecijų metodą, nežinomojo vektoriaus laiko išvestinė užrašoma tokiu pavidalu:

$$\{\dot{q}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{q}_t\} + \frac{2}{\Delta t} (\{q_{t+\Delta t}\} - \{q_t\}), \quad (2.24)$$

čia Δt – laiko žingsnis; $\{q_t\}, \{\dot{q}_t\}$ – nežinomasis vektorius ir jo išvestinė laiko momentu t ir $t + \Delta t$. Įrašius (2.23) ir (2.24) išraiškas į (2.21) gaunama:

$$\begin{aligned} \left(\frac{2}{\Delta t} [M] - [K] + [J_k] \right) \{\Delta q_k\} + [J_{TK}] \{\Delta T_k\} &= -\{B(q_k)\} - \\ &- \left(\frac{2}{\Delta t} [M] - [K] \right) \{q_k\}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

sutrumpintai (2.25) galima užrašyti:

$$[A_{k,t+\Delta t}] \{\Delta q_k\} + [J_{T,K}] \{\Delta T_k\} = \{F_{t+\Delta t,k}\}. \quad (2.26)$$

Išsprendus tiesinę algebrinę lygčių sistemą, patikslinami nežinomųjų vektoriai:

$$\{q_{k+1}\} = \{q_k\} + \{\Delta q_k\}. \quad (2.27)$$

Temperatūros pasiskirstymas bitumo plėvelėje aprašomas šilumos laidumo lygtimi:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2.28)$$

čia C_p – specifinė šiluma; ρ – tankis; k_x – šilumos laidumo koeficientas. Šiai lygčiai spręsti taikomos kraštinės sąlygos: $k_x \frac{\partial T}{\partial x} = q$; $k_x \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_\infty)$, čia T_∞ –

aplinkos temperatūra, h – šilumos perdavimo koeficientas, q – šilumos srautas. Šilumos laidumo uždavinį, taikant BE metodą, galima užrašyti:

$$[M_T]\{\dot{T}\} + [K_T]\{T\} = \{S_T\}, \quad (2.29)$$

čia $\{S_T\}$ – vektorius. Pritaikius trapecijų metodą, (2.29) lygtį galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$\left(\frac{2}{\Delta t}[M_T] + [K_T]\right)\{\Delta T_k\} = \{S_{TK}\} - \left(\frac{2}{\Delta t}[M_T] + [K_T]\right)\{T_k\}. \quad (2.30)$$

Sujungus difuzijos (2.26) ir šilumos laidumo (2.30) lygtis, gaunama tokia lygčių sistema:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c} \frac{2}{\Delta t}[M] - [K] + [J_k] \\ 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} [J_{TK}] \\ \frac{2}{\Delta t}[M_T] + [K_T] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \Delta q_k \\ \Delta T_k \end{array} \right\} = \\ & = \left\{ \begin{array}{c} -\{B(q_k, T_k)\} - \left(\frac{2}{\Delta t}[M] - [K]\right)\{q_k\} \\ \{S_{TK}\} - \left(\frac{2}{\Delta t}[M_T] + [K_T]\right)\{T_k\} \end{array} \right\}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

arba

$$[H_k]\{\Delta Y_k\} = \{R_k\}, \quad (2.32)$$

čia $\{\Delta Y_k\}^T = \left\{ \{\Delta q_k\}^T, \{\Delta T_k\}^T \right\} \{R_k\}$ – lygčių sistemos dešiniųjų pusių vektorius, $[H_k]$ – koeficientų matrica. Patikslintas (2.21) ir (2.29) lygčių sistemos sprendinys lygus:

$$\{Y_{t+\Delta, k+1}\} = \{Y_{t+\Delta, k}\} + \{\Delta Y_k\}. \quad (2.33)$$

Pateiktas uždavinys leidžia, įvertinus bitumo šiluminės savybės ir temperatūrą, nustatyti slėgio pasiskirstymą bitumo plėvelėje pagal gylį ir pagal laiką. Nustačius slėgio pasiskirstymą plėvelėje, iš (2.8) priklausomybės galima nustatyti CO₂ pasiskirstymą bituminio rišiklio plėvelėje.

2.4. Bitumo reikiamo kiekio užtikrinimo karšto maišymo asfalto mišinyje modeliavimas

Bitumas asfalto mišinyje suriša ir sujungia (sucementuoja) mineralinių medžiagų grūdelius į stiprų sudėtingos struktūros konglomeratą, galintį kelio dangoje priešintis transporto priemonių ir aplinkos veiksnių ardomajam (destruktyviajam) poveikiui. Skačiuojant ir laboratoriniu eksperimentu nustatytas bitumo optimalus kiekis KMA mišinyje turi būti užtikrintas iš ASMA maišyklės išberiamuose KMA mišinio maišiniuose.

2.2. lentelė. Bitumo trūkumo ir pertekliaus įtaka KMA struktūrai ir savybėms

Table 2.2. The effects of bitumen shortage and surplus on the HMA structure and properties

Bitumo trūkumas mišinyje	Bitumo perteklius mišinyje
Didina asfalto tuštymėtumą (poringumą).	Didinant bitumo kiekį, viršijantį optimalų, didėja laisvojo bitumo, silpninančio struktūrinius ryšius asfalte, kiekis, dėl to mažėja asfalto dangos sluoksnio stiprumas ir atsparumas šlyčiai (provėžoms), didėja plastiškumas ir dangos slidumas.
Bitumo kiekio sumažėjimas žemiau optimalios vertės lemia asfalto stiprumo sumažėjimą.	Kai asfalte yra daug tūrinio (laisvojo) bitumo, jį labiau veikia temperatūros pokyčiai.
Didina asfalto vandens sugerties rodiklį ir mažina jo atsparumą korozijai (šalčio poveikiui).	Didėjant bitumo kiekio santykiui su mineraliniais milteliais ir jam perėjus į asfaltinio rišiklio su mažesnę struktūrą sudarančia koncentracija sritį, kintant smėlio grūdelių kiekiui vyksta ne taip intensyviai kaip kintant skaldos kiekiui (taip paaiškinamas geresnis smulkiųjų grūdelių klojimo patogumas).
Mažinti laisvojo bitumo kiekį galima ne tik didinant mineralinių miltelių kiekį, bet ir didinant parinkto mineralinio mišinio tankumą, taip pat naudojant aktyvintuosius mineralinius miltelius, intensyvinant maišymo procesą, dėl to galimas jo tolygus pasiskirstymas mineraliniame mišinyje ir pertekliaus išstūmimas jam persiskirsčius.	Per didelis tūrinio bitumo kiekis blogina asfalto struktūrą, o dėl to ir jo struktūrines-mechanines savybes. Didinant tūrinio bitumo kiekį, staigiai didėja asfalto dangos plastiškumas, o tai nulemia jos deformacinio stovumo mažėjimą, kai veikia aukšta vasaros temperatūra.
Mažėjant bitumo kiekiui (plonėjant plėvelei) bitumo mineralinių kompozicijų temperatūriniai įtempiai mažėja, taip pat mažėja kontakto (sąlyčio) plotas tarp užpildo grūdelių.	Per didelis bitumo kiekis (lyginant su optimaliu) ir per didelis mineralinių griaučių (skeleto) poringumas lemia laisvojo bitumo, silpninančio struktūrinius ryšius, padidėjimą asfalte.
Įpildo į maišyklę bitumo nepakankamas kiekis gali lemti jo trūkių plėvelių mineralinių grūdelių paviršiuje atsiradimą.	

Bitumas yra brangiausias KMA mišinio komponentas, todėl netikslus jo dozavimas turi įtakos ir sąnaudoms. Bitumo kaina per pastaruosius 2 metus išaugo daugiau kaip 30 %. Tam, kad būtų galima nutiesti 1 km automagistralinio kelio dangos (trys juostos po 3,75 m, viršutinis sluoksnis), KMA mišiniui turi būti panaudota PMB bitumo net už 220 000 iš 600 000 tūkst. Lt, reikalingų visam mišiniui pagaminti. Periodinio veikimo ASMA bitumo dozavimo bake atsverto rišiklio masė turi būti tokia, kad jo procentinis kiekis KMA mišinio partijos visuose maišiniuose atitiktų projektinį kiekį, nustatytą DMF. Per didelė ar per maža bituminio rišiklio dozė neigiamai veikia KMA mišinio savybes (2.2 lentelė).

2.4.1. Bitumo kiekio karšto maišymo asfalto mišinio partijoje dispersiją sudarančių dispersijų sistis

Periodinio veikimo tipo ASMA KMA mišiniui gaminti naudojamos baigiamojo dozavimo medžiagos tiekiamos į maišyklę trimis svoriniais dozatoriais. Visi KMA komponentai sudaromi iš papildomai išsijotų mineralinių medžiagų karštųjų frakcijų $A_3... A_7$, šaltųjų mineralinių dulkių A_2 bei šaltųjų mineralinių miltelių A_1 , kurių masė % žymima $M_1... M_7$ (2.11 pav.), taip pat karštojo bitumo A_B .

Bitumo dozės masė q_B (kg), laiduojanti reikiamą (optimalų) bitumo procentinį kiekį x_{Bp} mišinyje, pateiktą KMA mišinio DMF, priklauso ir nuo KMA mineralinių medžiagų (užpildų) faktiškosios masės Q_{ma} , apskaičiuojama pagal formulę:

$$x_B = \frac{q_B}{Q_{ma}} \cdot 100 = x_{Bp}, \quad (2.34)$$

iš jos gaunama reikiama bitumo dozės masė (kg):

$$q_B = \frac{x_{Bp} \cdot Q_{ma}}{100} = M_B. \quad (2.35)$$

KMA mišinio i -ojo maišinio mineralinių užpildų masę Q_{mai} sudaro dozuotų šaltųjų mineralinių miltelių q_{MMi} bei mineralinio dulgio q_{Mdi} , taip pat baigiamojo dozavimo karštųjų frakcijų $q_{Fr1i}, \dots, q_{Fr5i}$ dozių masių suma:

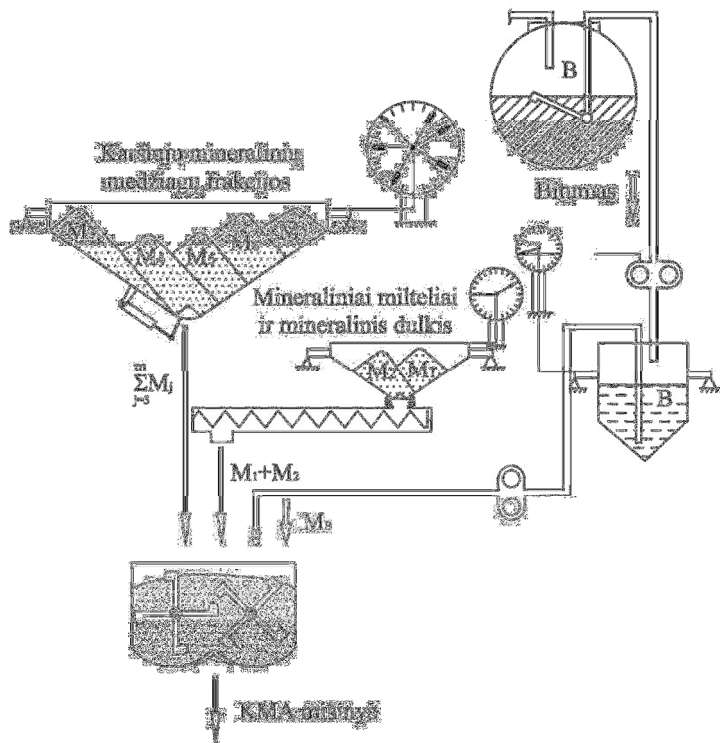
$$q_{MMi} + q_{Mdi} + q_{Fr1i} + \dots + q_{Fr5i} = Q_{mai}. \quad (2.36)$$

Kai bitumo kiekis KMA mišinyje skaičiuojamas ne kaip procentinė dalis nuo bendros mišinio masės (100 %), o atskirai (daugiau nei 100 %), tai mineralinės dalies Q_{mai} masė skaičiuojama taip:

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 = 100, \quad (2.37)$$

čia: M_1 ir M_2 – atitinkamai mineralinių miltelių ir mineralinio dul্কio procentinė masė KMA mišinyje; $M_3, \dots, M_7$ – atitinkamai pirmosios, ..., penktosios karštosios frakcijos procentinė masė KMA mišinyje.

Bitumo i -osios dozės masė q_{Bi} (kg) turi atitikti KMA i -ojo maišinio mineralinės dalies Q_{mai} masę taip, kad jų masių santykis bėgant gamybos proceso laikui būtų pastovus ir lygus projektinei masei q_{Bp} . Šie abu technologiniai parametrai (Q_{mai} ir q_{Bi}) dėl neišvengiamų atsitiktinių paklaidų varijuoja. Padidėjus arba sumažėjus Q_{mai} masei, ne visada proporcingai padidinama arba sumažinama q_{Bi} masė. Dažniausiai bitumo dozės masė q_{Bi} nekeičiama atsižvelgiant į faktiškąją KMA maišinio mineralinių užpildų masę Q_{mai} . Todėl, net idealiai atsverus ir supylus bitumą, bet pasikeitus DMF Q_{mai} parametru, bitumo kiekis x_{Bi} gaminamame KMA mišinyje nukrypsta nuo projektinės vertės M_{Bp} , kuri lygi x_{Bp} .



2.11 pav. Periodinio veikimo asfalto maišytuvo bitumo ir mineralinių medžiagų svorinių dozatorių konstrukcijos bei komponuotės schema

Fig. 2.11. A cross-section of weighing batchers at periodical asphalt mixing plant for bitumen and mineral aggregates

KMA mišinio gamybos technologiniai parametrai turi būti tokie, kad užtikrintų faktiškojo, iš imties nustatyto, bitumo kiekio x_B atitiktį jo projektiniam procentiniam kiekiui x_{Bp} , t. y. jų skirtumas Δx_B būtų mažesnis už leidžiamąją Δx_{Btol} toleranciją, priklausančią nuo ėminių skaičiaus (bandymų rezultatų skaičiaus) N ir turinčią pliuso arba minuso ženklą:

$$\Delta x_B = x_B - x_{Bp}. \quad (2.38)$$

Faktiškojo x_B ir projekcinio x_{Bp} bitumo kiekio skirtumo modulis turi būti mažesnis už Δx_{Btol} modulį:

$$|x_B - x_{Bp}| < |\Delta x_{Btol}|. \quad (2.39)$$

Tolerancija Δx_{Btol} būna tuo didesnė, kuo bitumo kiekio partijoje standartinis nuokrypis σ_B didesnis ir mažesnis išbandytų ėminių skaičius N :

$$\Delta x_{Btol} = f(\sigma_B, N). \quad (2.40)$$

Bitumo kiekio KMA mišinio atskirajame ėminyje (kai $N=1$) tolerancija nuo DMF skirtingų šalių norminiuose dokumentuose skiriasi (2.3 lentelė). Ji kito ir bėgant laikui normų tobulinimo procese.

Tolerancijos vertė gali būti apskaičiuojama iš bitumo kiekio KMA mišinio populiacijos (generalinės aibės) vidurkio μ_B pasikliautinio intervalo, kai dispersija σ_B^2 žinoma. Suderintasis, nepaslinktasis ir efektyvusis parametro μ_B taškinis įvertis yra empirinis vidurkis $\overline{x_B}$. Jo skirstinys taip pat normalusis. Pasiklivimo lygmeniu parinkę tikimybę $1 - \alpha$, įverčio $\overline{x_B}$ paklaidą ε apskaičiuojame iš lygties:

$$P(|\overline{x_B} - \mu_B| < \varepsilon) = 1 - \alpha, \quad (2.41)$$

ekvivalenčios lygčiai:

$$P\left(\frac{|\overline{x_B} - \mu_B|}{\sigma_B} < \varepsilon \frac{\sqrt{N}}{\sigma_B}\right) = 1 - \alpha. \quad (2.42)$$

Pažymėję z_p standartinio normaliojo skirstinio p -ąjį kvantilį (lygties $\Phi(z_p) = p$ sprendinį), gauname:

$$\varepsilon = \frac{z_p \sigma_B}{\sqrt{N}}. \quad (2.43)$$

2.3 lentelė. Leidžiamieji bitumo ir mineralinių medžiagų kiekio % nuokrypiai nuo darbinės mišinio formulės skirtingose šalyse

Table 2.3. Permitted bitumen and mineral aggregate content weight deviation % from job-mix formula tolerances in standards of various countries

Standartas	KMA mišinio komponentas			
	Bitumas Δx_{Btol}	Mineraliniai milteliai Δx_{MMtol}	Smėlis Δx_{SMtol}	Skalda Δx_{SKtol}
ASTM standartas D 3515-01 (JAV)	±0,5	±3,0	±7,0	±7,0
PANK 4102 (Suomija) mišinio tipams: A	±0,3	±2,0	±4,0	±4,0
B, C, D	±0,4	±2,0	±5,0	±5,0
BS 594 1 dalis (Jungtinė Karalystė)	±0,6	–	–	–
ČSN 73 6149 (Čekijos Respublika)	+0,4; –0,3	±2,0	±5,0	±5,0
ZTVT – StB 95 (Vokietijos Federacija)	±0,6	+7,0; –3,0	±9,0	±9,0
Statybos rekomendacijos R 35 – 01, 2001 (Lietuva)	±0,5	±3,0	±8,0	±8,0
IT ASFALTAS 08, 2008 (Lietuva) mišinio tipams: AC P	±0,6	+7,0 –3,0	±8,0	±9,0
MA	±0,5	±4,5	±8,0	±8,0
PA	±0,5	±2,0	±2,5	±6,0
AC A, AC V, SMA, AC PD	±0,5	±3,0	±8,0	±8,0

Dabar

$$1 - \alpha = P\left(\left|\bar{x}_B - \mu_B\right| < \varepsilon\right) = P\left(\bar{x}_B - \frac{z_p \sigma_B}{\sqrt{N}} < \mu_B < \bar{x}_B + \frac{z_p \sigma_B}{\sqrt{N}}\right), \quad (2.44)$$

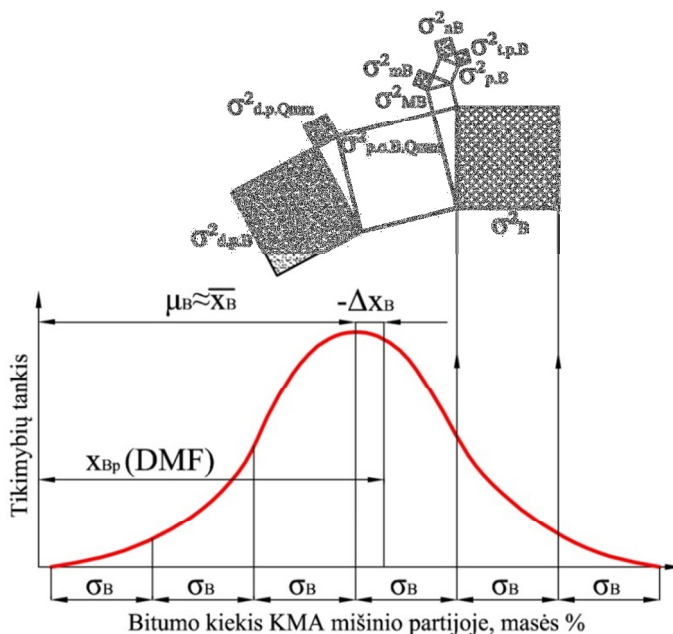
ir pasikliautinis intervalas:

$$I = \left(\bar{x}_B - \frac{z_p \sigma_B}{\sqrt{N}}, \bar{x}_B + \frac{z_p \sigma_B}{\sqrt{N}}\right), p = 1 - \frac{\alpha}{2}. \quad (2.45)$$

Kvantilio z_p reikšmės imame iš funkcijos $\Phi(x)$ reikšmių lentelės. Pavyzdžiui, jei pasiklovimo lygmuo $1 - \alpha = 0,95$, tai $\rho = 0,975$ ir $z_{0,975} = \Phi^{-1}(0,975) = 1,96$.

Tyrimai (Sivilevičius, Vislavičius 2008; Sivilevičius *et al.* 2003; Mučinis *et al.* 2009) rodo, kad KMA mišinio partijos komponentų kiekis pasiskirsto pagal normalųjį Gauso (*Gauss*) dėsnį. Bitumo kiekio variacijos didumą patogu vertinti jo populiacijos standartiniu nuokrypiu σ_B arba dispersija σ_B^2 . Kai variacija nustatoma iš eksperimentinių duomenų, tai naudojami imties įverčiai: standartinis nuokrypis s_B ir variacija s_B^2 .

Bitumo kiekio pagamintame KMA mišinyje sklaidos didumas priklauso nuo stochastinių veiksnių, nulemtų mišinio gamybos technologinio proceso parametrų, ėminių ėmimo ir laboratorinių bandymų atsitiktinių ir sistemingųjų paklaidų. Kai gaminant KMA mišinio partiją bitumo dozių masė nekeičiama (nėra sistemingųjų paklaidų), tai jo kiekio mišinio ėminiuose dispersiją σ_B^2 sudaro dispersijos, kurių sąsaja pateikta sieties modelyje (2.12 pav.).



2.12 pav. Bitumo kiekio KMA mišinio partijoje dispersiją σ_B^2 sudarančių dispersijų sieties modelis

Fig. 2.12. The model of correlation between variances constituting bitumen content variance σ_B^2 in HMA mixture lot

Bitumo kiekio KMA mišinio partijoje dispersija σ_B^2 , nustatyta iš jo ėminių ekstrahavimo duomenų, apskaičiuojama pagal formulę:

$$\sigma_B^2 = \sigma_{nB}^2 + \sigma_{d.p.B}^2 + \sigma_{d.p.Qmm}^2 + \sigma_{mB}^2 + \sigma_{t.p.B}^2, \quad (2.46)$$

čia σ_{nB}^2 – bitumo kiekio KMA mišinio partijoje neatskiriama dispersija, priklausanči nuo skirtingo dydžio grūdelių geriausio (tolygaus) galimo pasiskirstymo maišinyje ir juos gaubiančių bitumo plėvelių storio (visiškai homogeniško KMA mišinio); $\sigma_{d.p.B}^2$ – dispersija, priklausanti nuo bitumo dozių masės variacijos (atsitiktinių dozavimo paklaidų); $\sigma_{d.p.Qmm}^2$ – dispersija, priklausanti nuo KMA mišinio maišinius sudarančių mineralinių medžiagų suminės dozių masės variacijos (atsitiktinių maišinio mineralinės dalies dozavimo paklaidų); $\sigma_{d.p.B.Qmm}^2$ – dispersija, priklausanti nuo bituminio rišiklio ir mineralinių medžiagų (karštųjų frakcijų), šaltųjų mineralinių miltelių ir atskirtų dulkių) atsitiktinių dozavimo paklaidų, nulemtų dozių masės variacijos; σ_{mB}^2 – dispersija, priklausanti nuo KMA mišinio maišinyje esančių medžiagų sumaišymo kokybės, nulemta maišymo trukmės ir maišyklės savybių; $\sigma_{t.p.B}^2$ – dispersija, priklausanti nuo KMA mišinio ėminio laboratorinių bandymų (ėminio ėmimo ir bandymo) paklaidų.

Neatskiriamosios dispersijos σ_{nB}^2 ir dispersijos, priklausančios nuo ėminio laboratorinių bandymų paklaidų $\sigma_{t.p.B}^2$, suma sudaro eksperimentinių tyrimų paklaidų nulemtą bitumo kiekio KMA mišinio partijoje dispersiją σ_{pB}^2 . Prie jos (σ_{pB}^2) pridėjus dispersiją, priklausančią nuo medžiagų sumaišymo maišyklėje kokybės σ_{mB}^2 , gaunama bitumo kiekio dispersija σ_{MB}^2 , rodanti KMA mišinio maišinio homogeniškumą pagal šį komponentą. Bitumo kiekio KMA mišinio partijoje dispersijos, priklausančios nuo bitumo dozavimo atsitiktinių paklaidų $\sigma_{d.p.B}^2$, ir dispersijos, priklausančios nuo baigiamojo dozavimo mineralinių medžiagų suminės masės maišinyje variacijos $\sigma_{d.p.Qmm}^2$, suma rodo technologinių paruošiamųjų operacijų įtaką, išreiškiamą dispersija $\sigma_{p.o.B.Qma}^2$ (2.12 pav.).

Sumažinus modelyje (2.46) susistemintų dispersijų vertes, sumažėtų bitumo kiekio, pagaminto KMA mišinio partijoje, dispersija σ_B^2 , mišinys taptų vienalytiškesnis, vienodesnės struktūros ir savybių, o dėl to ir aukštesnės kokybės.

Gaminant didesnio vienalytiškumo pagal bitumo kiekį KMA mišinį (kai dėl bitumo dozių masės geresnės atitikties DMF būna mažesnės σ_B vertės), galima leisti mažiau nukrypti x_{Bi} ir $\overline{x_B}$ nuo projekcinio kiekio x_{Bp} . Laiduojant reikiamą KMA mišinio kokybę, nulemtą šalies ekonominio potencialo, prie formulės (2.47) dešinėsios pusės pridėjama liberalumo pataisa Δx_{Bek} , padidinanti Δx_{Btol} vertę.

$$|\Delta x_{Btol}| \geq \left| \overline{x_B} - \mu_B < \frac{z_p \sigma_B}{\sqrt{N}} \right|, \quad (2.47)$$

čia μ_B – bitumo kiekio KMA mišinio partijoje populiacijos vidurkis.

Mažinant liberalumo pataisos Δx_{Bek} vertę, geriau išnaudojamos ASMA bitumo dozatoriaus ir visos jo sistemos techninės galimybės, bet sudėtingesnis ir atsakingesnis būna operatoriaus darbas.

2.4.2. Medžiagų dozavimo proceso statistiniai parametrai ir karšto maišymo asfaltą sudarančių komponentų kiekio tolerancijos

Atskirose šalyse KMA mišinio komponentų kiekio tolerancijos nuo DMF skiriasi (2.3 lentelė). Faktinius komponentų kiekio nuokrypius galima nustatyti tik imant iš pagaminto mišinio reprezentatyvius ėminius ir tiriant juos laboratorijoje. Laboratorinio tyrimo duomenys lyginami su kiekvieno komponento kiekio statistinėmis tolerancijomis Δx_{tol} . Atskirieji ėminiai, kuriuose komponento kiekio nuokrypiai nuo DMF yra mažesni už statistines tolerancijas, laikomi kokybiškais ir rodo, kad mišinio gamybos technologinio proceso parametrai nenukrypę nuo reikiamų.

Tyrime (Bražiūnas, Sivilevičius 2011) lygintas bitumo faktiškasis kiekis i -jame ėminyje x_{Bi} (masės %) su jo projektiniu kiekiu x_{Bp} . Apskaičiuotas skirtumas, rodantis bitumo kiekio nuokrypį nuo DMF Δx_{Bi} , kuris labiausiai priklauso nuo bitumo dozės masės. Iš ėminio atskyrus tirpųjį bitumą ir išsijojus KMA mišinio mineralinę dalį, nustatyta mišinio granulimetrinė sudėtis. Mineralinė dalis skirstoma į tris komponentus: mikroužpildą (mineralinius miltelius – MM), smulkiąją mineralinę dalį (smėlį – SM) ir stambiają mineralinę dalį (skaldą – SK). Mineralinių miltelių faktiškasis kiekis i -jame ėminyje x_{MMi} (masės %) lygintas su KMA mišinio recepte numatytu projektiniu kiekiu x_{MMP} . Apskaičiuotas skirtumas (nuokrypis) Δx_{MMi} . Atitinkamai buvo lyginami smėlio ir skaldos faktiškieji kiekiai (x_{SMi} ir x_{SKi}) su šių komponentų projekciniais kiekiais (x_{SMP} ir x_{SKp}) bei apskaičiuoti nuokrypiai nuo DMF (Δx_{SMi} ir Δx_{SKi}). Bitumo ir mine-

ralinių komponentų kiekių KMA mišinyje nuokrypiai nuo DMF skaičiuojami pagal lygtis:

$$\Delta x_{Bi} = x_{Bi} - x_{Bp}, \quad (2.48)$$

$$\Delta x_{MMi} = x_{MMi} - x_{MMp}, \quad (2.49)$$

$$\Delta x_{SMi} = x_{SMi} - x_{Smp}, \quad (2.50)$$

$$\Delta x_{SKi} = x_{SKi} - x_{SKp}. \quad (2.51)$$

Visų komponentų faktiškųjų nuokrypių nuo DMF Δx_{Bi} , Δx_{MMi} , Δx_{SMi} , Δx_{SKi} moduliai pagal IT ASFALTAS 08 privalo būti mažesni už nustatytas tolerancijas atskiriesiems komponentams (x_{Bp} , x_{MMp} , x_{Smp} , x_{SKp}):

$$|\Delta x_{Bi}| < |\Delta x_{Btol}|, \quad (2.52)$$

$$|\Delta x_{MMi}| < |\Delta x_{MMtol}|; \quad (2.53)$$

$$|\Delta x_{SMi}| < |\Delta x_{SMtol}|; \quad (2.54)$$

$$|\Delta x_{SKi}| < |\Delta x_{SKtol}|. \quad (2.55)$$

Bitumo, mineralinių miltelių, smėlio arba skaldos darbų sezono metu visuose tirtuose ėminiuose nustatytų komponentų kiekių nuokrypių nuo DMF aritmetiniai vidurkiai $\overline{\Delta x_B}$, $\overline{\Delta x_{MM}}$, $\overline{\Delta x_{SM}}$, $\overline{\Delta x_{SK}}$ skaičiuojami pagal:

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}. \quad (2.56)$$

Atskirų ėminių kiekvieno komponento kiekio nuokrypius nuo DMF rodo standartinis nuokrypis, skaičiuojamas pagal formulę:

$$s_{\Delta x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{n-1}}, \quad (2.57)$$

čia n – per darbų sezoną ištirtų KMA mišinio ėminių skaičius; Δx_i – komponento kiekio i -jame KMA mišinio ėminyje nuokrypis nuo DMF, %.

Bet kurio komponento kiekio KMA mišinyje padėties ($\bar{x}$) ir sklaidos (s_x) parametrai skaičiuojami:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.58)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.59)$$

čia x_i – komponento kiekio i -jame KMA mišinio ėminyje, masės %.

Tyrimo naudojami komponentų padėties ir sklaidos parametrai (aritmetinis vidurkis $\bar{\Delta x}$ ir standartinis nuokrypis $s_{\Delta x}$) buvo randami iš paimtų ir laboratorijoje ištirtų ekstrahuojant bitumą ėminių. Teigiame, kad atsitiktinio dydžio x atskirų verčių x_i nuokrypių (skirtumo) Δx_i nuo bet kurio pastovaus skaičiaus, pavyzdžiui, projektinės vertės x_p standartinis nuokrypis $s_{\Delta x}$ yra lygus atskirų verčių x_i standartiniam nuokrypiui s_x .

Matematinės statistikos teorijoje yra žinoma, kad jeigu iš visų požymio reikšmių (šiuo atveju x_i) atimsime pastovų dydį x_p , tai dispersija nepasikeis. Todėl nuokrypių kvadratų vidurkis gali būti apskaičiuotas ne tik iš tiriamojo požymio reikšmių, bet ir iš jų nuokrypių nuo kurio nors pastovaus dydžio (šiuo atveju DMF). Grafiškai pavaizduotos dviejų ėminių komponento kiekio x_i pertekliaus (2.13 pav. a) ir trūkumo (2.13 pav. b) padėties nuo DMF rodo, kad absoliučių verčių x_i ir Δx_i aritmetiniai vidurkiai $\bar{x}$ ir $\bar{\Delta x}$ skiriasi, o standartiniai nuokrypiai s_x ir $s_{\Delta x}$ yra vienodi.

Kai sklaidos parametrai skaičiuojami naudojant komponentų kiekio absoliučias vertes, tai jų dispersija:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.60)$$

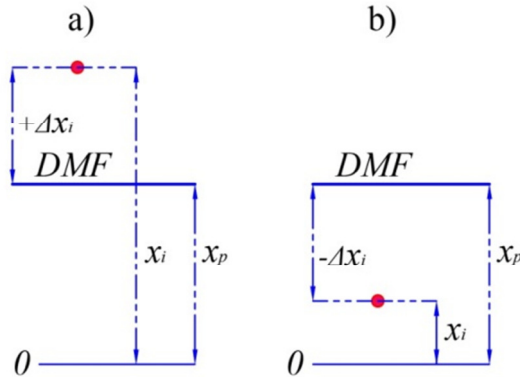
Jei iš (2.63) formulės skliaustuose esančio kiekvieno dydžio atimsime tokį patį dydį x_p , tai gausime nuokrypių dispersiją:

$$s_{\Delta x}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - x_p) - (\bar{x} - x_p)]^2. \quad (2.61)$$

Kadangi, $x_i - x_p = \Delta x_i$ ir $\bar{x} - x_p = \bar{\Delta x}$, tai atlikę veiksmus gausime:

$$s_{\Delta x}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_p - \bar{x} + x_p)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = s_x^2, \quad (2.62)$$

t. y. $s_{\Delta x}^2 = s_x^2$.



2.13 pav. i -tojo komponento kiekio nuokrypiai nuo darbinės mišinio formulės, kai: a – teigiamas nuokrypis (perteklius); b – neigiamas nuokrypis (trūkumas)

Fig. 2.13. i component content deviation from job-mix formula, when: a – positive deviation (surplus), b – negative deviation (deficit)

Taikant šias standartinių nuokrypių ir dispersijų savybes, galima turint tik projektinę vertę x_p ir komponento kiekio KMA mišinio ėminiuose nuokrypius Δx_i , o ne absoliučias x_i vertes, priklausančias nuo konkretaus projekto, apskaičiuoti komponento kiekio sklaidos parametrus. Žinome, kad per darbų sezoną ASMA gaminamas įvairių rūšių ir tipų KMA mišinys su skirtingu projektiniu kiekvieno komponento x_p . Tiriant ASMA galimybes atitikti statistinių tolerancijų reikalavimus, galima skaičiuojant standartinį nuokrypį s_x ar dispersiją s_x^2 , vietoje absoliučių verčių x_i naudoti nuokrypius Δx_i . Tai leidžia visų projektinių sudėčių KMA mišinius nagrinėti kaip visumą nustatant bet kurio komponento kiekio KMA mišinyje stabilumą (sklaidą, variaciją).

Kelių asfaltbetonio danga tiesiama pagal dabar Lietuvoje galiojančio norminio dokumento – IT ASFALTAS 08 reikalavimus, kuriame KMA mišinyje esančių komponentų (bitumo, mineralinių miltelių, smėlio, skaldos) kiekio leidžiamieji nuokrypiai Δx_{itol} ir Δx_{Btol} nuo jų projektinės vertės x_{ip} ir x_{Bp} skiriasi ir priklauso nuo tikrajam kiekiui $\bar{x}_i$ ir $\bar{x}_B$ nustatyti ištirtų atskirųjų pavyzdžių (tūrinių vieningų ėminių) skaičiaus N . Imties didumas N , rodantis ją sudarančių

atskirųjų pavyzdžių visumą, sutapatintas su neapibrėžtu terminu „bandymų rezultatai“, kurių aritmetinio vidurkio didžiausi tikrieji (o ne leidžiami!) nuokrypiai Δx_i ir Δx_B nuo projekcinės reikšmės negali būti didesni už leidžiamuosius Δx_{itol} ir Δx_{Btol} . Norėdami nustatyti, ar KMA mišinys gaminamas pagal projektą pakankamai tiksliai, imame labai mažą jo dalį taip, kad turiniai vieniniai ėminiai (pavyzdžiai) būtų reprezentatyvūs, t. y. iš jų atsitiktinai sudaryta imtis turėtų visas tas savybes, kurias turi visa populiacija (generalinė visuma).

Populiacija dažniausiai laikomas per vieną darbo dieną pagal tą patį sudėties projektą pagamintas (vienos partijos) KMA, tiekiamas to paties objekto dangai tiesti. Jos sąvoka gali būti išplėsta, kai kelias arba daug dienų iš tos pačios projekcinės sudėties KMA tiesiama „stambaus“ objekto danga: čia neišvenigiami pertrūkiai tarp darbo dienų.

Lietuvoje visi periodinio (nutrūkstamo, diskretinio) veikimo ASMA KMA mišinį gamina pagal klasikinę technologiją, pasižyminčią tuo, kad išdžiovintas ir įkaitintas pradinių mineralinių medžiagų srautas papildomai išsijojamas į 3–5 karštąsias frakcijas, kurias porcijomis sudozavus su mineraliniais milteliais, mineraliniu dulkiu ir bitumu, priverstinai sumaišomos ir periodiškai išpilami KMA atskiri maišiniai (Sivilevičius *et al.* 2003). Kiekvieno maišinio sudėtis skiriasi, dėl to ji skiriasi ir nuo projekcinės sudėties. Šių skirtumų didumą nulemia KMA gamybos technologinio proceso ir pradinių medžiagų savybės. Naudojant vienašlytes pradines mineralines medžiagas ir nustačius bei palaikant tinkamus technologinio proceso parametrus, užtikrinama tiksli ir stabili gaminamo KMA maišinių sudėtis.

Gaminamo KMA kiekvieno atskiro maišinio tikroji sudėtis priklauso nuo dviejų svarbiausių technologinių veiksnių:

- galutinai dozuojamų ASMA sijotuvu išsijotų karštųjų frakcijų, šaltųjų mineralinių miltelių ir mineralinio dulkių granulimetrinės sudėties;
- visų galutinai dozuojamų mineralinių medžiagų ir bitumo dozių tikrosios masės.

Trečiuoju technologiniu veiksniu, nulemiančiu visų maišinyje esančių komponentų tolygų pasiskirstymą erdvėje, pagrįstai galima laikyti sudozuotų medžiagų sumaišymo diskretinėje maišyklėje kokybę.

Kai techniškai tvarkingoje maišyklėje medžiagos pakankamai ilgai maišomos, KMA mišinys būna homogeniškas, o tai reiškia, kad iš bet kurios jo vietos paimtas pakankamos masės vieninis ėminys (atskirasis pavyzdys) turi vienodą visų komponentų kiekį, kuris labai artimas vidutiniam jo kiekiui maišinyje. Homogeniškus KMA maišinius sudarančių komponentų procentinės masės skirtumas, kurių didumą rodo sklaidos įverčiai – standartinis nuokrypis σ ir dispersija σ^2 , ir nuokrypius nuo projekcinio kiekio, kurių didumą rodo absoliutusias nuo-

krypis Δx , nulemia pirmieji du technologiniai veiksniai, t. y. medžiagų granulimetrinė sudėtis ir dozavimo paklaidos.

Todėl, norint nustatyti technologinių veiksnių įtaką gaminamo KMA sudėčiai ir dėl jų atsiradusius komponentų kiekio nuokrypius nuo projekto bei sklaidą, reikia tirti KMA atskirus maišinius, o ne kelių sumaišytų maišinių visumą. Sudarius vieną sudėtinį ėminį iš kelių kaupiamajame bunkeryje sumaišytų maišinių, esančių automobilio kėbule, skirtingų vietų skirtingų vietų paimtų KMA mišinio elementariųjų ėminių (o ne iš vieno maišinio), neatskleidžiama svarbiausių technologinių veiksnių įtaka nuokrypių didumui ir būtinųjų korektyvų reikiamos vertės. Nebūna aišku, ar didelius komponentų kiekio nuokrypius nuo DMF nulėmė pakitusi baigiamojo dozavimo mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis ar ir netinkama jų ir bitumo dozių masė.

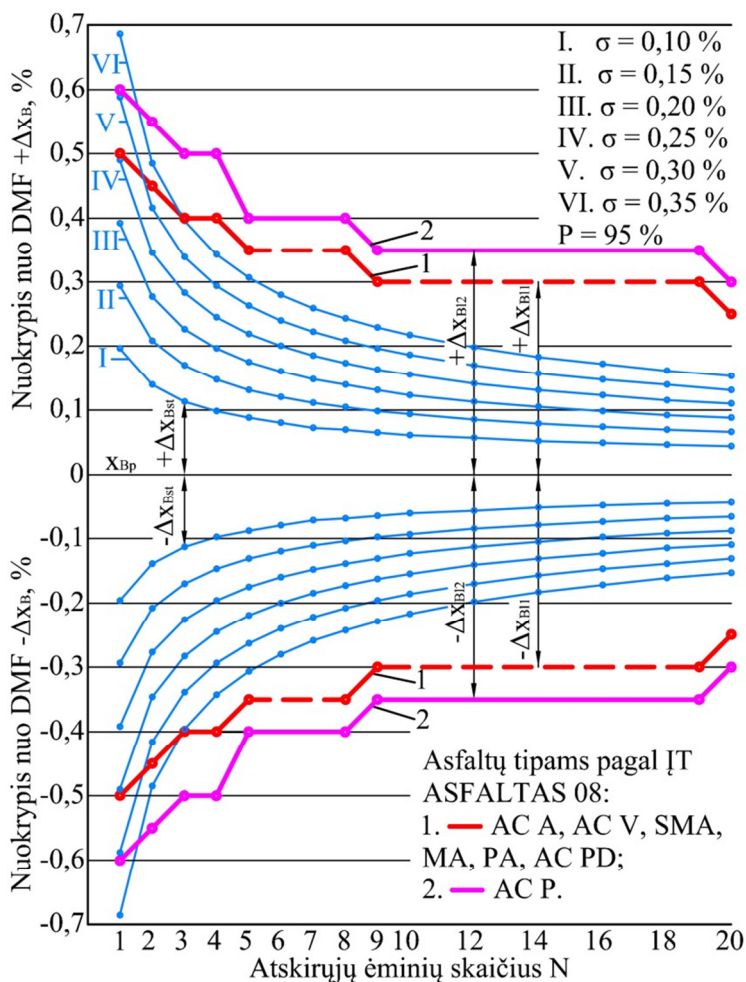
Iš kelių KMA maišinių skirtingų vietų paimtų dalių sudaryto atskirojo pavyzdžio (iš tikrųjų vidutinio pavyzdžio) gautas faktiškasis komponento kiekio x_i ir x_B nuokrypis Δx_i ir Δx_B lyginamas su didžiausiu leidžiamu jo kiekio nuokrypiu, nustatytu atskirajam pavyzdžiui (kai $N = 1$, $\Delta x_{itol} = \max, \Delta x_{Btol} = \max$). Kai atskirasis pavyzdys iš tikrųjų yra vidutinis pavyzdys, o iš jo gauti bandymo duomenys lyginami su atskirojo pavyzdžio didžiausiais leidžiamaisiais komponentų kiekio nuokrypiais, tai visada gaunami geresni rezultatai. Tokie „paslėpta“ pavyzdžių ėmimo ir duomenų lyginimo su statistinėmis tolerancijomis neatitiktis pagerina tikrąją būklę, nes leidžia priimti nekokybišką produkciją ir neskatina gerinti KMA gamybos kokybės.

Žinant tikrąją vienos partijos KMA mišinyje esančio i -ojo komponento sklaidą, kurią rodo jo kiekio standartinis nuokrypis σ_i , nustatytą iš N didumo imties, ir reikiamą patikimumo koeficientą t , priklausantį nuo pasirinktos tikimybės P , galima apskaičiuoti, kiek statistiškai daugiausiai gali skirtis iš N imties nustatytas aritmetinis vidurkis $\bar{x}_i$ nuo populiacijos (generalinės visumos) tikrojo vidurkio μ (matematinės vilties):

$$\Delta x_{i\ st} = \left| \bar{x}_i - \mu_i \right| < t \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (2.63)$$

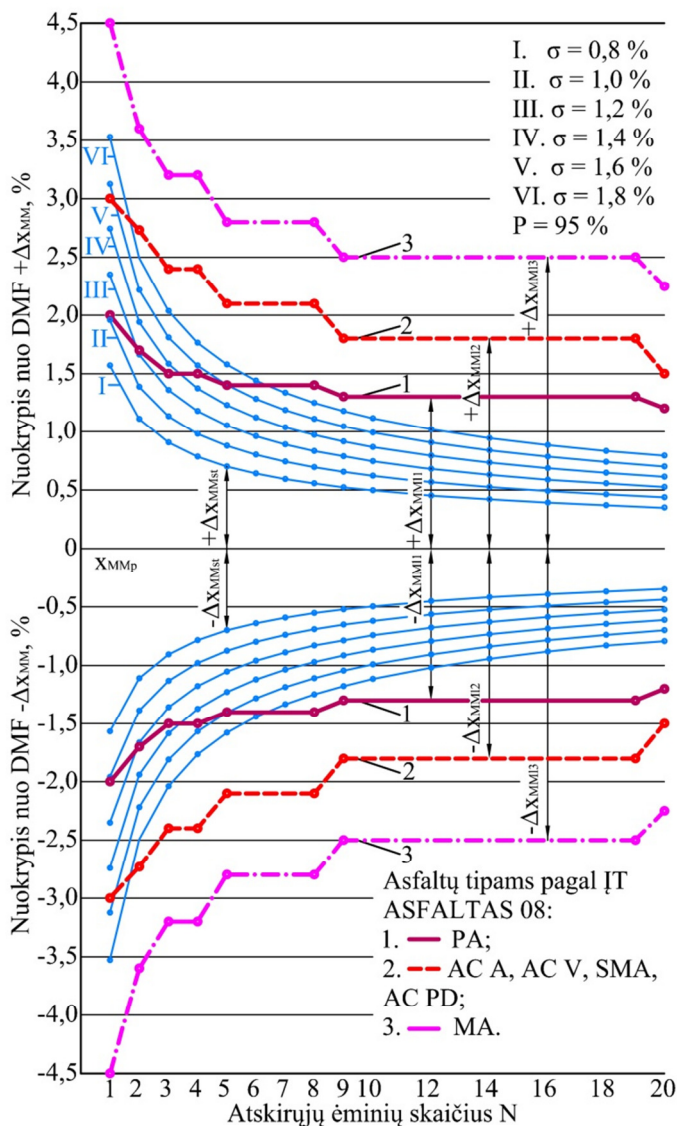
Dažniausiai naudojama $P = 95\%$ tikimybė, kurios $t = 1,96$. Pasirinkus bitumo kiekio KMA mišinio partijoje standartinį nuokrypį σ nuo $0,1\%$ iki $0,35\%$ (žingsniu $0,05\%$), mineralinių miltelių kiekio – σ nuo $0,8\%$ iki $1,8\%$ (žingsniu $0,2\%$), apskaičiuotos $\Delta x_{i\ st}$ ir $\Delta x_{B\ st}$ vertės, kai imties didumas N kinta nuo 1 iki 20. Iš skaičiuojamojo eksperimento nubrėžtos kiekvieno minera-

linio komponento ir bitumo kiekio statistiškai leidžiamųjų nuokrypių $\Delta x_{i\ st}$ ir $\Delta x_{B\ st}$ nuo projektinių jų verčių x_{ip} ir x_{Bp} kitimo kreivės (2.14–2.15 pav.).



2.14. pav. Karšto maišymo asfalto mišinyje esančio bituminio rišiklio kiekio statistinės tolerancijos ir jų verčių pagrindimas, esant šio komponento kiekio skirtingai sklaidai (standartiniam nuokrypiui σ) ir patikimumui $P = 95\%$

Fig. 2.14. Statistical tolerances and their substantiation of bitumen binder content in hot mix asphalt mixture at various dispersion of this component content (standard deviation σ) and dependability $P = 95\%$



2.15. pav. Karšto maišymo asfalto mišinyje esančių mineralinių miltelių kiekio statistinės tolerancijos ir jų pagrindimas, esant šio komponento kiekio skirtingai sklaidai (standartiniam nuokrypiui σ) ir patikimumui $P = 95\%$

Fig. 2.15. Statistical tolerances and their substantiation of mineral filler content in hot mix asphalt mixture at various dispersion of this component content (standard deviation σ) and dependability $P = 95\%$

Kitimo kreivės rodo, kiek statistškai daugiausiai gali skirtis iš N didumo imties nustatytas KMA komponento kiekis nuo jo projekcinio kiekio, kai populiacijos komponento kiekis atitinka sudėties projekto reikalavimus.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Teoriniais tyrimais iš Witczak ir kitų tyrėjų bituminio rišiklio trumpalaikio ir ilgalaikio senėjimo prognozavimo pradinių ir patikslintų matematinių modelių (regresijos lygčių) nustatyta, kad bitumo temperatūra, klampa ir efektyvusis jo kiekis mišinyje, priklausantis nuo rišiklio dozavimo paklaidų, turi įtakos pagaminto KMA mišinio dinaminiam moduliiui E . Didėjanti bitumo klampa trumpąjį laikotarpį didina dinaminį modulį, tačiau ilguoju laikotarpiu kelio dangos sluoksnio asfaltas dėl didesnės bitumo klamos pradeda aižėti. Efektyviojo bitumo kiekio didėjimas nuosekliai mažina E vertę. Oro tuštymų kiekis iki 3,5 % neturi įtakos, o daugiau kaip 3,5 % mažina dinaminį modulį E .

2. Periodinio veikimo (gamybos mišiniais) asfalto maišytuvo (ASMA) skirtingos atsverto bitumo išpylimo į maišyklę sistemos – jį išpilant didelio debito gravitaciniu srautu (DDGS) ir aukšto slėgio čiurkšle (ASČ) – nebuvo palygintos nei teoriniu, nei eksperimentiniu tyrimais, įrodančiais jų privalumus ir trūkumus. Kelis dešimtmečius praktikoje naudota ASČ sistema mokslininkų ir gamybininkų buvo laikoma kaip tinkamesnė, nes ji leidžia iš dozatoriaus bako išpiltą bitumą greičiau pervesti plėvelėmis, dengiančiomis mineralines daleles, sudarant tarpinio būvio smulkius lašus bei čiurkšles ir sutrumpinti maišymo trukmę. Ištyrus pilamo bitumo oksidacijos spartą, išreiškiamą karbonilų kiekiu, pasirodė, kad ji yra tuo intensyvesnė, kuo didesnis bitumo paviršiaus plotas ir šilumos laidumas, ilgiau liečiasi su oro deguonimi, aukštesnė temperatūra, mažesni lašai ar mažiau išsiplėtusios čiurkšlės. Matematinis modelis, sudarytas iš difuzijos ir šilumos laidumo uždavinių leidžia nustatyti oro deguonies slėgio pasiskirstymą bitumo plėvelės gylyje, CO_2 koncentraciją ir susiformavusių karbonilų kiekį.

3. Geriausias asfalto mišinio ir iš jo įrengtos kelio dangos sluoksnio savybes užtikrina tik tam tikras bitumo kiekis, kuriam esant visi mineraliniai grūdėliai būna padengti ištisinėmis orientuoto bitumo plėvelėmis, o tūrinio bitumo kiekis būna toks, kuris leidžia sudaryti reikiamą uždarų ir atvirų oro tuštymų turį tarpgrūdelinę erdvę. Bitumo trūkumas ar perteklius asfalto mišinyje blogina KMA mišinio struktūrą ir savybes, todėl jo kiekis turi būti optimalus, kuris projektuojant asfalto mišinio komponentinę sudėtį pateikiamas darbinėje mišinio formulėje (DMF).

4. Pagaminto KMA mišinio partijoje komponentų kiekis pasiskirsto pagal normalųjį (Gauso) dėsnį. Pritaikius dispersijų savybes adityviniame matemati- niame modelyje nustatyta, kad bitumo kiekio KMA mišinyje sklaidą rodančią

dispersiją sudaro bitumo ir baigiamojo dozavimo karštųjų bei šaltųjų mineralinių medžiagų dozavimo atsitiktinės valdomos paklaidos, taip pat neatskiriama dispersija, priklausanti nuo skirtingo dydžio grūdelių geriausio (tolygaus) galimo pasiskirstymo KMA mišinio maišinyje ir juos gaubiančio bitumo plėvelių storio vienodumo, esant homogeniškiausiam mišiniui.

5. Bitumo ir mineralinių komponentų kiekio gaminamame KMA mišinyje statistinėms tolerancijoms (leidžiamiesiems nuokrypiams nuo DMF) nustatyti panaudojus pagal skirtingus sudėties projektus pagamintų asfalto mišinių faktiškųjų nuokrypių nuo DMF standartinį nuokrypį KMA mišinyje, apskaičiuoti komponentų absoliučiąjų procentinių kiekių standartiniai nuokrypiai, leidę nustatyti ir įvertinti faktiškąsias ASMA technologines galimybes. Iš per KMA mišinio gamybos visą sezoną faktiškųjų nuokrypių nuo DMF apskaičiavus komponentų kiekio faktiškąsias absoliučias procentines vertes padidėja imtis ir duomenų sklaidos (glaudumo) patikimumas, leidžiantis tiksliau apskaičiuoti komponentų kiekio gaminamame KMA mišinyje statistines tolerancijas. Šis naujas būdas leidžia moksliskai pagrįsti komponentų kiekio KMA mišinyje leidžiamuosius nuokrypius, susietus su dabar naudojamų ASMA technologinėmis galimybėmis.

6. Laboratorijoje suprojektuoto KMA mišinio komponentinės sudėties (DMF) turi būti paisoma mišinio gamybos ASMA laikotarpiu. Dėl neišvengiamų sistemingųjų ir atsitiktinių KMA mišinio gamybos paklaidų, kurių vertes galima valdyti, bitumo ir mineralinių komponentų (mineralinių miltelių, $\geq 0,063$ mm; smėlio, 0,063–2 mm; skaldos, > 2 mm) kiekis, nustatytas iš sudėtinių ėminių (pagal LST EN 12697–27) arba jų vidurkio, skiriasi nuo DMF kiekių. Komponentų kiekių nuokrypių nuo DMF leidžiamas dydis turi būti statistiskai bei ekonomiškai pagrįstas ir mišinių gamintojams sudaryti sąlygas geriau išnaudoti veikiančių ASMA konstrukcines ir technologines galimybes pagerinti KMA mišinio gamybos kokybę.

Bitumo dozavimo sistemos technologinių parametų įtakos karšto maišymo asfalto mišinio kokybei tyrimas

Pagal antrajame skyriuje pateiktą metodologiją statistiškai tiriamas Lietuvoje veikiančio ASMA komponentų dozavimo tikslumas. Pateikti susisteminti ilgamečių laboratorinių tyrimų rezultatai, gauti paėmus ir ištyrus reprezentatyvius KMA mišinių ėminius per keturis gamybos sezonus. Apskaičiuoti nuo medžiagų dozavimo tikslumo ir stabilumo priklausantys asfalto mišinio komponentų nuokrypių nuo DMF statistiniai rodikliai. Šio skyriaus medžiaga buvo publikuota straipsniuose: Bražiūnas, Sivilevičius (2013), Bražiūnas, Sivilevičius (2010).

3.1. Pagaminto KMA mišinio komponentų faktiškieji nuokrypiai

Nuo 2008 metų pradžios įsigaliojusiame naujame norminiame dokumente, parengtame pagal Lietuvos standartus, atitinkančius Europos Sąjungos normas, TRA ASFALTAS 08 susistemintos svarbiausios asfalto mišinių techninių reika-

lavimų nuostatos. Šiuo aprašu įgyvendinami šie Lietuvos standartai: LST EN 13108 – 1, LST EN 13108 – 5, LST EN 13108 – 6, LST EN 13108 – 7, LST EN 13108 – 20 ir LST EN 13108 – 21. Pagal LST EN– 13108 serijos Lietuvos standartus, skirtus bituminiams mišiniams (medžiagų reikalavimams), parengtus 2006 m. rugsėjo mėn., bituminiai mišiniai skirstomi į 7 rūšis (3.1 pav.).

Iš šių 7 grupių bituminių mišinių įrengti kelio dangos sluoksniai gali būti regeneruojami. Visų 7 rūšių bituminių mišinių gamybai leidžiama naudoti tam tikrą naudoto asfalto granulį (NAG) (angl. *Reclaimed Asphalt RA* arba *Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*) kiekį. Schemoje (3.1 pav.) nukreiptomis žemyn rodyklėmis vaizduojama jų galimybė virsti naudotuoju asfaltu, kurio medžiagoms keliams techniniai reikalavimai pateikti LST EN 13108-8.

Pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08 asfalto mišiniai Lietuvos Respublikoje skirstomi į 4 grupes (3.2 pav.). Jame išdėstyti reikalavimai asfalto mišiniams, naudojamiems įrengti dangų konstrukcijas valstybinės reikšmės keliuose. Šis dokumentas taip pat gali būti taikomas vietinės reikšmės keliams (gatvėms), kitoms eismo zonoms.

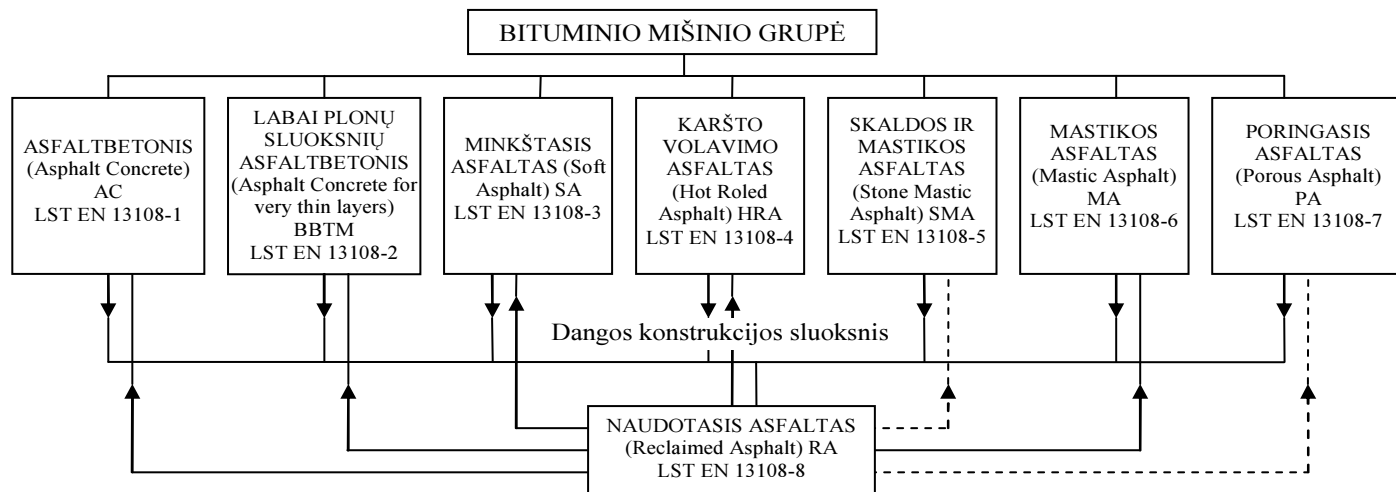
Grupės *Asfaltbetonis* asfalto mišiniai skirstomi į 4 tipus: asfalto viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mišinys (žymimas AC V), asfalto viršutinio sluoksnio mišinys (žymimas AC A), asfalto pagrindo – dangos sluoksnio mišinys (žymimas AC PG) ir asfalto pagrindo sluoksnio mišinys (žymimas AC P).

Periodinio veikimo asfalto maišytuve (ASMA) bitumo ir baigiamojo dozavimo mineralinių medžiagų (mineralinių miltelių, mineralinio dulkių ir karštųjų frakcijų) dozavimo sistemų (dozatoriais) atsvertų dozių masės turi būti tokios, kad iš jų gaunamų komponentų (bitumo (B), mineralinių miltelių (MM), smėlio (SM) ir skaldos (SK) procentinis kiekis karštai maišyto asfalto (KMA) mišinio partijos visuose maišiniuose atitiktų projektinį kiekį, nustatytą darbinėje mišinio formulėje (DMF).

Bitumo ir mineralinių komponentų kiekio KMA mišiniuose savikontrolė atliekama stebint technologinį procesą. Valstybinę kontrolę atliekanti įmonė nuolat kontroliuoja kelių tiesybos projektus. Laboratoriniais būdais gauti duomenys apie gamybos technologinį procesą, medžiagų kokybę, jų kiekius pateikiamos operatoriui, kuris atitinkamai keičia gamybos proceso parametrus. Įmonė tiria ir jau paklotą asfalto dangą. Nustatoma, ar pasikeitė pagaminto KMA mišinio sudėtis ir savybės transportavus ir klotuvu paklojus asfalto dangos sluoksnį.

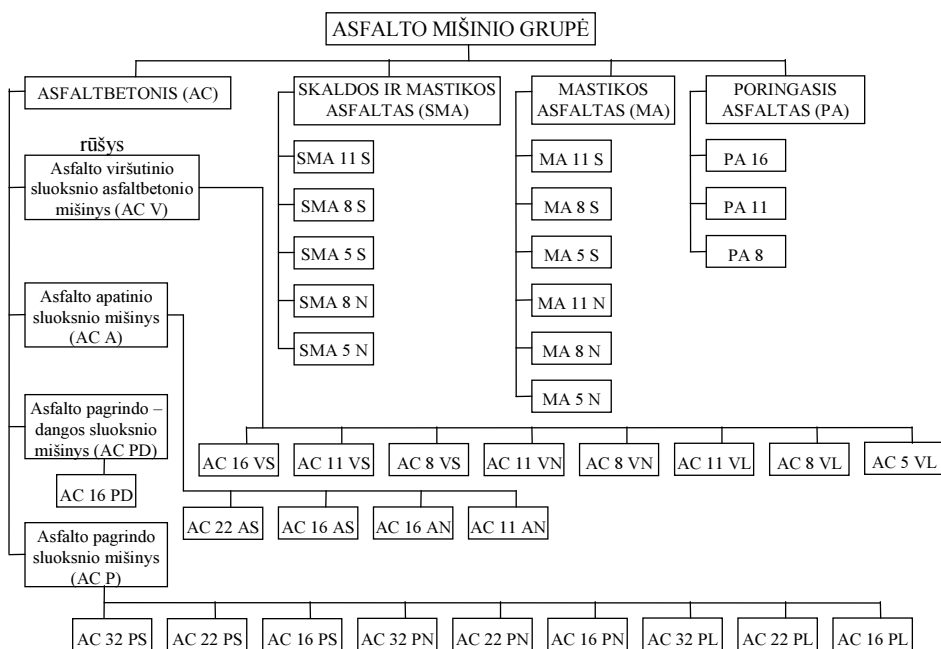
Kiek iš tikrųjų dozuojant yra atmatuota ir į maišyklę supilta bitumo ir mineralinių medžiagų, galima nustatyti trimis tiesioginiais ir netiesioginiais būdais:

- iš tiriamųjų dozių masės kompiuterinio valdymo programoje užfiksuotų duomenų arba ciferblatinio rodytuvo rodmenų, stebimų KMA mišinio gamybos metu;



3.1 pav. Lietuvos standartuose pateiktų bituminių mišinių, naudojamų automobilių kelių dangos konstrukcijos sluoksniams rengti, klasifikavimo pagal mišinių grupę (rūšį) schema

Fig. 3.1. Scheme of classification of bitumen mixtures used in road pavements by group (type) in Lithuanian standards



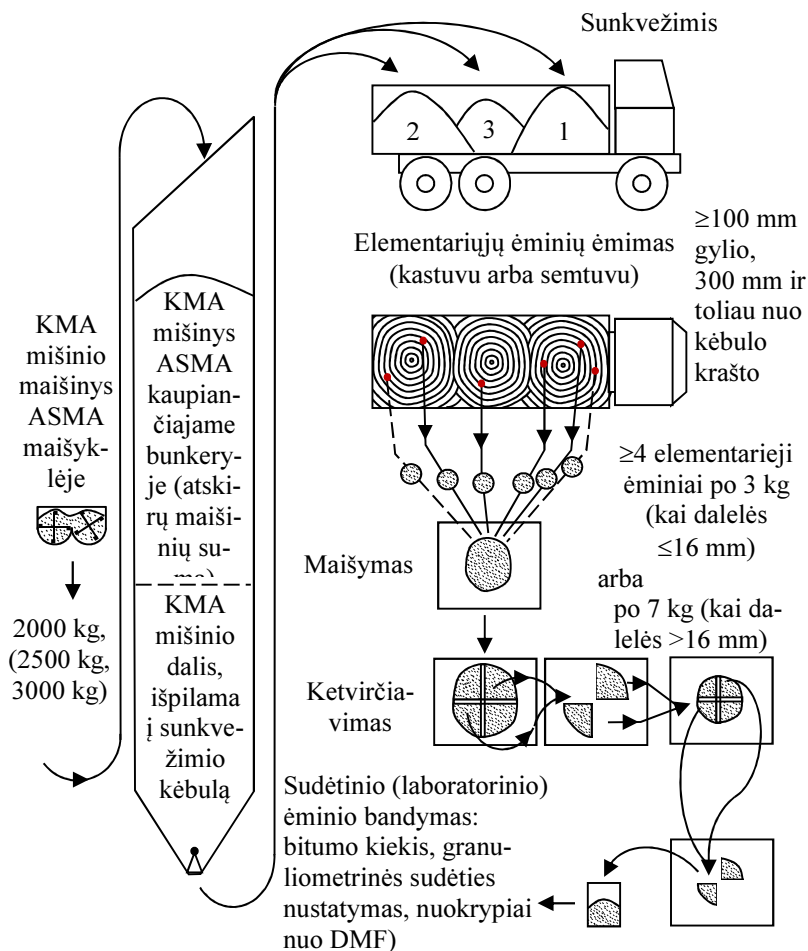
3.2 pav. Automobilių kelių asfalto mišinių, naudojamų įrengti valstybinės reikšmės kelių dangos konstrukciją, klasifikavimo techninių reikalavimų apraše TRA ASFALTAS 08 į grupes, rūšis ir tipus, pagal paskirtį ir apkrovas, schema

Fig. 3.2. Scheme of road asphalt mixtures used in state road pavement structure in the classification of technical requirements inventory TRA ASFALTAS 08 by groups, categories and types according to their function and loads

- imant pagaminto KMA mišinio tiriamo maišinio, krįntančio iš maišyklės, reprezentatyvų ėminį ir, išekstrahavus tirpųjį bitumą, nustatant jo ir kitų mineralinių komponentų kieki;
- imant pagaminto KMA mišinio, išbyrėjusio iš kaupiamojo bunkerio į automobilio kėbulą, reprezentatyvų ėminį kaip nurodyta LST EN 12697-27.

Šiame darbe naudojami duomenys gauti taikant trečiąjį komponentų kiekio KMA mišinyje nustatymo būdą (3.3 pav.). Per keturis gamybos sezonus vienoje Lietuvos Respublikoje veikiančioje asfalto gamykloje kiekvieną darbo dieną laboratorijos darbuotojai iš ASMA ėmė KMA mišinio reprezentatyvų ėminį, apibūdinantį vienos mišinio partijos atitiktį DMF. Buvo gaminami skirtingų rūšių ir tipų KMA mišiniai. Tyrimams iš viso buvo paimti 765 reprezentatyvūs ėminiai. Laikantis standartuose numatytų procedūrų, iš kiekvieno ėminio asfalto gamyklos laboratorijoje ekstrahuojant buvo atskirtas tirpusis bitumas ir sijojant nustatyta granulimetrinė sudėtis. Lietuvoje šiuo metu galiojantis norminis dokumentas IT

ASFALTAS 08 (2008) nustato reikalavimus, kuriuos turi atitikti asfalto mišinio sudėtis.



3.3 pav. Karšto maišymo asfalto mišinio sudėtinio ėminio sudarymo iš elementariųjų ėminių seka (pagal LST EN 12697-27)

Fig. 3.3. The sequence of constitution of bulk sample from the elementary samples of hot mix asphalt (according to LST EN 12697-27)

Kiekvienas pagaminto KMA mišinio atskirasis sudėtinis ėminys panaudotas tyrime, iš kurio gaunama rišiklio (ir mineralinių komponentų) atskiroji vertė, buvo imamas ASMA gamykloje iš sunkvežimio kėbulo, pripildyto KMA mišinio, iškritusio iš kaupiamojo bunkerio, ėminio ėmėjui (laborantui) stovint ant

specialios rampos. Sudėtinis ėminys buvo sudaromas imant KMA mišinio vienišius ėminius iš trimis kūgiais į kėbulą supilto SMA mišinio viršutinės paviršiaus dalies. Pagal LST EN 12697-27 standartą elementarieji (ne mažiau nei 4) ėminiai pilami ant šalia esančio švaraus skardos lapo, sumaišomi iki homogeniško ėminių mišinio. Gautas KMA mišinio plokščiaviršis kūgis ketvirčiuojant dalijamas kelis kartus į atskiras dalis, kol lieka KMA mišinio tiek, kiek jo reikia bitumui iš ėminio išekstrahuoti ir mineralinių komponentų kiekiui nustatyti.

Mineraliniai milteliai (MM) (<0,063 mm grūdėliai) yra svarbiausias struktūrą sudarantis asfalto mišinio komponentas. Skirtingai nuo smėlio (SM) ir dar labiau nuo skaldos (SK), mineraliniai milteliai turi didžiausią paviršiaus plotą. Jų plotas sudaro iki 90–95 % visų į asfalto mišinio sudėtį įeinančių mineralinių komponentų suminio paviršiaus ploto. Norint apskaičiuoti kiekvienos mineralinės medžiagos dalelių paviršiaus plotą, pradžioje reikia nustatyti jų vidutinį skersmenį $\bar{d}$. Siaurosios arba plačiosios frakcijos grūdelių vidutiniam skersmeniui skaičiuoti geriausiai tinka ši formulė (Pokac 1977):

$$\bar{d} = \frac{0,4343(D - d)}{\log \frac{d}{D}}, \quad (3.1)$$

čia D – mineralinės medžiagos dalelių dydis, apribotas viršutinio sieto akučių dydžio, mm; d – jos dalelių dydis, apribotas apatinio sieto akučių dydžio, mm. Tokia apibrėžtimi pripažįstama, kad jokios dalelės neužsilaiko ant viršutinio sieto ir jokios dalelės neprabyra per apatinį sietą.

Iš tikrųjų, kaip parodė tyrimai (Sivilevičius *et al.* 2011; Vislavičius, Sivilevičius 2013), karštosios atskirų frakcijų baigiamojo dozavimo mineralinės medžiagos turi tam tikrą procentinį kiekį dalelių, didesnių už D ir mažesnių už d . Aš savo darbe, norėdamas apytikriai apskaičiuoti mineralinių medžiagų dalelių paviršiaus plotą (3.1 lentelė) ir jį palyginti, ėmiau tris prielaidas. Pirma, mineralinės medžiagos neturi didesnių už D ir mažesnių d dalelių. Antra, dalelės yra rutulio formos. Trečia, Fr 0 / 2, Mm ir Md, kurių mažiausios dalelės yra artimos nuliui, vietoje nulio, iš kurio dalyba negalima, ėmiau $d = 0,01$ mm.

3.1 lentelėje pateiktos SMA rūšies 11 S mišinio atskirų baigiamojo dozavimo medžiagų masės ir tūrio proporcijos. Teorinis grūdelių skaičius rodo, kad šaltieji mineraliniai milteliai (Mm) ir mineralinis dulkis (Md), kurių masės dalis yra apie 8 %, sudaro daugiau kaip 78 % viso viename maišinyje esančių mineralinių medžiagų (karštųjų frakcijų Fr 0 / 2, Fr 2 / 5, Fr 5 / 8, Fr 8 / 11 paviršiaus ploto. Tai prilygsta daugiau kaip pusantros futbolo aikštės plotui. Pagrindinė mineralinių miltelių, sudarytų iš Mm ir Md, paskirtis – versti bitumą iš laisvojo į struktūrizuotą (orientuotą) būvį (Королев 1986).

Šiame poskyryje nagrinėjami iš 2006–2009 m. pagamintų KMA mišinių, paimtų ir ištirtų reprezentatyviųjų sudėtinų ėminių laboratorinių tyrimų duome-

nys pagal grafiškai pavaizduotas bitumo, mineralinių miltelių, smėlio ir skaldos kiekio nuokrypių nuo DMF vertes. Pagal galiojančias taisykles, mineralinių miltelių, smėlio ir skaldos leidžiamieji nuokrypiai arba statistinės tolerancijos, kada tiriamas vienas ėminys, yra $\Delta x_{MMtol} = \pm 3,0 \%$, $\Delta x_{SMtol} = \pm 8,0 \%$ $\Delta x_{SKtol} = \pm 8,0 \%$.

3.1 lentelė. Vieną SMA 11 S mišinio maišinį sudarančių baigiamojo dozavimo mineralinių medžiagų masė ir jų dalelių paviršiaus plotas

Table 3.1. HMA component mass, volume and number of particles (SMA 11 S mixture in 2,000 kg mix)

SMA komponentas / frakcija, mm	Masė, kg pagal DMF	Teorinė masės dalis, %	Medžiagos tankis, t/m^3	Medžiagos tūris, m^3	Grūdėlio teorinis skersmuo, mm	Teorinis grūdėlių skaičius, vnt.	Bendras teorinis grūdėlių plotas, m^2	Ploto dalis KMA mišinyje, %
Fr 0 / 2 mm	324	16,2	1,42	0,23	0,56	$2,48 \cdot 10^9$	2443,8	15,8
Fr 2 / 5 mm	162	8,1	1,37	0,12	3,27	$6,44 \cdot 10^6$	216,7	1,4
Fr 5 / 8 mm	478	23,9	1,37	0,35	6,38	$2,56 \cdot 10^6$	327,3	2,1
Fr 8 / 11 mm	734	36,7	1,38	0,53	9,42	$1,22 \cdot 10^6$	339,5	2,2
Mm 0 / 0,063	78	3,9	2,71	0,029	0,029	$2,30 \cdot 10^{12}$	5997,1	38,8
Md 0 / 0,063	80	4	2,71	0,030	0,029	$2,36 \cdot 10^{12}$	6150,9	39,7
Bitumas	138	6,9	1,05	0,13				
Priedai	6	0,3	1,00	0,006				
Iš viso	2000	100		1,42		$4,67 \cdot 10^{12}$	15475,3	100

Kai kurių rečiau gaminamų tipų KMA mišinių šios vertės yra mažesnės. Bitumo kiekio KMA mišinyje statistinės tolerancijos pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Duomenys apie per 4 metus paimtus *Amomatic VS 180 S* asfalto maišytuvo pagaminto karšto maišymo asfalto mišinio sudėtinius ėminius

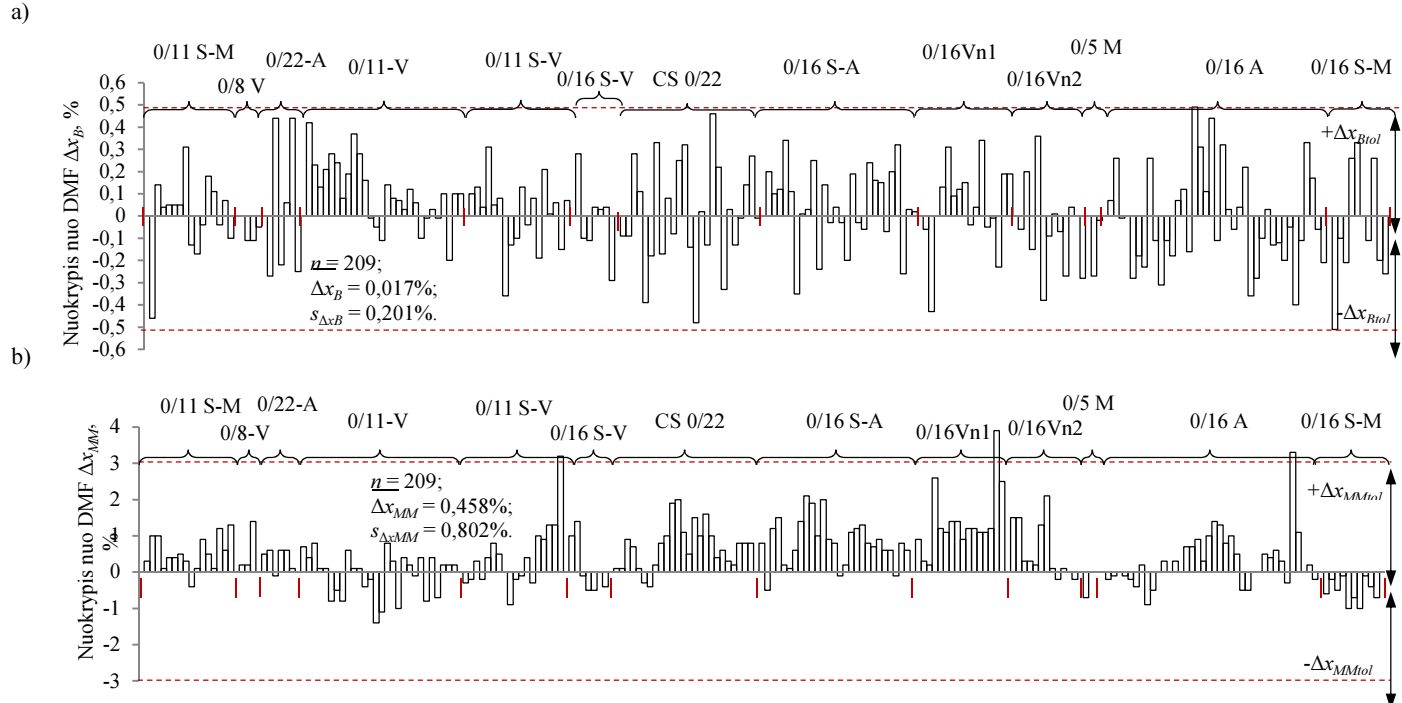
Table 3.2. Data about bukl samples of hot mix asphalt mixture produced by the *Amomatic VS 180 S* asphalt mixing plant taken in the 4 years

Metai	Ėminių ėmimo laikotarpis (mėnuo, diena)	KMA mišinio tipų skaičius	DMF skaičius	Sudėtinių ėminių skaičius
2006	03.01–10.31	12	13	208
2007	03.01–10.31	13	13	232
2008	05.11–12.23	4	8	167
2009	04.14–12.15	13	20	157

Darbe naudoti keturių metų ASMA *Amomatic VS 180 S* pagaminto KMA mišinio sudėtinių ėminių laboratorinių tyrimų duomenys (3.2 lentelė). Atliktas statistinis tyrimas parodė, kad nuo medžiagų dozavimo ir ASMA valdymo sistemų darbo kokybės, operatoriaus veiksmų, medžiagų sijojimo efektyvumo proceso ir kitų veiksnių priklausančys technologiniai parametrai $\overline{\Delta x_B}$, $\overline{\Delta x_{MM}}$, $\overline{\Delta x_{SM}}$, $\overline{\Delta x_{SK}}$ ir $s_{\Delta x_B}$, $s_{\Delta x_{MM}}$, $s_{\Delta x_{SM}}$, $s_{\Delta x_{SK}}$ atitiko taisyklėse IT ASFALTAS pateiktus reikalavimus (3.4–3.5 pav.). Pavyzdžiui, 2006 metais, iš 209 tirtų sudėtinių ėminių, tik viename faktiškas bitumo kiekis buvo už tolerancijų ribos $\Delta x_{Btol} = \pm 0,5 \%$, tai sudaro 0,48 % visų ėminių skaičiaus. Bitumo kiekio KMA mišinyje padėties ir sklaidos statistiniai parametrai buvo: $\overline{\Delta x_B} = 0,017 \%$ ir $s_{\Delta x_B} = 0,201 \%$.

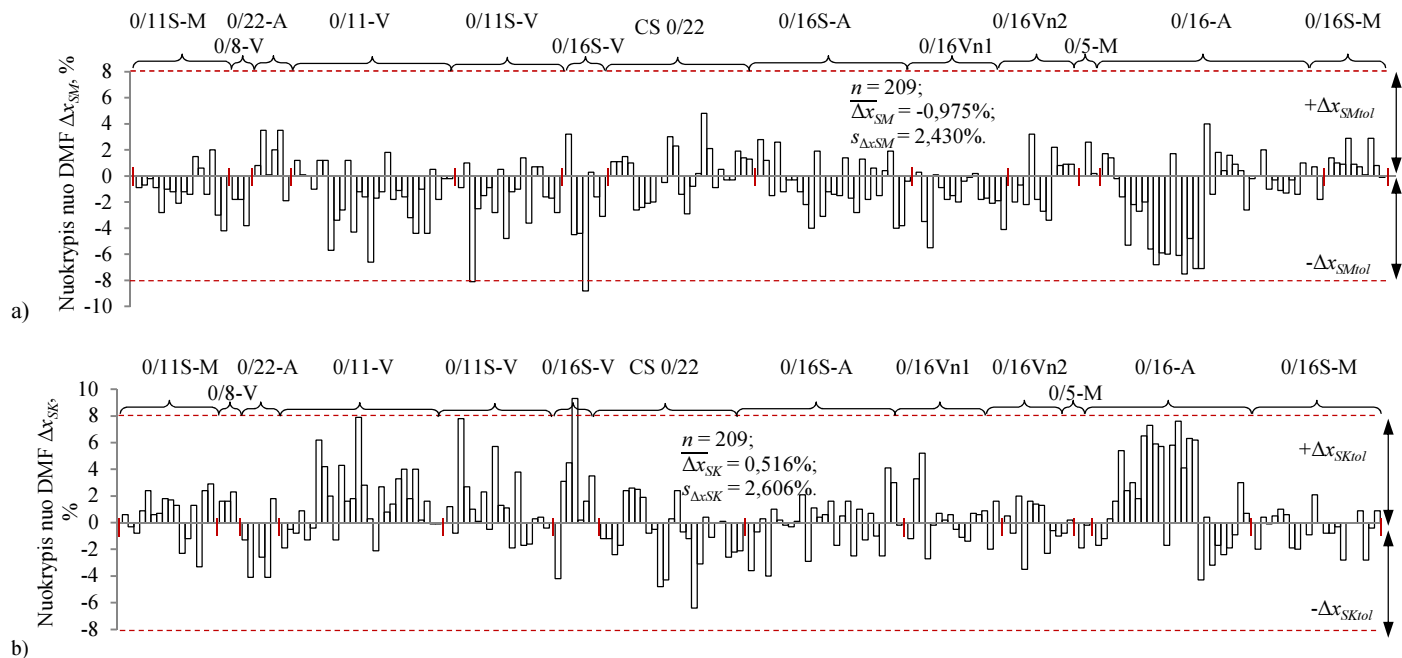
Mineralinių komponentų statistiniai parametrai taip pat atitiko reikalavimus. Mineralinių miltelių kiekio nuokrypių nuo DMF aritmetinis vidurkis buvo $\overline{\Delta x_{MM}} = 0,458 \%$, standartinis nuokrypis – $s_{\Delta x_{MM}} = 0,802 \%$. Iš pateiktų stulpelinių diagramų galima matyti, kad didžiausi komponentų nuokrypiai buvo tų KMA tipų mišiniuose, kuriuose pagal DMF naudojama nemažai stambių frakcijų mineralinių medžiagų. Diagramos rodo, kad nustačius vieno komponento trūkumą, galima matyti kito komponento perteklių. Toks tarpusavio ryšys dažnai pasitaiko kintant SM ir SK kiekiui. 3.5 paveikslu a) ir b) dalyse matoma, kad 0/16-A tipo KMA mišinio sudėtinuose ėminiuose nustatomas žymus skaldos perteklius ir smėlio trūkumas. Tai rodo, kad mineralinių komponentų kiekio nuokrypiai nuo DMF yra glaudžiai susiję ir vieno komponento kiekio nuokrypis dažnai tampa ir kito komponento kiekio nuokrypio priežastimi.

Tiriant per visus 4 gamybos sezonus gamintuose mišiniuose nustatytų atskirų komponentų kiekių nuokrypius matoma, kad statistiškai jie retai viršijo leidžiamas maksimalias tolerancijų ribas (3.6–3.9 pav.). Bitumo dozavimo tikslumas tiriamuoju laikotarpiu gerėjo ir dėl to mažėjo jo kiekio nuokrypiai. Tam didžiausią įtaką turėjo 4 skyriuje tiriamas ir aprašomas BDS įrenginių modernizavimas. Nustatyta, kad 2006 m. standartinis bitumo kiekio nuokrypis nuo DMF nuokrypis buvo $s_{\Delta x_{MM}} = 0,201 \%$, 2007 m. beveik nesikeitė ir buvo $s_{\Delta x_B} = 0,206 \%$, 2008 ir 2009 m. gerėjo ir atitinkamai buvo $s_{\Delta x_B} = 0,178 \%$ ir $s_{\Delta x_B} = 0,175 \%$ (3.5 pav.). B nuokrypių nuo DMF vertės pateiktos A priedo A1 lentelėje, B priedo, B1 lentelėje, C priedo C1 lentelėje, D priedo D1 lentelėje.



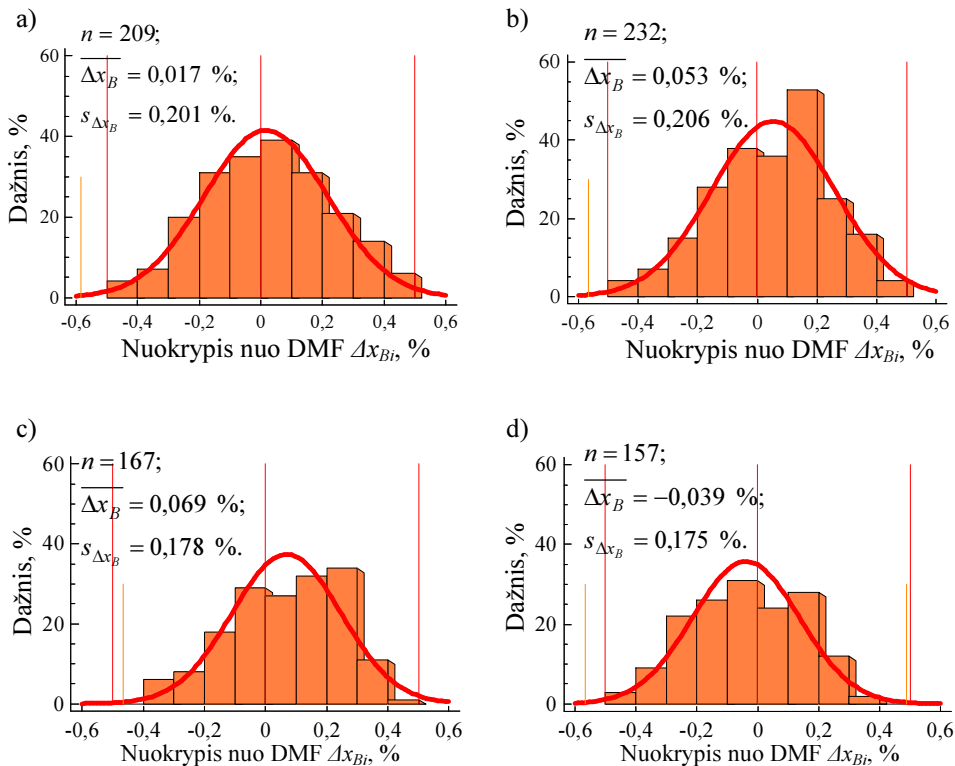
3.4 pav. Skirtingų rūšių ir tipų karštai maišyto asfalto mišinio sudėtinuose ėminiuose nustatytų komponentų x_i nuokrypių nuo darbinės mišinio formulės x_p reikšmių Δx_i diagramos ir jų atitiktis tolerancijoms $\pm \Delta x_{tol}$: a – bitumo, b – mineralinių miltelių

Fig 3.4. Distribution of the determined component content x_i deviations from job-mix formula x_p values Δx_i in the bulk samples of hot mix asphalt mixture of various types and grades, and their compliance with tolerances $\pm \Delta x_{tol}$: a – bitumen, b – mineral filler



3.5 pav. Skirtingų rūšių ir tipų karštai maišyto asfalto mišinio sudėtinuose ėminiuose nustatytų komponentų x_i nuokrypių nuo darbinės mišinio formulės x_p reikšmių Δx_i diagramos ir jų atitiktis tolerancijoms $\pm \Delta x_{tol}$: a – smėlio, b – skaldos

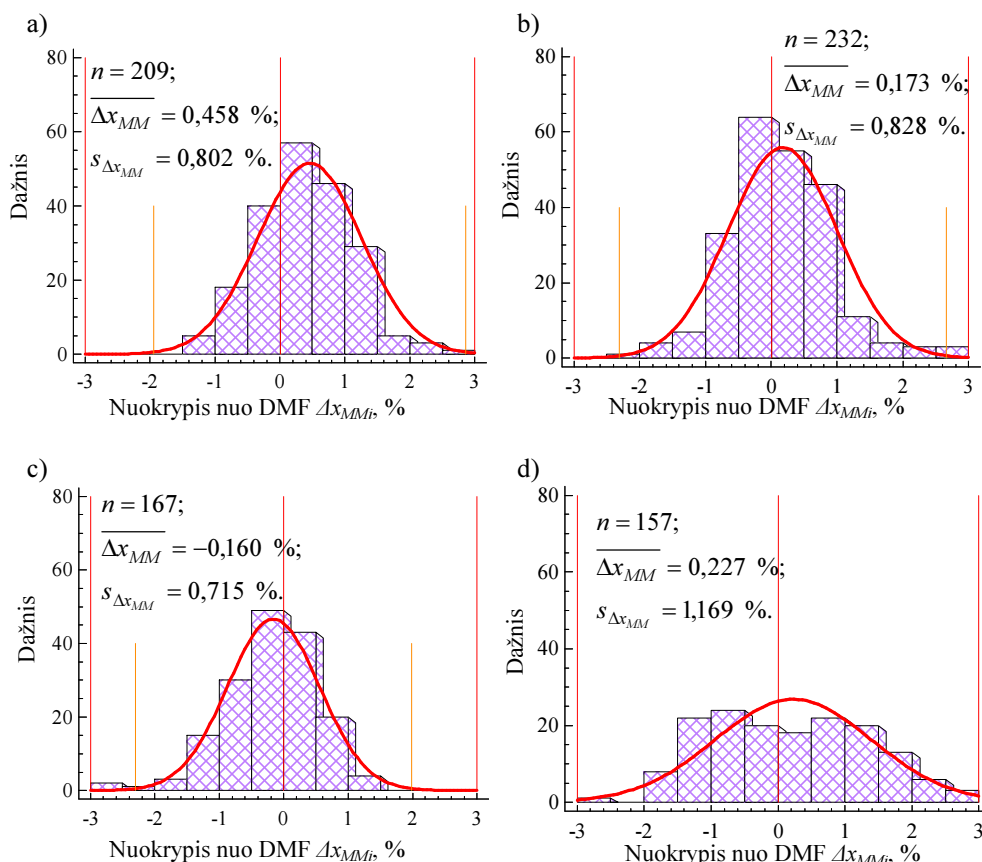
Fig 3.5. Distribution of the determined component content x_i deviations from job-mix formula x_p values Δx_i in the bulk samples of hot mix asphalt mixture of various types and grades, and their compliance with tolerances $\pm \Delta x_{tol}$: a – coarse aggregate, b – stone aggregate



3.6 pav. Bitumo kiekio nuokrypių nuo DMF pasiskirstymo histogramos KMA mišinio sudėtiniuose ėminiuose, paimtuose metais: a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

Fig 3.6. Distribution histograms of bitumen content deviations from JMF in HMA mixture bulk samples taken in years: a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

2006–2009 metais *Amomatic VS 180 ASMA* gamintų skirtingų rūšių ir tipų KMA mišinių atskiruosiuose sudėtiniuose ėminiuose nustatytų mineralinių mielių kiekio nuokrypių nuo DMF, nulemtas dozavimo tikslumo ir stabilumo kitimo, nebuvo vienakryptis. MM kiekio nuokrypių nuo DMF aritmetiniai vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai pasiskirstė taip: 2006 m. – $\overline{\Delta x_{MM}} = 0,458 \%$, $s_{\Delta x_{MM}} = 0,802 \%$; 2007 m. – $\overline{\Delta x_{MM}} = 0,173 \%$, $s_{\Delta x_{MM}} = 0,828 \%$; 2008 m. – $\overline{\Delta x_{MM}} = -0,160 \%$, $s_{\Delta x_{MM}} = 0,715 \%$; 2009 m. – $\overline{\Delta x_{MM}} = 0,227 \%$, $s_{\Delta x_{MM}} = 1,169 \%$ (3.7 pav.). MM nuokrypių nuo DMF vertės pateiktos A priedo A2 lentelėje, B priedo, B2 lentelėje, C priedo C1 lentelėje, D priedo D1 lentelėje.



3.7 pav. Mineralinių miltelių (<0,063 mm) kiekio nuokrypių nuo DMF pasiskirstymo histogramos KMA mišinio sudėtinuose ėminiuose, paimtuose metais:

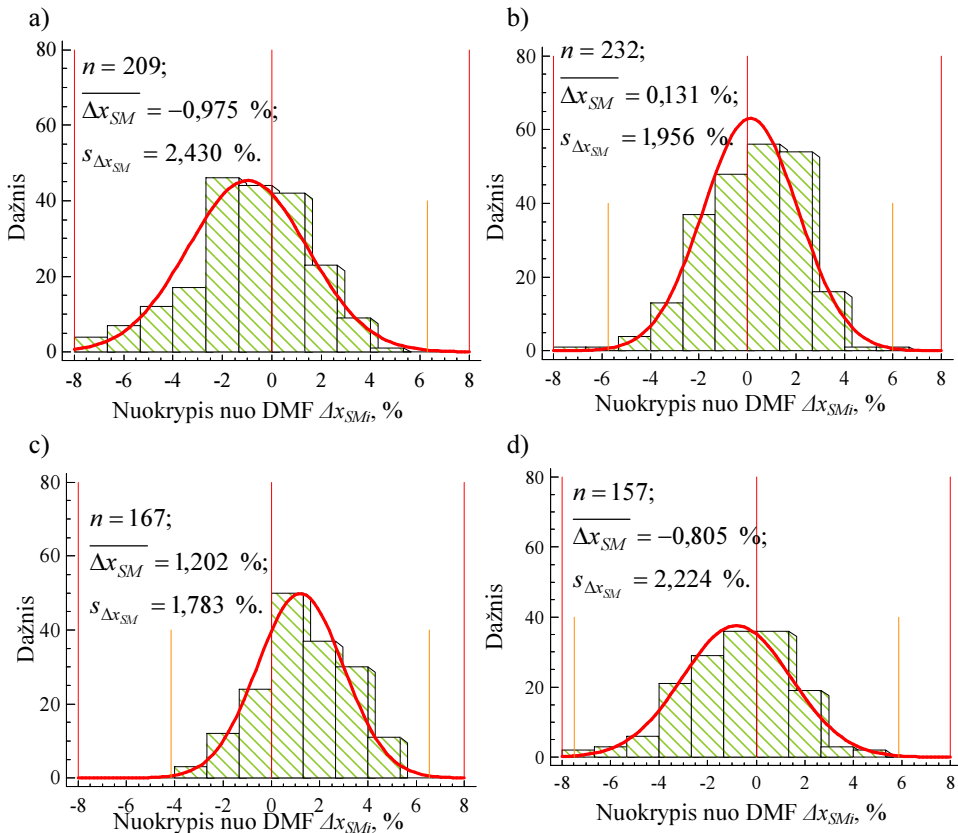
a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

Fig 3.7. Distribution histograms of mineral fillers (<0,063 mm) content deviations from JMF in HMA mixture bulk samples taken in years:

a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

Smėlio ir skaldos (SM ir SK) kiekių nuokrypiai šiame darbe tiriami mažiau, tačiau žinant, kad vieno komponento nuokrypis nuo DMF turi įtakos ir kitų komponentų nuokrypiams, pateikiamas SM ir SK kiekių nuokrypių nuo DMF per tiriamą laikotarpį statistinis tyrimas (3.8–3.9 pav.). Nustatyta, kad SM ir SK kiekis tiksliausias buvo 2007 m., t. y. standartinis nuokrypis buvo mažiausias: SM – $s_{\Delta x_{SM}} = 1,783 \%$, SK – $s_{\Delta x_{SK}} = 1,844 \%$. Blogiausiai asfalto maišytuve stambiosios

frakcijos buvo dozuojamos ir buvo nevienalytės 2006 m., tada statistiniai smėlio ir skaldos kiekio nuokrypių nuo DMF asfalto mišiniuose sklaidos parametrai pasiskirstė taip: $s_{\Delta x_{SM}} = 2,430 \%$ (SM) ir $s_{\Delta x_{SK}} = 2,328 \%$ (SK).



3.8 pav. Smėlio (0,063–2 mm) kiekio nuokrypių nuo DMF pasiskirstymo histogramos KMA mišinio sudėtiniuose ėminiuose, paimtuose metais:

a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

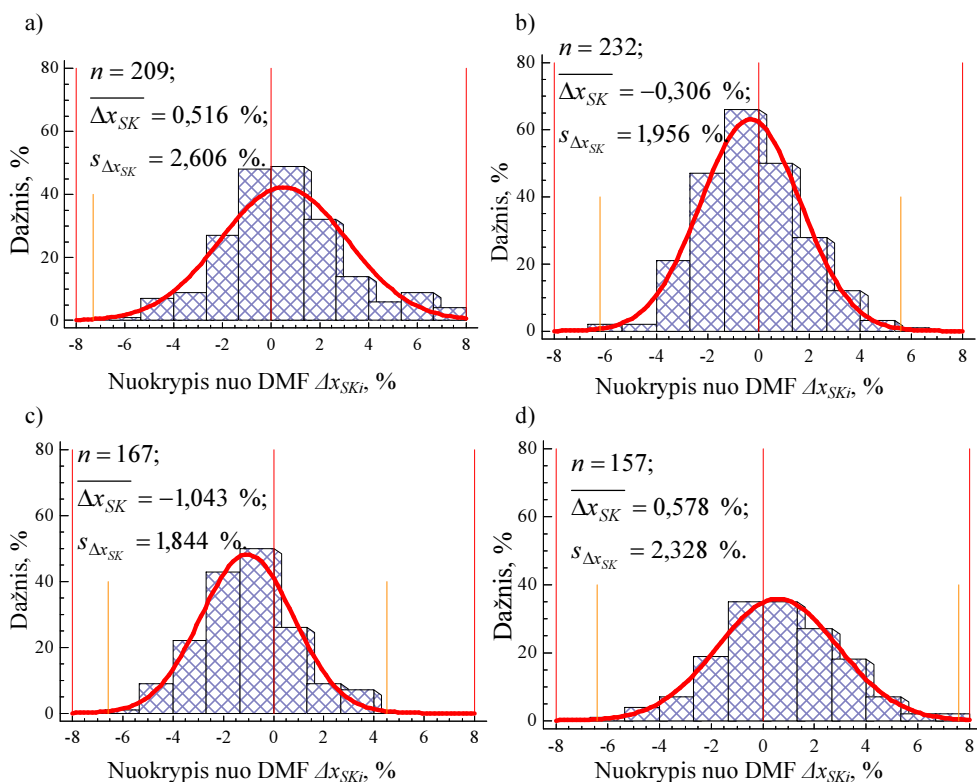
Fig 3.8. Distribution histograms of fine aggregate (0.063–2 mm) content deviations from JMF in HMA mixture bulk samples taken in years:

a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

Didžiausias technologinių parametrų tikslumas nustatytas 2008 m., tada šių stambiųjų mineralinių komponentų kiekių nuokrypių nuo DMF standartiniai nuokrypiai buvo $s_{\Delta x_{SM}} = 1,783 \%$ (SM) ir $s_{\Delta x_{SK}} = 1,844 \%$ (SK). SM nuokrypių nuo

DMF vertės pateiktos A priedo A3 lentelėje, B priedo, B3 lentelėje, C priedo C1 lentelėje, D priedo D1 lentelėje. SK nuokrypių nuo DMF vertės pateiktos A priedo A4 lentelėje, B priedo, B4 lentelėje, C priedo C1 lentelėje, D priedo D1 lentelėje.

Rezultatai rodo, kad dozavimo tikslumas kito, tačiau kaita vyko leidžiamose ribose, o faktiškieji dozių nuokrypiai buvo gerokai nutolę nuo leidžiamųjų. Šio darbo prieduose yra pateikti laboratorinių tyrimų duomenys, pagal kuriuos atlikta šiame skyriuje pateikiama statistinė analizė.



3.9 pav. Skaldos (> 2 mm) kiekio nuokrypių nuo DMF pasiskirstymo histogramos KMA mišinio sudėtinuose ėminiuose, paimtuose metais: a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

Fig 3.9. Distribution histograms of coarse aggregate (>2 mm) content deviations from JMF in HMA mixture bulk samples taken in years: a – 2006; b – 2007; c – 2008; d – 2009

Galima daryti išvadą, kad KMA mišinį sudarančių komponentų kiekių nuokrypių nuo DMF pasiskirstymo histogramos (3.6–3.9 pav.) rodo, kad šiuolaikiniai dozatoriai geba dozuoti medžiagas daug tiksliau nei to reikalauja taisyklės. Dauguma komponentų kiekio asfalto mišiniuose atskirų verčių turi mažesnę sklaidą už statistines tolerancijas, tai rodo, kad galiojantys standartai nereikalauja maksimaliai išnaudoti ASMA techninių galimybių.

Apskaičiavus B, MM, SM ir SK kiekių nuokrypių nuo DMF per visus 4 sezonus padėties ir sklaidos rodiklius, buvo skaičiuojamos dažnių skirstinių formos charakteristikos: asimetrijos sk ir eksceso ku koeficientai. Asimetrijos koeficientas yra histogramos simetrijos matas, o eksceso koeficientas yra histogramos lėkštumo matas. Jiems apibrėžti reikia centrinio empirinio momento sąvokos (Sivilevičius, Vansauskas 2013). Centrinis empirinis j -osios eilės momentas m_j skaičiuojamas:

$$m_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^j. \quad (3.2)$$

m_j – tai formos charakteristikos, kurios yra centrinių momentų ir standartinio nuokrypio funkcijos. Imties asimetrijos koeficientas ($j = 3$) ir eksceso koeficientai ($j = 4$) skaičiuojami:

$$sk = \frac{m_3}{s_{\Delta x}^3}, \quad (3.3)$$

$$ku = \frac{m_4}{s_{\Delta x}^4} - 3. \quad (3.4)$$

Kadangi visų 16 histogramų asimetrijos koeficientų sk empirinės vertės didesnės už nulį (sk kinta nuo iki), tai histogramų asimetrija teigiama (dešinioji) ir skiriasi nuo normaliojo skirstinio. Eksceso koeficientų ku empirinės vertės taip pat didesnės už nulį (ku kinta nuo iki), tai histogramų viršūnės smailesnės nei normaliojo skirstinio (teigiamas ekscesas).

Histogramų empiriniai asimetrijos ir eksceso koeficientai buvo palyginti su kritinėmis vertėmis, priklausančiomis tik nuo imties didumo n . Tam buvo apskaičiuoti sk ir ku standartiniai nuokrypiai:

$$s_{sk} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}, \quad (3.5)$$

$$s_{ku} = \sqrt{\frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}}. \quad (3.6)$$

Kai ir $|ku| \leq 5s_{ku}$, tai apytikriai galima laikyti, kad empirinių duomenų normališkumo hipotezė priimama. Priešingu atveju iškelta hipotezė atmetama $|sk| \leq 3s_{sk}$ arba laikoma kaip abejotina.

Imant bitumo faktiškųjų dozių nuokrypių histogramas ir ten pateiktus imties dydžius n pagal (3.3) ir (3.4), buvo apskaičiuoti sk ir ku standartiniai nuokrypiai s_{sk} ir s_{ku} : $s_{sk} = 0,168$, $s_{sk} = 0,160$, $s_{sk} = 0,188$, $s_{sk} = 0,194$ (atitinkamai 2006, 2007, 2008, 2009 m. sezonų). s_{sk} vertė buvo padauginta iš 3 ir gauta, kad atitinkamai $3s_{sk} = 0,505$, $3s_{sk} = 0,479$, $3s_{sk} = 0,564$, $3s_{sk} = 0,581$ ir visos yra didesnės už sk vertes. Eksceso koeficiento standartinis nuokrypis s_{ku} buvo padauginas iš 5 ir gauta, kad $5s_{ku} = 1,675$, $5s_{ku} = 1,591$, $5s_{ku} = 1,868$, $5s_{ku} = 1,925$.

3.3 lentelė. Karšto maišymo asfalte esančių komponentų kiekių nuokrypių nuo darbinės mišinio formulės pasiskirstymo normališkumo skaičiavimo duomenys

Table 3.3. Normal distribution calculation data of hot mix asphalt component deviations from job-mix formula

Komp.	Sez.	n	sk	ku	s_{sk}	s_{ku}	$3s_{sk}$	$5s_{ku}$	Normališkumas
B	06	209	-0,090	-0,216	0,168	0,335	0,505	1,675	Taip
B	07	232	-0,014	0,322	0,160	0,318	0,479	1,591	Taip
B	08	167	-0,268	-0,349	0,188	0,374	0,564	1,868	Taip
B	09	157	-0,101	-0,664	0,194	0,385	0,581	1,925	Taip
MM	06	209	0,856	2,076	0,168	0,335	0,505	1,675	Ne
MM	07	232	-0,014	0,322	0,160	0,318	0,479	1,591	Taip
MM	08	167	0,956	3,499	0,188	0,374	0,564	1,868	Ne
MM	09	157	0,100	-0,692	0,194	0,385	0,581	1,925	Taip
SM	06	209	-0,592	0,512	0,168	0,335	0,505	1,675	Ne
SM	07	232	-0,371	0,270	0,160	0,318	0,479	1,591	Taip
SM	08	167	-0,115	-0,314	0,188	0,374	0,564	1,868	Taip
SM	09	157	-0,319	0,298	0,194	0,385	0,581	1,925	Taip
SK	06	209	0,629	0,858	0,168	0,335	0,505	1,675	Ne
SK	07	232	0,103	0,261	0,160	0,318	0,479	1,591	Taip
SK	08	167	0,089	-0,134	0,188	0,374	0,564	1,868	Taip
SK	09	157	0,162	0,097	0,194	0,385	0,581	1,925	Taip

Visos $5s_{ku}$ vertės buvo didesnės už ku , todėl šie duomenys pagrįstai leidžia daryti išvadą, kad bitumo kiekio nuokrypių nuo DMF empirinių duomenų per keturis sezonus normališkumas yra patvirtintas (3.3 lentelė). MM kiekio nuokrypių nuo DMF duomenys 2006 ir 2008 m. pasiskirstė ne pagal normalųjį skirstinį.

SM ir SK 2006 metų duomenų skirstinių normališkumo hipotezę taip pat galima atmesti arba laikyti abejotina.

Atlikus 2006–2009 m. pagamintų mišinių laboratorinių tyrimų rezultatų analizę, suskaičiuojamos teorinės galimos statistinės tolerancijos (3.3 lentelė). Imdami 99,73 % tikimybę gauname, kad didžiausias leidžiamasis smėlio kiekio nuokrypis nuo DMF gali būti $x_p \pm 3s_{\Delta x_{SM}}$, nustatome, kad pagal mažiausią standartinį nuokrypį $s_{\Delta x_{SM}}$, Δx_{SMtol} gali būti sumažintas iki 5,35 %. Atitinkamai skaldos leidžiamasis nuokrypis Δx_{SKtol} iki 5,53 % (3.4 lentelė).

3.4 lentelė KMA mišinio komponentų kiekio pasiskirstymo ribinės vertės, nustatytos pagal 3σ taisyklę

Table 3.4. Marginal values of HMA mixture component content distribution identified by rule 3σ

Metai	MM (< 0,063 mm)		SM (0,063–2 mm)		SK (> 2 mm)	
	$s_{\Delta x_{MM}}$	$x_p \pm 3s_{\Delta x_{MM}}$	$s_{\Delta x_{SM}}$	$x_p \pm 3s_{\Delta x_{SM}}$	$s_{\Delta x_{SK}}$	$x_p \pm 3s_{\Delta x_{SK}}$
2006	0,802	$x_p \pm 2,41$	2,430	$x_p \pm 7,29$	2,606	$x_p \pm 7,82$
2007	0,828	$x_p \pm 2,48$	1,956	$x_p \pm 5,87$	1,956	$x_p \pm 5,87$
2008	0,715	$x_p \pm 2,15$	1,783	$x_p \pm 5,35$	1,844	$x_p \pm 5,53$
2009	1,169	$x_p \pm 3,51$	2,224	$x_p \pm 6,67$	2,328	$x_p \pm 6,98$

Ar šiuo metu galiojančios leidžiamosios statistinės tolerancijos nėra per daug liberalios, galima nustatyti naudojant Bartelto kriterijų ir visų 4 sezonų dozavimo duomenis tiriant kaip bendrą objektyvią duomenų aibę (Pliopys, Sivičevičius 2013). Ar KMA mišinio komponentų (B, MM, SM ir SK) nustatytų dozavimo paklaidų per 4 sezonus apskaičiuotieji standartiniai nuokrypiai $s_{\Delta x}$ statistiškai skiriasi su pasirinktuoju $\alpha = 0,05$ reikšmingumo lygmeniu, galima apskaičiuoti taikant Bartleto kriterijų. Šis kriterijus naudojamas pagal normalųjį skirstinį pasiskirsčiusių imčių dispersijoms lyginti ir, jei pasirodo, kad jos statistiškai nesiskiria, vidutinei dispersijai skaičiuoti. Taip pat B kriterijus geriausiai tinka dėl to, kad gali būti naudojamas, kai skiriasi imčių didumai (ištirtų per metus elementariųjų ėminių skaičius) n_i . B statistika skaičiuojama:

$$B = \frac{E}{C} = \frac{2,303 \left[k \cdot \log s^{-2} - \sum_{i=1}^l k_i \log s_i^2 \right]}{1 + \frac{1}{3(l-1)} \left[\sum_{i=1}^l \frac{1}{k_i} - \frac{1}{k} \right]}, \quad (3.7)$$

čia l – lyginamų KMA mišinio gamybos sezonų skaičius, šiame tyrime $l = 4$; $k_1 = n_1 - 1$ – laisvės laipsnių skaičius; n_i – i -ios KMA mišinio partijos didumas (ištirtų elementariųjų ėminių skaičius); $k = \sum_{i=1}^l k_i$; s_i^2 – i -ios KMA mišinio partijos tiriamojo kokybės parametro (šiuo atveju nuokrypio) paslinkta dispersija; s_i – standartinis nuokrypis; s^{-2} – per 4 sezonus paimtų KMA mišinio partijų imčių dispersijų vidurkis, kuris skaičiuojamas:

$$s^{-2} = \frac{\sum_{i=1}^l k_i s_i^2}{k}. \quad (3.8)$$

Bartletas nustatė, kad dydis B , kai tenkinama nulinė hipotezė, apytiksliai pasiskirstęs kaip χ^2 su $l - 1$ laisvės laipsniais, jeigu visi $k_i > 2$. Įvertinę, kad $k_i = n_i - 1$, nustatome, kad $n_i - 1 > 2$ arba $n_i > 3$, t. y. kiekvienos imties didumas privalo būti ne mažesnis kaip 4.

Bitumo kiekio nuokrypių skirtingais metais pagamintame KMA mišinyje dispersijų $s_{\Delta x_{MM}}^2$ vienodumo hipotezę tikrinu pagal Bartleto kriterijų (3.5 lentelė).

3.5 lentelė. Bitumo kiekio nuokrypių nuo DMF pagamintame KMA mišinyje dispersijų lyginimo pagal Bartleto kriterijų seka ir skaičiavimas

Table 3.5. Sequence and calculation of dispersion comparison according to Bartlett's criterion of bitumen content deviations from JMF in the produced HMA mixture

Metai	Imties didumas $n_{\Delta x_B}$	Laisvių skaičius $k_{\Delta x_B}$	Standartinis nuokrypis $s_{\Delta x_B}$	Dispersija $s_{\Delta x_B}^2$	Sandauga $k_{\Delta x_B} s_{\Delta x_B}^2$	$\log s_{\Delta x_B}$	$k_{\Delta x_B} \log s_{\Delta x_B}$
2006	209	208	0,200	0,040	8,320	-1,398	-290,772
2007	232	231	0,206	0,042	9,803	-1,372	-316,993
2008	167	166	0,178	0,032	5,260	-1,499	-248,861
2009	157	156	0,175	0,031	4,778	-1,514	-236,172
Suma	765	761			28,160		-1092,80

Lentelėje pateikti visi tarpiniai dydžiai, reikalingi B nustatyti.

Kritinė dešininė sritis nustatoma įvertinus reikalavimą, kad kriterijaus B patekimo į šią sritį tikimybė, kai teisinga nulinės hipotezės prielaida, būtų lygi imtam (nustatytam) reikšmingumo lygmeniui:

$$P[B > \chi_{kr}^2(\alpha, l-1)] = \alpha. \quad (3.9)$$

Kritinis taškas $\chi_{kr}^2(\alpha, l-1)$ randamas iš lentelių pagal reikšmingumo lygmenį α ir laisvių skaičių $k = l - 1$. Tada dešininė kritinė sritis nustatoma nelygybe (nulinė hipotezė atmetama – dispersijos skiriasi):

$$B > \chi_{kr}^2, \quad (3.10)$$

o hipotezės priėmimo sritis – nelygybė (dispersijos s_i^2 nesiskiria, jos lygios):

$$B < \chi_{kr}^2. \quad (3.11)$$

3.6 lentelė Pagaminto karšto maišymo asfalto mišinio komponentų kiekio nuokrypių nuo darbinės mišinio formulės dispersijų lyginimo pagal Bartleto kriterijų duomenys

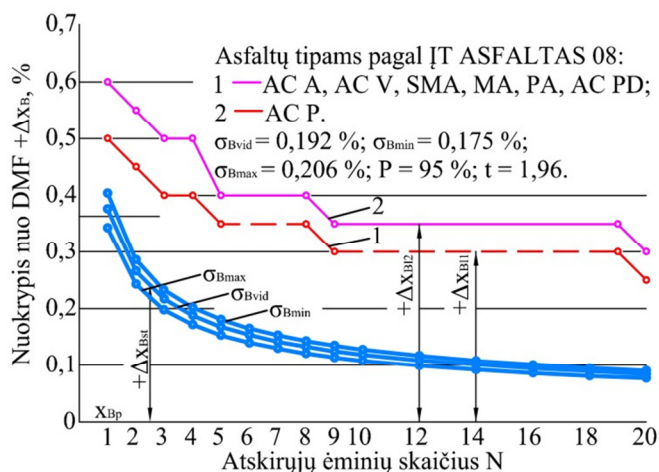
Table 3.6. Data of comparing the produced hot mix asphalt mixture component content deviations from job-mix formula dispersion according to Bartlett's criterion

KMA komponentas	Gamybos metai	Generalinė dispersija s^{-2}	Generalinis standartinis nuokrypis	Statistika B	Kritinė $\chi_{kr}^2(\alpha, l-1)$ vertė	Išvada dėl dispersijų vienodumo
B	2006–2009	0,037	0,192	7,44	7,815	Vienodos
MM	2006–2009	0,776	0,881	48,13	7,815	Nevienodos
MM	2006–2008	0,623	0,789	4,23	5,992	Vienodos
SM	2006–2009	4,483	2,117	20,943	7,815	Nevienodos
SM	2007–2009	3,948	1,987	8,01	5,992	Nevienodos
SM	2007–2008	3,555	1,886	1,64	3,842	Vienodos
SK	2006–2009	4,87	2,207	29,502	7,815	Nevienodos
SK	2007–2009	4,148	2,037	9,893	5,992	Nevienodos
SK	2007–2008	3,648	1,910	0,67	3,842	Vienodos

Metodikose rekomenduojama pradžioje apskaičiuoti dydį E ir jį palyginti su χ_{kr}^2 : jei pasirodo, kad $E < \chi_{kr}^2$, tai ir $B = \frac{E}{C} < \chi_{kr}^2$, nes $C > 1$, o tai patvirtina, kad C skaičiuoti nereikia. Kai $E > \chi_{kr}^2$, tai reikia skaičiuoti C ir tik po to lyginti B su χ_{kr}^2 . 3.6 lentelėje pateikti visų KMA mišinio komponentų dispersijų vienodumo tikrinimo pagal Bartletą rezultatai. Matoma, kad 4 sezonų B dozių nuokrypių nuo DMF dispersijos gali būti laikomos statistškai vienodomis. Tada generalinė dispersija $s_B^{-2} = 0,037\%$. Mineralinių miltelių, smėlio ir skaldos komponentų dozių nuokrypių nuo DMF per 4 sezonus dispersijų $s_{\Delta x_{MM}}^2$, $s_{\Delta x_{SM}}^2$, $s_{\Delta x_{SK}}^2$ vienodumo hipotezė taip pat patikrinta pagal Bartleto kriterijų. Nustatyta, kad viename ASMA pagamintuose KMA mišiniuose nustatyto mineralinių miltelių kiekio nuokrypių nuo DMF vertės statistškai skiriasi. Atmetus didžiausią

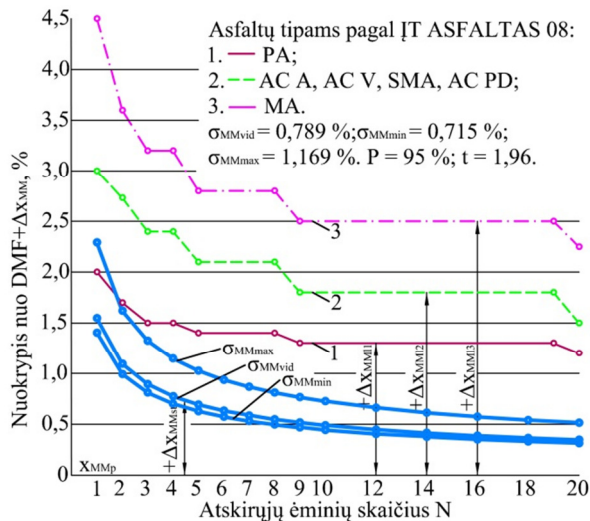
dispersiją turinčio 2009 m. sezono duomenis ir dar kartą patikrinus nustatyta, kad statistika $B = 7,44$ yra mažesnė už kritinę $\chi^2_{kr}(\alpha, l-1) = 7,815$, todėl galima daryti išvadą, kad 2006–2008 m. nustatytų MM dozių nuokrypių nuo DMF vertių dispersijos yra statistiškai vienodos. Atitinkamai tik dviejų sezonų (2007–2008 m.) smėlio ir skaldos dozių nuokrypių dispersijos pagal Bartleto kriterijų yra vienodos.

Statistiškai patikrinus dispersijų vienodumą, apskaičiuotus generalinius standartinius nuokrypius galima palyginti su IT ASFALTAS taisyklėse nurodytais maksimaliais leidžiamaisiais ir nustatyti, ar šiuo metu galiojančios leidžiamos B ir MM nuokrypių nuo DMF vertės yra pakankamai griežtos (3.10–3.13). Bitumo generalinį standartinį nuokrypį, minimalų ir maksimalų (per 4 gamybos sezonus) standartinius nuokrypius palyginus su leidžiamu B kiekio nuokrypiais nuo DMF skirtingų tipų KMA mišiniams matoma, kad leidžiamieji nuokrypiai gali būti per liberalūs, todėl ateityje, atlikus platesnius tyrimus, gali būti griežtinami (3.10 pav.).



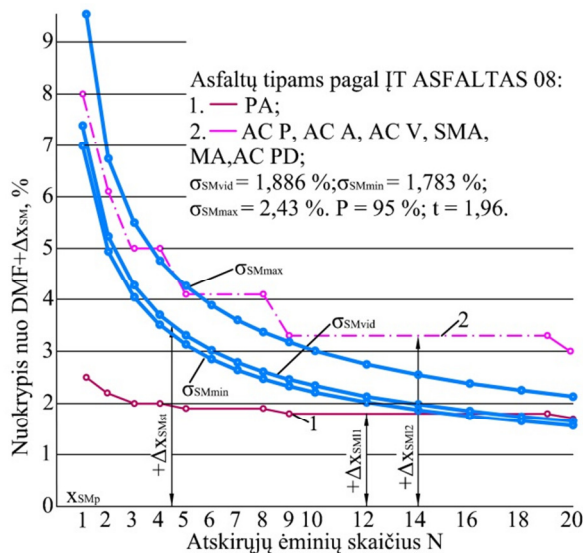
3.10 pav. Karšto maišymo asfalto mišinyje esančio bitumo kiekio statistinių tolerancijų rekomenduojamosios vertės

Fig 3.10. Recommended values of hot mix asphalt mixture bitumen content statistical tolerances



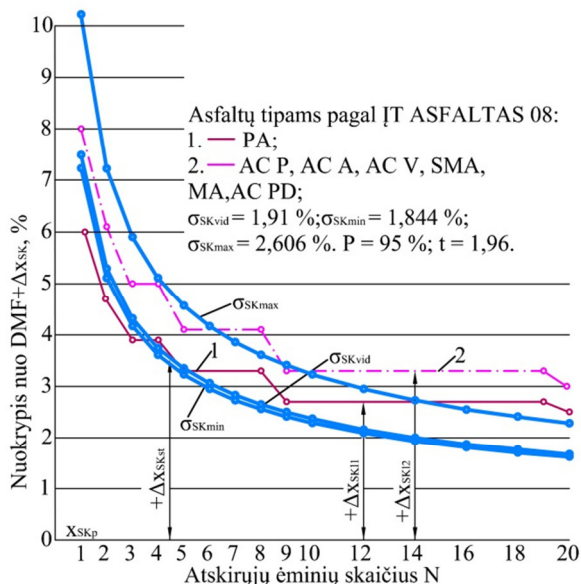
3.11 pav. Karšto maišymo asfalto mišinyje esančių mineralinių miltelių kiekio statistinių tolerancijų rekomenduojamosios vertės

Fig 3.11. Recommended values of hot mix asphalt mineral fillers content statistical tolerances



3.12 pav. Karšto maišymo asfalto mišinyje esančio smėlio kiekio statistinių tolerancijų rekomenduojamosios vertės

Fig 3.12. Recommended values of hot mix asphalt fine aggregate content statistical tolerances



3.13 pav. Karšto maišymo asfalto mišinyje esančios skaldos kiekio statistinių tolerancijų rekomenduojamosios vertės

Fig 3.13. Recommended values of hot mix asphalt coarse aggregate content statistical tolerances

Mineralinių miltelių 3 sezonų patikrintąjį generalinį standartinį nuokrypį palyginus su šiuo metu skirtingų tipų KMA mišiniais galiojančiais leidžiamaisiais nuokrypiais matoma, kad įrengimo taisyklėse IT ASFALTAS (2008) reglamentuotos tolerancijos, kaip ir B atveju, neatitinka realių tikslumo verčių (3.11 pav.). Siekiant išnaudoti šiuolaikinių ASMA technines galimybes, MM leidžiamąją dozavimo paklaidą (kada $N = 1$) teoriškai galima griežtinti iki 0,8 %.

Smėlio ir skaldos kiekių nuokrypių nuo DMF generaliniai standartiniai nuokrypiai yra nedaug nutolę nuo šiuo metu leidžiamų nuokrypių verčių (3.12–3.13 pav.).

Dėl tobulėjančios KMA gamybos įrangos komponentų dozavimo paklaidos turi iš esmės tendenciją mažėti, išskyrus atskirus atvejus. Techninė pažanga nulemia dozatorių techninių galimybių gerėjimą, o vertinant tai, kad naudojami vis patikimesni įrenginiai, būtina nuolat peržiūrėti leidžiamųjų paklaidų dydžius ir juos nustatyti pagal realius ilgalaikius tyrimų rezultatus. Nepaisant disertaciniame darbe gautų rezultatų, būtina atlikti išsamesnius tyrimus su daugiau ASMA, kad objektyviai būtų įvertintas leidžiamųjų komponentų kiekių nuokrypių nuo DMF verčių pagrįstumas.

3.2 Bitumo temperatūros kaitos asfalto maišytuvo įrenginiuose eksperimentinis tyrimas

KMA mišinio gamyba reikalauja didelių energinių resursų. Tyrimais įrodyta, kad energija karštųjų mišinių gamybai dažnai panaudojama neefektyviai (Peinado *et al.* 2011). Bitumas visoje BDS yra laikomas apie 160 °C temperatūros, o jo temperatūra turi būti vienoda visoje sistemoje. Per daug įkaitinus bitumą, jo savybės blogėja, vyksta oksidacija, t. y. spartus bitumo cheminių frakcijų kitimas (Puello *et al.* 2013; Firoozifar *et al.* 2011), intensyvėja kenksmingas garavimas (Bolliet *et al.* 2013; Butt *et al.* 2012; Deygout 2011). Esant per žemai temperatūrai – bitumo klampa didėja, pumpuoti bitumą tampa sunkiau. Šiltųjų asfalto mišinių gamyba vyksta žemesnėje temperatūroje, todėl gamybos technologija yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių energijos poreikį (Mogawer *et al.* 2012; Bito *et al.* 2009). JAV standarte ASTM D 2493-01 yra pateiktas bitumų temperatūros ir klamos priklausomybių grafikas, iš kurio galima matyti, kaip kinta dinaminė rišiklio klampa kintant jo temperatūrai (3.7 lentelė). Dinaminė klampa bitumui atvėsus nuo 160 °C iki 140 °C didėja 3 kartus, o atvėsus iki 100 °C didėja 60–70 kartų! Lietuvoje galiojančiame techniniame reglamente TRA ASFALTAS (2008) nustatytos maksimalios leidžiamos bitumo laikymo temperatūros. Pavyzdžiui, atliekant šio darbo tyrimus naudoto polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 maksimali leidžiama temperatūra yra 180 °C. Taip pat reglamentuota, kad su PMB 45/80-55 pagaminti KMA mišiniai turi būti ne žemesnės kaip 150 °C ir ne aukštesnės kaip 180 °C temperatūros (AC ir SMA tipai).

3.7 lentelė. Skirtingos temperatūros bitumo dinaminė klampa (ASTM D 2493-01)

Table 3.7. Dynamic viscosity of bitumen of varying temperatures (ASTM D 2493-01)

Temperatūra t , °C	Dinaminė klampa η , Pa·s
180	0,07
160	0,1
140	0,3
120	0,8–0,9
100	6–7
80	25

Talpyklos, vamzdynas, svėrimo bakelis, siurbliai, vožtuvai ir kiti BDS elementai turi savo individualius šildymo įrenginius. Talpyklos šildymas paprastai vyksta naudojant elektrą arba dujas. Didžioji dalis šilumos bitumui perduodama pagrindiniu kaitinimo tenu, iškilusiu apie 1m nuo talpyklos dugno. Jo galia būna nuo 23 iki 46 kW. Papildomas šildymas vyksta prie pat talpyklų dugno esančiais

papildomais šildymo įrenginiais, kurie generuoja iki 12 kW galią. Tai dažniausiai būna ant viso dugno ploto paskirstytas šildymo kabelis (jo paklota būna iki 20 m) arba šildymo strypai. Skirtingi talpyklų gamintojai savo talpyklas apšildo skirtingų medžiagų ir skirtingo storio izoliacinėmis medžiagomis. Nėra duomenų, kad izoliacinis sluoksnio parinkimas būtų atliekamas pagal ASMA eksploatacijos vietą, todėl vienas iš šio darbo tikslų ir yra ištirti, ar pagrįstai ASMA gamintojai nesiūlo skirtingų talpyklų su skirtingais izoliaciniais parametrais (pvz., atsižvelgiant į regioną, klimatą, naudojamas KMA mišinio gamybos technologijas).

Tam, kad vamzdyno temperatūra nevykstant gamybai nenukristų, visas BDS vamzdynas taip pat yra šildomas. Be to, visas vamzdynas yra izoliuotas, 1 m vamzdžio yra apvyniotas apie 2 m šildymo kabelio, kurio galia 60 W / 1 m. Bitumo siurbliai kaitinami kontaktiniais šildymo elementais, svėrimo bakeliui šildyti naudojama kaitinama alyva arba šildymo kabelis.

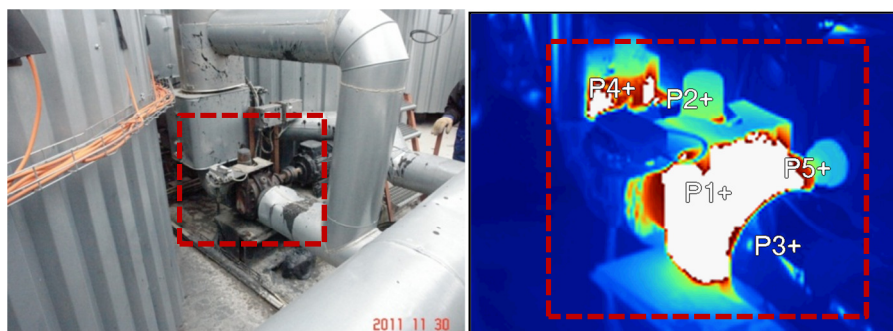
Nors visi BDS šildyti sumontuoti įrenginiai gali generuoti apie 250 kW galią, ne visa energija panaudojama racionaliai. Atliktas tyrimas su termografinių tyrimų infraraudonųjų spindulių kamera (3.14–3.15 pav.) parodė šias problemas:

- Kai kurie BDS įrenginiai visiškai neizoliuoti. Šilumos energija be jokių kliūčių išspinduliuojama aplinkos orui.
- Kritinėse BDS vietose dėl atšalusių sistemos vietų susidaro kamščiai.
- Vamzdyno šildymas kabeliu – neefektyvus dėl neracionaliai suskaidytų kabelio kontūrų (kabelio šildymas įjungiamas tada, kai šilumos daviklis perduoda signalą apie kritusią temperatūrą valdymo kompiuteriui. Jei kontūras yra ilgas, jame daviklių sumontuota yra mažai (arba yra tik vienas) ir skirtingose jo vietose bitumas dėl įvairių priežasčių vėsta nevienodai, tai šildymas neįsijungia nepriklausomai nuo to, kad prastai izoliuotose vietose jau yra susidaręs padidėjusios klampos bitumo kamštis).
- Bitumo kamščio atšildymas gali užtrukti iki kelių parų.

3.8 lentelė. Termografinių tyrimų infraraudonųjų spindulių kameros parametrai

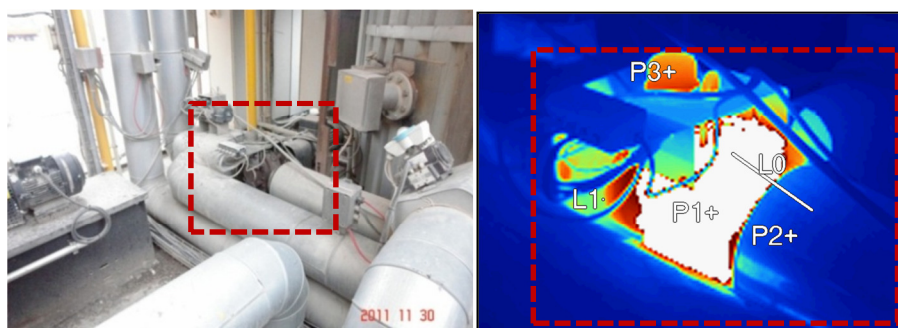
Table 3.8. Parameters of infrared thermography camera

Parametras	Reikšmė
Data, laikas	2011 11 30 12:34
Išorės temperatūra, °C	-2,0
Matuojamos temperatūros ribos, °C	Nuo 0,81 iki > 110
Temperatūros vidurkis, °C	~12,78
Kalibruotos ribos, °C	Nuo -20,0 iki 100,0
Lęšis	40948-2403. 20 mm/F0.8
Kameros modelis, S/N	FLX.06.03.021



Žyma / pjūvis	Temperatūros vidurkis, °C	Standartinis nuokrypis	Maksimali vertė, °C	Minimali vertė, °C
P1	>110	~0,00	>110	>110
P2	52,19	0,00	52,2	52,2
P3	7,81	0,00	7,8	7,8
P4	98,31	0,00	98,3	98,3
P5	45,19	0,00	45,2	45,2

a)

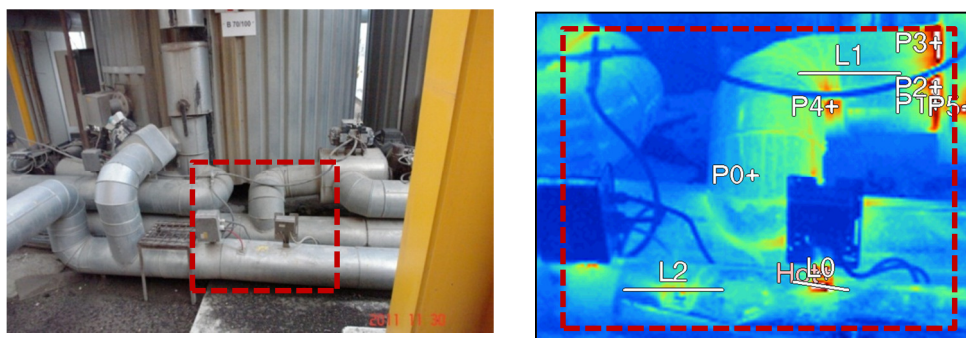


Žyma / pjūvis	Temperatūros vidurkis, °C	Standartinis nuokrypis	Maksimali vertė, °C	Minimali vertė, °C
L0	~68,33	~44,56	>110	15,9
L1	62,44	0,00	62,4	62,4
P1	>110	~0,00	>110	>110
P2	14,25	0,00	14,3	14,3
P3	84,50	0,00	84,5	84,5

b)

3.14 pav. Bitumo dozavimo sistemos elementų sandara, termovizinės nuotraukos ir jų temperatūros pjūviuose ir taškuose matavimo duomenys: a – siurblio mazgo; b – sklendės

Fig. 3.14. Structure of bitumen batching system elements, thermovisual photos and measurement data of their temperatures at cross-sections and points: a – pump hub; b – valves



Žyma / pjūvis	Temperatūros vidurkis, °C	Standartinis nuokrypis	Maksimali vertė, °C	Minimali vertė, °C
H	24,50	0,00	24,5	24,5
L0	12,44	7,06	24,3	5,8
L1	7,24	1,25	9,3	6,0
L2	7,28	2,02	11,3	4,6
P0	6,28	0,12	6,4	6,1
P1	16,13	0,00	16,1	16,1
P2	18,56	0,00	18,6	18,6
P3	16,38	0,00	16,4	16,4
P4	13,38	0,00	13,4	13,4
P5	16,81	0,00	16,8	16,8

3.15 pav. Bitumo dozavimo sistemos vamzdynas, termovizinė nuotrauka ir jo temperatūros pjūviuose ir taškuose matavimo duomenys

Fig. 3.15. Pipeline of bitumen batching system, thermovision photos and measurement data of its temperatures at cross-sections and points

Analizuojant siurblio mazgo (3.14 pav. a) nuotraukos taškus matyti, kad ši BDS sistemos vieta visiškai neizoliuota ir energija atiduodama aplinkos orui. Vietomis temperatūra viršija didžiausią prietaiso matuojamą 110 °C ribą.

Dviejų ir trijų padėčių vožtuvai, sklendės, jungtys yra zonos, kuriose taip pat yra didesnė galimų šilumos nuostolių atsiradimo tikimybė. Dėl izoliacinių sluoksnių sandūrų sudūrimų ir dažnai ardomų detalių šiose vietose atsiranda plyšių ir atvirų vietų, kuriose taip pat prarandama energija. Analizuojant sklendės ir vamzdyno mazgus (3.14 pav. b, 3.15 pav.) matoma, kad sklendės mazge šilumos nuostoliai taip pat buvo užfiksuoti. L1 ir L2 pjūviuose nustatyta, kad maksimali temperatūra vietomis viršijo 110 °C.

Matavimai parodė, kad vamzdyno izoliacinis sluoksnis yra pakankamai tvarkingas, nėra neužpildytų tarpų, šilumos nuostoliai, palyginti su kitais BDS įrenginiais, minimalūs. Termovizoriumi darytoje nuotraukoje matoma, kad visuose 9 tiriamuose taškuose, pjūviuose ir karščiausiam matuoto ploto taške H maksimalus temperatūros skirtumas yra 19,9 °C. Atlikto BDS įrenginių šilumos nuostolių matavimo metu nustatyta, kad išorinė įrenginių ir detalių temperatūra

svyruoja nuo $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai reiškia, kad įrenginiai ne visur pakankamai izoliuoti, vietose, kur skirtumas tarp aplinkos oro ir išmatuoto įrenginio paviršiaus temperatūros yra daugiau kaip $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, šilumos mainai yra aktyviausi, o energiniai nuostoliai didžiausi. Siekiant sumažinti sąnaudas, skiriamas elektros energijai, pirmiausia reikia izoliuoti daugiausiai šilumos energijos į aplinką atiduodančias zonas.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Periodinio veikimo ASMA pagaminto KMA mišinio komponentų (bitumo, mineralinių miltelių, smėlio ir skaldos) kiekio nuokrypiai nuo DMF pasiskirsto pagal normalųjį (Gauso) dėsnį, o tai leidžia nuokrypius nuo DMF vertinti pagal normaliojo skirstinio apskaičiuotų padėties ir sklaidos parametrų (aritmetinio vidurkio, standartinio nuokrypio, dispersijos) vertes.

2. Ištyrus ir įvertinus per ketverių metų laikotarpį veikiančiuose ASMA pagamintame KMA mišinyje esančių komponentų kiekio standartinių nuokrypių vertes, nustatyta, kad siekiant geriau išnaudoti ASMA technologines galimybes, KMA mišinio atskirųjų komponentų kiekio, gauto iš vieninio ėminio, nuokrypius nuo DMF galima sumažinti: bitumo iki $\pm 0,4\%$ (vietoje dabar reikalaujamo $\pm 0,5$ arba $\pm 0,6\%$), mineralinių miltelių iki $\pm 2,3\%$ (vietoje $\pm 3,0\%$).

3. Nustatyta, kad BDS įrenginiuose energija vartojama neefektyviai. Dėl neizoliuotų BDS įrenginių didėja energiniai nuostoliai, tampa sunkiau kontroliuoti ir valdyti bendrą BDS esančio bitumo temperatūrą, susidaro suklampėjusio bitumo kamščiai, trikdantys arba visiškai sustabdantys skysto bitumo tekėjimą vamzdynu. Nevienodai izoliuoti ir vietomis visai neizoliuoti technologiniai įrenginiai dažnai tampa bitumo perkaitinimo priežastimi: operatorius, siekdamas, kad silpniausiai izoliuotose vietose bitumas per daug neatvėstų, nustato per aukštą jo kaitinimo temperatūrą, spartinančią rišiklio degradaciją.

Asfalto maišytuvo bitumo dozavimo sistemos techninių ir technologinių parametrų tikslinio keitimo eksperimentinis tyrimas

Panaudojus sudarytus teorinius bitumo reikiamo kiekio užtikrinimo KMA mišinyje modelius, ištirtas Lietuvoje veikiančio ASMA modernizavimo efektyvumas. Pateikti atlikto skirtingų BDS eksperimentinio tyrimo realiomis gamybos sąlygomis rezultatai. Šio skyriaus medžiaga buvo publikuota straipsniuose: Bražiūnas, Sivilevičius (2013), Bražiūnas, Sivilevičius (2010).

4.1. Bitumo dozavimo sistemos modernizavimas ir jo veiksmingumas

Ilgą laiką Lietuvoje veikiančiame *Amomatic VS 180 S* ASMA eksploatuojant BDS pastebėta, kad veikiančios BDS technologiniai parametrai ir konstrukcija nebegali užtikrinti šių dienų gamybinių poreikių, nes bitumą dozuoja ne visada tiksliai ir stabiliai, yra sudėtingai valdoma ir neekonomiška dėl didelių energinių sąnaudų. Dėl per mažo talpyklų skaičiaus negali vienu metu laikyti visų vienu

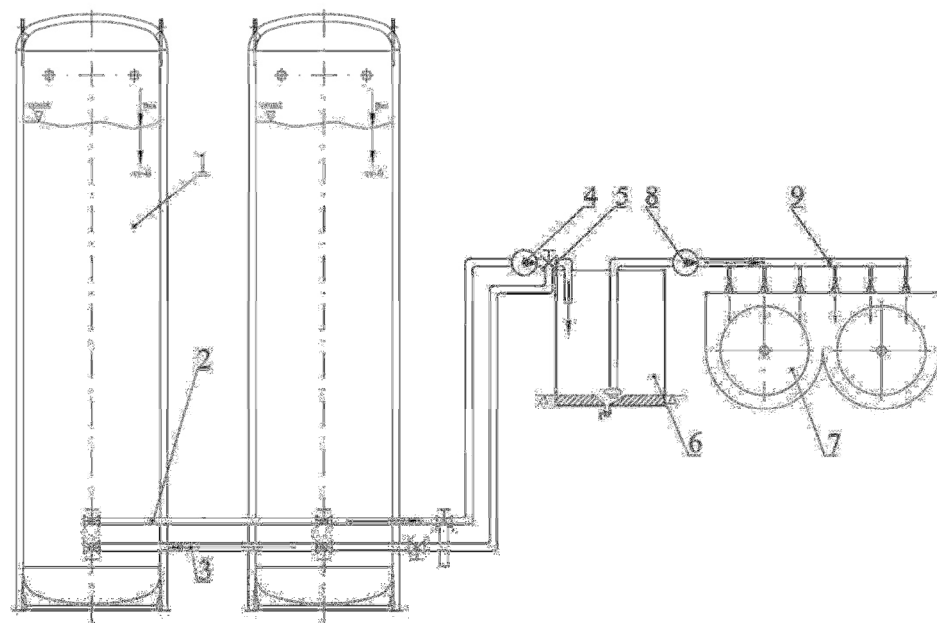
metu reikalingų karštojo bitumo markių. Buvo nuspręsta BDS įrenginius modernizuoti, įdiegiant naujus įrenginius arba senus atnaujinant. Šiame poskyryje tiriamas įrenginių modernizavimo poveikis vienam iš svarbiausių BDS technologinių parametrų – bitumo kiekio nuokrypiams nuo DMF. Tirtas Lietuvoje, UAB „Lemminkainen Lietuva“, veikiantis periodinio veikimo ASMA prieš patobulinant diskretinę svorinę BDS ir tas pats ASMA patobulinus BDS. *Amomatic VS 180 S* ASMA BDS buvo pakeisti konstrukciniai elementai (įmontuotas bitumo siurblio elektros variklio srovės dažnio keitiklis), įdiegtos šiuolaikinės kontrolės ir valdymo sistemos, bitumo dozės masės nustatymo elementai. Buvo patobulinti ir kiti BDS įrenginiai: šildymo kabeliai, bitumo siurblio sūkių reguliavimo įtaisai, bitumo talpyklos, vamzdžio sistema. Įrenginiai buvo kompiuterizuoti, integruoti automatikos elementai (pneumatiniai vožtuvai). Modernizavimo tikslas: padaryti tikslesnį, stabilesnį ir paprasčiau valdomą KMA mišinio gamybos procesą, gaminti kokybiškesnį KMA mišinį, sumažinti energijos sąnaudas.

4.1.1. Bitumo dozavimo sistemos konstrukcinio keitimo pagrindimas

Iki modernizavimo veikusi BDS (4.1 pav.) buvo sudėtingai valdoma, nestabili. Dėl bitumo laikymo talpyklų trūkumo buvo sudėtinga gaminti KMA mišinį su polimerais modifikuotu bitumu (PMB). Punktyrine linija apvesta sistemos dalis, kuri buvo iš esmės pakeista. Toliau apžvelgiama prieš konstrukcinių elementų pakeitimą veikusios BDS technologinė seka.

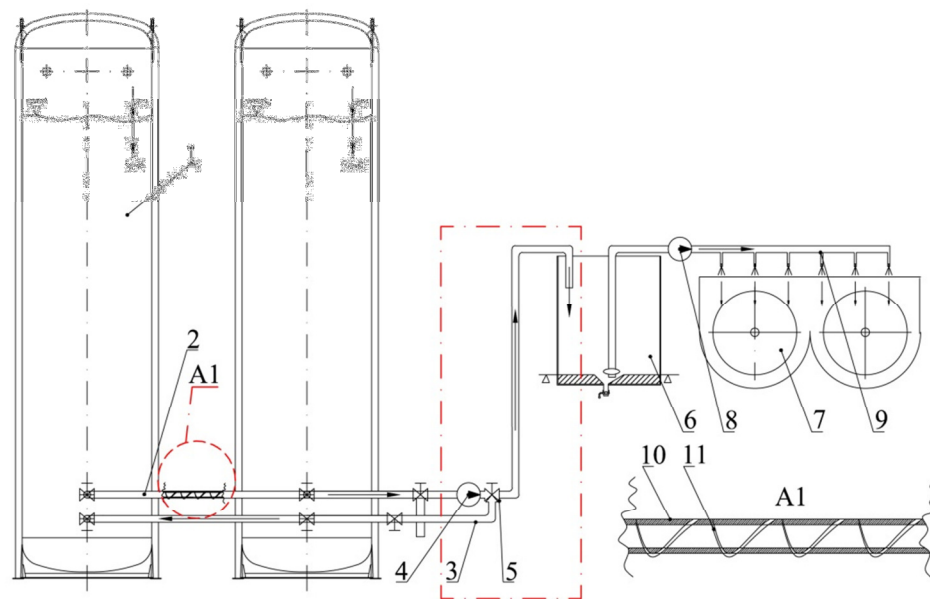
Operatoriaus padėjėjas prieš pradedant gamybą atidaro rankinę bitumo talpyklos sklendę (prieš atnaujinant technologinius įrenginius buvo naudojamos 3 talpyklos, skirtos skirtingų markių bitumui). Įjungus bitumo siurblių 4, karštasis rišiklis pumpuojamas tuščiąja eiga (ratu): ištekėjęs iš talpyklos 1 yra pumpuojamas siurbimo vamzdžiu 2 iki trijų padėčių vožtuvo 5. Iš ten teka atgal į talpyklą grįžimo vamzdžiu 3. Prasidėjus svėrimo ciklui, trijų padėčių vožtuvas perjungiamas į kitą padėtį ir, pasikeitus tekėjimo kryptčiai, bitumas pradeda tekėti į svėrimo baką 6. Rišiklis teka vienodu debitu, kol automatinės svarstyklės siunčia signalą, kad atsverta reikiama bitumo dozė. Tada signalas pasiekia trijų padėčių vožtuvą 5 ir šis, pakeisdamas padėtį, vėl nukreipia bitumą atgal į talpyklą 2. Atsvertas bitumas (svėrimo bakelyje esantis bitumas) siurbliu 8 išsiurbiamas iš svėrimo bakelio 6 ir aukštu slėgiu purkštukais išpurškiamas per sistemą 9 į KMA mišinio maišyklę 7. Iki modernizavimo veikęs bitumo dozatorius turėjo daug trūkumų: jis buvo sudėtingai valdomas, dozavimo procesas vyko neglaudžiai ir netiksliai.

Tikėtasi, kad atnaujinus technologinius įrenginius pradėjusios veikti BDS (4.2 pav.) leis pagerinti KMA mišinio kokybę ir jo gamybos procesą padarys paprasčiau valdomą.



4.1 pav. Bitumo dozavimo sistemos konstrukcinių elementų prieš patobulinant įrenginius schema: 1 – bitumo talpykla; 2 – siurbimo vamzdynas; 3 – grįžtamasis vamzdynas; 4 – bitumo siurblys; 5 – trijų padėčių vožtuvas; 6 – svėrimo bakas; 7 – maišyklė; 8 – siurblys atmatuotam bitumui siurbti į maišyklę; 9 – bitumo įpurškimo į maišyklę sistema

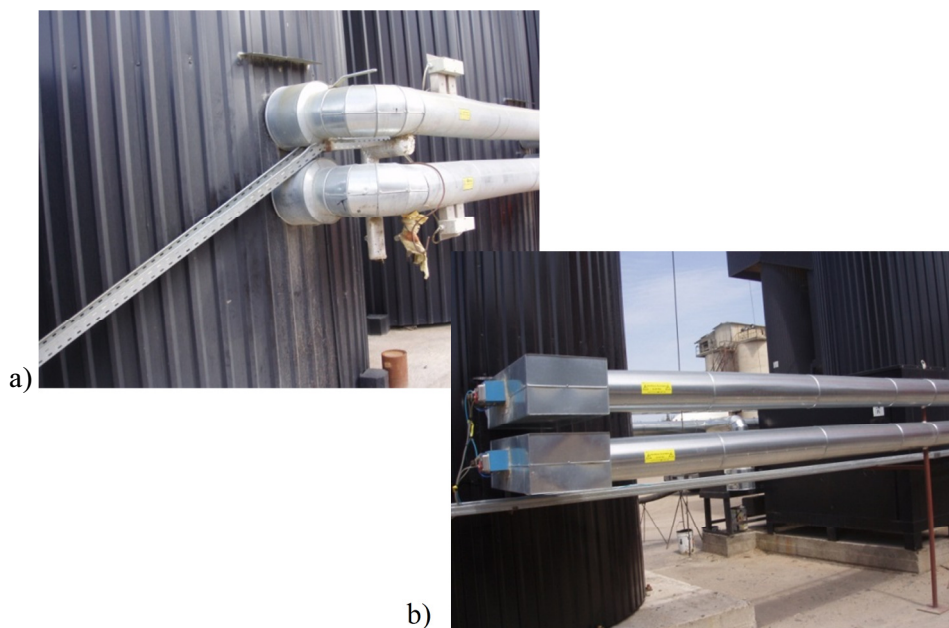
Fig. 4.1. The diagram of structural elements of bitumen batching system before reconstruction: 1 – bitumen tanks; 2 – pumping pipeline; 3 – recycling pipeline; 4 – bitumen pump; 5 – three-way valve; 6 – weigh bucket; 7 – mixer; 8 – the pump for pumping the weighed bitumen to mixer; 9 – the system of injecting bitumen into mixer



4.2 pav. Patobulintos bitumo dozavimo sistemos konstrukcinių elementų schema: 1 – bitumo talpykla; 2 – siurbimo vamzdynas; 3 – grįžtamasis vamzdynas; 4 – bitumo siurblys; 5 – trijų padėčių vožtuvas; 6 – svėrimo bakas; 7 – maišyklė; 8 – siurblys atmatuotam bitumui siurbti į maišyklę; 9 – bitumo įpurškimo į maišyklę sistema; 10 – vamzdyno termoizoliacija; 11 – vamzdyno šildymo elementas

Fig. 4.2. A schematic view of major structural elements of bitumen batching system after the reconstruction: 1 – bitumen storage tank; 2 – pumping line; 3 – return line; 4 – bitumen pump; 5 – three-way valve; 6 – weigh bucket; 7 – mixer; 8 – pump for pumping the weighed out bitumen into mixer; 9 – a system for bitumen injection into mixer; 10 – thermal insulation of pipeline; 11 – a heating element of the pipeline

Modernizuojant buvo sumontuota papildoma ketvirtoji bitumo talpykla, o tai leidžia atskirai laikyti 4 pagrindinių markių bitumą. Sumontavus pneumatinius talpyklų įtekėjimo ir ištekėjimo vožtuvus (4.3 pav.), operatoriaus pulte esančiais valdymo mygtukais galima tuoj pat pakeisti pumpuojamo bitumo markę (atidaryti vienos talpyklos vožtuvus ir uždaryti – kitos). Naudojant siurbimo 2 ir grįžimo 3 vamzdyną, galima perpumpuoti bitumą iš vienos talpyklos į kitą. Pakeisti šildymo elementai 11 bei įrenginių termoizoliacinės medžiagos 10 (4.2 pav.) užtikrina bitumo temperatūros visoje sistemoje vienodumą. Svarbiausias pakeistas įrenginys – bitumo siurblys ir jį sukantis elektros variklis 4.



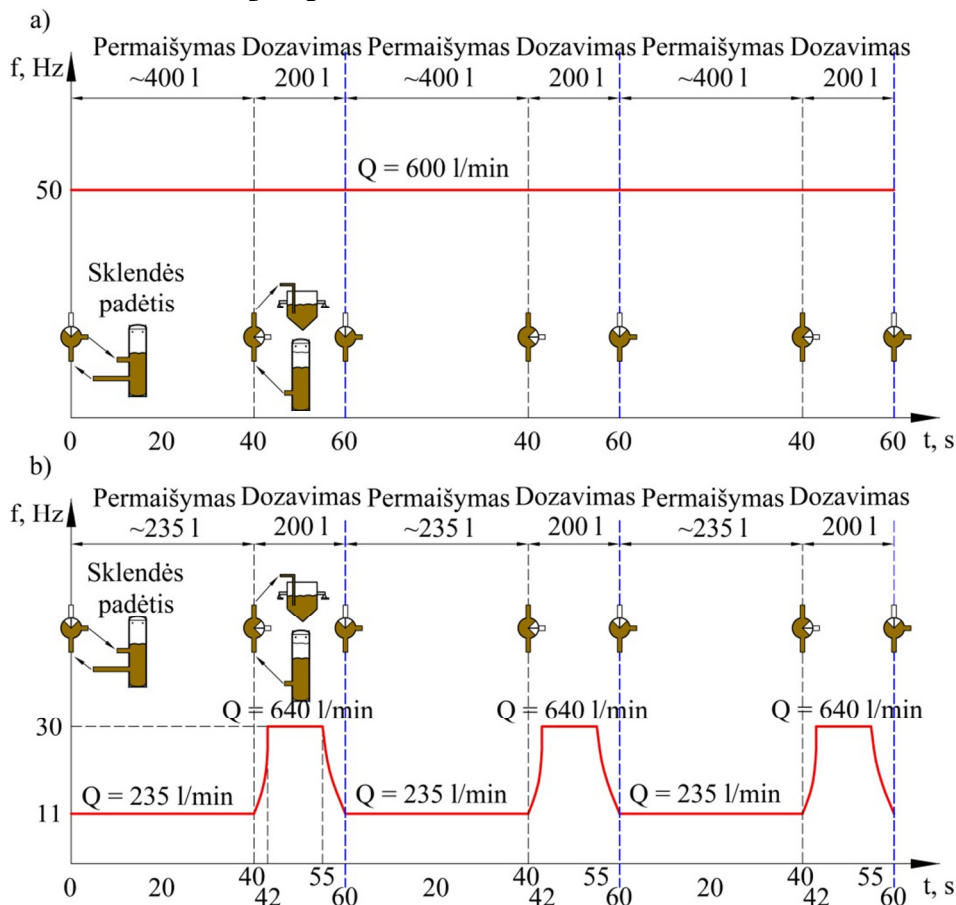
4.3 pav. Bitumo dozavimo sistemos talpyklų ir jas jungiančio vamzdyno bendrasis vaizdas: a – prieš modernizavimą; b – modernizuotos

Fig. 4.3. A schematic view of bitumen batching system containers and pipeline connecting it: a – before reconstruction; b – after reconstruction

Prieš modernizavimą buvusio ir patobulinus veikiančio siurblio veikimo ciklogramos skiriasi (4.4 pav.). Iki patobulinimo veikė 600 l/min našumo krumpiliaratinis siurblys, kurį suko asinchroninis trifazis elektros variklis. Bitumo dozė buvo siurbiamą apie 20 s, o perjungus trijų padėčių vožtuvą, pumpavimas atgal į talpyklą vykdavo tuo pačiu našumu, t. y. 600 l/min.

Atnaujinus BDS technologinius įrenginius į siurbli, sukantį elektros variklį, buvo integruotas dažnio keitiklis, kuris leidžia keisti elektros tinklo dažnį ir taip

pat siurblių sukančio variklio apsisukimus. Pumpuojant bitumą į svėrimo baką, variklis sukasi 30 Hz dažniu ($Q = 640$ l/min). Pripumpavus į svėrimo baką apie 85 % reikiamos bitumo dozės masės, variklio sukimosi dažnis palaipsniui mažėja ir, esant bake 100 % reikiamo bitumo kiekio bei persijungus trijų padėčių vortuvui, variklio sukimosi greitis nusistovi ties 11 Hz tinklo dažniu. Dažnių pasikeitimas trunka apie 2 s po perjungimo į dozavimo režimą ir apie 3 s sukimosi dažnis lėtėja baigiant dozavimo ciklą. Toks variklio parametrų keitimas leidžia tiksliau supilti bitumą į svėrimo baką bei sumažina šilumos energijos sąnaudas bitumui tekant laisvąja eiga.



4.4 pav. Bitumo dozavimo sistemos siurblio ciklogramos: a – prieš patobulinimą; b – po patobulino (įdiegus dažnio keitiklį)

Fig. 4.4. Cyclograms of the pipelines transport system of a bitumen batching system were used: a – before reconstruction; b – after reconstruction (after frequency converter installation)

Prieš atnaujinant įrenginius BDS siurblys ir trijų padėčių vožtuvus buvo sumontuoti prie pat svėrimo bako apie 3,5 m aukštyje. Taip buvo padaryta todėl, kad būtų galima sumažinti bitumo dozių svorio nuokrypius (atstumas tarp trijų padėčių vožtuvo ir dozavimo bako buvo minimalus). Pakeista siurbimo sistema leido bitumo siurblio mazgą bei skirstomąjį vožtuvą nuleisti žemiau, taip sutrumpinant bitumo laisvosios eigos kelią 8 metrais. Ši inovacija leido sumažinti energines sąnaudas (reikia šildyti 8 m trumpesnę vamzdyną), dozavimo procesas tapo tikslesnis ir paprasčiau valdomas.

4.1.2. Prieš modernizavimą ir po jo pagaminto karšto maišymo asfalto mišinio sudėties tyrimas

Siekiant kontroliuoti KMA mišinio kokybę, kelis kartus per savaitę du gamybos sezonus (metus prieš modernizavimą ir metus po modernizavimo) iš skirtingų rūšių ir tipų KMA mišinio buvo imami reprezentatyvieji ėminiai. Iš jų laboratorijoje buvo atskirtas bitumas ir nustatyta granulimetrinė sudėtis. Bitumo faktiškasis kiekis i -jame ėminyje x_{Bi} (masės %) lygintas su jo projektiniu kiekiu x_{Bp} ir apskaičiuotas skirtumas (nuokrypis) Δx_{Bi} . Šio skirtumo Δx_{Bi} modulis privalo būti mažesnis už toleranciją Δx_{Btol} , pateiktą atskirajam ėminiui (2.3 lentelė), t. y.

$$|\Delta x_{Bi}| < |\Delta x_{Btol}|.$$

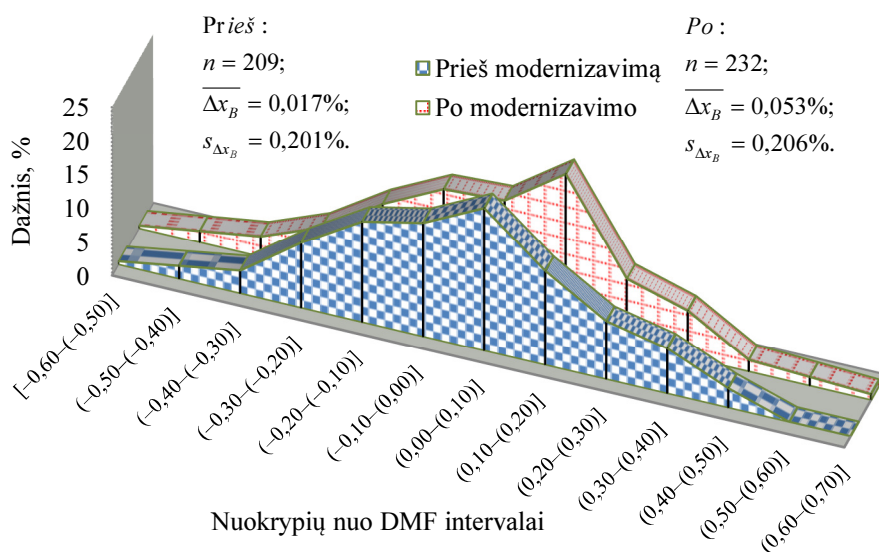
Per du tiriamus darbų sezonus buvo gaminami skirtingų rūšių ir tipų KMA mišiniai su skirtingu optimaliu projektiniu bitumo kiekiu. Skirtingos projektinės sudėties KMA mišiniuose esančio bitumo kiekio x_{Bi} standartinio nuokrypio s_{x_B} skaičiuoti nėra prasmės, nes jis būtų didesnis ir nerodytų vien tik jo kiekio svyravimus nulėmusių atsitiktinių veiksnių įtakos. Todėl tyrimui buvo pasirinktas bitumo kiekio atskiruose ėminiuose nuokrypių nuo kiekvieno projekto x_{Bp} vertės Δx_{Bi} .

Pagal Lietuvos naujausio norminio dokumento IT ASFALTAS 08 reikalavimus KMA mišinio iš atskirojo ėminio po ekstrahavimo nustatytas tirpaus bitumo kiekis negali skirtis nuo jo projektinio kiekio daugiau kaip $\Delta x_{Btol} = \pm 0,5\%$. Kuo faktiškasis bitumo kiekis x_{Bi} atskiruose KMA mišinio ėminiuose artimesnis projektiniam jo kiekiui x_{Bp} , tuo tiksliau ir glaudžiau būna dozuojamas bitumas. Šio organinio rišiklio faktiškasis procentinis kiekis x_{Bi} , % pagal atitinkamus LST EN standartus paimtame ir ištirtame KMA mišinio ėminyje labiausiai priklauso nuo dozatoriuje atsvertos bitumo dozės masės q_{Bi} . Faktiškasis bitumo kiekis x_{Bi} , % dar priklauso nuo KMA mišinio maišinio mineralinės dalies ma-

sės Q_{ma} (padidinus Q_{ma} , x_{Bi} sumažėja) ir nevysiško komponentų sumaišymo maišyklėje (paėmus ėminyje smulkesnius grūdelius, apgaubtus didesnio ploto bitumo plėvelėmis, x_{Bi} padidėja).

Bitumo dozatoriaus įrenginių atnaujinimo pagrįstumą (rezultatą) vertinome pagal po ekstrahavimo KMA mišinio atskiruose ėminiuose nustatyto bitumo kiekio x_{Bi} nuokrypių nuo projekcinio jo kiekio x_{Bp} vertės Δx_{Bi} . Skačiuotos padėties (darbų sezono visų ėminių aritmetinį vidurkį $\overline{\Delta x_B}$) ir nuokrypių sklaidos (atskirų ėminių Δx_{Bi} standartinį nuokrypį $s_{\Delta x_B}$) parametrų vertės.

Atliekant šį tyrimą buvo išanalizuoti ir susisteminti visų gamyklos laboratorijoje per 4 sezonus atliktų KMA mišinio sudėtinių ėminių laboratorinis tyrimų popieriniai protokolai. Visi duomenys buvo susisteminti pagal KMA mišinio rūšis ir tipus, gamybos datą.



4.5 pav. Bitumo kiekio nuokrypių Δx_{Bi} pasiskirstymas karšto maišymo asfalto mišinio sudėtinuose ėminiuose, paimtuose prieš ir po BDS modernizavimo

Fig. 4.5. A distribution histogram of bitumen deviations content Δx_{Bi} in hot mix asphalt mixture bulk samples taken before and after BBS reconstruction

Iš per vieną gamybos sezoną prieš modernizavimą ir per vieną gamybos sezoną po modernizavimo pagaminto KMA mišinio atliktos statistinės analizės

(4.5 pav.) nustatyta, kad dozatoriaus darbo kokybę rodantys technologiniai parametrai $\overline{\Delta x_B}$ ir $s_{\Delta x_B}$ pasikeitė nedaug. Prieš atnaujinant BDS įrenginius iš 209 ištirtų ėminių tik 1 ėminio bitumo kiekio nuokrypis Δx_B buvo didesnis už leidžiamąjį $\Delta x_{Btol} = \pm 0,5\%$. 0,48 % ėminių nuo bendro ištirtų ėminių skaičiaus buvo fiksuojami su leidžiamąsias tolerancijas viršijančiomis reikšmėmis. Modernizavus BDS įrenginius neatitikusių reikalavimų buvo 6 KMA mišinio ėminiai iš 232 tirtų ėminių, t. y. 2,5 % (4.1 lentelė).

Palyginus dviejų laikotarpių padėties ir sklaidos statistinius parametrus, galima matyti, kad supilto į maišinį bitumo kiekio nuokrypių nuo projekto aritmetinio vidurkio $\overline{\Delta x_B}$ bei standartinio nuokrypio $s_{\Delta x_B}$ vertės pasikeitė nedaug: prieš modernizavimą $\overline{\Delta x_B} = 0,017\%$ ir $s_{\Delta x_B} = 0,201\%$, o po modernizavimo – $\overline{\Delta x_B} = 0,053\%$ ir $s_{\Delta x_B} = 0,206\%$. Standartinio nuokrypio reikšmė, gauta iš visų tirtų ėminių laboratorinių duomenų, buvo panaši ir net padidėjo. Tačiau iš bitumo kiekio nuokrypių Δx_{Bi} pasiskirstymo grafiko (4.5 pav.) ir pasiskirstymo intervaluose (4.1 lentelė) dažnio nustatyta, kad atnaujinus technologinius įrenginius šiek tiek sumažėjo didesnio ((-0,30–(-0,20)] %) ir labai sumažėjo vidutinio ((-0,20–(-0,10)] %) bitumo trūkumo mišiniuose atvejų.

4.1 lentelė. Bitumo kiekio pagamintame KMA mišinyje nuokrypių nuo projektinės vertės (DMF) pasiskirstymo intervaluose dažnis

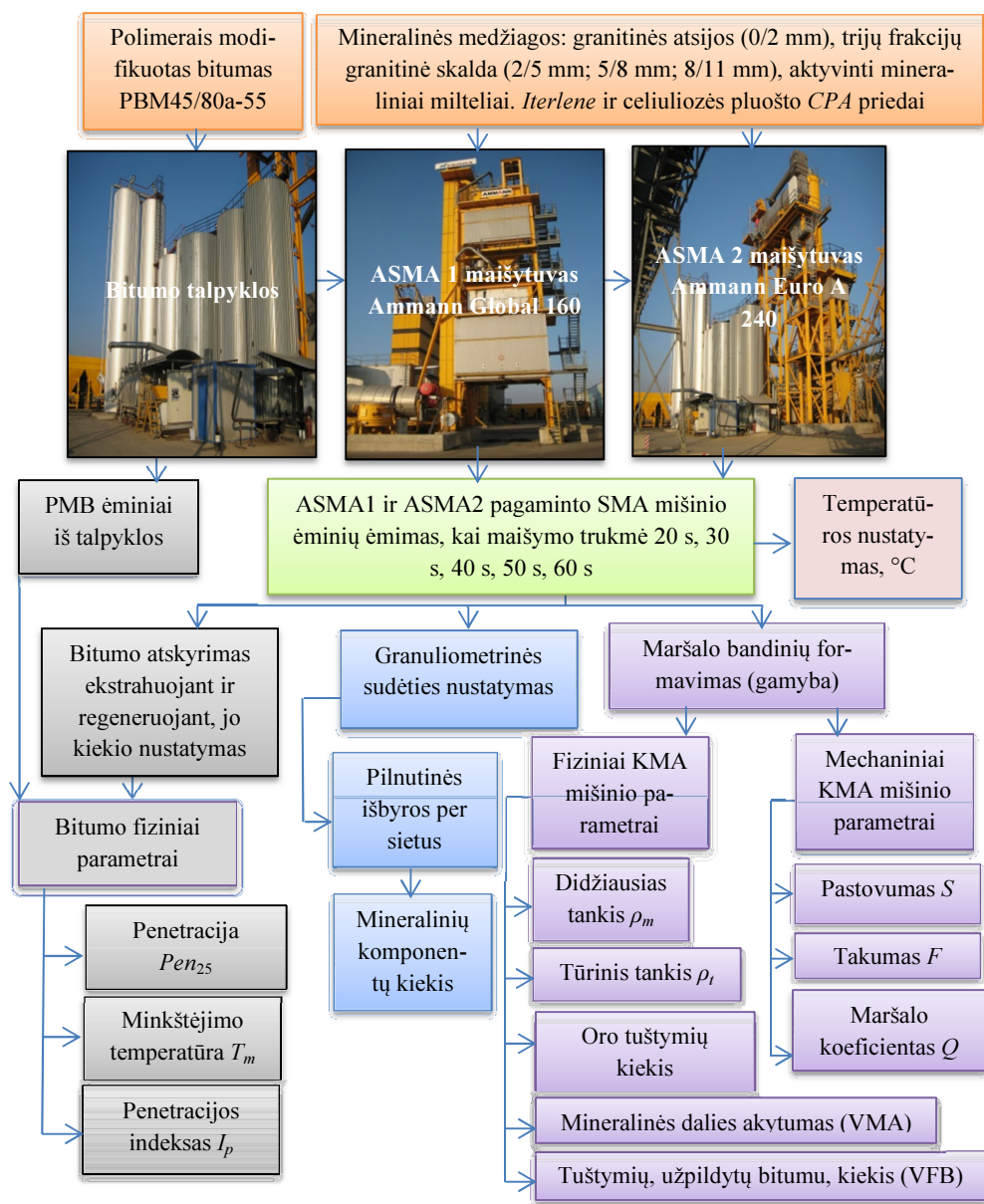
Table 4.1. The rate of deviation of bitumen content in the produced HMA mixture from the JMF in distributional intervals

Bitumo kiekio KMA mišinyje nuokrypių nuo projekto intervalai, %	Nuokrypių dažnis intervale, %	
	Prieš modernizavimą	Po modernizavimo
[-0,60–(-0,50)]	0,48	0,43
(-0,50–(-0,40)]	1,91	1,72
(-0,40–(-0,30)]	3,35	3,02
(-0,30–(-0,20)]	9,57	6,47
(-0,20–(-0,10)]	14,83	12,07
(-0,10–(0,00)]	16,75	16,38
(0,00–(0,10)]	21,05	16,81
(0,10–(0,20)]	13,88	22,84
(0,20–(0,30)]	8,61	9,48
(0,30–(0,40)]	6,70	6,90
(0,40–(0,50)]	2,87	1,72
(0,50–(0,60)]	0,00	1,29
(0,60–(0,70)]	0,00	0,86
Iš viso	100	100

Gamybos sezoną prieš BDS patobulinimą su bitumo trūkumu buvo pagaminta 46,9 % visų KMA mišinio maišinių, iš kurių 5,7 % su didesniu nei 0,30 % rišiklio trūkumu. Nustatyta, kad 40,1 % visų tirtų mišinių per 1 gamybos sezoną patobulinus BDS buvo su bitumo trūkumu. Iš jų su didesniu nei 0,30 % nuokrypiu buvo 5,2 %. BDS modernizavimas padidino KMA mišinio maišinių su bitumo pertekliumi santykinį dažnį, tačiau su didžiausiu leidžiamuoju (0,30–(0,50)] rišiklio pertekliumi maišinių sumažėjo nuo 9,6 % iki 8,6 %. Atitinkamai KMA mišinių dažnis su leidžiamuoju ir dažniausiai pasitaikančiu bitumo pertekliumi (0,00–(0,30)] padidėjo nuo 43,5 % iki 49,1 %. Tik gaminant 0/16-A tipo KMA mišinį gamybos sezono po modernizavimo metu pastebėti leidžiamo ir net neleidžiamo rišiklio pertekliaus mišinyje atvejų, kuriuos reikėtų vertinti ne kaip dozaatoriaus, bet dėl ASMA operatoriaus atsiradusią arba laboratorijoje padarytą klaidą.

4.2. Medžiagų maišymo trukmės ir temperatūros įtakos bitumo ir su juo pagaminto skaldos mastikos asfalto mišinio savybėms tyrimas

Poskyryje pateikiami eksperimentinio tyrimo, kuriuo buvo lyginamos dvi skirtingomis technologijomis veikiančios BDS, rezultatai. Mokslinis eksperimentas buvo atliktas ne laboratorinėmis, o realios gamybos sąlygomis. Prieš atliekant šį aktyvųjį eksperimentą iš anksto buvo aptarti eksperimento tikslai ir suplanuota jo eiga (4.6 pav.). Planuojant dalyvavo šio tyrimo ir šio darbo autorius, mokslinis vadovas, įmonės gamybos vadovas ir laboratorijos vadovas. Buvo nustatytas eksperimento laikas, sąlygos, suplanuotas abiejų ASMA darbas, aptartas būsimas ėminių ėmimo procesas, sudarytas laboratorinių tyrimų planas. Numatyta, kad laboratoriniai tyrimai bus atlikti gamyklos akredituotoje laboratorijoje ir UAB „Problematika“ akredituotoje laboratorijoje, suplanuotas būsimas ėminių transportavimas. Iš anksto numatytas laikas, kada planuojama gaminti didelį kiekį tos pačios rūšies ir tipo KMA mišinio tam, kad visas eksperimentas pilnai įvyktų per vieną dieną, užtektų laiko abiem ASMA pagaminti pakankamai maišinių skirtingomis sąlygomis (maišant KMA mišinį 20 s, 30 s, 40 s, 50 s, 60 s). Pagal disertacijoje iškeltą uždavinį eksperimentą buvo planuojama atlikti taip, kad sąlygos dozuojant bitumą skirtingomis BDS būdų kuo vienodesnės. Eksperimentui buvo panaudota 259 t SMA mišinio, t. y. 113 maišinių. Skaldos ir mastikos asfaltas (SMA) – asfalto mišinys, kuris turi netolydžią mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinę sudėtį ir rišiklį stabilizuojančių priedų (TRA AS-FALTAS 08 2008).



4.6 pav. Aktyviojo eksperimento asfalto maišytuve atlikimo schema

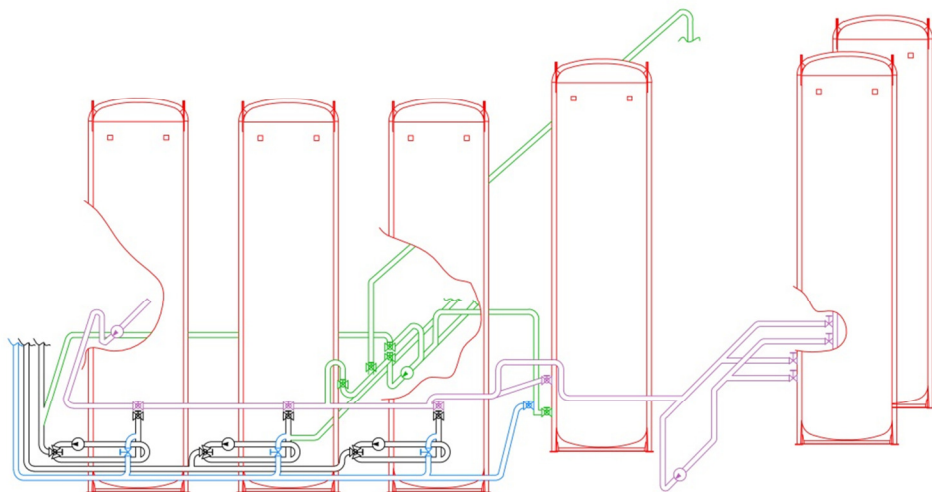
Fig. 4.6. Execution scheme of active experiment conducted in asphalt mixing plant

Atliekant aktyvųjį eksperimentą buvo gaminamas KMA mišinys, priklausantis skaldos ir mastikos asfalto (SMA) mišinių rūšiai, kurio tipas 11 (jo mineralinių medžiagų mišinio viršutinio sieto akutės yra 11 mm) ir jis naudojamas, kai kelio dangą veikia sunkioji (ypatingoji) apkrova S. Šis SMA 11 S mišinys buvo gaminamas su polimerais modifikuotu bitumu PMB 45/80-55, kurio minimali leidžiama laikymo ir naudojimo temperatūra 150 °C, o maksimali 180 °C. Duomenys iš ASMA1 ir ASMA2 valdymo kompiuterio apie SMA mišinio gamybos režimus pateikiami E priedo E1 lentelėje.

4.2.1. Gamykloje atlikto fizinio eksperimento metodika

Darbinė mišinio formulė (DMF) arba mišinio sudėtis gaunama jį projektuojant iki gamybos ASMA pradžios. Iš asfalto gamyklos sandėlyje sukauptų mineralinių medžiagų (gamtinio smėlio, atsijų, skirtingų frakcijų skaldos, skaldyto žvyro) rietuvių viršaus ir gilesnių sluoksnių imami reprezentatyvūs ėminiai. Iš kiekvienos rietuvės paimti vieniniai ėminiai supilami į atskirą dėžę ir sumaišomi. Iš jos paimamas bandinys tiriamos mineralinės medžiagos granulimetrinei sudėčiai ir kitoms savybėms (tankiui, formos ir plokštumo rodikliams, atsparumui šalčiui ir smūgiams ir kt.) nustatyti. Šaltųjų mineralinių miltelių vieniniai ėminiai imami iš uždaro siloso (talpyklos). Turint kiekvienos mineralinės medžiagos vidutinę (sumaišytų vieninių ėminių) granulimetrinę sudėtį, skaičiuojamas jų masės procentinis kiekis (šimte procentų), kuriam esant iš jų gauto mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinės sudėties kreivė (laužtė) patenka tarp mišinio granulimetrinės sudėties ribų. Geriausiu laikomas toks suprojektuotas asfalto mišinys, kurio mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinė sudėtis, išreikštos pilnutinėmis išbiromis per laboratorinius sietus (ir ypač per kontrolinius sietus), kreivė yra arti viršutinės ir apatinės techninių tolerancijų vidurio (centro). Šios granulimetrinės sudėties mineralinių medžiagų mišiniui parenkamas reikiamas bituminio rišiklio procentinis kiekis virš 100 procentų asfalto mišinio mineralinės dalies. Reikiamas bituminio rišiklio kiekis nustatomas Maršalo metodu. Tam pradžioje apskaičiuojamas tikėtinas optimalus jo kiekis. Po to nuo šio kiekio 0,5 % žingsniu du kartus mažinant ir du kartus didinant rišiklio kiekį gaunamos 5 jo kiekio projektuojamame asfalto mišinyje vertės (pvz., 4,2 %, 4,7 %, 5,2 %, 5,7 %, 6,2 %). Laboratorijoje paruoštus 5 suprojektuotos granulimetrinės sudėties pakankamos bandiniams gaminti masės vienodus mineralinių medžiagų mišinio bandomuosius kiekius ir pakaitinus iki reikiamos temperatūros, priklausančios nuo bituminio rišiklio rūšies ir markės, į kiekvieną iš jų supilamas apskaičiuotas skirtingas bitumo kiekis. Iš laboratorinėje maišyklėje su skirtingu bitumo kiekiu paruošto asfalto mišinio pagaminami ir išbandomi Maršalo bandiniai. Jie suskirstomi į kelias grupes, kurioms nustatomi fiziniai (maksimalus tankis, oro tuštymių kiekis, oro tuštymių, užpildytų bitumu, kiekis, tuštymių mineralinėse

medžiagose kiekis) ir mechaniniai (pastovumas, takumas, Maršalo koeficientas) rodikliai. Nubraižomos šių rodiklių priklausomybės nuo bitumo kiekio laužtės. Grafikuose nubraižomos asfalto mišinio kiekvieno fizinio ir mechaninio rodiklio normose (TRA ASFALTAS 08) pateiktos ribinės dvipusės arba vienpusės vertės. Laužčių ir norminių verčių horizontalių tiesių susikirtimo taškai „nuleidžiami“ į bitumo kiekio ašį. Tos bitumo kiekio vertės, kurioms esant užtikrinami visi normuotieji fiziniai ir mechaniniai rodikliai, laikomos jo leidžiamo kiekio ruožu, kurį padalijus perpus, gaunamas projektuojamas optimalus bitumo kiekis, atitinkantis panaudotų mineralinių medžiagų mišinį. Esant poreikiui, su optimaliu bitumo kiekiu laboratorijoje sumaišomas kontrolinis bandomasis asfalto mišinys, pagaminami ir išbandomi Maršalo bandiniai, pagal kurių vertes patikrinamas optimalus bitumo kiekis.



4.7 pav. Asfalto maišytuvo 1 ir asfalto maišytuvo 2 bitumo talpyklos ir transportavimo vamzdynas

Fig. 4.7. Bitumen transportation pipeline and tanks of asphalt mixing plant 1 and asphalt mixing plant 2

Iš suprojektuoto asfalto mišinio granulimetrinės sudėties nustatomas mineralinių komponentų (mineralinių miltelių MM, mažesnių už 0,063 mm dalelių; smėlio SM – 0,063–2 mm dalelių ir skaldos SK – didesnių už 2 mm dalelių) reikiamas procentinis kiekis. Apskaičiuojamas reikiamų dozuoti pradinių šaltųjų mineralinių medžiagų byrančių srautų masės santykis, vienam asfalto mišinio maišiniui pagaminti reikiama kiekvienos baigiamojo dozavimo mineralinės medžiagos (karštųjų frakcijų Fr 0 / 2, ..., Fr 16 / 22, šaltųjų mineralinių miltelių Mm ir mineralinio dulkyo Md) ir bitumo, taip pat priedų. Kiekvienas iš šių rodiklių

yra darbinė mišinio formulė. Darbe DMF laikomi ir suprojektuoto asfalto mišinio fiziniai ir mechaniniai rodikliai (4.2.4. poskyris).

Bitumo talpyklos, iš kurių vamzdynais (4.7 pav.) transportuojamas rišiklis, yra tos pačios abiem maišytuvams ASMA1 ir ASMA2, todėl daroma prielaida, kad eksperimentinių skaldos ir mastikos asfalto (SMA) mišinių gamybai panaudotas PMB 45/80-55 bitumas abiejose BDS1 ir BDS2 buvo transportuojamas būdamas vienodų savybių.

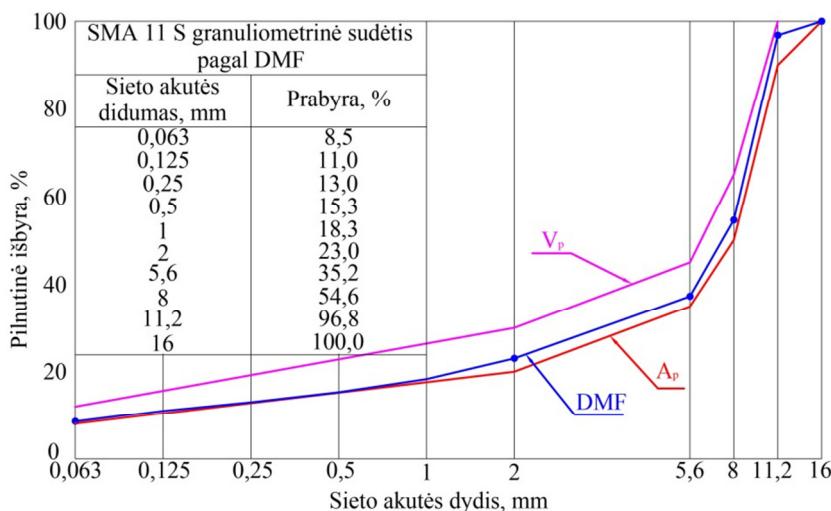
Gaminant iš tų pačių medžiagų vienodos sudėties skaldos ir mastikos asfalto (SMA) mišinį ASMA1 ir ASMA2 buvo keičiama maišymo trukmė. SMA 11 S mišiniai maišyklėje su bitumu buvo maišomi 20, 30, 40, 50 ir 60 sekundžių. SMA – asfalto mišinys, kuris turi netolydžią mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinę sudėtį ir rišiklį stabilizuojančių priedų (TRA ASFALTAS 08 2008). Atliekant aktyvųjį eksperimentą buvo gaminamas KMA mišinys, priklausantis skaldos ir mastikos asfaltų (SMA) rūšiai, kurio tipas 11 (jo mineralinių medžiagų mišinio viršutinio sieto akutės dydis yra 11 mm) ir jis naudojamas, kai kelio danga veikia sunkiosios transporto priemonės (ypatingoji apkrova S). Šis SMA 11 S mišinys buvo gaminamas su polimerais modifikuotu bitumu PMB 45/80-55, kurio maksimali leidžiama temperatūra 180 °C. Šio SMA mišinio leidžiama minimali temperatūra 150 °C, o maksimali – 180 °C.

SMA 11 S rūšies KMA mišinys abiem ASMA buvo gaminamas pagal tą patį sudėties projektą. Lietuvoje galiojantis norminis dokumentas *Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas „TRA ASFALTAS 08“* reglamentuoja reikalavimus kiekvieno KMA tipo granulimetrinei mišinio sudėčiai. Pro sietus prabyrančių mineralinių medžiagų apatinis (A_p) ir viršutinis (V_p) leidžiami procentiniai kiekiai (techninės tolerancijos) nurodyti TRA ASFALTAS 08 (2008), o suprojektuoto SMA 11 S mišinio – DMF (4.8 pav.).

SMA 11 S mišiniui gaminti buvo panaudotos granitinės atsijos (0/2 mm), trijų frakcijų granitinė skalda (2/5 mm; 5/8 mm; 8/11 mm), aktyvinti mineraliniai milteliai. Į mišinį buvo dedamas sukibimą gerinantis priedas *Iterlene* ir celiuliozės pluošto priedas *CPA*. Eksperimentinis tyrimas susideda iš dviejų etapų: gaminamo mišinio ėminių ėmimo (4.9 pav.) ir mišinio ėminių tyrimo laboratorijoje.

Kiekvienas pagaminto SMA mišinio atskirasis sudėtinis ėminys, panaudotas tyrime, iš kurio gaunama rišiklio (ir mineralinių komponentų) atskiroji vertė, buvo imamas iš pripildyto sunkvežimio kėbulo ASMA gamykloje, ėminio ėmėjui (laborantui) stovint ant specialios rampos. Sudėtinis ėminys buvo sudaromas imant KMA mišinio vieninius ėminus iš trimis kūgiais į kėbulą supilto SMA mišinio viršutinės paviršiaus dalies. Pagal LST EN 12697-27 standartą elementarieji (4 ir daugiau) ėminiai pilami ant šalia esančio švaraus skardos lapo, sumaišomi iki homogeniško ėminių mišinio. Gautas KMA mišinio plokščiaviršis kūgis ketvirčiuojant dalijamas kelis kartus į atskiras dalis, kol lieka SMA miši-

nio tiek, kiek jo reikia bitumui iš ėminio išekstrahuoti ir mineralinių komponentų kiekiui nustatyti. Šių ėminių ėmimo ir 3 skyriuje aprašomame tyrime naudotų ėminių ėmimo skirtumas yra toks, kad šiame eksperimente SMA mišinių, pagamintų skirtingais ASMA, sąlygas siekta išlaikyti kuo vienodesnes, todėl SMA mišinys nebuvo pilamas į kaupiamąjį bunkerį, o iškart pilamas į sunkvežimį ir ėminys buvo imamas iš tik ką pagaminto SMA mišinio.

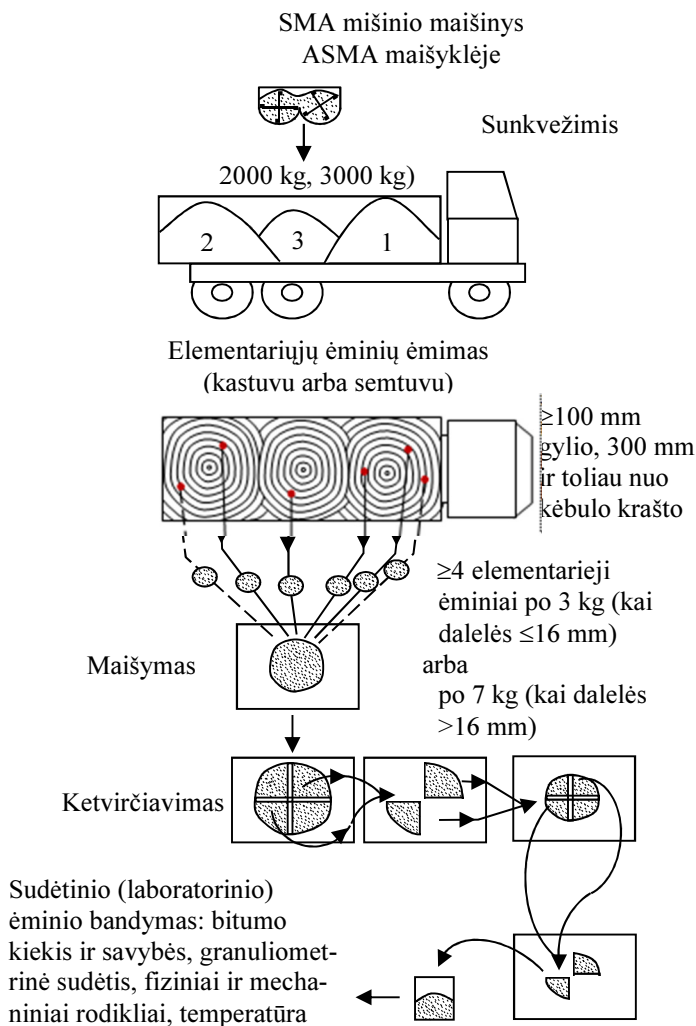


4.8 pav. Aktyviajam eksperimentui atlikti gaminto SMA 11 S mišinio projektinė granulometrinė sudėtis ir techninės tolerancijos

Fig. 4.8. Aggregate gradation and technical tolerances of SMA 11 S produced to conduct active experiment

Pirmajame eksperimento etape, laikantis standartuose numatytų procedūrų, buvo imami SMA mišinio ėminiai ir čia pat termometru išmatuota jų temperatūra. Pagamintas SMA mišinys iš maišyklės buvo pilamas tiesiai į sunkvežimio kėbulą ir nepateko į kaupiamąjį bunkerį-termosą. Dėl to buvo išvengta jo atšalimo, segregacijos ir papildomos bitumo oksidacijos. Visi 10 pagal standartą LST EN 12697:27 paimti laboratoriniai ėminiai, po 5 iš kiekvieno ASMA, kai mišinys buvo maišomas 20, 30, 40, 50, 60 s, buvo tiriami akredituotoje laboratorijoje, kurios visi įrenginiai periodiškai pagal reikavimus yra tikrinami. Todėl laboratoriniams tyrimams naudotų prietaisų rodmenų patikimumu abejoti nėra pagrindo. Nustatytas asfalto ėminiuose esančio bitumo kiekis, granulometrinė (frakcinė) sudėtis. Iš kiekvieno ėminio likusios dalies buvo pagaminti ir išbandyti Maršalo bandiniai. Nustatytas pastovumas ir takumas pagal Maršalą, Maršalo koeficientas, didžiausias KMA mišinio tankis, tuštymėtumas, tuštymių, užpildy-

tų bitumu, kiekis (VFB), tuštymių mineralinėse medžiagose kiekis (VMA). Taip pat ištirtas 10 bandinių išekstrahuotas ir regeneruotas sukiuoju garintuvu bitumas ir iš talpyklos prieš gamybą paimtas bitumas.



4.9 pav. Skaldos ir mastikos asfalto mišinio sudėtinio ėminio, naudojamo mišinio sudėčiai, fiziniams ir mechaniniams rodikliams tirti, sudarymo iš elementariųjų ėminių seka (pagal LST EN 12697-27)

Fig. 4.9. The sequence of constitution of bulk sample from the elementary samples of stone mastic asphalt (according to LST EN 12697-27)

Penetrometru *Humboldt H-2510*, kurio tikslumas 0,1 mm, matuojamos ribos 0–40 mm, nustatyta bitumo bandinių penetracija (Pen_{25}), žiedo ir rutulio prietaisu *Geotechnical Testing Equipment AS 0160* nustatyta minkštėjimo temperatūra (T_{sp}) ir apskaičiuotas penetracijos indeksas (I_p) (4.2 lentelė).

4.2 lentelė. Tyrimui naudota įranga ir jos parametrai

Table 4.2. Used testing equipment and its parameters

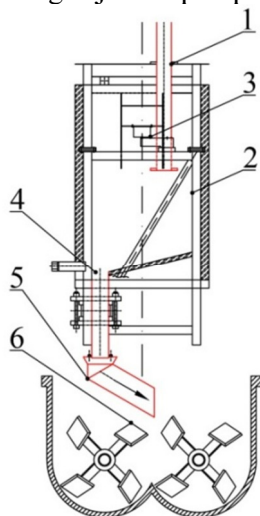
Penetrometras <i>Humboldt H-2510</i>		Minkštėjimo temperatūros nustatymo prietaisas <i>Geotechnical Testing Equipment AS 0160</i>	
Parametras	Reikšmė	Parametras	Reikšmė
Testo trukmės tikslumas	0,1 s	Matuojamos temperatūros ribos	30–157 °C (86–315 °F)
Adatos nuleidimo mechanizmas	Adata nuleidžiama paspaudus mygtuką ir sustoja automatiškai praėjus nustatytam laikui.	Naudojamas skystis ir temperatūros ribos	Distiliuotas vanduo (30–80 °C), UPS glicerinas (80–157 °C), Etilengliukolis (30–110 °C).
Matavimo ribos	0–40 mm		
Matavimo tikslumas	0,1 mm		

4.2.2. Skirtingų bitumo dozavimo sistemų lyginamoji analizė

Tyrimui buvo pasirinkta Lietuvoje esanti UAB „Fegda“ asfalto mišinio gamykla, kurioje veikia du periodinio veikimo ASMA. SMA mišinys buvo gaminamas dviem skirtingais įrenginiais. ASMA1 (*Ammann Global 160*) yra naujesnis ir modernesnis, 160 t/h maksimalaus našumo ($Q_{\max} = 160$ t/h) technologinis įrenginys, pagamintas Vokietijoje, ASMA2 (*Ammann Euro A 240*) yra to paties gamintojo senesnis įrenginys, kurio $Q_{\max} = 240$ t/h. BDS, t. y. ASMA įrenginiai, kuriais bitumas yra siurbiamas, transportuojamas, sveriamas ir supilamas į maišyklę, taip pat skiriasi.

ASMA1 sumontuota BDS1 (4.10 pav.) bitumas iš talpyklų į svėrimo baką pumpuojamas *Steimel TFE 10-240* krumpliaratiniu siurbliu 230–340 l/min debitu. Rišiklis transportuojamas 80 mm skersmens vamzdžiu apie 50 m atstumu iki svėrimo bako 2. Į svėrimo bakelį pripumpavus nustatytą bitumo kiekį, svėrimo mechanizmas 3 perduoda signalu informaciją pagrindiniam kompiuteriui ir šis perjungia vožtuvą. Atsverta bitumo dozė (138 kg pagal DMF) per išteklėjimo vamzdį 4 ir supylimo vamzdį 5 savuoju slėgiu iš bakelio išteka į maišyklę vienu didelio debito gravitaciniu srautu (DDGS). ASMA2 sumontuota BDS2 (4.11 pav.) bitumas iš talpyklų į svėrimo baką pumpuojamas tokiais pačiais krumpliaratiniais siurbliais. Šioje sistemoje ASMA eksploatacijos pradžioje buvo naudo-

jami tik dvi bitumo laikymo talpyklos su atskiromis transportavimo sistemomis. Todėl į svėrimo bunkerį bitumas galėjo būti pumpuojamas dviem vamzdžiais 1.



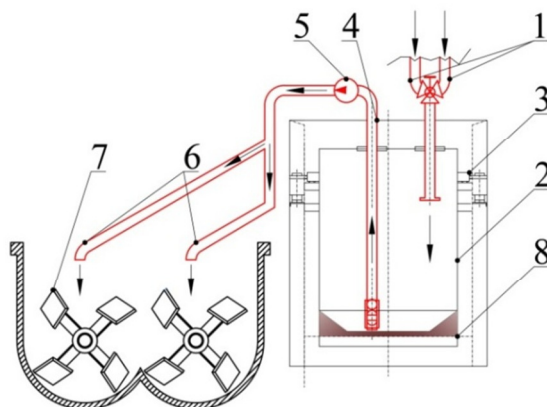
4.10 pav. Bitumo dozavimo sistemos BBS1 pagrindinių elementų schema: 1 – įtekėjimo vamzdis; 2 – svėrimo bakelis; 3 – svėrimo mechanizmas; 4 – išpylimo vamzdis; 5 – dozavimo vamzdis; 6 – maišyklė

Fig. 4.10. A schematic view of major elements of bitumen batching system BBS1:
1 – incoming pipe; 2 – weigh bucket; 3 – weighing mechanism; 4 – outgoing pipe;
5 – batching pipe; 6 – mixer

Vėliau, prireikus vienu metu laikyti 3–4 skirtingų rūšių bitumus, ši sistema modernizuota. Pastatyta daugiau talpyklų, o siurbimo vamzdynai valdomi automatiniais vožtuvais. BDS2 rišiklis iki svėrimo bunkerio 2 transportuojamas apie 8 m. Atsvėrus reikiamą rišiklio dozę, kaip BDS1, bitumo srautas nukreipiamas trijų padėčių vožtuvu ir rišiklis teka uždaroje sistemoje (vyksta permaišymas). Plokštelinis siurblys 5 *Blackmer NP3 C* apie 500 l/min debitu bakelyje 2 atsvertą bitumo dozę (201 kg pagal DMF) išsiurbimo vamzdžiu 4 ir įpurškimo vamzdžiais 6 įpurškia į maišyklę 7.

Kai ASMA2 buvo tik pradėtas eksploatuoti, įrenginyje buvo originalūs įpurškimo į maišyklę vamzdžiai su daug mažo skersmens skylučių, leidusių bitumą į maišyklę išpurkšti lašais. Maišyklėje esanti dulkių aplinka laikui bėgant užklijuodavo tas skylutes ir dėl to ilgiau užtrukdavo bitumo ištekejimas į maišyklę. Todėl buvo nutarta įpurškimo į maišyklę vamzdžius sutrumpinti, jų galuose padaryti didesnio skersmens išpurškimo skyles, kurios neužaktų. Šios dvi sistemos skiriasi dozuojamo bitumo išpylimo technologija: BDS1 didelio debito gravitaciniu srautu (DDGS) į maišyklę išpilant atsverto bitumo dozę, rišiklio

laisvo paviršiaus, sąveikaujančio su aplinkos oro deguonimi, plotas yra mažesnis, dėl to tikėtina, kad jis mažiau oksiduojasi; BDS2 dviem mažo skersmens vamzdžiais aukšto slėgio čiurkšlėmis (ASČ), skylančiomis į lašus, į maišyklę išpilant bitumo dozę, jis krisdamas čiurkšlėmis turi didesnę paviršiaus plotą ir sparčiai oksiduojasi.



4.11 pav. Bitumo dozavimo sistemos BDS2 pagrindinių elementų schema:

1 – įtekėjimo vamzdžiai; 2 – svėrimo bakelis; 3 – svėrimo mechanizmas; 4 – išsiurbimo vamzdis; 5 – siurblys; 6 – išpylimo vamzdžiai; 7 – maišyklė

Fig. 4.11. A schematic view of major structural elements of bitumen batching system

BBS2: 1 – incoming pipes; 2 – weigh bucket; 3 – weighing mechanism;
4 – outgoing pipe; 5 – pump for pumping the weighed out bitumen into mixer;
6 – mixer spray bars; 7 – mixer

Šis eksperimentinis tyrimas leis išspręsti vieną iš disertaciniame darbo keliamų uždavinių ir nustatyti, kiek pakinta skirtingose BDS transportuojamo ir dozuojamo bitumo savybės: penetracija, minkštėjimo temperatūra ir penetracijos indeksas.

4.2.3. Iš pagaminto SMA mišinio regeneruoto bitumo savybės

Nustatyta, kad ASMA1 ir ASMA2 pagaminto SMA mišinio frakcinė sudėtis skyrėsi nedaug ir neviršijo tolerancijų nuo DMF reikšmės (išskyrus >8 mm grūdelių kiekį) (4.3 lentelė). Mineralinių miltelių (frakcija <0,063 mm) beveik visuose ASMA2 pagaminto SMA mišinių ėminiuose buvo mažiau, nei pagamintuose ASMA1. Visuose ėminiuose šių grūdelių procentinė masė skyrėsi nuo DMF tolerancijų ribose, t. y. nuokrypis buvo mažesnis kaip $\pm 3,0\%$. 9 iš 10 bandinių buvo nustatytas didesnis nei nurodyta DMF >8 mm frakcijos ir >5,6 mm frakcijos mineralinių medžiagų kiekis. Smėlio frakcijos

(0,063–2 mm) pagamintame SMA mišinyje kiekiai mažai skyrėsi (didžiausi nuokrypiai nuo DMF atitinkamai buvo –1,1 % BDS1 ir +0,5 % BDS2). Bitumo kiekio pagamintame SMA mišinyje didžiausi nustatyti nuokrypiai buvo –0,3 % BDS1 ir +0,3 % BDS2. Jie atitiko reikalavimus ($\pm 0,5$ %). Tai rodo, kad abiejuose ASMA buvo gaminami vienodos komponentinės sudėties SMA. Tik SMA mišinyje, pagamintame ASMA1, kai buvo maišoma 30 s, didesnių už 8 mm grūdelių kiekis skyrėsi +12,0 % nuo DMF, t. y. neatitiko tolerancijų ($\pm 8,0$ %) reikalavimų.

ASMA maišyklėje mišinys maišomas aukštoje darbinėje temperatūroje (Grabowski *et al.* 2013), kurią nulemia džiovinimo ir kaitinimo būgne įkaitintos mineralinės medžiagos ir saugojimo talpyklose įkaitintas bitumas. Žinant, kad bitumo oksidacijai didžiausią įtaką turi jo temperatūra, vertinant bitumo savybių pokytį dėl oksidacijos buvo svarbu nustatyti mišinio maišymo temperatūrą. Tyrime buvo analizuojama ASMA valdymo kompiuteryje fiksuojama temperatūra ir termometru išmatuota SMA ėminių, tik ką paimtų iš sunkvežimio kėbulo, temperatūra (4.4 lentelė).

4.3 lentelė. Skaldos ir mastikos asfalto mišinio mineralinės dalies frakcinė sudėtis ir bitumo kiekis jame

Table 4.3. Composition of stone mastic asphalt mixture mineral part fraction and its bitumen content

Frakcija	DMF	Mineralinių medžiagų ir bitumo kiekis, %					Didžiausias nuokrypis nuo DMF, ±%
		Maišymo trukmė t_m , s					
		20	30	40	50	60	
Asfalto maišytuvas ASMA1 (BDS1)							
>8	45,4	48,8	57,4	52,0	50,6	50,6	+12,0
>5,6	62,7	64,8	68,1	63,0	62,2	63,9	+5,4
>2	77,0	76,7	77,6	75,7	75,8	75,9	−1,3
0,063–2	14,5	14,0	13,4	14,3	14,9	14,6	−1,1
<0,063	8,5	9,4	9,0	10,1	9,3	9,5	+1,6
Bitumas	6,6	6,6	6,3	6,8	6,6	6,6	−0,3
Asfalto maišytuvas ASMA2 (BDS2)							
>8	45,4	53,1	47,5	43,8	52,3	53,4	+8,0
>5,6	62,7	67,7	65,4	64,3	67,5	68,1	+5,4
>2	77,0	77,2	76,5	76,1	77,3	76,9	−0,9
0,063–2	14,5	14,8	15,1	15,3	14,8	14,1	+0,8
<0,063	8,5	8,0	8,4	8,6	7,8	9,0	+0,5
Bitumas	6,6	6,6	6,7	6,9	6,4	6,8	+0,3

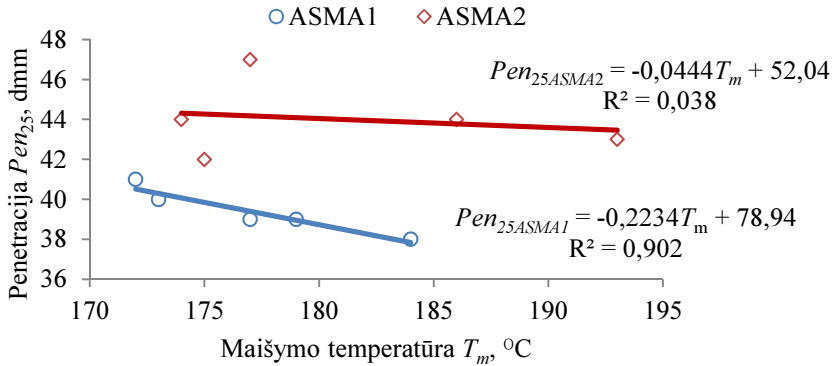
4.4. lentelė Skaldos ir mastikos asfalto mišinio gamybos ir paimtų jo ėminių temperatūra
Table 4.4. Stone mastic asphalt mixture production and its samples temperature

Maišymo trukmė t_m , s	SMA mišinio gamybos temperatūros (ASMA valdymo kompiuteryje išsaugomi duomenys) aritmetinis vidurkis, °C	
	ASMA1 (BDS1)	ASMA2 (BDS2)
20	173,1	174,0
30	172,6	175,3
40	184,5	177,5
50	177,9	186,5
60	179,3	193,4
Paimtų SMA mišinio ėminių temperatūra, °C		
	ASMA1 (BDS1)	ASMA2 (BDS2)
20	169	181
30	171	171
40	187	182
50	192	196
60	nematuota	186

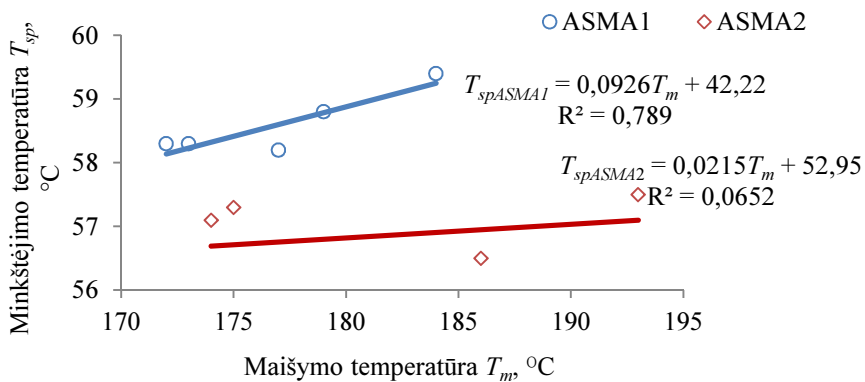
Bitumas talpyklose buvo laikomas 160 °C temperatūroje. Kadangi į ASMA1 ir ASMA2 rišiklis izoliuotu vamzdynu buvo pumpuojamas iš tos pačios bitumo talpyklos, galima teigti, kad jo temperatūra po transportavimo vamzdynais buvo apie 160 °C. Mineralinių medžiagų temperatūrą valdyti palaikant ją pastovią yra sunkiau. Perkaitintos mineralinės medžiagos dėl savo didelės tūrinės dalies mišinyje gali stipriai pakelti bendrą SMA mišinio temperatūrą. *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklėse „IT ASFALTAS 08“* nustatyta, kad SMA mišinio, gaminamo su PMB 45/80-55 markės rišikliu, temperatūra turi būti ne mažesnė kaip 150 °C ir ne didesnė kaip 180 °C. Kai kurie asfalto mišinio maišiniai buvo kritinės temperatūros arba net ją viršijo. Tai galėjo paspartinti bitumo oksidacijos procesus. Bitumo kokybės parametrų (Pen_{25} , T_{sp}) kitimo priklausomybė nuo mišinių gamybos temperatūros aprašyta didžiausią determinacijos koeficientą R^2 turinčiomis regresijos lygtimis (4.12 pav.).

ASMA1 maišytuvu gaminamo mišinio temperatūra apie 90 % ($R^2 = 0,902$) nulėmė bitumo penetracijos kitimą ir apie 79 % ($R^2 = 0,789$) minkštėjimo temperatūros kitimą. Senesniu, ASMA2 maišytuvu pagaminto mišinio bitumo penetracija taip pat mažėjo, o minkštėjimo temperatūra didėjo, tačiau temperatūros įtaka buvo mažesnė, nei ASMA1. Bitumo savybių kitimo tendencija didėjant mišinio maišymo maišyklėje temperatūrai nuo 172 °C iki 187 °C buvo tokia pat ASMA1 ir ASMA2. Galima daryti išvadą, kad SMA mišinio maišymo maišyklėje temperatūra turėjo įtakos bitumo savybių pokyčiui dėl spartesnės jo oksidacijos.

Iš SMA 11 S mišinio bandinių išekstrahuoto bitumo laboratorinių tyrimų rezultatai parodė, kad bituminio rišiklio kokybės parametrų Pen_{25} , T_{sp} , I_p kitimas priklauso nuo BDS ir mišinio maišymo trukmės t_m .



a)



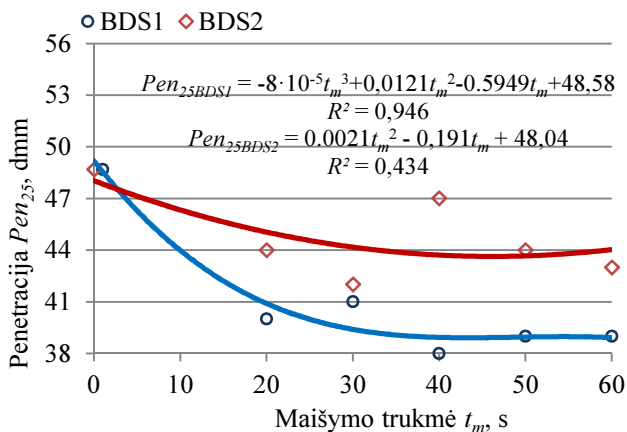
b)

4.12 pav. Iš ASMA1 ir ASMA2 mašytuvuose pagaminto skaldos ir mastikos asfalto mišinio atskirto tirpiojo bitumo savybių priklausomybė nuo gamybos temperatūros T_m : a – penetracijos (Pen_{25}); b – minkštėjimo temperatūros (T_{sp})

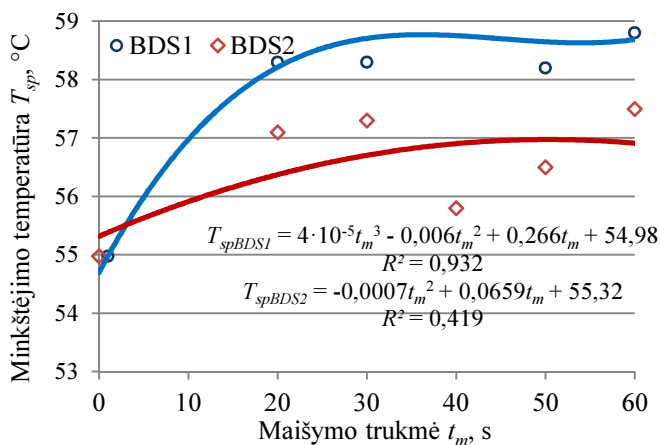
Fig. 4.12. Dependence of separate soluble bitumen properties of stone mastic asphalt mixture produced in AMP1 and AMP2 plants on production temperature T_m : a – penetration (Pen_{25}); b – softening point (T_{sp}).

Taikant regresinę analizę buvo naudotos įvairios lygčių formos ir jomis aprašyti eksperimentais gauti duomenys. Bitumo kiekvieno rodiklio (Pen_{25} , T_{sp} , I_p) abiejų BDS kitimas, keičiant SMA mišinio maišymo trukmę, aprašytas tos formos kreivalinėmis regresijos lygtimis, kurių buvo didžiausias determinacijos koefi-

cientas R^2 (4.13 pav.). Bituminio rišiklio tyrimų prieš SMA mišinio gamybą rezultatus duomenys pateikiami E priedo E3 lentelėje, o bituminio rišiklio, išekstrahuoto iš eksperimento metu pagaminto SMA mišinio, duomenys pateikiami E priedo E6 lentelėje.



a)

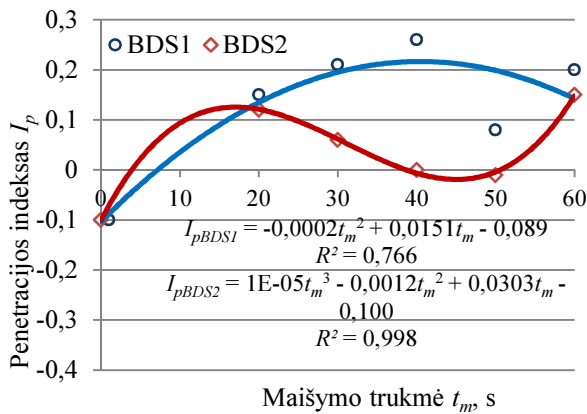


b)

4.13. pav. Iš ASMA1 ir ASMA2 maišytuvuose pagaminto skaldos ir mastikos asfalto mišinio atskirto tirpiojo bitumo savybių priklausomybė nuo mišinio maišymo trukmės:

a – penetracija (Pen_{25}); b – minkštėjimo temperatūra (T_{sp})

Fig. 4.13. Dependence of separated soluble bitumen properties of stone mastic asphalt mixture produced in AMP1 and AMP2 plants on mixing time: a – penetration (Pen_{25}); b – softening point (T_{sp})



4.14. pav. Iš ASMA1 ir ASMA2 maišytuvuose pagaminto skaldos ir mastikos asfalto mišinio atskirto tirpiojo bitumo penetracijos indekso (I_p) priklausomybė nuo mišinio maišymo trukmės

Fig. 4.14. Dependence of separated soluble bitumen penetration index (I_p) of stone mastic asphalt mixture produced in AMP1 and AMP2 plants on mixing time

BDS1 panaudoto bitumo Pen_{25} nuo pradinės reikšmės 48,7 dmm sumažėjo iki 39 dmm, kai jis buvo išekstrahuotas iš SMA mišinio ir regeneruotas sūkiuoju garintuvu. Bitumo penetracijos Pen_{25} kitimas apie 95 % ($R^2 = 0,946$) buvo nulemtas SMA mišinio maišymo trukmės t_m . Minkštėjimo temperatūra T_{sp} nuo pradinės reikšmės 55,0 °C padidėjo iki 58,6 °C ir šis pokytis apie 93 % ($R^2 = 0,932$) priklauso nuo asfalto mišinio maišymo trukmės.

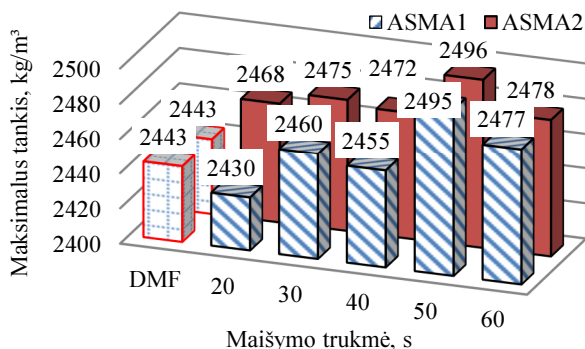
BDS2 panaudoto bitumo penetracijos Pen_{25} ir minkštėjimo T_{sp} temperatūros kitimo tendencija didinant maišymo trukmę iki 60 s buvo tokia pat kaip BDS1. Tačiau šių bitumo kokybės rodiklių kitimas tik apie 42–43 % buvo nulemtas SMA mišinio maišytuvo trukmės t_m . Daugiau kaip 57 % jų kitimas priklausė nuo regresijos lygtyse nesančių veiksnių, gali būti, kad nuo temperatūros.

Apskaičiuotos penetracijos indekso I_p reikšmės (4.14 pav.) nuo pradinės reikšmės (talpykloje esančio bitumo) padidėjo nuo –0,1 iki +0,26 bitumo, išskirto iš mišinių, pagamintų ASMA1, ir iki +0,15 bitumo, išskirto iš mišinių, pagamintų ASMA2.

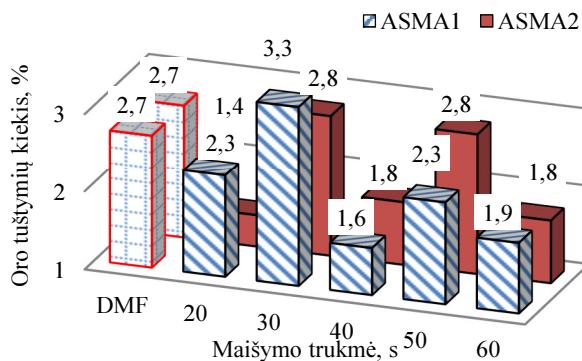
4.2.4. Maišymo trukmės įtaka skaldos ir mastikos asfalto mišinio fiziniams ir mechaniniams rodikliams

Taikant skirtingas BDS, pagaminto SMA mišinio fizinių ir mechaninių rodiklių kitimui įtakos turėjo ne tik bitumo išpylimo į maišyklę būdas, bet ir mišinio maišymo joje trukmė (4.15–4.17 pav.). Maksimalus tankis ir oro tuštymetumo fizi-

niai KMA mišinio parametrai (4.15 pav.) kito dėl maišymo trukmės. Pastebima tendencija, kad didėjant maišymo trukmei nuo 20 iki 60 s, didėja maksimalus tankis ir netolygiai mažėja mišinio tuštymėtumas. BDS konstrukcijos įtaka fiziniams SMA mišinio parametrams nebuvo reikšminga. Tyrimas parodė, kad aišrios koreliacijos tarp oro tuštymių, užpildytų bitumu (VFB), tuštymių mineralinėse medžiagose (VMA) ir ASMA tipo bei maišymo trukmės t_m nėra.



a)



b)

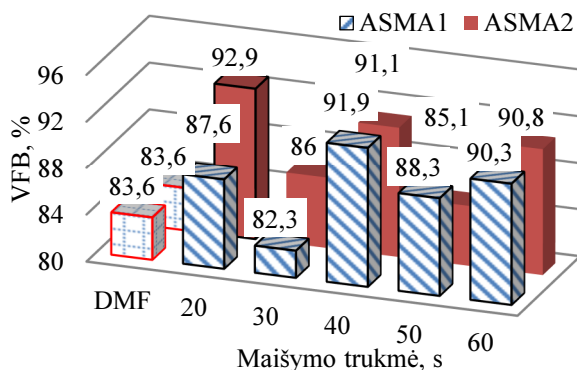
4.15 pav. Fizinių skaldos ir mastikos asfalto mišinio savybių kitimo priklausomybės nuo maišymo trukmės: a – maksimalus tankis; b – oro tuštymių kiekis

Fig. 4.15. Physical properties of stone mastic asphalt mixture: a – maximum density; b – air void content

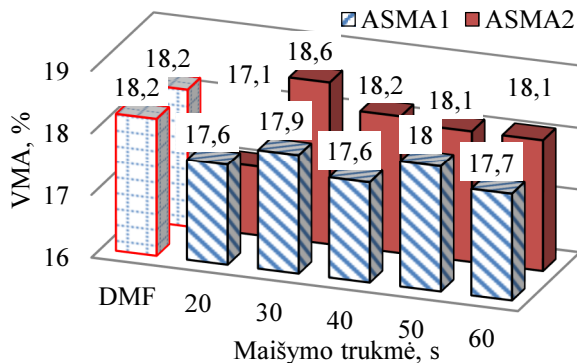
Didesnis mechaninis stipris KMA gali būti dėl dviejų priežasčių. Pirma, dėl bitumo senėjimo procesų, kai ilgiau maišant KMA mišinį, jo klampa padidėja. Antra,

ilgiau maišant mišinį, bitumas geriau padengia mineralinius grūdėlius ištinėmis reikiamo storio plėvelėmis, dėl to padidėja adhezijos jėgos.

Oksidacijos procesą sudarė 2 dedamosios: oksidacija jį pilant iš dozatoriaus į maišyklę ir oksidacija maišant. Kuo ilgiau maišomas mišinys, tuo ilgiau tęsiasi oksidacijos procesas. Abiejų ASMA maišymo procesas buvo vienodas, todėl mišinio stiprumo savybių skirtumo priežastis gali būti skirtingas bitumo senėjimo intensyvumas jį pilant iš dozatoriaus į maišyklę ir skirtinga SMA mišinio gamybos temperatūra.



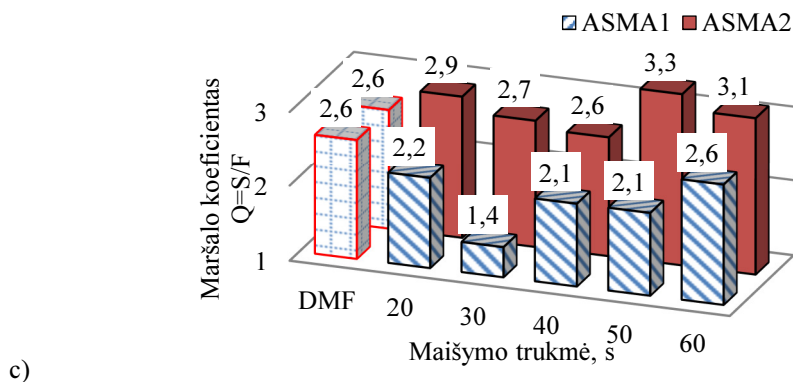
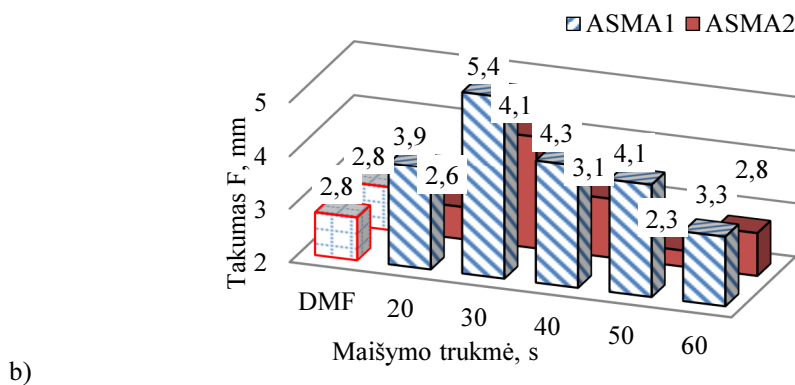
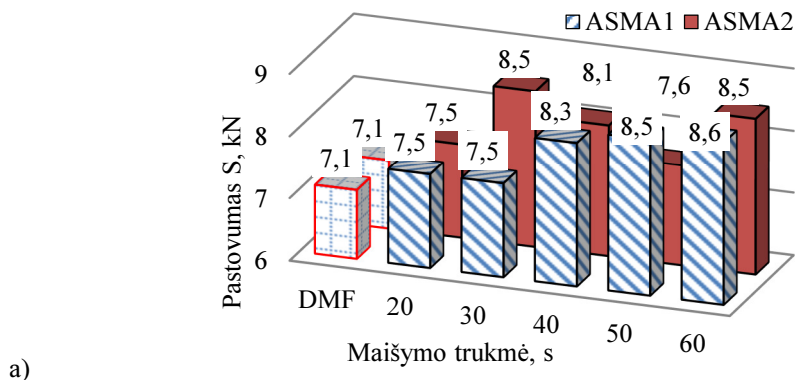
a)



b)

4.16 pav. Fizinių skaldos ir mastikos asfalto mišinio savybių kitimo priklausomybės nuo maišymo trukmės: a – oro tuštymės užpildytos bitumu (VFB); b – oro tuštymės mineralinėse medžiagose (VMA)

Fig. 4.16. Physical properties of stone mastic asphalt mixture: a – voids filled bitumen (VFB); b – voids in mineral aggregates (VMA)



4.17 pav. Mechaninių skaldos ir mastikos asfalto mišinio savybių kitimo priklausomybės nuo maišymo trukmės: a – pastovumas S ; b – takumas F ; c – Maršalo koeficientas Q

Fig. 4.17. Mechanical properties of stone mastic asphalt mixture: a – stability S ; b – flow F ; c – Marshall quotient Q

Nustatyta, kad ilgėjant maišymo trukmei, SMA mišinio pastovumas pagal Maršalą turėjo didėjimo, o takumas pagal Maršalą (plastiškumas) – mažėjimo tendenciją (4.17 pav.). Didinant SMA maišymo trukmę t_m , mažėja laisvojo bitumo dalis ir didėja orientuotojo bitumo, kuriuo padengiamas vis didesnis ypač smulkių dalelių paviršiaus plotas, dalis. SMA mišinio, pagaminto ASMA2, Maršalo koeficientas padidėjo 7 %, o pagaminto ASMA1 – 18 %. Nors BDS tipo (technologijos) įtaką įvertinti yra sudėtinga, Maršalo bandinių mechaniniai rodikliai rodo, kad ASMA2 maišytuve pagaminto SMA mišinio Maršalo koeficientas visais tirtais atvejais yra didesnis. ASMA1 ir ASMA2 pagaminto SMA mišinio bandinių fizinių ir mechaninių parametrų tyrimų rezultatai pateikiami E priedo E4–E5 lentelėse.

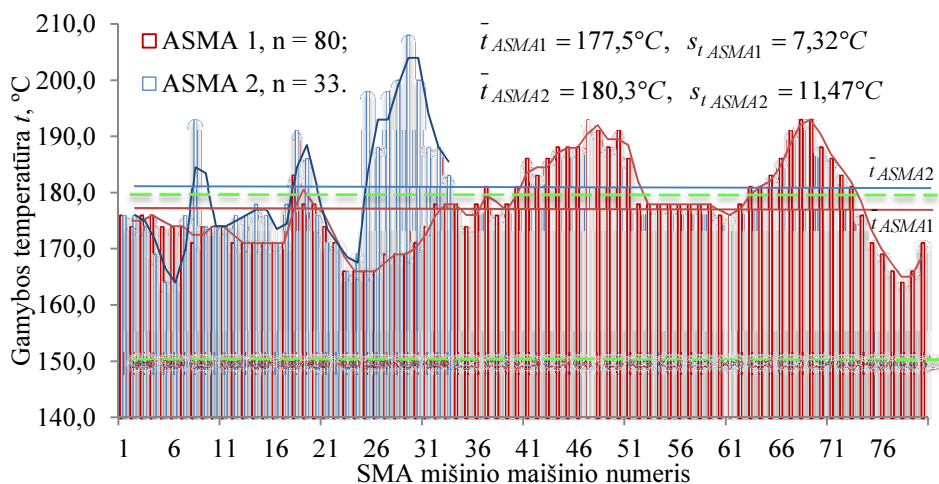
Iš SMA mišinio išekstrahuoto ir sukiuoju garintuvu regeneruoto bitumo I_p po dozavimo BDS1 ir maišymo maišyklėje didėja nuo –0,1 iki 0,21–0,26. Bitumo, sudozuoto BDS2, I_p didėja iki 0,12–0,15. Bitumas, išekstrahuotas iš ASMA2 įrenginyje pagaminto SMA mišinio, visais tirtais atvejais turėjo geresnes savybes – mažesnius penetracijos indekso pokyčius. Mažesnis penetracijos indeksas leidžia prognozuoti, kad kelio asfalto dangos eksploatacinės savybės bus geresnės, t. y. tokia asfalto danga bus atsparesnė provėžų susidarymui.

Iš SMA mišinio išskirto bituminio rišiklio savybių kitimas didinant mišinio maišymo trukmę iki 60 s aiškos tendencijos neturi. Tiriamose ribose nuo 20 s iki 60 s didžiausias bitumo penetracijos mažėjimas nustatytas esant 40 s trukmei BDS1 ir esant 30 s BDS2.

Nustatyta, kad maišymo trukmė turi įtakos SMA mišinio fizinėms ir mechaninėms savybėms. Pastovumas esant ilgesnei maišymo trukmei didėja nuo 7,5 kN iki 8,6 kN ASMA1 pagaminto mišinio ir nuo 7,5 kN iki 8,5 kN ASMA2 pagaminto mišinio. Takumas turi mažėjimo tendenciją ilgiau maišant SMA mišinį. Nustatyta, kad bitumo penetracija laikymo, svėrimo, dozavimo ir maišymo iki 60 s procesų metu sumažėja iki 22 %. Perkaitinus mineralines medžiagas, didėjant SMA mišinio gamybos temperatūrai nuo 172 °C iki 187 °C, iš jo išskirto bitumo penetracija ASMA1 sumažėjo nuo 41 dmm iki 38 dmm, o ASMA2 nuo 44 dmm iki 43 dmm. Minkštėjimo temperatūra ASMA1 padidėjo nuo 58 °C iki 59 °C, ASMA2 nuo 56,5 °C iki 57 °C.

ASMA1 ir ASMA2 kompiuteriuose yra užfiksuojama kiekvieno maišinio temperatūra maišyklėje. Palyginus antrajame skyriuje pateikiamą teorinį tyrimą ir eksperimentinių tyrimų rezultatus galima matyti, kad aukštesnė gamybos temperatūra turėjo įtakos didesniai difuziškumui ir dėl to vykusiai spartesnei oksidacijai (4.18 pav.). Kai kurių tiek ASMA1, tiek ASMA2 gamintų KMA mišinio maišinių gamybos temperatūra, užfiksuota ASMA termometro, buvo gerokai aukštesnė nei leidžiama 180 °C, nurodyta TRA ASFALTAS 08 (2008). Specialiai temperatūra nebuvo keičiama – ji turėjo būti pastovi, bet dėl mineralinių medžiagų drėgmės kaitos, srauto intensyvumo, degiklio liepsnos išskiriama ši-

lumos energija neatitiko reikiamo energijos kiekio medžiagoms išdžiovinti ir įkaitinti iki $t = const$. Kai kurių maišinių, maišytų ASMA1, temperatūra buvo daugiau nei 200 °C. Remiantis antrojo skyriaus teorinių tyrimų išvadomis ir eksperimentinio tyrimo rezultatais galima daryti išvadą, kad bitumo iš SMA mišinių, pagamintų ASMA1, klampa dėl aukštesnės temperatūros, didesnio bitumo difuziškumo ir didesnio kiekio susiformavusių karbonilo junginių, padidėjo labiau, nei bitumo iš ASMA2 pagamintų SMA mišinių.

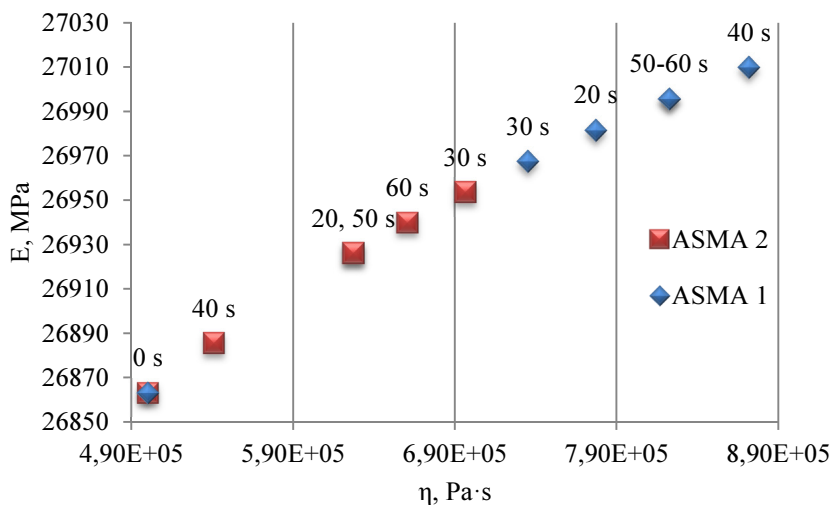


4.18 pav. Eksperimento metu gamintų skaldos ir mastikos asfalto mišinio maišinių gamybos temperatūra ASMA1 ir ASMA2 maišytuvuose (punktyrine linija pažymėtos minimali ir maksimali leidžiamos gamybos t ribos)

Fig. 4.18. Temperature of stone mastic asphalt mixture batches produced during the experiment in AMP and AMP2 asphalt mixing plants (dashed line represents the limits of minimum and maximum t of production)

Šią išvadą patvirtino teoriniame skyriuje pateiktos difuziškumo nuo temperatūros, karbonilų kiekio susiformavimo dėl temperatūros priklausomybės ir penetracijos bei minkstėjimo temperatūros eksperimentinių testų rezultatai. Palyginus oksidacijos paveiktas bitumo klampas matoma, kad dėl mažėjančios penetracijos ir didėjančios klampos bitumo ASMA1 dinaminis modulis buvo didesnis. Mineralinių medžiagų temperatūra nulėmė bitumo trumpalaikio senėjimo mastą, padidėjusią rišiklio klampą ir dėl to pakitusį SMA mišinio dinaminį modulį E (4.19 pav.). Kadangi įkaitintos mineralinės medžiagos sudaro daugiau nei 90 % viso SMA mišinio tūrio, o bitumas tik apie 6–7 % tūrio, tai dėl medžiagų susimaišymo maišyklėje vykstančių šilumos mainų bitumo temperatūra

staigiai kyla, ypač sąlyčio su mineralinių medžiagų grūdelių paviršiumi vietose ir tuo metu įvykstantis oksidacijos reakcijų masto šuolis yra daugiausia nuleimantis bitumo degradaciją dozavimo, maišymosi ir supylimo metu. Galutinėje gamybos operacijoje – SMA mišinio maišymo maišyklėje metu reikia kontroliuoti baigiamųjų dozuoti karštųjų mineralinių medžiagų frakcijų temperatūrą, nes net labai kontroliuojama ir stebima bitumo temperatūra nelemia bendros maišymo temperatūros.



4.19 pav. Naudojant aktyviajame eksperimente gautus duomenis apskaičiuota dinaminio modulio E priklausomybė nuo bitumo dinaminės klampos

Fig. 4.19. Dependence of dynamic modulus E on bitumen dynamic viscosity calculated using the data obtained during active experiment

Dėl aukštesnės SMA mišinio gamybos temperatūros labiau sumažėjusi penetracija, padidėjusi minkštėjimo temperatūra ir dinaminė klampa kartu su oro tuštymių kiekiu, bitumo ir kitų komponentų kiekiu nulemia SMA mišinio dinaminį modulį E . Nors tyrimas parodė, kad skirtingos dozavimo technologijos lemia nevienodą bitumo TLS, atliekant tolesnius tyrimus būtina įvertinti kitų parametrų, tokių kaip šilumos mainų tarp iki 200 °C besiskiriančių bitumo, ASMA įrenginių ir atskirų šaltųjų ir šiltųjų mineralinių medžiagų, mastą, greitį.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Transporto kelių, oro uostų ir kitų eismo zonų dangai tiesi agresyvaus klimato sąlygomis, kurioms priskiriama Lietuva, dažniausiai naudojami karšto maišymo asfalto (KMA) mišiniai, pagaminti sudėtinguose periodinio veikimo (gamybos maišiniiais) asfalto maišytuvuose (ASMA), kurių konstrukcinės ir technologinės savybės nėra išnaudojamos. ASMA, be kitų būtinųjų technologinių įrenginių, naudojama ir bitumo dozavimo sistema (BDS), skirta bituminiui rišikliui priimti, laikyti, kaitinti, transportuoti ir sverti reikiamos masės jo dozes, kurioje intensyviai vyksta bituminio rišiklio trumpalaikio senėjimo negrįžtamieji procesai dėl jo oksidacijos ir perkaitinimo.

2. Unikaliu aktyviuoju eksperimentiniu tyrimu, atliktu realiomis asfalto mišinio gamybos sąlygomis, nustatyta, kad bituminio rišiklio, esančio pagamintame KMA mišinyje, savybėms įtakos turi bitumo išpylimo iš dozatoriaus būdas, temperatūra ir maišymo su karštosiomis mineralinėmis medžiagomis trukmė.

3. Pagal masę atseikėto bitumo dozę iš svėrimo bako išpilant į maišyklę koncentruotu didelio intensyvumo srautu (BDS1) ir išpurškiant aukštu slėgiu čiurkšlėmis ir lašais (BDS2), dėl skirtingo su aplinkos oro deguonimi sąveikaujančio paviršiaus ploto, nevienodu intensyvumu vyksta bitumo oksidacijos trumpalaikio senėjimo procesas. Šį procesą spartina aukšta bitumo temperatūra ir didėjanti kritimo trukmė.

4. Skirtingomis BDS atsvertą ir išpiltą bitumą maišant priverstinio maišymo dviejų velenų panašių parametrų ASMA maišyklėse nuo 20 s iki 60 s (maišymo trukmę keičiant 10 s žingsniu) iš SMA mišinio ėminių išekstrahuoto ir sukiuoju garintuvu atskirto tirpiojo bitumo penetracija sumažėjo nuo 49 dmm iki 39 dmm (ASMA1) ir nuo 49 dmm iki 43 dmm (ASMA2), o minkštėjimo temperatūra padidėjo nuo 55 °C iki 59 °C (ASMA1) ir nuo 55 °C iki 58 °C (ASMA2).

5. Nustatyta, kad maišymo trukmė turi įtakos SMA mišinio fizinėms ir mechaninėms savybėms. Maišymo trukmei ilgėjant nuo 20 s iki 60 s ir ASMA1, ir ASMA2 pagaminto SMA mišinio maksimalus tankis didėja, oro tuštymų kiekis mažėja iki 1,8–1,9 %. Pastovumas pagal Maršalą nuo 7,5 kN (maišant 20 s) padidėjo 13–15 %, kai jis buvo maišomas 60 s, takumas maišant medžiagas nuo 20–30 s iki 60 s sumažėjo 39–31 % (ASMA1 – nuo 5,4 mm iki 3,3 mm; ASMA2 – nuo 4,1 mm iki 2,8 mm). Maršalo koeficientas nuo trukmės beveik nepriklausė, bet turėjo tendenciją didėti. Apie 29 % mažesnės jo vertės buvo ASMA1 pagaminto SMA mišinio.

6. Tiriant ir vertinant BDS modernizavimo efektyvumą pagal paimtų KMA mišinio ėminių tyrimo rezultatus nustatyta, kad tirpaus bitumo kiekio jame nuokrypių nuo DMF standartinis nuokrypis ir aritmetinis vidurkis prieš modernizavimą ir po jo beveik nepakito. Tačiau visus tirtus nuokrypius suskirsčius į 0,10 % dydžio nuokrypių intervalus nustatyta, kad prieš BDS modernizavimą su

bitumo trūkumu buvo gaminama 46,9 % maišinio, iš kurių 5,7 % su didesniu nei 0,30 % rišiklio trūkumu, o po modernizavimo pagaminti KMA mišinio maišiniai su bitumo trūkumu sudarė 40,1 %, iš kurių su didesniu nei 0,30 % nuokrypiu – 5,2 %.

7. Nors statistiškai BDS įrenginių modernizavimas tik nežymiai padidino dozavimo tikslumą ir stabilumą, tačiau gamybos procesas tapo paprasčiau valdomas dėl įdiegtų automatinio būdu valdomų talpyklų sklendžių, patikimesnės vamzdinių šildymo sistemos. Po modernizavimo gamykla tą pačią dieną gali gaminti daugiau rūšių KMA mišinių dėl papildomai įrengtos talpyklos.

8. Modernizuotas dozatorius užtikrina, kad bitumo kiekis KMA mišinio maišiniuose yra artimesnis optimaliam, o tai yra vienas svarbiausių siekinių gaminant KMA mišinį. DMF nustatytas bitumo kiekis KMA mišinyje reiškia, kad paklota asfaltbetonio danga bus ilgaamžiškesnė, atsparesnė temperatūrų svyravimams, stipresnė, atsparesnė šlyčiai (provėžų susidarymui) ir korozijai (lukštenimuisi dėl nepakankamo atsparumo šalčiui).

Bendrosios išvados

1. Bituminio rišiklio ir mineralinių komponentų kiekio gaminamame KMA mišinyje nuokrypiai nuo darbinės mišinio formulės (DMF) ir sklaida yra neišvengiami dėl technologinio proceso stochastinio pobūdžio, nulemta medžiagų savybių variacijos, atskirų operacijų parametrų kaitos, netobulos įrenginių konstrukcijos ir pakitusios būklės, taip pat netinkamų ASMA operatoriaus veiksmų (žmogiškojo veiksnio). Šiuos nuokrypius galima ir būtina sumažinti iki statistiškai ir ekonomiškai pagrįstų verčių.

2. Šiuo metu Lietuvoje galiojančios bitumo kiekio asfalto mišinyje nuokrypių nuo DMF leidžiamosios vertės (tolerancijos) yra pakankamai liberalios. Daugiamečio tyrimo rezultatai leidžia teigti, kad reglamentuojančiuose dokumentuose pateiktos tolerancijų vertės gali būti mažinamos: bitumo kiekio, nustatyto iš sudėtinių ėminių iki $\pm 0,4$ % (normose $\pm 0,5$ % arba $\pm 0,6$ %), mineralinių miltelių – iki $\pm 2,3$ % (normose $\pm 3,0$ %). Keisti smėlio ir skaldos komponentų leidžiamuosius nuokrypius nerekomenduojama. Patikslintas vertes bus galima nustatyti atlikus daugiau tyrimų ir kituose ASMA.

3. Dėl trumpalaikio oksidacinio senėjimo vykstanti bitumo savybių kaita priklauso nuo jo dozavimo ir išpylimo į maišyklę technologijos, temperatūros, taip pat visų asfalto komponentų maišymo trukmės. Aktyviuoju eksperimentu, atliktu ASMA keičiant technologinius parametrus, ištirta, kad dozuojant ir maišant bitumą, jo penetracijos indeksas išpilant jį į maišyklę aukštu slėgiu lašais

padidėja nuo minus 0,1 iki plius 0,12–0,15, o pilant intensyviu laisvu (gravitaciniu) turbulentišku srautu nuo minus 0,1 iki plius 0,21–0,26. Naudojant perkaitintas mineralines medžiagas, svarbiausias bitumo oksidacijai veiksnys yra ne dozavimo technologija, o kitų sudedamųjų mineralinių medžiagų per aukštą temperatūrą.

4. Didinant SMA 11 S tipo asfalto mišinio maišymo trukmę nuo 20 s iki 60 s, dėl bituminio rišiklio spartėjančios oksidacijos, nulėmusios jo klampos padidėjimą, ir vis daugiau sudedamųjų bitumo iš turinio būvio virtus ištisinėmis reikiama storio orientuotomis plėvelėmis, dengiančiomis ir smulkiausias grūdėlius, gerėjo asfalto mišinio svarbiausi normuoti fiziniai ir mechaniniai rodikliai. Abiejuose ASMA pagal tą patį sudėties projektą pagaminto SMA 11 S tipo asfalto mišinio oro tuštymių kiekis nuo 2,7 % (pagal DMF) sumažėjo 30–33 % (ASMA1 – iki 1,6 %, ASMA2 – iki 1,8 %). ASMA1 pagaminto mišinio bandinių pastovumas pagal Maršalą didėjo nuo 7,5 kN iki 8,6 kN ilgėjant maišymo trukmei iki 60 s, ASMA2 – nuo 7,5 kN iki 8,5 kN. Takumas turi tendenciją mažėti, kai SMA mišinio maišymo trukmė ilgėja. Didinant SMA mišinio komponentų maišymo trukmę nuo 20 s iki 60 s, jo kokybė tik gerėjo.

5. Tiriant techninį BDS modernizavimo efektyvumą nustatyta, kad prieš modernizavimą 15,3 % asfalto mišinio buvo dozuojama su didesniu nei $\pm 0,30$ % bitumo kiekio nuokrypiu nuo DMF. Įdiegus pažangesnius technologinius įrenginius, 11,4 % asfalto mišinio bituminio rišiklio kiekio nuokrypis buvo didesnis nei $\pm 0,30$ %. Praėjus dvejiems metams po modernizavimo, tokių mišinių sumažėjo iki 8,9 %. Svarbiausias BDS modernizavimo rezultatas yra jos paprastesnis valdymas, leidžiantis nedelsiant ir tiksliai pakeisti bitumo dozės masę ir dozuojamo bitumo markę.

6. Siekiant, kad išdžiovintų ir įkaitintų mineralinių medžiagų temperatūra ASMA būtų kuo tolygesnė per darbo dieną, joms pakaitinti būtų sunaudojama mažiau gamtinių dujų, būtina šių medžiagų rietuves uždengti stoginėmis. ASMA operatorius turi nuolat stebėti karštųjų frakcijų temperatūrą ir jai pakilus iki neleistinos ribos nedelsiant keisti šaltųjų mineralinių medžiagų džiovinimo-kaitinimo režimą (degiklio liepsnos intensyvumą). Taupant energinius išteklius, mažinant aplinkos oro taršą ir siekiant apsaugoti bitumą nuo perkaitinimo, vietoje karštojo maišymo asfalto mišinio galima gaminti šiltuosius asfalto mišinius, kurių panaudojimas pastaruoju metu pasaulyje nuolat plečiasi.

Literatūra ir šaltiniai

Al-Hadidy, Al; Tan, Yi-qiu. 2011. Performance of the SMA mixes made with the various binders, *Construction and Building Materials* 25(9): 3668–3673. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.008>

Al-Dobouni, I. A.; Salih, L. A.; Al-Layla, N. M. 2008. Effect of asphalt oxidation on the stability of asphalt-sulfur blends, *Petroleum Science and Technology* 26(12): 1347–1353. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460701204636>

Anderson R. M. 2011. The Asphalt Binder Handbook MS-26, First edition, Lexington, KY: Asphalt Institute. 242 p.

Ang, B. W.; Fwa, T. F.; Ng, T. T. 1993. Analysis of process energy use of asphalt-mixing plants, *Energy* 18(7): 769–777.

Apeageyi, A. K. 2011a. Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders, *Construction and Building Materials* 25(1): 47–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.058>

Apeageyi, A. K. 2011b. Correlating rutting with dynamic modulus of asphalt concrete, *Proceedings of the ICE – Transport* 164(4): 241–249. <http://dx.doi.org/10.1680/tran.9.00056>

ArafatYero, S.; Hainin, M. R. 2012. The influence of short-term aging on bitumen properties, *ARPJ Journal of Science and Technology* 2(7): 597–599.

Arrhenius, S. 1887. Ueber die Juncrc Reinigung Verdünnter Wesseriger Lösungen (in German), *Zeitschrift für Physikalisches Chemie* 1: 285–298.

ASTM D3515-01. 2009. Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures.

Azari, H.; Mohseni, A. 2013. Effect of short-term conditioning and long-term ageing on permanent deformation characteristics of asphalt mixtures, *Road Materials and Pavement Design* 14(sup2): 79–91. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.812833>

Bari, J.; Witczak, M. W. 1996. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion), *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 75:381–423.

Baptista, A. M.; Picado-Santos, L. G.; Capitão, S. D. 2013. Design of hot-mix recycled asphalt concrete produced in plant without preheating the reclaimed material, *International Journal of Pavement Engineering* 14(2): 95–102. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.587009>

Bazaras, Ž.; Micevičienė, D. 2010. Issues on measurement the benefits of improved highway infrastructure, *Inžinerinė ekonomika - Engineering Economics* 21(4): 344–351.

Behera, P. K.; Singh, A. K.; Reddy, M. A. 2013. An alternative method for short- and long-term ageing for bitumen binders, *Road Materials and Pavement Design* 14(2): 445–457. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.799086>

Behzadfar, E.; Hatzikiriakos, S. 2013. Viscoelastic properties and constitutive modelling of bitumen, *Fuel* 108: 391–399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.035>

Bhasin, A.; Little, D. 2009. Application of microcalorimeter to characterize adhesion between asphalt binders and aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(6): 235–243. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(235\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(235))

Bolliet, C.; Juery, C.; Thiebaut, B. 2013. Impact of Oxidation Process on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Content in Bitumen, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 10(8): 435–45. <http://dx.doi.org/10.1080/15459624.2013.801820>

Boulangé, L.; Sterczynskia, F. 2012. Study of interfacial interactions between bitumen and various aggregates used in road construction, *Journal of Adhesion Science and Technology* 26(1–3): 163–173. <http://dx.doi.org/10.1163/016942411X569372>

Breakah, T. M.; Bausano, J. P.; Williams, R. Ch.; Vitton, S. 2011. The impact of fine aggregate characteristics on asphalt concrete pavement design life, *International Journal of Pavement Engineering* 12(2): 101–109. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430903578937>

Brown, E. R.; Collins, R.; Brownfield, J. R. 1989. Investigation of segregation of asphalt mixtures in the state of Georgia, *Transportation Research Record No.* 1217: 1–8.

Brock, J. D. 1986. Oxidation of Asphalt. Technical Paper T-103, Astec Industries, Inc., Chattanooga, Tennessee. 20 p.

BS 594-1:2005. Title Identifier Hot rolled asphalt for roads and other paved areas. Specification for constituent materials and asphalt mixtures.

Butt, A. A.; Mirzadeh, I.; Toller, S.; Birgisson, B. 2012. Life cycle assessment framework for asphalt pavements: methods to calculate and allocate energy of binder and additives, *International Journal of Pavement Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2012.718348>

Carreau, P. J.; Bousmina, M.; Bonniot, F. 2000. The viscoelastic properties of polymer-modified asphalts, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 78(3): 495–503. <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.5450780308>

Ceylan, H.; Gopalakrishnan, K.; Kim, S. 2009. Looking to the future: the next-generation hot mix asphalt dynamic modulus prediction models, *International Journal of Pavement Engineering* 10(5): 341–352. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430802342690>

Cerni, G.; Cardone, F.; Colagrande, S. 2011. Low-temperature tensile behaviour of asphalt binders: Application of loading time–temperature–conditioning time superposition principle, *Construction and Building Materials* 25(4): 2133–2145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.018>

Choi, Y. K. 2011. Visco-elastic analysis of the elastomeric binder shear resistance in relation to asphalt rutting, *Road Materials and Pavement Design* 12(4): 767–794. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.9713894>

Chollar, B. H.; Zenewitz, J. A.; Boone, J. G.; Tran, K. T.; Andersen, D. T. 1989. Changes occurring in asphalts in drum dryer and batch (pug mill) mixing operations, *Transportation Research Record* 1228: 145–155.

Čygas, D.; Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Abukauskas, N. 2011. Dependence of the Recycled Asphalt Mixture Physical and Mechanical Properties on the Grade and Amount of Rejuvenating Bitumen, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(2): 124–134. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.17>

Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Pervenckas, Z.; Motiejūnas, A. 2008. Research of asphalt pavement structures on lithuanian roads (I), *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(2) 77–83. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2008.3.77-83>

ČSN 73 6149. 1991. Asfaltový betón na kryty vozoviek [Asfaltbetonis kelių statybai] (čekų kalba).

De Moraes, M. B.; Pereira, R. B.; Simão, R. A.; Leite, L. F. M. 2010. High temperature AFM study of CAP 30/45 pen grade bitumen, *Journal of Microscopy* 239(1): 46–53. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2818.2009.03354.x>

Dehouche, N.; Kaci, M.; Mokhtar, K. A. 2012. Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials* 26(1): 350–356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.033>

- Deygout, F. 2011. Volatile emissions from hot bitumen storage tanks, *Environmental Progress & Sustainable Energy* 30(1): 102–112. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.10444>
- Dessouky, S.; Reyes Ch.; Ilias, M.; Contreras, D.; Papagiannakis, A. T. 2011. Effect of pre-heating duration and temperature conditioning on the rheological properties of bitumen, *Construction and Building Materials* 25(6): 2785–2792. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.058>
- Divinski, M.; Nesichi, S.; Livneh, M. 2003. Optimal quality characteristic evaluation for asphalt mixing plants, *Journal of Testing and Evaluation* 31(3): 1-11.
- Dogan, M.; Bayramli, E. 2009. Effect of polymer additives and process temperature on the physical properties of bitumen-based composites, *Journal of Applied Polymer Science* 113(4): 2331–2338. <http://dx.doi.org/10.1002/app.30280>
- Domke, C. H.; Davison, R. R.; Glover, C. J. 1999. Effect of oxidation pressure on asphalt hardening susceptibility, *Transportation Research Record* 1661: 114–121. <http://dx.doi.org/10.3141/1661-16>
- Eddhahak-Ouni, A.; Dony, A.; Colin, J. 2012. Prediction of the rutting potential of bituminous binders using a stochastic approach, *Road Materials and Pavement Design* 13(1): 38–48. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.644061>
- Elseivi, M. A.; Trepanier, J.; Wakefield, H.; Pine, W. J.; Dahhan, A. 2011. The state of practice in the hot-mix asphalt sampling, *International Journal of Pavement Engineering* 12(2): 111-119. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2010.488691>
- Feng, Z. G.; Yu, J. Y.; Liang, Y. S. 2012. Relationship Between Colloidal Chemistry and Ageing Properties of Bitumen, *Petroleum Science and Technology* 30(14): 1453–1460. <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2011.613429>
- Fernández-Gómez, W. 2013. A review of asphalt and asphalt mixture aging, *Ingeniería e Investigación* 33(1): 5–12.
- Filippova, A. G.; Kirillova, L. G.; Okhotina, N. A.; Dvoyashkin, N. K.; Filippov, A. V.; Vol'fon, S. I.; Liakumovich, A. G.; Samuilov, Ya. D. 2000. Viscosity of polymer-bitumen binders, *Colloid Journal* 62(6): 755–758. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026639010912>
- Finnish Asphalt Specifications 1995. Finnish Pavement Technology Advisory Council – PANK. Suomija: Helsinkis. 67 p.
- Firoozifar, S. H.; Foroutan, S.; Foroutan, S. 2011. The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen, *Chemical Engineering Research and Design* 89(10): 2044–2048. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.025>
- Fuentes-Auden, C.; Martinez-Boza, F. J.; Navarro, F. J.; Partal, P.; Gallegos, C. 2012. Formulation of new synthetic binders: thermomechanical properties of resin/recycled polymer blends, *Polymer Engineering & Science* 52(2): 242–249. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.22075>

- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.032>
- Garcia-Morales, M.; Partal, P.; Navarro, F. J.; Martinez-Boza, F. J.; Gallegos, C. 2007. Processing, rheology, and storage stability of recycled EVA/LDPE modified bitumen, *Polymer Engineering & Science*, 47(2): 181–191. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20697>
- Ghaderi, S. M.; Tabatabaie, S. H.; Hassanzadeh, H.; Pooladi-Darvish, M. 2011. Estimation of concentration-dependent diffusion coefficient in pressure-decay experiment of heavy oils and bitumen, *Fluid Phase Equilibria* 305(2): 132–144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2011.03.010>
- Goh, S. W.; You, Z.; Williams, R. C.; Li, X. 2011. Preliminary dynamic modulus criteria of HMA for field rutting of asphalt pavements: Michigan's experience, *Journal of Transportation Engineering* 137(1): 37–45. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000191](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000191)
- Grabowski, W.; Jawowski, L.; Wilanowicz, J. 2013. Problems of energy reduction during the hot-mix asphalt production, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 8(1): 40–47. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2013.06>
- Greenfield, M. L. 2011. Molecular modelling and simulation of asphaltenes and bituminous materials, *International Journal of Pavement Engineering* 12(4): 325–341. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.575141>
- Haddadi, S.; Ghorbel, E.; Laradi, N. 2008. Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA, *Construction and Building Materials* 22(6): 1212–1219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.028>
- Haddadi, S.; Ghorbel, E.; Laradi, N. 2008. Fluage des bétons bitumineux, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 12(3): 229–241. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2008.9693011>
- Han, R.; Jin, X.; Glover, C. J. 2013. Oxygen diffusivity in asphalts and mastics, *Petroleum Science and Technology* 31(15): 1563–1573, <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2011.559506>
- Han, R.; Jin, X.; Glover, C. J. 2011. Modelling pavement temperature for use in binder oxidation models and pavement performance prediction, *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(4): 351–359. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000169](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000169)
- Herrington, Ph. R. 2012. Diffusion and reaction of oxygen in bitumen films, *Fuel* 94: 86–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.021>
- Herrington, P. R. 2005. Effect of oxygen concentration on product ratios during bitumen oxidation, *Petroleum Science and Technology* 23(3–4): 409–421. <http://dx.doi.org/10.1081/LFT-200031023>
- Horgnies, M.; Darque-Ceretti, E.; Fezai, H.; Felder, E. 2011. Influence of the interfacial composition on the adhesion between aggregates and bitumen: Investigations by EDX,

XPS and peel tests, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31(4): 238–247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.01.005>

Howard, I. L.; Baumgardner, G. L.; Jordan III, W. S.; Menapace, A. M.; Mogawer, W. S.; Hemsley, Jr, J. M. 2013. Haul Time Effects on Unmodified, Foamed, and Additive-Modified Binders Used in Hot-Mix Asphalt, *Transportation Research Record* 2347: 88–95. <http://dx.doi.org/10.3141/2347-10>

Huang, S. C.; Zeng, M. 2007. Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt-filler systems, *International Journal of Pavement Engineering* 8(3): 213–223. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430601135477>

Huang, S.; Tia, M.; Ruth, B. 1996. Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts, *Journal of Materials in Civil Engineering* 8(3):147–152.

Huh, J. D.; Robertson, R. E. 1996. Modeling of oxidative aging behavior of asphalts from short-term, high-temperature data as a step toward prediction of pavement aging, *Transportation Research Record* 1535: 91–97. <http://dx.doi.org/10.3141/1535-12>

Yero, S. A.; Hainin, M. R. 2012. Viscosity characteristics of modified bitumen, *ARPJN Journal of Science and Technology* 2(5): 500–503.

IT ASFALTAS 08. Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės. 2008. Vilnius: LAKD. 62 p.

Yildirim, Y. 2007. Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials* 21(1): 66–72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>

Yusoff, N. I. Md.; Jakarni, F. M.; Nguyen, V. H.; Hainin, M. R.; Airey, G. D. 2013. Modelling the rheological properties of bituminous binders using mathematical equations, *Construction and Building Materials* (40): 174–188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.105>

Yusoff, N. I. Md.; Shaw, M. T.; Airey, G. D. 2011. Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders, *Construction and Building Materials* 25(5): 2171–2189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.086>

Jemison, H. B.; Davison, R. R.; Glover, C. J.; Bullin, J. A. 1991. Evaluation of standard oven tests for hot-mix plant aging, *Transportation Research Record* 1323: 77–84.

Jenks, Ch. W.; Jenks, C. F.; Harrigan, E. T.; Adcock, M.; Delaney, E. P.; Freer, H. 2011. A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary, *NCHRP Report 673*. Washington, D.C.: Transportation Research Board. 273 p.

Jin, X.; Cui, Y.; Glover, C. J. 2013. Modeling Asphalt Oxidation in Pavement with Field Validation, *Petroleum Science and Technology* 31(13): 1398–1405. <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2012.665115>

Jo, M.-C. 2010. A study on the increase in the durability of asphalt paving mixtures, *Petroleum Science and Technology* 28(3): 225–235. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460903226080>

- Karlsson, R.; Isacsson, U. E.; Ekblad, J. 2007. Rheological characterisation of bitumen diffusion, *Journal of Materials Science* 42(1): 101–108, DOI 10.1007/s10853-006-1047-y
- Lee, S.-J.; Amirkhanian, S. N.; Shatanawi, K.; Kim, K. W. 2008. Short-term aging characterization of asphalt binders using gel permeation chromatography and selected Superpave binder tests, *Construction and Building Materials* 22(11): 2220–2227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.005>
- Li, D. D.; Greenfield, M. L. 2014. Chemical compositions of improved model asphalt systems for molecular simulations *Fuel* 115: 347–356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.012>
- Liang, Y.; Feng, Z.; Yu, J. 2010. Effect of chemical compositions on temperature susceptibility of bitumens, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 25(4): 669–673. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-040-0067-2>
- Liu, Y.; You, Z.; Dai, Q.; Mills-Beale, J. 2011. Review of advances in understanding impacts of mix composition characteristics on asphalt concrete (AC) mechanics, *International Journal of Pavement Engineering* 12(4): 385–405. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.575142>
- Liu, M.; Ferry, M.; A. Davison; R. R.; Glover, C. J.; Bullin, J. A. 1998 Oxygen uptake as correlated to carbonyl growth in aged asphalts and asphalt Corbett fractions, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 37:4669–4674.
- Liu, M.; Lunsford, K.; Davison, R. 1996. The kinetics of carbonyl formation in asphalt, *AIChE Journal* 42(4): 1069–1076.
- Loeber, L.; Muller, G.; Morel, J.; Sutton, O. 1998. Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach, *Fuel* 77(13): 1443–1450. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00054-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00054-4)
- Lu, X.; Isacsson, U. 2002. Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology, *Construction and Building Materials* 16(1): 15–22. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00033-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00033-2)
- Lund, J. W.; Wilson, J. E. 1984. Evaluation of asphalt aging in hot mix plants (with discussion), *Proceedings of Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Scottsdale, Arizona, April 9–11, p. 1–18.
- Marasteanu, M.; Clyne, T.; McGraw, J.; Li, X.; Velasquez, R. 2005. High-temperature rheological properties of asphalt binders, *Transportation Research Record* 1901: 52–59. <http://dx.doi.org/10.3141/1901-07>
- Mercado, E.; Martin, A.; Park, E.; Spiegelman, C.; Glover, C. 2005. Factors Affecting Binder Properties between Production and Construction, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(1): 89–98. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:1\(89\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:1(89))
- Miljković, M. 2013. Reconsideration of European Empirical and Fundamental Specifications for Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1030–1040. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000639](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000639)

Mogawer, W. S.; Austerman, A. J.; Bonaquist, R. 2012. Determining the influence of plant type and production parameters on performance of plant-produced reclaimed asphalt pavement mixtures, *Transportation Research Record, Construction* 2268: 71–81. <http://dx.doi.org/10.3141/2268-09>

Mogawer, W. S.; Austerman, A. J.; Daniel, J. S.; Zhou, F.; Bennert, T. 2011a. Evaluation of the effects of hot mix asphalt density on mixture fatigue performance, rutting performance and MEPDG distress predictions, *International Journal of Pavement Engineering* 12(2): 161–175. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2010.546857>

Mogawer, W.; Austerman, A.; Kutay, M. E.; Zhou, F. 2011b. Evaluation of binder elastic recovery on HMA fatigue cracking using continuum damage and overlay test based analyses, *Road Materials and Pavement Design* 12(2): 345–376. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.9695249>

Morian, N.; Hajj, E. Y.; Glover, C. J.; Sebaaly, P. E. 2011. Oxidative aging of asphalt binders in hot-mix asphalt mixtures, *Transportation Research Record* 2207: 107–116. <http://dx.doi.org/10.3141/2207-14>

Namutebi, M.; Birgisson, B.; Bagampadde, U. 2011. Foaming effects on binder chemistry and aggregate coatability using foamed bitumen, *Road Materials and Pavement Design* 12(4): 821–847. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.9713896>

Nien, Y. H.; Yeh, P. H.; Chen, W. C.; Liu, W. T.; Chen, J. H. 2008. Investigation of flow properties of asphalt binders containing polymer modifiers, *Polymer Composites* 29(5): 518–524. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.20404>

Oliver, J. W. H. 1989. Field trials of a lead-based asphalt antioxidant, *Transportation Research Record* 1228: 138–144.

Peinado, D.; de Vega, M.; García-Hernando, N.; Marugán-Cruz C. 2011. Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer, *Applied Thermal Engineering* 31(6–7): 1039–1049. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.029>

Petersen, J. C.; Glaser R. 2011. Asphalt oxidation mechanisms and the role of oxidation products on age hardening revisited, *Road Materials and Pavement Design* 12(4): 795–819. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.9713895>

Petkevičius, K.; Sivilevičius, H. 2008. Necessary measures for ensuring the quality of hot mix asphalt in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(1): 29–37. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.45-53>

Plioplys, R.; Sivilevičius, H. 2013. Valstybinės reikšmės kelių naujos asfalto dangos ir rato sukibimo koeficiento tyrimas ir vertinimas, 16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos „Transporto inžinerija ir vadyba“ 2013 m. gegužės 8 d. straipsnių rinkinys. Vilnius: Technika, 2013. p. 316–322.

Portillo, O; Cebon, D. 2013. Modeling Mode I Fracture of Bitumen Films, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25 (10): 1403–1414. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000561](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000561)

- Poulikakos, L. D.; Tiwari, M. K.; Partl, M. N. 2012. Analysis of failure mechanism of bitumen films, *Fuel* 106: 437–447. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.060>
- Prapaitrakul, N.; Han, R. 2009. A transport model of asphalt binder oxidation in pavements, *Road Materials and Pavement design* 10(sup1): 95–113. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2009.9690238>
- Puello, J.; Afanasjeva, N.; Alvarez, M. 2013. Thermal properties and chemical composition of bituminous materials exposed to accelerated ageing, *Road Materials and Pavement Design* 14(2): 278–288. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.785799>
- Puttagunata, V. R.; Singh, B.; Miadonye, A. 1993. Correlation of bitumen viscosity with temperature and pressure, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 71(3): 447–450.
- Radziszewski, P. 2007. Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations, *Journal of Civil Engineering and Management* 13(4): 307–315. <http://dx.doi.org/10.1080/13923730.2007.9636451>
- Radziszewski, P.; Ziolkowski, R.; Cygas, D. 2003. Technological ageing influence on viscosity of selected bitumens, *Journal of Civil Engineering and Management* 9(1): 20–24. <http://dx.doi.org/10.1080/13923730.2003.10531297>
- Read, J.; Whiteoak, D. 2003. The Shell bitumen handbook, Fifth edition, London: Thomas Telford Ltd. 464 p.
- Redelius, P. 2009. Asphaltenes in bitumen, what they are and what they are not, *Road Materials and Pavement Design* 10(sup1): 25–43. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2009.9690234>
- Said, S. F. 2005. Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures, *Transportation Research Record* 1901: 1–9. <http://dx.doi.org/10.3141/1901-01>
- Seo, J.; Kim, Y.; Cho, J.; Jeong, S. 2013. Estimation of in situ dynamic modulus by using MEPDG dynamic modulus and FWD data at different temperatures, *International Journal of Pavement Engineering* 14(4): 343–353. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2012.664274>
- Shalaby, A. 2002. Modelling short-term aging of asphalt binders using the rolling thin film oven test, *Canadian Journal of Civil Engineering* 29(1): 135–144. <http://dx.doi.org/10.1139/L01-086>
- Siddiqui, M. N. 2010. NMR fingerprinting of chemical changes in asphalt fractions on oxidation, *Petroleum Science and Technology* 28(4): 401–411. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460903070751>
- Sivilevičius, H.; Vansauskas, V. 2013. Research and evaluation of ruts in the asphalt pavement on Lithuanian highways, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(5): 609–621. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.817481>

Sivilevičius, H. 2011. Application of expert evaluation method to determine the importance of operating asphalt mixing plant quality criteria and rank correlation, *The Baltic journal of road and bridge engineering* 6(1): 48–58. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.07>

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.050>

Sivilevičius, H.; Šukevičius, Š. 2009. Manufacturing technologies and dynamics of hot-mix asphalt mixture production, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 169–179. <http://dx.doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.169-179>

Sivilevičius, H.; Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2008. Quality attributes and complex assessment methodology of the asphalt mixing plant, *The Baltic journal of road and bridge engineering* 3(3): 161–166. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2008.3>

Sivilevičius, H.; Vislavičius, K. 2008. Stochastic simulation of the influence of variation of mineral material grading and dose weight on the homogeneity of hot-mix asphalt, *Construction and Building Materials* 22(9): 2007–2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.001>

Sivilevičius, H.; Šukevičius, Š. 2007. Dynamics of vehicle loads on the asphalt pavement of European roads which cross Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(4): 147–154.

Sivilevičius, H. 2005. The analysis of the new asphalt concrete mixing plant batchers and their smart control systems / Henrikas Sivilevicius // The 6th International Conference Environmental Engineering: selected papers: May 26–27, 2005 Vilnius, Lithuania. Vol. 2. Vilnius: Technika, 2005. ISBN 9986058511. p. 775–782.

Sivilevičius, H.; Karalevičius, I.; Gailius, A. 2003. Naujo kompiuterizuoto asfaltbetonio maišytuvo medžiagų diskretinių dozatorių technologinių rodiklių statistinis vertinimas, *Journal of Civil Engineering and Management* 9(2): 131–140.

Ślowski, M. 2012. Modelling of the inverse creep of road bitumen modified with SBS copolymer, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 7(1): 68–75. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2012.10>

Sörensen, A.; Wichert, B. 2009. Asphalt and Bitumen. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 273–294. http://dx.doi.org/10.1002/14356007.a03_169.pub2

Statybos rekomendacijos R 35-01: Automobilių kelių asfaltbetonio ir žvyro dangos. 2001.

The Asphalt Institute. 1997. Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types (MS-2), 6th edition, Lexington, Kentucky: Asphalt Institute. 141p.

Tongyan, P.; Yang, L.; Zhaoyang, W. 2012. Development of an atomistic-based chemophysical environment for modelling asphalt oxidation, *Polymer Degradation and Stability* 97(11): 2331–2339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.032>

TRA ASFALTAS 08 – Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas. 2008. Vilnius: LAKD. 62 p.

TRA BITUMAS 08 – Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų aprašas. 2009. Vilnius: LAKD. 16 p.

Tran, N.; Taylor, A. J.; West, R. C.; Kvasnak, A.; Turner, P. 2010. Evaluation of predictive models for determination of binder critical high temperature from mixture properties, *TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers DVD*, Washington, D.C.: Transportation research board of the National academies.

Trumbore, D. C. 1999. Estimates of air emissions from asphalt storage tanks and truck loading, *Environmental Progress* 18(4): 250–259. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.670180411>

Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R. 2012. Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures, *Građevinar: Journal of the Croatian Association of Civil Engineers* (HSGI) 64(11) 915–921.

Vislavičius, K.; Sivilevičius, H. 2013. Effect of reclaimed asphalt pavement gradation variation on the homogeneity of recycled hot-mix asphalt, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13(3): 345–353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.03.003>

White, T. D.; Brown, E. R. 1977. Statistical quality control procedures for airfield pavement materials and construction, *Transportation Research Record* 652: 36–42.

Witczak, M. W.; Fonseca, O. A. 1996. Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures, *Transportation Research Record* 1540:15–23.

Witczak, M. W. 2005. Simple performance tests: summary of recommended methods and database, *NCHRP Report 547*, Washington, D.C.: Transportation Research Board. 25 p.

Xiao, F.; Amirkhanian, A. N.; Amirkhanian, S. N. 2011. Influence of Carbon Nanoparticles on the Rheological Characteristics of Short-Term Aged Asphalt Binders, *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(4): 423–431. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000184](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000184)

Zeng, M.; Wu, C. 2008. Effects of type and content of mineral filler on viscosity of asphalt mastic and mixing and compaction temperatures of asphalt mixture, *Transportation Research Record* 2051: 31–40. <http://dx.doi.org/10.3141/2051-05>

Zhang, H. L.; Yu, J. Y.; Xue, L. H.; Li, Z. C. 2011. Effect of montmorillonite organic modification on microstructures and ultraviolet aging properties of bitumen, *Journal of Microscopy* 244: 85–92. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2818.2011.03511.x>

Zhitov, R. G.; Kizhnyaev, V. N.; Alekseenko V. V.; Smirnov, A. I. 2011. Bitumen-rubber composite binders for production of asphalt concretes, *Russian Journal of Applied Chemistry* 84(11): 1983–1987. <http://dx.doi.org/10.1134/S1070427211110255>

ZTVT-stB 95. 1995. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau. Bundesministerium für Verkehr [Specification for unbound granular materials used in pavement constructions] (vokiečių kalba).

Колбановская А. С.; Михайлов, В. В. 1973. *Дорожные битумы*. Москва: Транспорт. 261 с.

Королёв, И. В. 1986. *Пути экономии битума в дорожном строительстве*. Москва: Транспорт. 149 с.

Лупанов А. П.; Гладышев Н. В. 2013. Энергозатраты при производстве асфальто-бетонных смесей, *Наука и техника в дорожной отрасли* 2: 36–37.

Печеный, Б. Г. 1990. *Битумы и битумные композиции*. Москва: Химия. 256 с.

Рокас, С. 1977. *Статистический контроль качества в дорожном строительстве*. Москва: Транспорт. 150 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo žurnaluose

Bražiūnas, J.; Sivilevičius, H. 2013. Dependences of SMA mixture and its bituminous binder properties on bitumen batching system, mixing time and temperature on asphalt on asphalt mixing plant, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(6): 862–872. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.843587>. (Thomson Reuters ISI Web of Science, IF₂₀₁₂ = 2,016).

Bražiūnas, J.; Sivilevičius, H. 2010. The bitumen batching system's modernization and its effective analysis at the asphalt mixing plant, *Transport* 25(3): 325–335. ISSN 1648–4142. <http://dx.doi.org/10.3846/transport.2010.40>. (Thomson Reuters ISI Web of Science).

Bražiūnas, J.; Sivilevičius, H. 2010. Modernizuotos bitumo dozavimo sistemos įtakos karštojo maišymo asfalto mišinio sudėčiai tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos = Science – Future of Lithuania: Civil and Transport Engineering, Aviation Technologies*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 2, Nr. 6 (2010), p. 72–76. (*Index Copernicus*).

Straipsniai kituose leidiniuose

Bražiūnas, J.; Sivilevičius, H. 2013. Comparison of not modernized and modernized bitumen batch systems of an asphalt mixing plant, *The Proceedings of the Conference Asphalt Pavements 2013 (AV'2013) = Sbornik příspěvků pro konference Asfaltové vozovky 2013*. 26-27 November 2013, Czech Republic. Praha : PragoProject, 2013. ISBN 9788090392533. p. 1–9.

Bražiūnas, J.; Sivilevičius, H. 2011. Statistical analysis of component content deviation from job-mix formula in hot mix asphalt, *8th International Conference „Environmental Engineering“*, May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vol. 3. *Sustainable Urban development. Roads and Railways. Technologies of Geodesy and Cadastre*. Vilnius: Technika, 2011. ISSN 2029-7106. ISBN 9789955288299. p. 1044–1050. (*ISI Proceedings*)

Priedai¹

A priedas. 2006 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtiniuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės

B priedas. 2007 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtiniuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės

C priedas. 2008 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtiniuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės

D priedas. 2009 metų sezono duomenys apie skirtingų rūšių ir tipų karšto maišymo asfalto mišinio atskiruose sudėtiniuose ėminiuose nustatytus komponentų kiekių procentinius nuokrypius nuo darbinės mišinio formulės

E priedas. Aktyviojo eksperimento rezultatai

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Justas BRAŽIŪNAS

ASFALTO MAIŠYTUVO BITUMO DOZAVIMO SISTEMOS TECHNOLOGINIŲ
PARAMETRŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (03T)

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BITUMEN BATCHING
SYSTEM IN THE ASPHALT MIXING PLANT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

Redaktorė Angelika Petrėtienė

2013 12 27. 13,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius