ӘОЖ 665.775; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-3.15
https://orcid.org/0000-0001-8228-7188
https://orcid.org/0000-0002-9847-8218
https://orcid.org/0000-0001-8486-8744
https://orcid.org/0009-0005-8311-2861
https://orcid.org/0000-0002-4494-7533
https://orcid.org/0000-0001-9595-9756
https://orcid.org/0009-0001-2436-8841

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН БИТУМНЫҢ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ МИКРОҚҰРЫЛЫМДЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

А.Ч. БУСУРМАНОВА[1], химия ғылымдарының кандидаты, профессор, *akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz*

А.Ш. АККЕНЖЕЕВА[1], техника ғылымдарының кандидаты, профессор, *anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz*

У.К. ЕНСЕГЕНОВА[2], докторант, *uzilkhan.yensegenova@yu.edu.kz*
И.Н. ДЮСЕМБАЕВ[1], техника ғылымдарының докторы, профессор, *izim.dyussembayev@yu.edu.kz*
М.Б. ТУРКМЕНБАЕВА[1], химия ғылымдарының кандидаты, доцент, *maira.turkmenbayeva@yu.edu.kz*
М.Ж. АИМОВА[1], химия ғылымдарының кандидаты, доцент, *murshida.aimova@yu.edu.kz*
Б.Ж. НАУЫРЫЗОВА[1], химия ғылымдарының кандидаты, доцент, *bibigul.nauyryzova@yu.edu.kz*

[1]«ИНЖИНИРИНГ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ
Қазақстан Республикасы, 130000, Ақтау қ., 32 ш/а

[2]ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Қазақстан Республикасы, 050040, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71

Бұл зерттеуде бастапқы полиэтилен (vPE) және қайта өңделген полиэтилен (rPE) қатысында жартылай девулканизацияланған резеңкемен (DVR) модификацияланған битумның микроқұрылымдық өзгеруі мен реологиялық қасиеттері зерттелді. Модификаторлардың құрылымдық сипаттамалары золь-гель талдауы және торлану тығыздығын анықтау арқылы бағаланды, ал полимер фазаларының битум матрицасында таралуын зерттеу үшін

флуоресценттi микроскопия қолданылды. Реологиялық қасиеттер динамикалық тұтқырлық және ығысу кернеуі-ығысу жылдамдығы тәуелділіктері арқылы талданды.

Нәтижелер көрсеткендей, rPE негізіндегі жүйелер битуммен едәуір жақсы үйлесімділікке ие болып, vPE негізіндегі жүйелермен салыстырғанда неғұрлым ұсақ әрі біртекті микроқұрылым қалыптастырады. Мұндай жақсарған дисперсия тұтқырлықтың 20-35%-ға артуына және ығысуға төзімділіктің жоғарылауына алып келеді, бұл ішкі құрылымның жақсырақ қалыптасқанын көрсетеді. Аэросил (А) енгізілген кезде үшөлшемді торлы құрылымның түзілуі нәтижесінде тұтқырлық шамамен 1,5-2 есе артады, бұл фазалардың қозғалғыштығын шектеп, беттік өзара әрекеттесуді күшейтеді. Жалпы алғанда, DVR-rPE-A жүйесі жоғары реологиялық тұрақтылық пен құрылымдық біртектілік көрсетеді.

Алынған нәтижелер полимер-резеңке-битум жүйелеріндегі өзара әрекеттесу механизмдері туралы жаңа ғылыми түсініктер береді және қайта өңделген полиэтиленнің модификацияланған байланыстырғыштардың реологиялық қасиеттерін жақсартудағы әлеуетін дәлелдейді.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *битум, реология, микроструктура, девулканизацияланған резеңке, қайта өңделген полиэтилен, тұтқырлық.*

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО БИТУМА

А.Ч. БУСУРМАНОВА[1], кандидат химических наук, профессор, *akkenzhe.bussurmanova@ yu.edu.kz*
А.Ш. АККЕНЖЕЕВА[1], кандидат технических наук, профессор, *anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz*
У.К. ЕНСЕГЕНОВА[2], докторант, *uzilkhan.yensegenova@yu.edu.kz*
И.Н. ДЮСЕМБАЕВ[1], доктор технических наук, профессор, *izim.dyussembayev@yu.edu.kz*
М.Б. ТУРКМЕНБАЕВА[1], кандидат химических наук, доцент, *maira.turkmenbayeva@yu.edu.kz*
М.Ж. АИМОВА[1], кандидат химических наук, доцент, *murshida.aimova@yu.edu.kz*
Б.Ж. НАУЫРЫЗОВА[1], кандидат химических наук, доцент, *bibigul.nauyryzova@yu.edu.kz*

[1]НАО «КАСПИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГИИ И ИНЖИНИРИНГА ИМ. Ш. ЕСЕНОВА»
Республика Казахстан, 130000, г. Актау, 32 мкр.

[2]КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.АЛЬ-ФАРАБИ
Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71

В данной работе исследуются микроструктурная эволюция и реологическое поведение битума, модифицированного частично девулканизированной резиной (DVR) в сочетании с первичным полиэтиленом (vPE) и переработанным полиэтиленом (rPE). Структурные характеристики модификаторов оценивались с использованием золь-гель анализа и определения плотности сшивки, тогда как флуоресцентная микроскопия применялась для анализа распределения полимерных фаз в битумной матрице. Реологические свойства исследовались посредством измерений динамической вязкости и зависимостей «сдвиговое напряжение-скорость сдвига».

Результаты показали, что системы, модифицированные rPE, обладают существенно более высокой совместимостью с битумом, что приводит к формированию более тонкой и однородной микроструктуры по сравнению с композициями на основе vPE. Улучшенная дисперсия способствует увеличению вязкости на 20-35% и повышению сопротивления сдвигу, что свидетельствует о формировании более развитой внутренней структуры. Введение аэросила (А) дополнительно увеличивает вязкость примерно в 1,5-2 раза за счёт формирования трёхмерной сетчатой структуры, ограничивающей подвижность фаз и усиливающей межфазные взаимодействия. В целом система DVR-rPE-A демонстрирует высокую реологическую стабильность и структурную однородность.

Полученные результаты дают новые представления о механизмах взаимодействия в системе «полимер-резина-битум» и подтверждают перспективность использования переработанного полиэтилена для регулирования реологических свойств, модифицированных вяжущих.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *битум, реология, микроструктура, девулканизированная резина, переработанный полиэтилен, вязкость.*

RHEOLOGICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED BITUMEN

A.Ch. BUSSURMANOVA[1], candidate of chemical sciences, professor, *akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz*
A.Sh. AKKENZHEYEVA[1], candidate of technical sciences, professor, *anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz*
U.K. YENSEGENOVA[2], doctoral student, *uzilkhan.yensegenova@yu.edu.kz*
I.N. DYUSSEMBAYEV[1], doctor of technical sciences, professor, *izim.dyussembayev@yu.edu.kz*
M.B. TURKMENBAYEVA[1], candidate of chemical sciences, associate professor, *maira.turkmenbayeva@yu.edu.kz*
M.Zh. AIMOVA[1], candidate of chemical sciences, associate professor, *murshida.aimova@yu.edu.kz*
B.Zh. NAUYRYZOVA[1], candidate of chemical sciences, associate professor, *bibigul.nauyryzova@yu.edu.kz*

[1]NPJSC «CASPIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ENGINEERING NAMED AFTER SH. YESSENOV»
Republic of Kazakhstan, 130000, Aktau, 32 microdistrict

[2]KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY NAMED AFTER AL-FARABI
Republic of Kazakhstan, 050040, Almaty, al-Farabi ave., 71

This study investigates the microstructural evolution and rheological behavior of bitumen modified with partially devulcanized rubber (DVR) in combination with virgin polyethylene (vPE) and recycled polyethylene (rPE). The structural characteristics of the modifiers were evaluated through sol–gel analysis and crosslink density determination, while fluorescence microscopy was employed to assess the dispersion of polymer phases within the bitumen matrix. Rheological properties were analyzed using dynamic viscosity and shear stress-shear rate measurements.

The results demonstrate that rPE-modified systems exhibit significantly improved compatibility with bitumen, leading to a finer and more homogeneous microstructure compared to vPE-based compositions. This enhanced dispersion contributes to a 20-35% increase in viscosity and higher shear resistance, indicating the formation of a more developed internal structure. The incorporation of Aerosil (A) further increases viscosity by approximately 1.5-2 times due to the formation of a three-dimensional network that restricts phase mobility and enhances interfacial interactions. Overall, the DVR-rPE-A system exhibits superior rheological stability and structural homogeneity.

The findings provide new insights into the mechanisms governing polymer-rubber-bitumen interactions and demonstrate the potential of recycled polyethylene for tailoring the rheological performance of modified binders.

KEYWORDS: *bitumen, rheology, microstructure, devulcanized rubber, recycled polyethylene, viscosity.*

Кіріспе. Жол құрылысының тұрақты дамуы ресурстарды тиімді пайдалану және қоршаған ортаға әсерді азайту мақсатында қайта өңделген материалдарды қолдануға деген қызығушылықтың артуына алып келді. Осындай тәсілдердің ішінде қалдық резеңке мен пластиктерді битум құрамына енгізу байланыстырғыштың пайдалану қасиеттерін жақсартумен қатар, пайдаланылған шиналар мен полимер қалдықтарына байланысты экологиялық мәселелерді шешудің перспективалы бағыты ретінде қарастырылады [1,2]. Дәстүрлі полимермен модификацияланған байланыстырғыштармен салыстырғанда, бұл жүйелер қанағаттанарлық инженерлік қасиеттерді сақтай отырып, неғұрлым тұрақты балама ұсынады.

Девулканизацияланған резеңке (DVR) дәстүрлі резеңке үгіндісіне қарағанда битуммен үйлесімділікті жақсарту қабілетіне байланысты ерекше назар аударуда. Девулканизация процесі күкірттік көлденең байланыстарды ішінара үзіп, молекулалардың қозғалғыштығын арттырады және битум матрицасымен өзара әрекеттесуді жақсартады. Алайда, DVR-мен модификацияланған байланыстырғыштардың реологиялық әрекеті мен құрылымдық өзгеруі күрделі болып табылады, ал олардың соңғы қасиеттері резеңке мен қосымша модификаторлар арасындағы өзара әрекеттесуге айтарлықтай тәуелді [3].

Полиэтилен (PE), әсіресе қайта өңделген полиэтилен (rPE), қолжетімділігі мен қолайлы механикалық қасиеттеріне байланысты битумды модификациялауда кеңінен қолданылады. Бастапқы полиэтиленмен (vPE) салыстырғанда, rPE әдетте төмен молекулалық массаға, кең молекулалық масса таралуына және тозу нәтижесінде түзілген тотығу функционалдық топтарының болуына ие болады. Бұл ерекшеліктер оның битум және резеңке фазаларымен өзара әрекеттесуін күшейтеді [4]. Дегенмен, полиэтиленмен модификацияланған байланыстырғыштарда жиі үйлесімділіктің жеткіліксіздігі және біркелкі емес дисперсия байқалады, бұл олардың реологиялық әрекетіне кері әсер етеді.

Соңғы зерттеулер резеңке мен термопластикалық полимерлерді біріктіретін гибридті жүйелердің синергиялық әсер көрсететінін және реологиялық қасиеттер мен құрылымдық тұрақтылықты жақсартатынын көрсетті [5]. DVR мен полиэтилен арасындағы өзара әрекеттесу байланыстырғыштың ішкі құрылымын қалыптастыруда шешуші рөл атқарып, тұтқырлыққа, ығысуға төзімділікке және вискоэластикалық күйге әсер етеді. Әсіресе, битум матрицасында өзара байланысқан полимерлік торлардың түзілуі жүйенің жалпы ағу әрекетін анықтайды.

Осы жетістіктерге қарамастан, DVR-PE жүйелеріндегі микроқұрылымның қалыптасуы мен реологиялық қасиеттерін анықтайтын механизмдер әлі де толық зерттелмеген. Полиэтилен түрінің (vPE және rPE) дисперсия сапасына, үйлесімділікке және құрылымдық тор түзілуіне әсері қосымша зерттеуді талап етеді.

Сондықтан бұл жұмыстың мақсаты – DVR және полиэтиленмен модификацияланған битумның микроқұрылымдық сипаттамалары мен реологиялық әрекетін зерттеу. Зерттеуде қайта өңделген полиэтиленнің үйлесімділікті арттырудағы рөліне және тұтқырлық пен ығысуға төзімділікті жақсартатын механизмдерге ерекше назар аударылады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Негізгі байланыстырғыш ретінде Б70/100 маркалы битум («CASPI BITUM» ЖШС, Ақтау, Қазақстан) пайдаланылды. Оның физика-химиялық қасиеттері, со-

ның ішінде пенетрация және жұмсару температурасы EN стандарттарына сәйкес анықталды [6-9].

Модификатор ретінде «Polylema» АҚ жеткізген жартылай девулканизацияланған резеңке (DVR) қолданылды. «Rubbintec» ЖШС әзірлеген девулканизация әдісі полимердің негізгі тізбегін сақтай отырып, күкірттік байланыстарды селективті түрде үзуге негізделген [10]. Бастапқы резеңке үгіндісінің бөлшек өлшемі шамамен 0,08 мм болды.

DVR бастапқы полиэтиленмен (vPE) немесе қайта өңделген полиэтиленмен (rPE) модификацияланды. Нәтижесінде алынған DVR негізіндегі модификатор құрамы: 70-94% резеңке, 1-23% полиэтилен және 5-12% қоспалардан тұрды.

Аэросил 200 (кремний диоксиді) құрылым түзуші қоспа ретінде қарастырылды. Алайда бұл жұмыста ол негізінен реологиялық әрекеті мен микроқұрылымдық өзгеру әсері тұрғысынан талданады.

Модификацияланған битумды дайындау. Модификацияланған байланыстырғыштар жоғары ығысу жылдамдығы бар араластырғыш (Silverson L5M-A) көмегімен дайындалды. Алдымен битум 140 °C температураға дейін қыздырылып, кейін DVR негізіндегі модификатор қосылып, 180 °C температурада 4500 айн/мин жылдамдықта 60 минут бойы араластырылды. Кейбір құрамдарға құрылымдық әсерді күшейту мақсатында араластыру кезінде Аэросил енгізілді.

Микроқұрылымдық сипаттау. Флуоресцентті микроскопиялық зерттеу EN 13632 стандартына сәйкес [11] Moticam ProS5 Lite жүйесі көмегімен жүргізілді. Бақылау D480/30 нм сүзгісі арқылы орындалып, битум матрицасындағы полимер фазаларының таралуы мен морфологиясы бағаланды.

Модификаторлардың құрылымдық талдауы. DVR және DVR-PE модификаторларының ішкі құрылымы золь фракциясы (ЗФ), гель фракциясы (ГФ) және торлану тығыздығы көрсеткіштері арқылы бағаланды.

Золь фракциясы келесі формула бойынша есептелді:

$$\text{ЗФ} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{ГФ} = 100 - \text{ЗФ} \quad (2)$$

Торлану тығыздығы Флори-Ренер теңдеуін қолдану арқылы анықталды:

$$V_e = \frac{-[\ln(1 - V_r) + V_r + \chi V_r^2]}{[V_1(V_r^{\frac{1}{3}} - V_r/2)]} \quad (3)$$

мұнда V_1 – толуолдың молярлық көлемі (106,13 см^3/моль), χ – резеңке-еріткіш өзара әрекеттесу параметрі (χ = 0,39), ал V_r – ісінген үлгідегі резеңкенің көлемдік үлесі. V_r мәні Эллис-Уэлдинг теңдеуі (4) бойынша есептелді.

$$V_r = \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_r}{\rho_r} + \frac{m_s}{\rho_s}} \quad (4)$$

мұнда m_s – ісінген үлгінің массасы (г), m_r – құрғақ үлгінің массасы (г), ρ_s – толуолдың тығыздығы (0,8669 г/см^3), ал ρ_r – резеңке үлгінің тығыздығы.

Реологиялық сипаттау. Динамикалық тұтқырлық ASTM D4402 стандартына сәйкес 180 °C температурада айналмалы вискозиметр көмегімен өлшенді.

Сонымен қатар, модификацияланған байланыстырғыштардың ағу әрекеті мен құрылымдық күйін сипаттау үшін ығысу кернеуі-ығысу жылдамдығы тәуелділіктері талданды.

Нәтижелер және талқылау

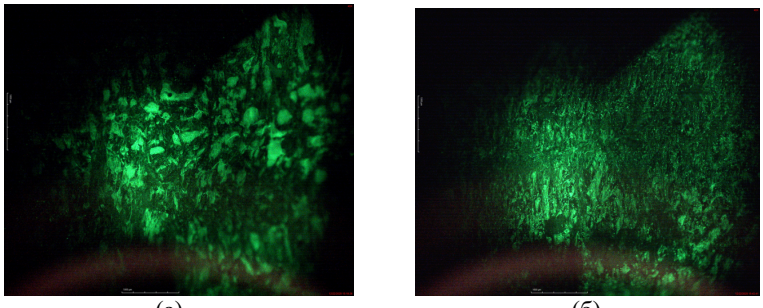
Әзірленген модификаторлардың құрылымдық сипаттамалары золь фракциясы (ЗФ), гель фракциясы (ГФ) және торлану тығыздығы (V_e) көрсеткіштері арқылы бағаланды, нәтижелері *1-кестеде* келтірілген.

Кесте 1 – **DVR негізіндегі модификаторлардың құрылымдық параметрлері**

Материал	Золь фракциясы (SF), %	Гель фракциясы (GF), %	Торлану тығыздығы (моль/см^3 × 10^{-5})
Резеңке үгіндісі	10	90	5,72
DVR + vPE	52	48	0,69
DVR + rPE	56	44	1,46

Золь фракциясының айтарлықтай артуы және гель фракциясының төмендеуі девулканизация процесінің тиімді жүзеге асқанын көрсетеді. Әсіресе, DVR-rPE жүйесінде DVR-vPE-мен салыстырғанда торлану тығыздығы жоғары, бұл құрылымдық өзара әрекеттесудің күштірек екенін білдіреді. Бұл құбылыс қайта өңделген полиэтилен құрамындағы тотығу функционалдық топтарының болуымен түсіндіріледі.

Флуоресцентті микроскопия (*1 сурет*) нәтижелері битумның үздіксіз фаза түзетінін, ал модификатор бөлшектерінің осы матрицада дисперсияланған күйде орналасатынын көрсетті.



(а) (б)

Сурет 1 – **DVR-vPE (а) және DVR-rPE (б) негізінде модификацияланған байланыстырғыштардың флуоресцентті микроскопиялық суреттері**

Бұл модификацияланған битум үлгісінің көлденең қимасынан алынған флуоресцентті микроскопияның суреттерінде көрсетілген (*1 сурет*). Флуоресценциялық микроскопия суреттері битумның тұрақты емес пішінді модификатор бөлшектері таралатын үздіксіз матрицалық фазаны құрайтынын көрсетеді, осылайша EN 13632 стандартына сәйкес бірінші жағдайға сәйкес келетін гетерогенді/біртекті емес жүйелерді білдіреді. Битум матрицасының ішінде әртүрлі өлшемдегі салыстырмалы түрде үлкен флуоресцентті модификатор бөлшектерін көрсететін DVR-vPE-ге қара-

ма-қайшы, DVR-rPE-модификацияланған битум битум матрицасының ішінде үнемі таралатын ұсақ бөлшектердің әлдеқайда нәзік морфологиясын көрсетеді. Сонымен қатар, DVR-vPE бөлшектері DVR-rPE-мен салыстырғанда бөлшектердің кеңірек мөлшерінің таралуын білдіреді, бұл біріншісінің үлкен агломерация үрдісін білдіреді. DVR-rPE жүйесінде байқалған ұсақ әрі біркелкі дисперсия оның битуммен үйлесімділігінің жоғары екенін және фазалардың бөліну үрдісінің төмендегенін көрсетеді. Бұл нәтижелер [12]-те келтірілген деректермен сәйкес келеді.

Тұтқырлық-ығысу жылдамдығы тәуелділіктері *2 кестеде* көрсетілген.

Кесте 2 – **Модификацияланған байланыстырғыштар үшін тұтқырлықтың ығысу жылдамдығына тәуелділігі**

Үлгі	200 rpm	300 rpm	400 rpm
DVR-vPE	~2000	~1800	~1700
DVR-rPE	~2500	~2200	~2100
DVR-vPE + A	~3000	~2700	~2500
DVR-rPE + A	~3200	~2900	~2700
DVR-vPE жоғары	~5500	~4800	~4300
DVR-vPE төмен	~4000	~3500	~3200
DVR-rPE жоғары	~11000	~10000	~9000
DVR-rPE төмен	~7000	~6000	~5200
DVR-vPE + A жоғары	~7500	~6000	~5200
DVR-vPE + A төмен	~9000	~7500	~6500
DVR-rPE + A жоғары	~9000	~7500	~6500
DVR-rPE + A төмен	~6000	~5000	~4500

DVR-vPE жүйелері ең төмен тұтқырлық мәндерін көрсетеді, бұл олардың битум матрицасымен өзара әрекеттесуінің әлсіз екенін білдіреді. Ал DVR-rPE жүйесінде тұтқырлық айтарлықтай артады, бұл құрылымның жақсырақ қалыптасқанын көрсетеді.

Аэросил қосылуы тұтқырлықты одан әрі арттырып, күшейтілген торлы құрылымның түзілгенін растайды.

Ығысу кернеуі-ығысу жылдамдығы тәуелділіктері *3 кестеде* көрсетілген.

Кесте 3 – **Әртүрлі айналу жылдамдықтарындағы модификацияланған битум байланыстырғыштарының ығысу кернеуі**

Үлгі	**200 rpm (Pa)**	**300 rpm (Pa)**	**400 rpm (Pa)**
DVR-vPE	5000	9000	12000
DVR-Rpe	6000	11000	15000
DVR-vPE + A	7000	13000	18000
DVR-rPE + A	8000	15000	20000
DVR-vPE жоғары	3500	6000	8000
DVR-vPE төмен	4000	7000	9500
DVR-rPE жоғары	4500	8000	11000
DVR-rPE төмен	5000	9000	12000
DVR-vPE + A жоғары	9000	16000	22000
DVR-vPE + A төмен	7000	12000	16000
DVR-rPE + A жоғары	10000	17000	23000
DVR-rPE + A төмен	8000	14000	18000

DVR-rPE жүйелері DVR-vPE жүйелерімен салыстырғанда жоғары ығысуға төзімділік көрсетеді. Қартаюдан кейін үлгінің жоғарғы және төменгі қабаттары арасында айқын айырмашылықтар байқалады, бұл фазалық бөлінуді көрсетеді. Алайда Aerosil қосылғаннан кейін бұл айырмашылықтар айтарлықтай азаяды.

DVR-rPE жүйелерінің жақсарған реологиялық әрекеті полимер тізбектерінің Аэросил бетінде адсорбциялануы; тотығуға ұшыраған rPE мен кремний диоксиді арасында сутектік байланыстардың түзілуі; үшөлшемді құрылымдық тордың қалыптасуы сияқты факторлармен түсіндіріледі.

Бұл тор полимер тізбектерінің қозғалғыштығын шектейді, дисперсияны жақсартады, тік бағыттағы фазалық бөлінуді азайтады. Алынған нәтижелер нано Аэросилмен модификацияланған битумдарға қатысты бұрынғы зерттеулермен сәйкес келеді [12-15].

Қорытынды

Бұл зерттеу девулканизацияланған резеңке мен полиэтиленмен модификацияланған битумның микроқұрылымы мен реологиялық әрекеті арасындағы байланысты анықтайды. Нәтижелер полиэтилен түрінің модификацияланған байланыстырғыштың ішкі құрылымы мен ағу қасиеттерін анықтауда маңызды рөл атқаратынын көрсетті.

Қайта өңделген полиэтилен (rPE) бастапқы полиэтиленмен (vPE) салыстырғанда битум матрицасымен жоғары үйлесімділік көрсетіп, модификатор бөлшектерінің ұсақ әрі біркелкі таралуына әкеледі. Флуоресцентті микроскопия DVR-rPE жүйелерінде агломерацияның азайғанын және біртекті микроқұрылымның қалыптасқанын растады, бұл реологиялық қасиеттердің жақсаруына ықпал етеді.

Реологиялық талдау DVR-rPE негізіндегі байланыстырғыштардың тұтқырлығы мен ығысуға төзімділігінің жоғары екенін көрсетті, бұл дамыған ішкі құрылымның қалыптасуын білдіреді. Аэросил енгізу беттік өзара әрекеттесуді күшейтіп, үшөлшемді торлы құрылым түзілуін қамтамасыз ету арқылы бұл құрылымды одан әрі нығайтты. Мұндай құрылымдық күшею фазалардың қозғалғыштығын шектеп, деформацияға төзімділікті арттырады.

DVR-rPE жүйелерінің жоғары реологиялық тұрақтылығы полимер-битум үйлесімділігінің жақсаруы мен нанобөлшектер әсерінен туындайтын құрылымдану нәтижесінде қамтамасыз етіледі. Бұл нәтижелер гибридті резеңке-полимермен модификацияланған байланыстырғыштардың әрекетін түсіндіретін механизмдер туралы маңызды ғылыми мәліметтер береді және қайта өңделген полиэтиленнің реологиялық қасиеттерді тиімді реттейтін компонент ретіндегі әлеуетін көрсетеді.

Қаржыландыру

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP26104151 «Мұнай битумдары мен асфальтбетондарды резеңке-полимерлі композиттермен модификациялау технологиясын әзірлеу»).

ӘДЕБИЕТ

1. Imanbayev Y., Bussurmanova A., Ongarbayev Y., Serikbayeva, A., Sydykov, S., Tabylganov M., Akkenzheyeva A., Izteleu N., Mussabekova Z., Amangeldin D., et al. Modification of bitumen with recycled PET plastics from waste materials. Polymers 2022, 14, 4719.
2. Akkenzheyeva A., Haritonovs V., Bussurmanova A., Merijs-Meri R., Imanbayev Y., Riekstins A., Serikbayeva A., Sydykov S., Aimova M., Mustapayeva G. Study of the Viscoelastic and Rheological Properties of Rubber-Bitumen Binders Obtained from Rubber Waste. Polymers 2024, 16, 114.
3. Qian C., Fan W., Liang M., He Y., Ren S., Lv X., Nan G., Luo H. Rheological properties, storage stability and morphology of CR/SBS composite modified asphalt by high-cured method. Constr. Build. Mater. 2018, 193, 312–322.
4. Liang M., Xin X., Fan W., Zhang J., Jiang H., Yao Z. Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene. Int. J. Pavement Eng. 2021, 22, 11–20. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1575968.
5. Akkenzheyeva A., Haritonovs V., Bussurmanova A., Merijs-Meri R., Imanbayev Y., Serikbayeva A., Sydykov S., Ayapbergenov Y., Jankauskas M., Trumpels A., et al. The use of rubber-polymer composites in bitumen modification for the disposal of rubber and polymer waste. Polymers 2024, 16, 3177. https://doi.org/10.3390/polym16223177.
6. EN 1426:2015; Bitumen and Bituminous Binders Determination of Needle Penetration. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
7. EN 1427:2015; Bitumen and Bituminous Binders Determination of The Softening Point Ring and Ball Method. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
8. EN 12591:2009; Specifications for paving grade bitumens, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009
9. EN 12607-1:2015; Bitumen and Bituminous Binders Determination of The Resistance to Hardening Under Influence of Heat and Air Part 1: Rtfot Method. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
10. Vorobyev L.R., Bosnik V.B. Method of Devulcanization of Sulfur-Cured Rubber. U.S. Patent 9,982,107 B1, 29 May 2018. Available online: https://patents.google.com/patent/US9982107B1/no (accessed on 31 May 2018).
11. EN 13632:2010; Bitumen and Bituminous Binders—Visualisation of Polymer Dispersion in Polymer Modified Bitumen.
12. Ma Y., Yin T., Xie T., Cai B., Zhao Q., Yu H.; Gong X.; Zhang X.; Xiang H. Influence of rubber cross-linking degree on compatibility and performance of modified asphalt: Rheological characterization and molecular simulation. Case Stud. Constr. Mater. 2025, 23, e05487. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05487.
13. Behnood A., Gharehveran M. Morphology, rheology and physical properties of polymer-modified asphalt binders. Eur. Polym. J. 2018, 109, 68–96. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.
14. Assolie A.A., Al-Migdady A.I., Borowski G.; Al-Sakkaf A.; Jaroszuk-Sierocińska M. Utilizing waste polyethylene for improved properties of asphalt binders and mixtures: A review. Adv. Sci. Technol. Res. J. 2025, 19, 301–320. https://doi.org/10.12913/22998624/195657.
15. Zhou S., Li S., Yan C. Influence of fumed silica nanoparticles on the rheological and anti-aging properties of bitumen. Constr. Build. Mater. 2023, 397, 132388.