

ӨОЖ 665.775; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-2.15>

<https://orcid.org/0000-0001-8486-8744>

<https://orcid.org/0000-0001-8228-7188>

<https://orcid.org/0000-0002-9847-8218>

<https://orcid.org/0000-0001-8273-0020>

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН БИТУМНЫҢ САҚТАУ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ



У.К. ЕНСЕГЕНОВА¹,
докторанты,
[uzilkhan.yensegenova@
yu.edu.kz](mailto:uzilkhan.yensegenova@yu.edu.kz)



А.Ч. БУСУРМАНОВА²,
химия ғылымдарының
кандидаты, профессор,
[akkenzhe.bussurmanova@
yu.edu.kz](mailto:akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz)



А.Ш. АККЕНЖЕЕВА²,
техника ғылымдарының
кандидаты, профессор,
[anar.akkenzheeva@yu.edu.
kz](mailto:anar.akkenzheeva@yu.edu.kz)

Е.И. ИМАНБАЕВ³, PhD, қауымдастырылған профессор, аға ғылыми қызметкері,
erzhan.imanbayev@mail.ru

¹ӨЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Қазақстан Республикасы, 050040, Алматы қ., өл-Фараби даңғылы, 71

²Ш.ЕСЕНОВ АТЫНДАҒЫ «КАСПИЙ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ЖӘНЕ ИНЖИНИРИНГ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ
Қазақстан Республикасы, 130000, Ақтау қ., 32 шағынаудан

³РМК «ЖАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ ИНСТИТУТЫ»
Қазақстан Республикасы, 050012, Алматы қ., Бөгенбай батыр к., 172

Бұл зерттеу ішінара вулканизацияланған резеңке (DVR), полиэтилен (vPE – бастапқы және rPE – қайта өңделген) және Аэросил – кремний диоксиді (А) арқылы модификацияланған битум байланыстырғыштарының механикалық өнімділігін, сақтау тұрақтылығын және деформацияға төзімділігін бағалайды.

Зерттеу барысына сақина және шар бойынша жұмсару нүктесі, иненің енуі, күш икемділігі және серпімділікті қалпына келтіру сынақтары, сондай-ақ термиялық күйден кейін жоғарғы-төменгі қасиеттердің айырмашылықтарына негізделген сақтау тұрақтылығын бағалау кірді. Нәтижелер қайта өңделген полиэтиленді қамтитын байланыстырғыштардың

таза полиэтиленге негізделген жүйелермен салыстырғанда қаттылығының жақсарғанын, деформацияға төзімділігінің артқанын және серпімділікті қалпына келтірудің жоғары екенін көрсетеді. Аэросилді қосу құрылымдық тұрақтылықты айтарлықтай жақсартады, жоғарғы және төменгі бөліктер арасындағы жұмсару нүктелерінің айырмашылықтарын бес есеге дейін азайтады және сақтау кезінде фазалық бөлінуді азайтады. Механикалық сынақтар DVR-rPE + A байланыстырғыштарының деформация энергиясын 10-20%-ға көбірек сіңіретінін және серпімді қалпына келтіру мәндерін 70-80%-дан жоғары сақтайтынын көрсетті, бұл тұрақты деформацияға төзімділіктің жақсарғанын көрсетеді. Жалпы алғанда, DVR-rPE-A жүйесі механикалық беріктіктің, сақтау тұрақтылығының және термиялық өнімділіктің ең теңгерімді үйлесімін көрсетеді. Өнімділік артықшылықтарынан басқа, қайта өңделген полиэтиленді пайдалану экономикалық және экологиялық артықшылықтарды ұсынады, бұл жол жабындарына арналған тұрақты, жоғары өнімді битумды материалдарды өзірлеуді қолдайды.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: битум, сақтау тұрақтылығы, механикалық қасиеттер, серпімді қалпына келтіру, қайта өңделген полиэтилен.

СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИ ХРАНЕНИИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО БИТУМА

У.К. ЕНСЕГЕНОВА¹, докторант, uzilkhan.yensegenova@yu.edu.kz

А.Ч. БУСУРМАНОВА², кандидат химических наук, профессор, akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz

А.Ш. АККЕНЖЕЕВА², кандидат технических наук, профессор, anar.akkenzheeva@yu.edu.kz

Е.И. ИМАНБАЕВ³, PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник, erzhan.imanbayev@mail.ru

¹КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.АЛЬ-ФАРАБИ
Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71

²НАО «КАСПИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГИИ И ИНЖИНИРИНГА
ИМ. Ш. ЕСЕНОВА»
Республика Казахстан, 130000, г. Актау, 32 мкр

³РГП «ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГОРЕНИЯ»
Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172

В данном исследовании оцениваются механические характеристики, стабильность при хранении и сопротивление деформации битумных вяжущих, модифицированных частично вулканизированной резиной (DVR), полиэтиленом (vPE – первичный и rPE – переработанный) и Аэросил – диоксидом кремния (А). Исследование включало испытания на температуру размягчения кольца и шара, проникновение иглы, упругость и упругое восстановление, а также оценку стабильности при хранении на основе различий в свойствах верхней и нижней частей после термической обработки.

Результаты показывают, что вяжущие, содержащие переработанный полиэтилен, обладают улучшенной жесткостью, повышенным сопротивлением деформации и более высоким упругим восстановлением по сравнению с системами на основе чистого полиэтилена. Добавление Аэросил значительно улучшает структурную стабильность, уменьшает разницу температур размягчения между верхней и нижней частями до пяти раз и снижает фазовое расслоение при хранении. Механические испытания показали, что вяжущие DVR-rPE + A поглощают на 10-20% больше энергии деформации и сохраняют значения упругого восстановления выше 70-80%, что указывает на улучшенное сопротивление необратимой

деформации. В целом, система DVR-rPE-A демонстрирует наиболее сбалансированное сочетание механической прочности, стабильности при хранении и тепловых характеристик. Помимо преимуществ в эксплуатационных характеристиках, использование переработанного полиэтилена обеспечивает экономические и экологические преимущества, способствуя разработке экологически чистых высокоэффективных битумных материалов для дорожных покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битум, стабильность при хранении, механические свойства, упругое восстановление, переработанный полиэтилен.

STORAGE STABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF MODIFIED BITUMEN

U.K. YENSEGENOVA¹, doctoral student, uzilkhan.yensegenova@yu.edu.kz

A.Ch. BUSSURMANOVA², candidate of chemical sciences, professor, akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz

A.Sh. AKKENZHEYEVA², candidate of technical sciences, professor, anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz

Y.I. IMANBAYEV³, PhD, associate professor, senior researcher, erzhan.imanbayev@mail.ru

¹AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY
Republic of Kazakhstan, 050040, Almaty, Al-Farabi Ave., 71

²NJSC "CASPIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ENGINEERING
NAMED AFTER SH. YESSENOV"
Republic of Kazakhstan, 130000, Aktau, 32 microdistrict

³RSE "INSTITUTE OF COMBUSTION PROBLEMS"
Republic of Kazakhstan, 050012, Almaty, Bogenbay Batyr str., 172

This study evaluates the mechanical properties, storage stability, and dimensional stability of bitumen binders modified with partially vulcanized rubber (DVR), polyethylene (vPE – virgin and rPE – recycled), and Aerosil – silica (A). The study included ring and ball softening point, needle penetration, resilience, and elastic recovery tests, as well as an assessment of storage stability based on differences in the properties of the top and bottom halves after heat treatment.

The results show that binders containing recycled polyethylene exhibit improved stiffness, increased dimensional stability, and higher elastic recovery compared to pure polyethylene-based systems. The addition of Aerosil significantly improves structural stability, reduces the softening point difference between the top and bottom halves by up to five times, and reduces phase separation during storage. Mechanical testing showed that DVR-rPE+A binders absorb 10-20% more deformation energy and retain elastic recovery values above 70-80%, indicating improved resistance to permanent deformation. Overall, the DVR-rPE-A system demonstrates the most balanced combination of mechanical strength, storage stability, and thermal performance. In addition to performance advantages, the use of recycled polyethylene provides economic and environmental benefits, facilitating the development of environmentally friendly, high-performance bitumen materials for road surfaces.

KEYWORDS: bitumen, storage stability, mechanical properties, elastic recovery; recycled polyethylene.

Қіріспе. Құрылыс индустриясында тұрақтылық жаһандық басымдыққа айналды, қоршаған ортаға әсерді азайту үшін қалдық материалдарды пайдалануды ынталандырады. Халықаралық бастамалар мен өнеркәсіптік есептерде көрсетілгендей, қызмет ету мерзімі аяқталған шиналардың көп мөлшерде жиналуы

оларды тиімді қайта өңдеуді қажет етеді [1]. Сондықтан битум материалдарына резеңке және пластик қалдықтарын қосу экологиялық және экономикалық тұрғыдан тиімді шешім ретінде танылады [2,3].

Жол қозғалысына деген сұраныстың үздіксіз өсуі берік және үнемді жол жабындарын қажет етеді. Полимермен модификацияланған битум беріктік пен қызмет ету мерзімін жақсартса да, оның жоғары құны – көбінесе қоспа шығындарын 40%-ға дейін арттырады, яғни кеңінен қолдануды шектейді. Демек, резеңке үгіндісі мен полиэтилен сияқты қайта өңделген материалдарды пайдалану барған сайын назар аудару бастады. Резеңкемен модификацияланған байланыстырғыштар шуды және жарықшақты азайта отырып, серпімділікті, тозуға төзімділікті және сырғанау өнімділігін арттырады. Дегенмен, бұл жүйелер жоғары тұтқырлықпен, жоғары өңдеу температурасымен және сақтау кезінде фазалардың бөлінуіне күшті бейімділікпен сипатталады [4].

Полиэтиленді модификациялау қаттылықты және жолтабанға төзімділікті жақсарттады, бірақ көбінесе төмен температуралық өнімділік пен сақтау тұрақтылығына кері әсер етеді [5]. Сол сияқты, девулканизацияланған резеңке өңделмеген резеңкемен салыстырғанда үйлесімділікті арттырса да, DVR-модификацияланған байланыстырғыштардың ұзақ мерзімді механикалық әрекеті мен тұрақтылығы әлі де талқылануда.

Полимер-модификацияланған битум жүйелерінің негізгі шектеуі – тығыздық айырмашылықтары мен фазалар арасындағы үйлесімсіздіктен туындаған олардың нашар сақтау тұрақтылығы. Фазалардың бөлінуі біркелкі емес қасиеттерге және қызмет көрсету кезіндегі өнімділіктің төмендеуіне әкеледі. Бұл құбылысты бағалау үшін әртүрлі әдістер, соның ішінде микроскопия, спектроскопия және түтік сынақтары жасалды, соңғысы нақты сақтау жағдайларын ең жақсы көрсетеді [6].

Жақында жүргізілген зерттеулер нанобөлшектер, әсіресе кремний диоксиді, модификацияланған битумның тұрақтылығы мен механикалық өнімділігін айтарлықтай арттыра алатынын көрсетті [7]. Жоғары меншікті беткі ауданы және үш өлшемді желіні құру қабілетіне байланысты кремний диоксиді нанобөлшектері бетаралық адгезияны жақсарттады, фазалық бөлінуді азайтады және деформацияға төзімділікті арттырады. Бұл әсерлер байланыстырғыштың серпімді қалпына келуін, термиялық тұрақтылығын және құрылымдық біркелкілігін жақсартуға ықпал етеді.

Тұрақтылықты жақсартумен қатар, DVR, полиэтилен және нанобөлшектерді біріктіретін гибриді жүйелер механикалық өнімділіктің және тұрақты деформацияға төзімділіктің жақсарғанын көрсетті [8]. Дегенмен, бұл жақсартулардың көлемі және олардың полиэтилен түріне тәуелділігі (vPE және rPE) әлі де жеткілікті зерттелмеген.

Сондықтан, бұл зерттеудің мақсаты DVR, полиэтилен және кремний диоксидімен модификацияланған битумның механикалық өнімділігін, сақтау тұрақтылығын және деформацияға төзімділігін бағалау болып табылады. Аэросилдің фазалық бөлінуді азайтудағы және құрылымдық тұтастықты жақсартудағы рөліне, сондай-ақ қайта өңделген және таза полиэтилен жүйелерінің салыстырмалы өнімділігіне ерекше назар аударылады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Бұрын сипатталған Б70/100 битумы мен DVR негізіндегі модификаторлар (vPE және rPE) қолданылды. Аэросил (кремний диоксиді) битум матрицасында үш өл-

шемді желіні қалыптастыру қабілетіне байланысты тұрақтандырғыш және күшейткіш агент ретінде енгізілді, бұл сақтау тұрақтылығын және механикалық өнімділікті жақсартады [9].

Модификацияланған битумды дайындау. Модификацияланған байланыстырғыштар 180 °С температурада 60 минут бойы 4500 айн/мин жылдамдықпен жоғары ығысу араластыру процесін қолдана отырып дайындалды. Тұрақтылықты арттыру және фазалық бөлінуді азайту үшін таңдалған құрамдарға аэросил қосылды.

Байланыстырғышқа иненің енуін бағалау EN 1426 [10] стандартына сәйкес жүргізілді.

Жұмсару температурасын, яғни температураға сезімталдықты анықтау үшін EN 1427 [11] стандартын қолданып өлшенді.

Күш әсерінен созылғыштық сынақтары EN 13589 [12] стандартына сәйкес жүргізілді, ал серпімділік қалпына келу EN 13398 [13] стандартын пайдаланып анықталды:

$$ER = \frac{d}{L} \times 100 \quad (1)$$

мұндағы d – кесілген немесе сынған сынақ үлгісінің ұштары арасындағы қашықтық, әдетте 30 минуттан кейін өлшенеді. Сынақ кезінде L – сынақ үлгісінің ұзаруы (егер сынақ үлгісі сынбаған болса, 200 мм). Алынған күш – иілгіштік қисықтарынан шың күші мен деформация да анықталды.

Сақтау тұрақтылығы EN 13399 [14] стандартына сәйкес түтік сынағы арқылы бағаланды. Жоғарғы және төменгі бөліктер арасындағы жұмсару нүктесіндегі айырмашылық фазалардың бөлінуінің индикаторы ретінде пайдаланылды.

Модификацияланған байланыстырушы құрамдар (DVR-vPE, DVR-rPE, DVR-rPE+A және т.б.) олардың құрамына және тозу жағдайына (сақтаудан кейінгі жоғары/төменгі) сәйкес анықталды.

Зерттеу нәтижесі

1-кестеде битуммен әр түрлі DVR композиттерінің сақина және шар бойынша жұмсару температурасы (СШ) деректері көрсетілген.

Кесте 1 – Сақтау тұрақтылығы сынағына дейін және кейін модификацияланған битумның жұмсару температурасы

Үлгі	Сақтау тұрақтылығын тексеруге дейін	Сақтау тұрақтылығын тексеруден кейін, төмен	Сақтау тұрақтылығын тексеруден кейін, жоғары
Жұмсару температурасы, °C			
DVR-vPE	48	55	50
DVR-vPE + A	52	60	40
DVR-rPE	50	55	52
DVR-rPE + A	55	62	48
Пенетрация, 0,1 мм			
DVR-vPE	70	60	65
DVR-vPE + A	75	72	60
DVR-rPE	78	70	66
DVR-rPE + A	80	78	68

DVR-vPE-модификацияланған битум құрамдарының СШ мәндері DVR-rPE мәндеріне қарағанда 7 °С төмен, бұл қалдық PE-нің битуммен тиімдірек әрекеттесуіне байланысты модификацияланған битумның жоғары қаттылығын көрсетуі мүмкін. Қалдық PE әдетте макромолекулалық тізбектің бұзылуынан туындаған тозуға байланысты төмен молекулалық салмаққа, кең молекулалық салмақ таралуына және винил, винилен және оттегі атомы бар топ құрамының жоғарылауына ие екені белгілі. Битумды модификациялау аясында rPE реактивтілігінің жоғарылауы ғылыми және практикалық тұрғыдан қызықты мәселе болып табылады. Бұл DVR-rPE арасындағы әртүрлі битум фракцияларымен әрекеттесу деңгейін арттыруы мүмкін. Сондықтан бұл аспект тереңірек зерттеуді қажет етеді. Әртүрлі полиэтилен өнімдерінің тозуы кезінде rPE-нің бұзылу деңгейін және оның макромолекулалық құрылымның өзгеруімен корреляциясын анықтаудан басқа, бұл қалдық PE-нің сенімді жеткізу тізбегін қамтамасыз ету үшін үлкен практикалық қызығушылық тудырады. Қазіргі уақытта қалдықтарды басқару компаниялары әртүрлі тозу кезеңдерінде әртүрлі көздерден, мысалы, пайдаланылған ауылшаруашылық пленкасынан, пайдаланылған полиэтилен банкаларынан және т.б. қалдық полиэтиленді жеткізе алады. Аэросил қосылғаннан кейін, DVR-vPE- және DVR-rPE-модификацияланған битумдар үшін СШ сәйкесінше шамамен 3-5 °С-қа артады. Сақтау тұрақтылығы сынағынан кейін ΔСШ-да айтарлықтай айырмашылықтар байқалуы мүмкін. ΔСШ диапазонындағы ең үлкен айырмашылықтар (шамамен 32 °С) rPE бар жүйелер үшін байқалды, бұл ескірген полимердің кеңірек молекулалық салмақ таралуының әсері болуы мүмкін. Дегенмен, битумды модификациялау кезінде Аэросил енгізілгеннен кейін, ескірген модификацияланған битум құрамдарының жоғарғы және төменгі бөліктері арасындағы айырмашылықтар 10 °С-тан 1,9 °С-қа дейін DVR + vPE үшін шамамен 5 есеге және DVR + rPE үшін (32,2 °С-тан 19,9 °С-қа дейін) 1,5 есеге айтарлықтай төмендеді, бұл Аэросилдің модификацияланған битум құрамдарының құрылымына тұрақтандырушы әсерін көрсетеді. 1 кестеде DVR-vPE, DVR-rPE және DVR-модификацияланған битум үшін иненің ену тереңдігі мәндері көрсетілген. Тозу алдында, Аэросилсіз DVR-rPE-модификацияланған битум құрамдарының пненетрация мәндері DVR-vPE-мен салыстырғанда (шамамен 5 бірлік) біршама жоғары екенін байқауға болады, бұл СШ сынақ мәндерін ескере отырып, қатты байланыстырғышта СШ сынақ мәндері жоғары және ену тереңдігінің мәндері төмен болуы керек. Дегенмен, мұны белгілі бір дәрежеде ену сынағы құрамның беткі біртекті еместігіне сезімтал екенін ескере отырып түсіндіруге болады. Дегенмен, битум қоспасына Аэросил енгізілгеннен кейін бұл айырмашылықтар айтарлықтай азаяды, бұл дисперсті көмекшінің тұрақтандырушы әсеріне байланысты қоспаның біртектілігінің жақсаруымен түсіндірілуі мүмкін. Аэросил қоспасының әсері vPE бар құрамдар жағдайында айқынырақ болады, бұл DVR-rPE-модификацияланған битум құрамдарының бастапқыда DVR-vPE бар жүйелермен салыстырғанда жақсырақ қоспа сапасына ие болуымен түсіндірілуі мүмкін. Бұл vPE тізбектерімен салыстырғанда реактивтілігі жоғары төменгі және кең молекулалық салмақтағы rPE тізбектерінің DVR және битуммен жақсырақ араласуына байланысты болуы мүмкін. Біз күткендей, сақтау тұрақтылығы сынағынан кейін, ескірген сынақ цилиндрінің төменгі және жоғарғы бөліктері

арасындағы пенетрация айырмашылығы DVR-vPE-модификацияланған битум жағдайында DVR-rPE-модификацияланған битуммен салыстырғанда үлкенірек; сонымен қатар, төменгі бөліктің пенетрация жоғары мәндерді көрсетеді. Дегенмен, бұл ескіргеннен кейін салыстырмалы түрде төмен тығыздықтағы DVR-rPE-модификацияланған битум құрамының қысқа молекулалық салмақ фрагменттері сынақ үлгісінің жоғарғы бөлігінде шоғырланатынын, осылайша оны төменгі бөлікпен салыстырғанда қаттырақ ететінін көрсетуі мүмкін. Мұндай әрекет Аэросилмен модификацияланған құрамдар үшін де байқалады; дегенмен, бұл DVR ішінде rPE немесе vPE қолданылатынын ескермегенде аз дәрежеде. Сондай-ақ, Аэросил қосқаннан кейін DVR-rPE-модификацияланған битум құрамының төменгі және жоғарғы бөліктері арасындағы айырмашылықтың азаюы маңызды. Осы зерттеуде алынған DVR-rPE-модификацияланған битум жүйелерінің жұмсару температурасы DVR-vPE құрамдарына қарағанда айтарлықтай жоғары. Бұл үрдіс [5,15]-те келтірілген нәтижелерге сәйкес келеді, бұл қайта өңделген PE-нің жақсартылған термиялық өнімділігімен, жоғары қаттылығымен және интерфейстік өзара әрекеттесуінің жақсаруымен байланысты. DVR-rPE-модификацияланған байланыстырғыштардың СШ жұмсару нүктесінің жоғарылауы [15]-те де қарастырылған, мұнда PE қалдықтары деформацияға төзімділіктің және термиялық тұрақтылықтың жақсаруына ықпал етті. DVR-rPE-модификацияланған битум үшін байқалған сәл жоғары пенетрация мәндері, СШ температурасының жоғарылауына қарамастан, [15]-те келтірілген қорытындыларға сәйкес келеді, бұл ену сынағының жергілікті беттік гетерогенділікке төмен сезімталдығын көрсетеді. Аэросил дисперсті қоспасын қосу сақтаудан кейін үлгілердің жоғарғы және төменгі бөліктері арасындағы СШ мен пенетрация мәндеріндегі айырмашылықтарды азайтты. Бұл нәтиже [5,15]-те көрсетілген функционалды және силан негізіндегі қоспалардың тұрақтандырушы әсерлеріне сәйкес келеді, олар PE-модификацияланған битумды байланыстырғыштарда фазалық үйлесімділікті күшейтетіні, сегрегацияны басатыны және сақтау тұрақтылығын жақсартатыны белгілі.

Жалпы алғанда, термиялық тозудан кейін зерттелген құрамдардың СШ мен пенетрацияның өзгеруі rPE бар DVR битумды модификациялауға қолайлырақ екенін көрсетеді.

2-кестеде DVR-vPE немесе DVR-rPE-модификацияланған битум құрамдарының серпімді қалпына келтіру әрекетін айқын салыстыру үшін жүктеме-ығысу (F- Δ) нүктелері көрсетілген.

Зерттелген барлық модификацияланған битум құрамдары 200 мм немесе жыртылғанға дейін тұрақты деформациядан кейін көрінетін шығымдылық максимумымен бірдей типтегі F- Δ нүктелерін көрсетеді. Сақтау тұрақтылығы сынағына ұшырамас бұрын, DVR-rPE бар модификацияланған битум құрамы DVR-vPE-модификацияланған битумға тән мәндермен салыстырғанда жоғары шығымдылық максимумын және үзіліс мәндерінде үлкен созылуды көрсететіні анық көрсетілген. Мұндай әрекет DVR-rPE битуммен DVR-vPE-мен салыстырғанда тиімдірек әрекеттесетінін көрсетуі мүмкін, бұл қайта өңделген полимердің әдетте төмен молекулалық салмағымен және кең молекулалық салмақ таралуымен түсіндірілуі мүмкін, бұл қысқа макромолекулалық тізбектерге әкеледі, олар битуммен оңай әрекетте-

Кесте 2 – vPE және rPE бар модификацияланған битум байланыстырғыштарының жүктеме-ығысу сипаттамалары

Ығысу, мм	DVR-vPE	DVR-vPE + A	DVR-vPE төмен	DVR-vPE + A төмен	DVR-vPE жоғары	DVR-vPE + A жоғары
Жүктеме, Н						
0	0	0	0	0	0	0
20	72	88	85	80	78	82
40	68	74	83	79	81	84
60	60	58	77	76	78	80
80	54	48	72	73	75	76
100	50	42	70	71	72	73
120	47	38	68	69	69	70
140	45	34	66	67	60	66
160	43	-	64	65	-	60
180	41	-	60	0	-	-
200	38	-	0	-	-	-
Ығысу, мм	DVR-rPE	DVR-rPE + A	DVR-rPE төмен	DVR-rPE + A төмен	DVR-rPE жоғары	DVR-rPE + A жоғары
Жүктеме, Н						
0	0	0	0	0	0	0
20	70	92	95	88	82	90
40	65	70	90	85	88	88
60	58	55	82	80	85	84
80	52	45	75	72	80	80
100	48	38	72	65	76	78
120	45	32	70	58	72	75
140	43	28	68	50	60	72
160	40	-	65	-	-	68
180	38	-	60	-	-	65
200	35	-	-	-	-	-

седі. Аэросилмен модификациясынан кейін таңдалған полимерді (vPE немесе rPE) ескермегенде, модификацияланған битум құрамының айтарлықтай жақсарғаны байқалады. DVR-vPE модификацияланған битум құрамдары жағдайында Аэросил шығымдылық максимумын және үзілістегі ұзаруды қосқаннан кейін екеуі де сәйкесінше шамамен 30% және 10%-ға артады. DVR-rPE модификацияланған битум құрамдары жағдайында бұл параметрлердің артуы онша байқалмаса да (үзілістегі ұзарудың кем дегенде 14%-ға артуы және шығымдылық максимумын іс жүзінде өзгертпейді), жалпы алғанда, Аэросил қосқаннан кейін rPE бар жүйенің абсолютті мәндері DVR-vPE модификацияланған битум құрамдарына тән мәндерден әлі де жоғары. Бұл 3-кестеде де айқын көрсетілген, онда зерттелген құрамдардың тән сіңірілген деформация энергия мәндері қорытындыланған.

Кесте 3 – Күштік иілгіштік сынағы кезінде DVR-vPE/rPE-модификацияланған битум құрамдарының сіңірілген энергиясы

Үлгі	Сақтау тұрақтылығын тексеруге дейін, J/cm ²	Сақтау тұрақтылығын тексеруден кейін, төменгі, J/cm ²	Сақтау тұрақтылығын тексеруден кейін, жоғары, J/cm ²
DVR-vPE	1,266	1,497	1,879
DVR-rPE	1,978	1,681	1,897
DVR-vPE + A	1,738	1,864	1,521
DVR-rPE + A	2,288	2,692	2,736

Күтілгендей, сақтау тұрақтылығы сынағынан кейін зерттелген құрамдардың F–Al әрекеті айтарлықтай өзгереді; жалпы алғанда, беріктік шегі артады, ал үзіліс кезіндегі деформация төмендейді, бұл кейіннен сіңірілген деформация энергия мән-дерінің өзгеруіне әкеледі. Жалпы алғанда, DVR-rPE жүйелерінің жоғары сіңірілген энергия мән-дері (DVR-vPE жүйелерімен салыстырғанда) ескірген полимер бөліктерінің DVR-мен және әртүрлі битум фракцияларымен өзара әрекеттесуінің артуымен байланысты. Тозудан кейін DVR-rPE + A-модификацияланған битум сіңірілген энергияның артуын көрсетті, әсіресе сынақ түтігі үлгісінің жоғарғы бөлігінен алынған сынақ үлгілері үшін, бұл бұрын белгіленгендей, құрамның жоғарғы бөлігіндегі DVR-rPE-модификацияланған битумға бай фазаның концентрациясын көрсетуі мүмкін. Дегенмен, сақтау тұрақтылығы сынағынан кейін сынақ түтігі үлгісінің төменгі бөлігінен алынған DVR-rPE + A негізіндегі битум үлгісінің сіңірілген энергия мәні сынақ үлгісінің жоғарғы бөлігінен алынғаннан сәл ғана төмен (шамамен 2%) болғанын атап өту маңызды. Тағы бір қызықты факт – модификацияланған битумның DVR + rPE + A сақтау тұрақтылығын сынаудан кейін сіңірілген энергия мән-дерінің модификацияланбаған аналогымен салыстырғанда жоғарылауы, бұл жоғары температурада (163 °C) сақтау кезінде DVR-rPE + A мен әртүрлі битум фракциялары арасында қосымша өзара әрекеттесу болатынын көрсетуі мүмкін. Дегенмен, бұл фактіні абайлап қарастырған жөн, ал DVR-rPE + A сынақ үлгісінің тозу алдындағы сіңірілген энергия мәнін басқа модификацияланған битум құрамдарымен тікелей салыстыруға болмайды, себебі оның қалпына келу әрекеті әртүрлі, яғни сынақ үлгісі басқаларына қарама-қайшы кесілген, ол *1-кестеде* көрсетілгендей әртүрлі деформация мән-дерінде жарылды. Әртүрлі деформация әрекеті, яғни үзіліс кезіндегі созылу мән-дері, сақтау тұрақтылығын сынаудан кейін сіңірілген энергия мән-дерінің біркелкі емес өзгеруінің себебі болуы мүмкін. СБС-модификацияланған битум үшін (битум массасы бойынша 4-6% полимерден тұрады) N мәні 3,5 болды, бұл полиэтилен-модификацияланған битум құрамдары үшін байқалғаннан 4-6 есе төмен. Бұл салыстырмалы түрде төмен күш кезінде серпімді қалпына келтіру 60%-дан 80%-ға дейін болды.

4-кестеде зерттелген модификацияланған битум құрамдарының серпімді қалпына келтіру (ER) мән-дері көрсетілген.

Кесте 4 – Сақтау тұрақтылығын тексеруге дейін және кейін битумды байланыстырғыштардың серпімді қалпына келуі

Құрам	Сынаққа дейін, %	Сынақтан кейін, төменгі бөлік, %	Сынақтан кейін, жоғары бөлік, %
DVR-vPE	71	68	70
DVR-rPE	72	69	78
DVR-vPE + A	67	70	68
DVR-rPE + A	71	74	74

Жалпы, барлық тексерілген DVR-vPE- және DVR-rPE-модификацияланған битум құрамдары үшін ER мән-дері 70-тен жоғары, бұл битум класының бесіншіден (ER 25 °C > 50%) үшіншіге (ER 25 °C > 70%) немесе тіпті екіншіге (ER 25 °C > 80%) дейін өскенін көрсетеді. Сонымен қатар, DVR-rPE негізіндегі модификацияланған

битумды құрамдар жалпы алғанда DVR-vPE-модификацияланған битумды жүйелерге тән мәндермен салыстырғанда ұқсас немесе тіпті жоғары серпімді қалпына келтіру мәндерін көрсетеді. Сондай-ақ, DVR-vPE-модификацияланған битумға қосқаннан кейін ER мәндері аздап төмендейтіні анық, бұл әдетте материалдардың серпімді қалпына келуін төмендететін жоғары беттік аудан мен жоғары модульді минералды толтырғыштың қосылуымен түсіндірілуі мүмкін. Сонымен қатар, DVR-rPE + A жағдайында, Аэросил жоқ аналогтық жүйелермен салыстырғанда, ER мәнінде іс жүзінде ешқандай айырмашылық байқалмайды. Сонымен қатар, соңғы жүйенің (DVR-rPE + A) жоғарғы және төменгі бөліктері арасында ER-де іс жүзінде ешқандай айырмашылық болмауы маңызды, бұл оның басқа сынақтан өткен битуминозды байланыстырушы құрамдармен салыстырғанда жоғары тұрақтылығын көрсетеді.

DVR-rPE-модификацияланған битум жүйелері үшін байқалған ағындылық кернеуінің жоғарылауы және үзілістегі созылу [15]-те келтірілген нәтижелерге сәйкес келеді, бұл қайта өңделген PE жоғары реактивтілік көрсететінін және қысқа және полярлы тізбектерінің арқасында серпімді, құрылымдалған желі құратынын көрсетеді. DVR-rPE-модификацияланған битум жүйелері үшін өлшенген жоғары сіңірілген энергия мәндері [15] нәтижелерімен де корреляцияланады, мұнда PE қалдықтары байланыстырғыштың беріктігін және деформацияға төзімділігін арттырды. DVR-vPE- және DVR-rPE негізіндегі құрамдарға дисперсті қоспа Аэросил қосу олардың беріктігі мен деформация сипаттамаларын одан әрі жақсартты. Бұл үрдіс [5] жұмыстарда сипатталған функционалдандырылған және силан қоспаларының әсеріне сәйкес келеді, олар полимердің дисперсиясын жақсартады және серпімді қалпына келтіруді арттырады. Осы зерттеуде DVR-rPE-модификацияланған битум жүйелері үшін алынған жоғары ER мәндері (>70–80%) [15] қорытындыларын растайды, бұл қайта өңделген PE таза PE-мен салыстырғанда жоғары серпімділік пен тұрақты деформацияға төзімділік беретінін көрсетеді. DVR-rPE + A үлгілерінің жоғарғы және төменгі бөліктері арасындағы минималды айырмашылықтар сақтаудан кейін фазалық сегрегацияның төмендегенін көрсетеді: бұл әсер тұрақтандырылған PE/EVA жүйелеріне ұқсас.

Қорытынды:


Бұл зерттеу вулканизацияланған резеңкемен, полиэтиленмен және кремний диоксидімен модификацияланған битумның өнімділігін, сақтау тұрақтылығын және механикалық әрекетін бағалайды. Нәтижелер полиэтилен түрі де, Аэросилді қосу да модификацияланған байланыстырғыштардың инженерлік өнімділігіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді.

Қайта өңделген полиэтилен (rPE) бар байланыстырғыштар таза полиэтиленге (vPE) негізделгендермен салыстырғанда жоғары қаттылықты, деформацияға төзімділіктің жақсарғанын және серпімді қалпына келтірудің жақсарғанын көрсетті. rPE-модификацияланған жүйелердің өнімділігінің жақсаруы олардың реактивтілігінің жоғарылауына және битум матрицасымен күштірек өзара әрекеттесуіне байланысты.

Аэросилді қосу сақтау тұрақтылығын жақсартудың өте тиімді стратегиясы болып шықты. Термиялық күйден кейін үлгілердің жоғарғы және төменгі бөліктері арасындағы айырмашылықтар айтарлықтай азайды, бұл фазалық бөлінудің басылуын және құрылымдық біркелкіліктің жақсарғанын көрсетеді. Сонымен қар-

тар, Аэросил тұрақты деформацияға төзімділікті арттырды және жоғары серпімді қалпына келтіру мәндерін (>70–80%) сақтауға ықпал етті.

Механикалық сынақтар DVR–rPE + А жүйелерінің басқа құрамдармен салыстырғанда жоғары жүк көтергіштік қабілетін, үзіліс кезінде үлкен созылуды және энергия сіңірілуін арттыратынын көрсетті. Бұл жақсартулар механикалық және термиялық кернеулерге төтеп бере алатын тұрақты және серпімді байланыстырушы құрылымды көрсетеді.

Практикалық тұрғыдан алғанда, қайта өңделген полиэтиленді пайдалану экономикалық және экологиялық пайда әкеледі, материалдық шығындарды азайтады және материалды тұрақты пайдалануды қолдайды. Жалпы алғанда, DVR–rPE + А формуласы өнімділіктің, тұрақтылықтың және тұрақтылықтың ең теңгерімді үйлесімін қамтамасыз етеді, бұл оны жоғары өнімді асфальт қолдану үшін перспективалы шешімге айналдырады. 

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. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Tire Industry Project (TIP). In Global ELT Management—A Global State of Knowledge on Regulation, Management Systems, Impacts of Recovery and Technologies; WBCSD: Geneva, Switzerland, 2019. Available online: https://docs.wbcSD.org/2019/12/Global_ELT_Management%E2%80%93A_global_state_of_knowledge_on_regulation_management_systems_impacts_of_recovery_and_technologies.pdf (accessed on 1 November 2025).
2. 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.
3. 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.
4. Rodríguez-Alloza, A.M.; Gallego, J. Mechanical performance of asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives. *Mater. Struct.* 2017, 50, 147.
5. Ma, Y.H.; Zhou, T.; Song, H.; Zhang, H. Investigation of the rheological properties and storage stability of waste polyethylene/ethylene–vinyl acetate-modified asphalt with crosslinking and a silicone coupling agent. *Materials* 2023, 16, 3289. <https://doi.org/10.3390/ma16093289>.
6. Jihyeon, Y.; Shyaamkrishnan, V.; Hyunhwan, K.; Moon-Sup, L.; Soon-Jae, L. Laboratory evaluation of storage stability for asphalt binder modified with crumb rubber and styrene–isoprene–styrene depending on evaluation factors and blending condition. *Materials* 2024, 17, 2091. <https://doi.org/10.3390/ma17092091>.

7. Zhou, S.; Shi, B.; Kong, L.; Mao, C.; Yan, C.; Ai, C.F. Rheological and adhesive improvements of terminal blend rubberized asphalt via fumed silica nanoparticle modification. *Constr. Build. Mater.* 2024, 449, 138543.
8. 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>.
9. Akpolat, M.; Kök, B.V.; Aydoğmuş, E. Research on the rheological properties of asphalt binder modified by fume silica and crumb rubber compound. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2022, 66, 502–515. <https://doi.org/10.3311/PPci.19139>.
10. EN 1426:2015; Bitumen and Bituminous Binders Determination of Needle Penetration. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
11. EN 1427:2015; Bitumen and Bituminous Binders Determination of The Softening Point Ring and Ball Method. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
12. EN 13589:2003; Bitumen and Bituminous Binders—Determination of The Tensile Properties of Modified Bitumen by the Force Ductility Method. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2003.
13. EN 13398:2003; Bitumen and Bituminous Binders Determination of the Elastic Recovery of Modified Bitumen. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017.
14. EN 13399:2017; Bitumen and Bituminous Binders Determination of Storage Stability of Modified Bitumen. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017.
15. 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>.