

Determination of the chemical composition of liquid products of thermocatalytic cracking of hydrocarbon mixtures

Zh.Kh. Tashmukhambetova,
E.A. Aubakirov, B.Zh. Kenzheev,
F.N. Bolatbek, K. Amantaiuly, K. Toshtay*

Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan
*E-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

This study presents the results of a comprehensive experimental investigation of the co-pyrolysis processes of carbon-containing wastes of various origins, including coal dust from the Kulan deposit, plastic waste based on polyethylene and polypropylene, gossypol resin isolated from soapstock generated during cottonseed oil production, and oil sludge from the "Petro Kazakhstan Oil Products" refinery (Shymkent). The experiments were carried out over a wide temperature range of 500–700 °C at atmospheric pressure in inert (N₂) and weakly acidic (CO₂) gas atmospheres. Fractional separation and identification of the components of the liquid pyrolysis products were performed using extraction methods. It was established that the nature of the gas medium and the process temperature exert a decisive influence on the yield and distribution of oil, resin, asphaltene fractions, and insoluble substances. It was shown that the thermocatalytic cracking of individual wastes and their mixtures (1:1:1) results in the formation of a liquid product dominated by oils and resins with a reduced asphaltene content. A pronounced synergistic effect of co-pyrolysis was identified, associated with the destruction of polyphenolic structures and fatty acids of gossypol resin, leading to hydrogen formation that contributes to the stabilization of active hydrocarbon radicals generated during the thermal decomposition of coal dust and polymer waste. This promotes the intensification of secondary synthesis reactions with the formation of olefins, aromatic hydrocarbons, and resinous compounds, as well as a redistribution of the fractional composition of liquid products toward an increased oil fraction at elevated temperatures. Gas chromatography–mass spectrometry analysis demonstrated that co-pyrolysis of the multicomponent mixture ensures the formation of hydrocarbon products with a uniform distribution across the main classes of compounds, confirming the potential of this approach for the integrated processing of heterogeneous carbon-containing wastes.

Keywords: pyrolysis; co-pyrolysis; thermocatalysis; waste; coal dust; plastics; gossypol resin; oil sludge.

Көмірсутек қоспаларының термokatалитикалық ыдырауы нәтижесінде түзілетін сұйық өнімдердің химиялық құрамын анықтау

Ж.Х. Ташмұхамбетова, Е.А. Аубакиров,
Б.Ж. Кенжеев, Ф.Н. Болатбек,
Қ. Амантайұлы, Қ. Тоштай*

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университеті, Алматы, Қазақстан
*E-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

Жұмыста әртүрлі текті көміртеқұрамды қалдықтардың, атап айтқанда Құлан кен орнының көмір шаңы, полиэтилен және полипропилен негізіндегі пластмасса қалдықтары, мақта майын өндірудің соапстогынан бөлінген госсиполды шайыр, сондай-ақ «Petro Kazakhstan Oil Products» (Шымкент қ.) мұнай өңдеу зауытының мұнайшламын бірге пиролиздеу процесіне кешенді эксперименттік зерттеу нәтижелері ұсынылған. Тәжірибелер 500-700 °C температура аралығында атмосфералық қысымда инертті (N₂) және әлсіз қышқылдық (CO₂) газдық ортада жүргізілді. Экстракциялық әдістерді қолдану арқылы пиролиздің сұйық өнімдері фракциялық бөлініп, олардың компоненттері сәйкестендірілді. Газдық ортаның табиғаты мен процесс температурасы майлы, шайырлы, асфальтенді фракциялар мен ерімейтін заттардың шығымы мен арақатынасына шешуші әсер ететіні анықталды. Жеке қалдықтар мен олардың қоспаларын (1:1:1) бірге термokatалитикалық ыдырату кезінде асфальтендердің төмен мөлшерінде майлар мен шайырлар басым болатын сұйық өнім түзілетіні көрсетілді. Сопиролиздің айқын синергетикалық әсері анықталды, ол госсиполды шайырдың полифенолды құрылымдары мен май қышқылдарының деструкциясы нәтижесінде сутегінің түзілуімен байланысты, бұл өз кезегінде көмір шаңы мен полимерлік қалдықтардың термиялық ыдырауы кезінде түзілетін белсенді көмірсутек радикалдарын тұрақтандыруға ықпал етеді. Нәтижесінде олефиндер, ароматты көмірсутектер және шайырлы қосылыстар түзілуімен жүретін екіншілік синтез реакциялары жылдамдап, температура жоғарылаған сайын сұйық өнімдердің фракциялық құрамы майлардың үлесі арту жағына қарай қайта бөлінеді. Хромато-масс-спектрометриялық талдау көпкомпонентті қоспаны сопиролиздеу кезінде негізгі қосылыстар кластары бойынша біркелкі таралған көмірсутекті өнімдердің түзілетінін көрсетті, бұл әртүрлі көміртеқұрамды қалдықтарды кешенді қайта өңдеудің аталған тәсілінің перспективасы екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: пиролиз; сопиролиз; термokatализ; қалдықтар; көмір шаңы; пластмассалар; госсиполды шайыр; мұнай шламы.

Установление химического состава жидких продуктов термokatалитического расщепления углеводородных смесей

Ж.Х. Ташмұхамбетова, Е.А. Аубакиров,
Б.Ж. Кенжеев, Ф.Н. Болатбек,
Қ. Амантайұлы, Қ. Тоштай*

Казахский национальный университет
имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
*E-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

В работе представлены результаты комплексного экспериментального исследования процессов совместного пиролиза углеродсодержащих отходов различного происхождения, включая угольную пыль месторождения Құлан, отходы пластмасс на основе полиэтилена и полипропилена, госсиполовую смолу, выделенную из соапстока производства хлопкового масла, а также нефтешлам нефтеперерабатывающего завода «Petro Kazakhstan Oil Products» (г. Шымкент). Эксперименты проведены в широком температурном интервале 500-700 °C при атмосферном давлении в инертной (N₂) и слабokислотной (CO₂) газовых средах. С использованием экстракционных методов выполнены фракционное разделение и идентификация компонентов жидких продуктов пиролиза. Установлено, что природа газовой среды и температура процесса оказывают определяющее влияние на выход и соотношение масляной, смолистой, асфальтеновой фракций и нерастворимых веществ. Показано, что при совместном термokatалитическом расщеплении индивидуальных отходов и их смесей (1:1:1) формируется жидкий продукт с преобладанием масел и смол при пониженном содержании асфальтенов. Выявлен выраженный синергетический эффект сопиролиза, связанный с деструкцией полифенольных структур и жирных кислот госсиполовой смолы с образованием водорода, способствующего стабилизации активных углеводородных радикалов, возникающих при термическом разложении угольной пыли и полимерных отходов. Это приводит к интенсификации реакций вторичного синтеза с образованием олефинов, ароматических углеводородов и смолистых соединений, а также к перераспределению фракционного состава жидких продуктов в сторону увеличения доли масел при повышении температуры. Хроматомасс-спектрометрический анализ показал, что сопиролиз многокомпонентной смеси обеспечивает формирование углеводородных продуктов с равномерным распределением по основным классам соединений, что подтверждает перспективность данного подхода для комплексной переработки разнородных углеродсодержащих отходов.

Ключевые слова: пиролиз; сопиролиз; термokatализ; отходы; угольная пыль; пластмасса; госсиполовая смола; нефтешлам.



Мақала (Article)

Көмірсутек қоспаларының терموкаталитикалық ыдырауы нәтижесінде түзілетін сұйық өнімдердің химиялық құрамын анықтау

Ж.Х. Ташмухамбетова , Е.А. Аубакиров , Б.Ж. Кенжеев , Ф.Н. Болатбек ,
Қ. Амантайұлы , Қ. Тоштай* 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы 71, 050040 Алматы, Қазақстан
*E-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

1. Кіріспе

Көміртекқұрамды қалдықтарды термохимиялық әдістермен қайта өңдеу қазіргі таңда экологиялық және ресурстық тиімді технологияларды дамыту тұрғысынан өзекті бағыттардың бірі болып табылады. Әсіресе көмір шаңы, полимер қалдықтары, өсімдік майы өндірісінің соапстоктары және мұнай шламдары сияқты әртекті қалдық ағындарын бірге өңдеу, қалдықсыз технологиялар құруға және энергетикалық әрі химиялық құнды өнімдер алуға мүмкіндік береді.

Әдеби деректерге сәйкес, көмірдің термиялық деструкциясы кезінде алынатын өнімдердің шығымы мен құрамы шикізаттың генетикалық ерекшеліктері мен технологиялық параметрлерге айтарлықтай тәуелді [1]. Төмен температуралы пиролиз инертті ортада жартылай кокстың шығымын арттырса, қалпына келтіруші ортада шайыр түзілуі басым, ал тотығу жағдайында газ тәрізді өнімдердің үлесі ұлғаяды. Көмір шаңының пиролизі бөлшектердің жоғары дисперстілігі мен минералдық компоненттердің едәуір мөлшеріне байланысты ерекшеліктермен сипатталады. Минералдық фаза терموкаталитикалық белсенділік танытып, газ және сұйық өнімдердің құрамына әсер етеді, ал шайырлардың максималды шығымы шамамен 700°C температурада байқалады [2].

Көмірді биомассамен немесе өзге органикалық компоненттермен бірге пиролиз процесін жылдамдатудың перспективалы бағыты ретінде қарастырылады. Бірқатар зерттеулерде синергетикалық әсерлердің байқалатыны, атап айтқанда, термиялық ыдырау кинетикасының өзгеруі

мен ұшқыш өнімдердің қайта бөлінуі көрсетілген [3–5]. Каталитикалық пиролиз әдістері, соның ішінде цеолиттер мен металл оксидтерін (Mo-MFI, ZSM-5, CaO, MgO) қолдану ауыр көмірсутектердің крекингілеу процесін күшейтіп, оттеққұрамды қосылыстардың мөлшерін азайтып, жеңіл ароматты көмірсутектердің түзілуін арттырады [6]. Сонымен қатар кокстың минералдық бөлігі өзіндік катализатор рөлін атқарып, өздігінен катализ эффектісін қамтамасыз ете алатыны көрсетілген [7].

Мақта майын өндіру кезінде түзілетін соапсток пен госсиполқұрамды шайырлардың утилизациясы күрделі, бірақ олар жоғары энергетикалық құндылыққа ие қалдықтар. Осыған байланысты оларды пиролиз, сопирилиз және термокаталитикалық әдістермен қайта өңдеуге қызығушылық артуда. Зерттеулер соапстокты көмір шаңы және полимер қалдықтарымен бірге пиролиздеу кезінде айқын синергетикалық әсер байқалатынын, бұл сұйық және газ өнімдерінің шығымын арттыратынын көрсетті [8]. Микротолқынды пиролиз жоғары ыдырау жылдамдығын және биомайдың жоғары шығымын қамтамасыз етіп, алынған өнімдердің отындық қасиеттерін жақсартады [9,10].

Соапстокты лигнин, көмір шаңы және полимер қалдықтарымен бірге өңдеу кезінде сутек тасымалы мен радикалдық өзара әрекеттесулер есебінен кокстүзілу азайып, ароматты көмірсутектердің үлесі артады [11–13]. Полимер қалдықтарының пиролизі термогравиметриялық әдістермен жан-жақты зерттеліп, олардың ыдырау механизмдері мен кинетикалық параметрлері анықталған, бұл аралас шикізатты қайта өңдеу процестерін оңтайландыруға мүмкіндік береді [14–19]. Көмір мен

Received 12 Feb 2026; Received in revised form 23 Mar 2026; Accepted 24 Mar 2026; Available online 30 Mar 2026.

© 2026 The Authors

This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

полимерлердің сополиролизі кезінде сутек донорлық әсер көрсетіп және ароматизация процестері күшейіп, төменмолекулалы көмірсутектердің шығымы артады [20].

Пиролиз мұнайшламдарын қайта өңдеудің негізгі термиялық әдісі болып табылады және отындық сұйық көмірсутектер мен синтез-газ алуға мүмкіндік береді [21]. Катализаторларды қолдану өнімдердің сапасын жақсартып, қатты қалдықтардың түзілуін азайтады [22]. Қазақстан мұнайшламдарын зерттеу нәтижелері пиролиздің тиімділігін және катализделген схемаларды әрі қарай дамытудың маңыздылығын көрсетеді [23,24]. Қазіргі шолу жұмыстарында шикізаттың химиялық және минералдық құрамын ескере отырып, аралас қалдықтарды термokatалитикалық пиролиздеу арқылы ресурс тиімділігін арттырудың перспективалары атап өтіледі [25–27]. Алайда мұнай шламын көмір шаңы, полимер қалдықтары және госсиполды шайыр сияқты әртекті көміртеқұрамды материалдармен бірлесіп термokatалитикалық өңдеуге арналған кешенді зерттеулер жеткіліксіз. Осы жұмыста температура мен газ ортасының әсерін ескере отырып, көмір шаңы, полимер қалдықтары, госсиполды шайыр және мұнай шламын бірлесіп термokatалитикалық ыдырату нәтижесінде түзілетін сұйық және шайыртөкес өнімдердің көмірсутектік құрамын анықтау, сондай-ақ сополироз кезінде байқалатын синергетикалық әсерлердің заңдылықтарын айқындау.

2. Тәжірибелік бөлім

2.1 Пиролиз эксперименттері

Пиролиз эксперименттері жоғары температураға төзімді реакторда жүргізілді, реактор автоматтандырылған пиролиз пешімен жабдықталған. Шикізат реактордың изотермиялық аймағына орналастырылған тұрақты тот баспайтын болат реакторға салынды. Әр үлгінің массасы 14,0-14,5 г аралығында болды, реактордың өлшемдері: ұзындығы 19,5 см, ені 1,7 см. Эксперимент басталғанға дейін жүйенің герметикалық екендігі тексерілді. Пиролиз N_2 немесе CO_2 ағынында жүзеге асырылды, газ реометриялық түтік арқылы 8 мл/мин жылдамдықпен берілді. Реактор бақылаулы қыздыру жылдамдығымен қажетті температураға жеткізіліп, тәжірибе бойы тұрақты атмосферада ұсталды.

Негізгі пиролиз өнімдері: сұйық конденсат, конденсацияланбайтын газдар және қатты қалдық. Сұйық өнімдер қайта ағымды конденсатор мен мұзбен салқындатылатын қабылдағышта жинақталды. Қосымша конденсация үшін мұз немесе сұйық азотпен салқындатылатын сериялы ыдыстар қолданылды. Эксперименттік қондырғының схемасы алдыңғы жарияланымдарда көрсетілген [2]. Барлық эксперименттер кемінде **үш қайталау**мен жүргізіліп, ораша мәні алынды.

2.2 Сұйық өнімдердің фракциялау және топтық құрамын талдау

Сұйық пиролиз өнімдерінің компоненттік құрамы еріткішпен экстракциялау және фракциялау әдістерімен анықталды. Алдымен асфальтендердің мөлшері стандартты «суық» Голде әдісімен анықталды. Кейінгі фракциясы Сокслет экстракторы арқылы активтелген силикагелде адсорбцияланғаннан кейін талданды.

Келесі қадамда көмірсутек (май) және шайыр фракцияларын бөлу үшін ретті экстракция жүргізілді: май фракциясы *n*-гексанмен алынып, шайыр фракциясы этанол-бензол қоспасы (1:1) арқылы бөлінді. Әр фракцияның концентрациясы еріткіш буланғаннан кейін гравиметриялық әдіспен анықталды.

2.3 Газ хроматографиялық-масс спектрометрия (GC–MS) талдауы

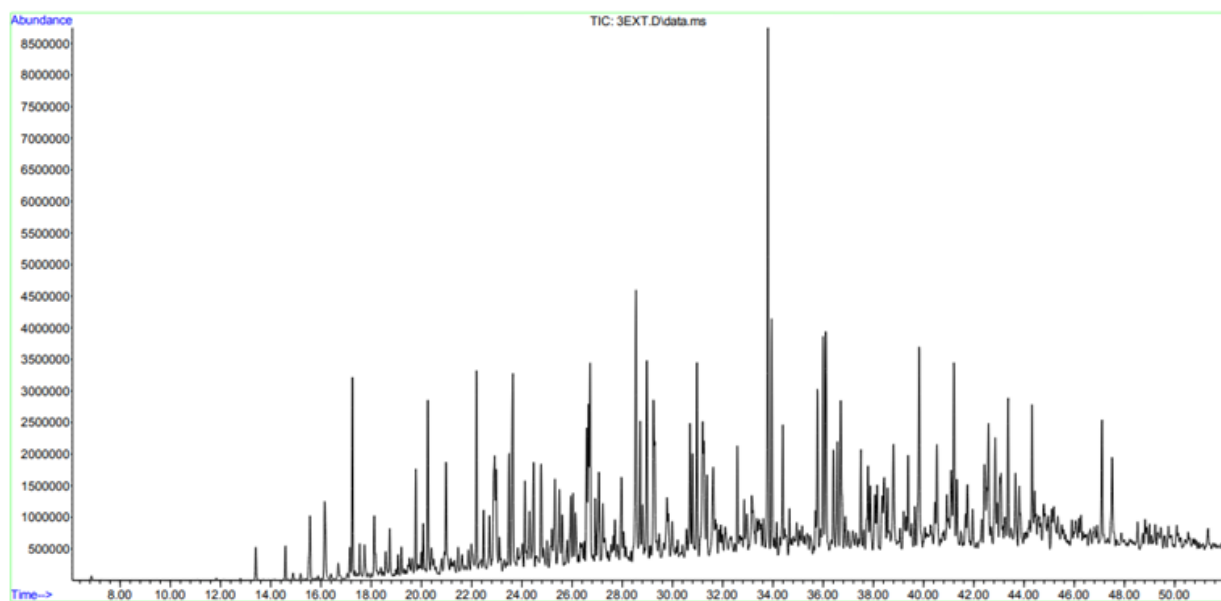
Көмір шаңы пиролизінен алынған май фракцияларының көмірсутек құрамын газ хроматографиялық-масс спектрометрия (GC-MS) әдісімен талданды. Талдау үшін Agilent 7890A газ хроматографы 5975C масс-селективті детекторы бар құрылғыда қолданылды.

3. Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

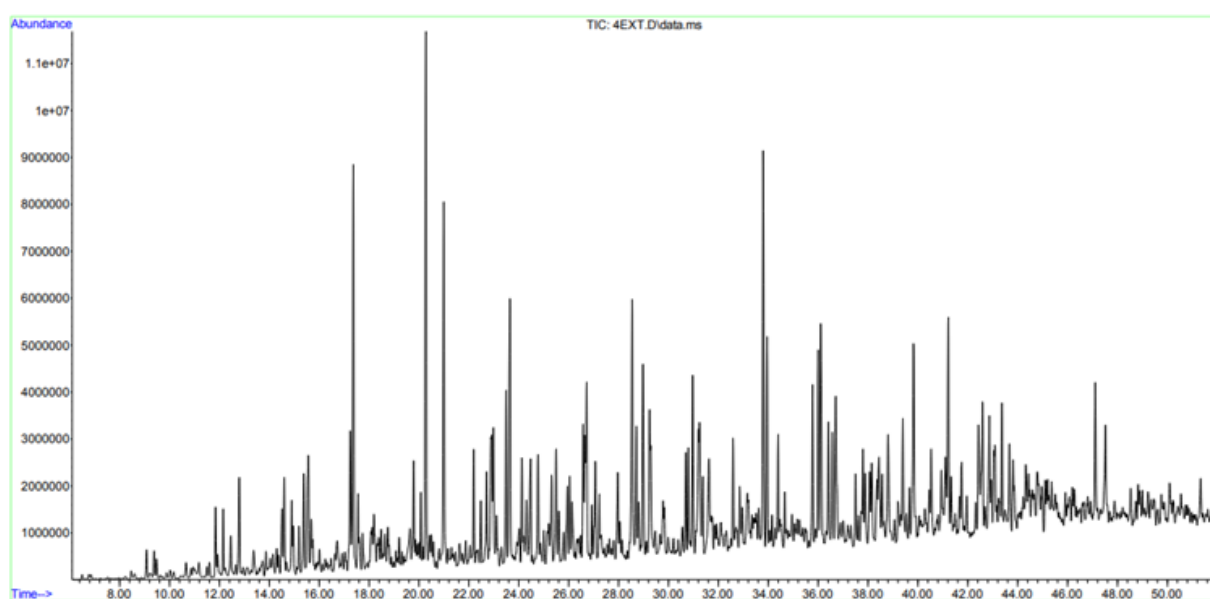
Тұрмыстық, органикалық және өнеркәсіптік қатты қалдықтарды (көмір шаңы, шайырлар, пластмасса қалдықтары және мұнайшламдар) бірлесіп қайта өңдеу тиімділік пен бастапқы шикізат қасиеттеріне барынша жақын жағдайларды анықтауды талап етеді. Осы тұрғыда, көмір шаңының (диаметрі = 90 мкм) пиролизінен алынған сұйық өнімдердің май фракцияларының құрамын 700 °C температурада N_2 , $CO_2:N_2$ (1:1) және таза CO_2 атмосферасында газ хроматографиялық-масс спектрометрия (GC-MS) әдісімен зерттедік (1-3-суреттер).

GC-MS талдауы көрсеткендей, әртүрлі газдық ортада пиролизделген көмір шаңының май фракцияларында парафиндер, конденсацияланған және конденсацияланбаған 2 және 3 сақинасы бар циклопарафиндер, бензол, нафтобензол, тринафтобензол, нафталиндер, ацетонафталиндер, флуорендер және фенантрендер бар, бұл көмір массаларының типтік құрамдық ерекшелігі болып табылады (1-3-суреттер, 1-кесте).

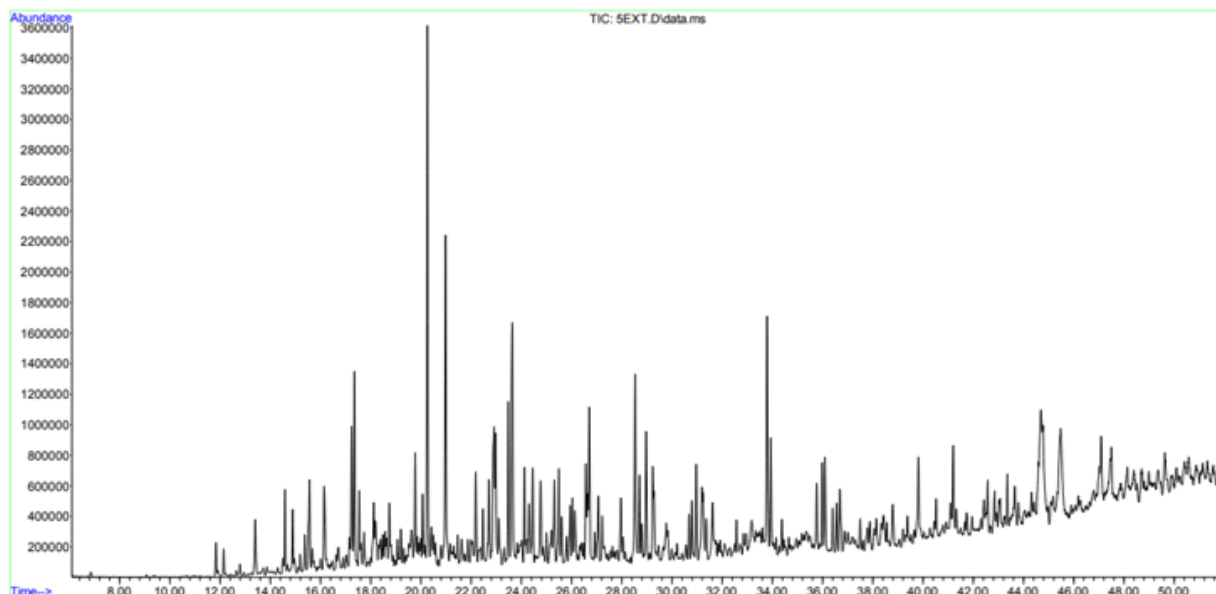
1-кестеде 700 °C температурада диаметрі 90 мкм көміршаңының N_2 , $CO_2:N_2$ (1:1) және CO_2 атмосфераларында пиролизі кезінде түзілген май фракцияларының көмірсутектік құрамы салыстырмалы түрде көрсетілген. Нәтижелерге сәйкес, барлық атмосфераларда парафиндердің мөлшері шамалас (12,15–12,92%), яғни газ ортасының өзгеруі алифатты көмірсутектердің түзілуіне айтарлықтай әсер етпейді. Конденсацияланбаған және екі сақиналы циклопарафиндер де салыстырмалы түрде тұрақты деңгейде сақталады, алайда $CO_2:N_2$ қоспасында екі сақиналы құрылымдардың үлесі біршама артқаны байқалады (4,99%).



1-сурет – Ұнтақталған көмір шаңының ($d = 90$ мкм) 700 °C температурада, N_2 атмосферасындағы пиролиз нәтижесінде алынған, шайырдан бөлінген майлы фракцияның хроматограммасы



2-сурет – Ұнтақталған көмір шаңының ($d = 90$ мкм) $T = 700$ температурада, $CO_2:N_2$ (1:1) атмосферадағы пиролиз нәтижесінде алынған, шайырдан бөлінген майлы фракцияның хроматограммасы



3-сурет – ұнтақталған көмір шаңының ($d = 90$ мкм) 700 °C температурада, CO_2 атмосферасындағы пиролиз нәтижесінде алынған, шайырдан бөлінген майлы фракцияның хроматограммасы

1-кесте – 700 °C температурада алынған, диаметрі 90 мкм көмір шаңының N_2 , CO_2 және $\text{CO}_2:\text{N}_2$ (1:1) атмосфераларындағы пиролиз нәтижесінде түзілген майлы фракциялардың көмірсутек құрамы

Майлардың көмірсутектік құрамы	N_2	$\text{CO}_2:\text{N}_2$	CO_2
Парафиндер	12,92	12,36	12,15
Конденсацияланбаған циклопарафиндер	9,38	9,05	8,82
Екі сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер	3,95	4,99	4,01
Үш сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер және барлық циклопарафиндер	15,14	13,75	12,36
Бензол	10,68	10,68	8,45
Нафтенбензол	9,18	10,33	9,32
Динафтенбензол	6,53	7,87	9,5
Нафталиндер	10,35	10,86	14,06
Аценафтендер	8,72	7,56	11,48
Флуорендер	5,62	5,74	5,22
Фенантрендер	7,55	6,79	4,64

Үш сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер мен жалпы циклопарафиндер мөлшері N_2 ортасында ең жоғары (15,14%), ал CO_2 қатысында төмендеу тенденциясы байқалады, бұл көмірқышқыл газының ароматтану және құрылымдық қайта түзілу процестеріне ықпал ететінін көрсетеді. Ароматты көмірсутектердің ішінде бензол мөлшері N_2 және $\text{CO}_2:\text{N}_2$ орталарында бірдей (10,68%), бірақ таза CO_2 атмосферасында азаяды (8,45%). Керісінше, нафталиндер мен аценафтендер CO_2 ортасында едәуір артып (тиісінше 14,06% және 11,48%), полициклді ароматты көмірсутектердің түзілуі күшейетінін дәлелдейді.

Жалпы алғанда, инертті N_2 атмосферасында алифатты және циклоалкандық құрылымдар басым болса, CO_2 қатысында ароматтану және көпсақиналы ароматты көмірсутектердің түзілу үрдісі күшейеді, ал $\text{CO}_2:\text{N}_2$ қоспасы аралық сипат көрсетеді. Бұл газ ортасының пиролиз өнімдерінің молекулалық құрылымына елеулі әсер ететінін айқын дәлелдейді.

Диаметрі 90 мкм дисперсті көмір шаңының N_2 атмосферасында, 700 °C температурада пиролизденген сұйық өнімін талдау негізінде оның компоненттік құрамы анықталды (2-кесте).

2-кесте – диаметрі 90 мкм дисперсті көмір шаңының 700°C температурада, N₂ атмосферасындағы пиролизінәтижесінде алынған сұйық өнімнің компоненттік құрамы

Бастапқы көмір шаңының дисперстілігі, мкм	Пиролиз сұйық өнімдерінің компоненттік құрамы, масс. %		
	Асфальтендер	Майлы фракциялар	Шайырлар
90	3,33	5,75	90,92

Алынған нәтижелер пиролиз сұйық өнімдерінің құрамында шайырлардың айқын басым екенін көрсетеді, олардың үлесі 90,92 % жетеді, ал майлы және асфальтенді фракциялардың үлестері сәйкесінше 5,75 % және 3,33 % құрайды. Бұған дейін жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, көмір шаңы бөлшектерінің өлшемі азайған сайын сұйық өнімнің майлы компоненттерінің шығымы артып, ал асфальтендердің мөлшері төмендейді. Бұл құбылыс бөлшектердің біркелкі қыздырылуымен және жылу-материалдық тасымалдың қарқынды болуымен байланысты, нәтижесінде көмірдің органикалық матрицасы тереңірек ыдырап, екінші реттік поликонденсация реакциялары бәсеңдейді. Сонымен қатар, бөлшектердің шағын өлшемі олардың беткі ауданын арттырып, жылу тасымалын жақсартады, бұл термиялық деструкция процестерін күшейтіп, сұйық компоненттердің шығымын жоғарылатуға ықпал етеді [27].

Шайыр фазасының басым түзілуі көмір шаңының термиялық өңдеу кезінде конденсация және кокс түзілу процестеріне жоғары бейімділігін көрсетеді. Пиролизді инертті газ ортасында жүргізу, сонымен қатар оны жылу тасымалдаушы ретінде қолдану, бөлшектер мен газ фазасының тікелей байланысын қамтамасыз етеді, бұл жергілікті қызып кетулерді азайтып, екінші реттік кокс түзілу реакцияларының қарқынын бәсеңдетеді және нәтижесінде сұйық өнімдердің шығымын арттырады.

Жоғары температура (700 °C) жоғары молекулалық ароматикалық құрылымдардың термиялық ыдырауын белсенді түрде бастайды, нәтижесінде молекулалық массасы төмен қосылыстар түзіледі, олар негізінен майлы және шайырлы фракциялардың құрамына кіреді. Сонымен қатар, көмір шаңының минералдық компоненттері жоғары табиғи жылу сыйымдылығы арқасында процестің жылу режимін тұрақтандыруға ықпал етеді, бұл пиролиздің термодинамикалық жағдайларын жақсартады.

Аталған факторларды ескере отырып, көмір шаңының пиролиз процесін термокаталитикалық крекингтің бір түрі ретінде қарастыруға болады. Бұл жағдайда органикалық заттар қыздыру кезінде ыдырап, сұйық және газ фазаларына бөлінеді, ал минералдық компонент табиғи каталитикалық агент ретінде әрекет етіп, түрленулердің бағыты мен тереңдігіне әсер етеді.

Дисперсті көмір шаңының (d=90 мкм) пиролизінде инертті газ ортасының табиғатының сұйық өнімдердің компоненттік құрамына және олардың шығымына әсері зерттелді. Алдыңғы зерттеулер көрсеткендей, осы дисперстілік деңгейінде сұйық өнімнің максималды шығымы шамамен 15 %-ға дейін жететіні анықталған, бұл бөлшектердің біркелкі қыздыруы мен жылу тасымалдарының тиімділігіне байланысты. Пиролиз процесі 700 °C температурада жүргізіліп, N₂, CO₂ және CO₂:N₂ (1:1) газ қоспалары атмосферасы қолданылды. Мұндай эксперименттік дизайн инертті ортаның табиғаты сұйық өнімдердің құрамына, әсіресе майлы, шайырлы және асфальтенді фракциялардың арақатынасына қалай әсер ететінін анықтауға мүмкіндік берді (3-кесте).

Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, CO₂ атмосферасында көмір шаңының пиролизі кезінде асфальтендердің шығымы N₂ атмосферасымен салыстырғанда шамамен 2,1 есе жоғары болып, аралас газ ортасы CO₂:N₂ (1:1) қолданылған кезде бұл көрсеткіш 1,2 есе артады. Бұл феномен шайырлы заттардың асфальтендердің негізгі прекурсорлары екендігімен байланысты. Аралас газ ортасы пиролиздің зерттелген температуралық режимінде кокс түзілу процестерін баяулатып, шайырлы заттардың біртіндеп ыдырауына және асфальтендерге айналу қарқынының төмендеуіне әсер етеді. Сонымен қатар, газ ортасының құрамындағы CO₂ мөлшерінің жоғары болуы жергілікті қызып кетулерді төмендетіп, термиялық деструкция мен конденсация

3-кесте –дисперсті көмір шаңының (90 мкм) 700°C температурада, N₂, CO₂ және CO₂:N₂ (1:1) атмосфераларында алынған пиролиз сұйық өнімдерінің компоненттік құрамы

Газ ортасы	Пиролиз сұйық өнімдерінің компоненттік құрамы, масс. %		
	Асфальтендер	Майлы фракциялар	Шайырлар
N ₂	3,33	5,75	90,92
CO ₂	7,25	5,07	87,68
CO ₂ :N ₂ - (1:1)	8,90	7,87	83,23

реакцияларының теңгерімін өзгертеді. Нәтижесінде, аралас газ ортасы пиролиз сұйық өнімдерінің құрамын өзгертеді. Майлы және шайырлы фракциялар тұрақтылығын сақтап, асфальтендердің шығымын белгілі бір деңгейде шектейді. Бұл қорытындылар көмір шаңының термиялық өңдеу процестерінде газ ортасының табиғатының маңызды рөл атқаратынын және сұйық өнімдердің құрамын басқарудағы потенциалын көрсетеді.

Дисперсті көмір шаңының (90 мкм) пиролизі, госсипол шайырының пиролизі және көмір шаңы-госсипол шайырының (1:1) сопирилизі N_2 атмосферасында әртүрлі температураларда жүргізіліп, олардың сұйық өнімдерінің компоненттік құрамы 4-кестеде көрсетілді.

4-кестеде көрсетілгендей, N_2 атмосферасында дисперсті көмір шаңының (90 мкм), госсипол шайырының және олардың 1:1 қатынасындағы қоспасының пиролизі кезінде сұйық өнімдердің құрамындағы фракциялық құрылым айқын көрінеді. Көмір шаңының пиролизі кезінде сұйық өнімнің басты компоненті шайырлы фракция болып, оның үлесі 90,92%-ға жетеді, ал майлы және асфальтенді фракциялардың үлестері тиісінше 5,75% және 3,33% деңгейінде қалыптасады. Бұл көрсеткіштер көмір шаңының термиялық өңделуі кезінде негізгі органикалық құрамның сұйық шайырлы фракцияға айналатынын және майлы және асфальтенді компоненттердің салыстырмалы түрде аз екенін айқын көрсетеді.

Ал госсипол шайырының пиролизі кезінде асфальтендер түзілмей, оның орнына ерігіш емес қатты қалдықтар пайда болады, бұл процестің органикалық компоненттердің термиялық ыдырауының ерекше ерекшелігін көрсетеді. Сонымен қатар, госсипол шайырының пиролизінде майлы фракция 24,6-30,0% аралығында, ал шайырлы фракция 60,9-73,3% шамасында болады, бұл шайырлы компоненттің барлық жағдайларда негізгі рөл атқаратынын растайды.

Көмір шаңы мен госсипол шайырының 1:1 қатынасындағы қоспасын пиролиздеу нәтижесінде, $T = 500^\circ C$ температурада сұйық өнім құрамында жоғары шайырлы фракция (72,5%) және майлы фракция (25%) байқалады, ал асфальтендер түзілмейді, ерігіш емес қатты қалдықтар тек 2,5% деңгейінде қалыптасады. Бұл деректер көрсеткендей, қоспалық пиролиз кезінде компоненттердің

өзара әрекеттесуі сұйық өнімнің құрамын тұрақтандыруға және асфальтендердің түзілуін шектеуге ықпал етеді, нәтижесінде майлы және шайырлы фракциялар арасындағы балансты сақтауға мүмкіндік туады.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері N_2 атмосферасында жүргізілген пиролиз процесінде шайырлы фракцияның барлық жағдайларда басты компонент болып қалатынын, майлы және асфальтенді фракциялардың салыстырмалы түрде төмен болатынын және қоспалық пиролиз кезінде компоненттердің өзара әрекеттесуі сұйық өнімнің сапасын жақсартуға және термиялық өңдеу кезінде асфальтендердің түзілуін тиімді бақылауға мүмкіндік беретінін айқын көрсетеді.

Көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтарының қоспасын N_2 атмосферасында пиролиздеу жүргізіліп, алынған сұйық өнімнің компоненттік құрамы анықталды. Әр компоненттің пиролиз процесіне әсерін бағалау үшін зерттеу 1:1:1 қатынасындағы қоспа бойынша әртүрлі температураларда өткізілді. 5-кестеде көрсетілгендей, кестеде пиролиз нәтижесінде алынған сұйық өнімдердің негізгі фракциялары -майлы, шайырлы және асфальтенді компоненттердің үлестері талданып, олардың температураға байланысты өзгерістері көрсетілген.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, температураның көтерілуі майлы фракциялардың түзілуін айқын арттырады. Пиролиз процесінде асфальтенді заттар түзілмей, олардың орнына органикалық еріткіштерде ерімейтін жартылай

5-кесте – N_2 атмосферасында 1:1:1 қатынасындағы көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар қоспасын пиролиздеу нәтижесінде алынған сұйық өнімдердің компоненттік құрамы

Температура, °C	Сұйық өнімнің компоненттік құрамы, масс. %		
	ерімейтін заттар	майлы фракциялар	шайырлар
500	9,4	34,7	55,9
600	15,1	31,7	53,2
700	12,2	64,0	23,8

4-кесте – N_2 атмосферасында әртүрлі температураларда, дисперсті көмір шаңы (90 мкм), госсипол шайыры және көмір шаңы-госсипол шайыры (1:1) сопирилизінен алынған сұйық өнімдердің компоненттік құрамы

Шикізат	Температура, °C	Сұйық өнімнің компоненттік құрамы, масс. %			
		ерімейтін заттар	асфальтендер	майлы фракциялар	шайырлар
Көмір шаңы	700	-	3,33	5,75	90,92
Госсиполды шайыр	500	2,1	-	24,6	73,3
Госсиполды шайыр	550	9,1	-	30,0	60,9
Көмір шаңы + госсиполды шайыр (1:1)	500	2,5	-	25,0	72,5

коксты заттар пайда болады. 500 және 600°C температурада алынған сұйық өнімдердің құрамдары бір-біріне жақын болып, пиролиздің температурасы 700°C-қа жеткенде сұйық өнімдердегі майлы фракцияның үлесі 64 масс. %-ға дейін өседі. Сонымен қатар, N₂ және CO₂ орталарында 1:1:1 қатынасындағы көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар қоспасының пиролизін салыстырғанда, өнімдердің шығымы арасындағы айырмашылық айтарлықтай маңызды емес екені анықталды. Бұл деректер пиролиз процесінде температура мен газдық орта әсерінің сұйық өнімдердің құрамына тигізетін әсерін бағалауға мүмкіндік береді. N₂ ортасында, 700°C температурада 1:1:1 қатынасындағы көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар қоспасының пиролизінен алынған шайырлы өнімнің хроматомасс-спектрометриялық талдау нәтижелері 6-кестеде берілген.

6-кесте – N₂ ортасында 700°C температурада, көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар (1:1:1 қатынасы) қоспасының термokatалитикалық өңдеу нәтижесінде алынған шайырлы өнімнің хроматомасс-спектрометриялық деректері

Қосылыстар	Идентификациялану ықтималдығы, %	Массалық үлесі, %
3-Метил-1 <i>H</i> -инден	88	26,62
1-Метилнафталин	82	11,28
Аценафтилен	70	3,73
Бензол	78	2,33
Фенантрен	70	14,84
2-Метилантрацен	75	8,86
Флуорантен	84	11,52

700°C температурада N₂ ортасында көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар қоспасының (1:1:1) термokatалитикалық өңделуі нәтижесінде шайырлы өнімде моноциклдық, бициклдық және көпядролы полициклдық ароматты көмірсутектер анықталды. Негізгі құрамды полициклдық ароматты көмірсутектер және олардың алкил туындылары – инден, нафталин, фенантрен және антрацен құрылымдары құрайды. Фенантреннің, флуорантеннің, 3-метил-1*H*-инданың және 2-метилантраценнің жоғары мөлшері ароматты фрагменттердің циклдену, дегидрлеу және поликонденсация реакцияларының белсенді жүріп жатқанын көрсетеді. Бұл өнімнің термодинамикалық тұрақты конденсацияланған ароматты қосылыстарға бай болуы әрі қарайғы термиялық өңдеуде шайырлы және коксты заттарға айналу мүмкіндігін айқындайды.

700°C температурада 1:1:1 қатынасындағы көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар қоспасын термokatалитикалық өңдеуде газдық орта (CO₂

7-кесте – 700°C-та көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар (1:1:1) қоспасының CO₂ және N₂ ортасында түзілген сұйық шайырлы өнімдер құрамы

Компоненттік құрамы	Мөлшері, %	
	CO ₂	N ₂
Парафиндер		
Конденсацияланбаған циклопарафиндер	36,65	17,21
2 сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер	21,18	13,26
3 сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер + барлық 3 сақиналы циклопарафиндер	10,14	7,82
Бензолдар	2,49	9,83
Нафтенбензолдар	4,23	8,22
Динафтенбензолдар	11,21	10,65
Нафталиндер	14,10	8,37
Аценафтендер	0	10,22
Флуорендер	0	4,94
Фенантрендер	0	3,79
Парафиндер	0	5,69

және N₂) сұйық шайырлы өнімдердің топтық құрамына әсері 7-кесте келтірілді.

700°C температурада CO₂ және N₂ орталарында 1:1:1 қатынасындағы көмір шаңы -госсипол шайыры мен пластмасса қалдықтар қоспасының термokatалитикалық өңделуі нәтижесінде алынған шайырлы өнімдердің хроматомасс-спектрометриялық талдауы газдық ортаның өнімдердің топтық құрамына елеулі әсер ететінін көрсетті. CO₂ ортасында парафиндік және нафтендік қосылыстар басым болып, термиялық крекинг реакцияларының негізгі процестер екенін білдіреді. Ал N₂ ортасында бициклдық және көпядролы полициклдық ароматты көмірсутектердің үлесі, оның ішінде нафталиндер, аценафтендер, флуорендер және фенантрендер айтарлықтай артып, дегидрлеу, циклдену және ароматты ядролардың конденсациялану процестерінің белсенді жүріп жатқанын көрсетеді.

CO₂ ортасы алифаттық және цикликалық құрылымдардың сақталуы орын алады, N₂ ортасында өнімдердің терең ароматтануы және тұрақты полициклдық қосылыстардың түзілуіне жағдай жасайды. Азот ортасында парафиндік көмірсутектердің шығымы шамамен 2 есе, ал конденсацияланбаған циклопарафиндердің шығымы 1,5 есе азаяды, ал бензол үлесі 2 есе артады. Жоғары температура жағдайында CO₂ көміртекпен немесе көмірсутек фрагменттерімен әрекеттесіп, C + CO₂ → 2CO реакциясын және құрғақ реформингке ұқсас процестерді инициирлей алады. Бұл реакциялар нәтижесінде CO және белсенді радикалдық бөлшектердің түзілуі күшейіп, олар алкил тізбектерінің дегидрленуін және қысқа көмірсутек фрагменттерінің циклденуін жеңілдетеді. Осындай аралық

радикалдық түрленулер нәтижесінде ароматты сақиналардың қалыптасуы және олардың біртіндеп конденсациялануы мүмкін.

Комплексті талдау нәтижелері (хроматомасс-спектрометрия, ИК-спектроскопия, рентгенфазалық талдау және экстракциялық бөлу әдістері) пиролиз өнімдерінің фазалық әрі фракциялық құрамын жан-жақты сипаттауға мүмкіндік берді. Пиролиз газдары негізінен C₁-C₅ көмірсутектерінен тұрады, олардың ішінде парафиндер, C₂-C₄ олефиндер және изо-пентан басым, бұл жүйеде көмірсутектердің терең термодеструкциясы жүретінін дәлелдейді. 700°C температурада көмір шаңы, госсипол шайыры және полимер қалдықтары қоспасын бірлесіп өңдеу барысында газ түзілуіне негізгі үлесті госсипол шайыры мен полимер қалдықтары қосатыны анықталды. Бұл олардың құрылымындағы C-C және C-H байланыстарының үзілуге жоғары бейімділігімен түсіндіріледі. Керісінше, көмір шаңының үлесі салыстырмалы түрде төмен болып, ол көбінесе жоғары молекулалық фрагменттердің конденсациясы мен ароматизациясы нәтижесінде жартылай кокс және кокс тәрізді қатты қалдықтардың түзілуімен сипатталады, бұл рентгенфазалық талдау мен инфрақызыл спектроскопия деректерімен толық сәйкес келеді [2].

Алынған нәтижелер көрсеткендей, температураны 600-700 °C-қа көтерудің крекинг, дегидрлеу және ароматизация процестерін күшейтіп, газ және сұйық өнімдердің максималды шығымын қамтамасыз етеді. Бұл зерттелген және оған ұқсас қатты тұрмыстық қалдықтарды бірлесіп пиролиздік өңдеуде аталған температуралық интервалды қолданудың тиімділігін растайды.

Зерттеу барысында пиролизге арналған перспективалық қатты қалдықтардың бірі ретінде мұнай шламы қарастырылды. Мұнай шламын және оны бензолмен алдын ала тазалаған нұсқасын 700 °C температурада N₂ атмосферасында пиролиздік өңдеуден өткізгенде сұйық өнімдердің компоненттік

құрамы айтарлықтай өзгеретіндігі байқалды. 8-кестеде осы тәжірибелердің нәтижелері, яғни мұнай шламындағы негізгі компоненттер мен олардың пайыздық үлестері, сондай-ақ бензолмен алдын ала тазалаудан кейінгі өзгерістер көрсетілген.

8-кестеден көрініп тұрғандай, мұнай шламын бензолмен тазалағаннан кейін органикалық еріткіштерде ерімейтін заттардың мөлшері шамамен 20 есе азайған. Бастапқы, тазаланбаған мұнай шламында асфальтенді компоненттер жоқ болса, бензолмен тазалағаннан кейін оның құрамында асфальтендер пайда болғаны байқалды. Бұл процесс тазалау кезінде химиялық және физикалық өзгерістермен, атап айтқанда, мұнай шламындағы органикалық фазаның бензол арқылы экстракциялануымен байланысты болуы мүмкін, онда бұрын минералды бөлшектер диспергірленген болатын. Нәтижесінде тұрақты органоинералдық ассоциациялар бұзылып, минералды қоспалар тұндырылып немесе кейіннен шығарылған.

Сонымен, мұнай шламында асфальтенді фракцияның пайда болуы жүйенің коллоидтық тұрақтылығының бұзылуына, шайырлы компоненттердің экстракциясына және жоғары молекулалық ароматты қосылыстардың конденсациясы мен агрегатталу реакцияларына байланысты. Мұнай шламында органикалық өнімдермен қатар балшық, металл оксидтері және бейорганикалық тұздар түрінде ерімейтін компоненттер бар, олар катализатор қызметін атқара алады, бұл пиролиз өнімдерінің құрамына және шығымына әсер етуі мүмкін. Аталған компоненттер жоғары молекулалық қосылыстардың крекингін, изомеризация, дегидрлеу, конденсация реакцияларын және кокс түзілуін ынталандыруы ықтимал. Барлық осы процестер пиролиз өнімдерінің құрамын өзгертіп, газ, сұйық және қатты қалдықтардың шығымын қайта бөлуге әкелуі мүмкін. 9-кестеде әртүрлі орталарда 700°C температурада бастапқы мұнай шламын пиролиздеу нәтижесінде алынған сұйық өнімдердің компоненттік құрамы көрсетілген.

8-кесте – Бастапқы және бензолмен алдын ала тазаланған мұнай шламдарының компоненттік құрамы

Үлгінің атауы	Компоненттік құрамы, масс. %			
	ерімейтін заттар	асфальтендер	майлы фракциялар	шайырлар
Мұнай шлам	38,05	–	15,28	46,67
Бензолмен тазаланған мұнай шлам	1,90	74,45	–	23,65

9-кесте – 700°C температурада N₂ және CO₂ орталарында бастапқы мұнай шламын пиролиздегенде алынған сұйық өнімдердің компоненттік құрамы

Процесс ортасы	Компоненттік құрамы, масс. %		
	ерімейтін заттар	майлы фракциялар	шайырлар
Инертті азот (N ₂)	11,34	73,92	14,74
Көмірқышқыл газы (CO ₂)	6,03	74,39	19,58

10-кесте – 700°C температурада N₂ ортасында көмір шаңы, госсипол шайыры, полимер қалдығы және бензолмен тазаланған мұнай шламы қоспасының пиролизі мен сопирилизінен алынған шайырлы өнімдердің хроматомасс-спектрометриялық салыстырмалы деректері

Компоненттік құрамы	Мөлшері, %			
	көмір шаңы	госсипол шайыры	мұнай шламы	қоспа
Қосылыстар / Шикізат				
Парафиндер	12,92	16,15	19,28	16,34
Конденсацияланбаған циклопарафиндер	9,38	11,49	15,18	13,17
2 сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер	3,95	6,43	15,2	8,77
3 сақиналы конденсацияланған циклопарафиндер + барлық 3 сақиналы циклопарафиндер	15,14	12,98	13,57	11,73
Бензолдар	10,68	13,80	8,59	9,10
Нафтенбензолдар	9,18	10,71	6,23	9,32
Динафтенбензолдар	6,53	8,57	3,97	6,83
Нафталиндер	10,35	7,73	7,29	9,59
Аценафтендер	8,72	4,86	3,63	5,55
Флуорендер	5,62	4,39	3,91	4,18
Фенантрендер	7,55	2,89	3,15	5,41

Көмірқышқыл газы (CO₂) ортасында пиролиз кезінде ерімейтін заттардың мөлшері азайып, сұйық өнімдердегі майлы фракцияның құрамы шамамен бірдей болып қалады. 700°C температурада N₂ ортасында көмір шаңыгоссипол шайырымұнай шламы-полимер қалдығы (1:1:1) қоспасының сопирилизін зерттеу тәжірибелері жүргізілді. Жеке қалдық компоненттерінің пиролизінен және қоспаның сопирилизінен алынған шайырлы өнімдердің компоненттік құрамы хроматомасс-спектрометриялық әдіспен талданып, оның нәтижелері 10-кестеде берілген.

Жекелеген компоненттер құрамындағы парафиндердің мөлшері көмір шаңы үшін 12,9%, госсипол шайыры үшін 16,2% және мұнай шламы үшін 19,3% деңгейінде анықталды. Осы мәндердің орташа көрсеткіші шамамен 16,13%-ды құрайды. Ал көмір шаңы–госсипол шайыры–мұнай шламы–полимер қалдығы қоспасында парафиндердің нақты мөлшері 16,34% болып анықталды. Бұл көрсеткіш жеке компоненттер бойынша есептелген теориялық орташа мәннен небәрі шамамен 0,21% ғана жоғары. Мұндай жақындық қоспадағы парафинді көмірсутектердің таралуы бастапқы шикізаттардың үлестік қатынасына сәйкес қалыптасатынын және олардың аддитивтік сипатқа жақын екенін көрсетеді. Сонымен қатар, тәжірибелік мәннің теориялық есептелген көрсеткіштен сәл жоғары болуы компоненттердің бірлескен термокаталитикалық түрленуі барысында әлсіз оң синергетикалық әсердің орын алуы мүмкін екенін де аңғартады.

Конденсацияланбаған және конденсацияланған циклопарафиндердің қоспадағы мөлшері де ұқсас заңдылықты көрсетеді. Екі және үш сақиналы циклдік көмірсутектердің үлесі жекелеген компоненттердегі ең

жоғары концентрациялардан төмен болғанымен, олардың ең төменгі мәндерінен едәуір жоғары деңгейде қалыптасады. Бұл көрсеткіштердің жеке компоненттердің диапазонының ортасына жақын орналасуы қоспадағы циклдік құрылымды көмірсутектердің қайта түзілу және өзара түрлену процестері нәтижесінде салыстырмалы түрде біркелкі таралатынын көрсетеді. Мұндай құбылыс аралас шикізаттарды бірге пиролиздеу кезінде молекулалық фрагменттердің өзара әрекеттесуінен туындайтын құрылымдық қайта бөлінулермен түсіндірілуі мүмкін.

Қоспадағы ароматты көмірсутектердің таралуы да белгілі бір өзгерістерге ұшырайды. Мысалы, бензолдар мен нафтенбензолдардың мөлшері тиісінше 9,1% және 9,32% болып анықталды. Бұл көрсеткіш госсипол шайырындағы ароматты қосылыстардың жоғары үлесімен (13,8%) салыстырғанда айтарлықтай төмен. Мұндай айырмашылық қоспаны сопирилиздеу кезінде ароматты құрылымдардың бір бөлігінің жеңіл көмірсутектерге немесе басқа құрылымдық топтарға қайта түрленуімен байланысты болуы мүмкін. Яғни бұл жағдайда ароматты қосылыстардың түзілуі жеке компоненттер бойынша күтілетін мәндермен салыстырғанда белгілі бір дәрежеде тежелетінін байқауға болады.

Ал динафтенбензолдар мен нафталиндердің мөлшері қоспада жекелеген компоненттер бойынша есептелген орташа деңгейге барынша жақын болып шықты. Бұл қоспаның жалпы көмірсутектік құрамының салыстырмалы түрде теңгерімді әрі тұрақты сипатта қалыптасатынын көрсетеді. Осылайша алынған нәтижелер аралас көміртекті қалдықтарды бірге пиролиздеу барысында көмірсутектердің таралуы негізінен аддитивтік сипатқа ие болғанымен, жекелеген фракциялар үшін әлсіз

синергетикалық байқалатынын дәлелдейді. Мұндай сандық талдау қоспадағы компоненттердің өзара әрекеттесу сипатын тереңірек түсіндіруге мүмкіндік береді.

Осылайша, көмір шаңыгоссипол шайырымұнай шламы-полимер қалдығы (1:1:1) қоспасының сопиролизі (1-сурет).барлық негізгі қосылыстар кластары бойынша орташа мәнге жақын әрі теңгерілген құрамдағы өнімдердің түзілуіне алып келеді. Бұл қоспада әртүрлі шикізаттардың бір мезгілде термиялық ыдырауы нәтижесінде түзілетін

аралық өнімдердің өзара әсерлесуімен және қайта таралуымен түсіндіріледі. Ал қоспа компоненттерін жеке-жеке пиролиздеу кезінде кейбір көмірсутек топтарының айқын басым болуы байқалады, мысалы, мұнай шламы пиролизі барысында парафиндер мен циклпарафиндердің жоғары мөлшерде түзіледі. Жалпы алғанда, сопиролиз процесі жекелеген қалдықтарды пиролиздеумен салыстырғанда шайыр құрамды өнімнің химиялық құрамының бірқалыптылығын және біртектілігін арттырып, тұрақты әрі үйлесімді құрамда түзілуін қамтамасыз етеді.



4-сурет – Көмір шаңыгоссипол шайырымұнай пиролизі және қоспалардың бірлескен пиролизі кезінде түзілген шайыр тәрізді өнімнің құрамы

4. Қорытынды

Алғаш рет көмір шаңы негізіндегі қалдықтардың, госсипол шайырының, пластмасса қалдықтарының және тазартылған мұнайшламның 500-700°C температура диапазонында, 1 атм қысымда, азот ортасында бірлескен пиролиз процесі зерттелді. Температураның артуымен қоспаның пиролизі кезінде сұйық өнімнің шығымы шамамен 1,5 есе төмендеп, газ өнімдерінің шығымы сәйкесінше артады, ал қатты қалдық мөлшері салыстырмалы түрде тұрақты болып қалады. Зерттеу нәтижелері әртүрлі шығу тегі бар көміртекті қалдықтардың бірлескен пиролизі айқын синергетикалық әсерлермен қатар жүретінін және сұйық өнімдердің шығымы мен

құрамына елеулі ықпал ететінін көрсетті. Газ ортаның табиғаты мен процесс температурасы майлы, шайырлы және асфальтенді фракциялардың арақатынасын анықтайды. Бірлескен пиролиз кезінде жекелеген компоненттердің пиролизімен салыстырғанда, асфальтендер мен ерімейтін заттардың мөлшері төмен, құрамы теңгерілген шайыр тәрізді сұйық өнім түзіледі.

Хроматомасс-спектрометриялық талдау қоспасының (1:1:1 қатынасы) пиролизі нәтижесінде көмірсутек өнімдерінің негізгі қосылыстар кластары бойынша, бірқалыпты таралуын қамтамасыз етілетінін көрсетті, бұл процесің жоғары тиімділігін және әртүрлі көміртекті қалдықтарды кешенді өңдеу үшін маңыздылығын дәлелдейді.

Алғыстар

Авторлар BR28713351 «Құрамында көміртегі бар қалдықтарды энергия ресурстарына және сұранысқа ие өнімдерге кешенді өңдеу үшін жоғары тиімді каталитикалық технологияны әзірлеу» жобасы аясында финанстық көмек көрсеткені үшін ҚР Ғылым және Жоғары Білім министрлігіне өз алғысын білдіреді.

CRedit жобасы бойынша авторлардың үлесі туралы мәлімдеме

Ж.Х. Ташмұхамбетова: жазу-бастапқы нұсқа, тұжырымдама жасау, жобаны басқару; Е.А. Аубакиров: зерттеу, әдіснама, тұжырымдама жасау, жобаны басқару; Б.Ж. Кенжеев: визуализация, зерттеу; Ф.Н. Болатбек: формальды талдау, визуализация, зерттеу; Қ. Амантайұлы: формальды талдау, визуализация, деректерді өңдеу; Қ. Тоштай: деректерді өңдеу, жазу-рецензиялау және редакциялау.

Мүдделер қақтығысы туралы мәлімдеме

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Әдебиеттер

- Romanova TA, Mikhailova ES, Ismagilov ZR (2017) Chemistry for Sustainable Development 25(6):544–551. <https://doi.org/10.15372/CSD20170602>
- Aubakirov Y, Tashmukhambetova Z, Imanbayev Y, Nurtazina N, Kenzheyev B, Toshtay K (2024) ES Mater Manuf 24:1123. <https://doi.org/10.30919/esmm1123>
- Li X, He L, Xu Z, Wang Z, Zhang S (2024) Process Saf Environ Prot 187:1010–1021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.037>
- Singh RK, Gu S, Baliarsingh N (2025) S Afr J Chem Eng 54:216–230. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.08.005>
- Yang Y, Wang Q, Li H (2023) Molecules 28(5):2313. <https://doi.org/10.3390/molecules28052313>
- Zhang Q, Zhang S, Liu J, Chen X, Li W (2023) RSC Advances 13:33852–33862. <https://doi.org/10.1039/D3RA06925G>
- Xie B, Zhang X, Gu S, Du Y, Wu J (2025) J Anal Appl Pyrolysis 193:107424. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107424>
- Tashmukhambetova Z, Aubakirov Y, Imanbayev Y, Nurtazina N, Kenzheyev B (2024) Chem J Kaz 3:157–166. <https://doi.org/10.51580/2024-3.2710-1185.41>
- Wang YP, Zhang SM, Wu QH, Duan DL, Liu YH, et al (2019) International Int J Agric Eng 12(6):202–208. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191206.4599>
- Wang Y, Dai L, Wang R, Fan L, Liu Y, et al (2016) J Anal Appl Pyrolysis 119:251–258. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.01.008>
- Smith J, Johnson M, Lee A (2019) Fuel 255:115773. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.030>
- Zhang X, Hu H, Pan H, Li D, Yan Y (2021) Nanomaterials 11(7):1659. <https://doi.org/10.3390/nano11071659>
- Mousavi MV, Rezvani B, Hallajisani A (2025) J Energy Inst 119:102007. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102007>
- Xuan W, Yan S, Dong Y (2023) Processes 11(9):2764. <https://doi.org/10.3390/pr11092764>
- Marwani M, Trifarizy MD (2024) J Electr Eng Comput Sci 5(1):29–34. <https://doi.org/10.51630/ijes.v5i1.104>
- Hamd MI, Akream NS, Gheni SAK (2025) J Pet Sci Res 15(3):68–84. <https://doi.org/10.52716/jprs.v15i3.958>
- Silva RJO, Graf K, Leite ML (2025) J Eng Appl Sci 72:251. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00799-2>
- Damayanti D, Saputri DR, Marpaung DSS., Yusupandi F, Sanjaya A, et al (2022) Polymers 14(15):3133. <https://doi.org/10.3390/polym14153133>
- Hu C, Tang Z, Yao D, Yang H, Shao J, Chen H (2020) J Clean Prod 260:121102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121102>
- Hong D, Li P, Xi T, Guo S (2021) Energy 218:119553. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119553>
- Larionov K, Kaltaev A, Slyusarsky K, et al (2022) Appl Sci 12(3):1012. <https://doi.org/10.3390/app12031012>
- Chu Z, Li Y, Zhang C, Fang Y, Zhao J (2023) J Environ Chem Eng 11:109692. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109692>
- Di X, Pan H, Li D, Hu H, Hu Z, Yan Y (2021) Environ Sci Pollut Res 28:15536–15552. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12872-z>
- Imanbayev Ye, Tileuberdi Ye, Aubakirov Ye et al (2025) Processes 13(11):3404. <https://doi.org/10.3390/pr13113404>
- Bian H, Chen S, Qi J, Zhang L, Li Y. (2026) J Anal Appl Pyrolysis 193:107428. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107428>
- Han L, Li J, Qu C, Shao Z, Yu T, Yang B (2022) Sustainability 14(13):7574. <https://doi.org/10.3390/su14137574>

Авторлар туралы мәлімет:

Ж.Х. Ташмұхамбетова – қауымдастырылған профессор, бас ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: zheneta@mail.ru;

Е.А. Аубакиров – профессор, бас ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: miral.64@mail.ru;

Б.Ж. Кенжеев – докторант, ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: beibit.kenzheev@gmail.com;

Ф.Н. Болатбек – магистрант, кіші ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: bolatbek.farabi012@gmail.com;

Қ. Амантайұлы – оқытушы, ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: kanat.chem@gmail.com;

Қ. Тоштай – қауымдастырылған профессор, жетекші ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz.