

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

О.А.Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институты

Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика кафедрасы

Анефия Нұрдос Нұржанұлы

«Тау-кен металлургия, өндіріс қалдықтарынан геополимер алу және
сипаттамаларын зерттеу»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B07109 - «Инженерлік физика және материалтану» білім алу бағдарламасы

Алматы 2025

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ
БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

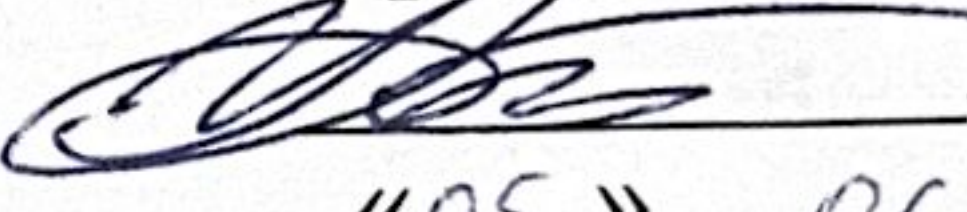
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология, және инженерлік физика» кафедрасы

БЕКІТЕМІН

«Материалтану, нанотехнологиялар
және инженерлік физика»
кафедрасының меңгерушісі

 Какимов У.К.
«05» 06 2025ж.

Дипломдық жұмыс орындауға

ТАПСЫРМА

Білім алушы: Анефия Нұрдос Нұржанұлы

Тақырыбы: «Тау-кен металлургия, өндіріс қалдықтарынан геополимер
алу және сипаттамаларын зерттеу»

Университет ректорының «29» қаңтар 2025 жылғы №26-П/Ө
бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «05» 06 2025 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

- 1) Шикі заттарды әзірлеу;
- 2) Геополимер синтездеу.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер:

1. Геополимер туралы жалпы шолу және сипаттамалық зерттеу;
2. Тәжірибелік жұмыс жүргізу

Ұсынылған негізгі әдебиет 26 атаудан тұрады.

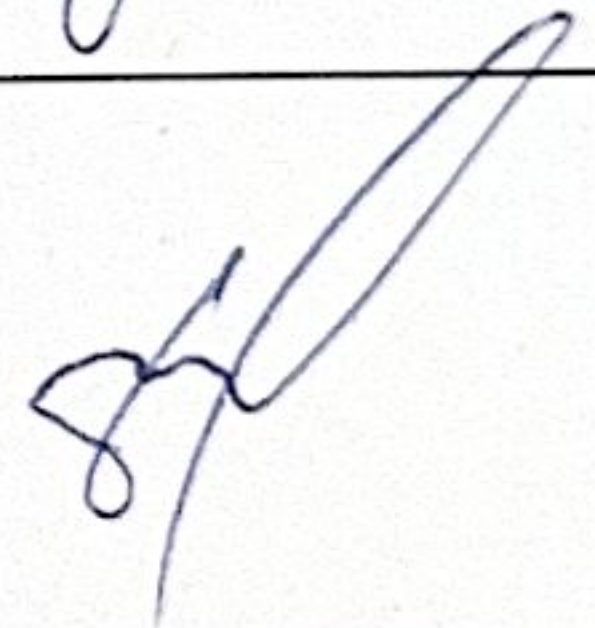
1. Ahmari S. Recycling and Reuse of Wastes as Construction Material Through Geopolymerization. – PhD Thesis.

2. Davidovits J. Geopolymer Science and Technics. – Technical Paper. – Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2013.

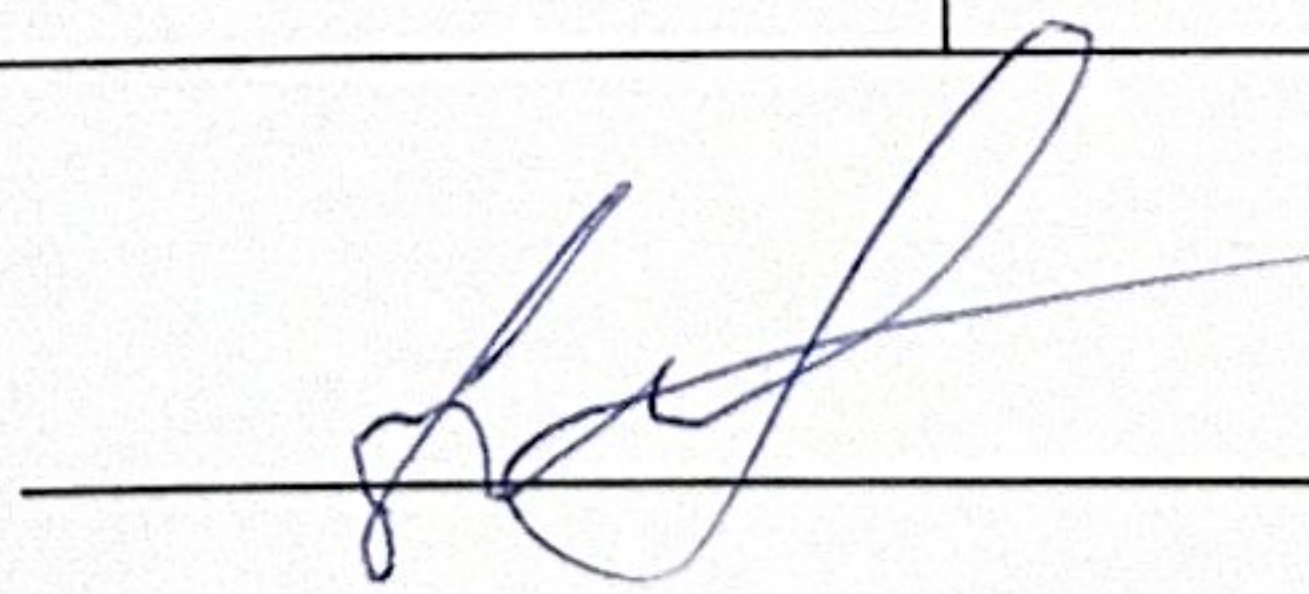
Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлім атаулары, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге, кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Әдеби шолу	15.04.2025	
Тәжірибелік бөлім	15.04.2025	
Дипломдық жұмысты алдын-ала қорғау	29.04.2025	

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма
бақылаушының аяқталған жұмысқа (жобаға) қойған
қолтаңбалары (жұмысқа қарасты тараулардың нұсқаумен)

Бөлімдер атауы	Ғылыми жетекші, кеңесшілер (аты-жөні, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қолтаңба қойылған мерзімі	Қолы
Әдеби шолу	Бейсебаева А.С, Физика-математика ғылымдарының кандидаты, асс. Проф.	05.06.2025	
Тәжірибелік жұмыстар	Бейсебаева А.С, Физика-математика ғылымдарының кандидаты, асс. Проф.	05.06.2025	
<u>Нормоконтролер</u>	Етиш Талшын Техникалық ғылымдар магистрі	05.06.2025	

Ғылыми жетекшісі



Бейсебаева А.С.

Тапсырманы орындауға білім алушы



Анефия Н.Н.

Күні

«05» 06 - 2025

ПІКІР

Студент: Анефия Нұрдос Нұржанұлы

Мамандығы: 6B07109 – Инженерлік физика және материалтану

Дипломдық жұмыстың тақырыбы: «Тау-кен металлургия өндіріс қалдықтарынан геополимер алу және сипаттамаларын зерттеу»

Дипломдық жұмыстың өзектілігі мен мазмұны

Дипломдық жұмыс өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу мәселесіне арналған. Студент Павлодар ЖЭС ұшпа күлі мен кен байыту қалдықтарын пайдалану арқылы экологиялық таза геополимерлік материалдар алу әдісін зерттеген. Жұмыстың теориялық негіздемесі жоғары деңгейде жазылған, тәжірибелік бөлімде СЭМ және XRD әдістерін қолдана отырып материалдардың морфологиясы мен фазалық құрамы сипатталған. Жұмыс нәтижелері геополимерді құрылыс саласында пайдалану мүмкіндігін көрсетеді.

Дипломдық жұмысты бағалау

Анефия Нұрдос Нұржанұлының дипломдық жұмысы қойылған талаптарға толық сәйкес келеді. Жұмысты « 85 » (%) бағасына лайық деп есептеймін және бакалавр академиялық дәрежесін беруге болады деп санаймын.

Ғылыми жетекші:
физика-математика

ғылымдарының кандидаты,

асс. профессор

Бейсебаева А.С.

«04» 06 2025 ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Анефия Нұрдос Нұржанұлы

Тақырыбы: Тау-кен металлургия, өндіріс қалдықтарынан геополимер алу және сипаттамаларын зерттеу

Жетекшісі: Бейсебаева А.С.

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0,2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0,2

Әріптерді ауыстыру: 7

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 12

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні

26.05.2025



Кафедра меңгерушісі

Какимов У.К.

ҚОЛ ТАҢБАСЫ КУӘЛАНДЫРАМЫН
/ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Ғылыми хатшы/Ученый секретарь
«Физика-техникалық институты» ЖШС
.30 05 2025 ж/г.
Қолы/подпись аты-жөні/ФИО

АНДАТПА

Бітіру біліктілік жұмысында тау-кен металлургия өнеркәсібінің қалдықтары негізінде геополимерлік материалдарды алу әдістері қарастырылады. Алынған материалдың құрылымдық және фазалық сипаттамалары зерттелді.

Жұмыс үш бөлімнен тұрады. Бірінші бөлімде геополимерлеу процесінің теориялық негіздері келтірілген, сілтілі активаторлардың құрамы мен рөлі сипатталған, сонымен қатар күл мен металлургиялық шлактарды шикізат ретінде қолдану ерекшеліктері қарастырылған. Екінші бөлімде эксперименттік зерттеулердің нәтижелері келтірілген: геополимер матрицасының синтезі орындалды, оның морфологиясы сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) әдісімен зерттелді, аморфты және кристалды фазаларды анықтауға мүмкіндік беретін рентгендік фазалық талдау (XRD) жүргізілді. Үшінші бөлімде негізгі тұжырымдар берілген.

Алынған геополимерлі материал құрамында натрий-алюмосиликат гелі және инертті қосындылары бар кеуекті гетерогенді құрылымға ие екендігі анықталды. Алынған нәтижелер геополимерді құрылыс және оқшаулағыш материал ретінде пайдалану перспективасын растайды.

АННОТАЦИЯ

В дипломной работе рассматриваются методы получения геополимерных материалов на основе отходов горно-металлургической промышленности. Изучены структурные и фазовые характеристики полученного материала.

Работа состоит из трёх разделов. В первом разделе приведены теоретические основы процесса геополимеризации, охарактеризован состав и роль щелочных активаторов, а также рассмотрены особенности применения золы-уноса и металлургических шлаков в качестве сырья. Во втором разделе представлены результаты экспериментальных исследований: выполнен синтез геополимерной матрицы, изучена её морфология методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), проведён рентгенофазовый анализ (XRD), позволивший определить аморфные и кристаллические фазы. В третьем разделе приведены основные выводы.

Установлено, что полученный геополимерный материал обладает пористой гетерогенной структурой, содержащей натрий-алюмосиликатный гель и инертные включения. Полученные результаты подтверждают перспективность использования геополимера в качестве строительного и изоляционного материала.

ABSTRACT

The final thesis discusses methods for obtaining geopolymer materials based on waste from the mining and metallurgical industry. The structural and phase characteristics of the obtained material are studied.

The work consists of three sections. In the first section, the theoretical foundations of the geopolymerization process are presented, the composition and role of alkaline activators are characterized, and the features of the use of fly ash and metallurgical slags as raw materials are considered. The second section presents the results of experimental studies: a geopolymer matrix was synthesized, its morphology was studied by scanning electron microscopy (SEM), and X-ray phase analysis (XRD) was performed, which made it possible to determine the amorphous and crystalline phases. The third section contains the main conclusions.

It has been established that the resulting geopolymer material has a porous heterogeneous structure containing a sodium-aluminosilicate gel and inert inclusions. The results obtained confirm the prospects of using geopolymer as a building and insulating material.

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ	9
1 ТЕОРИЯЛЫҚ БӨЛІМ	10
1.2 Геополимер жайлы негізгі түсініктемелер	10
1.3 Геополимерлеу процестерінің теориялық негіздері	11
1.4 Геополимерлік материалдарды алу үшін қолданылатын шикізат түрлері	12
1.5 Активаторлардың түрлері мен олардың әсері	14
1.6 Шикізаттардың химиялық және минералогиялық құрамы	15
2 ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ	19
2.1 Бастапқы материалдар мен реагенттер	19
2.2 Натрий гидроксиді, сұйық әйнек және ұшпа күл негізіндегі геополимер синтездеу әдісі	21
2.3 Натрий гидроксиді, сұйық әйнек және ұшпа күл негізіндегі геополимер синтездеу кезінде болатын процесстер	22
3 НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУЛАР	24
3.1 СЭМ арқылы алынған суреттер анализі	24
3.2 Рентгендік дифракция арқылы алынған график анализі	26
ҚОРЫТЫНДЫ	28
ҚЫСҚАРТЫЛҒАН СӨЗДЕР	29
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	30
ҚОСЫМШАЛАР	32

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда Қазақстан Республикасында өндірістік және тұрмыстық қалдықтардың жиналуы экологиялық және экономикалық мәселелердің өзекті бағыттарының біріне айналып отыр. Жыл сайын елде 5 миллион тоннадан астам тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚҚ) түзіледі, оның тек 25%-ы ғана қайта өңделеді, ал қалған бөлігі арнайы полигондарда жиналады. Сонымен қатар, Қазақстанда 31,6 миллиард тоннадан астам өндірістік қалдықтар жинақталған. Бұл қалдықтардың едәуір бөлігін жылу электр станциялары мен металлургиялық кәсіпорындардың ұшпа күлі мен металлургиялық шлактары құрайды.

Осы жағдайды ескере отырып, бұл дипломдық жұмыста өндірістік қалдықтар негізінде экологиялық қауіпсіз, физико-химиялық және құрылымдық сипаттамалары жоғары геополимерлік материалдар алу мәселесі қарастырылады. Жұмыстың ғылыми жаңалығы — дәстүрлі құрылыс материалдарының баламасы ретінде өнеркәсіп қалдықтарын тиімді пайдалану арқылы көп фазалы геополимер құрылымын синтездеу жолдарын ұсыну.

Зерттеу мақсаты — тау-кен металлургиясы қалдықтары негізінде жаңа буындағы геополимерлік материалдарды алу және олардың құрылымдық, механикалық және фазалық қасиеттерін зерттеу.

Міндеттері:

- шикізат ретінде қолданылатын қалдықтардың минералогиялық және химиялық құрамын анықтау;
- әртүрлі концентрациядағы сілтілік белсендіргіштердің геополимерлену процесіне әсерін зерттеу;
- алынған материалдардың морфологиясын, фазалық құрамын және беріктік сипаттамаларын талдау.

Зерттеудің теориялық негізін геополимерлеу процестері туралы заманауи әдебиет көздері мен Жозеф Давидовиц бастаған геополимерлік химия саласындағы еңбектер құрайды. Методологиялық база ретінде зертханалық синтез әдістері, сканерлейтін электронды микроскопия (СЭМ) және рентгендік фазалық талдау (XRD) қолданылды. Практикалық база ретінде Павлодар ЖЭС-інен алынған ұшпа күл мен тау-кен қалдықтары пайдаланылды.

Жұмыстың өзектілігі — Қазақстандағы қалдықтарды қайта өңдеу көрсеткішінің төмендігі мен құрылыс индустриясында экологиялық балама материалдарға сұраныстың артуымен айқындалады. Геополимерлік технологияларды қолдану арқылы экологияға келетін зиянды азайтуға және құрылыс саласына жаңа буын материалдарын енгізуге жол ашылады.

1 ТЕОРИЯЛЫҚ БӨЛІМ

1.1 Қазақстандағы тау-кен металлургия өндіріс қалдықтары

Қазақстандағы тау-кен металлургия саласы елдің жалпы өнеркәсіптік өндірісінің шамамен 26%-ын қамтамасыз ететін стратегиялық маңызды сала болып табылады. Бұл саланың белсенді дамуы салдарынан жыл сайын шамамен 1 миллиард тоннаға жуық өндірістік қалдық түзіледі. Осындай ауқымды өндіріс нәтижесінде елімізде техногендік минералдық түзілімдердің (ТМТ) көлемі артып, қазіргі таңда олардың жиынтық мөлшері 60 миллиард тоннадан асуда [1].

Алайда, бұл қалдықтардың тек 11%-ы ғана қайта өңдеуге ұшырайды. Салыстырмалы түрде, дамыған елдерде бұл көрсеткіш 70–80% деңгейінде. Қазақстандағы қайта өңдеу деңгейінің төмендігі, ең алдымен, экономикалық және құқықтық кедергілерге, сондай-ақ қажетті инфрақұрылымның жеткіліксіздігіне байланысты [2].

Соңғы жылдары қалдықтарды қайта өңдеу саласында бірқатар өңірлік бастамалар қолға алынуда. Мысалы, Павлодар облысындағы екі кәсіпорын боксит шламдары мен ұшпа күлді құрылыс материалдары ретінде пайдалануға талпынып отыр. Шымкент қаласында жеке кәсіпкерлер 2 миллион тонна қорғасын шлагын қайта өңдеуге кірісті [3]. Сонымен қатар, ERG компаниясы хром өндірісінің қалдықтарын қайта өңдеуге бағытталған флотациялық байыту учаскесін іске қосуды жоспарлауда [3].

Мемлекеттік деңгейде де бірқатар ынталандыру шаралары ұсынылуда. Атап айтқанда, техногендік қалдықтарды қайта өңдеу кезінде пайдалы қазбалар өндіру салығынан босату бастамасы көтерілуде [3]. Бұл шаралар қалдықтарды басқару жүйесін жандандыруға бағытталған.

2025 жылдың қыркүйегіне дейін Қазақстанда қалдықтарды тиімді басқаруға бағытталған ұлттық стратегия қабылдау жоспарланып отыр. Бұл құжат өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу мен пайдаланудың жүйелі және ұзақмерзімді тетіктерін қамтуы тиіс [4].

1.2 Геополимер жайлы негізгі түсініктемелер

Геополимер – бұл сілтілік ортада жоғары реакция қабілеттілігі бар алюмосиликат материалдар негізінде түзілетін бейорганикалық полимерлік байланыстырғыш. Геополимерлену процесі табиғи немесе өндірістік алюмосиликаттар (ұшпа күл, шлак, метакаолин және т.б.) мен сілтілік ерітінділердің (NaOH , KOH , Na_2SiO_3) арасындағы химиялық реакция нәтижесінде жүзеге асады [5].

Бұл материалдар кеңістіктік торлы құрылым түзіп, жоғары механикалық беріктік, термиялық және химиялық төзімділік қасиеттерін көрсетеді. Олар цементке балама ретінде құрылыс саласында кеңінен қолданылады. Сонымен

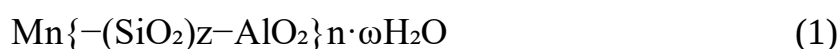
катар, геополимерлердің өндірісі дәстүрлі портландцементке қарағанда көмірқышқыл газының (CO₂) шығарылуын едәуір төмендетеді [6].

"Геополимер" терминін алғаш рет 1970 жылдары француз ғалымы Жозеф Давидовиц енгізген. Ол геополимерлерді ежелгі құрылыс әдістерімен байланыстырды және оларды табиғи процестерге ұқсас синтетикалық материалдар ретінде сипаттады. Ғалымның гипотезасы бойынша, геополимер тәріздес материалдар Ежелгі Мысыр пирамидаларын салуда пайдаланылған болуы мүмкін [5].

Геополимерлену процесі үш негізгі кезеңнен тұрады:

- алюмосиликат шикізатының сілтілік ортада еруі;
- полимерлі гель түзілуі (мысалы, N–A–S–H гелі);
- гелдің құрылымдануы мен қатайып үшөлшемді торға айналуы [14].

Геополимерлердің жалпылама химиялық формуласы келесідей [11]:



мұнда:

- **M** – сілтілік металл ионы (Na⁺, K⁺),
- **n** – полимерлену дәрежесі,
- **z** – кремний мен алюминийдің (Si/Al) қатынасы,
- **ω** – химиялық байланысқан судың мөлшері.

Геополимер құрылымында SiO₄ және AlO₄ тетраэдрлары оттегі көпірлері арқылы байланысып, тұрақты үшөлшемді тор құрайды. Бұл құрылымдағы алюминийдің теріс заряды сілтілік металл иондары (Na⁺ немесе K⁺) арқылы теңгеріледі. Нәтижесінде, геополимер құрылымы термиялық және химиялық тұрақты, механикалық жағынан берік болады.

1.3 Геополимерлеу процестерінің теориялық негіздері

Француз ғалымы Жозеф Давидовиц айтуы бойынша қатайуы сілтілермен белсендірілетін барлық байданыстырғыш заттарды геополимер деп атауға болмайды. Терминді қолданудың негізділігі геополимерлі байланыстырғыштар технологиясы мономерлі Силикат және алюминий топтарынан осындай материалдардың полимерлік құрылымын синтездеуді қамтамасыз ететіндігіне негізделген. Бұл топтар, алюминисиликатты өндіріс отходтары мен тау жынысындағы материалдардың алғашқы құрылысы, сілтілі ертінділерде жойыла алуына негізделген. Сілтімен белсендірілген байланыстырғыш материалдар, цеолиттен тұрып, аморфты немесе жартылай кристалды құрылысқа ие болған кезде ғана геополимер болады деп айтпы кеткен екен [11]

Геополимеризация процесі бірінші сілтілі ертінділердің (NaOH және KOH) әсерінен алюминисиликатты шикізаттың құрылымының кремний(Si) және алюминий(Al) иондарын шығара отырып бұзылуы. Екіншіден, кремний мен алюминиден бөлінген иондар әрекеттесіп олигомерлер құрайды. Олигомерлер өз кезегінде геополимер деп аталтын оданда қиын үш өлшемді

құрылымға жиналады. Бұл құрылым жалпы оттегі атомдары арқылы байланысқан SiO_4 және AlO_4 тетраэдрлерінің болуымен сипатталады. Si^{4+} -ны Al^{3+} - мен алмастырудан туындайтын теріс заряд Na^+ немесе K^+ сияқты катиондардың болуымен өтеледі. [7, 11] дереккөздерге сәйкес, сілтілік активтендіру үдерісі бірізді бұзу және тығыздау сатыларынан тұрады. Алдымен бастапқы материалдар бұзылып, тұрақсыз құрылымдық бірліктерге айналады, олар кейін коагуляциялық құрылымдармен әрекеттесіп, біртіндеп тығыздалады. Бірінші кезеңде Si-O-Si және Al-O-Si байланыстары жоғары концентрациялы сілті ерітіндісінде үзіліп, материал коллоидтық күйге өтеді. Одан әрі коллоидтық бөлшектердің саны артып, үшінші кезеңде олар берілген көлемде тығыздалады. Бұл процесс тығыз құрылымның қалыптасуына және аутогендік шөгуге алып келеді [8].

1.4 Геополимерлік материалдарды алу үшін қолданылатын шикізат түрлері

Геополимерлі материалды алу үшін негізгі шикізат ретінде тау-кен өндірісінен қалған қалдықтар (мыс, алтын, темір, көмір және т.б.) қолданылады. Бірақта геополимер жасауға арналған шикізатқа қойылатын негізгі талап, оның құрамында жеткілікті мөлшерде аморфты және реакцияға түсе алатын кермний(Si) мен алюминидің(Al) болуы [11].

1-кесте — Геополимерлік материалдарды алу үшін қолданылатын шикізат түрлері

№	Шикізат түрі	Мысалдар	Ерекшеліктері
1	Өнеркәсіптік қалдықтар	- Metallургиялық шлактар (домендік, ферроқорытпа шлактары) - Күл (ЖЭС-тен алынған ұшпа күл) - Шламдар	Арзан әрі қолжетімді. Құрамы әртүрлі болуы мүмкін. Кейде қажетсіз қоспалар (CaO , Fe_2O_3) кездеседі.
2	Табиғи минералдар	- Каолинит (кальцинацияланғаннан кейін метакаолинге айналады) - Вулкандық туф, пемза	Құрамы тұрақты, бірақ қымбат. Алдын ала өңдеуді қажет етеді (мысалы, каолинитті күйдіру).
3	Арнайы дайындалған материалдар	-Метакаолин - Күйдірілген балшықтар	Жоғары сапалы геополимерлер үшін қолданылады.

Shi, Krivenko және Roy (2006) өздерінің «Alkali-Activated Cements and Concretes» атты еңбегінде металлургиялық шлактардың сілтілік активтендірілген цементтер мен бетондар өндірісінде маңызды рөл

атқаратынын атап өтеді. Атап айтқанда, домна пешінің шлактары (blast furnace slag) және электр доғалы пеш шлактары (electric arc furnace slag) сияқты металлургиялық қалдықтар сілтілік активтендірілген байланыстырушы материалдар ретінде кеңінен зерттелуде. Бұл шлактардың құрамында кремний диоксиді (SiO_2) мен алюминий оксиді (Al_2O_3) көп мөлшерде кездеседі, бұл оларды сілтілік ортада жоғары реакциялық қабілетке ие етеді. Сілтілік активтендіргіштермен әрекеттесу нәтижесінде, шлактардан кальций-алюмосиликат гидраттары (C-A-S-H гельдері) түзіледі, бұл құрылымдық беріктігі жоғары материалдардың қалыптасуына ықпал етеді. Авторлар шлактардың химиялық құрамы, бөлшек өлшемі және активтендіргіштердің түрі мен мөлшері сияқты факторлардың сілтілік активтендірілген материалдардың қасиеттеріне әсер ететінін атап көрсетеді. Мысалы, шлактардың ұсақталу дәрежесі олардың реакциялық қабілетін арттырып, нәтижесінде алынатын материалдардың механикалық беріктігін жақсартады. Сонымен қатар, шлактарды сілтілік активтендіру арқылы алынған цементтер мен бетондар жоғары коррозияға төзімділік, химиялық тұрақтылық және ұзақ мерзімді беріктік сияқты қасиеттерге ие болады. Бұл оларды агрессивті ортада қолдануға тиімді етеді. Осылайша, металлургиялық шлактар сілтілік активтендірілген байланыстырушы материалдар өндірісінде перспективалы шикізат көзі болып табылады және олардың тиімді қолданылуы экологиялық таза және жоғары сапалы құрылыс материалдарын жасауға мүмкіндік береді[9, 20].

Даксон және оның әріптестері (2007) зерттеуінде метакаолин геополимерлерді синтездеуге арналған негізгі алюмосиликат көзі ретінде сипатталады. Метакаолин каолинді термиялық өңдеу нәтижесінде алынатын аморфты материал, және оның құрылымының ретсіздігі оның жоғары реакциялық қабілетін қамтамасыз етеді. Бұл қасиет метакаолинді сілтілік активтендіру процесінде өте тиімді етеді. Металкаолиннің құрылымдық ерекшеліктеріне тоқталсақ, ядролық магниттік резонанс (ЯМР) спектроскопиясы нәтижелері алюминий атомдарының басым бөлігі тетраэдрлік үйлесімділікке (Al(IV)) ие екенін көрсетеді. Бұл көрсеткіш геополимер гельдерінің түзілуіне қолайлы жағдай жасайды. Метакаолиннің басқа алюмосиликатты материалдармен салыстырғанда басты артықшылығы – оның біртекті құрамы мен тұрақты құрылымы. Мысалы, ұшпа күлге қарағанда, метакаолин негізіндегі геополимерлердің қасиеттері анағұрлым тұрақты әрі алдын ала болжанатын сипатқа ие болады. Бұл метакаолинді ғылыми-зерттеу жұмыстары мен өнеркәсіптік қолдану үшін ыңғайлы етеді. Физика-химиялық тұрғыда метакаолин негізіндегі геополимерлер жоғары қысу беріктігін, төмен шөгуді және агрессивті орталарға төзімділікті көрсетеді. Бұл қасиеттер оларды құрылыс материалдары мен түрлі инженерлік шешімдер үшін перспективалы етеді. Сонымен қатар, геополимерлердің қасиеттеріне синтез шарттарының – мысалы, сілтілік ерітінді концентрациясының, Si/Al қатынасының және қату температурасының әсері зор. Зерттеулер көрсеткендей, қату температурасының өсуі реакция жылдамдығын арттырып, алынған материалдың механикалық сипаттамаларын жақсартады. Қорытындылай келе, метакаолин геополимерлер

өндірісінде жоғары тиімділік көрсететін және қажетті қасиеттерге ие материал ретінде кеңінен зерттелуде [10].

Әрі қарай геополимерлік байланыстырғыштарды зерттеу барысында ұшпа күлдің (fly ash) маңызы ерекше атап өтіледі. Ұшпа күл — көмірді жағу нәтижесінде түзілетін алюмосиликатты қалдық, және ол метакаолин секілді геополимерлеу процесінде негізгі шикізат көзі бола алады. Duxson және оның әріптестері (2007) өз еңбектерінде ұшпа күлдің химиялық және физикалық сипаттамалары алынатын геополимер материалдарының сапасына елеулі әсер ететінін атап көрсетеді. Ұшпа күлдің құрамында жоғары мөлшерде аморфты кремний диоксиді (SiO_2) мен алюминий оксиді (Al_2O_3) болады, бұл оның сілтілік ортада жақсы еруін және реакцияға түсуін қамтамасыз етеді. Бөлшектердің ұсақтығы мен беткі ауданының үлкен болуы оның реакциялық қабілетін арттырады. Мақалада сонымен қатар сілтілік ерітінділердің концентрациясы, Si/Al молекулалық қатынасы және қату температурасы сияқты факторлардың ұшпа күлге негізделген геополимерлердің механикалық беріктігі мен ұзақ мерзімді тұрақтылығына ықпал ететіні түсіндіріледі. Дұрыс тандалған технологиялық параметрлер ұшпа күл негізіндегі геополимерлік материалдардың беріктігін арттырып, олардың экологиялық таза және тиімді құрылыс материалдары ретінде қолданылуына жол ашады. Осылайша, метакаолинмен қатар ұшпа күл де геополимерлік байланыстырғыштарды әзірлеуде перспективалы шикізат көзі болып табылады және оның қасиеттерін дұрыс басқару арқылы сапалы геополимер өнімдерін жасау мүмкіндігі жоғары [10].

1.5 Активаторлардың түрлері мен олардың әсері

Геополимеризация процесін белсендендіру мақсатында натрий гидроксиді (NaOH) мен натрий силикатының (SS) судағы қоспасы қолданылды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, 10 M NaOH ерітіндісі негізінде дайындалып, 60 °C температурада 7 күн бойы қатырылған үлгілер үшін бір осьтік сығымдау беріктігі (UCS) $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ қатынасы артқан сайын өсті және шамамен 1.0–1.26 аралығында ең жоғарғы мәніне жетті. Бұл шектен жоғары қатынастарда беріктік төмендей бастайды. Осылайша, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -ның тиімді қатынасы осы диапазонда болады деп қорытынды жасауға болады.

NaOH және SS-тің біріктірілген ерітіндісінің геополимерлерге әсерін бұрынғы зерттеушілер де қарастырған, олардың нәтижелерімен салыстыру 3-кестеде келтірілген. Бұл жұмыстың нәтижелері әдебиет деректерімен жақсы үйлеседі. Натрий силикатын қосу геополимерлі құрылымның беріктігін арттырады, себебі ол қосымша кремний көзі ретінде әрекет етіп, геополимеризация реакциясын жеделдетеді. Бұған қоса, алюминий компоненттері кремнийге қарағанда ерітіндіде жылдамырақ еритіндіктен, кремнийдің қосымша көзі ретінде SS-тің болуы маңызды [21–23].

Алайда SS мөлшерінің шектен тыс болуы кері әсер етуі мүмкін, өйткені ол судың булануын тежеп, гель түзілу процесін баяулатады және Si-Al

фазаларының тұнбаға түсуіне ықпал етіп, геополимерлік реакцияны шектейді. SEM микросуреттері үлгілердің түйіршікті құрылымға ие екенін көрсетті, бұл метакаолин негізіндегі геополимерлерден айырмашылық бар екенін білдіреді. Микроструктура гетерогенді болып, кейбір аймақтар толық, ал кейбіреулері ішінара немесе мүлде реакцияға түспеген бөлшектерден тұрады.

EDX талдауы реакцияланған және реакцияланбаған аймақтарда Si, Al және Na элементтерінің таралу айырмашылықтарын анықтады. Атап айтқанда, реакцияланған аймақтарда Si/Al қатынасы төменірек, ал Na/Al жоғарырақ болып шықты. Бұл алюминийдің белсенді гель түзу фазасына өтуі мен кремнийдің кейіннен қосылуы нәтижесінде туындайды. Мұндай өзгерістер басқа зерттеулерде де байқалған [24, 25].

XRD талдауы рентгенограммалардың кристалдық құрылымды сақтағанын көрсетті. Бұл SEM нәтижелерін растады. Кремнеземнің рентгендік шыңдарының қарқындылығының төмендеуі оның геополимеризацияға қатысқанын білдіреді. Сонымен қатар, бастапқы үлгілерде байқалған гипс белгілері реакциядан кейін жоғалып, оның еруі нәтижесінде жойылғанын көрсетеді. Реакцияны 90 °C температурада жүргізген кезде аморфты фаза үлесі арта түссе, 60 °C-та бұл құбылыс әлсіз байқалады.

1.6 Шикізаттардың химиялық және минералогиялық құрамы

Әдебиеттерге сүйенсек, геополимерлеу процесіне арналған шикізаттардың химиялық және минералогиялық құрамы олардың реакциялық қабілетін және алынған материалдың қасиеттерін айқындайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. Осы тұрғыда мыс қалдықтары (MT) мен ұшпа күлдің (FA) құрамы арнайы зерттеулерде талданған.

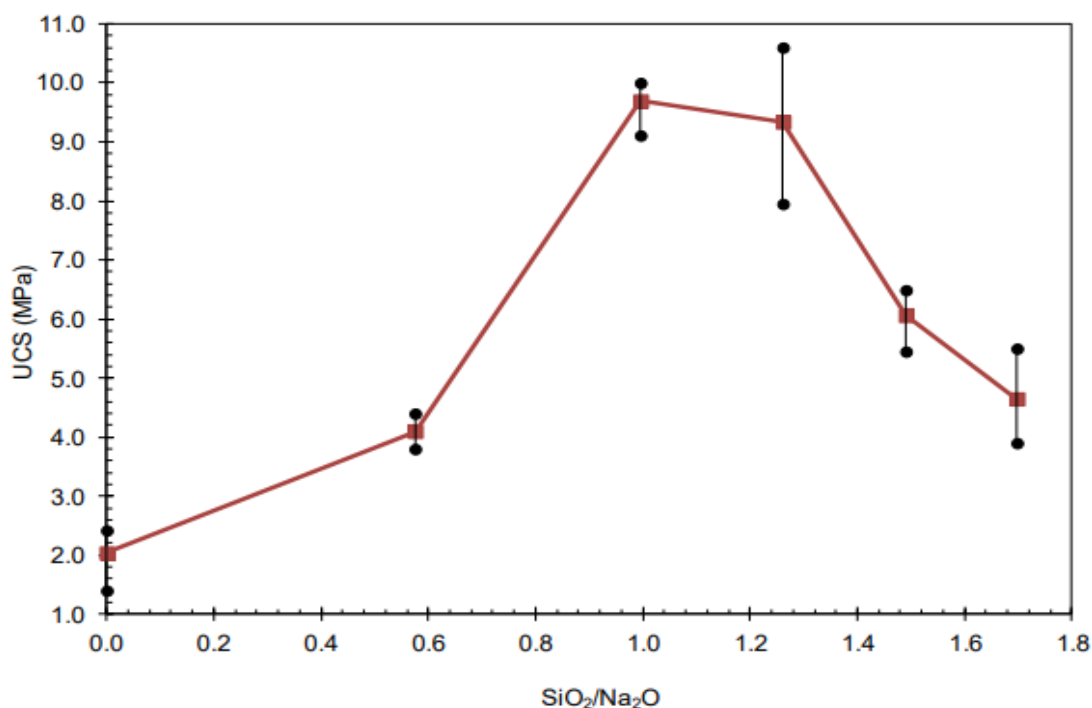
2-кестеде берілген мәліметтерге сәйкес, мыс қалдықтары мен ұшпа күлдің негізгі компоненттері кремний диоксиді (SiO_2) мен алюминий оксиді (Al_2O_3) болып табылады. Сонымен қатар, құрамында белгілі мөлшерде кальций (CaO) және темір оксидтері (Fe_2O_3) бар екені анықталған. Бұл оксидтер жиынтығы аталған материалдарды геополимерлік байланыстырғыштар өндіруге қолайлы етеді.

Минералогиялық құрам бойынша мыс қалдықтарының басым бөлігі кристалдық фазалардан тұрады. Рентгендік дифракциялық талдау (XRD) нәтижелері бойынша, негізгі анықталған минералдар мыналар:

- Кварц (SiO_2),
- Альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$),
- Сандин $[(\text{K}_{0.831}\text{Na}_{0.169})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)]$,
- Гипс (CaSO_4).

Бұл минералдық фазалардың болуы бастапқы материалдардың салыстырмалы түрде төмен реакциялық қабілетке ие екендігін көрсетеді, себебі кристалдық құрылымдар аморфты құрылымдарға қарағанда сілтілік ерітінділерде баяу ериді. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері көрсеткендей,

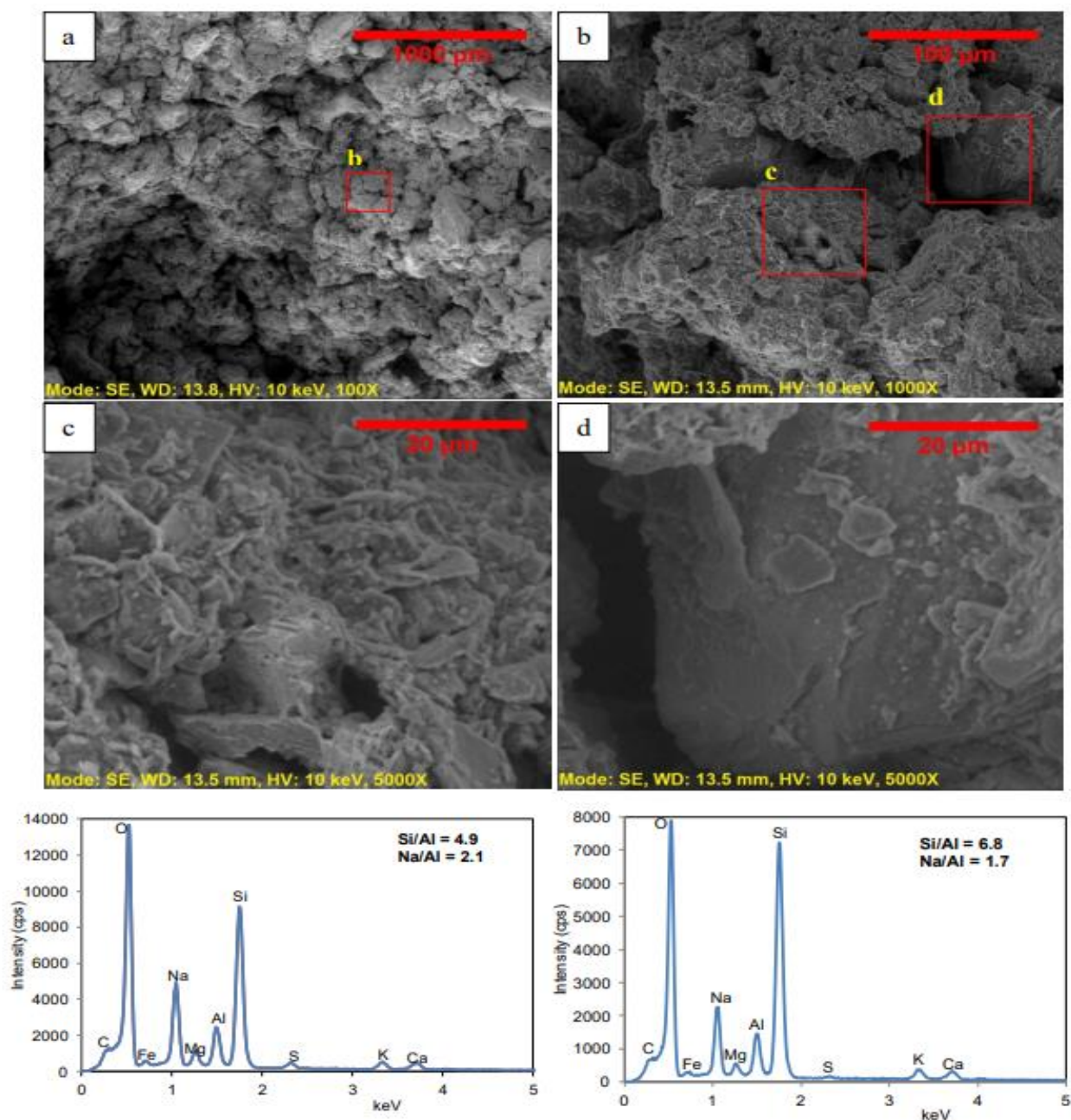
ұшпа күл ұсақ дисперсті құрылымға ие және аморфты фазаның жоғары үлесін қамтиды, бұл оны геополимерлеу реакциясында белсендірек етеді. Осы мәліметтерге сүйене отырып, мыс қалдықтары мен ұшпа күлдің химиялық және минералогиялық сипаттамалары оларды геополимерлік байланыстырғыштарды әзірлеу үшін перспективалы шикізат көздері ретінде қолдануға мүмкіндік беретіні анықталды. [26]



1-сурет – 10 М NaOH және сұйық натрий силикаты (SS) қоспасымен активтендірілген және 60 °C температурада 7 күн бойы қатаюға қалдырылған үлгілер үшін UCS пен SiO₂/Na₂O қатынасының арасындағы байланыс[26].

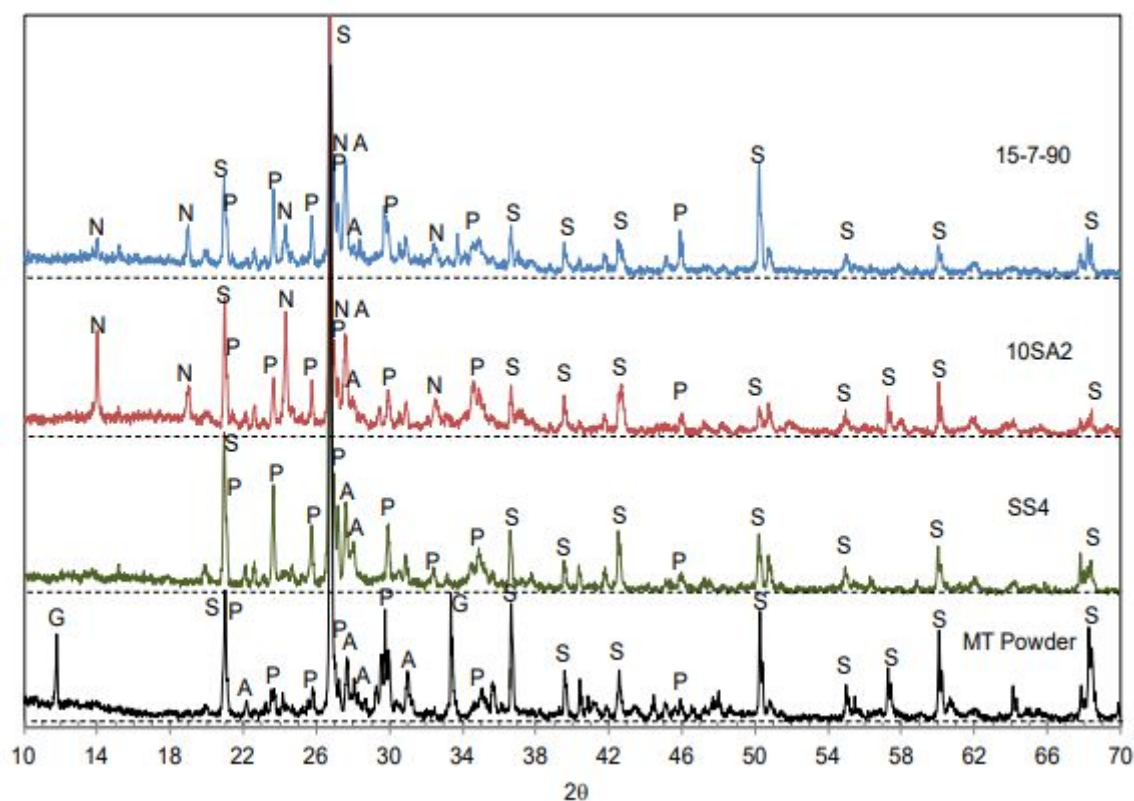
2-кесте – Әдебиетте келтірілген оңтайлы SiO₂/Na₂O қатынастары

№	Бастапқы материал	Оптималды SiO ₂ /Na ₂ O қатынасы	Әдебиет
1	Ұшпа күл (Fly ash)	0.5–0.89	[10]
2	Ұшпа күл	1.5	[14]
3	Ұшпа күл	1.0–1.5	[15]
4	Метакаолин (Metakaolin)	1.5	[12]
5	Ұшпа күл	1.0–1.5	[16]
6	Домна шлактарының түйіршіктері (Granulate blast furnace slag)	1.0–1.25	[17]



- (a) бүкіл аймақтың төмен ұлғайтылған суреті;
 (b) (a) суретінде көрсетілген квадраттың жоғары ұлғайтылған суреті;
 (c) және (d) (b) суретінде көрсетілген квадраттағы сәйкесінше реакцияға түскен және түспеген аймақтардың жоғары ұлғайтылған суреттері.
 EDX спектрлері (c) және (d) үшін көрсетілген[26].

2 сурет - $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1$ кезінде сұйық SS қосылған және 60 °C температурада 7 күн бойы қатаюға қалдырылған үлгінің SEM микросуреттері мен EDX талдау нәтижелері:



SS4: 10 M NaOH және $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1$ кезіндегі сұйық SS-пен синтезделген және 60°C температурада 7 күн қатаюға қалдырылған байланыстырғыш;
 10SA2: 10 M NaOH және $A/N = 1,25$ кезіндегі ұнтақ SA-пен синтезделген және 90°C температурада 7 күн қатаюға қалдырылған байланыстырғыш;
 15-7-90: 15 M NaOH-пен синтезделген және 90°C температурада 7 күн қатаюға қалдырылған байланыстырғыш (A: натрий алюмосиликаты (альбит), G: гипс, N: натрий алюмосиликат гидраты (цеолит), P: калий алюмосиликаты (санидин), S: кварц) [26].

3 сурет - Кен қалдықтары ұнтағының XRD үлгілері;

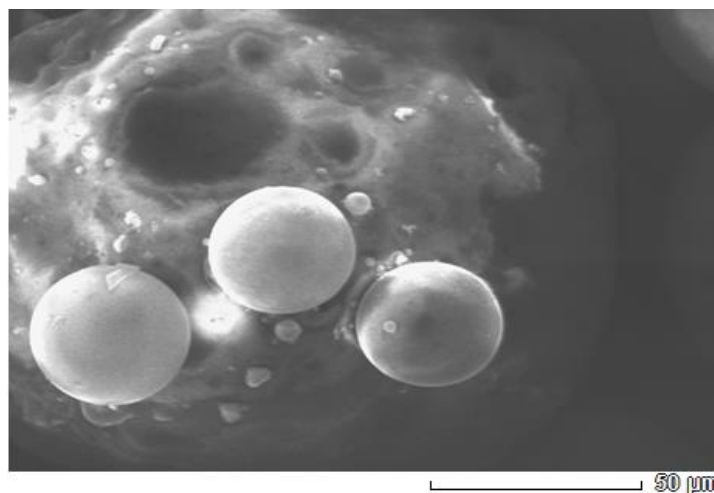
2 ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ

2.1 Бастапқы материалдар мен реагенттер

Ұшпа күл — бұл көмірді жағу нәтижесінде түзілетін және түтін газдарымен бірге жылу электр станцияларынан шығарылатын дисперстік минералдық қалдық. Зерттеуде қолданылған ұшпа күл Павлодар қаласындағы жылу электр станциясынан (ЖЭС) алынды. Бұл зат негізінен силикатты және алюмосиликатты компоненттерден тұрады. Ұшпа күлдің түсі сұрғылт, балқу температурасы шамамен 1200 °С. Тығыздығы — шамамен 2,1–2,5 г/см³. Негізгі оксидтер құрамына кремнезем (SiO₂), алюминий тотығы (Al₂O₃), темір тотығы (Fe₂O₃), кальций тотығы (CaO) және магний тотығы (MgO) кіреді. Күлдің бөлшек өлшемі 10–80 мкм аралығында. Бұл материал геополимерлік байланыстырғыштар алу үшін кремний және алюминий көзі ретінде пайдаланылды.



4-сурет — Павлодар жылу электро станциясынан алынған ұшпа күл



5-сурет — Ұшпа күлдің СЭМ арқылы алынған бейнесі

3-кесте — Ұшпа күлдің элементтік құрамы

Element	Energy (keV)	Mass %	Counts	Error %	Mol %	Compound	Compound Mass%	Cation	K
O	—	50.06	—	—	—	—	—	—	—
Mg K	1.253	0.10	9.88	0.21	0.29	MgO	0.16	0.03	0.9661
Al K	1.486	18.37	1769.32	0.27	23.93	Al ₂ O ₃	34.72	5.22	0.9967
Si K	1.739	28.39	2724.53	0.33	71.03	SiO ₂	60.73	7.75	1.0000
S K	2.307	0.22	17.95	0.40	0.49	SO ₃	0.56	0.05	1.1970
Ca K	3.690	1.36	90.94	0.35	2.39	CaO	1.91	0.26	1.4398
Fe K	6.398	1.49	56.83	0.53	1.88	FeO	1.92	0.20	2.5195
Total	—	100	—	—	100	—	100	13.53	—

Натрий гидроксиді (жүйелік атауы: натрий гидроксид, NaOH) — күшті сілтілік қасиетке ие бейорганикалық қосылыс. Ақ түсті, қатты күйде болады және ауадағы ылғал мен көмірқышқыл газын сіңіреді. Суда жақсы ериді, еру процесі экзотермиялық болып табылады. Балқу температурасы – 318 °С, тығыздығы – 2,13 г/см³. Геополимерлі материалдар синтезінде алюмосиликаттық құрылымдарды бұзып, поликонденсация процесін белсендіру үшін қолданылады. Тәжірибеде 30%-дық сулы ерітінді түрінде қолданылды. Реактив ТОО «Лабхимпром» компаниясынан алынып, ГОСТ 4328-77 талаптарына сай келеді.



6-сурет — Натрий гидроксид ұнтақшалары

Сұйық шыны (жүйелік атауы: натрий силикатының сулы ерітіндісі, $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) — түссіз немесе әлсіз сары түсті тұтқыр сұйықтық. Құрамында кремний диоксиді мен натрий оксиді бар. Тығыздығы шамамен $1,40 \text{ г/см}^3$, ал модулі ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) — 2,5–1. Бұл реагент геополимеризация үдерісінде белсенді кремний көзі ретінде қолданылады және құрылымдық беріктікті арттырады. Сұйық шыны жергілікті өндірушіден алынып, ГОСТ 13078-81 стандартына сәйкес болды.



7-сурет — Сұйық шыны

2.2 Натрий гидроксиді, сұйық әйнек және ұшпа күл негізіндегі геополимер синтездеу әдісі

$$m = C \cdot V \cdot Mr \quad (2)$$

формуласы арқылы есептеп колбаға 40г натрий гидроксиді 100мл дистилденген суға араластыру арқылы, концетрациясы 10М натрий гидроксид расстворын алды. Натрий гидроксидін суға еріту барысында жылу бөлінеді. Температура қалыптасу үшін және натрий гидроксид ұнтағы толық еру үшін 12 сағатқа беті ашық күйде қалдырылды. Сұйық шыны немесе натрий силикатының сулы ертінідісін 3,7 грамм мөлшерде аналитикалық таразыда өлшеп алады. Оны 2,7 грамм мөлшерде тағыда аналитикалық таразымен өлшеп алынған натрий гидроксидімен стаканда қолмен араластырылады. Магниттік араластырғышқа 2-3 минут арасында минутына 300 айналыммен тағыда араластырылады.

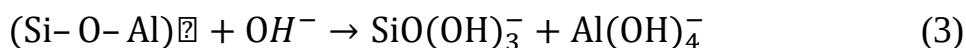
Келесі қадамда аналитикалық таразы көмегімен ұшпа күл 10 грамм мөлшерде өлшеп алынады. Ұшпа күлді стаканға салады. Стакандағы ұшпа күлге сұйық әнекпен натрий гидроксид қосындысын порциялармен 2-3 бөлікке бөліп қосады. Әр сұйық әнекпен натрий гидроксид қосындысының бөлігін құйған сайын қасықпен немесе шпательмен араластырылып отыру керек. Алынған смесь сұйық бірақ қатты қою болмау керек. Смесьті 1-2 минут ішінде силиконда формаға орналастырып, ішіндегі ауа көпіршектерін шығару үшін тығыздау жасайды.

Сұйық әнекпен натрий гидроксид қосындысын порциялармен қосып, тығыздау жасалғаннан кейін, алынған смесьті ауада немесе кептіргіш шкафта кептіру керек болады. Ауада кептіру барысында 20-25 °C 7-28 күн ішінде кептіру керек. Бұл экспериментте кептіргіш шкафта 60-80 °C температурада смесь 4-7 күн кептірілді.

2.3 Натрий гидроксиді, сұйық әнек және ұшпа күл негізіндегі геополимер синтездеу кезінде болатын процесстер

Ұшпа күл аморфты кремний диоксидіне (SiO_2) және алюмосиликаттарға ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) бай болып келеді. Дәл осы фазалар геополимерлену процессіне қатысады. Ұшпа күлдің нақты құрамы жоғарыда келтірілген.

Ұшпа күлге сұйық әнекпен натрий гидроксид қосындысын қосқан барыста алғашынан алюминий силикаттардың деструкция (бұзылуы) басталады



Бұл реакция сілтілік ортада (NaOH ерітіндісінде) ұшпа күл құрамындағы алюмосиликаттардың ($\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ байланыстарының) бұзылуын сипаттайды.

- $(\text{Si}-\text{O}-\text{Al})_n$ — бұл геологиялық түрде табиғатта немесе ұшпа күлде болатын алюмосиликат тізбектері. Олар аморфты (бейтарап пішінді) және суда ерімейді.

- OH^- — натрий гидроксидінен келген гидроксид ионы, өте реакцияға қабілетті.

- Реакция нәтижесінде:

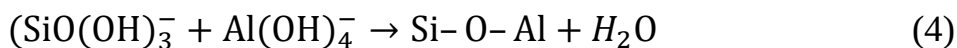
- $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ — кремнийдің суда еритін оксоанионы (силикат ионы).

- $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ — алюминийдің тетра-гидроксид ионы (алюминат ионы).

Бұл екі ион – геополимерленудің бастапқы құрылыс блоктары.

Сілтілік ортада $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ байланыстары гидролизге ұшырайды. Нәтижесінде белсенді кремний және алюминий оксоаниондары түзіледі: силикат-аниондар мен алюминат-аниондар.

Геополимерлену процессі кезінде силикат және алюминат иондарының конденсация құбылысы жүреді. Бұл кезеңде геополимердің үш өлшемді құрылымы түзіледі:



Бұл — геополимеризация процесінің негізгі химиялық реакциясы.

- $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ және $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ — бұлар жоғарыда айтылған активті иондар.

- Олар өзара әрекеттесіп:

- $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ — берік химиялық байланыс түзеді, бұл геополимерлік тордың негізін құрайды.

- Сонымен қатар су (H_2O) бөлінеді — бұл конденсация реакциясы, яғни екі молекула бірігіп, біреуі шығарылады.

Геополимердің гель фазасының түзілуі

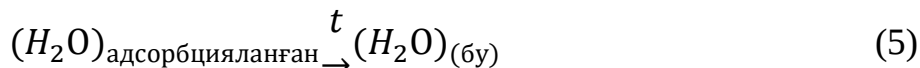


мұндағы, $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}]_n^-$ — бұл алюмосиликаттық желі теріс зарядталған болады.

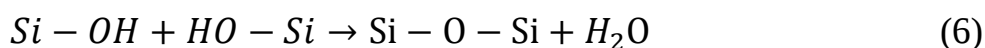
Na^+ немесе K^+ иондары бұл желінің тұрақтылығын сақтап тұрады, яғни олар электростатикалық тепе-теңдікке жауап береді.

Осылайша, гель қатты, берік геополимерлік матрицаға айналады.

80 °C кептіру барысында гель капиллярларында жиналған су бу ретінде шығып кетеді



Су буланып шығып кеткенсоң гель құрылымы нығыздалып тығыздала түседі. Қосымша поликонденсация құбылысы жүреді.

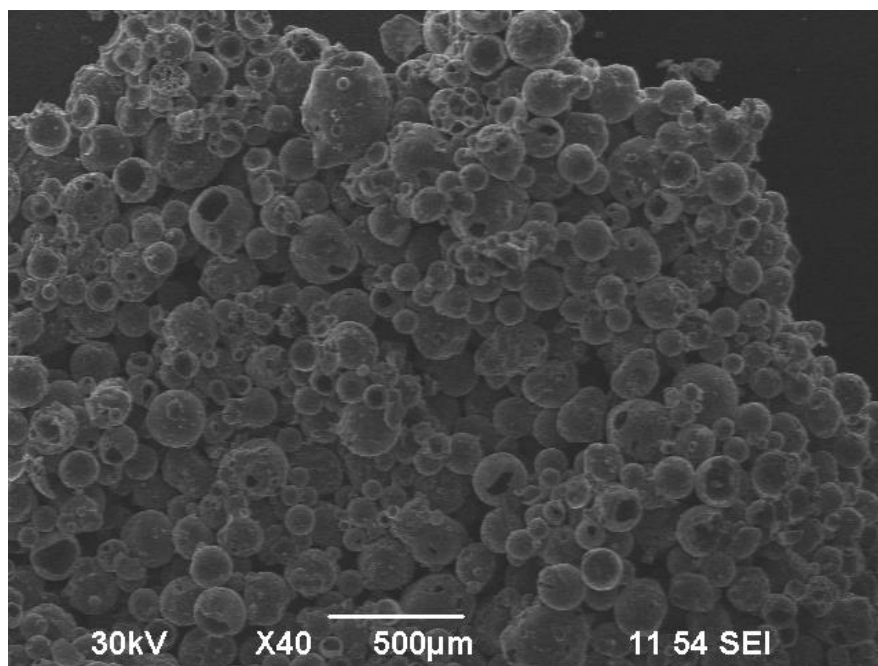


$\text{Si}-\text{OH}$ (силанол топтары) өзара әректесіп, $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ көпірлі байланысын түзеді. Тағыда су бөліну құбылысы жүреді. Геополимерлік гельді қатайтып, қатты әрі берік құрылымға айналдырады.

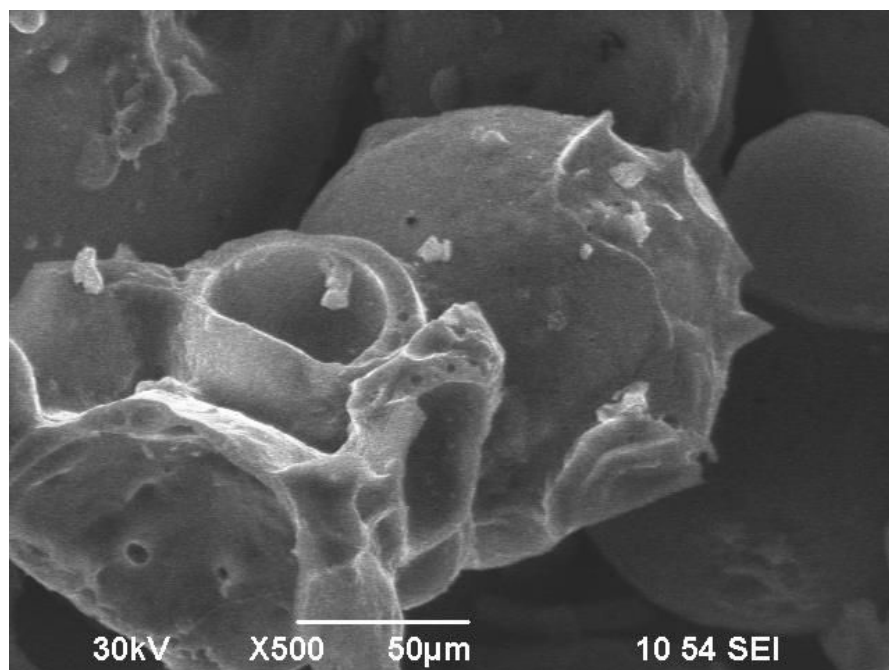
3 НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУЛАР

3.1 СЭМ арқылы алынған суреттер анализі

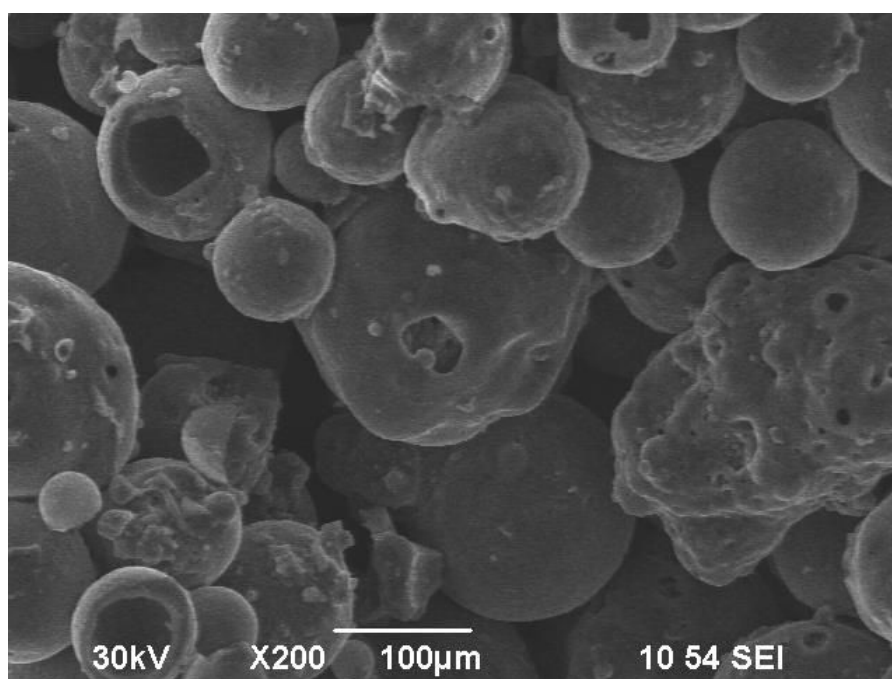
Алынған геополимердің беттік морфологиясы СЭМ арқылы зерттелді. Келтірілген 8 суретте көрініп тұрғандай әртүрлі пішіндегі және өлшемдегі бөлшектер байқалады, олардың кейбіреулерінің беті тегіс, ал кейбіреулерінікі кедір-бұдыр, бұл сілтілік белсендіру реакциясының әртүрлі деңгейде жүргенін көрсетеді. Түрлі пішіндегі қуыстар мен поралар макро- және мезокеуекті құрылымның қалыптасуын көрсетеді, бұл көбінесе ылғалдың булануы немесе қалыптау кезінде жеткіліксіз тығыздалудың нәтижесі болуы мүмкін. Сонымен қатар, реакцияға толық қатыспаған, ұшпа күл қалдық бөлшектері де байқалады. Кейбір аймақтарда бөлшектер арасында гельтәрізді қосылыстар анық көрінеді, бұл натрий-алюмосиликатты гель (N-A-S-H) түзілімінің болуын білдіреді. Жалпы алғанда, алынған геополимер ұшпа күл негізіндегі жүйелерге тән құрылым қалыптастырған және гельдік фаза мен қатты қалдықтардың қатар жүруі байқалады. Келтірілген 9 және 10 суретте микрожарықтар, капиллярлы кеуектер мен натрий-алюмосиликатты гель (N-A-S-H) түзілімдері айқын байқалады, бұл геополимерлік байланыстыру фазасының қалыптасуын дәлелдейді. Сонымен қатар, бастапқы шикізаттан (мүмкін, ұшпа күл немесе металлургиялық шлак) толық реакцияға түспеген бөлшектер де көрініп тұр. Мұндай қалдықтардың болуы құрылымның біртектілігіне теріс әсер етуі мүмкін, бірақ кейбір жағдайда материалдың термиялық және химиялық тұрақтылығын арттырады. Жалпы алғанда, алынған геополимерлік материалда гельдік фаза мен инертті бөлшектер қатар кездесетін типтік кеуекті құрылым қалыптасқаны байқалады.



8-сурет — 40 есе үлкейтілген СЭМ арқылы алынған геополимер суреті

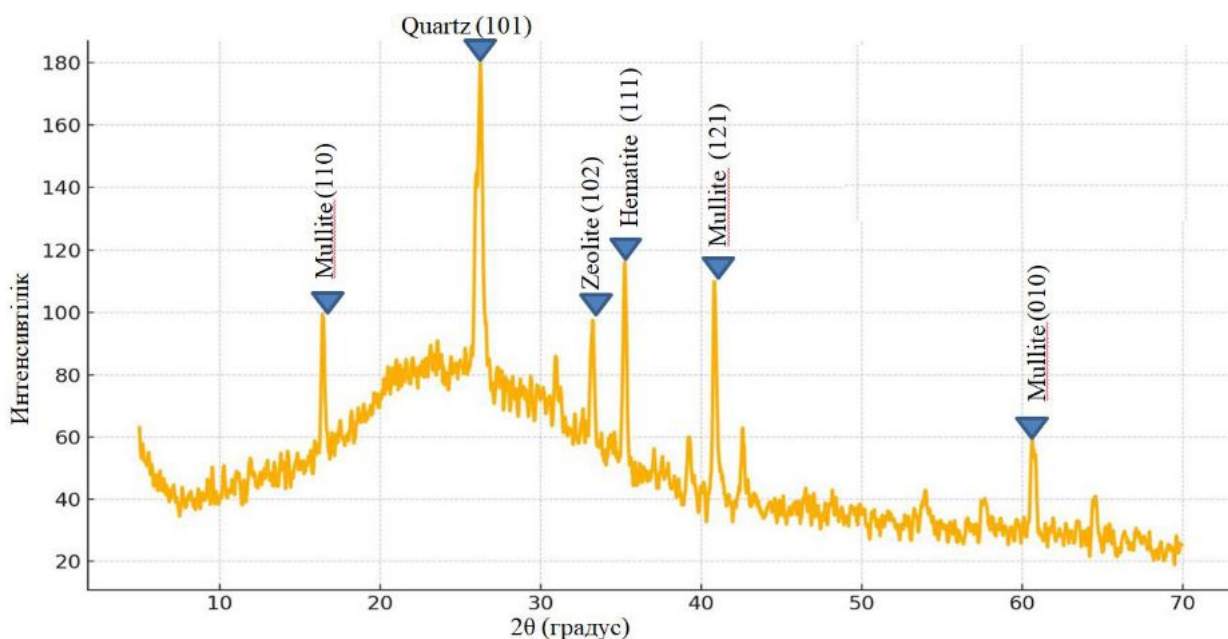


9-сурет — 500 есе үлкейтілген СЭМ арқылы алынған геополимер суреті



10-сурет — 200 есе үлкейтілген СЭМ арқылы алынған геополимер суреті

3.2 Рентгендік дифракция арқылы алынған графика анализі



11-сурет – Ұшпа күл негізіндегі геополимер үлгісінің рентгенографиясы
($2\theta = 5\text{--}70^\circ$ диапазонындағы XRD талдауы)

Рентгендік дифракциялық (XRD) талдау нәтижелері бойынша синтезделген геополимерлік материалдың құрылымында аморфты және кристалдық фазалардың бір мезгілде кездесетіні анықталды. Зерттелген геополимер құрамына ұшпа күл, натрий гидроксиді (NaOH) және натрий силикаты (сұйық шыны) кіреді. Бұл құрамдас бөліктердің негізінде түзілген жүйе сілтілік белсендіру нәтижесінде қатты фазалық өзгерістерге ұшырап, күрделі минералдық құрылым қалыптастырады.

Рентгендік талдау нәтижесінде 2θ бұрышының $10\text{--}40^\circ$ аралығында кең таралған қарқынды шоғыр байқалады, бұл аморфты фазаның, дәлірек айтқанда натрий алюмосиликат гидратының (N-A-S-H) түзілуімен түсіндіріледі. Аталған гель фазасы геополимерлі жүйенің негізгі біріктіруші құрамдас бөлігі болып табылады және оның механикалық әрі физика-химиялық қасиеттеріне тікелей әсер етеді.

Сонымен қатар, рентгендік үлгіде бірнеше нақты кристалдық фазалар анықталды. 26.5° 2θ мәнінде тіркелген шоғыр кварц (SiO_2) минералына сәйкес келеді, ол ұшпа күлдің бастапқы құрамында кездеседі. $30\text{--}31^\circ$ аралығында байқалатын шоғырлар цеолиттер тобына жататын минералдардың (гейландит, анальцим) болуын көрсетеді. Бұл фазалар сілтілік ортада екінші реттік химиялық әрекеттесулер нәтижесінде түзіледі. 33° 2θ маңындағы шоғыр муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) кристалдық фазасына сәйкес келеді, ол жоғары температураның әсерінен пайда болған жылуға төзімді алюмосиликат құрылымын білдіреді. Көрініп тұрғандай $36\text{--}38^\circ$ аймағында гематит (Fe_2O_3) минералының, ал $50\text{--}55^\circ$

аралығында кальцит (CaCO_3) және қосымша кварц фазаларының бар екеніне дәлел болатын шоғырлар тіркелді. Толық шоғырлармен оларға сәйкес фазалар 4-кестеде көрсетілген.

Анықталған кристалдық фазалар ұшпа күлдің бастапқы құрамында сақталған немесе сілтілік белсендіру процесі кезінде қайта түзілген. Бұл фазалық құрам геополимердің құрылымдық тұрғыдан әртекті екенін дәлелдейді және оның беріктік, жылуға төзімділік, химиялық төзімділік сияқты негізгі сипаттамаларын анықтайды.

Жалпы алғанда, рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері геополимерлік материалдың құрылымы көп фазалы жүйеден тұратынын көрсетті. Материалдың негізін аморфты алюмосиликат гелі құрайды, ал кристалдық фазалар оның беріктігін, тұрақтылығын және ұзақ мерзімді қызмет ету қабілетін қамтамасыз ететін маңызды құрылымдық элементтер ретінде қызмет атқарады.

4-кесте – Геополимердің фазалық құрамы

№	2θ (°)	Минерал / Фаза	Индекстер (hkl)	Шығу тегі / Түсініктеме
1	16.41–16.46	Муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	(120)/(210)	Жоғары температурада пайда болатын термостабильді фаза
2	22.02	Кальцит (CaCO_3)	(012)	Қалдық немесе карбонизация нәтижесі
3	23.40–23.77	Кварц (SiO_2)	(100)/(101)	Ұшпа күлдің құрамындағы бастапқы фаза
4	25.64–25.92	Кварц / Апатит / Кальцит	(002)/(112)/(220)	Қоспалар арқылы түзілген
5	26.33–26.5	Кварц (SiO_2)	(002)	Негізгі фаза, жиі ұшпа күлде болады
6	30–31	Цеолиттер (гейландит, анальцим)	әтүрлі	Сілтілік ортада екінші реттік түзілімдер
7	33.0	Муллит	(121)/(031)	Термиялық тұрақты алюмосиликат
8	36–38	Гематит (Fe_2O_3)	(104)/(110)	Тотыққан темірдің болуы
9	50–55	Кальцит және кварц	(104)/(202)/(211)	Екі фаза да бірдей шоғырларда кездесуі мүмкін

ҚОРЫТЫНДЫ

Дипломдық жұмысты қорытындылай келе, біз геополимер алу әдістерін, негізгі шикі зат ретінде қолданатын тау-кен металлургия қалдықтарын және де белсендіргіш материалдарды зерттедік. Алынған геополимердің СЭМ арқылы алынған беттік морфологиясын зерттей отырып оның натрий-алюмосиликатты гель фазасы мен реакцияға түспеген инертті бөлшектер қатар кездесетін, кеуекті әрі гетерогенді құрылым қалыптасқаны анықталды. XRD талдау нәтижелері геополимерлік материалдың аморфты N-A-S-H гелі негізінде түзілген көп фазалы құрылымға ие екенін көрсетті; құрамында кварц, муллит, гематит, кальцит және цеолит тәрізді кристалдық фазалар бар, бұл оның беріктігі мен химиялық тұрақтылығын арттырады. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер ұшпа күл мен тау-кен металлургиялық қалдықтар негізінде геополимерлік материалдарды тиімді синтездеуге болатынын және олардың құрылымдық-функционалдық қасиеттерін әрі қарай жетілдіру үшін перспективалы негіз екенін көрсетті.

ҚЫСҚАРТЫЛҒАН СӨЗДЕР

СЭМ – Сканерлейтін электрондық микроскопия

XRD – Рентгендік дифракциялық талдау (X-ray Diffraction)

NaOH – Натрий гидроксиді

N-A-S-H – Натрий-алюмосиликат гидраты (Natrium-Aluminosilicate Hydrate)

Al₂O₃ – Алюминий оксиді

SiO₂ – Кремний диоксиді (кварц)

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. MINEX Kazakhstan. Mining and metallurgical contributed 26% of industrial production in Kazakhstan [Electronic resource]. – 2023. – Access: <https://2023.minexkazakhstan.com/> (accessed: 01.05.2025).
2. The Astana Times. Kazakhstan to Tackle Gaps in Waste Management With Strategy Due by September [Electronic resource]. – 2025. – Access: <https://astanatimes.com/> (accessed: 01.05.2025).
3. MINEX Forum. Kazakhstan faces challenges in processing mining and metallurgical waste [Electronic resource]. – 2024. – Access: <https://social.minexforum.com/> (accessed: 01.05.2025).
4. KazTAG News. Kazakhstan recycles only 11% of annual mineral waste output [Electronic resource]. – 2024. – Access: <https://kaztag.info/> (accessed: 01.05.2025).
5. BP Statistical Review of World Energy 2023. – London: BP Global, 2023.
6. REN21. Renewables 2023 Global Status Report. – Paris: REN21 Secretariat, 2023.
7. Scrivener K. L., John V. M., Gartner E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and concrete Research. – 2018. – T. 114. – C. 2-26.
8. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2020 // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13. – P. 1795–1839.
9. Gartner E., Hirao H. A review of alternative materials for reducing CO₂ emissions associated with cement production // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78. – P. 126–142.
10. Duxson P., van Deventer J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42. – P. 2917–2933.
11. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. – 5th ed. – Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020.
12. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’ // Cement and Concrete Research. – 2007. – Vol. 37. – P. 1590–1597.
13. Allahverdi A., Kani E.N. Application of geopolymer technology to waste treatment: A review // Int. Journal of Environmental Science and Technology. – 2019. – Vol. 16. – P. 3057–3070.
14. Provis J.L., van Deventer J.S.J. Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.
15. Shi C., Jiménez A.F., Palomo A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41. – P. 750–763.
16. Fernández-Jiménez A., Palomo A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure // Microporous and Mesoporous Materials. – 2005. – Vol. 86. – P. 207–214.

17. van Jaarsveld J.G.S., van Deventer J.S.J. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymer // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1999. – Vol. 38. – P. 3932–3941.
18. Davidovits J. *Geopolymer Science and Technics*. – Technical Paper. – Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2013.
19. Panda B., Ruan S., Unluer C. 3D printing of geopolymer concrete for sustainable construction: A review // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 195. – P. 515–529.
20. Shi C., Krivenko P.V., Roy D. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. – London: Taylor & Francis, 2006.
21. Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J.P., Jalali S. Investigations on mix design of tungsten mine waste geopolymeric binder // *Construction and Building Materials*. – 2008. – Vol. 22. – P. 1939–1949.
22. Chindaprasirt P., Chareerat T., Siricicatanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer // *Cement and Concrete Composites*. – 2007. – Vol. 29(3). – P. 224–229.
23. Cheng T.W., Chiu J.P. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag // *Minerals Engineering*. – 2003. – Vol. 16. – P. 205–210.
24. Duxson P., Lukey G.C., Separovic F., Van Deventer J.S.J. Effect of alkali cations on aluminum incorporation in geopolymeric gels // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2005. – Vol. 44. – P. 832–839.
25. Silva P.D., Sagoe-Crenstil K., Sirivivatnanon V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – Vol. 37. – P. 512–518.
26. Ahmari S. *Recycling and Reuse of Wastes as Construction Material Through Geopolymerization*. – PhD Thesis.





ДИПЛОМ

II степени

Международной научно-практической конференции, посвященной
90-летию со дня рождения крупного ученого, педагога, академика НАН РК,
Заслуженного деятеля Республики Казахстан, доктора технических наук, профессора,
почетного ректора КазНТУ имени К.И. Сатпаева, Баяна Ракишева
«РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИНЕРАЛЬНО-ИНДУСТРИАЛЬНОМ
МЕГАКОМПЛЕКСЕ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ»

Анефия Нұрдос Нұржанұлы

Секция: Наноматериалы и нанотехнологии



М. Бегендиев

2024



СЕРТИФИКАТ

подтверждает, что

Анефия Нурдос

Принял (-а) участие в Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения крупного ученого, педагога, академика НАН РК, Заслуженного деятеля Республики Казахстан, доктора технических наук, профессора, почетного ректора КазНТУ имени К.И. Сатпаева,

Баяна Ракишева

«РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИНЕРАЛЬНО-ИНДУСТРИАЛЬНОМ
МЕГАКОМПЛЕКСЕ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ»

*Проректор по науке
и корпоративному развитию*



2024

Е. Кulydеев

