

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты

Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы

Смағұлова Сабина Абайқызы

ҰШПА КҮЛ НЕГІЗІНДЕГІ ГЕОПОЛИМЕРЛЕРГЕ БОР ҚЫШҚЫЛЫНЫҢ ӘСЕРІН
ЗЕРТТЕУ

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Мамандығы: 6B07116– «Негізгі өндірістер технологиясы және жаңа материалдар»

Алматы 2025

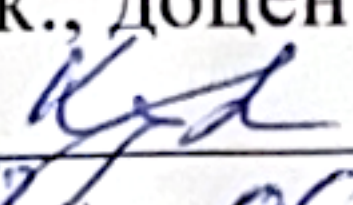
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық емес
акционерлік қоғамы

О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институты

«Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология» кафедрасы

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
«Химиялық процестер және
өнеркәсіптік экология» кафедра
меңгерушісі
Т.Ғ.К., доцент
 Кубекова Ш.Н.
«13» 06 2025 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

«Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу» тақырыбында

6B07116 — «Негізгі өндіріс технологиясы және жаңа материалдар»

Орындаған

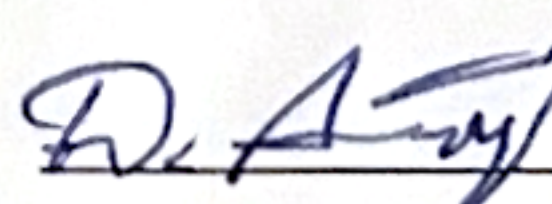
Смағұлова.С.А.

Рецензент

Ғылыми жетекші

« Ә.Б. Бектұров атындағы
ХФИ» АҚ
Ж.Ғ.Қ., Т.Ғ.К.,
қауымдастырылған
профессор
 Кайынбаева Р.А.

Т.Ғ.М., аға-оқытушы

 Далбанбай А.

«09» 06 2025 ж.

«13» 06 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты

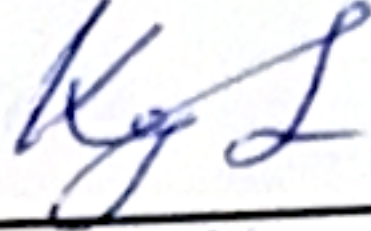
Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы

6B07116– «Негізгі өндірістер технологиясы және жаңа материалдар»

БЕКІТЕМІН

Химиялық процестер және
өнеркәсіптік экология кафедрасы

меңгерушісі

 Кубекова Ш.Н.
«13» 06 2025ж.

**Дипломдық жұмысты орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Смағұлова Сабина Абайқызы

Тақырыбы: Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу

Университет Академиялық мәселелер жөніндегі проректорының 2025 жылғы 29 қаңтардағы № «26-П/Ө» бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі: 13.06.2025 жыл.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі

- a) Алматы жылу орталығынан алынған ұшпа күл негізінде геополимерлік материалдар синтездеу кезінде бор қышқылының (H_3BO_3) әсерін анықтау
- b) $NaOH$ және KOH сілтілік активаторларының үлгілердің құрылымдық беріктігіне және морфологиясына әсерін зерттеу.
- c) Ұшпа күлдің физика-химиялық құрамын және геополимеризацияға бейімділігін анықтау;
- d) Бор қышқылы (B_5 , B_{15}), $NaOH$ және KOH қолданылған үлгілердің термиялық өңдеу кезінде жүретін өзгерістерін бақылау;
- e) FTIR спектроскопиялық зерттеу арқылы үлгілердегі химиялық байланыстар мен құрылым ерекшеліктерін сипаттау.
- f) XRD, SEM, FTIR, TGA/DSC сынды заманауи аналитикалық әдістер арқылы алынған геополимерлердің құрылымдық және морфологиялық ерекшеліктерін толық зерттеу

Ұсынылатын негізгі әдебиет

- [1] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 1991. – Vol. 37, № 8. – P. 1633–1656.
- [2] Aleem M. I. A., Arumairaj P. D. Geopolymer concrete – a review // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. – 2012. – Vol. 1, № 2. – P. 118–122.
- [3] Rangan B. V. Geopolymer concrete for environmental protection // The Indian Concrete Journal. – 2014. – Vol. 88, № 4. – P. 41–59.
- [4] Salas D. A., et al. Life cycle assessment of geopolymer concrete // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 190. – P. 170–177.

[5] Parathi S., Nagarajan P., Pallikkara S. A. Eco-friendly geopolymers concrete: a comprehensive review // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2021. – Vol. 23. – P. 1701–1713.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлім атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімі	Ескерту
Әдебиеттерді шолу және зерттеу мақсатын қалыптастыру	24.01.2025	орындағым Д. Далбанбай
Эксперимент жүргізу және мәліметтер жинау	11.04.2025	орындағым. Д. Далбанбай
Қорытындылау, талдау және рәсімдеу	02.06.2025	орындағым Д. Далбанбай

Дипломдық жоба бөлімдерінің кеңесшілері мен
норма бақылаушысының аяқталған жобаға қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолтаңба
Нормалық бақылаушы	Далбанбай А., аға оқытушы, техника ғылымдарының магистрі	13.06.2025	Д. Далбанбай

Ғылыми жетекші Д. Далбанбай А. Далбанбай

Тапсырманы орындауға алған білім алушы _____ С.А. Смағұлова

Күні «13» 06 2025ж.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста ұшпа күл негізіндегі геополимерлік материалдарға бор қышқылының әсері зерттелді. Жұмыстың мақсаты — бор қышқылының концентрациясы мен термиялық өңдеу температурасының геополимерлердің құрылымдық және механикалық қасиеттеріне әсерін анықтау. Зерттеу барысында NaOH және KOH сілтілік активаторлары қолданылып, алынған үлгілердің морфологиясы, термиялық тұрақтылығы мен химиялық байланыстары SEM, XRD, FTIR және TGA/DSC әдістерімен кешенді түрде талданды. Нәтижелер бор қышқылының геополимер торын нығайтып, материалдың термиялық және химиялық төзімділігін арттыратынын көрсетті.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе исследовано влияние борной кислоты на геополимерные материалы, полученные на основе золы уноса. Цель исследования — определить, как концентрация борной кислоты и температура термообработки влияют на структурные и механические свойства геополимеров. Использовались щелочные активаторы NaOH и KOH, а полученные образцы анализировались методами SEM, XRD, FTIR и TGA/DSC. Результаты показали, что борная кислота способствует укреплению геополимерной решётки и повышает термическую и химическую стойкость материала.

ANNOTATION

This thesis investigates the effect of boric acid on fly ash-based geopolymer materials. The aim is to assess how boric acid concentration and thermal treatment temperature influence the structural and mechanical properties of the geopolymers. NaOH and KOH were used as alkaline activators, and the resulting samples were comprehensively analyzed using SEM, XRD, FTIR, and TGA/DSC methods. The results showed that boric acid strengthens the geopolymer network and improves the thermal and chemical resistance of the material.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	7
1 Әдеби шолу	8
1.1 Геополимерлер туралы жалпы мәлімет	8
1.2 Ұшпа күл – геополимердің шикізаты ретінде	8
1.3 Геополимерлік байланыстар және фазалық құрылымдар	9
1.4 Сілтілік активаторлар және олардың әсері (NaOH, KOH және баламалар)	11
1.5 Бор қышқылының геополимерлерге әсері	12
1.6 Ұшпа күлді активтендіру температурасының геополимердің қасиетіне әсері	14
1.7 Қорытынды және болашақ бағыттар	16
2 Эксперименттік бөлім	18
2.1 Қолданылған материалдар	18
2.2 Геополимерді дайындау және зерттеу әдістері	18
2.3 Ұшпа күлден геополимер алудың технологиялық басқыштары	19
3 Зерттеу нәтижелері мен оның талқылануы	21
3.1 Ұшпа күлдің құрамын сипаттау	21
3.2 Геополимерді алу және оның беріктілі қасиетін зерттеу	26
3.3 Геополимерді алуға қолданылатын активаторлардың әсері	27
3.4 Геополимерді механикалық белсендіру уақытының өнім қасиетіне әсері	29
3.5 Геополимерді механикалық белсендіру уақытының өнім қасиетіне әсері	29
3.6 Геополимерді механикалық белсендіру уақытының өнім қасиетіне әсері	31
3.7 Алынған геополимерлердің термиялық қасиеттерін зерттеу	34
Қорытынды	37
Пайдаланылғын әдебиеттер	38

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда құрылыс және экологиялық инженерия саласында ресурсты үнемдейтін, қоршаған ортаға зияны аз, әрі механикалық тұрғыдан берік жаңа материалдар жасау өзекті мәселелердің бірі. Дәстүрлі портландцемент өндірісі атмосфераға мол мөлшерде көмірқышқыл газын шығарады және табиғи ресурстарды көп тұтынады, бұл экологиялық тұрақтылыққа кері әсерін тигізеді. Осы тұрғыдан алғанда, геополимерлік материалдар — балама әрі экологиялық тиімді шешімдердің бірі ретінде кеңінен зерттелуде.

Геополимерлер — алюмосиликат негізіндегі бейорганикалық материалдар, олар сілтілік ортада жүретін поликонденсация реакциялары нәтижесінде қатты құрылымға айналады. Геополимер өндірісінде табиғи немесе техногендік шикізат ретінде ұшпа күл, металлургиялық шлактар және басқа да өндірістік қалдықтар жиі қолданысқа ие. Бұл тәсіл бір жағынан қалдықтарды қайта өңдеу арқылы экологиялық мәселелерді шешуге сеп болса, екінші жағынан арзан әрі қолжетімді шикізат көздерін пайдалануға мүмкіндік береді.

Ұшпа күл — Қазақстандағы жылу электр станцияларында (ЖЭС) молынан кездесетін техногендік қалдықтардың бірі болып табылады. Оның құрамында кремний мен алюминий оксидтері басым болғандықтан, геополимерлік байланыстырушы ретінде қолдануға тиімді. Алайда, ұшпа күлдің құрылымы мен белсенділігі әртүрлі болуы мүмкін. Сол себепті оның химиялық және фазалық құрамын өзгерту немесе модификациялау арқылы геополимер қасиеттерін оңтайландыру қажеттілігі туындайды.

Соңғы жылдары бор қышқылының геополимерлер құрылымына әсерін зерттеу қызығушылық тудыруда. Бор иондары алюмосиликат торына кіріге отырып, материалдың термиялық және химиялық төзімділігін арттыра алады. Сонымен қатар, бор қышқылының белгілі температурада B_2O_3 фазасына өтіп, алюмосиликат құрылымымен байланысуы нәтижесінде геополимерлік тор нығаяды.

Осы дипломдық жұмыстың мақсаты — ұшпа күл негізінде алынатын геополимерлерге бор қышқылының концентрациясы мен жылулық өңдеу температурасының әсерін зерттеу. Бұл үшін күл мен бор қышқылы қоспаларына механоактивация және күйдіру процестері қолданылып, алынған өнімдердің морфологиясы, термиялық тұрақтылығы және механикалық беріктігі кешенді түрде бағаланды.

1 ӘДЕБИ ШОЛУ

1.1 Геополимерлер туралы жалпы мәлімет

Геополимерлер – Қазіргі таңда экологиялық таза құрылыс материалдарының ретінде танылып отырған бейорганикалық полимерлердің жаңа класы. Осы ұғым ең алғаш француз ғалымы Joseph Davidovits еңбектерінде пайда болған [1-2]. Геополимерлер сілтілік активтендірілген алюмосиликат негізіндегі материалдар болып табылады және кремний-алюминий оксидтері мен сілтілік ерітінділердің арасындағы химиялық реакциялар арқылы алынады. Органикалық байланыстар геополимерлер құрамында болмайды, сол себепті оларды жоғары температураға, химиялық және механикалық әсерлерге төзімді.

Геополимерлердің артықшылықтарына мыналар жатқызуға болады:

- Төмен көміртекті ізі –климаттың өзгеруіне әсер ететін парниктің газдардың азаю себебі, геополимерлерді өндіру барысында цемент өндірісіне қарағанда CO_2 газының бөлінуі 50–80% төмен болады, сол себепті газдардың азаюына ықпал етеді [3].

- Қышқылға, сілтіге және жоғары температураға төзімділік – геополимерлерді агрессивті орталарда және жоғары температура жағдайында қолдануға мүмкіндік береді, мысалы, химиялық зауыттарда немесе өнеркәсіптік пештерде.

- Ұзақ уақытқа төзімді механикалық беріктік – геополимерлер уақыт өте келе механикалық қасиеттерін сақтайды, сол себепті оларды тұрақты құрылыс конструкцияларында пайдалануға мүмкіндік береді екен.

- Шикізат ретінде өнеркәсіптік қалдықтарды (мысалы, ұшпа күл, шлак) қолдану мүмкіндігі – бұл өндірістік қалдықтарды кәдеге жарату арқылы тұрақты даму талаптарына сай өнім алуға және экологиялық жүктемені азайтуға жағдай жасайды [4].

Геополимеризация процесі алюмосиликаттық компоненттердің сілтілік ортада еріп, поли(силикат) гельдерге айналуы арқылы жүзеге асады [5]. Бұл гель кейінірек үшөлшемді тор құрылымға өтіп, қатайған материал түзеді.

Үш негізгі типке бөлінетін геополимерлер түрі:

- N-A-S-H (натрий алюмосиликат гидрогелі)
- K-A-S-H (калий алюмосиликат гидрогелі)
- C-A-S-H (кальций алюмосиликат гидрогелі)

1.2 Ұшпа күл – геополимердің шикізаты ретінде

Ұшпа күл – көмір жағатын жылу электр станцияларында (ЖЭС) пайда болатын ең көп таралған өнеркәсіптік қалдықтардың бірі болып табылады [6]. Ұшпа күлдің негізгі компоненттері:

- Кремний диоксиді (SiO_2)
- Алюминий оксиді (Al_2O_3)

- Темір оксиді (Fe_2O_3)
- Кальций оксиді (CaO)
- Магний оксиді (MgO)

Онымен қоса, күл құрамында титаний (Ti), ванадий (V), хром (Cr), мырыш (Zn), стронций (Sr), барий (Ba), тіпті өте сирек кездесетін элементтер – лантан (La), церий (Ce), иттрий (Y) сияқты микроэлементтер де кездесуі мүмкін [8]. Осы элементтердің мөлшері аз болғанымен, олар геополимеризация процесіне әсер етіп, өнімнің түпкі қасиеттерін өзгеріс береді. Мысал ретінде қарастыратын болсақ, Fe_2O_3 мөлшері жоғары күлдерден алынған геополимерлер қоңыр-сұр немесе қызыл түске боялуы мүмкін және оларды жол құрылысында, ауыр жүктемеге төзімді блоктар жасауға немесе пигмент ретінде қолдануға болады [9].

Күлдің морфологиясы негізінен сферикалық пішінді, шыны тәрізді бөлшектерден құралған [10]. Бұл морфология оның сілтілік ерітінділерде тез әрі оңай еруіне және геополимеризация процесіне бейімділігін арттырады. Ұшпа күлдің мол қоры Қазақстанда да кездеседі. Әрбір ірі ЖЭС жыл сайын мыңдаған тонна күл қалдықтарын шығарады [11].

Геополимер алу үшін күлдің кремний мен алюминийге бай, аморфты фаза үлесі жоғары болғаны дұрыс [12]. Si/Al қатынасы 2-ден 4-ке дейін болса, беріктік пен тығыздық жоғары болып келеді. Сонымен қатар, CaO мөлшері жоғары болған жағдайда, бұл геополимеризация процесіне кедергі келтіруі мүмкін, себебі кальций қатысқан жағдайда C-A-S-H типті фазалар түзіліп, N-A-S-H гелінің тұрақты түзілуіне бөгет болады. Мұндай жағдайда кальцийдің артық мөлшерін бейтараптау үшін сілтілік ерітінділердің концентрациясын реттеп немесе алдын ала өңдеу керек.

Күлдің реакциялық қабілеті оның құрамындағы аморфтық фаза үлесіне және алюмосиликат қатынасына (Si/Al молекулалық қатынасы) байланысты [13]. Күлдің құрамында аморфтық фазаның мөлшері неғұрлым жоғары болса, соғұрлым геополимерлеу процесі жылдам және толық жүреді.

1.3 Геополимерлік байланыстар және фазалық құрылымдар

Геополимеризация — алюмосиликатты шикізат пен сілтілік еріткіштер арасындағы күрделі химиялық әрекеттесу нәтижесінде жүретін көпсатылы процесс [14]. Бұл үдерісте бастапқы компоненттер өзара реакцияға түсіп, кеңістіктік ұйымдасқан үшөлшемді құрылымды гель тәрізді жүйеге айналады, ал кейіннен бұл гель қатайып, берік қатты геополимерлік материал түзіледі [15]. Реакция барысында молекулааралық және құрылымдық байланыстар қалыптасады. Геополимерлік құрылым негізінен алюмосиликат торынан тұрады, мұндағы SiO_4 және AlO_4 тетраэдрлері оттегі атомдары арқылы өзара жалғасып, кеңістікте полимерлік тор түзеді [16].

Құрылымда жиі кездесетін негізгі байланыс түрлеріне төмендегілер жатады:

- Si–O–Si – бұл байланыс материалдың жоғары механикалық беріктігі мен химиялық тұрақтылығын қамтамасыз етеді;
- Si–O–Al – геополимер торының басты элементтерінің бірі;
- Al–O–Al – сирек кездесетін байланыс, бірақ ол құрылымға белгілі бір икемділік береді.

Тетраэдрлік Al^{3+} иондарының теріс заряды әдетте натрий (Na^+) немесе калий (K^+) катиондары арқылы бейтараптандырылады, бұл иондар гель фазасының құрылымдық тұрақтылығына үлес қосады [17]. Геополимер түзілу барысында негізгі фазалық компонент ретінде аморфты гель қалыптасады. Ол көбіне N-A-S-H (натрий алюмосиликат гидраты), K-A-S-H (калий алюмосиликат гидраты) немесе C-A-S-H (кальций алюмосиликат гидраты) түрінде кездеседі [18].

Геополимерлік жүйеде екі түрлі құрылым фазасы қалыптасуы мүмкін:

- Аморфты немесе шынытәрізді құрылымдар – бұл фаза жоғары беріктік пен химиялық төзімділікке ие, және ұзақ мерзімді жүктемелер мен температуралық әсерлерге төтеп бере алады;
- Кристалдық фазалар – көбінесе кейінгі сатыларда немесе қыздырудан кейін пайда болады. Бұған содалит, гейленит немесе фельдшпат сынды минералдар жатады. Мұндай фазалар гель тығыздалған кезде немесе термоөңдеу нәтижесінде қалыптасады [19].

Геополимеризация үдерісі бірнеше негізгі кезеңнен тұрады. Алғашқысы — гидролиз, мұнда алюмосиликат бөлшектері сілтілік ортада ери бастайды:

- Si және Al элементтері ион түрінде ерітіндіге өтеді;
- бұл иондар полимерленіп, ірі молекулалық құрылымдарға бірігеді;
- нәтижесінде гель тәрізді масса түзіледі;
- бұл масса қатайып, кеңістіктік полимерлі тор құрылымына айналады [20].

Осы үдерістің жылдамдығы мен тиімділігі сілті концентрациясына, температуралық жағдайға, Si/Al қатынасына және бастапқы шикізаттың физикалық пішініне байланысты өзгеріп отырады.

Түзілген гель фазасының морфологиясы көбіне талшықты, иілімді немесе губкаға ұқсас сипатта болады. Мұндай құрылым суды сіңіру мен қайта шығару қабілетіне ие, бұл материалдың кеуектілігі мен беріктік сипаттамаларын анықтайды. Температура артқан сайын және реакция уақыты ұзарған жағдайда, бұл гель фазасы тығыздалып, микрокристалдық құрылымдарға өтуі мүмкін. Мұндай өзгеріс материалдың құрылымдық реттелуін жақсартып, беріктігін арттырады.

Қалыптасқан құрылымдар мен фаза түрлерін рентгендік дифракция (XRD), инфрақызыл спектроскопия (FTIR), және сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) сияқты жоғары дәлдікті аналитикалық әдістер арқылы сипаттауға болады. Бұл тәсілдер материалдың ішкі құрылымын анықтап, оның физика-химиялық қасиеттерін болжауға мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, геополимерлік материалдың соңғы қасиеттері оның ішкі тор құрылымының сипатына және фазалық құрамына тікелей байланысты. Жоғары сапалы өнім алу үшін, мысалы, N-A-S-H типтес гельдердің толық түзілуіне қолайлы жағдайларды қамтамасыз ету қажет. Қосымша компоненттер, соның ішінде бор қышқылы, осы құрылымға әсер ету арқылы немесе жаңа фазалық ауысуларды қоздыра отырып, материалдың қасиеттерін айтарлықтай өзгертуі мүмкін.

1.4 Сілтілік активаторлар және олардың әсері (NaOH, KOH және баламалар)

Геополимеризация процесінде сілтілік активаторлардың рөлі ерекше. Олар алюмосиликат материалдарының (мысалы, ұшпа күл) Si–O және Al–O байланыстарын үзіп, кремний мен алюминийдің иондық түрлерге өтіп, одан әрі полимерленуіне мүмкіндік береді [21]. Нәтижесінде үшөлшемді геополимерлік торлар пайда болады. Белгілі және кең қолданылатын активаторлар — NaOH (натрий гидроксиді), KOH (калий гидроксиді), Na_2SiO_3 (сілтілік сілтілі силикат), бірақ соңғы жылдары басқа да баламалы және экологиялық қауіпсіз белсенді заттарға қызығушылық артып отыр.

NaOH (натрий гидроксиді) – ең жиі қолданылатын сілті. Ол ұшпа күл құрамындағы аморфты алюмосиликаттарды тиімді ерітеді [22]. Ерітіндіде алюминий мен кремний тотығы иондары пайда болып, одан әрі поликонденсацияланады. NaOH негізінде N-A-S-H (натрий алюмосиликат гидрат) гелі түзіледі. Мұндай құрылым жоғары беріктік пен тығыздыққа ие болады.

KOH (калий гидроксиді) – NaOH-пен салыстырғанда әлсіздеу сілті, бірақ калий иондарының үлкен радиусы гель құрылымын икемдірек етеді [23]. Бұл өз кезегінде термиялық және химиялық тұрақтылыққа оң әсер етеді. KOH негізінде K-A-S-H типті гельдер түзіледі.

Na_2SiO_3 (натрий силикат) – бұл активатор көбінесе NaOH-пен бірге қосылып, геополимерлеу процесінің кинетикасын жақсартады [24]. Ол геополимерге қосымша кремний көзі болып табылады.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (кальций гидроксиді) — дәстүрлі портландцемент өндірісінде қолданылатын сілті [25]. Бірақ ол таза геополимерлік жүйе үшін тиімді активатор емес, себебі кальцийдің артық мөлшері N-A-S-H құрылымының орнына C-A-S-H (кальций алюмосиликат гидрат) фазасын түзуге бейім. Бұл гель құрылымының тұрақтылығына теріс әсер етіп, ұзақ мерзімді беріктік пен химиялық төзімділікті төмендетуі мүмкін. Алайда белгілі бір пропорцияда қолданған жағдайда кальций фаза тұрақтандырғыш ретінде қызмет ете алады.

Альтернативті активаторлар:

– Na_2CO_3 (натрий карбонаты) – экологиялық тұрғыдан қауіпсіз, салыстырмалы түрде арзан. Бірақ оның реакция жылдамдығы төмен және қату процесі ұзаққа созылады.

– K_2CO_3 (калий карбонаты) – калий негізіндегі балама, сонымен қатар баяу әрекет етеді, бірақ қоршаған ортаға қауіпсіз.

– Na_2SO_4 (натрий сульфаты) – сілтілі емес активатор ретінде аралас жүйелерде қолданылады.

– Шарпылған сілтілік силикаттар – төмен температурада тиімді қатайып, құрылым түзуге қабілетті [26].

Температура әсері: Температура – геополимеризация процесінің екінші негізгі факторы [27]. Температураны 200–600°C аралығында арттырғанда гель фазасының тығыздалуы, поликонденсация тереңдігі, кристалдану деңгейі жоғарылайды. Бұл әсіресе төмен реакциялық белсенділігі бар активаторлармен жұмыс істегенде маңызды.

Активаторды таңдаудағы негізгі факторлар:

- Сілтілік индекс (молярлық концентрация)
- Еріткіш түрі (су, этанол, т.б.)
- Қосымша кремний немесе алюминий көзі (мысалы, метакаолин)
- Қатты/сұйық қатынасы (S/L)
- Активатордың экологиялық қауіпсіздігі мен құны

NaOH және KOH геополимерлеудің ең тиімді сілтілік активаторлары болып қала бермек. Бірақ экологиялық және экономикалық тұрғыдан Na_2CO_3 , $Ca(OH)_2$ секілді баламалар да зерттелу үстінде. Геополимерлік жүйелердің әртүрлілігіне байланысты, активаторды таңдау шикізаттың құрамына, қолдану мақсатына және талап етілетін қасиеттерге байланысты жүргізілуі қажет. Сонымен қатар, құрамында кальций көп жүйелер үшін C-A-S-H және N-A-S-H фазаларының тепе-теңдігін бақылау маңызды.

1.5 Бор қышқылының геополимерлерге әсері

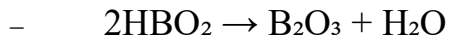
Бор қышқылы (H_3BO_3) – бейорганикалық химияда кеңінен қолданылатын әлсіз қышқыл, ол су ерітіндісінде $B(OH)_3$ немесе BOH_3 түрінде болады [28]. Геополимерлік жүйелерде бордың қолданылуы соңғы онжылдықта зерттеліп келе жатқан өзекті тақырыптардың бірі [29]. Бордың негізгі артықшылығы – оның алюмосиликат құрылымына ерекше түрде кіріге алуы. Бор иондары (BO_3 немесе BO_4) Si және Al тетраэдрлік ортасына еніп, полимерлік тордың беріктігіне, қышқылға төзімділігіне, термиялық тұрақтылығына әсер етеді [30].

Геополимеризация процесінде бор қышқылының қосылуы бірнеше жолмен жүзеге асады:

- сілтілік ортаға қоспа түрінде қосу
- алдын ала балқытып B_2O_3 формасында енгізу
- борды борсиликат шыны немесе басқа қосылыстардан енгізу

Химиялық реакциялар тұрғысынан, бор қышқылы төмен температурада (100–300°C) метабор қышқылына (HBO_2), ал 300–600°C аралығында – B_2O_3 -ке дейін дегидратацияланады:

- $H_3BO_3 \rightarrow HBO_2 + H_2O$



600°C-тан жоғары температурада түзілген B_2O_3 күл құрамындағы SiO_2 және Al_2O_3 -пен әрекеттесіп, борсиликат және алюмо-борсиликат құрылымдарын қалыптастырады. Бұл құрылымдар тығыз, су өткізбейтін, механикалық тұрақты болып келеді.

Неліктен тек 600°C температурада жақсы нәтиже байқалды?

– 200 және 400°C-та бор қышқылы ішінара дегидратацияланып, реакцияға толық түспейді

– 600°C-та бор толық B_2O_3 -ке айналып, алюмосиликат гелімен химиялық байланыс түзеді

– Бұл байланыстар Si-O-B және Al-O-B түрінде қалыптасып, геополимер торын нығайтады

– Бор қышқылының негізгі әсерлері:

– Гидрофобтық қасиеттер береді – бор қосылған геополимерлер суды аз сіңіреді, бұл олардың беріктігі мен ұзақ мерзімділігіне оң әсер етеді

– Термиялық тұрақтылықты арттырады – бор негізіндегі құрылымдар жоғары температурада (800–1000°C) да құрылымын жоғалтпайды

– Қышқылға төзімділікті жоғарылатады – В-О байланыстары қышқылдарға тұрақты, бұл геополимерлерді химиялық агрессивті ортада қолдануға мүмкіндік береді

– Түстік сипат өзгереді – бор қосылған жүйелердің түсі ақшыл немесе ашық реңді болады, бұл эстетикалық тұрғыдан пайдалы болуы мүмкін

– Әдеби деректер бойынша, бор қосылған геополимерлер:

– 10–20% бор қышқылы қосылғанда қысымға төзімділік 20–30%-ға артады

– 600–800°C температурада термиялық тұрақтылық сақталады;

– Су сіңіру деңгейі 2 есе төмендеген.

Бордың әсер ету механизмдері:

1) Бор оттек көпіршелері арқылы (B-O-Si , B-O-Al) полимер торын кеңейтіп, құрылымды тығыздайды;

2) Су молекулаларына әлсіз байланысып, капиллярлық сіңіруді шектейді;

3) Химиялық агрессияға қарсы фаза тұрақтылығын арттырады.

Бор қышқылының дозасына байланысты:

– Төмен концентрацияда ($\leq 5\%$) – құрылымға аз әсер етеді

– Орташа концентрацияда (5–10%) – механикалық қасиеттер жақсарады

– Жоғары концентрацияда (10–20%) – гель фазасының тығыздығы артады, бірақ артық мөлшерде кристалдық емес бор фазалары түзіліп, құрылым әлсіреуі мүмкін.

Бор қышқылы ұшпа күл негізіндегі геополимерлер үшін перспективалы модификатор. Ол геополимерлік желінің құрылымын нығайтып, термиялық, механикалық және химиялық төзімділікті арттырады. Алайда оның тиімділігі

қыздыру температурасына және енгізу концентрациясына тәуелді. Болашақта бордың түрлі түрлерін (бор оксиді, натрий бораттары, боркарбид) зерттеу геополимерлік материалдарды жетілдіруде жаңа бағыттар ашады.

1.6 Ұшпа күлді активтендіру температурасының геополимердің қасиетіне әсері

Температура — геополимеризация процесіндегі ең сезімтал және шешуші факторлардың бірі. Ұшпа күл негізіндегі жүйелерде температура тек химиялық реакциялардың жылдамдығына әсер етіп қана қоймайды, сонымен қатар материал құрылымының өзін, оның беріктігін, кеуектілігін, фазалық құрамын, суға және қышқылға төзімділігін, эстетикалық қасиеттерін де анықтайды. Егер температура дұрыс таңдалмаса — тіпті ең бай кремнийлі шикізаттан да сапалы геополимер алу мүмкін болмайды [31].

Ұшпа күл — аморфты және кристалды фазалардың күрделі қоспасы. Оны белсендіру үшін жеткілікті температура қажет. Төмен температурада (20–100°C) тек бастапқы гель фазасы (мысалы, N-A-S-H) түзіледі, ол механикалық тұрғыдан әлсіз, кеуектілігі жоғары және сілті қалдығы көп болады. Бұл кезеңде су буының булануы арқылы материал біртіндеп қатайды, бірақ толық құрылымдық тор түзіліп үлгермейді. Мұндай температурада бор қышқылы да толығымен реакцияға түспейді, нәтижесінде материал оңай үгітіледі [32].

Температура 200–400°C аралығында болғанда — маңызды құрылымдық қайтақалыптасу жүреді. Бұл диапазонда гель тығыздалып, су толық дерлік шығып кетеді. Механикалық беріктік едәуір артады. Алайда, бор қышқылы бұл аралықта метабор қышқылына айналып, тек жартылай реакцияға түсуі мүмкін. Геополимердің түсі, тығыздығы мен микрокеуектілігі де осы кезеңде өзгереді [33-34].

Нағыз өзгеріс 600°C маңында басталады. Бұл температурада тек күлдегі алюмосиликаттар ғана емес, бор қышқылы да B_2O_3 -ке дейін тотықтанып, Si және Al тетраэдрлерімен өзара химиялық байланыс түзеді. Нәтижесінде пайда болатын B–O–Si және B–O–Al байланыстары материалдың тор құрылымын нығайтып, оны термиялық, химиялық тұрғыдан бірегей етеді. Бұл кезеңде бордың шынайы күші ашылады: гель полимерлік фазаға өтеді, қышқылға төзімділік жоғарылайды, микрокеуектер жабылып, геополимер су сіңірмейтін, эстетикалық және механикалық тұрғыдан тартымды материалға айналады [35].

Температураны одан әрі көтеру (700–800°C және одан жоғары) кейде фазааралық ауысуларға, жаңа кристалдық құрылымдардың пайда болуына әкеледі. Бірақ бұл өзгерістер материалдың иілгіштігін төмендетуі мүмкін. Сондықтан геополимерлер үшін 600–650°C аралығы — тепе-тең температуралық плато ретінде қарастырылады.

Ұшпа күл мен бор қышқылын бірге қолданған жүйеде температура — тек термиялық параметр емес [36-37]. Ол — материалды трансформациялайтын, әлсіз гельді қуатты қатты фазаға айналдыратын ғылыми режиссер. Бұл термиялық

өңдеуді дұрыс басқару арқылы, геополимерлерге тек беріктік емес, сонымен қатар болашақтың құрылыс индустриясы талап ететін интеллектуалдық сипаттар да беріледі.

Міне, дәл осы себепті ұшпа күл негізіндегі геополимерлерді температуралық өңдеусіз елестету — шебердің жаны жоқ мүсінін көрумен тең. Геополимер – қызу арқылы пісіп жетілетін, ғылым мен инженерлік шеберліктің нағыз көрінісі [38-39].

Геополимерлер заманауи технологияларда кеңінен қолданыс тауып келеді, себебі олардың химиялық, термиялық және механикалық тұрақтылығы жоғары. Бірқатар салада бұл материалдар дәстүрлі шешімдерге балама ретінде қарастырылады. Қолдану салаларын нақты сипаттау олардың әрқайсысының ғылыми және инженерлік маңызын тереңірек аша түседі [40].

Құрылыс және азаматтық инженерияда геополимерлер құрылыс блоктары, кірпіштер, жабын плиталары және цемент алмастырушы ретінде кеңінен зерттелуде. Цементке қарағанда олардың беріктігі жоғары, ал қышқыл мен сілтіге төзімділігі әлдеқайда мықты. Су сіңіргіштігінің төмендігі мен деформацияға қарсы тұру қасиеттері оларды көпір тіректері, жол жабындары және су өткізбейтін элементтер үшін өте қолайлы етеді. Сонымен қатар, бор қосылған геополимерлер эстетикалық түс пен беткі сапаны жақсартуға мүмкіндік береді, бұл оларды сәулеттік және көркемдік мақсатта да қолдануға жол ашады [41-42].

Өртке және жоғары температураға төзімді құрылымдарда геополимерлердің 1000–1200°C аралығындағы температураға дейін тұрақты болуы – оларды пештер, реактор қаптамалары, металлургиялық ванналар және термоқалқан материалдар ретінде қолдануға мүмкіндік береді [43]. Құрылымдық тұтастығы мен жанбайтындығы арқасында олар өртке қарсы панельдер мен ішкі қорғаныс құрылымдарын жасау үшін қолданылады.

Экологиялық инженерия және қалдықтарды басқару саласында геополимерлер ауыр металдар мен радиоактивті элементтерді құрылымына енгізіп, ұзақмерзімді оқшаулау материалдары ретінде қолданылуы мүмкін. Бұл материалдар ағынды суларды тазарту жүйелерінде адсорбент немесе ионалмастырғыш ретінде қолданылады. Сонымен қатар, өндірістік қалдықтар мен ластанған топырақты тұрақтандыру үшін геополимеризация әдісі аса тиімді саналады [44-45].

Энергетика және электроника саласында геополимерлер жоғары температураға төзімді изоляторлар мен электрлік қаптама материалдары ретінде танылып келеді. Әсіресе жоғары вольтты желілерде және трансформатор құрылымдарында олардың қызметі артып келеді. Сонымен қатар, олар катализатор негізі немесе тасымалдаушы ретінде де пайдаланылып, отын элементтері мен химиялық реакторларда белсенді компоненттерді тұрақты ұстап тұруда маңызды рөл атқарады [46].

Медициналық материалдар мен биотехнологияда геополимерлер биосәйкестілік қасиеттерінің арқасында сүйек импланттары мен тіс цементтерінде қолданылады. Бор қышқылы қосылған геополимерлердің

биологиялық инерттілігі мен антибактериалды қасиеті оларды остеоинтеграциялық құрылымдарға айналдырады. Сонымен қатар, радиациядан қорғайтын материал ретінде де зерттелуде [47-48].

Декоративтік және сәулеттік мақсатта геополимерлер түрлі-түсті плиткалар, мүсіндер, фасад панельдері ретінде қолданылады. Олардың түсі, текстурасы және суға төзімділігі бұл өнімдерді сыртқы және ішкі безендіру элементтері ретінде пайдалануға мүмкіндік береді [49].

3D баспа және аддитивті өндіріс саласында геополимерлер жаңа материал ретінде қалыптасып келеді. Олардың тез қату, механикалық беріктік, экологиялық қауіпсіздік сияқты қасиеттері автоматтандырылған құрылыс пен ғарыштық құрылыс жобаларында өте тиімді. 3D принтерлер арқылы күрделі құрылымдарды аз шығынмен және жоғары дәлдікпен жасау мүмкіндігі – бұл бағыттың болашағы зор екенін көрсетеді.

Осылайша, геополимерлер көпсалалы қолдануға бейімделген, болашақтың экологиялық және технологиялық талаптарына толық жауап беретін материалдар тобы болып табылады [50].

1.7 Қорытынды және болашақ бағыттар

Жүргізілген әдебиеттерге шолу мен ғылыми тұжырымдар ұшпа күлге негізделген геополимерлі композиттердің құрылыс, энергетика, экология және биотехнология салаларында кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Бұл материалдар – өнеркәсіптік қалдықтарды қайта кәдеге жарату, қоршаған ортаға келетін кері әсерді азайту және төмен көміртекті технологияларды дамыту үшін перспективалы шешімдердің бірі болып табылады екен. Әсіресе бор қышқылы қосылған геополимерлердің құрылымдық және функционалдық қасиеттері айтарлықтай жақсаратыны анықталды. Мұндай қоспа олардың беріктік сипаттамаларын, термиялық төзімділігін және су жұқтырмау қабілетін жоғарылатады.

Бор қышқылы негізіндегі модификация кезінде пайда болатын артықшылықтар жоғары температура әсерінен жүретін күрделі фазалық түрленістермен тығыз байланысы бар. 600°C және одан жоғары температураларда B_2O_3 түзіліп, кремний мен алюминиймен әрекеттесе отырып борсиликат тәрізді құрылым қалыптастырады, бұл өз кезегінде материалдың химиялық тұрақтылығын жоғарлатады. Мұндай қасиет агрессивті орталарда, үлкен механикалық жүктемелер жағдайында және ұзақ мерзімді пайдалануда ерекше маңызды болып табылады.

Келешек зерттеулердің тиімділігі мен практикалық маңызын арттыру мақсатында мынадай ғылыми-тәжірибелік бағыттар ұсынылады:

- Бор қышқылының мөлшерін кезең-кезеңімен өзгертіп, фазалық құрам мен механикалық сипаттамалар арасындағы тәуелділікті тереңірек зерделеу;

- Материалдардың ұзақ уақыт бойғы суға төзімділігін, жоғары температурадағы қартаю үрдісін және сілтілік ортадағы тұрақтылығын кешенді бағалау;
- XRD, SEM, FTIR, TGA/DSC сынды заманауи аналитикалық әдістер арқылы алынған геополимерлердің құрылымдық және морфологиялық ерекшеліктерін толық зерттеу;
- Геополимерлік қоспаларды 3D-баспа технологиясы арқылы қалыптастырып, өндірістік процестің тиімділігін оңтайландыру;
- Бор қышқылының баламалы қосылыстарын (мысалы, бораттар, боркарбидтер, кешенді тұздар) енгізу мүмкіндігін қарастыру;
- Алынған материалдардың тәжірибелік үлгілерін жасап, олардың құрылыс индустриясында, экологиялық шешімдерде немесе биомедициналық мақсаттағы қолданбаларын тексеру.

Қорыта келе, бор қышқылымен модификацияланған геополимерлер — экологиялық қауіпсіз, функционалды және төмен көміртекті материалдарды жасауға арналған болашағы зор бағыт болып табылады. Бұл зерттеу — сол бағытта жүргізілетін келесі ғылыми жұмыстарға мықты теориялық және тәжірибелік негіз қалайды.

2 ЭКСПЕРИМЕНТТІК БӨЛІМ

2.1 Қолданылған материалдар

Жұмыс барысында төменде көрсетілген материалдар мен химиялық реагенттер қолданылды:

- Ұшпа күл – Алматы қаласындағы ЖЭО-2 жылу электр орталығынан алынған. Күл алдымен 105 °С температурада кептіріліп, кейін ≤ 400 мкм өлшемді фракция алу үшін електен өткізілді.

- Дистилденген су (H_2O) – барлық зертханалық процестерде еріткіш ретінде пайдаланылды; тазалық дәрежесі – 99,9%.

- Натрий гидроксиді ($NaOH$) – сілтілік белсендіру үшін және механоактивация кезеңінде қолданылды; тазалығы – 99,9%.

- Калий гидроксиді (KOH) – қосымша сілті ретінде механоактивацияда пайдаланылды; тазалығы – 99,9%.

- Бор қышқылы (H_3BO_3) – геополимер құрылымын модификациялаушы компонент ретінде қолданылды; тазалығы – 99%.

2.2 Геополимерді дайындау және зерттеу әдістері

Жұмыс барысында бастапқы шикізаттар мен өнімді зерттеуге төмендегі әдістер қолданылды:

- Гранулометриялық құрамды анықтау

Ұшпа күл бөлшектерінің өлшемдік сипаттамалары лазерлік дифракция әдісімен анықталды (Winner2005A, Қытай). Бұл әдіс бөлшектердің көлемі мен таралуын дәл бағалауға мүмкіндік береді және материалдың реакциялық қабілеті мен құрылымдық сипаттамаларына әсер ететін маңызды фактор болып табылады.

- Меншікті беткі аудан мен кеуектілік құрылымды анықтау

Материалдың меншікті беткі ауданы мен пористік құрылымын анықтау азот адсорбциясының төмен температуралық әдісімен жүргізілді. Зерттеу BSD-660S автоматтандырылған анализаторында (ҚХР) жүзеге асырылды. Өлшеулер сұйық азот температурасы жағдайында (-196 °С) орындалды.

Талдауға дейін үлгілер 150 °С температурада 4 сағат бойы дегазацияланып, адсорбталған қоспалар мен ылғалдан тазартылды. Бұл тәсіл BET әдісі бойынша меншікті беткі ауданды, сондай-ақ Бжоуэра-Джойнера-Халенда (BJH) әдісі арқылы кеуектілік сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді.

- Элементтік құрамды талдау (EDXRF)

Ұшпа күлдің химиялық құрамын анықтау мақсатында энергия-дисперсиялық рентгенфлуоресценттік спектроскопия (EDXRF) қолданылды. Талдау Rigaku NEX CG II спектрометрінде жүргізілді. Құрылғыда алюминий (Al), молибден (Mo), мыс (Cu), RX9 және кремний (Si) сияқты бес екінші реттік нысана пайдаланылды. Әр нысана үшін кернеу 25–50 кВ, ал ток күші 1–2 мА

аралығында таңдалды. Экспозиция уақыты 100–200 секундты құрады. Үлгілер тот баспайтын болаттан жасалған FULVERISETTE 2 автоматты келі-келсапта ұнтақталып, 4 мкм қалыңдықтағы полипропилен пленка астына орналастырылып, порошок түрінде өлшенді.

- Рентгендік фазадық талдау (XRD)

Кристалдық фазаларды анықтау үшін PANalytical X'Pert Pro рентгендік дифрактометрі пайдаланылды. CuK α сәулесімен ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) жүргізілген зерттеулерде 2θ бұрыштық диапазоны 5° – 80° аралығында, сканерлеу қадамы 0.02° , ал экспозиция уақыты әр нүктеде 1 секунд болды. Алынған дифрактограммалар JCPDS мәліметтер базасымен салыстырылып, негізгі кристалдық фазалар анықталды.

- Термиялық талдау (TGA/DSC)

Үлгілердің термиялық тұрақтылығын бағалау және фазалық ауысуларды зерттеу Mettler Toledo TGA/DSC 3+ аспабында (Швейцария) жүргізілді. Жылыту жылдамдығы $10^\circ\text{C}/\text{мин}$, температуралық диапазон 25°C – 1000°C аралығын қамтыды. TGA көмегімен масса жоғалту сатылары (дегидратация, органикалық компоненттердің ыдырауы, т.б.) тіркелсе, DSC әдісі арқылы эндотермиялық және экзотермиялық процестердің температуралық интервалдары мен тиісті жылу эффектілері анықталды.

- Инфрақызыл спектроскопия (FTIR)

Үлгілердің функционалдық топтарын анықтау мақсатында Shimadzu FTIR-8600 инфрақызыл спектрометрі қолданылды. Өлшеулер 4000 – 400 см^{-1} диапазонында жүргізілді. Үлгілер спектрофотометриялық таза KBr қосылып, пресстеу арқылы мөлдір таблетка күйінде дайындалды.

- Оптикалық микроскопиялық зерттеу

Ұнтақ материалдардың морфологиялық сипаттамаларын бағалау үшін Leica DM4 P (Германия) поляризациялық оптикалық микроскопы қолданылды. Үлгілер шыны пластинаға жіңішке қабат түрінде дайындалып, әртүрлі үлкейту режимдерінде бақыланды. Бөлшектердің пішіні, мөлшері, агрегациясы және құрылымдық гетерогендігі сапалы сипатталды.

- Сканерлеуші электронды микроскопия (SEM)

Үлгілердің беткі морфологиясы мен микроструктурасын зерттеу JEOL JSM-6490LA (Жапония) сканерлеуші электронды микроскопында жүргізілді. Бейнелеу сапасын арттыру мақсатында үлгілер алдын ала ток өткізгіш қабатпен (алтынмен) қапталды. Зерттеу әртүрлі үлкейту режимдерінде жүзеге асырылып, бөлшектердің өлшемі мен беткі құрылымы туралы сапалы деректер алынды.

2.3 Ұшпа күлден геополимер алудың технологиялық басқыштары

Зерттеу барысында геополимерді алу үшін құрғақ әдіс қолданылды. Бұл тәсілде су пайдаланылмай, ұнтақ түріндегі материалдар сілтілік және қышқылдық активаторлармен бірге механикалық белсендіру арқылы өңделді. Жалпы басқыштар төмендегідей:

Шикізатты дайындау

Геополимер синтезі үшін негізгі кремний және алюминий көзі ретінде Алматы қаласындағы ЖЭО-2 мекемесінен алынған ұшпа күл пайдаланылды. Күл 105 °C температурада алдын ала кептіріліп, ≤ 400 мкм фракция алу үшін електен өткізілді.

– Реагенттермен араластыру

50 грамм ұшпа күлге бор қышқылы (H_3BO_3), натрий гидроксиді (NaOH) және калий гидроксиді (KOH) 15 грамнан өлшеніп, құрғақ күйінде араластырылды. Бұл қоспа біртекті масса алу үшін алдын ала қолмен немесе механикалық түрде араластырылды.

– Механоактивация (механикалық ұнтақтау)

Алынған құрғақ қоспалар PULVERISETTE 2 автоматты келі-келсабында 1 және 2 сағат бойы ұнтақталып, механоактивациядан өткізілді. Бұл процесс ұнтақтардың беткі энергиясын арттырып, әрі қарай жүретін геополимерлеу реакциясының тиімділігін жоғарылатуға бағытталды.

– Жылулық өңдеу (күйдіру)

Механикалық белсендірілген қоспалар 200 °C, 400 °C және 600 °C температурада термиялық өңдеуден өткізілді. Бұл кезең кристалдық құрылымдардың қалыптасуы мен ішкі фазалық өзгерістерді қамтамасыз ету үшін жүргізілді.

– Қайта ұнтақтау

Күйдірілген материалдар қайтадан PULVERISETTE 2 автоматты келі-келсабында ұнтақталып, ұсақ фракцияға дейін жеткізілді. Бұл материалдардың біртектілігін сақтау және соңғы геополимерлеу процесіне толық дайын болуын қамтамасыз ету мақсатында орындалды.

– Активация (полимерлеу)

Қайта ұнтақталған қоспалардан 4 грамм үлгі алынып, оған 3 мл дистилденген су қосылды. Алынған қоймалжың паста гомогенизацияланып, диаметрі 25 мм дөңгелек қалыптарға құйылды. Қалыптағы үлгілер өздігінен катуға қалдырылды.

– Қасиеттерін бағалау

Қатудан кейін алынған геополимер үлгілерінің қысу беріктігі, тығыздығы және құрылымдық-морфологиялық сипаттамалары зерттелді. Бұл арқылы механоактивация уақыты мен күйдіру температурасының материалдың түпкі қасиеттеріне әсері анықталды.

3 ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ МЕН ОНЫҢ ТАЛҚЫЛАНУЫ

3.1 Ұшпа күлдің құрамын сипаттау

Энергия-дисперсиялық рентгенфлуоресценттік (XRF) талдау нәтижелері ұшпа күлдің химиялық құрамы геополимерлік және құрылыс материалдары ретінде қолдануға қолайлы екенін көрсетті. Негізгі компоненттер ретінде кремний диоксиді (SiO_2 – 65,9%) және алюминий оксиді (Al_2O_3 – 22,5%) анықталды. Бұл компоненттердің жоғары үлесі күлдің геополимерлеуге бейімді екенін және оны кремний мен алюминийдің көзі ретінде тиімді пайдалануға болатынын дәлелдейді.

Сонымен қатар, күл құрамында темір оксиді (Fe_2O_3 – 5,54%) бар болуы оның пигменттік материалдар немесе каталитикалық жүйелер үшін де қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Күлде сілтілік және сілтілі-жер металдардың оксидтері де тіркелді: CaO – 1,94%, MgO – 0,572%, Na_2O – 0,913% және K_2O – 0,559%. Бұл құрам күлдің сілтілік табиғатын анықтайды, әрі тәжірибе барысында алынған су экстрактысының рН мәні – 9,25 екенін растайды. Мұндай сілтілік орта геополимерлеу реакцияларын белсендіреді және қышқылдық активаторлармен әрекеттесу қабілетін арттырады.

Күлде байқалған титан диоксидінің (TiO_2 – 1,11%) болуы алынған материалдардың механикалық беріктігіне оң әсерін тигізуі мүмкін.

Осылайша, ұшпа күлдің химиялық құрамы оның келесі салаларда қолданылуын негіздейді:

- геополимерлерді синтездеуге арналған бастапқы материал ретінде;
- құрылыс қоспаларына арналған минералдық белсенді қоспа ретінде;
- керамикалық материалдар өндірісіне арналған шикізат ретінде;
- каталитикалық жүйелердің әлеуетті компоненті ретінде.

Рентгендік фазалық талдау нәтижелері (Сурет 1) ұшпа күлдің кристалдық құрылымында келесі негізгі минералдық фазалардың бар екенін көрсетті:

- Муллит ($\text{Al}_{4.64}\text{Si}_{1.36}\text{O}_{9.68}$) – 47,4%
- Кварц (SiO_2) – 41,0%
- Магнетит ($\text{Fe}_{2.946}\text{O}_4$) – 3,7%
- Маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) – 3,5%
- Кальцит (CaCO_3) – 2,9%
- Диоксид титана (TiO_2) – 1,6%

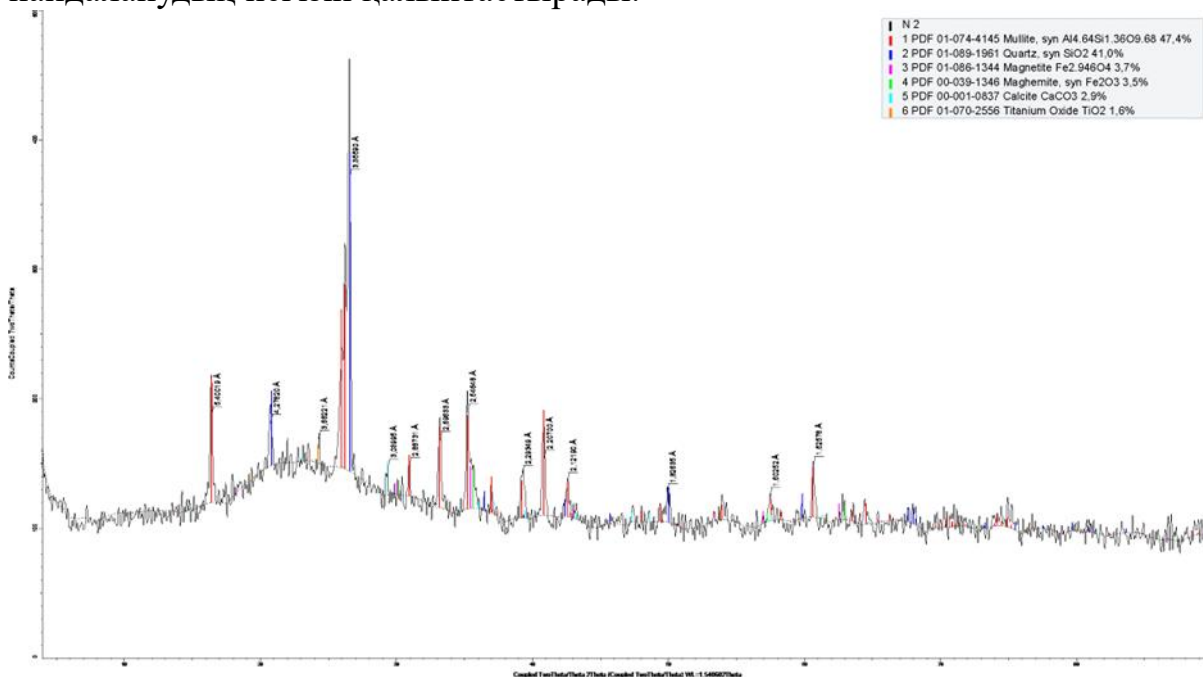
Алюмосиликатты фазалардың (муллит пен кварц) басым болуы бастапқы көмір құрамындағы SiO_2 және Al_2O_3 мөлшерінің жоғары болуымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, темірдің (магнетит, маггемит), кальцийдің (кальцит) және титанның (TiO_2) оксидтері жану процесіндегі минералдық қосылыстардың түзілуін сипаттайды.

Анықталған фазалық құрам күлдің физика-химиялық қасиеттерін және оның келесі бағыттарда қолдану әлеуетін анықтайды:

- геополимерлік материалдар синтезі үшін белсенді қоспа ретінде;

- құрылыс материалдарының құрамдас бөлігі ретінде;
- отқа төзімді және керамикалық бұйымдар өндірісінде шикізат ретінде.

Бұл нәтижелер ұшпа күлдің құрылымы мен құрамының геополимерлеу процесіне бейімділігін растайды және оны бағалы техногендік шикізат ретінде пайдаланудың негізін қалыптастырады.



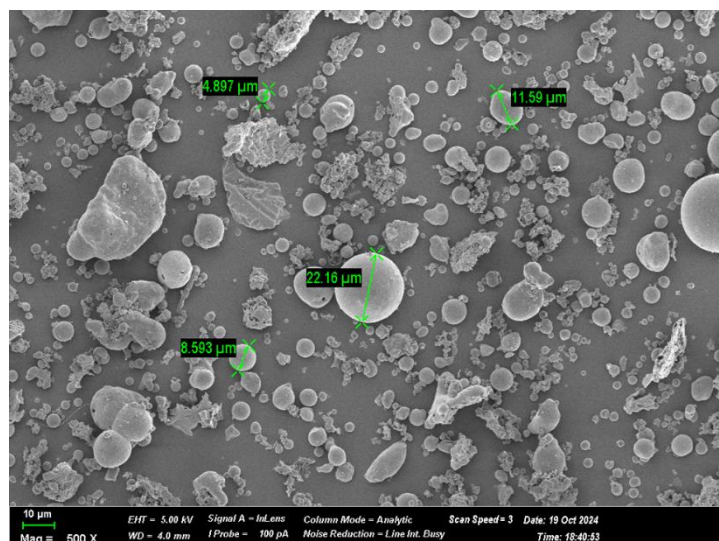
Сурет 1 – Ұшпа күлдің рентгендік дифрактограммасы (ЖЭО)

Сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) нәтижелері бойынша (Сурет 2), ЖЭО-дан алынған ұшпа күлдің морфологиясы гетерогенді құрылыммен сипатталады. Басты ерекшелігі — сфералық пішінді бөлшектердің (ценосферлердің) басым болуы. Олардың диаметрі 4,9–22,16 мкм аралығында өзгеріп, беткі қабаты тегіс келеді. Мұндай морфология жоғары температурада көмірдің жануы және алюмосиликатты тамшылардың жылдам салқындауы нәтижесінде пайда болады.

Сфералық бөлшектермен қатар күлде қиғаш, қырлы, беті кедір-бұдыр бөлшектер де байқалды. Олар жану кезінде минералдық компоненттердің толық балқымауынан пайда болған. Сонымен қатар, 8,5–11,6 мкм диапазонында болатын агломераттар да тіркелді – бұл майда бөлшектердің түтін газдарында салқындау кезінде бірігуінен қалыптасқан.

Мұндай бөлшектердің түрлі пішіндері мен өлшемдері күлдің практикалық қолдану мүмкіндіктерін арттырады:

- Сфералық бөлшектер құрылыс қоспаларында жақсы жұмыс істелгіштік (удобоукладываемость) қамтамасыз етеді.
- Кедір-бұдыр, қырлы бөлшектердің жоғары беткі ауданы сілтілік активация кезінде реакциялық қабілеттілікті арттырады.
- Фракциялық әртүрлілік материалдарды толтырғыш ретінде пайдаланғанда оптималды тығыздық пен қаптама қамтамасыз етеді.



Сурет 2 – Ұшпа күл бөлшектерінің SEM микрофотосуреттері (ЖЭО)

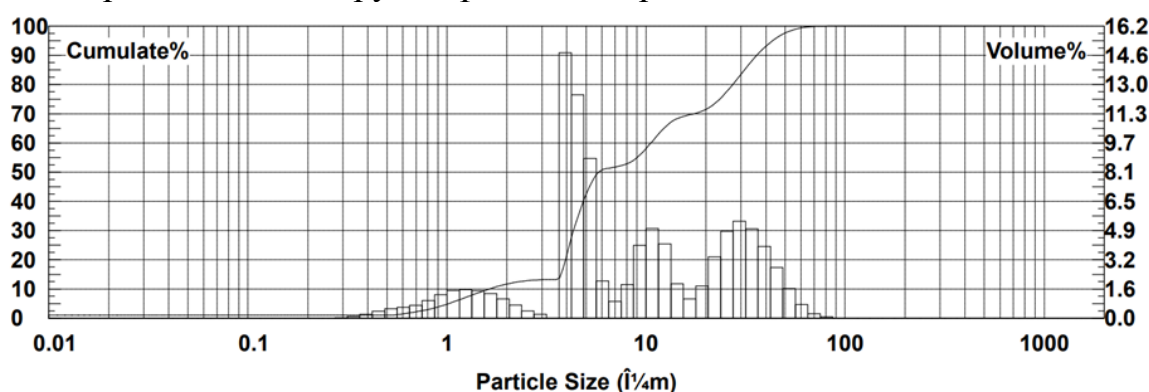
ЖЭО-дан алынған ұшпа күлдің түйіршік құрамы лазерлік дифракциялық әдіспен анықталды. Өлшеу нәтижелері бөлшектердің өлшемдік таралуының кең ауқымда екенін көрсетті:

- орташа бөлшек өлшемі (D_{50}) – 5,789 мкм,
- D_{10} – 1,633 мкм (ультрамелкие бөлшектер),
- D_{90} – 35,998 мкм (ірі фракциялар).

Мұндай бөлшектер құрамындағы әртүрлілік беттік ауданды/көлемге қатынастың (S/V) жоғары болуына алып келеді, бұл көрсеткіш $14\,572,640\text{ см}^2/\text{см}^3$ құрады. Осындай дамыған беттік аудан күлдің адсорбциялық материалдарда қолданылуына зор мүмкіндік береді, себебі мұндай жүйелерде жоғары беттік белсенділік шешуші рөл атқарады.

Сонымен қатар, ұнтақтың өлшемдік әртүрлілігі мен құрылымдық тұрақтылығы геополимерлік және құрылыс материалдары үшін қажетті механикалық беріктік пен тығыз құрылым түзуге ықпал етеді. Ұсақ және ірі бөлшектердің үйлесімі материал ішінде оптималды оралу (packing density) қасиетін қамтамасыз етеді.

Бұдан бөлек, күлдің бөлшектерінің өлшемдік құрамы мен беттік ауданы каталитикалық жүйелерде белсенді компоненттерді біркелкі тарату үшін қолайлы орта қалыптастыруға мүмкіндік береді.



Сурет 3 – Түйіршік өлшемі бойынша үлестірім нәтижелері

Алматы ЖЭО-нан алынған ұшпа күлге жүргізілген термогравиметриялық (TGA) және дифференциалдық сканирлеуші калориметриялық (DSC) талдау нәтижелері (Сурет 5) материалдың температуралық тұрақтылығы мен фазалық өзгерістерін сипаттайды. Талдау 20 °С/мин жылдамдықпен ауа атмосферасында 900 °С дейін қыздыру жағдайында жүргізілді.

TGA қисығы бойынша бірнеше маңызды кезеңдер тіркелді:

– 0–200 °С аралығында 0,5% шамасындағы масса жоғалту байқалды. Бұл ылғалдың және адсорбциялық түрде байланысты су молекулаларының жойылуымен байланысты.

– 200–500 °С аралығында масса өзгерісі мардымсыз, материалдың салыстырмалы термиялық тұрақтылығы байқалды.

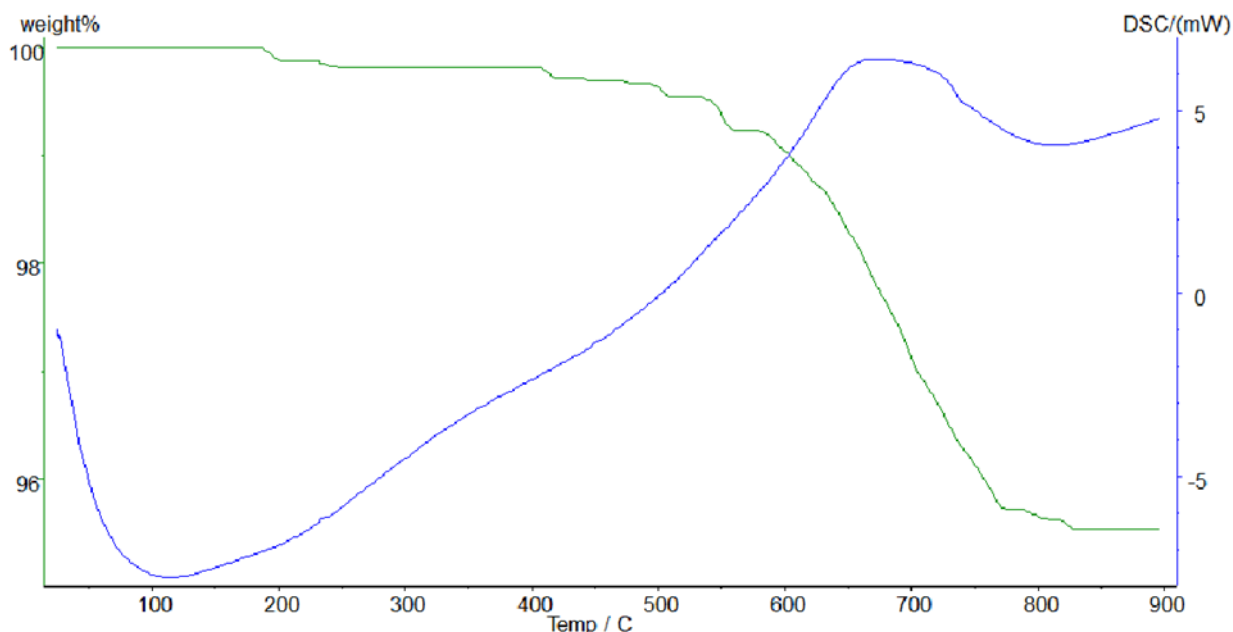
– 500–800 °С диапазонында 3,5% шамасындағы айтарлықтай масса жоғалту орын алды, бұл карбонаттардың термиялық ыдырауымен (мысалы, CaCO_3) және қалдық көміртек құрамдас заттардың тотығуымен түсіндіріледі.

DSC қисығында:

– төмен температуралық аймақта эндотермиялық эффект тіркелді – бұл ылғалдың булануы мен дегидратацияға сәйкес келеді;

– 650 °С шамасында кең экзотермиялық максимум байқалды – бұл көміртекті компоненттердің тотығуы мен минералдық құрамдағы фазалық өзгерістермен байланысты.

Бұл термиялық мінез-құлық күлдің жоғары температурада өңделген жағдайдағы өзгерісін сипаттайды және оны геополимерлік жүйелерде немесе керамикалық материалдар өндірісінде пайдалану кезінде ескерілуі тиіс.



Сурет 4 – Алматы ЖЭО ұшпа күлінің TGA/DSC қисықтары

БЭТ әдісімен жүргізілген талдау нәтижелері бойынша (Сурет 6), Алматы ЖЭО-2 ұшпа күлі жоғары меншікті беткі ауданға ие – 7,5273 м²/г, бұл материалдың дамыған кеуектілік құрылымымен сипатталатынын көрсетеді.

Кеуек көлемінің таралуы бойынша анықталғандай:

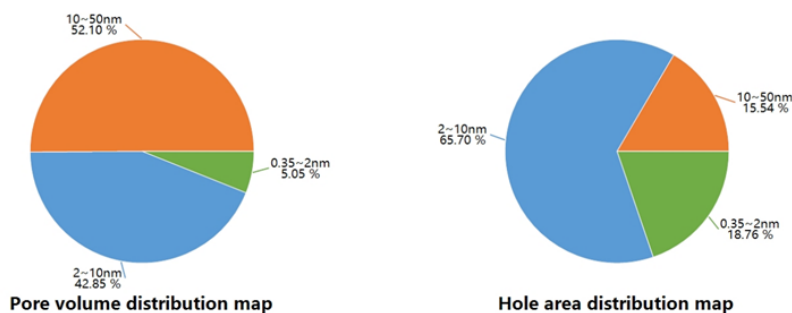
- мезопоралардың үлесі – 59,14%,
- микропоралардың үлесі – 21,48% құрайды.

Осындай аралас кеуектілік құрылымы ұшпа күлді:

- адсорбциялық жүйелерде (су мен ауаны тазарту үшін),
- катализатор тасымалдаушысы ретінде,
- және гетерогенді каталитикалық процестерде қолдануға өте тиімді материал етеді.

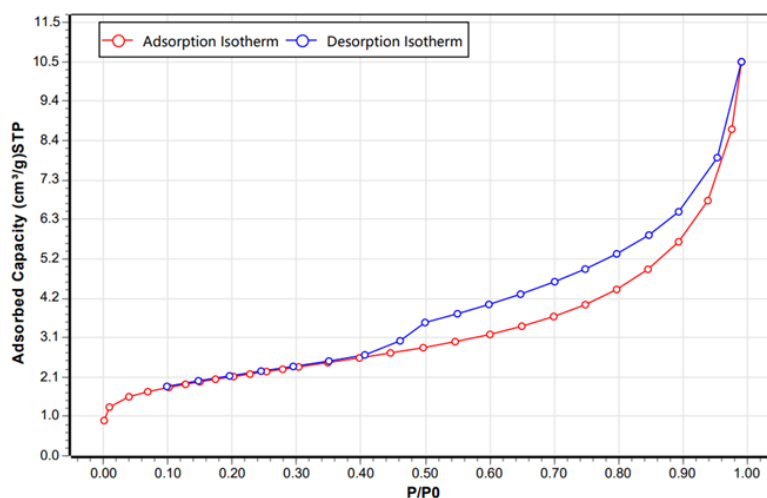
Салыстырмалы талдау нәтижелері (Сурет 7) көрсеткендей, ЖЭО-ның ұшпа күлінен алынған адсорбция изотермасы микропористы материалдарға, атап айтқанда цеолиттерге, ұқсас сипатқа ие. Алайда, күлдің кеуек өлшемдерінің кең таралуы оның күрделі минералдық-химиялық құрамымен және жоғары температуралық жағу шарттарымен байланысты.

Зерттеу барысында микропоралардың түзілуі, шамамен, отынның органикалық бөлігі толық жанғаннан кейін, бейорганикалық бу конденсациясы нәтижесінде пайда болған деп есептеледі.



Aperture segment		Pore volume		Hole area	
		cm ³ /g	Percent	m ² /g	Percent
Micro	0.35~2nm	0.0008	5.05 %	1.8714	18.76 %
	2~10nm	0.0070	42.85 %	6.5543	65.70 %
Meso	10~50nm	0.0085	52.10 %	1.5498	15.54 %
Large	50~200nm	0.0000	0.00 %	0.0000	0.00 %

Сурет - 5 – Кеуектердің көлем бойынша таралу диаграммасы (ВЕТ)



Сурет - 6 – ТЭЦ күлі мен типтік микропористы материалдар изотермаларын салыстыру

3.2 Геополимерді алу және оның беріктілі қасиетін зерттеу

Бұл зерттеуде геополимерлі материалдарды алудың түрлі технологиялық параметрлерінің өнім сапасына және механикалық беріктігіне әсері қарастырылды. Жұмыс барысында құрғақ әдіс негізінде механикалық активация жүргізіліп, бастапқы шикізат ретінде күл және басқа қосымша минералдық компоненттер қолданылды.

Геополимерлер қатты және сұйық фазалардың 4:3 массалық қатынасында дайындалып, алынған қоспа біртекті қоймалжың күйге жеткенше араластырылды. Кейіннен қоспа цилиндр пішінінде қалыпқа құйылып, бір апта бойы ауада қатырылды. Осыдан кейін өнімдердің механикалық беріктігі бағаланды.



Сурет - 7 – Қалыпқа құйылған геополимер



Сурет - 8 – Қатып беріктілік қалыптасқан геополимер

Геополимер үлгілерінің механикалық беріктігі арнайы қысу сынақ құрылғыларының болмауына байланысты динамикалық соққы әдісімен бағаланды. Бұл әдісте цилиндр пішініндегі қатырылған үлгілер биіктігі нақты өлшенген деңгейлерден (1.0 м, 1.5 м және 2.0 м) қатты бетке (бетон плита) тік бағытта еркін түрде тасталды. Әр биіктікте үш үлгіден сыналып, олардың бұзылу сипаты мен жарықтар деңгейі бойынша сапалық баға берілді.

Соққыдан кейінгі өзгерістерді бағалау үшін келесі шкала қолданылды:

- 0 балл – үлгі бүтін, ешбір жарықсыз;
- 1 балл – беткі жарықтар;
- 2 балл – ішінара жарықтар мен бөліну;
- 3 балл – толық құрылымдық бұзылу.

Нәтижелерге сүйенсек, 1.0 м биіктіктен тастағанда геополимер үлгілерінің басым көпшілігі бүтін қалды немесе тек беткі жарықтар байқалды. Бұл олардың белгілі бір деңгейдегі соққы энергиясын (~10–15 Дж) сіңіре алатынын көрсетті. 1.5 м биіктікте кейбір үлгілерде айқын жарықтар мен құрылымдық бөліну белгілері байқалды. Ал 2.0 м биіктіктен тасталған үлгілердің көбісі толық немесе жартылай бұзылды. Бұл көрсеткіш үлгілердің беріктік шегі шамамен 20–25 Дж соққы энергиясына сәйкес келетінін болжауға мүмкіндік береді.

Үлгілер арасындағы салыстырмалы талдау олардың құрамы мен өңдеу тәсілдеріне байланысты беріктіктің өзгеретінін көрсетті. Әсіресе, темір немесе палладий иондарымен өңделген геополимерлер құрылымдық тұрақтылығын жақсы сақтап, 1.5 м биіктікте де бүтін қалуға бейім болды. Бұл олардың микроқұрылымындағы байланыстардың беріктігін арттыратын ықтимал әсерін көрсетеді.

Жалпы алғанда, қарапайым тастау әдісі арқылы алынған бұл нәтижелер үлгілердің салыстырмалы механикалық қасиеттерін сапалы бағалауға мүмкіндік берді. Алайда, бұл әдістің шектеулерін (мысалы, стандартталған жүктеме болмауы, үлгі массасының өзгерісі және соққы бет сипаты) ескере отырып, алынған нәтижелерді алдын ала бағалау немесе басқа сынақ әдістерімен салыстыру мақсатында ғана қолдану ұсынылады.

3.3 Геополимерді алуға қолданылатын активаторлардың әсері

Геополимерлік материалдар қазіргі таңда цементті алмастыра алатын экологиялық және беріктігі жоғары балама ретінде кеңінен зерттеліп келеді. Геополимеризация үдерісі негізінен алюмосиликатты шикізат пен сілтілік немесе тұздық табиғатты активаторлардың әрекеттесуі арқылы жүреді. Бұл зерттеуде үш түрлі активатор: бор қышқылы (H_3BO_3), натрий гидроксиді (NaOH) және калий гидроксиді (KOH) қолданылып, олардың геополимер түзілуіне, өнімнің құрылымдық беріктігіне, сондай-ақ экономикалық және экологиялық аспектілеріне әсері қарастырылды.

Бор қышқылы — салыстырмалы түрде әлсіз қышқылдық қасиетке ие және экологиялық жағынан бейтарап зат. Ол геополимер құрылымында қосымша В–О–Si байланыстарын түзу арқылы материалдың термиялық және химиялық тұрақтылығын арттыра алады, бірақ жоғары мөлшерде қолданылуы геополимеризацияны тежеуі мүмкін.

NaOH және KOH — кең таралған сілтілік активаторлар, олар алюмосиликат құрылымын ерітіп, геополимерлік гельдердің түзілуін жылдамдатады. Алайда олардың өндірістік бағасы мен экологиялық қауіптері (қолдану кезінде қауіптілігі, өндіріс кезіндегі CO_2 ізі) біршама жоғары.

Экономикалық тұрғыдан қарағанда, бор қышқылы салыстырмалы түрде қымбатырақ және арнайы жеткізуді талап етуі мүмкін, ал NaOH арзан әрі қолжетімді. KOH бағасы мен экологиялық салмағы бойынша орташа позицияда орналасқан.

Бұл зерттеуде ұшпа күл негізіндегі геополимер үлгілерін алу кезінде қолданылған әртүрлі активаторлардың (B5, B15, NaOH, KOH) өнімнің құрылымдық тұтастығы мен беріктігіне әсері зерттелді. Барлық үлгілер бірдей массалық қатынаста (қатты:сұйық = 4:3) дайындалып, бір апта бойы қалыпта қатырылды.

Активаторлар сипаттамасы:

- B5 – 50 г ұшпа күлге 5 г бор қышқылы (H_3BO_3);
- B15 – 50 г ұшпа күлге 15 г бор қышқылы;
- NaOH – 50 г ұшпа күлге 15 г натрий гидроксиді;
- KOH – 50 г ұшпа күлге 15 г калий гидроксиді.

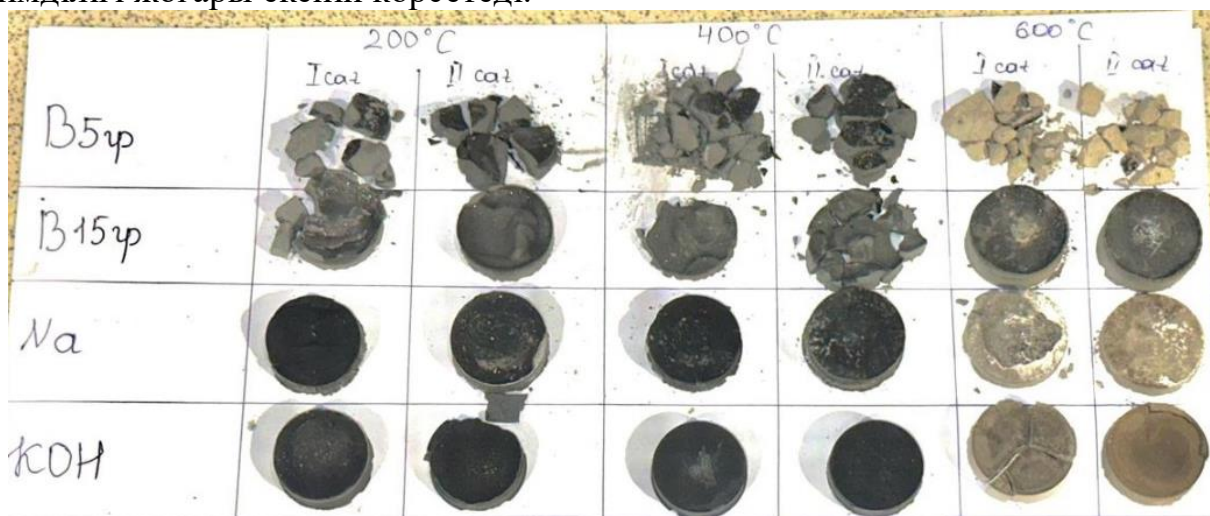
Нәтижелер:

Фотосуреттегі (Сурет 11) үлгілерге визуалды талдау жүргізу арқылы келесі негізгі қорытындылар жасалды:

B5 және B15 активаторлары қолданылған үлгілердің механикалық беріктігі төмен болды. B5 үлгілері механикалық беріктілікке ие ешқандай өнім қалыптастыра алмады, тіпті үш түрлі температура жағдайында. Ал B15 үлгілерінде бор қышқылының көп мөлшері геополимеризация жүруін жақсартып тіпті 600 °C. Бұл бор иондарының артық мөлшерде болуы геополимер торының қалыптасуына кедергі келтіріп, қосымша шыны фазасының пайда болуымен байланыстырылуы мүмкін.

NaOH активаторы қолданылған үлгілер барлық сынақ жағдайларында ең жоғары құрылымдық тұрақтылық көрсетті. Үлгілер тығыз, беткі қабаты тегіс және жарықсыз болып шықты. Бұл натрий гидроксидінің алюмосиликат гельдерінің түзілуін белсенді түрде қамтамасыз еткенін және эффективті геополимеризация жүргенін дәлелдейді.

KOH қолданылған үлгілер де салыстырмалы түрде жақсы нәтиже көрсетті. Алайда, кейбір үлгілерде шеткі жарылу және пішіндік өзгерістер байқалды. Бұл калий гидроксидінің әсері натрийге қарағанда сәл әлсіз болғанымен, жалпы тиімділігі жоғары екенін көрсетеді.



Сурет – 9 – Түрлі активаторлармен температурада дайындалған қатып беріктілік қалыптасқан геополимер

3.4 Геополимерді механикалық белсендіру уақытының өнім қасиетіне әсері

Механикалық белсендіру химиялық өндірістің көптеген саласында қолданылады. Олар әдетте химиялық реакцияның жүру жылдамдығын арттырады, қосымша реагенттердің жұмысалуын төмендетеді.

Механикалық белсендіру – бұл қатты фазаларды ұнтақтау, ұсақтау немесе басқа да физикалық өңдеу әдістері арқылы олардың физикалық-химиялық қасиеттерін өзгерту процесі. Геополимерлік жүйелерде механикалық белсендіру бастапқы шикізаттың реакциялық қабілетін арттыруда маңызды рөл атқарады. Әсіресе, ұшпа күл немесе шлак сияқты кремний мен алюминийге бай, бірақ төмен белсенді материалдарда бұл әдіс кеңінен қолданылады.

Механикалық белсендіру кезінде бөлшектердің өлшемі кішірейеді, нәтижесінде олардың меншікті беті артады. Бұл активаторлармен әрекеттесу мүмкіндігін жақсартып, геополимеризация реакциясының жылдамдығын арттырады. Сонымен қатар, бұл процесте материалдың кристалдық құрылымы бұзылып, аморфты фаза үлесі көбейеді. Аморфты фазалардың химиялық тұрғыдан белсенділігі жоғары болғандықтан, олар сілтілік ортада тез ериді және геополимерлік гельдің түзілуіне оң әсерін тигізеді.

Бөлшектердің микроструктурасындағы өзгерістер де геополимерлік матрицаның қалыптасуына ықпал етеді. Белсендірілген материалдардан алынған геополимерлер тығыз құрылымымен және біркелкілігімен ерекшеленеді. Бұл микроскопиялық деңгейдегі құрылымдардың жетілуіне, соның ішінде гель фазаның тиімді түзілуіне және су/күл қатынасының оңтайлануына себеп болады.

Механикалық белсендірудің әсерінен геополимерлік жүйелердің беріктігі, тұтқырлығы және ұзақ мерзімді тұрақтылығы артуы мүмкін. Сонымен қатар, бұл әдіс арқылы геополимердің қату уақытына, су сіңіру қабілетіне және тығыздығына әсер етуге болады. Бастапқы материалдың физикалық қасиеттерін өзгерту арқылы геополимерлік өнімнің сапасын бақылауға мүмкіндік туады.

9-суреттен механикалық белсендіру уақытының үлгілердің беріктігіне айтарлықтай әсер етпегенін, бірақ бор қышқылы мөлшерін арттырғанда (15 г) және ұзақ уақыт ұнтақтағанда геополимерлік құрылымның тұтастығы мен механикалық беріктігінің аз да болса артқанын көруге болады. Сонымен қатар, сілтілік активаторлар (NaOH, KOH) қолданылған үлгілердің жоғары температурада да құрылымын сақтап қалғаны байқалады.

3.5 Геополимер қоспасын күйдіру температурасының өнім қасиетіне әсері

Геополимерлік материалдардың сапасын арттыру мақсатында, механикалық өндеуден кейін негіз-күл қоспалары әртүрлі температурада (200 °C, 400 °C, 600 °C) күйдірілді. Бұл тәсілдің негізгі мақсаты — материалдың фазалық құрамын өзгерту арқылы оның механикалық беріктігін, суға төзімділігін және

құрылымдық тұрақтылығын жақсарту. Сонымен қатар, күйдіру процестері арқылы қоспадағы артық ылғал, органикалық қоспалар жойылады, ал бұл өз кезегінде ұзақ мерзімді беріктілік пен химиялық тұрақтылықты қамтамасыз етеді.

Экономикалық тұрғыда, күйдіру энергия шығынын қажет етсе де, оның нәтижесінде беріктігі жоғары және төзімді өнім алынуы, ұзақ мерзім қызмет ету мерзімімен ақталуы мүмкін. Ал экологиялық тұрғыда, тым жоғары температураларда органикалық қосылыстардың ыдырауынан зиянды газдар бөліну ықтималдығы бар, бұл ретте төмен және орташа температуралық күйдіру режимдері экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан тиімдірек болуы мүмкін.

В5 бор қышқылы қосылған үлгі:

- 200 °C: Үлгілер жарылып, құрылымы толық бұзылған, берік емес.
- 400 °C: Жарылу айқын байқалады, құрылым сөнген.
- 600 °C: Жоғары дәрежеде қираған, беріктілік жоқ.

Түйін: Бұл үлгілер күйдіру температураларына төзімсіз, әсіресе 600 °C-та құрылым толық бұзылған.

В15 бор қышқылы қосылған үлгі:

- 200 °C: Біршама тұтас, аздап жарылған.
- 400 °C: Беріктігі төмен, жарықтар көп.
- 600 °C: Ішінара сақталған, бірақ үгітілу байқалады.

Түйін: 15 г бор қышқылы қосылғанда өнім біршама тұрақтырақ, әсіресе 200 °C-та тұтастығы жоғарырақ.

NaOH қолданылған үлгі:

- 200 °C: Қара, тығыз құрылымды, тұтас.
- 400 °C: Қара, құрылымы сақталған, жарықтар аз.
- 600 °C: Жартылай сақталған, кейбір үгітілу бар.

Түйін: NaOH негізінде дайындалған геополимерлер күйдіруге төзімді, 200–400 °C аралығы оңтайлы.

KOH қолданылған үлгі

- 200 °C: Қара түсті, тұтас күйде, жарықсыз.
- 400 °C: Қара, бүтін сақталған, құрылымы өзгермеген.
- 600 °C: Қоңырқай түске боялған, аздап жарылған.

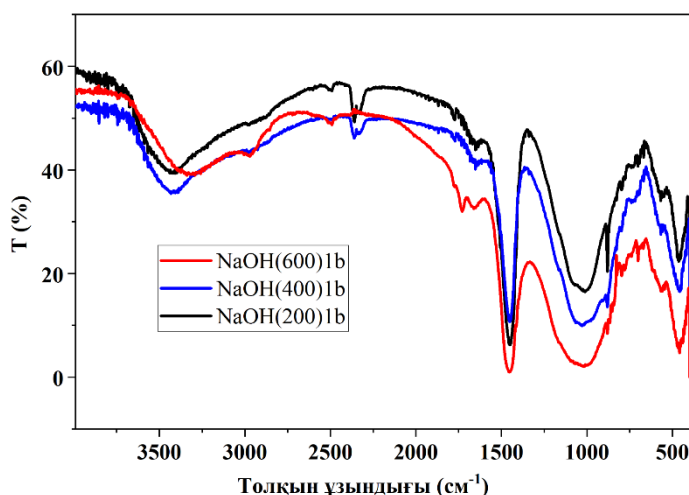
Түйін: КОН активаторы жоғары температурада да тұрақты құрылым түзеді, 200–400 °C аралығы ең қолайлы күй болып көрінеді.

Жалпы айтқанда күйдіру температурасы геополимер өнімдерінің құрылымдық тұтастығына және механикалық қасиеттеріне тікелей әсер етеді. Төмен температурада (200 °C) сәл ғана кептірілген материалдар тұтастығын жақсы сақтаған. Орташа температурада (400 °C) өнім құрылымы біршама сақталғанымен, кей үлгілерде жарылу байқалады. Жоғары температурада (600 °C) көбінде құрылым толық үгітіліп, механикалық беріктік төмендеген.

Осылайша, 200–400 °С аралығында күйдіру – геополимер өнімінің құрылымдық тұрақтылығын сақтап қалуға қолайлы, ал 600 °С-тан жоғары температура өнімнің сапасын нашарлатады. NaOH және КОН активаторлары жоғары температурада салыстырмалы түрде тұрақтырақ құрылым түзген.

3.6 Геополимер өнімдерінің FTIR зерттеу нәтижелеріне талдау

FTIR спектроскопиясы геополимерлік материалдардың химиялық байланыстары мен функционалдық топтарының табиғатын зерттеуге мүмкіндік береді. Активацияланған және жаңа күйдірілген геополимер үлгілерін салыстыру арқылы олардың құрылымдық өзгерістері мен қалыптасқан фазалар туралы маңызды ақпарат алуға болады. Әсіресе гидроксил топтарының (–OH), карбонат иондарының (CO_3^{2-}) және кремний-оттек (Si–O), алюминий-оттек (Al–O) байланыстарының спектрлік белгілері геополимер торының тығыздығы мен кристалдық дәрежесін сипаттайды. FTIR нәтижелері бойынша геополимерлену дәрежесі, су молекулаларының қатысуы және құрылымның тұрақтылығы жөнінде тұжырым жасауға болады.



10- сурет – Түрлі температурада күйдірілген механикалық белсендірілген NaOH/күл қоспасының FTIR қисығы

10 Суретте NaOH-пен активтендірілген геополимер қоспаларының әртүрлі күйдіру температураларындағы (200 °С, 400 °С, 600 °С) FTIR спектрлері көрсетілген. Барлық үлгілер механикалық активациядан кейін алынған (белгісі: "1b").

FTIR нәтижесіне негізделген тұжырымдар:

~3400 см⁻¹ аймағы (O–H созылу тербелісі):

Бұл жолақ барлық үлгілерде байқалады, бірақ температура артқан сайын (қара → көк → қызыл) жолақтың интенсивтілігі азаяды.

Бұл гидроксил топтарының немесе адсорбцияланған судың мөлшерінің төмендегенін көрсетеді. Жоғары температурада су толық десорбцияланады немесе құрылым ішінде байланысады.

~1400–1500 cm^{-1} аймағы (CO_3^{2-} иондары):

Бұл карбонаттардың тербеліс жолақтары.

Жолақ интенсивтілігі 600 °C үлгісінде (қызыл) әлсіреген, бұл температура артқан сайын көмірқышқыл иондары ыдырайтынын немесе құрылымда азайғанын көрсетеді. Жоғары температурада карбонаттардың ыдырауы немесе қайта құрылуы жүреді.

~1000–450 cm^{-1} (Si–O, Al–O байланыстары):

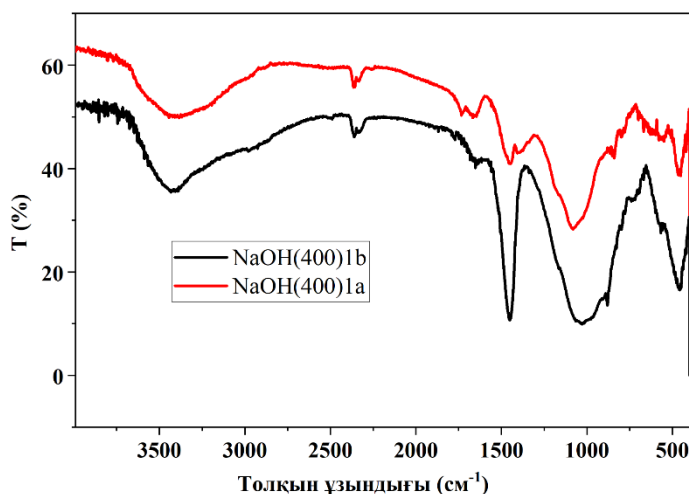
Бұл аймақтағы жолақтар геополимер торының негізгі құрылымына тән.

Күйдіру температурасы артқан сайын (қызыл сызықта) жолақтар терең және күрделі көрінеді. Жоғары температурада геополимер құрылымы тығыздық, торы реттелген және кристалдық элементтерге бай.

FTIR нәтижелері бойынша NaOH-пен активтендірілген геополимерлерде күйдіру температурасы артқан сайын:

- Гидроксил және су молекулаларының саны азаяды,
- Карбонат иондары ыдырайды немесе азаяды,
- Si–O және Al–O байланыстары анық және терең көрініп, құрылымның кристалдық немесе тұрақты түрге өткенін көрсетеді.

Бұл өзгерістер геополимерлеу дәрежесінің артқанын және құрылымның тұрақтануын көрсетеді.



11-сурет – 400 °C күйдірілген NaOH/күл қоспасыны мен геополимердің FTIR қисықтары

11 суретте сумен активтендіруге дейінгі және кейінгі геополимер екі үлгінің FTIR спектрі салыстырылған:

NaOH(400)1b – 1 сағат механикалық активациядан кейін 400 °C-та күйдірілген күл мен NaOH қоспасы (қара сызық).

NaOH(400)1a – осы өнімге сумен активация жүргізілгеннен кейін қатқан үлгі (қызыл сызық).

FTIR нәтижесіне сүйеніп жасалатын тұжырым:

~3400 cm^{-1} аймағы (O–H топтарының тербелісі):

– а үлгісінде (қызыл) бұл жолақ анық әрі кең, ал b үлгісінде (қара) әлсіз.

Сумен өңделгеннен кейін материал ылғалданған және құрылымда гидроксил топтары артады немесе судың адсорбциясы байқалады.

~1450 cm^{-1} (карбонат иондары):

– b үлгісінде бұл жолақ әлдеқайда айқын көрінеді, а үлгісінде – бәсең.

Бастапқы күйдірілген материалда бос карбонат иондары көп, ал сумен активация кезінде бұл иондар құрылыммен әрекеттесіп немесе жуылып кеткен болуы мүмкін.

~1000–450 cm^{-1} (Si–O, Al–O тербелістері):

– а үлгісінде бұл аймақтағы жолақтар салыстырмалы түрде жатық және кең, b үлгісінде – терең әрі өткір.

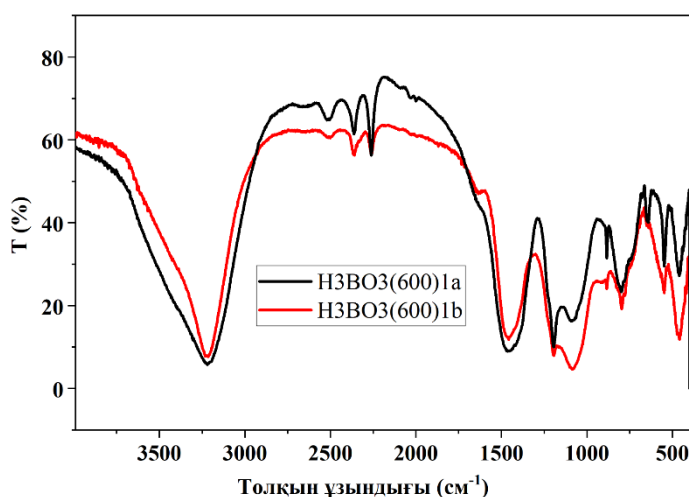
b үлгісінде құрылым кристалдық және Si–O, Al–O байланыстары анық. Ал сумен өңделгеннен кейін (a үлгісі) бұл байланыстар аморфты күйге ауысуы немесе гидратация әсерінен қайта ұйымдасуы мүмкін.

Жалпы алғанда сумен активация (гидратация) нәтижесінде өнімде гидроксил топтары көбейіп, су молекулаларының адсорбциясы байқалады.

Күйдірілген үлгіде (b) бос карбонаттар мен тұрақты Si–O/Al–O байланыстары байқалса, гидратациядан кейінгі үлгіде (a) бұл құрылым әлсіреп, сәл аморфты күйге өткен болуы мүмкін.

Геополимерлік құрылым тұрғысынан алғанда, күйдірілген үлгі кристалдық қасиетке ие болса, сумен өңделген үлгіде су әсерінен қайта құрылымдану немесе тордың бұзылуы жүруі ықтимал.

Бұл өзгерістер гидратация мен термиялық өңдеудің геополимер құрылымына әртүрлі әсер ететінін көрсетеді.



12-сурет – 600 °C күйдірілген H_3BO_3 /күл қоспасыны мен геополимердің FTIR қисықтары

12 Суретте берілген FTIR спектрі екі үлгінің салыстырмалы сипаттамасын көрсетеді:

$\text{H}_3\text{BO}_3(600)1b$ – 1 сағат механикалық активациядан кейін 600°C -та күйдірілген күл мен бор қышқылы (қызыл сызық),

$\text{H}_3\text{BO}_3(600)1a$ – осы өнімге сумен активация жүргізілгеннен кейін қатқан үлгі (қара сызық).

FTIR нәтижесіне негізделген тұжырым:

~3400 cm^{-1} аймағы (O–H топтарының тербелісі):

– Бұл аймақта кең әрі қарқынды жұтылу жолақтары байқалады, бұл – гидроксил топтары мен су молекулаларының болуын білдіреді.

– а үлгісінде (қара) бұл жолақ сәл әлсіздеу, яғни гидратация кезінде су құрылым ішінде байланысқан немесе реттелген күйге өткен болуы мүмкін.

b үлгісінде (қызыл) бос гидроксил топтары көп.

~2900–3000 cm^{-1} аймағындағы тербеліс:

– Бұл органикалық қалдықтардың немесе су молекулаларымен байланысты тербелістер болуы мүмкін.

– а үлгісінде бұл сигнал анық – гидратация әсерінен құрылымда жаңа байланыстар немесе комплекстер пайда болғанын көрсетуі мүмкін.

~1400–1000 cm^{-1} аймағы (BO_3 , B–O–Si, Si–O–Si байланыстары):

– а үлгісінде бұл жолақтар айқынырақ және өткір – құрылымның жоғарырақ ұйымдасқанын (ordered) көрсетеді.

– b үлгісінде жолақтар кеңірек және салыстырмалы түрде жалпақ – бұл аморфты немесе нашар кристалданған құрылымды білдіреді.

~500–900 cm^{-1} аймағы (Si–O және B–O тербелістері):

– а үлгісінде бұл аймақтағы жолақтар анық, өткір және жіктелген, бұл құрылымның тығыз әрі тұрақты екендігін көрсетеді.

– b үлгісінде – салыстырмалы түрде әлсіз және жалпақ, бұл аз реттелген байланыстарға тән.

Қысқаша айтсақ, сумен активациядан кейінгі үлгі (a) құрылымдық жағынан тұрақтырақ, гидроксил топтары кристалдық тормен байланысқан, B–O–Si және Si–O–Si тәрізді құрылымдық байланыстар айқынырақ көрінеді.

Күйдірілген бастапқы үлгіде (b) гидроксил және бор-оттек байланыстары бар, бірақ олардың ұйымдасу деңгейі төменірек.

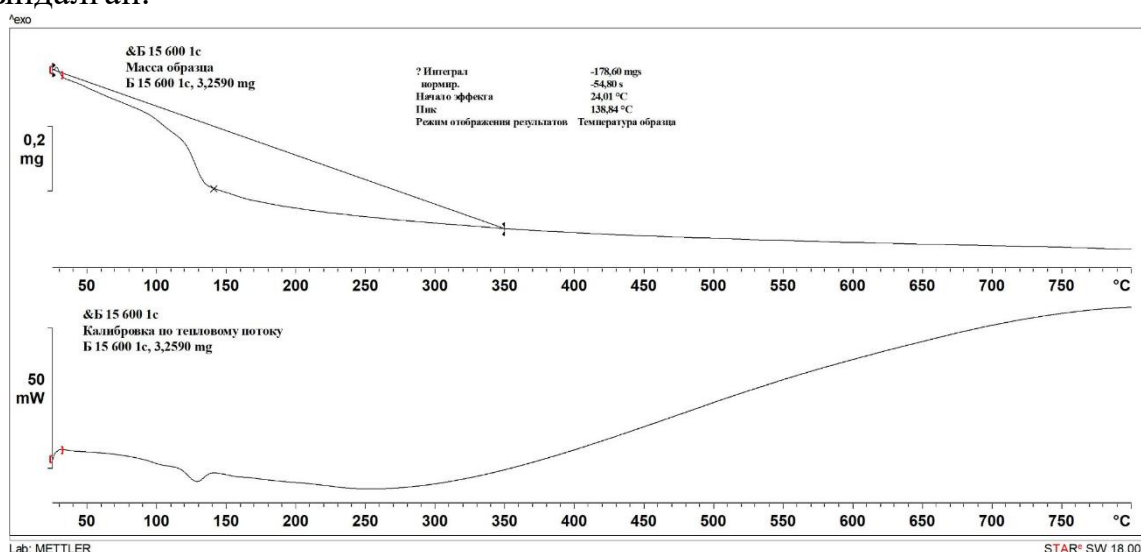
FTIR нәтижелері сумен активациядан кейін құрылымда белгілі бір деңгейде қайта түзілу және реттелу жүргенін көрсетеді.

3.7 Алынған геополимерлердің термиялық қасиеттерін зерттеу

Геополимерлік материалдардың жоғары температурадағы тұрақтылығын бағалау мақсатында NaOH және H_3BO_3 негізінде алынған екі түрлі үлгіге термогравиметриялық (TGA) және дифференциалды сканерлік калориметриялық (DSC) талдау жүргізілді. Бұл зерттеу өнімдердің жылу әсерінен болатын құрылымдық өзгерістерге төзімділігін және қалдық құрамындағы ұшпа компоненттердің мөлшерін анықтау үшін қажет болды.

NaOH(400 °C) геополимерлік үлгісі – 1 сағат механикалық белсендіруден кейін 400 °C температурада күйдірілген күл мен NaOH қоспасынан алынған.

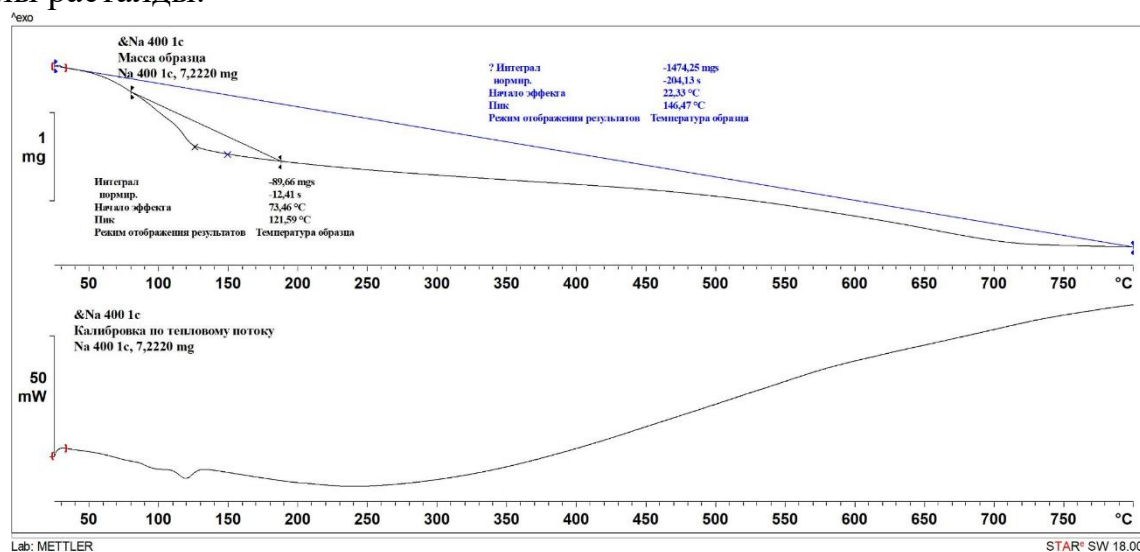
H₃BO₃(600 °C) геополимерлік үлгісі – 1 сағат механикалық белсендіруден кейін 600 °C температурада күйдірілген күл мен бор қышқылы қоспасынан дайындалған.



13-сурет - NaOH активаторы бар геополимердің TGA/DSC талдауы

NaOH негізіндегі үлгінің термиялық талдауы:

TGA нәтижесіне сәйкес, бұл үлгіде қыздыру кезінде екі негізгі масса жоғалту кезеңі байқалды. Алғашқысы – 22–150 °C аралығында, су мен адсорбцияланған ұшпа заттардың булануы нәтижесінде жүреді. Екінші кезең – 150°C-тан жоғарыда, яғни органикалық және құрылымдық байланысқан қосылыстардың ыдырауына сәйкес келеді. Жалпы масса жоғалту шамамен 20%-ға жетті, бұл құрылымда әлсіз байланысқан фазалар мен бос иондардың бар екенін көрсетеді. DSC қисығында бұл өзгерістер жеңіл эндотермиялық процестер арқылы расталды.



14-сурет - Бор қышқылы (H₃BO₃) негізіндегі геополимердің TGA/DSC талдауы

Н₃ВО₃ негізіндегі үлгінің термиялық талдауы:

Бұл үлгіде де басты масса жоғалту 24–150 °С аралығында байқалды, бірақ жоғалтылған масса мөлшері бар болғаны ~5.5% құрады. Бұл көрсеткіш құрылымда бос су мен тұрақсыз фазалардың аз екенін білдіреді. DSC қисығында айқын жылулық өзгеріс байқалмайды, бұл материалдың жоғары температураға тұрақтылығын және термиялық тұрақты құрылым түзілгенін көрсетеді.

NaOH-пен дайындалған геополимер 400 °С температурада күйдірілсе де, термиялық тұрақтылығы төмен болып шықты. Керісінше, Н₃ВО₃-пен алынған өнім 600 °С температурада тұрақты құрылым түзіп, қыздыру кезінде аз масса жоғалтты. Бұл бор қышқылының геополимер құрылымын тұрақтандыруда тиімді рөл атқаратынын және өнімнің жоғары температурада бұзылмай сақталуына септігін тигізетінін көрсетеді.

Осылайша, TGA/DSC зерттеулері геополимерлік жүйеде қолданылған активатордың табиғаты мен күйдіру температурасы өнімнің термиялық тұрақтылығына елеулі әсер ететінін көрсетті. Бұл ақпарат геополимерлік материалдарды нақты инженерлік немесе құрылыс мақсатында қолдану үшін маңызды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде ұшпа күл мен бор қышқылы негізіндегі геополимерлік жүйелердің құрылымдық қасиеттері мен тұрақтылығы олардың дайындалу әдістері мен өндеу температурасына тікелей тәуелді екені анықталды. Құрғақ әдіспен механикалық белсендіру және кейінгі термиялық өндеу — геополимер түзілуінің тиімді тәсілі болып табылды.

Зерттеу барысында бор қышқылының мөлшері мен күйдіру температурасының материал қасиеттеріне әсері ерекше байқалды. Атап айтқанда, 600 °C температурада бор қышқылы B_2O_3 фазасына өтеді де, Si және Al тетраэдрлерімен химиялық байланысып, материалдың тор құрылымын нығайтады. Мұндай құрылым геополимерге жоғары термиялық және химиялық тұрақтылық береді, су сіңіргіштігі төмендейді және механикалық беріктігі артады. Әсіресе, 15 г бор қышқылы қосылып, ұзақ уақыт механоактивация жүргізілген үлгілер жақсы нәтижелер көрсетті.

NaOH және KOH активаторлары қолданылған үлгілермен салыстырғанда, бор қышқылы негізіндегі геополимерлер экологиялық тұрғыдан қауіпсіз және гидрофобты сипатқа ие болды. Сонымен қатар, бор модификациясы арқасында алынған өнімдердің эстетикалық сипаттамалары да жақсарғанын атап өткен жөн.

Жалпы алғанда, бор қышқылы ұшпа күл негізіндегі геополимерлердің беріктігі мен тұрақтылығын арттыратын тиімді модификатор болып табылады. Бұл жұмыс ұшпа күлді құрылыс және арнайы мақсаттағы материалдарға айналдыруда перспективалы бағыттың бар екенін көрсетті. Болашақта алынған нәтижелерді 3D баспа, экологиялық сорбенттер және химиялық төзімді құрылымдық материалдар өндіруде қолдануға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials // Journal of Thermal Analysis. – 1989. – Vol. 35. – P. 429–441.
- [2] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 1991. – Vol. 37, № 8. – P. 1633–1656.
- [3] Гришин А. С., Петроченко Р. Е. Преимущества геополимерных бетонов перед бетонами из портландцемента // Россия молодая. – 2022. – С. 63109-1.
- [4] Сариев Б., Амрин А., Джексембаева А., Конканов М. Анализ реологических свойств геополимера летучей золы, армированного полиэтиленовым волокном, для аддитивного производства // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2024. – Т. 21, № 4. – С. 234–244.
- [5] Кожухова Н. И., Жерновский И. В., Соболев К. Г. Влияние различий рентгеноаморфной фазы в составе низкокальциевых алюмосиликатов на прочностные характеристики геополимерных систем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 4. – С. 5–12.
- [6] Ketegenov T., et al. The study of fly ash filler behaviour in the polymer matrix of polyethyleneterephthalate // Chemical Bulletin of Kazakh National University. – 2019. – Vol. 92, № 1. – P. 28–36.
- [7] Молдахметов К. Жылу электр станцияларының (ЖЭС) даму болашағы // Data Science. – 2025. – Т. 2, № 2.
- [8] Faizullayev S. N., Sailaubay E., Adilbekova A. O. Thermal treatment of model water-in-oil emulsions by coal fly ash particles // Chemical Bulletin of Kazakh National University. – 2025. – Vol. 114, № 1. – P. 4–10.
- [9] Нұғмансая Е. Н., Копжасаров Б. Т., Моминова С. М., Дуйсенбаева С. Т., Копжасарова Г. Т. Кремнийлі компоненттер мен олардың газдалған бетон түрлеріне әсерін зерттеу // Механика және технологиялар. – 2024. – № 2 (84). – Б. 159–166.
- [10] da Silva A. P. F., et al. Production and characterization of geopolymers from diatomaceous earth // [Conference/Journal details not specified].
- [11] Kabirova A., Uysal M. Bazalt tozunun geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması // Mühendislik Bilimleri.
- [12] Ariöz E., Büke G. B. Removal of methylene blue from aqueous solutions with fly ash-based geopolymer foam // Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. – 2021. – № 28. – P. 1437–1441.
- [13] Parmanbek N., et al. Қоңыр көмір мен одан бөлініп алынған гумин қышқылының физика-химиялық қасиеттерін зерттеу // Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University: Multidisciplinary. – 2025. – № 1 (124). – P. 49–62.

- [14] Абзал А. А., Мухатаева Н. Н. Алматы қаласындағы автокөліктің топыраққа, өсімдікке және топырақ омыртқасыздарына әсері // Proceedings of the 8th International Scientific Conference “Research Reviews” (Prague, 2025). – P. 144.
- [15] Жабриков С. Ю., и др. Геополимеризация органоминерального отсева твердых коммунальных отходов с применением интеграционной минерал-матричной технологии // Экологические проблемы недропользования. – 2016.
- [16] Федюк Р. С., Тимохин Р. А., Смоляков А. К. Научное лидерство китайских ученых в области строительных технологий // Россия и Китай: проблемы стратегического взаимодействия. – 2017. – Вып. 19. – С. 21–24.
- [17] Носков С. Ю., Киселев М. Г., Колкер А. М. Структурные аспекты сольватации NaCl в водном растворе метанола: моделирование методом молекулярной динамики // Журнал физической химии. – 2001. – Т. 75, № 3. – С. 446–452.
- [18] Очур-Оол А. П., Манзырыкчы Х. Б., Зырянова В. Н. Кристаллическая структура минералов группы серпентина (хризотил-асбест) // Вестник Туvinского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2021. – № 4 (86). – С. 14–22.
- [19] Aleem M. I. A., Arumairaj P. D. Geopolymer concrete – a review // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. – 2012. – Vol. 1, № 2. – P. 118–122.
- [20] Клесов А. А., Рабинович М. Л. Ферментативный гидролиз целлюлозы // Биоорганическая химия. – 1980. – Т. 6, № 8. – С. 1225–1242.
- [21] Мирзоев Д. Х., и др. Водно-солянокислотное разложение зелёных глин месторождения Чашма-Санг Таджикистана с предварительным спеканием с гидроксидом натрия // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 467–469.
- [22] Шендрик Т. Г., и др. Формирование пористой структуры бурого угля при термолизе с гидроксидом калия // Химия твердого топлива. – 2009. – № 5. – С. 51–55.
- [23] Каблов В. Ф., Кейбал Н. А., Мещеряков А. В. Разработка и исследование огнезащитных материалов с гидратами силиката натрия // Взаимодействие предприятий и вузов – наука, кадры, новые технологии. – 2018.
- [24] Володченко А. Н. Особенности взаимодействия магнезиальной глины с гидроксидом кальция при синтезе новообразований и формировании микроструктуры // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 51–55.
- [25] Kurmangazhy G., et al. Adsorption of tetracycline on magnetite-bentonite composite // Chemical Bulletin of Kazakh National University. – 2019. – Vol. 93, № 2. – P. 36–40.
- [26] Цырятьева А. В. Зола гидроудаления как компонент геополимеров // Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий. – 2015.

[27] Tanasheva M., et al. Способы выбора аппаратуры экологически эффективных технологических схем для переработки боратного сырья // Chemical Bulletin of Kazakh National University. – 2011. – Vol. 64, № 4. – P. 187–189.

[28] Сейлгазина С. М., Муратбекова Б. М. Формирование продукции различных сортов тыквы при возделывании по интенсивной технологии в условиях капельного орошения // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2020. – № 3 (91). – С. 299–303.

[29] Байдуллаева Ш. А. Вопросы безопасности борной кислоты и её производных // Вестник Казахского Национального медицинского университета. – 2010. – № 5-3. – С. 209–212.

[30] Lloyd N. A., Rangan B. V. Geopolymer concrete: a review of development and opportunities // Proceedings of the 35th Conference “Our World in Concrete & Structures” (Singapore, 25–27 Aug 2010). – Singapore: CI-Premier, 2010.

[31] Ахметжан Г. Б. *Filipendula ulmaria* жапырактарынан ультрадыбысты сығындыларын алу технологиясы // [Proceedings details not specified]. – 2021.

[32] Ахметжан З. С., и др. Увеличение добычи жидких углеводородов интенсификацией нагнетательных скважин месторождения Карачаганак // [Proceedings details not specified]. – 2020.

[33] Parathi S., Nagarajan P., Pallikkara S. A. Eco-friendly geopolymer concrete: a comprehensive review // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2021. – Vol. 23. – P. 1701–1713.

[34] Айтжанова Н. М. *Nitraria schoberi* L. дәрілік өсімдік шикізатын фармакопаялық сапа көрсеткіштері мен фармако-технологиялық параметрлерін анықтау // [Journal details not specified]. – 2021.

[35] Rangan B. V. Geopolymer concrete for environmental protection // The Indian Concrete Journal. – 2014. – Vol. 88, № 4. – P. 41–59.

[36] Salas D. A., et al. Life cycle assessment of geopolymer concrete // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 190. – P. 170–177.

[37] Калиаскаров Н. Б., и др. Измерение температуры и влажности на основе двухпроцессорной Wi-Fi системы // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2020. – № 4. – С. 60–69.

[38] Дудников А. Г., Дудникова М. С., Реджани А. Геополимерный бетон и его применение // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2018. – № 1-2. – С. 38–45.

[39] Фаликман В. Р., Охотникова К. Ю. Геополимерные вяжущие и бетоны в современном строительстве // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 4-1 (35). – С. 93–97.

[40] Ерошкина Н. А., Коровкин М. О. Методы оценки и повышения долговечности геополимерных строительных материалов на основе промышленных отходов: учеб. пособие. – 2014.

[41] Сулейманова Л. А., Рябчевский И. С., Чесноков И. А. Исследование факторов, влияющих на физико-механические характеристики геополимерного бетона // [Journal details not specified].

[42] Ким С. В., Катаев Г. А., Муравьев А. С. Геополимерная цементно-песчаная смесь: вопросы характеристик // Перспективы науки. – 2020. – № 11. – С. 238–240.

[43] Федотенко В. С., Радченко Д. Н., Гаджиева Л. А.-С. Выбор состава геополимерного материала для изоляции горнотехнических конструкций при шахтном подземном выщелачивании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 164, вып. 4. – С. 125–137.

[44] Разуева Е. А., Парфенова Л. М. Оценка эффективности ускорителей твердения геополимерного вяжущего // [Journal details not specified]. – 2019.

[45] Алиев А. А. Улучшение реологических свойств геополимеров щелочной активации с применением технологических жидкостей на безводной основе // [Journal details not specified].

[46] Nikolov A. Синтез и термические свойства геополимеров на основе местной летучей золы // Proceedings of the International Symposium “Mineral Diversity – Research and Preservation”. – 2019.

[47] Тесля А. Ю., и др. Изучение влияния вида форм на физико-механические свойства геополимерного вяжущего // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2022.

[48] Ерошкина Н. А., Мишанов А. А. Водостойкость геополимерных вяжущих с комплексной добавкой // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: сб. науч. тр. – Пенза: ПГУАС, 2006.

[49] Lloyd N. A., Rangan B. V. Geopolymer concrete with fly ash // Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (Ancona, 28–30 Jun 2010). – Milwaukee: UWM Center for By-Products Utilization, 2010. – P. 1493–1504.

[50] Van Chanh N., Trung B. D., Van Tuan D. Recent research on geopolymer concrete // Proceedings of the 3rd ACF International Conference “ACF/VCA” (Vietnam, Nov 2008). – 2008. – Vol. 18. – P. 235–241.

РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмыс бойынша
(жұмыс түрінің атауы)

Смағұлова Сабина Абайқызы
(Білім алушының Т.А.Ә.)

6B07116"Негізгі өндірістер технологиясы және жаңа материалдар"
(ББ шифры және атауы)

Тақырып: Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУЛЕР

Жұмыста қолданылған зерттеу әдістері – лазерлік дифракция (гранулометрия), BET адсорбциясы (меншікті бет пен кеуектілік), XRF (элементтік құрам), XRD (фаза талдауы), FTIR, SEM, TGA/DSC және динамикалық механикалық беріктік сынағы – дипломдық жұмыстың ғылыми деңгейінің жоғары екенін көрсетеді. Бұл әдістер нәтижесінде күлдің химиялық-фазалық құрамы, беткі морфологиясы және геополимеризация нәтижесіндегі құрылымдық өзгерістері толық сипатталған.

Жұмыс құрылымы логикалық тұрғыдан нақты құрылған: кіріспе, әдеби шолу, эксперименттік бөлім, нәтижелер және қорытынды бөлімдері мазмұнды әрі ғылыми талаптарға сай. Әдебиет шолуында геополимеризация, бор қышқылының модификатор ретіндегі рөлі, сілтілік активаторлардың әсері туралы жан-жақты мәліметтер келтірілген. Эксперименттік бөлімде нақты тәжірибелік шарттар мен параметрлер егжей-тегжейлі баяндалған.

Нәтижелерді талдау барысында бор қышқылының 600 °C температурада B_2O_3 фазасын түзетіні және бұл фазаның Si/Al құрылымымен әрекеттесіп, геополимердің термиялық және механикалық қасиеттерін жақсартатыны дәлелденген. Сонымен қатар, NaOH пен KOH активаторларымен салыстырмалы зерттеу нәтижелері де нақты ұсынылған.

Жұмысты бағалау

Ескере отырып практикалық және танымдық құндылығы, тақырып бойынша дипломдық жұмыс «Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу» орындалды Смағұлова Сабина Абайқызы "өте жақсы" бағасына лайық (98 балл, А, 98%).

Рецензент

«Ө.Б. Бектұров атындағы ХФИ» АҚ,

«Тыңайтқыштар және тұздар химиясы» зертханасының

Ж.Т.К., Т.Т.А. қауымдастырылған профессор

(лауазымы, ғылыми дәрежесі, атағы)

Кайынбаева Р.А.



Қолын
Подпись
куәландыруға қолданылған
ХФИ АҚ кеңсесі бастығы
Зав. канцелярией АО ИХН

Дипломдық жұмыс бойынша

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Смағұлова Сабина Абайқызы

6B07116– «Негізгі өндірістер технологиясы және жаңа материалдар»

Тақырып: «Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу»

Смағұлова Сабинаның дипломдық жұмысы экологиялық және технологиялық тұрғыдан өзекті мәселеге арналған. Автор ұшпа күлді екінші реттік шикізат ретінде пайдалана отырып, бор қышқылының геополимерлік жүйенің құрылымдық және физикалық-химиялық қасиеттеріне әсерін жан-жақты зерттеген.

Жұмыс құрылымы талапқа сай, әдеби шолуда геополимерлік байланыстырғыштардың түзілу механизмі, ұшпа күлдің құрамы мен қасиеттері, сондай-ақ бор қосылыстарының рөлі терең талданған. Эксперименттік бөлімде зерттеу үлгілері дайындалып, әртүрлі концентрациядағы бор қышқылының әсері XRD, FTIR, SEM сияқты заманауи әдістермен зерттелген. Сынақ нәтижелері диаграммалармен, кестелермен және микробейнелермен толық берілген.

Сабина ғылыми әдебиеттермен жұмыс істей алады, алынған мәліметтерге сауатты талдау жасап, олардан қорытынды шығара біледі. Студент зерттеу жұмысын жүйелі, жауапкершілікпен орындап шықты.

Дипломдық жұмыс мазмұны мен орындалу сапасы бойынша қойылған ғылыми-техникалық талаптарға толық сай келеді. Жұмыс қорғауға ұсынылады, бағасы – 95% (өте жақсы).

Ғылыми жетекші

Техника ғылымдарының магистрі,
аға оқытушы

 Далбанбай А.

«13» 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: Смағұлова Сабина Абайқызы

Тақырыбы: Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу_2025

Жетекшісі: Амантай Далбанбай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0

Әріптерді ауыстыру: 10

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 79

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 13.06.2025ж.

Кафедра меңгерушісі КРМӨЗ

Кудекова с.а. Куз

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Смағұлова Сабина Абайқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Ұшпа күл негізіндегі геополимерлерге бор қышқылының әсерін зерттеу_2025

Научный руководитель: Амантай Далбанбай

Коэффициент Подобия 1: 0.1

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 79

Знаки из других алфавитов: 10

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 05.06.2025



проверяющий эксперт