



Дулааны цахилгаан станцын үнсэн сангийн үнсний төмрийн агуулгыг  
бууруулах судалгаа

Лувсандагва Мандахсайхан\*, Батмөнх Даваабал, Рэнцэнноров Уламбаяр, Очирхуяг Алтантуяа,  
Цоодол Золзаяа, Гэндэнжамц Оюун Эрдэнэ

Материал судлал, технологийн лаборатори, Хими, химийн технологийн хүрээлэн, Шинжлэх ухааны академи,  
Улаанбаатар 13330, Монгол

\*E-mail: mandakhsaikhanl@mas.ac.mn

ORCID: [0000-0002-1465-0894](https://orcid.org/0000-0002-1465-0894)

Хүлээн авсан: 20.10.2024

Хяналтад: 14.11.2024

Хэвлэлтэд авсан: 16.12.2024

**Хураангуй:** Энэхүү судалгаагаар дулааны цахилгаан станцад нүүрс шатаах явцад их хэмжээгээр үүсдэг хаягдал үнсний төмрийн агуулгыг бууруулах технологийн шийдлүүдийг харьцуулан судалсан. Судалгаанд ашигласан үнс нь 45.5% SiO<sub>2</sub>, 11.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12.5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> агуулгатай байсан. Хаягдал үнсийг барилгын материал, зам гүүрийн бүтээн байгуулалт, цеолитын нийлэгжилтэд ашигласаар ирсэн бөгөөд орчин үед үнснээс цахиурын давхар оксид (SiO<sub>2</sub>), хөнгөнцагаан (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-ыг ялган авч, цэнэг хураагуур, 3D хэвлэл, нийлмэл материал гарган авах судалгаа өргөжиж байна. Гэвч үнсэнд агуулагдах төмрийн оксид нь эдгээр нэгдлүүдийг өндөр цэвэршилттэй гарган авахад саад болж, бүтээгдэхүүний чанарт сөрөг нөлөө үзүүлдэг.

Судалгааны ажлаар үнснээс төмрийн агуулгыг бууруулах хоёр төрлийн боловсруулалтын аргыг харьцуулсан. Үнсэнд агуулагдах дутуу шатсан нүүрстөрөгчийг дулааны боловсруулалт хийж (800°C, 2 цаг) бүрэн зайлуулсны дараа нойтон соронзон баяжуулалт болон хүчлийн автоклавын уусгалтын аргыг ашиглан төмрийн агуулгыг бууруулах боломжийг судалсан. Нойтон соронзон баяжуулалтын аргаар (соронзон хүч 400МТл) нийт төмрийн 51.0%-ийг зайлуулсан бол давсны хүчил (HCl) ашиглан автоклавын уусгалтын аргаар төмрийг зайлуулах тохиромжтой параметрийг (6М HCl, 24 цаг, 100°C, Х:Ш харьцаа 1:10) тодорхойлж, төмрийн агуулгыг 91.4% хүртэл бууруулах боломжтойг тогтоов.

Судалгааны үр дүнд үнсэн дэх төмрийн агуулгыг үр дүнтэйгээр бууруулснаар цахиур болон хөнгөнцагааны оксидуудыг өндөр цэвэршилттэй гарган авах боломжийг бүрдүүлж байна.

**Түлхүүр үг:** хаягдал үнс, төмөр, соронзон баяжуулалт, хүчлийн уусгалт

**ОРШИЛ**

Нүүрсийг шатаахад үүсдэг хаягдал бүтээгдэхүүн болох үнс нь дэлхийн хэмжээнд өргөн хэрэглэгддэг түүхий эдийн нэг болж байна. Нийт хаягдаж байгаа үнсний 20-30%-ийг полимер, геополлимер, бетон [1] болон цементийн үйлдвэрлэл [2], шингээгч материал [3], цеолит [4], будаг, барилгын материал, керамикийн түүхий эд, ХАА-д хөрс сайжруулах зэрэг олон чиглэлээр ашиглаж байна [5]. Хамгийн өргөн хэрэглэж байгаа салбар нь цементийн үйлдвэрлэлд нийт ашиглаж байгаа үнсний 38%, бетоны үйлдвэрлэлд 14%, барилгын материалын үйлдвэрлэлд 26%-ийг тус тус ашиглаж байна [6]. Барилга, цементийн үйлдвэрлэлд бетоны механик шинж чанар, тогтвортой байдлыг сайжруулах зорилгоор үнсийг хэрэглэдэг байна [7]. Үүнээс гадна үнс нь хөнгөнцагаан, цахиур зэрэг үнэтэй материалыг гарган авах эх үүсвэр болох боломжтой юм. Гэвч үнсэн сангийн үнсэн дэх төмрийн өндөр агуулга нь цементийн чанарт сөргөөр нөлөөлөх, хөнгөнцагаан болон цахиурыг ялган авах процессыг төвөгтэй болгож, бүтээгдэхүүний чанарт сөргөөр нөлөөлдөг [8]. Тиймээс үнсэн дэх төмрийн агуулгыг бууруулах нь өндөр бат бэхтэй бетон үйлдвэрлэх, хөнгөнцагаан болон цахиурыг ялган авах процессыг хөнгөвчилж,

бүтээгдэхүүний чанарыг сайжруулах гол нөхцөл болдог [9]. Мөн үнсэн сангийн үнсийг үр ашигтайгаар ашиглах нь байгалийн цэвэр түүхий эдийн хэрэглээг багасгахын зэрэгцээ хог хаягдлын хэмжээг бууруулах давхар ач холбогдолтой юм [10]. Тэгэхээр үнсэн санд цугларсан хаягдал үнсийг ашиглаж үйлдвэрийн түүхий эд болгохын тулд юуны түрүүнд төмрийн агуулгыг бууруулж, зайлуулах нь чухал юм [11]. Төмрийн агуулгыг бууруулахад соронзонгоор ялгах, флотаци, химийн уусгалт, ширхэглэлээр ангилах, шүүх зэрэг аргуудыг ашигладаг [12]. Жишээ нь, соронзон ялгалт нь үнсэн дэх төмрийн нэгдлүүдийг механик аргаар салгах боломжийг олгодог бол флотацийн арга нь химийн урвалын тусламжтайгаар төмөр болон бусад эрдсүүдийг ялгадаг байна [13].

Манай улсын хувьд цахилгаан дулааны эрчим хүчний дийлэнх хувийг үйлдвэрлэдэг Улаанбаатар хотын ДЦС-2, 3, 4 станцууд нь 2023 оны байдлаар жилдээ 5.97 сая тн. нүүрс хэрэглэж, үнсэн санд 0.5 сая тн орчим үнсийг хуримтлуулсан байна. “ДЦС-4”-ийн 2013 онд байгуулсан үнсэн сан 1.4 сая м<sup>3</sup> эзлэхүүнтэй бөгөөд хаягдал жилд 250-300 мянган тонноор нэмэгддэг байна. “ДЦС-4” ТӨХК-ийн 70 гаруй га газар бүхий нийт 5 үнсэн санд 6-9 сая.м<sup>3</sup>

үнс хадгалагдан, жилд дунджаар 0.34 сая.тн-оор нэмэгдэж байна [14].

Улаанбаатар хот өдрөөс өдөрт тэлж, хотжих үйл явц эрчимтэй явагдаж байгаатай холбоотойгоор нэмж үнсэн сан байгуулах газар улам бүр хомсдож байна. Иймээс үнсэн санд хуримтлагдсан үнсийг зүй зохистойгоор боловсруулж түүхий эд болгон хэрэглэх асуудал зайлшгүй тулгарч байна. Мөн үнсэнд агуулагдах хүнд, хортой элементүүд нь хөрс, ус, агаарыг бохирдуулдаг байна [15].

Бид энэхүү судалгааны ажлаар “ДЦС-4” ТӨХК-ийн үнсэн сангийн үнсний физик химийн шинж чанарын судалгааг гүйцэтгэж, үнсэнд агуулагдах элементийн шинжилгээг гүйцэтгэсэн. Уг шинжилгээний дүнд үндэслэн үнсэнд >12 % агуулагдах төмрийн ислийг зайлуулах судалгааг гүйцэтгэсэн. Ингэхдээ соронзон шинж чанартай төмрийн ислийг зайлуулах зорилгоор нойтон соронзон баяжуулалтын аргыг ашигласан бол нийт төмрийг зайлуулах зорилгоор автоклавын хүчлийн уусгалтын аргыг ашигласан. Эдгээр аргуудыг харьцуулан судалсанаар 6 М давсны хүчил, 24 цагийн урвалын хугацаа, 100°C-ийн температур, 1:10 харьцаатай хатуу-шингэний харьцаатайгаар үнсийг хүчлийн боловсруулалтад оруулж төмрийг  $\geq 90\%$  зайлуулах боломжтойг тогтоосон. Энэхүү аргыг ашиглан үнснээс төмрийг зайлуулсны дараа цахиур ( $\text{SiO}_2$ ), хөнгөнцагааны оксид ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ялгах боловсруулалтыг гүйцэтгэхэд илүү хялбар бөгөөд үр дүнтэй болно гэж үзэж байна.

### СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

**Судалгааны материал:** Бид энэхүү судалгааны ажлын түүхий эдээр Улаанбаатар хотын Баянгол дүүрэгт байрлах “ДЦС-4” ТӨХК-ийн үнсэн сангийн үнсийг ашигласан. Дээж боловсруулахад ОХУ-д үйлдвэрлэсэн химийн цэвэр зэрэглэлийн давсны хүчлийг (CAS:7647-01-0, HCl, 35-38%, ГОСТ 3118-77, Орос) ашигласан.

**Үнсний боловсруулалт:** Үнсний дээжийг сайтар хатаагаад 0.5мм-ийн шигшүүрээр бүрэн нэвтэртэл нунтаглаж шигшсэн. Үнсэнд агуулагдах дутуу шатсан нүүрстөрөгчийг 800°C-д 2 цагийн турш шатааж зайлуулан дараагийн шатны судалгаанд ашиглахад бэлэн болгосон.

**Нойтон соронзон баяжуулалт:** Нойтон соронзон сепаратор ашиглан 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 мТл соронзон хүчээр үнснээс төмрийг зайлуулан, дээжийг шүүж 105°C-д 24 цаг хатаасан.

**Үнсийг хүчлээр боловсруулах:** Механик боловсруулалт хийж, соронзон баяжуулалтын аргаар төмрийн агуулгыг бууруулсан үнсийг тефлон

сав бүхий автоклавт давсны хүчлээр уусгав. Үнс болон хүчлийн уусмалын 1:10 (w/v) харьцаатай хольцыг автоклавт хийж, хатаах шүүгээнд тодорхой температур, хугацаанд боловсруулж хүчлийн боловсруулалт хийсэн. Хольцыг шүүж, нэрмэл усаар угааж, хуурай үлдэгдлийг 105°C-д 24 цаг хатаасан. Энэхүү хуурай үлдэгдлийг стандарт аргын (ISO 2597-2:2015/ASTM E246-10) дагуу задалж, төмрийн агуулгыг XRF, ICP-OES багаж болон комплексометрийн аргаар тодорхойлсон. Автоклавын аргаар давсны хүчлийн уусгалтаар төмөр зайлуулахад дараах хүчин зүйлүүдээс хамааруулан судалсан. Үүнд:

- Давсны хүчлийн концентраци 1М, 2М, 4М ,6М
- Хугацаа 12 цаг, 24 цаг, 48 цаг
- Температур 100°C ,150°C
- Шингэний даралт 3МПа хүртэл
- Хатуу шингэний харьцаа 1:5, 1:10

**Багаж, шинжилгээ:** Судалгааны ажлын дээж боловсруулалтад нойтон соронзон сепаратор (XCGS -50, БНХАУ), шатаах зуух (RC181B5AN Nabertherm, Герман), хатаах шүүгээ (DZF-6020 Meditry, БНХАУ), автомат ажиллагаатай шигшүүрийн багц (JS14S, БНХАУ), тефлон сав бүхий автоклав, богино долгионы дээж задлагч (MARS-7, АНУ) ашигласан. Багажит шинжилгээнд рентгенфлуоресценцийн спектрометр (XRF, AXIOS max PW4400, PanAnalytic; Explorer 5000 Handheld Analyzer), термогравиметр (TG/DTA, STA 7300, Hitachi, Япон), электрон микроскоп (SEM, SWIFTED TM-1000 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, Hitachi, Япон), рентген дифрактометр (Enraf Nonius Defelt Diffractis 583, Голланд) багажийг ашигласан.

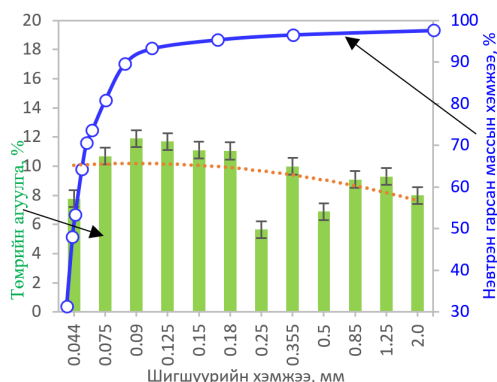
### ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

**Түүхий эдийн шинж чанарын судалгаа:** Үнсэн сангийн үнсний эрдсийн найрлагыг тодорхойлсон рентген дифракцийн (XRD) шинжилгээний дүнгээс үзэхэд, эрдсийн найрлагын хувьд кварц ( $\text{SiO}_2$ ) 37.7%; гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 20.9%; альбит ( $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ) 17.0%; магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 7.2%, анортит ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 9.1% агуулагдаж байсан. XRD шинжилгээгээр соронзон шинж чанартай төмөр буюу магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 7.2% илэрсэн нь үнсэн дэх төмрийн тодорхой хэсгийг соронзон баяжуулалтаар бууруулах боломжтойг харуулж байна. Мөн төмөр нь соронзон бус буюу гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) хэлбэрээр агуулагдаж байгаа тул химийн арга буюу хүчлийн уусгалтын аргыг давхар ашиглах боломжтой. Иймээс бид судалгааны ажлаараа төмрийн агуулгыг 2 өөр төрлийн арга ашиглан салгаж, төмрийг

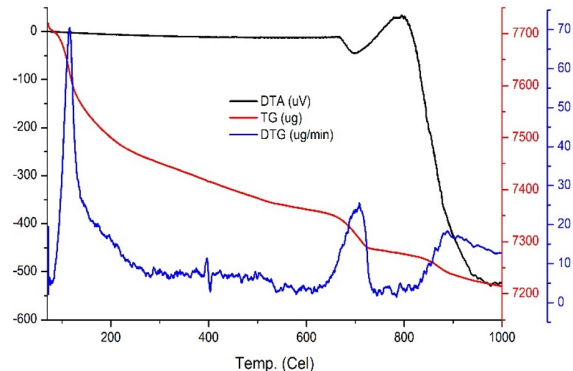
Хүснэгт 1. Үнсэн сангийн үнсний химийн найрлага (% , XRF)

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	BaO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	ШЖХ*
45.5	11.3	12.5	17.0	2.9	0.4	0.05	1.1	0.54	0.64	0.06	6.7

\*Шатаалтын жингийн хорогдол



**Зураг-1.** Үнсэн сангийн үнсний ширхэглэлийн тархалт, ширхэглэлд агуулагдах төмрийн агуулга

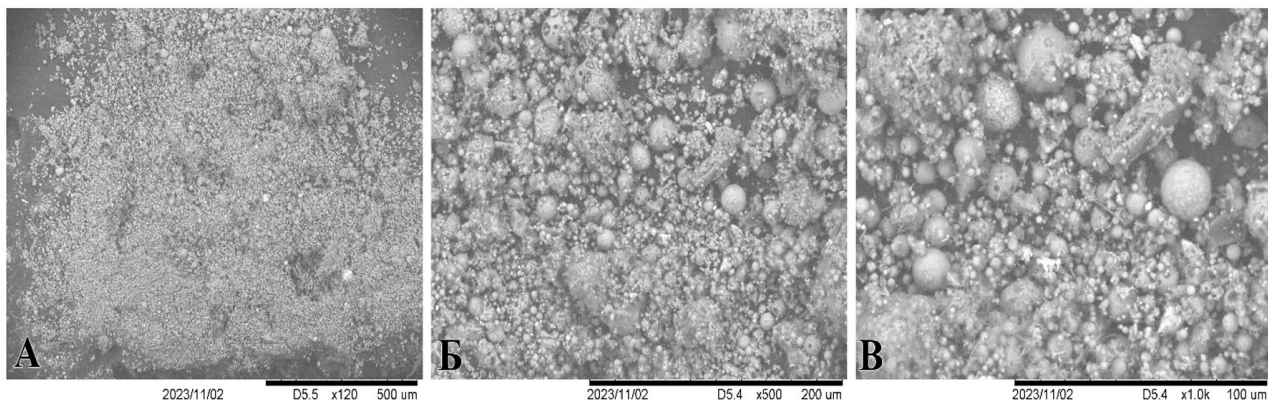


**Зураг-2.** Үнсэн сангийн үнсний термогравиметр (TG)

бууруулах судалгааг явуулаа.

Мөн үнсэн дэх эрдсийн найрлагыг рентгенфлуоресценцийн спектрометр (XRF)-ийн багажаар тодорхойлон шинжилгээний дүнг Хүснэгт 1-т үзүүлэв. Шинжилгээний дүнгээс үзэхэд, SiO<sub>2</sub> агуулга хамгийн өндөр буюу 45.5%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> агуулга 11.3%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> нь 12.5% агуулагдаж байна. Бусад судалгааны материалуудтай харьцуулахад CaO-н агуулга харьцангуй өндөр буюу 17.0% байна [16]. Эдгээрээс төмөр нь дулааны цахилгаан станцаас гарч буй үнсийг дахин боловсруулж SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> гэх мэт металл оксидууд гарган авах технологид хамгийн их саад болдог бөгөөд эхний шатанд зайлшгүй салгах шаардлагатай нь харагдаж байна. Үнсний ширхэглэл нь үнсний боловсруулалтад чухал нөлөөтэй бөгөөд ширхэглэлийн хэмжээнээс уусгалт, цэвэршүүлэлтийн чанар шууд хамаардаг. Үнсний дээжийн ширхэглэлийн тархалтыг тодорхойлсон туршилтын дүнг Зураг 1-т харуулснаас гадна ширхэглэлийн бүрэлдэхүүн, төмрийн агуулга хоорондын хамаарлыг харьцуулан үзүүлээ. Ширхэглэлийн бүрэлдэхүүнийг тооцож үзэхэд, дундаж ширхэглэлийн хэмжээ D<sub>50</sub>=0.072 мм (72 мкм), 0.5 мм-с бага ширхэглэлтэй хэсэг нийт дээжийн 93.27% байгаа нь дээжийг боловсруулахад дахин нунтаглах шаардлагагүй болох нь харагдаж байна. Иймээс цаашдын боловсруулалтад шигшсэн 0.5 мм-ийн ширхэглэлтэй үнсийг ашигласан.

Үнсний ширхэглэлийн хэмжээ ихсэх тусам төмрийн агуулга буурах зүй тогтол ажиглагдаж байна. 0.075-0.18 мм нарийн ширхэглэлтэй үнсний хувьд дундаж төмрийн агуулга 11.29%, ≥0.5мм дээш том ширхэглэлтэй үнсний хувьд 8.3%, ≤0.5мм доош ширхэглэлтэй үнсний хувьд 11.04% байна. ДЦС-н үнсэн сангийн үнсний термогравиметрийн шинжилгээний үр дүнг (TG) Зураг 2-т үзүүлсэн бөгөөд энэхүү муруйгаар тасралтгүй өсөх халууны нөлөөгөөр дээжийн халууны задрал явагдах массын өөрчлөлтийг хэмждэг. Зургаас үзэхэд, үнсний хувьд 180°C хүртэл 2.6%-ийн жингээ алдсан нь агуулагдаж байгаа чийг буюу чөлөөт усаа алдаж байгаатай холбоотой бол 600°C хүртэл нэмж 2.0% жингээ алдсан нь дутуу шатсан нүүрсний задралтай холбоотой гэж үзэж байна. Нүүрсний задрал 200-230°C-аас эхэлж задарч эхэлдэг. Өөрөөр хэлбэл, хэдийгээр дулааны цахилгаан станцын шаталтын процесс 1400°C-г явагдан шатаалтын процессын дараа үлдэх үнсний 80% болох нарийн ширхэгт дэгдэмхий үнс цахилгаан шүүлтүүр дээр, үлдсэн 20% нь зуухны ёроолд хуримтлагддаг. Энэхүү том ширхэгт үнсэнд дутуу шатсан нүүрс агуулагдсан байх боломжтой. Үнсэн санг руу дээрх нарийн болон том ширхэгт үнс усаар зайлуулагдан очдог. Температурыг цааш 1000°C хүртэл нэмэгдүүлэхэд жингийн хорогдол 2.1%-аар нэмэгдсэн нь аморф нүүстөрөгч, нүүрсэн дэх дутуу задарсан CaCO<sub>3</sub>

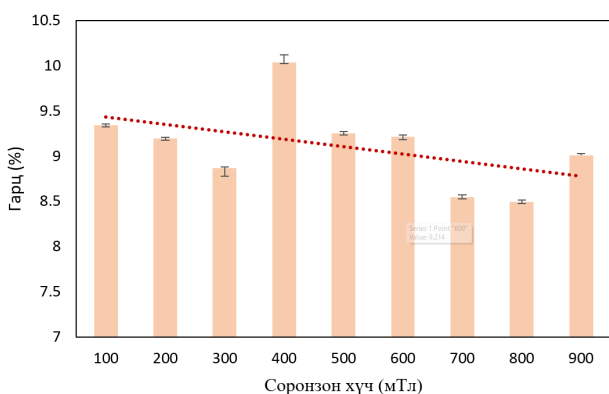


**Зураг-3.** Үнсэн сангийн үнсний электрон микроскопи. А. ×120, Б. ×500, В. ×1000 (өсгөлт)

болон хүхэрлэг хийн задралтай хамааралтай байж болох юм. Эх үнсний дээжийн морфологи бүтцийн шинжилгээг Зураг 3-д харууллаа. Зургаас харахад, үнс нь 10-100мкм хэмжээтэй, бөмбөлөг хэлбэрийн бүтэцтэй болох нь ажиглагдаж байна. Энэхүү цахиур, хөнгөнцагаан агуулсан бөмбөлөг хэлбэрийн морфологи бүтэц нь 1400°C дээш өндөр температурт үүсдэг [17].

**Үнснээс төмрийн агуулгыг бууруулах судалгаа:** Нойтон соронзон сеператороор дээжийг боловсруулахын өмнө эхлээд үнсэн сангийн үнсийг сайтар хатаагаад 0.5мм-ийн шигшүүрээр бүрэн нэвтэртэл шигшсэн. Үнсэнд агуулагдах дутуу шатасан нүүрстөрөгчийг 800°C-д 2 цагийн турш шатааж зайлуулан дараагийн шатны судалгаанд ашиглахад бэлэн болгосон.

**1. Нойтон соронзонгийн аргаар төмрийн агуулгыг бууруулах:** Үнсний соронзон хэсгийн хэмжээ болон соронзон хүчний хамаарлыг судлахдаа төхөөрөмжийн соронзон орны хэмжлийн хязгаар болох 100-900 мТл хооронд явуулж, гарцыг тооцоолж, төмрийн агуулгыг тодорхойлоход (Зураг 4) соронзон хүчийг нэмэгдүүлэхэд соронзон хэсгийн хэмжээ буурах ерөнхий хандлага ажиглагдаж байна.



**Зураг 4.** Үнсэн сангийн үнсний соронзон хэсгийн хэмжээ болон соронзон хүчний хамаарал

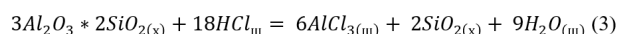
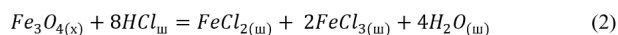
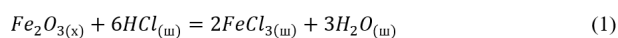
Тиймээс 400 мТл (миллитесла) соронзон хүчээр үнсийг боловсруулах нь тохиромжтой гэж үзлээ. Цаашид үнсэн сангийн үнсийг 400 мТл соронзон

хүчээр төмрийн агуулгыг бууруулах туршилтыг явуулж төмөргүйжүүлсэн үнс ба ялгаж авсан соронзон хэсгийн химийн найрлагыг үнсэн сангийн эх үнстэй харьцуулан Хүснэгт 2-т, эрдсийн найрлагыг Зураг 5, 6-т харуулав.

Хүснэгтээс харахад, эх үнсэн дэх төмрийн агуулга нь 11.04% байсан бол нойтон соронзонгоор боловсруулсны дараа 5.41% болон буурч, ялгасан соронзон хэсэгт агуулагдах төмрийн агуулга >15% болсон нь харагдаж байна. Мөн төмрийн агуулгыг бууруулсан үнсэнд Mn, Co, Cu, Zn зэрэг элементүүд буурсан нь эдгээр металлууд соронзон хэсгээ дагаж шилжсэн болох нь харагдаж байна. 15%-с дээш төмрийн агуулгатай ялгасан төмрийг үйлдвэрийн зориулалтаар ашиглах боломжтой юм [18].

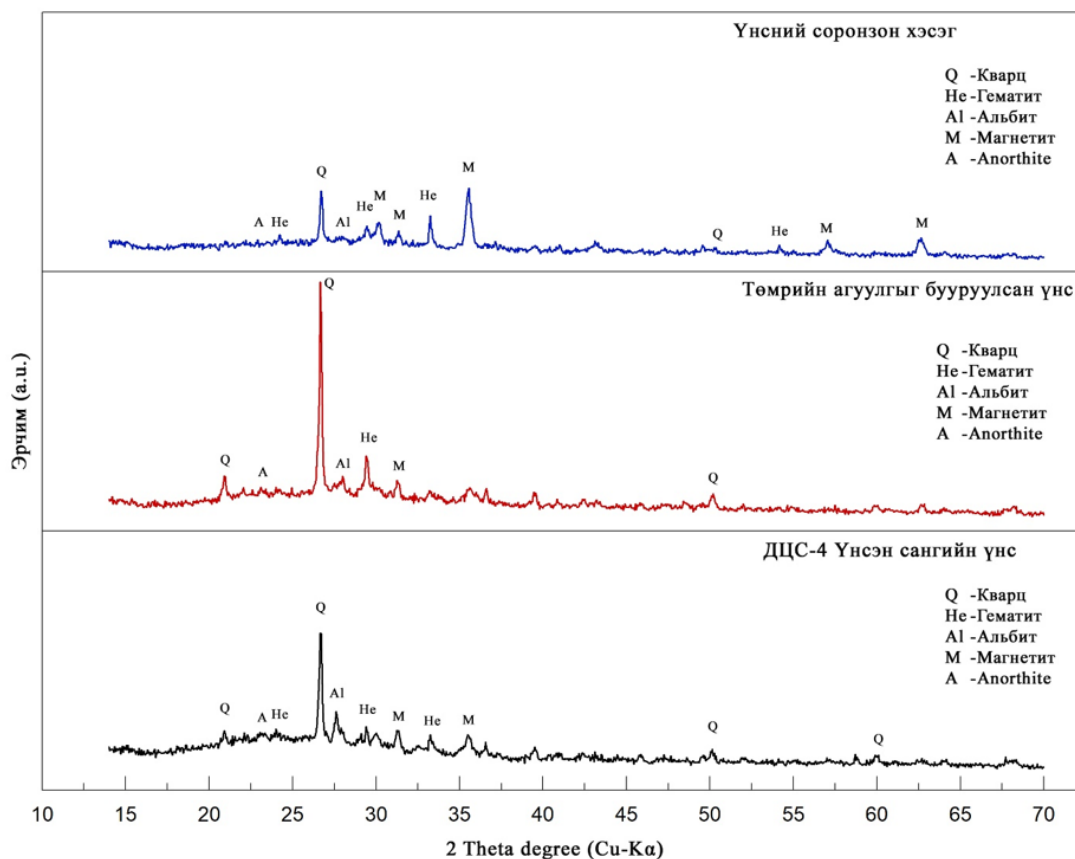
Зураг 5-с харахад үнсэн сангийн үнсний  $2\theta=20.09$ ;  $26.6$ ;  $50.01$ ;  $59.9$  дээр кварц ( $SiO_2$ ),  $2\theta=31.3$ ;  $35.5$  дээр магнетит ( $Fe_3O_4$ ),  $2\theta=24.1$ ;  $27.8$ ;  $33.2$  гематит ( $Fe_2O_3$ )-н эрчмүүд илэрсэн байна. Харин төмрийн агуулгыг бууруулсан үнсэнд  $2\theta=59.9$  дээрх кварц,  $2\theta=35.5$  дээрх магнетит,  $2\theta=24.1$ ;  $33.2$  гематитийн эрчмүүд алга болж төмрийн агуулга буурч  $2\theta=26.6$  дээрх кварцын эрчим нэмэгдэж кварцын агуулга  $37.7 \rightarrow 50.6\%$  болж өссөн байна. Үнсний соронзон хэсэгт кварцын  $2\theta=20.09$ ;  $59.9$  дээрх эрчмүүд алга болж  $2\theta=54.1$  гематит,  $2\theta=30.1$ ;  $57$ ;  $62.6$  магнетитийн эрчмүүд шинээр бий болж төмрийн агуулга өссөн байна (Зураг 6). Эрдсийн найрлагын шинжилгээгээр төмрийн агуулгыг бууруулсан үнсэнд магнетит болон гематитын төмрийн эрдсүүд буурч, үнсний соронзон хэсэгт магнетит болон гематит өссөн нь соронзон баяжуулалт үр дүнтэй явагдсан болохыг харуулж байна.

**2. Давсны хүчлийн уусгалтаар төмрийн агуулгыг бууруулах:** Үнсийг давсны хүчлээр уусгахад дараах урвалууд явагдах боломжтой ба  $FeCl_3$ -аас гадна төмрийн (II) валенттай хлоридуудыг тэгшитгэлийн дагуу үүсгэж болно [19].



**Хүснэгт 2.** Үнсэн сан, төмрийн агуулгыг бууруулсан үнс болон ялгасан соронзон хэсгийн элементийн агуулга (ICP-OES)

№	Үзүүлэлт	Үнсэн сангийн үнс	Төмрийн агуулгыг бууруулсан үнс	Үнсний соронзон хэсэг
1	Хөнгөн цагаан (Al), %	6.18	6.61	3.69
2	Төмөр (Fe), %	11.04	5.41	>15
3	Магни (Mg), %	1.69	1.74	1.14
4	Манган (Mn), ppm	3491	3003	7362
5	Кобальт (Co), ppm	22.12	15.1	29.8
6	Хром (Cr), ppm	35.97	35	41
7	Зэс (Cu), ppm	124	64.2	165
8	Хар тугалга (Pb), ppm	16.67	24.1	9.8
9	Ванади (V), ppm	73.88	76	64
10	Цайр (Zn), ppm	104.38	96	136
11	Хүнсэл (As), ppm	21.45	47	21
12	Кадми (Cd), ppm	1.07	0.36	0.17



Зураг 5. Эх үнс, төмрийн агуулгыг бууруулсан үнс, ялгасан соронзон хэсгийн эрдсийн найрлага (XRD)

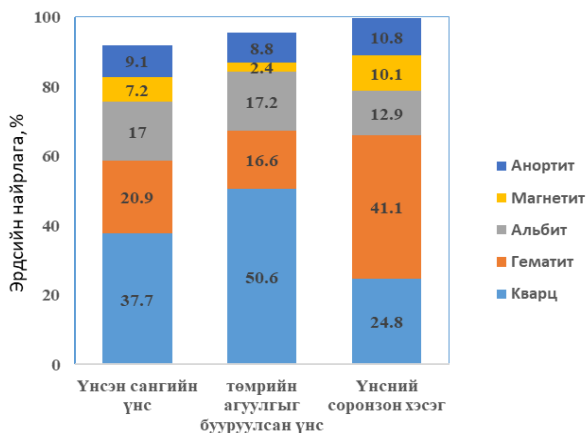
**Концентраци болон урвалын хугацааны нөлөө:**

Үнсний төмрийг зайлуулахад давсны хүчлийн концентрацийн нөлөөг судлахад хатуу/шингэний харьцаа 1:10, урвалын хугацаа 24 цаг, урвалын температур 100°C, давсны хүчлийн концентраци 1М, 2М, 4М, 6М сонгон авч автоклавт боловсруулалт хийсэн. Урвалын температур 100°C ба HCl-ийн концентраци 6М үед төмөр зайлуулах хугацааны нөлөөг Зураг 7а-д үзүүлэв. Урвалын температур 100°C ба HCl-ийн концентраци 6М үед төмөр зайлуулах хугацааны нөлөөг Зураг 7б-д үзүүлэв. Бидний хийсэн судалгааны дүнгээс

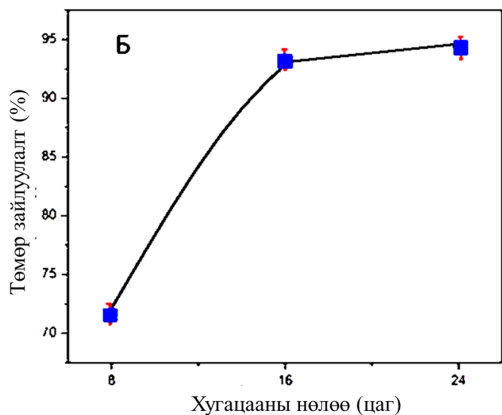
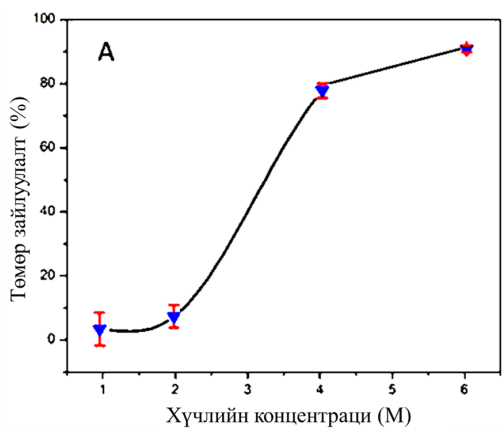
харахад, төмрийг зайлуулах хэмжээ нь HCl-ийн концентрацитай шугаман хамааралтайгаар нэмэгдэж байгааг харуулсан. 4М болон 6М хүчлээр дээжийг боловсруулахад 77.1% болон 91.4%-р тус тус төмрийг зайлуулсан байна. Гэвч хүчлээр уусгахад төмрийн зайлуулалт 100% хүрэхгүй нь тодорхой болов. Учир нь хүчил нь зөвхөн үнсний гадаргуу дээрх төмрийг уусгах боломжтой бөгөөд муллит эрдсэн дэх төмөр үлддэг байна. Тиймээс үнсийг цаашид идэвхжүүлж төмрийн агуулгыг бууруулах өөр аргуудыг туршиж үзэх шаардлагатай.

Төмрийг зайлуулахад хугацааны нөлөөллийг үзэх зорилгоор 6М давсны хүчлийн уусмалаар 8, 16, 24 цагийн хугацаанд автоклавт боловсруулсан. Судалгаагаар, 8 цагийн дараа төмрийн зайлуулалт 71.7%, 16 цагт 90.9%, 24 цагт 91.4% байсан бөгөөд урвалын хугацаа уртсах тусам төмрийг зайлуулах хэмжээ нэмэгдэж байв. Хүчлийн уусгалтаар зарим төмрийн исэл нь хөнгөнцагааны, цахиурын исэлтэй нэгдэл үүсгэж, төмөр ялгах явцад хүндрэл учруулдаг байна [8].

**Температур болон хатуу шингэний харьцаанаас хамаарах хамаарал:** Температураас хамаарах хамаарлыг 6М давсны хүчлийн уусмалаар хатуу шингэний 1:10 харьцаатай, 24 цагийн турш автоклавт үнсийг боловсруулсан дүнг Зураг 8а-д үзүүлэв. Хатуу шингэний харьцаанаас төмрийн уусгалтыг судлахдаа 6М давсны хүчлийн уусмалаар 24 цагийн турш үнс/хүчил 1:5; 1:10 харьцаатай



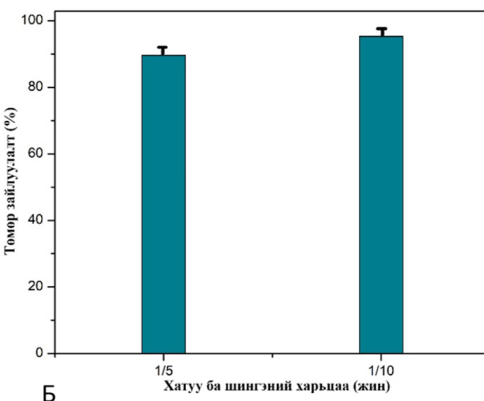
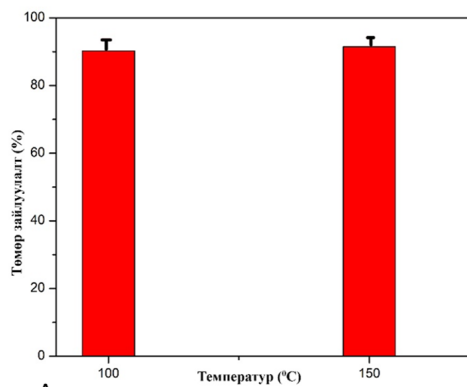
Зураг 6. Үнсэн сангийн болон төмрийн агуулгыг бууруулсан үнс, ялгасан соронзон хэсгийн эрдсийн агуулга (XRD)



**Зураг 7.** Төмрийн зайлуулалтад хүчлийн концентраци (а) болон хугацааны (б) нөлөө

үнсийг боловсруулсан (Зураг 8б). Урвалын температур 100-аас 150°C болгон өсөхөд төмөр зайлуулалтын хувь 91.4-91.5% болж төдийлөн их өсөлт ажиглагдахгүй байгаа нь температурыг ихэсгэх шаардлагагүй нь харагдаж байна. Автоклавт 100°C-ийн температурт хангалттай даралт үүсэж төмрийг уусгаж байгаа нь харагдаж байна. Туршилтын дүнгээс харахад үнс/ хүчлийн харьцаа 1:5 байхад 89.6% төмрийг зайлуулж байсан бол 1:10 харьцаатай үед 91.4% зайлуулж байв. Хатуу шингэний харьцаа төмөр зайлуулалтад тодорхой нөлөөтэй нь харагдаж байна.

Үнсэн сангийн үнснээс төмрийн агуулгыг бууруулах судалгаа нь үнсэнд агуулагдах соронзон шинж чанартай төмрийн эрдсийг соронзон баяжуулалтаар хялбар аргаар зайлуулах бүрэн боломжтой боловч соронзон бус шинж чанартай төмрийн агуулсан эрдсийг химийн боловсруулалт буюу хүчлийн уусгалт хийн зайлуулах шаардлагтайг харуулж байна. Хэдийгээр хүчлийн уусгалт нь төмрийн агуулгыг 89.6-91.4% хүртэлх хэмжээгээр бууруулж байгаа ч үйлдвэрлэлийн түвшинд их хэмжээний үнсийг автоклав ашиглан боловсруулахад үр ашиг нь багасах магадлалтай. Иймд боловсруулах үнсний дээжийн төмрийн эрдсийн төрлийг тодорхойлсны үндсэн дээр төмрийг бууруулах аргыг дан болон ашиглах бүрэн боломжтой.



**Зураг 8.** Төмрийн зайлуулалтад температур (а) болон хатуу шингэний жингийн харьцааны (б) нөлөө

**ДҮГНЭЛТ**

Үнсэн дэх дутуу шатсан нүүрстөрөгчийг 800°C-т 2 цагийн турш шатааж зайлуулснаар үнсний бүтцийг идэвхтэй болгож, химийн уусгалтын идэвхийг нэмэгдүүлэх боломжтой болсон. Нойтон соронзон сепаратор ашиглан 400 мТл соронзон хүчээр үнсний дээжийг боловсруулахад нийт төмрийн 51.0% зайлуулж байв. Соронзон баяжуулалт хийж төмрийн агуулгыг бууруулсан үнсийг автоклавд боловсруулах горимыг тогтоов. Үүнд: HCl-н концентраци 6М, хугацаа 24 цаг, урвалын температур 100°C, хатуу шингэний харьцаа 1:10 байна. Энэхүү судалгааны үр дүнд үнсний дээжийн төмрийн агуулгыг  $\geq 90\%$  хүртэл бууруулснаар цахиур болон хөнгөнцагааны оксидуудыг өндөр цэвэршилттэй гарган авах боломжийг нэмэгдүүлж, улмаар катализатор, цэнэг хураагуур, электроникийн үйлдвэрлэл зэрэг өндөр технологийн салбарт өргөнөөр ашиглах нөхцөлийг бүрдүүлж байна. Цаашид цэвэршилт өндөртэй, төмөр агуулсан соронзон хэсгийг ялган авах, хэрэглээний чиглэлийг тодорхойлох, төмөргүйжүүлсэн үнсийг дахин боловсруулах технологийн судалгааг хийх шаардлагатай.

**ТАЛАРХАЛ**

Энэхүү судалгааны ажлыг Боловсрол, шинжлэх ухааны яамны захиалгаар, Шинжлэх Ухаан,

Технологийн сангийн санхүүжилтээр 2023-2026 оны хооронд хэрэгжүүлж буй “Хаягдал үнсийг боловсруулж, шинэ материал гарган авах технологи боловсруулах” сэдэвт судалгааны үндсэн чиглэлийн (ШУСҮЧ-2023/221) төслийн хүрээнд гүйцэтгэсэн болно. Зохиогчдын зүгээс энэхүү судалгаанд хамтран ажилласан нийт судлаачдаа талархал илэрхийлье.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. S.C. Bostanci. (2020) Coal ash use as a cement replacement in concrete production. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 800. 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/800/1/012010>
2. A. Mousa. (2023) Utilization of coal bottom ash from thermal power plants as a cement replacement for building: A promising sustainable practice. *J. Build. Eng.* 74(1), 106885. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106885>
3. A. Eteba, M. Bassyouni, M. Saleh. (2023) Utilization of chemically modified coal fly ash as cost-effective adsorbent for removal of hazardous organic wastes. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20(7), p.7589-7602. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04457-5>
4. X. Ren, L. Xiao, R. Ou, S. Lui, D. Ye, H. Song, W. Wu, X. Gao. (2018) Synthesis and characterization of a single phase zeolite A using coal fly ash. *RSC Adv.* 8(73), p.42200-42209. <https://doi.org/10.1039/C8RA09215J>
5. M.H. Abdullah, A.S.A. Rashid, U.H.M. Anuar, A. Marto, R. Abuelgasim. (2019) Bottom ash utilization: A review on engineering applications and environmental aspects. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 527, 012006. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012006>
6. H. Hamada, A. Alattar, B. Tayeh, F. Yahaya, A. Adesina. (2022) Sustainable application of coal bottom ash as fine aggregates in concrete: A comprehensive review. *Case Stud. Constr. Mater.* 16, 01109. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01109>
7. D.K. Nayak, P.P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar, V. Kumar. (2022) Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Clean. Mater.* 6, 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
8. H.J. Han, Y.G. Chen, J. Lu, D.D. Yuan, J. Song, Y. Chen. (2013) Investigation on the extraction of aluminum and iron from fly ash by sodium carbonate fusion method. *Adv. Mater. Res.* p.1262-1265. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.807-809.1262>
9. H. Song, H. Fan, H.T. Gao, J.A. Liu, H. Mou. (2020) Improving fly ash brightness with carbon and iron oxide removal. *Recyc.* 5(1), p.5. <https://doi.org/10.3390/recycling5010005>
10. D. Das, P.K. Rout. (2023) A review of coal fly ash utilization to save the environment. *Water Air Soil Pollu.* 234(2), p.128. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06143-9>
11. H.J. Han, Y.G. Chen, J. Lu, T.T. Xu, Y.H. Jiang, J.L. Bai. (2013) Investigation of removing iron from fly ash. *Adv. Mater. Res.* 807, p.1194-1197. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.807-809.1194>
12. M.C. Udaeta, G. Dodbiba, J. Ponou, K. Sone, T. Fujita. (2017) Recovery of phosphorus from Sewage Sludge Ash (SSA) by heat treatment followed by high gradient magnetic separation and flotation. *Adv. Powder Technol.* 28(3), p.755-762. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.11.023>
13. F. Michalíková, I. Brezáni, J. Dadová, B. Stehliková, M. Sisol, M. Fröhlichová. (2015) Magnetic separation of magnetite iron novelties from black coal fluid bed-ash. *Inz. Miner.* 2, p.111-116.
14. Ж. Тэмүүжин. (2017) Нүүрсний үнсний шинж чанар, иж бүрэн боловсруулалт, хэрэглээ. Улаанбаатар: Nickel Deckel Printing.
15. R. Sharma, M. Sharma, R. Sharma, V. Sharma. (2013) The impact of incinerators on human health and environment. *Rev. Environ. Health.* 28(1), p.67-72. <https://doi.org/10.1515/reveh-2012-0035>
16. J. Kalemkiewicz, D. Galas, E. Sitarz-Palczak. (2018) The physicochemical properties and composition of biomass ash and evaluating directions of its applications. *Pol. J. Environ. Stud.* 27(6), 2593-2603. <https://doi.org/10.15244/pjoes/80870>
17. J. Li, X. Zhuang, X. Querol, O. Font, N. Moreno. (2018) A review on the applications of coal combustion products in China. *Int. Geo. Rev.* 60(5-6), p. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1309997>
18. J. Zang, W. Cheng, X. Pan. (2023) Iron removal from a high-lithium coal fly ash by magnetic separation. *Multipurp. Util. Miner. Resour.* 44(5), p.63-69. doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.05.012
19. D. Valeev, A. Mikhailova, A. Atmadzhidi. (2018) Kinetics of iron extraction from coal fly ash by hydrochloric acid leaching. *Metals.* 8(7), p.533. <https://doi.org/10.3390/met8070533>

---

## Research on reducing the iron minerals in the ash of thermal power plant ash ponds

Luvsandagva Mandakhsaikhan\*, Batmunkh Davaabal, Rentsennorov Ulambayar, Ochirkhuyag Altantuya, Tsoodol Zolzaya, Gendenjamts Oyun-Erdene

*Laboratory of Material Science and Technology, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13330, Mongolia*

\*E-mail: [mandakhsaikhanl@mas.ac.mn](mailto:mandakhsaikhanl@mas.ac.mn)  
ORCID: [0000-0002-1465-0894](https://orcid.org/0000-0002-1465-0894)

---

Submitted: 200.10.2024

Reviewed: 14.11.2024

Accepted: 16.12.2024

---

**Abstract:** This study investigates technological solutions for reducing the iron content in fly ash, a byproduct generated in large quantities during coal combustion at thermal power plants. The fly ash used in the study contained 45.5% SiO<sub>2</sub>, 11.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and 12.5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fly ash has been traditionally utilized in construction materials, road and bridge development, and zeolite synthesis. However, recent advancements focus on extracting silica (SiO<sub>2</sub>) and alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) from fly ash for applications in energy storage, 3D printing, and composite materials. The presence of iron oxides in fly ash hinders the production of these compounds with high purity, negatively impacting product quality.

The study compares two methods for reducing iron content in fly ash. Initially, unburned carbon in the fly ash was removed through thermal treatment at 800°C for 2 hours. Subsequently, wet magnetic separation and acid leaching using an autoclave were employed to reduce iron content. Wet magnetic separation (at a magnetic field strength of 400 mT) removed 51.0% of the total iron content. Acid leaching with hydrochloric acid (HCl) under optimized conditions (6M HCl, 24 hours, 100°C, solid-to-liquid ratio of 1:10) achieved a 91.4% reduction in iron content.

The results demonstrate that effective reduction of iron content in fly ash facilitates the extraction of high-purity silica and alumina, enabling their application in advanced technology sectors such as catalysis, energy storage, and electronics manufacturing.

**Keywords:** *pond ash, iron, magnetic separation, acid leaching*

---

© The Author(s). 2024 **Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

DOI: