



Нүүрсний үнснээс синосфер ялгаж авах судалгаа

Очирхуяг Алтантуяа, Лувсандагва Мандахсайхан, Чулуунтөмөр Жавзандулам, Цоодол Золзаяа,
Гэндэнжамц Оюун Эрдэнэ, Батнасан Алтансүх*

*Дэвшилтэт материал хими, технологийн лаборатори, Хими, химийн технологийн хүрээлэн, Шинжлэх ухааны академи,
Улаанбаатар 13260, Монгол улс*

*E-mail: altansukh.b@mas.ac.mn
ORCID: [0000-0003-3531-3050](https://orcid.org/0000-0003-3531-3050)

Хүлээн авсан: 21.11.2025

Хяналтад: 22.11.2025

Хэвлэлтэд авсан: 25.12.2025

Хураангуй: Синосфер нь нүүрсний үнсэнд агуулагдах хөндий микро бөмбөлөг бүтэцтэй, нягт багатай, механик бат бөх, дулаан тусгаарлах чадвар сайтай тул барилга, композит материал, дулаан тусгаарлагч зэрэг салбарт өргөн хэрэглэгддэг өндөр үнэ цэнтэй материал юм. Энэхүү судалгааны ажлаар “ДЦС-4” ТӨХК-ийн дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнснээс синосфер ялгаж авах аргачлалыг боловсруулж, ялгалтын гарц болон ялгасан синосферийн физик-химийн шинж чанарыг харьцуулан судалсан. Эхний шатанд усаар ялгах аргаар дэгдэмхий үнснээс 0.77%, үнсэн сангийн үнснээс 0.02% гарцтай хөнгөн фракц ялгав. Цаашид ус-ацетоны холимгийг ашиглан ялгалтын горимыг оновчлох судалгаагаар ус:ацетон = 80:20 жингийн харьцаа нь дэгдэмхий үнснээс синосфер ялгахад хамгийн тохиромжтой нөхцөл болохыг тогтоож, энэ үед гарц 17.3% хүрсэн. Дулааны боловсруулалт (800 °C, 2 цаг) нь усаар ялгах үед хамт хөвж гарч ирсэн органик хольцыг зайлуулахад үр дүнтэй байж, синосфер давамгайлсан хөнгөн фракцыг ялган авах боломжийг бүрдүүлсэн. Олон шатлалт боловсруулалтын дараах эцсийн үр дүнгээс үзэхэд дэгдэмхий үнсний синосферийн нийт гарц 0.13%, үнсэн сангийн үнснийх 0.002% байсан бөгөөд дэгдэмхий үнс нь синосфер ялгаж авахад үнсэн сангийн үнснээс ойролцоогоор 71 дахин илүү үр ашигтай түүхий эд болох нь тогтоогдов. SEM-EDS шинжилгээгээр дэгдэмхий үнсний синосфер нь гөлгөр гадаргуутай, төмрийн агууламж харьцангуй өндөр, харин үнсэн сангийн синосфер нь барзгар гадаргуутай, цахиур, хөнгөн цагаан, кальциар баялаг болох нь тогтоогдсон. Зета потенциалын шинжилгээгээр дэгдэмхий үнсний коллоид тогтвортой байдал (-46.63 мВ) нь үнсэн сангийн үнснийхээс (-27.13 мВ) илүү сайн болох нь батлагдсан. Судалгааны үр дүнгээс дүгнэхэд дэгдэмхий үнсийг гүн боловсруулах замаар синосфер ялган авч, нэмүү өртөг шингэсэн материал үйлдвэрлэх нь Монгол улсын нөхцөлд техникийн хувьд боломжтой бөгөөд эдийн засаг, байгаль орчны хувьд ач холбогдолтой чиглэл болохыг харуулж байна.

Түлхүүр үг: нүүрсний үнс, синосфер, дэгдэмхий үнс, үнсэн сан, цахилгаан станц

ОРШИЛ

Дэлхий дахинд эрчим хүчний хэрэгцээ өсөн нэмэгдэж байгаа бөгөөд нүүрсээр ажилладаг цахилгаан станцууд нь олон улс орнуудын эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн чухал хэсэг хэвээр байна. Нүүрс шатаах үйл явцын үр дүнд их хэмжээний үнс үүсдэг бөгөөд энэ нь байгаль орчинд ноцтой асуудал үүсгэж байна [1]. Монгол улсын хувьд нүүрсэнд суурилсан станцууд эрчим хүчний 80 гаруй хувийг үйлдвэрлэж, жилд 1 сая орчим тонн үнс ялгаруулдаг. Үүнээс 70-90 % нь үнсэн санд хуримтлагдаж, эдийн засгийн эргэлтэд орохгүй байна. 2024 оны байдлаар “ДЦС-4” ТӨХК 53 мян.тн, “Амгалан” ДС ТӨХК 7.3 мян.тн хуурай үнсийг цемент болон барилгын материалын үйлдвэрт нийлүүлж, үнсийг эдийн засгийн эргэлтэд оруулсан нь нийт үүссэн үнсний 13% бөгөөд үлдсэн 80 гаруй хувь нь хаягдаж, хуримтлагдсаар байна.

Цахилгаан станцуудын үнсийг хадгалах үнсэн сангууд дүүрч, шинээр үнсэн сан байгуулах газар олгох асуудал хүндрэлтэй болж байна. Үүний зэрэгцээ үнсэн сангаас үүсэх агаар, хөрс, усны бохирдол зэрэг нь хүний эрүүл мэнд болон байгаль

орчинд сөрөг нөлөө үзүүлж байна [2]. Иймд үнсийг дахин ашиглах, боловсруулах нь байгаль орчны асуудлыг шийдвэрлэхэд чухал ач холбогдолтой юм. Нүүрсний үнс нь цахиурын давхар исэл (SiO_2), хөнгөн цагааны исэл (Al_2O_3), төмрийн исэл (Fe_2O_3), кальцийн исэл (CaO) болон ховор элементүүдийг агуулдаг [3]. Эдгээр бүрэлдэхүүн хэсгүүдийг ялгаж авснаар үнэ цэнтэй материалууд гарган авах боломжтой. Үнсийг барилгын материал, авто замын суурь, хөрс сайжруулагч зэргээр ашиглах уламжлалт аргуудаас гадна өндөр үнэ цэнтэй нано материалууд, тухайлбал цахиурын давхар ислийн нано бөөмс, хөнгөнцагааны ислийн бөөмс, ховор элементүүд болон синосфер зэргийг ялгаж авах боломжтой [4].

Синосфер нь нүүрсний үнсэнд агуулагддаг хөндий микро бөмбөлөг хэлбэртэй жижиг хэсгүүд бөгөөд нягт багатай, механик бат бөх чанар сайтай, дулаан тусгаарлах чадвар өндөртэй, химийн идэвх багатай зэрэг онцлог шинж чанартай [5]. Эдгээр онцлог шинж чанаруудаас нь шалтгаалан синосферийг хөнгөн жинтэй бетон, дулаан тусгаарлагч материал, полимер композит, тусгай зориулалтын бүрээс

зэрэгт өргөнөөр ашиглаж байна [6]. Нүүрсний үнснээс синосфер ялгах технологиудыг ерөнхийд нь хуурай ба нойтон гэсэн хоёр үндсэн аргад хуваадаг [7]. Хуурай аргууд нь ус ашигладаггүй тул хурдан бөгөөд хатаах зардал шаардлагагүй зэрэг давуу талтай. Үүнд агаарын ангилал, электростатик ялгалт зэрэг аргууд багтана. Агаарын ангилал (air classification) нь үнсний бөөмсийг агаарын урсгалд оруулж, нягт ба хэмжээний ялгаагаар нь хөнгөн синосферийг хүнд хэсгээс нь салгадаг арга бөгөөд циклон болон тусгай агаарын ангилагч төхөөрөмжүүдийг ашигладаг [8]. Харин электростатик ялгалт (electrostatic separation) нь бөөмсийн цахилгаан дамжуулах чадварын ялгаан дээр үндэслэн синосферийг нүүрстөрөгчийн хэсгүүдээс ялгахад ашиглагддаг [9]. Хэдийгээр хуурай аргууд нь ашиглахад хялбар боловч гарган авсан синосферийн цэвэршилт нь нойтон аргынхаас харьцангуй бага байдаг сул талтай. Нойтон аргууд нь өндөр цэвэршилттэй бүтээгдэхүүн гарган авах боломжийг олгодог бөгөөд дараах түгээмэл аргуудыг агуулна. Усаар ялгах гравитацийн арга нь синосферийн нягт уснаас бага (1 г/см^3 -аас бага) байдаг хөвөх чадвар дээр үндэслэсэн хамгийн энгийн, өргөн хэрэглэгддэг арга юм [10]. Илүү нарийвчлалтай ялгалт хийх зорилгоор “хүнд шингэн ашиглах арга”-ыг хэрэглэдэг бөгөөд үүнд цайрын хлорид (ZnCl_2), ацетон зэрэг тусгай уусмалуудыг ашиглан нягтын зөрүүгээр ялгадаг [11]. Мөн гадаргуугийн идэвхт бодис (жишээ нь, керосин) ашиглан синосферийн гидрофоб (усанд үл нийцэх) шинж чанарыг нэмэгдүүлж, агаарын бөмбөлөгт наалдуулан хөвүүлж ялгах флотацын аргыг түгээмэл ашигладаг.

Монгол улсын хувьд цахилгаан станцуудын үнсийг ашиглах чиглэлээр сүүлийн жилүүдэд хэд хэдэн судалгаа хийгдсэн. Тухайлбал, Тэмүүжин (2016) нь цахилгаан станцын хаягдал үнсний төрөл, хими, эрдэс зүйн найрлага, ашиглах боломжийг судалсан [12]. Мөн Лувсандагва нар (2024) нь “ДЦС-4” ТӨХК-ийн үнсэн сангийн үнснээс төмрийн агуулгыг бууруулах судалгаа хийсэн [13]. Эдгээр судалгаанууд нь Монгол улсын нүүрсний үнсний шинж чанар, ашиглах боломжийг тодорхойлсон чухал суурь материал болсон. Гэвч үнсний өндөр үнэ цэнтэй бүрэлдэхүүн хэсэг, тухайлбал синосфер гарган авах судалгаа хомс байдаг. Синосферийг олон улсад хөнгөн бетон, дулаан тусгаарлагч зэрэг барилгын материалд өргөн ашигладаг [14]. Түүнчлэн, синосферийн гадаргуу дээрх Si-OH, Al-OH зэрэг гидроксильн функциональ бүлгүүд нь түүнийг полимер матрицтай химийн холбоо үүсгэх боломжийг олгодог [15]. Гадаргууг идэвхжүүлэх замаар композит материалын механик шинж чанарыг сайжруулдаг нь батлагдсан [16, 17]. Иймд дотоодын түүхий эд болох үнсийг гүн боловсруулах замаар синосфер ялган авч, нэмүү өртөг шингэсэн

бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэх шаардлага зүй ёсоор тавигдаж байна.

Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнснээс синосфер ялгаж авах аргачлалыг боловсруулах, тэдгээрийн гарцыг харьцуулан судлах, мөн синосферийн физик-химийн шинж чанарыг тодорхойлоход оршино.

СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

Материал, дээж бэлтгэл: Судалгаанд “Дулааны дөрөвдүгээр цахилгаан станц” ТӨХК (ДЦС-4)-ийн дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсийг ашиглав. Дэгдэмхий үнсийг станцын цахилгаан шүүлтүүр бүхий тоос баригч системээс, үнсэн сангийн үнсийг үнсэн сангаас авсан болно. Үнсэн сан нь дэгдэмхий үнс болон ёроолын үнсний холимог бөгөөд үнсэн санд удаан хугацаагаар хадгалагдсан материал юм. Туршилтад ашигласан Ацетон (CH_3COCH_3 , Merck, Герман) урвалж бодис нь шинжилгээний цэвэр зэрэглэлтэй (analytical grade, $\geq 99.5\%$ цэвэршилттэй) байв. Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсийг 105°C -д 24 цагийн турш хатааж, чийггүй болгов. Үнсэн сангийн үнсний чийгийн агууламжийг жингийн аргаар тодорхойлохын тулд дээжийг хатаахын өмнө болон дараа жинг хэмжиж, чийгийн агууламжийг тооцоолов. Чийгийн агууламжийг дараах томъёогоор (1) тооцоолов:

$$\text{Чийгийн агууламж (\%)} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

Энд:

m_1 - энхий жин, г

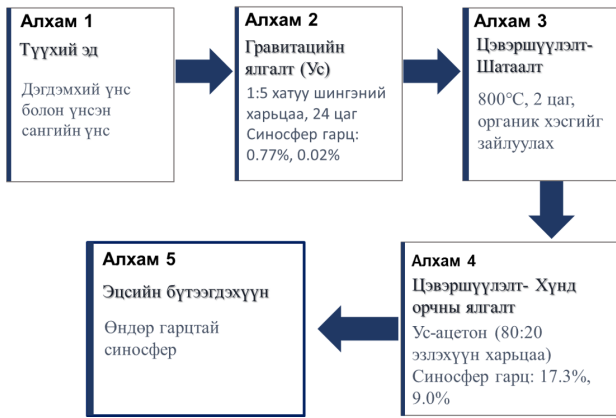
m_2 - хатаасны дараах жин, г

Синосфер ялгах аргачлал

Гравитац-Усаар ялгах: Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсийг (хуурай хэсэг болон усны жингийн харьцаа 1:5) усанд хийж, 24 цагийн турш байлгав. Усан дээр хөвсөн хөнгөн фракцыг шүүн авч, 105°C -д 24 цагийн турш хатааж, жинг хэмжив.

Хүнд орчны ялгалт - Ус-ацетоны холимгоор ялгах: Усаар ялгасан дээжээс дэгдэмхий үнсний дээжээс 3 г авч, ус-ацетоны холимогт хийв. Ус-ацетоны харьцааг 80:20, 50:50, 20:80, 0:100 гэсэн 4 нөхцөлд туршив. Холимгийг соронзон хутгуураар 30 минутын турш хутгаж, дараа нь 24 цагийн турш тайван байлгав. Холимог дээр хөвсөн синосферийг шүүн авч, 105°C -д 24 цагийн турш хатааж, жинг хэмжив.

Дулааны боловсруулалт - Шатаалт: Усаар ялгасан дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсний хөнгөн фракцын дээжийг 800°C -д 2 цагийн турш дулааны боловсруулалтад оруулав. Уг боловсруулалтын дараа дээжийг ус-ацетон (өмнөх туршилтаар тогтоосон оновчтой горим- 80:20) бүхий холимог уусмалд хийж, дээрх аргачлалын дагуу синосферийг ялгаж авав. Нийт 2 төрлийн



Бүдүүвч 1. Синосфер ялгах аргачлал

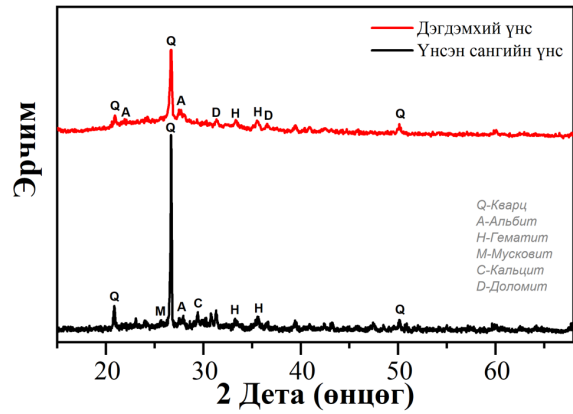
үнсний дээжээс синосфер ялгах аргачлалыг Бүдүүвч 1-д нэгтгэн харуулаа.

Шинжилгээний арга, багаж төхөөрөмж: Синосферийн морфологи, хэмжээг сканинг электрон микроскоп (SEM) ашиглан тодорхойлов. Туршилтын явцад дараах багаж төхөөрөмжүүдийг ашиглав. Үүнд: аналитик жин (Shimadzu AUW220D), хатаах шүүгээ (Memmert UF55), зуух (Nabertherm L5/11), соронзон хутгуур (IKA C-MAG HS7), вакум шүүгч (KNF N 840.3 FT.18), электрон микроскоп (JEOL JSM-IT500 InTouchScope™), рентген дифрактометр (TD-3500, Dandong Tongda Science&Technology Co.,Ltd) багажийг ашигласан. Жижиг хэсгүүдийн гадаргуугийн цэнэгийн зета потенциалын шинжилгээг STABINO ZETA бөөмийн цэнэгийн титрлэлтийн анализатор (Microtrac Retsch GmbH Germany) ашиглан тодорхойлсон.

ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Түүхий эдийн рентген дифракцийн (XRD) шинжилгээ:

Судалгаанд ашигласан дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсний эрдэс-фазын бүтцийг рентген дифракцийн аргаар (XRD) шинжилж, үр дүнг Зураг 1-д харуулав. Шинжилгээний дүнгээс үзэхэд хоёр дээжид хоёуланд нь $2\theta \approx 26.6^\circ$ орчимд илэрсэн пик нь α -кварц (α -quartz, SiO_2)-ын (101) талстын хавтгайн дифракцад харгалзаж байна [18] [19]. Дэгдэмхий үнсний дээжийн дифрактограммд кварцын сул эрчимтэй пикүүд $2\theta = 26.6^\circ, 20.8^\circ$ илэрснээс гадна $2\theta = 22.0^\circ, 27.9^\circ$ орчимд ажиглагдсан пикүүд нь альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), $2\theta = 33.1^\circ$ пик нь доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), $2\theta = 33.1^\circ, 35.6^\circ$ пикүүд нь гематит (Fe_2O_3) фазыг тус тус илэрхийлж байна. Үнсэн сангийн үнсний дифрактограммд кварцын пик $2\theta \approx 26.6^\circ$ -д дэгдэмхий үнсний дээжийнхээс харьцангуй өндөр илэрсэн. Энэ нь дэгдэмхий үнсний бүтэц нь ихэвчлэн аморф буюу шилэн фаз давамгайлсан бол үнсэн сангийн үнс нь илүү талстлаг бүтэцтэй байгааг илэрхийлж байна. Мөн үнсэн сангийн үнсэнд $2\theta = 22.0^\circ$ орчимд альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), $2\theta = 33.1^\circ, 35.6^\circ$ -д гематит (Fe_2O_3), $2\theta = 25.4^\circ$ -д мусковит ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{11}(\text{OH})$), $2\theta = 29.3^\circ$ -д кальцит (CaCO_3) фазын пикүүд тус тус илэрсэн.



Зураг 1. Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсний дээжийн рентгенграммын харьцуулалт

Дээжүүдэд илэрсэн гол фазуудыг Зураг 1-д тусгай тэмдэглэгээгээр ялган тэмдэглэсэн болно. Нүүрсний шаталтын үед үнсний бөөмс өндөр температурт хайлж, дараа нь хурдан хөрөх явцад шилэн бүтэц үүсдэг бөгөөд энэ нь синосфер үүсэх үндсэн нөхцөл болдог. Иймд XRD шинжилгээний үр дүнгээс үзэхэд дэгдэмхий үнс нь аморф фаз давамгайлсан, харин үнсэн сангийн үнс нь илүү талстлаг бүтэцтэй болох нь тогтоогдсон бөгөөд энэхүү ялгаа нь синосферийн морфологи, ялгалтын үр ашигт нөлөөлөх чухал хүчин зүйл болж байна [20].

Гравитацийн ялгалт

Усаар ялгах: Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнснээс усаар ялгаж авсан синосферийн гарцыг Хүснэгт 1-д үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Усаар ялгасан хөнгөн фракцы (синосфер агуулсан) гарц

Материал	Анхны масс (г)	Ялгаж авсан масс* (г)	Гарц (%)
Дэгдэмхий үнс	5000	38.3	0.77
Үнсэн сангийн үнс (хуурай)	12500	2.6	0.02

Тайлбар: Ялгаж авсан масс* - усаар ялгах явцад усны гадаргуу дээр хөвж гарч ирсэн, нягт багатай хөнгөн фракцын (синосфер, дутуу шатсан нүүрс болон бусад хөнгөн хэсгүүдийг агуулсан) хуурай жин

Хүснэгт 1-ээс харахад усаар ялгасан хөнгөн фракцын гарц дэгдэмхий үнсний хувьд 0.77%, харин үнсэн сангийн үнсний хувьд 0.02% байна. Энэ нь дэгдэмхий үнсэнд агуулагдах хөнгөн фракцын хэмжээ үнсэн сангийн үнснээс ойролцоогоор 35 дахин их болохыг харуулж байна. Уг ялгаа нь дэгдэмхий үнс нь шууд шаталтын дараа үүссэн, харьцангуй бүтэн, нягт багатай синосферийг илүү их хэмжээгээр агуулдагтай холбоотой. Харин үнсэн сангийн үнс нь удаан хугацаанд ус, атмосферийн нөлөөнд байснаас синосферийн ихэнх хэсэг нь өмнө нь усаар угаагдаж, эсвэл эвдэрч хүнд фракцтай холилдсон байж болох бөгөөд энэ нь усаар ялгах үеийн гарц маш бага байхад нөлөөлсөн гэж үзэж байна [12]. Иймд усаар ялгах аргын хувьд дэгдэмхий үнс нь үнсэн сангийн үнснээс синосфер

ялгаж авахад илүү тохиромжтой түүхий эд болох нь энэхүү үр дүнгээр батлагдаж байна.

Хүнд орчны ялгалт

Ус-ацетоны холимгоор ялгах: Дэгдэмхий үнснээс усаар ялгасан үнсний хөнгөн фракцыг цаашид цэвэршүүлэх зорилгоор ус-ацетоны өөр өөр харьцаатай холимгоор ялгах туршилтыг гүйцэтгэж, синосферийн гарцыг *Хүснэгт 2*-т үзүүлэв. Энэхүү туршилт нь ус-ацетоны холимгийн найрлага өөрчлөгдөхөд синосферийн ялгалтын үр ашиг хэрхэн өөрчлөгдөхийг тодорхойлоход чиглэсэн болно.

Хүснэгт 2. Ус-ацетоны холимгийн харьцааны нөлөө (Дэгдэмхий үнснээс ялгасан синосферийн гарц)

Ус:Ацетон (жингийн харьцаагаар)	Нягт (г/см ³)	Синосферийн гарц (%)
80:20	0.95	17.3
50:50	0.88	14.2
20:80	0.82	6.2
0:100	0.79	2.5

Хүснэгт 2-оос харахад ус-ацетоны холимгийн харьцаа 80:20 (нягт ≈ 0.95 г/см³) байх үед дэгдэмхий үнснээс ялгасан синосферийн гарц хамгийн өндөр буюу 17.3% байна. Харин ацетоны агууламж нэмэгдэх тусам гарц буурч, 50:50 харьцаанд 14.2%, 20:80 харьцаанд 6.2% болж эрс багасаж байна. Цэвэр ацетон (0:100) ашигласан нөхцөлд синосферийн гарц хамгийн бага буюу 2.5% байгааг тогтоосон. Ацетоны нягт ойролцоогоор 0.79 г/см³ байдаг бөгөөд цэвэр ацетон ашиглах үед шингэний нягт нь синосферийн нягтын доод хязгаарт (0.4–0.8 г/см³) ойртсоноор зарим синосферүүд бүрэн хөвөх чадвараа алдаж, хүнд фракцтай хамт суух үзэгдэл ажиглагдсан. Үүний улмаас синосферийг бүрэн ялгаж авах боломж хязгаарлагдаж, нийт гарц буурсан гэж үзэж байна. Харин ус-ацетоны холимог, ялангуяа 80:20 харьцаатай үед шингэний нягт синосферийн нягтад илүү ойртож, ялгалтын явцад синосферүүд тогтвортой хөвөх нөхцөл бүрдсэнээр ялгалтын үр ашиг сайжирсан [22]. Иймд энэхүү туршилтын үр дүнд үндэслэн ус-ацетоны 80:20 харьцааг синосфер агуулсан хөнгөн фракцаас синосферийг гарц өндөртэй ялгах тохиромжтой горим болгон дараагийн туршилтуудад сонгон ашигласан.

Дулааны боловсруулалтын нөлөө

Синосферийг усаар ялгах үед усны гадаргуу дээр хамт хөвж гарч ирсэн дутуу шатсан нүүрс болон бусад органик хольцыг зайлуулахын тулд дэгдэмхий болон үнсэн сангийн үнсийг 800 °C-д 2 цагийн турш шатааж, дараа нь ус-ацетоны (80:20) холимгоор тус тус ялгасан. Уг аргаар ялган авсан цэвэр синосферийн гарцыг *Хүснэгт 3*-т үзүүлэв.

Хүснэгт 3-аас харахад дулааны боловсруулалтын дараах синосферийн гарц дэгдэмхий үнсний хувьд 3.3%, харин үнсэн сангийн үнсний хувьд 9.0% байна. Энэ нь үнсэн сангийн үнсэнд агуулагдах

органик хольцын хэмжээ их байж, дулааны боловсруулалтын явцад органик хольцууд нь шатсаны үр дүнд хөнгөн фракцын харьцангуй эзлэх хувь нэмэгдсэнтэй холбоотой гэж үзэж байна [22, 23]. Энд гарцын өсөлт нь синосферийн цэвэршилт нэмэгдсэнийг шууд илэрхийлэхгүй бөгөөд харин дулааны боловсруулалтын дараа органик хольц багасаж, синосфер давамгайлсан фракц ялгарч байгааг харуулж байна. Өөрөөр хэлбэл, үнсэн сангийн үнс нь анхдагч синосферийн агууламж бага боловч дулааны боловсруулалтын дараа ялгасан хөнгөн фракц нь органик хольц багатай, харьцангуй

Хүснэгт 3. Дулааны боловсруулалтын дараах ус-ацетоны (80:20) аргаар ялгасан синосферийн гарц

	Дэгдэмхий үнс	Үнсэн сангийн үнс
Шатаалтын өмнөх масс (г)	1.00	1.00
Шатаалтын дараах масс* (г)	0.03	0.09
Синосферийн гарц (%)	3.30	9.00

Тайлбар: Шатаалтын дараах масс* - 800 °C-д 2 цагийн турш дээж дэх органик хольц болон дутуу шатсан нүүрсийг дулааны боловсруулалтад оруулсны дараа, ус-ацетоны (80:20) холимгоор ялгасан синосфер давамгайлсан хөнгөн фракцын хуурай жин

жигд найрлагатай байж болохыг илтгэнэ. Иймд дулааны боловсруулалт нь усаар ялгах үед хамт хөвж гарч ирдэг органик хольцыг зайлуулах, синосфер давамгайлсан фракцыг ялган авахад үр дүнтэй арга болох нь энэхүү үр дүнгээр батлагдаж байна.

Гарцын харьцуулалт

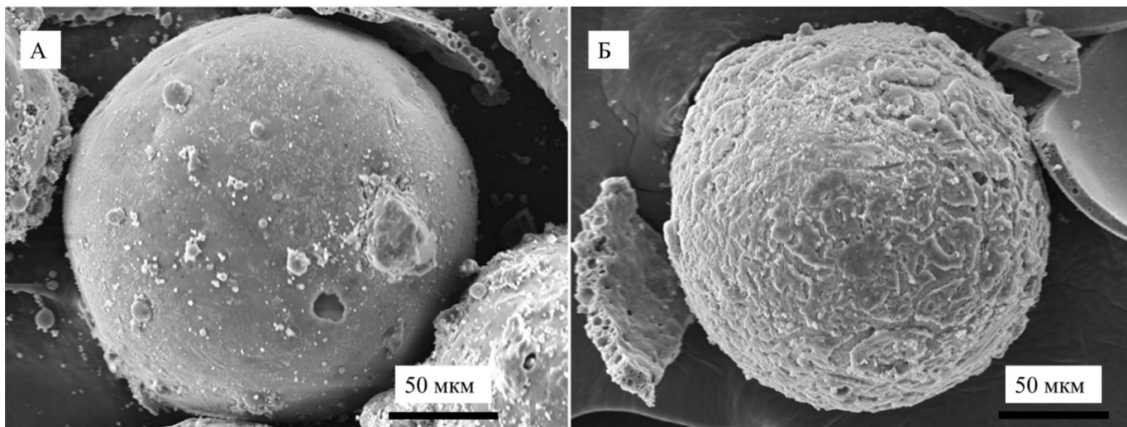
Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнснээс синосфер ялгаж авах нийт гарцыг *Хүснэгт 4*-т үзүүлэв.

Хүснэгт 4. Дэгдэмхий үнс ба үнсэн сангийн үнснээс ялгаж авсан синосферын нийт гарцын харьцуулалт

	Дэгдэмхий үнс	Үнсэн сангийн үнс
Усаар ялгах гарц, %	0.77	0.02
Ус-ацетон (80:20)-оор ялгах гарц, %	17.3	9.00
Нийт гарц*, %	0.13	0.002

Тайлбар: Нийт гарц* - анхны түүхий эдийн жинд харьцуулан тооцсон, олон шатлалт (усаар ялгах + ус-ацетон холимгоор ялгах) боловсруулалтын дараах синосферийн эцсийн гарц

Хүснэгт 4-өөс харахад дэгдэмхий үнснээс ялгасан синосферийн нийт гарц 0.13% байгаа нь үнсэн сангийн үнсний нийт гарцаас (0.002 %) ойролцоогоор 71 дахин их байна. Энэхүү ялгаа нь дэгдэмхий үнс нь шууд шаталтын бүтээгдэхүүн тул анхдагч синосферийн агууламж өндөр, морфологийн хувьд харьцангуй бүрэн бүтэцтэй байдагтай холбоотой. Харин үнсэн сангийн үнс нь удаан хугацаанд ус, атмосферийн нөлөөнд байснаас синосферийн ихэнх хэсэг өмнө нь алдагдсан, эсвэл эвдэрч хүнд фракцтай холилдон байж болох бөгөөд энэ нь нийт гарц бага байхад нөлөөлсөн гэж үзэж байна. Иймд олон шатлалт боловсруулалтын



Зураг 2. Дэгдэмхий үнс (А) болон үнсэн сангийн үнс (Б)-ээс ялгасан синосферийн SEM зургууд

нөхцөлд дэгдэмхий үнс нь үнсэн сангийн үнснээс синосфер ялгаж авахад илүү үр ашигтай түүхий эд болох нь энэхүү судалгааны үр дүнгээр тодорхойлогдлоо. Мөн дэгдэмхий үнсний синосферийн гарц өндөр байгаа нь түүний морфологийн онцлогтой холбоотой байж болох юм. Зураг 2-д харуулсан SEM шинжилгээний зургаас харахад дэгдэмхий үнсний синосфер нь гөлгөр, бөмбөлөг хэлбэртэй, бүрэн бүтэцтэй байхад үнсэн сангийн синосфер нь барзгар гадаргуутай, өгөршилд орсон байдал нь гравитацийн ялгах үйл явцад нөлөөлж, синосферийн гадаргуу дээр хөвөх чадварыг бууруулж, улмаар түүний гарцыг багасгахад нөлөөлсөн байх боломжтой.

Синосферийн морфологи ба элементийн найрлага

Синосферийн морфологи болон элементийн найрлагыг Сканинг электрон микроскоп (SEM) шинжилгээгээр гүнзгийрүүлэн судалж, үр дүнг Зураг 2-д тус тус харуулав. Тус зураг синосферийн хоёр дээжийн хооронд морфологийн илэрхий ялгаа байгааг харуулж байна. Дэгдэмхий үнснээс ялгасан синосфер (Зураг 2А) нь өндөр температурт үүссэн синосферийн онцлог шинж болох тодорхой бөмбөлөг хэлбэртэй, харьцангуй гөлгөр гадаргуутай байна. Харин үнсэн сангийн үнснээс ялгасан синосфер (Зураг 2Б) нь тодорхой бөмбөлөг хэлбэртэй боловч үнсэн санд удаан хугацаанд орчны нөлөөнд өртөж, өгөршсөний улмаас барзгар, гадаргуутай харагдаж байна. Ширхэглэлийн хэмжээ ойролцоогоор 100-200 мкм байна.

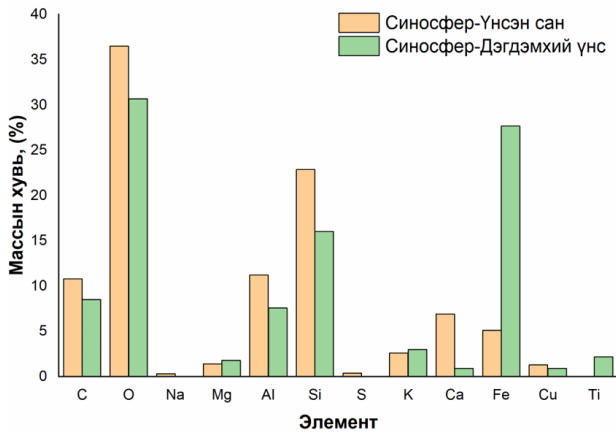
Синосферийн элементийн найрлагыг Энерги дисперсийн рентген спектрометрийн (EDS) шинжилгээгээр гаргасан дүнг Зураг 3-д харууллаа. EDS шинжилгээ нь эдгээр морфологийн ялгааг бий болгож буй химийн найрлагын зөрүүг ойлгох боломжийг олгож байна. Дэгдэмхий үнсний синосфер нь төмрөөр (Fe) мэдэгдэхүйц баяжсан бөгөөд массын хувь нь 27.7% байгаа нь үнсэн сангийн синосферээс (5.1%) тав дахин их юм. Үүнтэй харьцуулахад, үнсэн сангийн синосфер нь цахиур (Si), хөнгөнцагаан (Al), ялангуяа кальцийн (Ca) өндөр агууламжтай байна. Тухайлбал, үнсэн

сангийн синосферт цахиур 22.9%, хөнгөнцагаан 11.2%, кальци 6.9% агуулагдаж байгаа бол үнсэн сангийн синосферт цахиур, хөнгөнцагаан, кальци тус бүр 16.0%, 7.6%, 0.9% байна. Үнсэн сангийн үнсэнд эдгээр элементүүдийн агууламж өндөр байгаа нь үнсэн санд хадгалагдах хугацаанд усанд илүү уусдаг элементүүд угаагдаж, харьцангуй бага уусдаг силикат болон алюмосиликатын эрдсүүд баяжсантай холбоотой байж болох юм. Найрлагын эдгээр ялгаа нь синосферийн физик шинж чанар болон боломжит хэрэглэнд нөлөөлөөд зогсохгүй, хоёр төрлийн үнсэн материалын өөр өөр түүхий эд болох боломжтойг илтгэж байна. Синосферийн гадаргуугийн бүтэц, функциональ бүлгүүд (Si-OH, Al-OH гэх мэт) нь полимер матрицтай химийн холбоо үүсгэх боломжийг олгодог. Гадаргууг идэвхжүүлэх нь композитын механик шинж чанарыг мэдэгдэхүйц сайжруулдаг болох нь судлаачдын ажлаар батлагдсан [17, 24, 25].

Зета потенциалын шинжилгээ

Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнсний гадаргуугийн цэнэгийн тогтвортой байдлыг тодорхойлох зорилгоор зета потенциалын шинжилгээг хийж, үр дүнг Зураг 4-т харуулав. Хоёр төрлийн үнсний зета потенциал нь рН-ийн утгаас ихээхэн хамааралтай байна (Зураг 4). Дэгдэмхий үнсний хувьд изоэлектрик цэг (IEP) буюу зета потенциал нь тэгтэй тэнцүү болох цэг нь рН \approx 5.71-д ажиглагдаж байна. Харин үнсэн сангийн үнсний хувьд IEP нь рН \approx 2.76-д байна. Энэ нь дэгдэмхий үнс нь үнсэн сангаас илүү өндөр рН-д гадаргуугийн цэнэгээ алдаж, бөөмс хоорондын түлхэлцлийн хүч буурч, бөөгнөрөл үүсгэх магадлалтайг харуулж байна.

Шүлтлэг орчинд (рН > 7) хоёр төрлийн үнсний зета потенциал сөрөг утгатай байгаа нь тэдгээрийн гадаргуу сөрөг цэнэгтэй болохыг илтгэнэ. Дэгдэмхий үнсний зета потенциал (-46.63 мВ) нь үнсэн сангийн үнснийхээс (-27.13 мВ) илүү сөрөг байгаа нь түүний коллоид уусмал дахь тогтвортой байдал илүү сайн болохыг харуулж байна. Энэ нь дэгдэмхий үнсний синосферийг ялгаж авах,



Зураг 3. Дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангийн үнснээс ялгасан синосферийн элементийн найрлага (EDS, масс %)

цэвэршүүлэх процесст чухал ач холбогдолтой юм. Учир нь өндөр сөрөг цэнэгтэй бөөмс нь хоорондоо түлхэлцэж, бөөгнөрөл үүсгэхгүйгээр уусмалд жигд тархах боломжийг олгодог.

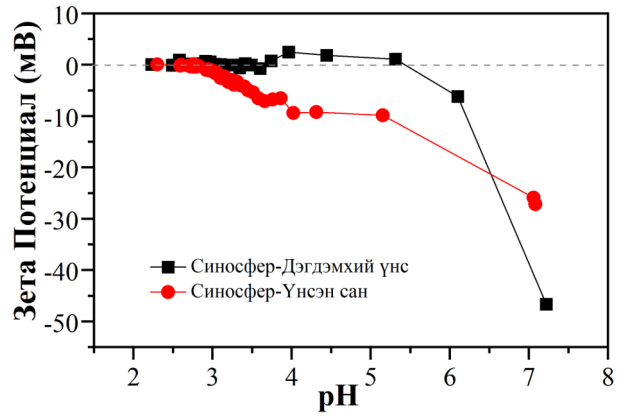
Энэхүү судалгааны үр дүнг бусад улс орнуудад хийгдсэн судалгаануудтай харьцуулан Хүснэгт 5-д үзүүлэв. Хүснэгтээс харахад энэхүү судалгааны синосферийн гарц 0.77% бүхий үр дүн нь бусад судлаачдын үр дүнтэй ойролцоо хэмжээнд байна. Гэвч ус-ацетоны холимог ашигласнаар гарцыг нэмэгдүүлэх боломжтой болох нь харагдаж байна. Үнсэн сангийн үнсний гарц бага байгаа нь удаан хугацаанд хадгалагдах явцад синосферийн бүтэц эвдэрсэнтэй холбоотой байж болно.

Синосферийн морфологи ба хэрэглээний боломж
Синосферийн SEM болон SEM-EDS шинжилгээгээр тодорхойлогдсон морфологи, ширхэглэлийн хэмжээ зэрэг нь түүнийг хөнгөн жинтэй композит материалд ашиглах боломжийг тодорхойлдог.

Бөмбөлөг хэлбэр: Синосферийн төгс бөмбөлөг хэлбэр нь полимер эсвэл цементийн матрицтай холиход урсгалыг сайжруулж, зуурамтгай чанарыг бууруулдаг. Энэ нь композит материалыг боловсруулахад хялбар болгодог.

Хөндий бүтэц: Синосферийн хөндий бүтэц нь түүний нягтыг эрс бууруулж (0.4-0.8 г/см³), хөнгөн жинтэй композит материал үйлдвэрлэх гол нөхцөл болдог. Мөн энэхүү хөндий бүтэц нь дулаан болон дуу тусгаарлах чадварыг нэмэгдүүлдэг тул дулаалгын болон дуу чимээ намсгагч материалд ашиглахад тохиромжтой.

Ширхэглэлийн хэмжээ: Дэгдэмхий үнснээс ялгасан синосферийн ширхэглэлийн хэмжээ (50-200 мкм) нь



Зураг 4. Дэгдэмхий үнс (Fly ash) болон үнсэн сангийн үнс (Pond ash)-ны зета потенциалын pH-аас хамаарах хамаарал

композит материалд дүүргэгч бодисоор ашиглахад тохиромжтой. Ширхэглэлийн хэмжээний өргөн тархалт нь матриц доторх синосферийн бөөмсийн хоорондын зайг багасгаж, савлагааны нягтыг нэмэгдүүлдэг. Энэ нь шаардагдах холбогч материалын (полимер, цемент) хэмжээг бууруулж, улмаар нийт материалын өртөг болон жинг багасгах давуу талтай [29].

Гадаргуугийн шинж чанар: Дэгдэмхий үнснээс ялгасан синосферийн харьцангуй гөлгөр гадаргуу нь полимер матрицтай холбогдохдоо сул адгези үүсгэж болзошгүй тул гадаргууг идэвхжүүлэх эсвэл холбогч агент ашиглах шаардлагатай байж болно. Харин үнсэн сангийн синосферийн барзгар гадаргуу нь матрицтай механик холбоог сайжруулах боломжтой ч, гадаргуу дээрх бохирдол нь нийт бат бөх чанарт сөргөөр нөлөөлж болзошгүй юм.

Монгол улсын хэмжээнд синосфер үйлдвэрлэх боломж: Монгол улсын цахилгаан станцууд жилд ойролцоогоор 1 сая тонн үнс ялгаруулдаг бөгөөд үүний 20 орчим хувь нь дэгдэмхий үнс байдаг [22]. Энэхүү судалгааны үр дүнд үндэслэн, дэгдэмхий үнснээс 0.13% гарцтайгаар синосфер ялгаж авах боломжтой гэж үзвэл, жилд ойролцоогоор 266 тонн синосфер үйлдвэрлэх боломжтой. Синосферийн зах зээлийн үнэ нь чанараас хамааран 1 кг тутамд 1-5 ам.доллар байдаг бөгөөд энэ нь жилд 266,000-1,330,000 ам.долларын орлого олох боломжийг бүрдүүлж байна [30].

Үнсэн сангийн үнснээс синосфер ялгаж авах гарц бага боловч, үнсэн сангуудад хуримтлагдсан үнсний хэмжээ их учраас энэ эх үүсвэрээс синосфер ялгаж авах боломжийг судлах нь чухал ач холбогдолтой

Хүснэгт 5. Синосферийн гарцыг бусад судалгааны үр дүнтэй харьцуулсан байдал

Улс	Эх үүсвэр	Ялгах арга	Гарц (%)	Эшлэл
Монгол (энэхүү судалгаа)	Дэгдэмхий үнс	Гравитац	0.77	
Монгол (энэхүү судалгаа)	Үнсэн сангийн үнс	Гравитац	0.002	
Тайланд	Дэгдэмхий үнс	Гравитац	3.5	[26]
Польш	Дэгдэмхий үнс	Хуурай арга	0.64	[27]
Энэтхэг	Дэгдэмхий үнс	Флотац	>1	[28]

юм. Монгол Улсын хувьд нүүрсний цахилгаан станцуудаас их хэмжээний үнс гардаг бөгөөд түүний нэг бүрэлдэхүүн хэсэг болох синосферийг эдийн засгийн эргэлтэд оруулах өргөн боломжтой. Олон улсын туршлагаас харахад синосферийг барилгын салбарт хөнгөн жинтэй бетон, дулаан тусгаарлах материал, зам барилгын дүүргэгч зэрэгт амжилттай ашиглаж байна. Монгол Улсад цахилгаан станцын хаягдал үнсийг барилгын материалд ашиглах боломжийн талаарх судалгаа хийгдэж байгаа хэдий ч, синосферийг ялган авч, нэмүү өртөг шингэсэн бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэх нь хангалтгүй байна. Иймд дотоодын түүхий эдэд түшиглэн синосфер ялгах, түүгээр барилгын болон бусад салбарын хэрэгцээт бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэх нь эдийн засгийн болон байгаль орчны хувьд чухал ач холбогдолтой юм.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар ДЦС-4 ТӨХК-ийн дэгдэмхий үнс болон үнсэн сангаас синосфер ялгаж авах боломжийг судалж, дараах үндсэн дүгнэлтэд хүрлээ:

- *Түүхий эдийн ялгаа:* Дэгдэмхий үнс нь үнсэн сангийн үнснээс синосфер ялгаж авахад илүү тохиромжтой түүхий эд болох нь тогтоогдсон. Нийт синосферийн гарцаар дэгдэмхий үнс нь үнсэн сангийн үнснээс ойролцоогоор 71 дахин их үр ашигтай байна.
- *Ялгалтын тохиромжтой горим:* Ус–ацетоны холимог ашиглан ялгах туршилтаар ус:ацетон = 80:20 жингийн харьцаа (нягт ≈ 0.95 г/см³) нь дэгдэмхий үнснээс синосфер ялгахад хамгийн тохиромжтой горим болохыг тогтоосон бөгөөд энэхүү нөхцөлд ялгалтын үр ашиг мэдэгдэхүйц сайжирсан.
- *Дулааны боловсруулалтын нөлөө:* 800 °C-д хийсэн дулааны боловсруулалт нь усаар ялгах үед хамт хөвж гарч ирсэн дутуу шатсан нүүрс болон бусад органик хольцыг зайлуулахад үр дүнтэй байж, синосфер давамгайлсан хөнгөн фракцыг ялган авах боломжийг бүрдүүлсэн.
- *Синосферийн физик-химийн шинж чанар:* SEM-EDS шинжилгээгээр дэгдэмхий үнсний синосфер нь гөлгөр гадаргуутай, төмөр (27.7%)-ийн агууламж харьцангуй өндөр, харин үнсэн сангийн синосфер нь барзгар гадаргуутай, цахиур (22.9%), хөнгөнцагаан (11.2%), кальци (6.9%)-ийн агууламж давамгайлж байгааг тогтоов. Эдгээр ялгаа нь синосферийн хэрэглээний боломжид нөлөөлөх чухал хүчин зүйл болно.
- *Коллоид тогтвортой байдал:* Зета потенциалын шинжилгээгээр дэгдэмхий үнсний гадаргуугийн цэнэгийн тогтвортой байдал (-46.63 мВ) нь үнсэн сангийн үнснийхээс (-27.13 мВ) илүү сайн болох

нь тогтоогдсон бөгөөд энэ нь ялгалт, цэвэршүүлэлтийн процесст эерэг нөлөө үзүүлэх боломжтойг харуулж байна.

Ерөнхийд нь дүгнэвэл, дэгдэмхий үнсийг гүн боловсруулах замаар синосфер ялган авч, нэмүү өртөг шингэсэн материал үйлдвэрлэх нь Монгол Улсын нөхцөлд техникийн хувьд боломжтой бөгөөд эдийн засаг, байгаль орчны хувьд ач холбогдолтой чиглэл болох нь энэхүү судалгаагаар батлагдлаа. Цаашид синосферийн цэвэршилтийг тоон үзүүлэлтээр үнэлэх, үйлдвэрлэлийн технологийн схем боловсруулах чиглэлээр судалгааг гүнзгийрүүлэх шаардлагатай гэж үзэж байна.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг Боловсрол, шинжлэх ухааны яамны захиалгаар, Шинжлэх Ухаан, Технологийн сангийн санхүүжилтээр 2023-2027 оны хооронд хэрэгжүүлж буй “Хаягдал үнсийг боловсруулж, шинэ материал гарган авах технологи боловсруулах” сэдэвт судалгааны үндсэн чиглэлийн (ШУСҮЧ-2023/221) төслийн хүрээнд гүйцэтгэсэн болно. Тус судалгаанд ХХТХ-ийн Эрдэс боловсруулалтын Нэг Зам - Нэг бүс судалгааны лабораторийн рентген дифрактометр (XRD)-ийн багажийг ашигласан. Зохиогчдын зүгээс энэхүү судалгаанд хамтран ажилласан нийт судлаачдаа талархал илэрхийлье.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi. (2015) A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth Sci. Rev.*, 141, p.105-121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
2. M. Ahmaruzzaman. (2010) A review on the utilization of fly ash. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 36, p.327-363. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.003>
3. R.S. Blissett, N.A. Rowson. (2012) A review of the multi-component utilization of coal fly ash. *Fuel*, 97, p.1-23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>
4. E.V. Fomenko, N.N. Anshits, L.A. Solov'Ev, O.A. Mikhailova, A.G. Anshits. (2014) Composition and structure of the shells of fly ash cenospheres from the combustion of coal of the Kuznetsk basin. *Solid Fuel Chem.*, 48, p.129-139. <https://doi.org/10.3103/S0361521914020037>
5. S. V. Vassilev, R. Menendez, D. Alvarez, M. Diaz-Somoano, M.R. Martinez-Tarazona. (2003) Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. Characterization of feed coals and fly ashes. *Fuel*, 82, p.1793-1811. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00123-6)

6. H. Yang, H.G. Li, X.Y. Xie, Q. Wang, Y.P. Duan, L.H. Huang. (2018) Layered double hydroxide-derived catalyst of Zn-Ni-Al-Fe-O for hydrogen production via auto-thermal reforming of acetic acid. *Ranliao Huaxue Xuebao/J. Fuel Chem. Technol.*, 46, p.1352-1358. [https://doi.org/10.1016/s1872-5813\(18\)30055-0](https://doi.org/10.1016/s1872-5813(18)30055-0)
7. N. Ranjbar, C. Kuenzel. (2017) Cenospheres: A Review. *Fuel*, 207, p.1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.059>
8. T. Hirajima, H.T.B.M. Petrus, Y. Oosako, M. Nonaka, K. Sasaki, T. Ando. (2010) Recovery of cenospheres from coal fly ash using a dry separation process: Separation estimation and potential application. *Int. J. Miner. Process.*, 95, p.18-24. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.03.004>
9. K. Wierchowski, A. Klupa, B. Białocka, J.C. Moszko. (2023) Gravity and electrostatic separation of unburned coal from a selected fly ash. *J. Sustain. Mining*, 22, p.33-40. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1372>
10. V.K. Yadav, K.K. Yadav, V. Tirth, A. Jangid, G. Gnanamoorthy, N. Choudhary, S. Islam, N. Gupta, C.T. Son, B.H. Jeon. (2021) Recent advances in methods for recovery of cenospheres from fly ash and their emerging applications in ceramics, composites, polymers and environmental cleanup. *Crystals*, 11(9), 1067. <https://doi.org/10.3390/cryst11091067>
11. S. Yoriya, T. Intana, P. Tepsri. (2019) Separation of cenospheres from lignite fly ash using acetone-water mixture. *Appl. Sci.*, 9(18), 3792. <https://doi.org/10.3390/app9183792>
12. Ж. Тэмүүжин. (2016) Цахилгаан станцын хаягдал үнс, үнсний хэрэглээ, үнсийг манай улсад ашиглах боломж. *Proc. Mong. Acad. Sci.*, 01, x.58-72. <https://doi.org/10.5564/pmas.v53i1.703>
13. Л. Мандахсайхан, Б. Даваабал, Р. Уламбаяр, О. Алтантуяа. (2024) Дулааны цахилгаан станцын үнсэн сангийн үнсний төмрийн агуулгыг бууруулах судалгаа. *Bull. Ins. Chem. Chem.*, 12, x.20-24. <https://doi.org/10.5564/bicct.v12i12.3937>
14. S. Beddu, M. Ahmad, D. Mohamad, M.I. bin Noorul Ameen, Z. Itam, N.L.M. Kamal, N.A.N. Basri. (2020) Utilization of fly ash cenosphere to study mechanical and thermal properties of lightweight concrete. *AIMS Mater. Sci.*, 7, p.911-925. <https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2020.6.911>
15. P. Rybiński, W. Zukowski, D. Bradło. (2015) Influence of cenosphere particles on thermal properties composites of silicon rubber. *J. Therm. Anal. Calorim.* 122, p.1307-1318. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4829-0>
16. D.S. Nakonieczny, M. Antonowicz, T. Heim, A.S. Swinarew, P. Nuckowski, K. Matus, M. Lemanowicz. (2022) Cenospheres: Reinforced PA-12 composite: Preparation, physicochemical properties, and soaking tests. *Polymers*, 14(12), 2332. <https://doi.org/10.3390/polym14122332>
17. B.R. Bharath Kumar, S.E. Zeltmann, M. Doddamani, N. Gupta, Uzma, S. Gurupadu, R.R.N. Sailaja. (2016) Effect of cenosphere surface treatment and blending method on the tensile properties of thermoplastic matrix syntactic foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, 133(35).
18. C. Patra. (2014) Physical properties of cenospheres, Master degree thesis, Department of civil engineering, National Institute of Technology, India.
19. S. Chakravarty, M. Fischer, P. García-Trinanes, D. Parker, O.L. Bihan, M. Morgenerer. (2017) Study of the particle motion induced by a vortex shaker. *Powder Technol.*, 322, p.54-64 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.026>
20. A. Shishkin, V. Abramovskis, I. Zalite, A.K. Singh, G. Mezinskis, V. Popov, J. Ozolins. (2023) Physical, thermal, and chemical properties of fly ash cenospheres obtained from different sources. *Materials*, 16(5), 2035. <https://doi.org/10.3390/ma16052035>
21. G.V.P. Bhagath Singh, K.V.L. Subramaniam. (2016) Quantitative XRD study of amorphous phase in alkali activated low calcium siliceous fly ash. *Constr. Build. Mater.*, 124, p.139-147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.081>
22. T. Hirajima, H.T.B.M. Petrus, Y. Oosako, M. Nonaka, K. Sasaki, T. Ando. (2010) Recovery of cenospheres from coal fly ash using a dry separation process: Separation estimation and potential application. *Int. J. Miner. Process.*, 95, p.18-24. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.03.004>
23. Y. Xing, F. Guo, M. Xu, X. Gui, H. Li, G. Li, Y. Xia, H. Han. (2019) Separation of unburned carbon from coal fly ash: A review. *Powder Technol.*, 353, p.372-384. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.037>
24. P. Rybiński, W. Zukowski, D. Bradło. (2015) Influence of cenosphere particles on thermal properties composites of silicon rubber. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 122, p.1307-1318 <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4829-0>
25. W. Gou, Z. Xu, X. Lin, Y. Sun, X. Han, M. Liu, Y. Zhang. (2022) Boosting lithium storage of a metal-organic framework via zinc doping. *Materials*, 15, p.1-11. <https://doi.org/10.3390/ma15124186>
26. S. Yoriya, P. Tepsri. (2020) Separation process and microstructure-chemical composition relationship of cenospheres from lignite fly ash produced from coal-fired power plant in Thailand. *Appl. Sci.*, 10, p.1-21. <https://doi.org/10.3390/app10165512>
27. J. Wrona, W. Zukowski, D. Bradło, P. Czuprynśki. (2020) Recovery of cenospheres and fine fraction from coal fly ash by a novel dry separation method.

- Energies*, 13, p.1-14 <https://doi.org/10.3390/en13143576>
28. L.M. Manocha, K.A. Ram, S.M. Manocha. (2011) Separation of cenospheres from fly ashes by floatation method. *Eurasian Chem. Techno. J.*, 13, p.89-95 <https://doi.org/10.18321/ectj72>
29. D. Hangxing, Z. Shiyu, Z. Xiaolong, Z. Zhaohao, Z. Yingliang. (2021) Low carbon cementitious composites: Calcined quarry dust modified lime/sodium sulfate-activated slag. *Constr. Build. Mater.*, 282, p.122521 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122521>
30. P.K. Kolay, S. Bhusal. (2014) Recovery of hollow spherical particles with two different densities from coal fly ash and their characterization. *Fuel*. 117, p.118-124 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.014>

Study on cenosphere recovery from coal ash

Altantuya Ochirkhuyag, Mandakhsaikhan Luvsandagva, Javzandulam Chuluuntumur, Zolzaya Tsoodol, Gendenjamts Oyun-Erdene, Altansukh Batnasan*

Laboratory of Advanced Materials Chemistry and Technology, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13260, Mongolia

*E-mail: altansukh.b@mas.ac.mn
ORCID: [0000-0003-3531-3050](https://orcid.org/0000-0003-3531-3050)

Submitted: 21.11.2025

Reviewed: 22.11.2025

Accepted: 25.12.2025

Abstract: Cenospheres are hollow microspheres found in coal fly ash, characterized by low density, high strength, and thermal insulation properties, making them valuable materials widely used in construction, composite materials, and thermal insulation applications. This study developed a methodology for separating cenospheres from fresh fly ash and pond ash from the "TPP-4" Thermal Power Plant, and comparatively investigated their physicochemical properties. In the initial separation stage using the hydraulic (water) method, cenospheres were recovered at yields of 0.77 wt.% from fresh fly ash and 0.02 wt% from pond ash. To purify the separated cenospheres, thermal treatment followed by separation using an 80:20 water-acetone mixture was applied, resulting in increased yields of 17.3% for fresh fly ash cenospheres and 9.0% for pond ash cenospheres. SEM-EDS analysis revealed that fresh fly ash cenospheres have smooth surfaces and are enriched in iron (27.7%), while pond ash cenospheres have rough surfaces and are enriched in silicon (22.9%), aluminum (11.2%), and calcium (6.9%). Zeta potential analysis confirmed that the colloidal stability of fresh fly ash (-46.6 mV) is superior to that of pond ash (-27.13 mV). The study results demonstrate that fresh fly ash is 71 times more effective as a raw material for cenosphere recovery compared to pond ash, indicating the potential for reprocessing coal ash in Mongolia to produce high-value materials.

Keywords: coal ash, cenosphere, fly ash, ash pond, power plant

© The Author(s). 2025 **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.

<https://doi.org/10.5564/bicct.v13i13.4580>