

Багануурын ордын хүрэн нүүрсний флотацын судалгаа

Бямбаа Мөнхцэцэг¹, Юнчан Ли², Дамдиндорж Мөнгөннаран¹, Гандандорж Шийрав¹,
Барнасан Пүрэвсүрэн¹, Яавэн Шинг² Бүдээбазар Авид^{1*}

¹Шинжлэх ухааны академийн Хими, химийн технологийн хүрээлэн, Улаанбаатар, Монгол улс

²Хятадын уул уурхай ба технологийн их сургууль, Шюйжэоу, Хятад улс

*avid@mas.ac.mn

Хураангуй. Багануурын хүрэн нүүрс нь үнслэг өндөртэй, чийг ихтэй тул хол газар тээвэрлэхэд ашиггүй, экспортлох боломж хомс учир баяжуулан чанарыг сайжруулах шаардлагатай. Манай орны хэмжээнд хүрэн нүүрсний баяжуулалтын судалгаа харьцангуй бага хийгдсэн, нөгөө талаас хүрэн нүүрс нь их хэмжээний хүчилтөрөгч агуулдаг тул баяжуулахад амаргүйд тооцогддог. Иймээс энэхүү судалгаагаар Багануурын хүрэн нүүрсний эрдсийн найрлага, тархалтын онцлог болон баяжуулалтын судалгаа хийлээ. Багануурын нүүрсэнд шаварлаг эрдэс болон пирит нарийн ширхэгтэйгээр жигд тархсан бөгөөд цуглуулагч 1100-г ашиглан флотацаар баяжуулахад 12.81%-ийн гарцтай, 11.93%-ийн үнстэй баяжмал гарсан нь хамгийн сайн үр дүн байв. Туршилтын явцад эрдсийн ширхгүүд нүүрсний гадаргууг бүрхэх, баяжмалтай хамт хөвөх, мөн том ширхэгтэй нүүрсийг хөвүүлэхэд хүндрэлтэй байсан зэргээс флотацын үр ашиг харьцангуй сул байлаа. Харин шламгүйжүүлснээр 39.52%-ийн гарцтай, 12.62%-ийн үнстэй баяжмал гарган авлаа. Судалгаанаас харахад хүрэн нүүрс нь гидрофил шинж чанартай, хөвөх чадвар муу бөгөөд органик ба органик бус эрдсүүдийн хэмжээ маш нарийн, жигд тархалттай тул тэдгээрийг салгах нь хүндрэлтэй байв. Хүрэн нүүрсний флотац нь нүүрсний ширхэглэлийн хэмжээ, гадаргуугийн гидрофоб ба гидрофил шинж, гадаргуу хоорондын харилцан үйлчлэл болон гадаргуугийн цахилгаан шинж чанараас ихээхэн хамааралтай болохыг уг судалгаа харууллаа.

Түлхүүр үг: хүрэн нүүрс, флотац, цуглуулагч, баяжмал, хаягдал

ОРШИЛ

Флотацын технологи нь физик-химийн аргуудын хослол бөгөөд эрдэс бодисыг хөөсний гадаргууд наалдуулах замаар хэрэгтэй хэсгийг үр дүнтэйгээр ялган авах арга юм. Флотацын процессын үр ашиг нь рН, ширхэглэлийн хэмжээ, температур болон урвалжийн тун зэрэг олон хүчин зүйлээс хамаардаг [1,2]. Доод шатны хүрэн нүүрс нь керосин, дизель зэрэг түгээмэл тослог цуглуулагчийг ашиглан флотацад оруулахад хүндрэлтэйд тооцогддог [3–6]. Хүрэн нүүрсний гадаргуу ихэвчлэн гидрофил шинжтэй ба гидрофоб шинж сул байдаг ба гол шалтгаан нь түүний гадаргуу дээр гидрофил функциональ бүлгүүд (C–O, C=O, O–C=O) их хэмжээгээр агуулагддагтай холбоотой бөгөөд энэ нь нүүрсний гадаргуу ба тосон дусал/хөөс хоорондын наалдцын үр ашгийг бууруулдаг [7–9]. Доод шатны нүүрсний флотацын үр ашгийг дээшлүүлэхийн тулд зөв цуглуулагч сонгох нь маш чухал [10–14]. Мөн нүүрсний ширхэглэл их чухал ба заримдаа нарийн ширхэгтэй хэсэг (шламгүйжүүлэх)-ийг ялгаж зайлуулсны дараа баяжуулахад флотац илүү үр дүнтэй явдаг судалгаа бий [15–19]. Сүүлийн үеийн олон судалгаагаар туйлт ба туйлт бус цуглуулагчаас бүрдсэн нийлмэл цуглуулагч нь үр дүн сайтай, өртөг багатай болох нь тогтоогдсон бөгөөд судалгааны гол чиглэл болж байна [20–25]. Чанг нар [20] нь Triton X-100 болон дизель түлшний нийлмэл цуглуулагч нь исэлдсэн нүүрсний флотацад сайн үр дүн өгдгийг, Triton X-100 нь дизелийг эмульсжүүлэх болон туйлтай хэсгээрээ (head-on) адсорбцлох замаар нүүрсний гидрофил хэсгийг бүрхэх чадвартай холбоотой гэж үзжээ. Жу нар [22] нь нефтийн гаралтай тос болон хүчилтөрөгч агуулсан химийн бодисоос тогтсон нийлмэл цуглуулагч ашиглах замаар доод шатны нүүрсийг флотацын аргаар баяжуулсан байна. Үүнээс харахад нийлмэл цуглуулагчаар баяжуулах нь дизельтэй харьцуулахаас илүү өндөр гарцтай байсан байна. Мөн дизельтэй харьцуулбал нийлмэл цуглуулагч нь нүүрсний гадаргад наалдаж жигд тархсан байна. Чанг нар [26] доод шатны нүүрсний флотацыг сайжруулах зорилгоор додекан болон тетраэтилен гликол монододецилийн эфир гэх гадаргуу идэвхт бодисыг холин нийлмэл цуглуулагч болгон ашиглажээ. Мөн гадаргуу идэвхт бодис ба додеканы харьцаа 1:3 байх үед флотацын үр дүн хамгийн сайн байсан гэж дүгнэжээ. Вао нар [27] олеины хүчил болон метил олеатын доод шатны нүүрсний флотацад үзүүлэх нөлөөг судалж, эдгээрийг дизельтэй хослуулан флотацын үр ашгийг нэмэгдүүлжээ. Судалгаагаар олеины хүчил эсвэл метил олеат ба дизелийн харьцаа мөн 1:3 байх үед флотацын үр дүн хамгийн сайн байсан байна. Лиано нар [28] додекан–этил бутират, додекан–этил каприлат, додекан–этил лаурат (додекан:этил = 4:1) гэсэн гурван төрлийн алкан–эфирийн холимог цуглуулагчийг ашиглан доод шатны нүүрсний флотацыг үр

ашигтай явуулж, эдгээр тосон дуслууд ба нүүрсний хэсгүүдийн хоорондох гадаргуугийн харилцан үйлчлэлийг судалсан байна. Шү нар [29] нарийн шаарны флотацад зориулсан нүүрсний хийжүүлэлтийг сайжруулах зорилгоор нафтений хүчил болон керосины нийлмэл цуглуулагчийг ашиглажээ. Тэд нафтений хүчил ба керосины молийн харьцаа 4:6 үед хаягдлын үнсний агуулга болон шатамхай хэсгийн авалт хамгийн дээд түвшинд хүрсэн гэж дүгнэжээ. Энэ судалгаа нь нийлмэл цуглуулагчийг нүүрс хийжүүлэхийн нарийн шаарны флотацад амжилттай ашиглаж болдгийг, мөн тэдгээрийн харьцааг зөв сонгох нь чухал болохыг харуулж байна. Сонирхолтой нь, тэдний судалгаануудын дунд туйлт болон туйлт бус цуглуулагчийн оновчтой харьцаа байнга ажиглагддаг. Гэвч энэ үзэгдлийн механизм тодорхой бус хэвээр байна. Одоо хүртэл нийлмэл цуглуулагчийн харьцааг сонгоход зориулагдсан онолын үндэслэл байхгүй байна. Олон судлаачид туйлт цуглуулагч ашиглан доод шатны нүүрсийг флотацад оруулах асуудлыг авч үзсэн байдаг [30–32]. Тиан нар [33] нүүрстөрөгчийн гинжний урт нь ялгаатай карбон хүчлүүдийн флотацын гүйцэтгэлийг судалж, карбон хүчлүүд нь алкануудтай харьцуулахад хүрэн нүүрсийг илүү сайн хөвүүлдэг болохыг тогтоосон байна. Шиан нар [34] Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектроскоп (ФХНУТ)-ын багаж ашиглан хүрэн нүүрсний гадаргуу дээр додецилтриметиламмонийн бромид (ДТАБ)-ын адсорбцыг судалсан. Тэд ДТАБ-аар боловсруулсны дараа гадаргуу дахь CH_3/CH_2 -ийн харьцаа багассан нь ДТАБ молекулууд адсорбцлогдсоныг илтгэнэ гэж үзсэн. Жиан нар [35] тетрагидрофурфурил эфирийн төрлийн цуглуулагч нь хүрэн нүүрсний гадаргуу дээрх хүчилтөрөгч агуулсан функциональ бүлгүүд болон бензолын цагаригтай холбогдож чадна гэж үзжээ. Ийм харилцан үйлчлэл нь илүү хүчтэй таталцлын хүч үүсгэж, баяжмалын гарцыг нэмэгдүүлдэг. Цуглуулагчийн фаз хоорондын үйлчлэлийн механизм ч мөн судлагдсан. Шиан нар [36] атомын хүчний микроскоп ашиглан янз бүрийн цуглуулагчийн молекулууд ба хатуу гадаргуугийн хоорондын харилцан үйлчлэлийн хүчийг судалж, туйлт урвалжуудын наалдац нь туйлгүй урвалжуудаас нүүрсний гадаргууд илүү хүчтэй болохыг ажигласан.

Энэхүү судалгаагаар Багануурын ордын хүрэн нүүрсний флотацын судалгааг нүүрсний ширхэглэл, флотреагентийн төрөл болон хэмжээнээс хамааруулан судаллаа.

СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ БА АРГА ЗҮЙ

Судалгааны дээжийн шинж чанар

Эл судалгаанд Багануурын ордын нүүрсний дээжийг стандарт аргын дагуу бутлан нунтаглаж, аналитик дээж бэлтгэн ашиглалаа. Эх нүүрсний микро зургийг Zeiss AXIO туйлширсан гэрлийн микроскоп ашиглан авсан. Нүүрсний 2 г дээжийг эпоксидын давирхайтай хольж, 24 цаг байлгаад хатуурсны дараа металлограф өнгөлөгчөөр өнгөлж, ажиглахад тохиромжтой толигор гадаргуу бий болгосон. Гадаргууг 500 дахин томсгон микроскопоор зургийг авлаа.

Рентген дифракцын шинжилгээ

Рентген дифракцын шинжилгээг Cu K α цацраг ($\lambda = 1.54187 \text{ \AA}$)-аар тоноглогдсон PANalytical X'Pert Pro дифрактометр ашиглан, 40 кВ хүчдэл болон 40 мА гүйдлийн нөхцөлд гүйцэтгэсэн. Сканнерийг $2\theta = 10^\circ\text{--}90^\circ$ мужид тасралтгүй горимоор явуулж, 0.02° -ын алхамтай, алхам бүрд 10 секундний тоолох хугацаатайгаар хэмжилт хийсэн. Үүссэн дифракцын хэв шинжийг Jade 6.5 программ ашиглан боловсрууллаа.

Рентген флуоресценцийн шинжилгээ

Дээжийн эрдсийн макро бүрэлдэхүүний найрлагыг шинжлэхэд рентген флуоресценцийн аргыг ашиглав. Дээжүүдийг давирхай ашиглан бэлтгэж, өөр өөр ширхэглэлийн хэмжээтэй (2000, 400, 240 грит) зүлгүүрийн цаас хэрэглэн өнгөлгөөний машинаар өнгөлж шинжиллээ.

Зета потенциалын шинжилгээ

Зета потенциалыг хэмжихэд потенциометрийн анализатор Malvern Panalytical ZS 90-ыг ашиглав. Туршилтуудыг 20°C температурт таван удаа давтан явуулж, хэмжилтийн дундаж утгыг туршилтын өгөгдлийн найдвартай байдлыг хангах эцсийн үр дүн болгон авсан.

Индукцийн хугацааны шинжилгээ

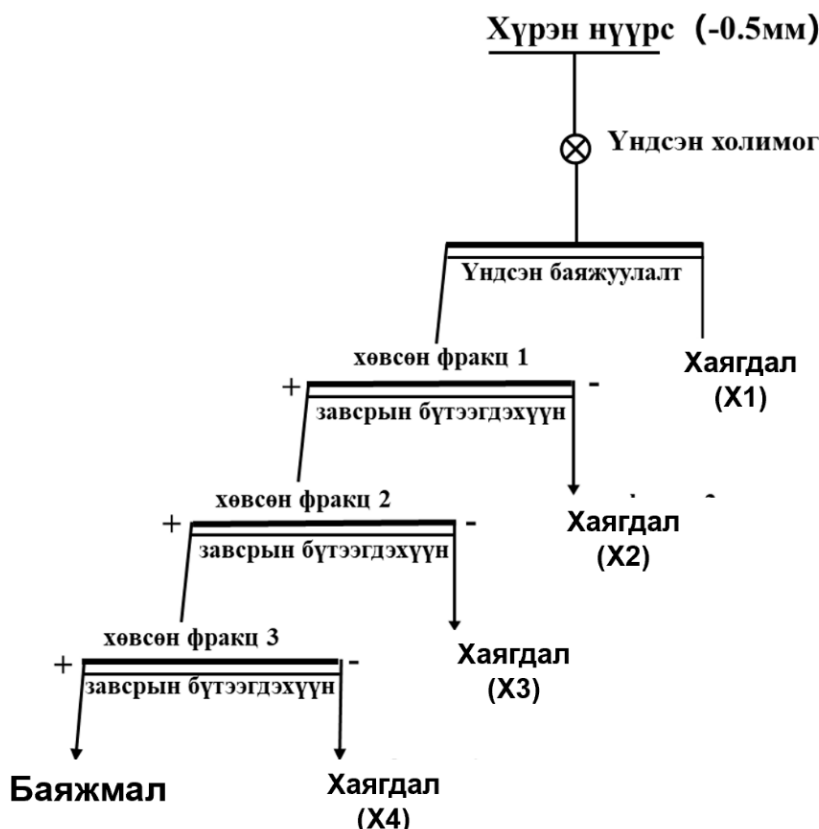
Адгезлах буюу наалдах магадлал 50% болох үеийн шүргэлтэх/контактлах хугацаагаар индукцийн хугацааг тодорхойлдог. Шүргэлзэх хугацаа индукцийн хугацаанаас хэтэрсэн тохиолдолд бөмбөлөг ба жижиг хэсгийн хооронд наалдац үүсдэг. Тиймээс индукцийн хугацааг хэмжих нь жижиг хэсгийн хөвөх чадварыг тооцоолох энгийн арга юм. Бөмбөлөг ба нүүрсний жижиг хэсгийн хоорондох индукцийн хугацааг хэмжихэд өндөр хурдтай камер, гэрлийн эх үүсвэр, компьютер, микро тариур, капилляр, соронзон хутгагч, чичиргээ өдөөгч зэргийг ашиглан, хэмжилт хийлээ. Хэмжилт хийхээс өмнө камерыг хүйтэн ус ба 2 г хүрэн нүүрсний жижиг хэсгээр ($0.25 + 0.125 \text{ мм}$)-ээр дүүргэж, холимгийг шаардлагатай температурт хүртэл хутгалттай халаав. Энэ процесст цуглуулагч эсвэл хөөсрүүлэгч нэмээгүй. Дараа нь 3.0 мм-ийн агаарын бөмбөлгийг нүүрсний давхарга руу доош оруулсан. Өөр өөр шүргэлцэх хугацааг тохируулж, бөмбөлөг татагдсаны дараа наалдац үүссэн эсэхийг шалгахын тулд камер ашигласан. Наалдах магадлалыг тооцоолохын тулд туршилт бүрийг 20 удаа хийсэн. Жишээлбэл, хэрэв бөмбөлөг жижиг хэсэгт 20 удаагаас 10 удаа шүргэлцэхэд наалдах магадлал 50% байна гэж тооцлоо.

Контакт өнцөг хэмжих арга

Гидрофоб гадаргуу дээр цуглуулагчийн адсорбцлох үр ашгийг шалгахын тулд контакт өнцгийн хэмжилтийг Lauda загварын контакт өнцөг ба гадаргуугийн таталцлын хэмжих багаж ашиглан гүйцэтгэсэн. 0.5 г жинтэй, цэвэр нүүрсний дээжийг 0.0001 г нарийвчлалтай жинлэж, 1 см радиустай хэв ашиглан 10 МПа даралтаар 2 минутын турш шахаж шахмал (брикет) бэлтгэсэн. Ижил нөхцөлд хоёр шахмалыг зэрэгцээ туршилтад зориулан бэлтгэсэн. Багажийг ажиллуулж, нүүрсний брикетийн гадаргуу дээрх усны дуслын динамик контакт өнцгийн дүрсүүдийг бичиж авсан болно.

Флотацын туршилтын арга зүй

Флотацын туршилтыг XFD-1L машин дээр гүйцэтгэсэн ба туршилтын бүдүүвчийг 1-р зурагт үзүүлээ.



1-р зураг. Флотацын туршилтын бүдүүвч

Туршилтад цуглуулагчаар цуглуулагч SYS, цуглуулагч 1100, цуглуулагч 1600, хөөсрүүлэгчээр метил изобутил карбинол (МИБК), 2-октанол ($C_8H_{18}O$)-ыг ашиглав. Туршилтыг дараах дарааллаар гүйцэтгэв. 80 г нүүрсийг 1 л устай хамт флотацын машинд хийж зутанг бүрэн нортол 2 минут байлгасан. Дээж бүрэн норсны дараа цуглуулагч нэмж, процессыг 2 минут үргэлжлүүлсний дараа хөөсрүүлэгчийг нэмж, процессыг дахин 30 секунд явуулна. Дараа нь агаар оруулж флотацыг эхлүүлэх бөгөөд процесс 2.5 минут үргэлжилнэ. Туршилтын явцад хутгагчийн эргэлтийн хурд 1800 эрг/мин, агаарын зарцуулалт 0.10 м³/цаг байв. Флотац дууссаны дараа баяжмал болон хаягдлыг вакуум шүүлтүүрээр тус тусад нь шүүж холбогдох тооцоог хийв. Флотацын туршилтад ашигласан нүүрсний дээжийг бэлдсэн нөхцөл: нунтаглах хугацаа 0-4 минут, тээрмийн эргэлтийн хурд 250-350 эргэлт/мин, керамик бөмбөлгийн диаметр 5, 6 болон 7 мм байсан ба 1.6 кг бөмбөлөг ашиглав. Цуглуулагчийн хэмжээ 6000-10000 г/т, хөөсрүүлэгчийн хэмжээ 2000-4000 г/т байв.

ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

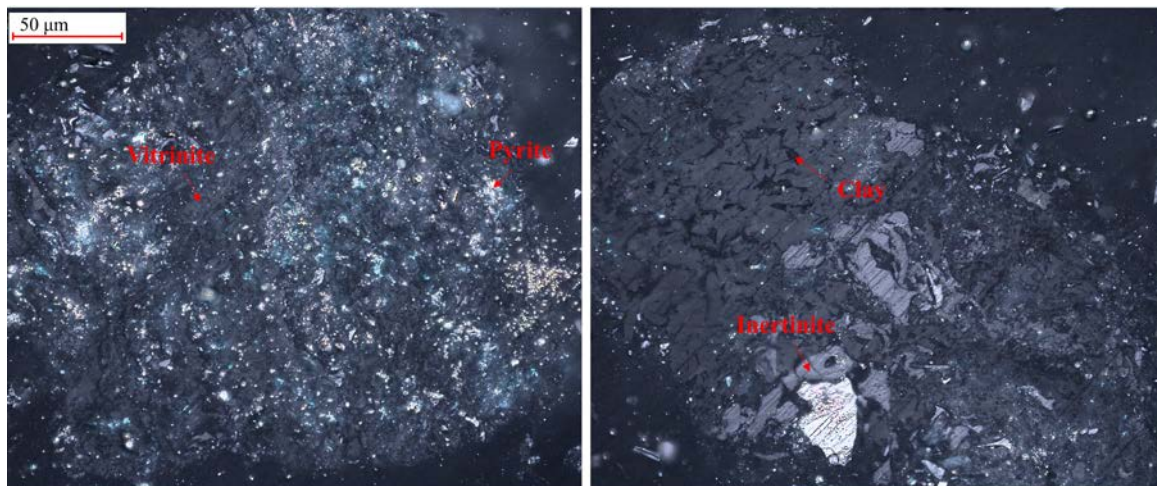
Флотацын судалгаанд ашигласан Багануур ордын нүүрсний техникийн болон элементийн шинжилгээний дүнг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

1-р хүснэгт. Нүүрсний техникийн болон элементийн найрлага

Дээж	Техникийн үзүүлэлтүүд				Элементийн шинжилгээ, %				
	M ^{ar}	A ^{ad}	V ^{ad}	ҮН*	C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	S ^{daf}	O ^{daf}
Багануур	19.8	20.5	25.4	34.3	70.5	5.45	0.9	0.7	22.45

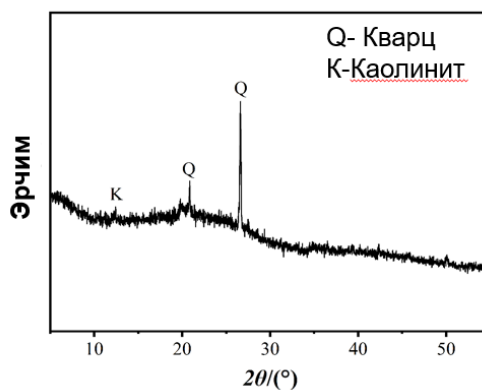
*ҮН-Үлдэгдэл нүүрстөрөгч

Багануурын ордын нүүрсний үнс 20.5 %, нүүрстөрөгчийн агуулга 70.5 %, хүчилтөрөгчийн хэмжээ 22.45 % байна. Дээжийн органик ба эрдэс хэсгийн оптик микроскопоор авсан зургийг 2-р зурагт үзүүлэв.



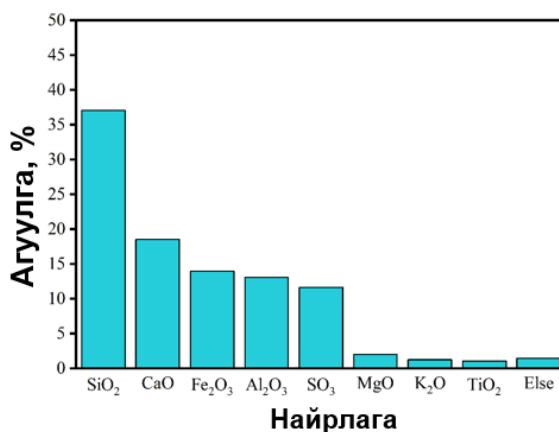
2-р зураг. Багануурын нүүрсний микроскопын зураг

2-р зургаас харахад Багануурын нүүрсэнд шаврын төрлийн эрдэс болон пирит тархмал байдалтай агуулагдаж байгаа нь харагдаж байна. Шаврын эрдсийн ширхгийн хэмжээ ойролцоогоор 10–20 мкм, харин пиритийн ширхэглэл үүнээс хамаагүй жижиг байна. Мөн нүүрсэн дэх эрдэс хэсэг нь нарийн тархсан нь харагдаж байгаа ба энэ нь органик хэсгээс эрдэс хэсгийг салгахад хүнд гэсэн үг юм. Дээжид рентген дифракцын шинжилгээ хийж дүнг 3-р зурагт харуулав.



3-р зураг. Рентген дифракцын шинжилгээний дүн

Рентген дифракцын дүнгээс харахад нүүрсэнд агуулагдаж буй эрдэс бүрэлдэхүүнд кварц ба каолинит зонхилж байгаа бөгөөд Багануурын хувьд 2θ өнцгийн 20.8° ба 26.6° мужид кварцын пик, 12.3° мужид каолинитийн жижиг пик илэрсэн байна. Ялангуяа 26.6° мужид их хурц пик байгаа нь кварц нэлээд зонхилж байгааг харуулж байна. Дээжийн рентген флуоресценцийн шинжилгээний дүнг 4-р зурагт харуулсан ба шинжилгээний дүнгээс харахад Багануурын нүүрсний 38 % нь SiO_2 ба дагалдаад CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 агуулагдаж байна. Энэ нь шинжилгээний дүнгүүд бие биеэ баталж байгааг харуулж байна.



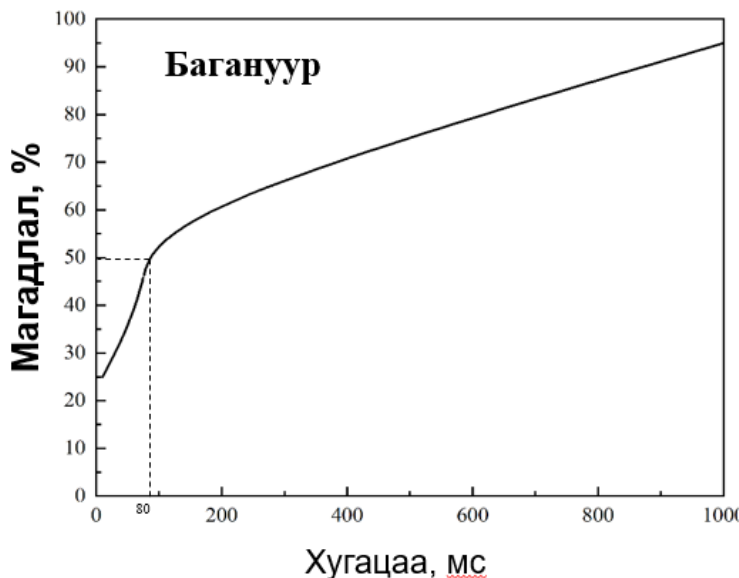
4-р зураг. Рентген флуоресценцийн шинжилгээний дүн

Дээжид зета (ζ) потенциал тодорхойлж дүнг 2-р хүснэгтэд харуулав. Багануур нүүрсний дээжийн ζ -потенциал нь бүх хэмжилтэд сөрөг утгатай байна. Энэ нь нүүрсний ширхгийн гадаргуу сөрөг цэнэгтэй болохыг илтгэх ба дундаж ζ -потенциал -44.88 мВ байна. Ийм нүүрсний хувьд сөрөг цэнэгтэй сайн холбогдох магадлалтай катионит урвалж илүү тохиромжтой юм.

2-р хүснэгт. Зета потенциалын хэмжээ

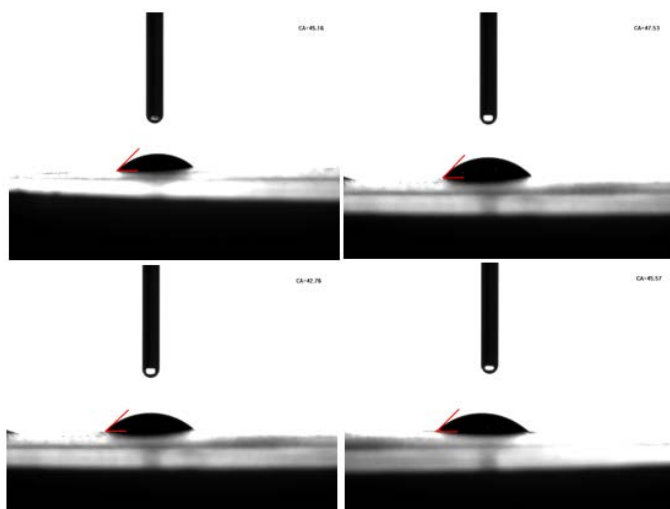
Дээж	ζ потенциал/мВ				
	1	2	3	4	5
Багануур	-43.73	-44.84	-46.07	-42.25	-48.91
					Дундаж
					-44.88

Түүнчлэн дээжүүдийн жижиг ширхгүүд ба хөөсний хоорондын индукцийн хугацааны шинжилгээг хийж 5-р зурагт харууллаа. Нүүрсний хувьд индукцийн хугацаа ойролцоогоор 80 мс байгаа нь жижиг хэсгүүд ба хөөсний харилцан үйлчлэл сул байгааг илтгэнэ.



5-р зураг. Индукцийн хугацааны шинжилгээ

Дээжүүдэд гадаргуугийн контакт өнцгийн шинжилгээ хийж дүнг 6-р зураг болон 3-р хүснэгтэд харууллаа. Контакт өнцөг нь нүүрсний гадаргуугийн норсон байдал, гидрофил/гидрофоб шинж чанарыг илэрхийлэх чухал үзүүлэлт юм. Хэмжилтийн дүнгээс харахад Багануурын нүүрсний гадаргуу дээрх дуслууд намхан тархсан, контакт өнцөг харьцангуй бага байгаа нь харагдаж байгаа ба энэ нь Багануурын нүүрс илүү гидрофил шинж чанартай, усанд норх чадвар сайн болохыг харуулж байна.



6-р зураг. Гадаргуугийн контакт өнцгийн шинжилгээний дүн

Нүүрсний дээжийн контакт өнцгийг дөрвөн давтамжтайгаар хэмжиж, дундаж утгыг тооцсон.

3-р хүснэгт. Гадаргуугийн контакт өнцгийн шинжилгээний дүн

Дээж	Өнцөг, °				
	1	2	3	4	Дундаж
Багануур	45.16	47.53	42.76	45.57	45.26

Багануурын нүүрсний дундаж контакт өнцөг 45.26° байгаа нь гадаргуу дунд зэргийн норолттой, харьцангуй гидрофил шинж давамгайлж байгааг илтгэж байна. Эдгээр ялгаатай гадаргуугийн шинж чанарууд нь нүүрсний найрлага, ялангуяа хүчилтөрөгч агуулсан функциональ бүлгүүдийн хэмжээ, эрдэс хольцын тархалт болон микроструктурын онцлогтой шууд холбоотой. Гадаргуугийн норолтын ялгаа нь нүүрсний флотацын төлөв, баяжуулалтын сонгомол чанар болон процессын үр ашигт чухал нөлөө үзүүлэх ач холбогдолтой.

НҮҮРСНИЙ ФЛОТАЦЫН ТУРШИЛТУУД

Цуглуулагчийн нөлөөллийн судалгаа

Флотацын судалгааг цуглуулагчийн төрөл, нүүрсний ширхэглэл, нүүрсийг нунтаглах хугацаа, тээрмийн эргэлтийн хурд, тээрмийн керамик бөмбөлгийн диаметр зэргээс хамааруулан судаллаа. Багануурын нүүрс нь үнс ихтэй, эрдсүүд нь нарийн ширхэглэлтэй, жигд тархсан тул нүүрсийг 4 мин нунтаглаж флотацын цуврал туршилтууд хийв. Урьдчилсан судалгаагаар нийлмэл цуглуулагч болох SYS нь цуглуулах/хөвүүлэх чадвар сайтай, харин сонгомол чанар харьцангуй сул болох нь тогтоогдсон. Иймээс цуглуулагч SYS, мөн хоёр өөр төрлийн нийлмэл цуглуулагч (Цуглуулагч 1100 ба Цуглуулагч 1600)-ыг сонгон авч туршилтад ашиглалаа. Эдгээр цуглуулагчийн үндсэн найрлагад хүнсний тосны үйлдвэрлэлийн явцад үүссэн хаягдлаас боловсруулж гаргасан биодизель байлаа. Дээрх цуглуулагчийг ашиглан гарган авсан баяжмал (Б) болон хаягдал (Х)-ын гарц, тэдгээрийн үнсний агуулгыг тодорхойлсон флотацын цуврал туршилтын дүнг 4-6-р хүснэгт болон 7-р зурагт харууллаа. Гурван өөр төрлийн цуглуулагчийн цуглуулах чадвар дараах дарааллаар илэрсэн: $1600 > SYS > 1100$, харин салгах чадвар нь үүний эсрэг хандлагатай байв.

4-р хүснэгт. Цуглуулагч 1600 ашигласан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	57.18	19.87	57.18	19.87	100.00	19.20
Х ₄	5.50	17.23	62.69	19.64	42.82	18.31
Х ₃	7.28	17.15	69.96	19.38	37.31	18.46
Х ₂	14.33	18.30	84.29	19.20	30.04	18.78
Х ₁	15.71	19.22	100.00	19.20	15.71	19.22
Нийлбэр	100.00	19.20				

Цуглуулагч 1600 ашигласан үед баяжмалын гарц 57.18% байгаа боловч үнс нь 19.87% байсан ба энэ нь флотацын явцад их хэмжээний хаягдал хөвж баяжмалтай хамт гарч ирснийг харуулж байна.

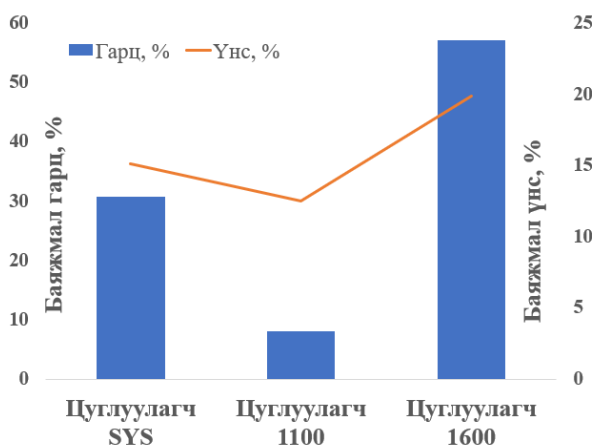
5-р хүснэгт. SYS цуглуулагч ашигласан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	30.69	15.14	30.69	15.14	100.00	18.57
X ₄	4.64	18.85	35.33	15.62	69.31	20.09
X ₃	2.64	22.58	37.97	16.11	64.67	20.17
X ₂	5.02	18.30	42.99	16.36	62.03	20.07
X ₁	57.01	20.23	100.00	18.57	57.01	20.23
Нийлбэр	100.00	18.57				

6-р хүснэгт. Цуглуулагч 1100 ашигласан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	8.12	12.48	8.12	12.48	100.00	18.84
X ₄	6.14	14.65	14.26	13.41	91.88	19.40
X ₃	5.48	17.89	19.75	14.66	85.74	19.74
X ₂	14.89	19.26	34.63	16.63	80.25	19.87
X ₁	65.37	20.01	100.00	18.84	65.37	20.01
Нийлбэр	100.00	18.84				

Цуглуулагч 1600 болон SYS ашигласан үед баяжмалын гарц нэлээд өндөр байгаа бөгөөд үүнийг өмнөх судалгаатай харьцуулахад гарцын хувьд харьцангуй их боловч, үнс бууруулахад хангалтгүй үр дүн гэж үзэж байна. Өмнөх судалгаанд цуглуулагчаар дизель болон ургамлын тос ашигласан бөгөөд эл тохиолдолд баяжмалын гарц бага төдийгүй баяжуулалт төдийлөн сайн явахгүй байсан үр дүн гарсан болно [6].



7-р зураг. Янз бүрийн цуглуулагч ашигласан флотацын судалгааны дүн

Цуглуулагч SYS ашиглахад баяжмал 30.69% гарцтай, 15.14% үнстэй байсан бол, эсрэгээрээ, цуглуулагч 1100 нь 8.12%-ийн гарцтай, үнсийг агууламж 12.48% буюу баяжмалын гарц хамгийн бага гарсан байна. Үнсийг бууруулах нь судалгааны үндсэн зорилт байсан тул дараагийн туршилтад цуглуулагч 1100-г сонгон авч ашиглав.

Нунтаглах хугацаа

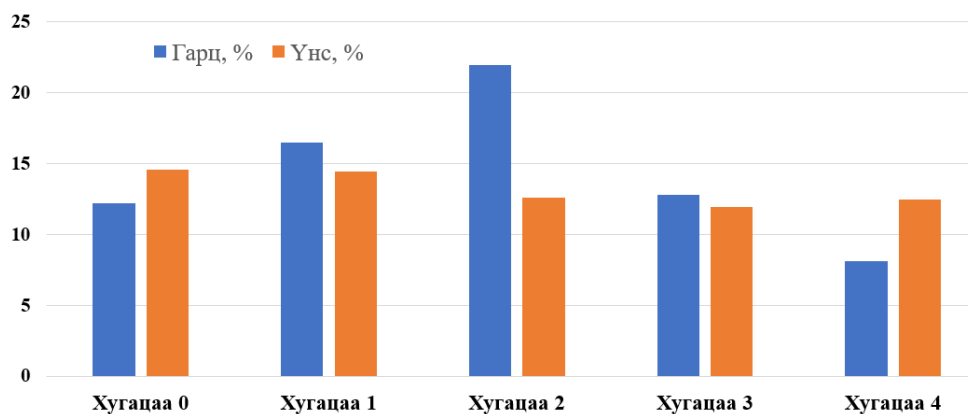
Дараагийн шатанд Багануурын нүүрсний флотацад дээжийн нунтаглах хугацааны нөлөөг судлав. Үүний тулд урвалжийн хэмжээг тогтмол байлгаж, нунтаглах хугацааг 0, 1, 2, 3, 4 минут болгон тохируулж, баяжуулалтын дүнг 7-р хүснэгт болон 8-р зурагт харууллаа.

7-р хүснэгт. Нунтаглах хугацааг 3 мин авсан үеийн флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	12.81	11.93	12.81	11.93	100.00	18.44
X ₄	3.50	16.54	16.31	12.92	87.19	19.40

X ₃	3.13	17.28	19.44	13.62	83.69	19.52
X ₂	7.16	15.68	26.60	14.18	80.56	19.60
X ₁	73.40	19.99	100.00	18.44	73.40	19.99
Нийлбэр	100.00	18.44				

Нунтаглах хугацаа уртсах тутам баяжмалын гарц аажмаар өсөж, харин хэт удаан нунтаглах үед буурсан байна.



8-р зураг. Нунтаглах хугацаанаас хамаарсан флотацын туршилтын дүн

Үүний шалтгааныг дараах байдлаар тайлбарлаж болно. Бага хугацаагаар нунтаглахад том ширхэгтэй хэсэг их үлдэж, нүүрс нь гидрофоб чанар муутай тул хөвөх чадвар муудна. Том ширхгүүдийн инерцийн хүч их тул флотацын үед хөөсөрхөг давхаргад наалдаж хөвөхөд бэрхшээлтэй. Нунтаглах хугацааг нэмэгдүүлэхэд том ширхгүүдийн эзлэх хувь буурч (гарц өсөхөд нөлөөлсөн), гэхдээ хэт нарийн ширхэглэлтэй болгоход, нүүрсний гадаргуугийн талбай нэмэгдэж, гидрофоб чанарт өөрчлөлт хийхэд илүү их цуглуулагч шаарддаг. Мөн хэт жижиглэснээр сонгомол чанар буурдаг ба учир нь нарийн ширхгүүд урсгалыг л дагах хандлагатай байдаг. Иймээс хамгийн сайн үр дүн 3 минут нунтаглах үед гарсан (12.81% гарц, 11.93% үнс) ба цаашдын туршилтад нунтаглах хугацааг 3 минут болгон тохируулав.

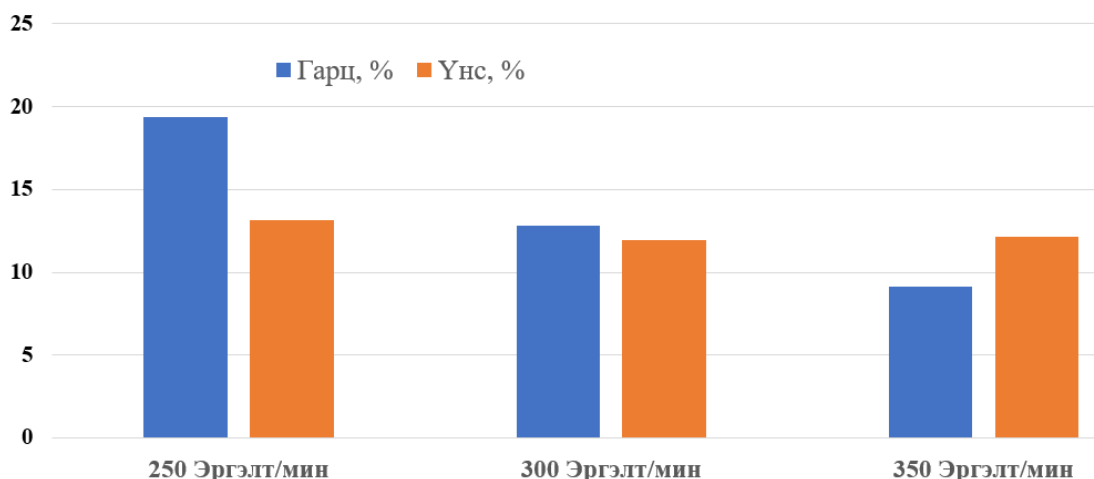
Нунтаглагчийн эргэлтийн хурд

Дараа нь Багануурын нүүрсний флотацад нунтаглагчийн эргэлтийн хурдны нөлөөг судлав. Нунтаглах төхөөрөмжийн эргэлтийн хурдыг 250, 300, 350 эргэлт/мин болгон тохируулж, урвалжийн тун болон нунтаглах хугацааг тогтмол байлгасан. Флотацын баяжуулалтын туршилтын дүнг 8-р хүснэгт болон 9-р зурагт харууллаа.

8-р хүснэгт. 300 эргэлт/мин үеийн флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	12.81	11.93	12.81	11.93	100.00	18.44
X ₄	3.50	16.54	16.31	12.92	87.19	19.40
X ₃	3.13	17.28	19.44	13.62	83.69	19.52
X ₂	7.16	15.68	26.60	14.18	80.56	19.60
X ₁	73.40	19.99	100.00	18.44	73.40	19.99
Нийлбэр	100.00	18.44				

Эргэлтийн хурд 250 эргэлт/мин үед, баяжмалын гарц харьцангуй өндөр гарсан хэдий ч, үнсний хэмжээ мөн өндөр байна.



9-р зураг. Эргэлтийн хурдаас хамаарсан флотацын туршилтын дүн

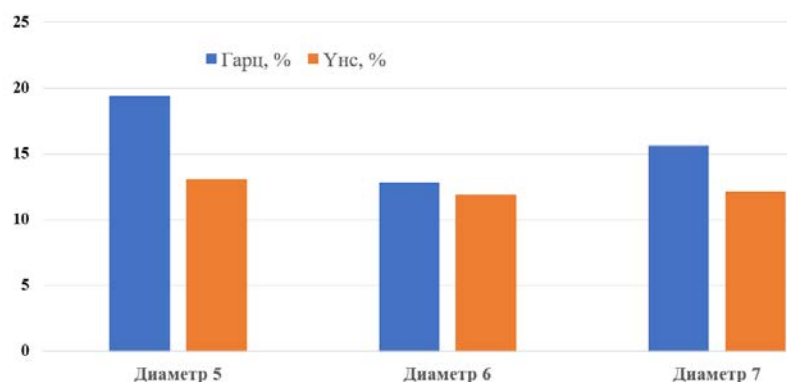
Харин эргэлтийн хурд 350 эргэлт/мин үед баяжмалын гарц 9.16% хүртэл буурч, харин үнс (12.12%) мөн л өндөр гарсан тул флотацын баяжуулалтын дараагийн туршилтад 300 эргэлт/мин-ийг сонгож авлаа.

Нунтаглагчийн бөмбөлгийн диаметр

Багануурын нүүрсний флотацад нунтаглагчийн бөмбөлгийн диаметрийн нөлөөг судлав. Үүний тулд урвалжийн хэмжээ, нунтаглах хугацаа (3 минут), эргэлтийн хурд (300 эргэлт/мин)-ыг тогтмол байлгаж, 5, 6, 7 мм-ийн керамик бөмбөлгүүд ашиглан туршилт явуулж, туршилтын дүнг 9-р хүснэгтэд үзүүлэв. 5 мм болон 7 мм-ийн керамик бөмбөлгөөр нунтаглахад баяжмалын гарц 6 мм-ээс өндөр байсан ч, үнсний агууламж 13%-иас дээш гарсан. Харин керамик бөмбөлгийн диаметр 6 мм үед хамгийн сайн үр дүн өгсөн байна. Нунтаглах нөхцөл өөрчилсөн нь туршилтын дүн тийм сайн байгаагүй тул, илүү бага үнстэй баяжмал гаргах боломжтой эсэхийг судлах зорилгоор урвалжийн хэмжээг нэмэгдүүлэн туршилтыг үргэлжлүүлэв.

9-р хүснэгт. Керамик бөмбөлгийн диаметр 6 мм байх үеийн флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	12.81	11.93	12.81	11.93	100.00	18.44
X ₄	3.50	16.54	16.31	12.92	87.19	19.40
X ₃	3.13	17.28	19.44	13.62	83.69	19.52
X ₂	7.16	15.68	26.60	14.18	80.56	19.60
X ₁	73.40	19.99	100.00	18.44	73.40	19.99
Нийлбэр	100.00	18.44				



10-р зураг. Нунтаглагчийн бөмбөлгийн диаметрээс хамаарсан флотацын туршилтын дүн

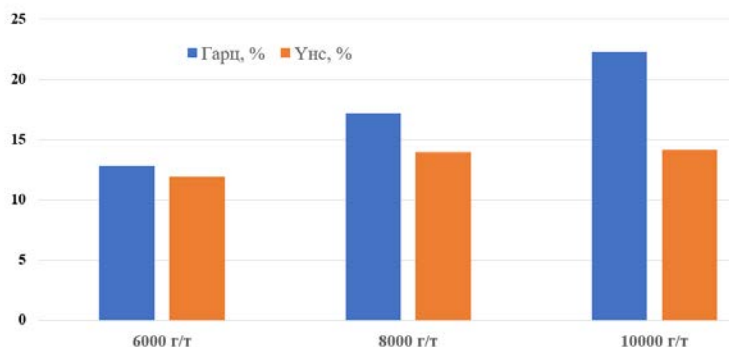
Цуглуулагчийн нөлөөлөл

Багануурын нүүрсний баяжуулалтад цуглуулагчийн тунгийн нөлөөг судлахын тулд хөөсрүүлэгчийн тунг тогтмол байлгаж, цуглуулагчийн тунг 6000, 8000, 10000 г/т болгон өөрчилж туршилтын дүнг 10-р хүснэгтэд үзүүлэв.

10-р хүснэгт. Цуглуулагч 1100-ийн хэмжээг 6000 г/т авсан үеийн флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	12.81	11.93	12.81	11.93	100.00	18.44
X ₄	3.50	16.54	16.31	12.92	87.19	19.40
X ₃	3.13	17.28	19.44	13.62	83.69	19.52
X ₂	7.16	15.68	26.60	14.18	80.56	19.60
X ₁	73.40	19.99	100.00	18.44	73.40	19.99
Нийлбэр	100.00	18.44				

Цуглуулагчийн тун нэмэгдэх тутам баяжмалын гарц аажмаар өссөн боловч баяжмалын үнс мөн дагаад өсөж байна. Гурав дахь цэвэрлэгээний шатанд хаягдлын үнс өндөр хэвээр байсан (эхний хоёр шаттай бараг адил), энэ нь хаягдал эрдсийн хөвөлт тогтвортой үргэлжилж байгааг, мөн цуглуулагчийн тун нэмэгдэх тутам энэ байдал улам дордож байгааг харуулж байна.



11-р зураг. Цуглуулагчийн тунг нэмэгдүүлсэн туршилтын дүн

Цуглуулагч 1100-ийн тунг нэмэгдүүлэх нь бага үнстэй хүрэн нүүрсийг үр дүнтэй хөвүүлэхэд хүргээгүй төдийгүй, хаягдлын хөвж гарах процессыг эрс нэмэгдүүлсэн. Мөн анхны салгалтын шатанд мэдэгдэхүйц нүүрсний алдагдал гарсан. Цуглуулагчийн тунг их хэмжээгээр нэмэгдүүлсэн ч тухайн фракц хөөсөнд наалдаж хөвөхгүй хэвээр байсан. Үүний шалтгаан нь түүхий нүүрс өргөн хүрээ бүхий ширхэглэлтэй байсан ба энэ хөвүүлэн баяжуулалтад төдийлөн таатай биш. Дээрх дүгнэлтүүдэд үндэслэн түүхий нүүрсний +0.25 мм фракцыг дараах нөхцөлөөр нунтаглав. Үүнд 6 мм бөмбөлгийн диаметр бүхий нунтаглагч ашиглан 300 эргэлт/мин хурдтайгаар 3 мин нунтаглан, -0.25 мм фракцтай хольж, цаашдын туршилтад ашиглав. Нөгөө талаас, нунтаглах болон хөвүүлэх явцад нүүрсний гадаргууд нарийн жижиг хэсгүүд наалдахыг бууруулахын тулд жижиг хэсгийг урьдчилан ялгах аргыг хэрэглэн өндөр үнстэй нарийн хэсгийг зайлуулж, үлдсэн нүүрсийг нунтаглах болон хөвүүлэн баяжуулах туршилтыг явуулав.

Шламгүйжүүлсэн туршилт

Шламгүйжүүлэх буюу жижиг хэсгийг ялгах туршилтад цуглуулагч 1100 болон SYS хоёрын тунгийн хэмжээг өөрчлөн туршилт явуулж, дүнг 11-р хүснэгтэд үзүүлэв. Цуглуулагч 1100 нь хөвүүлэх чадвар султайг урьдах дүн харуулсан ба түүний хэмжээг 4000 г/т-оос 6000 г/т хүртэл нэмэгдүүлэхэд баяжмалын гарц ердөө 3%-иар өссөн бөгөөд үнс өндөр хэвээр байна. SYS цуглуулагчийг (илүү өндөр хөвүүлэх чадвартай) ашиглахад баяжмалын гарц болон сонгомол чанар мэдэгдэхүйц сайжрав.

11-р хүснэгт. Янз бүрийн флотреагентын горимд шламгүйжүүлсэн дээжийн флотацын туршилтын дүн

Флотреагентууд	Тун, г/т	Баяжмал		Хаягдал	
		Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
1100+Sec-Octanol	4000+2000	32.30	17.38	67.70	19.46
1100+Sec-Octanol	6000+2000	35.06	17.43	64.94	19.91
SYS+Sec-Octanol	3000+2000	68.94	16.83	31.06	24.39
SYS+Sec-Octanol	4000+2000	72.53	16.10	27.47	25.57

SYS+Sec-Octanol	6000+2000	80.95	16.62	19.05	27.52
-----------------	-----------	-------	-------	-------	-------

SYS-ийг 4000 г/т тунгаар ашиглахад баяжмалын гарц 72.53%, үнс 16.10%, харин хаягдлын үнс 25.57% болж, үр дүнтэй флотац явагдсаныг харууллаа. Энэ хэмжээг шламгүйжүүлэх туршилтын нөхцөлөөр сонгож авсан болно. Цуглуулагч SYS-ийн хөвүүлэх чадвар болон цуглуулагч 1100-ийн сонгомол чанарыг тооцон, 2:1, 1:1, 1:2 жингийн харьцаагаар хольж туршилт явуулав. Цуглуулагч ба хөөсрүүлэгчийн тунг тус бүр 6000 г/т болон 2000 г/т-д тогтмол байлган, флотац явуулсан дүнг 12-14-р хүснэгтэд үзүүлсэн ба дүнгээс харахад SYS-ийн эзлэх хувь нэмэгдэх тутам баяжмалын гарц болон үнс хоёулаа өсөж байна.

12-р хүснэгт. Цуглуулагч SYS +1100 (2:1) ашигласан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	35.87	16.30	35.87	16.30	100.00	16.31
X ₅	8.60	15.29	44.47	16.11	64.13	16.32
X ₄	7.70	16.08	52.17	16.10	55.53	16.48
X ₃	10.72	12.13	62.89	15.42	47.83	16.54
X ₂	16.13	17.04	79.02	15.76	37.11	17.82
X ₁	20.98	18.42	100.00	16.31	20.98	18.42
Нийлбэр	100.00	16.31				

Өөрөөр хэлбэл, цуглуулагч 1100 -ийн агуулга нэмэгдсэнээр флотацын үр дүн сайжирч байв. Флотацаар 21.42%-ийн гарцтай, 14.50%-ийн үнстэй баяжмал гарган авсан нь хамгийн сайн үр дүн байсан ч ерөнхийлөө баяжуулалтын дүн хангалтгүй гарлаа гэж үзэж болно.

13-р хүснэгт. Цуглуулагч SYS +1100 (1:1) ашигласан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	22.46	16.56	22.46	16.56	100.00	15.98
X ₅	14.63	14.46	37.08	15.74	77.54	15.81
X ₄	12.90	14.99	49.98	15.54	62.92	16.12
X ₃	14.87	15.20	64.85	15.46	50.02	16.41
X ₂	20.00	16.42	84.85	15.69	35.15	16.92
X ₁	15.15	17.59	100.00	15.98	15.15	17.59
Нийлбэр	100.00	15.98				

Баяжуулалтын дүн хангалтгүй байсан нь нунтаглах явцад үүссэн нарийн ширхэглэлтэй хэсэгтэй холбоотой байж магадгүй.

14-р хүснэгт. Цуглуулагч SYS +1100 (1:2) ашигласан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	21.42	14.50	21.42	14.50	100.00	15.92
X ₅	13.29	15.44	34.70	14.86	78.58	16.31
X ₄	13.94	16.06	48.64	15.20	65.30	16.49
X ₃	14.44	15.61	63.08	15.29	51.36	16.61
X ₂	16.87	16.30	79.95	15.51	36.92	17.00
X ₁	20.05	17.59	100.00	15.92	20.05	17.59
Нийлбэр	100.00	15.92				

Иймээс дахин нунтаглалгүй, SYS+1100 (1:2) холимог урвалжийг сонгон туршив. Баяжуулалтын дүнгээс үзэхэд баяжмалын гарц 47.17%, үнс 14.78%-тай байгаа ба гарц мэдэгдэхүйц нэмэгдсэн боловч үнсний агуулга өндөр хэвээр байв. Хоёр цуглуулагчийг хольсноор хүлээгдэж байсан синергетик нөлөө гараагүй тул зөвхөн цуглуулагч 1100 ашиглан нунтаглаагүй дээж авч флотац явуулсан дүнг 16-р хүснэгтэд харуулав. Флотацын баяжуулалтын дүнгээс харахад холимог цуглуулагч ашигласан туршилтаас ч баяжмалын гарц илүү өндөр, үнс нь зөвхөн 12.62% байсныг харуулсан.

15-р хүснэгт. Цуглуулагч SYS + I100 (1:2) ашиглан нунтаглаагүй дээж авсан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Yield, %	Ash, %
Б	47.17	14.78	47.17	14.78	100.00	15.88
X ₅	10.19	15.62	57.36	14.93	52.83	16.87
X ₄	11.19	15.68	68.55	15.05	42.64	17.17
X ₃	11.38	16.99	79.94	15.33	31.45	17.70
X ₂	10.79	17.06	90.72	15.53	20.06	18.11
X ₁	9.28	19.33	100.00	15.88	9.28	19.33

Нийт баяжмалын гарцыг дараах байдлаар тооцсон: $54.49\% \times 72.53\% = 39.52\%$
Энэ нь шууд нунтаглах-хөвүүлэн баяжуулах аргаар авсан үр дүнгээс (гарц 12.81%, үнс 11.93%) давсан байна.

16-р хүснэгт. Цуглуулагч I100 ашиглан нунтаглаагүй дээж авсан флотацын цуврал туршилтын дүн

Бүтээгдэхүүн	Гарц, %	Үнс, %	Баяжмалын нийлбэр		Хаягдлын нийлбэр	
			Гарц, %	Үнс, %	Гарц, %	Үнс, %
Б	54.49	12.62	54.49	12.62	100.00	15.93
X ₅	4.01	16.61	58.50	12.89	45.51	19.91
X ₄	3.30	19.40	61.80	13.24	41.50	20.22
X ₃	6.31	19.01	68.11	13.77	38.20	20.30
X ₂	11.00	23.02	79.11	15.06	31.89	20.55
X ₁	20.89	19.25	100.00	15.93	20.89	19.25
Нийлбэр	100.00	15.93				

Дээрх туршилтаас харахад цуглуулагчийг холих нь дандаа үр дүнтэй байж чаддаггүй; зөвхөн тохирох ширхэглэлтэй нүүрсийг тохирсон цуглуулагчтай хослуулсан үед үр дүнтэй баяжуулалт явах боломжтойг тогтоов.

ДҮГНЭЛТ

- Багануурын нүүрсний шинжилгээний дүнгээс харахад нүүрсэнд шаварлаг эрдэс болон пирит нарийн тархсан, шаварлаг эрдсийн ширхэглэл $\approx 10\text{--}20$ мкм, пиритийнх түүнээс хамаагүй бага байна. Багануурын нүүрсний эрдсийн тархалт нягт, их хэмжээний пирит органик бодист жигд тархсан харагдаж байна.
- Багануурын нүүрсний флотацаар цуглуулагч I100-г ашиглан 12.81%-ийн гарцтай, 11.93%-ийн үнстэй баяжмал гарган авсныг хамгийн сайн үр дүн гэж үзлээ. Флотацын үед эрдсийн ширхгүүд нүүрсийг бүрхэх болон баяжмалтай хамт хөвөн гарч ирэх, том ширхэгтэй нүүрсийг хөвүүлэхэд хүндрэлтэй байгаагаас хамааран флотацын үр дүн тааруу явж байна гэж үзлээ. Иймээс 25.57%-ийн үнстэй, 27.47%-ийг эзэлж байгаа жижиг хэсгийг зайлуулснаар, 39.52% гарцтай, 12.62%-ийн үнстэй баяжмал гарган авлаа.
- Хүрэн нүүрс нь хүчтэй гидрофил чанартай, хөвөх чадвар муу, эрдсүүд нь мөн гидрофил шинжтэй тул хоорондын гидрофоб шинжийн ялгаа хангалтгүй, органик ба органик биш эрдсийн харьцаа маш нарийн, жижиг ширхэгтэй, өргөн тархалттай тул салгахад маш хүнд байв. Бүрэн салгахын тулд нарийн нунтаглах шаардлагатай боловч хэт нарийн нунтаглах нь сонгомол чанарыг бууруулдаг тул хүрэн нүүрсний флотацаар төдийлөн сайн үр дүнд хүрэхэд бэрхшээлтэй байлаа.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажил нь Монгол улсын Эдийн засаг, хөгжлийн яам ба БНХАУ-ын Шинжлэх ухаан, технологийн яамны хамтарсан санхүүжилт бүхий CHN -2023/70 дугаар бүхий төслийн хүрээнд хийгдсэн болно.

АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ (REFERENCES)

- [1] V. Vijayaraghavan, E. V. Lau, Ankit Goyal, Xiaodong Niu, A. Garg, L. Gao, Design of explicit models for predicting the efficiency of heavy oil-sand detachment process by floatation technology, Measurement 137 (2019) 122-19. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.074>
- [2] D. Tao, Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles-a review, Separ. Sci. Technol. 39 (4) (2004) 741-760. <https://doi.org/10.1081/SS-120028444>

- [3] W. Xia, C. Ni, G. Xie, Effective flotation of lignite using a mixture of dodecane and 4 dodecylphenol (DDP) as a collector, *Coal Prep.* 36 (5) (2015) 262-271. <https://doi.org/10.1080/19392699.2015.1113956>
- [4] R. Jia, G.H. Harris, D.W. Fuerstenau, An improved class of universal collectors for the flotation of oxidized and/or low-rank coal, *Int. J. Miner. Process.* 58 (1) (2000) 99-118. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00024-1)
- [5] W.C. Xia, J. Yang, C. Liang, B. Zhu, The effects of conditioning time on the flotation of oxidized coal, *Energy Sources* 36 (1) (2014) 31-37. <https://doi.org/10.1080/15567036.2012.697095>
- [6] Намхайноров, Ж., Мөнхцэцэг, Б., Шийрав, Г., Яаовэн Шинг, Пүрэвсүрэн, Б., Авид, Б., Навчцэцэг, Н, Багануур ба Шивээ-Овоогийн нүүрсний баяжуулалтад үзүүлэх цуглуулагчийн нөлөөлөл, *Химийн нийгэмлэгийн бүтээл*, 2024, 19, 59-71.
- [7] T. Grzybek, R. Pietrzak, H. Wachowska, X-ray photoelectron spectroscopy study of oxidized coals with different sulphur content, *Fuel Process. Technol.* 77 (1) (2002) 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00058-9)
- [8] T. Grzybek, R. Pietrzak, H. Wachowska, The influence of oxidation with air in comparison to oxygen in sodium carbonate solution on the surface composition of coals of different ranks, *Fuel* 85 (7) (2006) 1016-1023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.017>
- [9] G. Ateşok, M.S. Çelik, A new flotation scheme for a difficult-to-float coal using pitch additive in dry grinding, *Fuel* 79 (12) (2000) 1509-1513. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00012-0)
- [10] Huang, G., Xu, J., Geng, P., Li, J. Carrier Flotation of Low-Rank Coal with Polystyrene. *Minerals* 2020, 10, 452. <https://doi.org/10.3390/min10050452>
- [11] Yang, A., Liao, Y., An, M., Cao, Y., Yang, Z., Ren, H., Su, H., Zou, Q., Chen, L. Effect of Ultrasonic Pretreatment on Flocculation Filtration of Low-Rank Coal Slurry. *Molecules* 2022, 27, 6460. <https://doi.org/10.3390/molecules27196460>
- [12] Zhang, Q., Niu, C., Bu, X., Bilal, M., Ni, C., Peng, Y. Enhancement of Flotation Performance of Oxidized Coal by the Mixture of Laurylamine Dipropylene Diamine and Kerosene. *Minerals* 2021, 11, 1271. <https://doi.org/10.3390/min11111271>
- [13] Han, H., Liu, A., Wang, H. Effect of Hydrodynamic Cavitation Assistance on Different Stages of Coal Flotation. *Minerals* 2020, 10, 221. <https://doi.org/10.3390/min10030221>
- [14] Liao, Y., Song, X., An, M., Yang, Z., Hao, X., Ren, H. Effect of Dodecane-Oleic Acid Collector Mixture on the Evolution of Wetting Film between Air Bubble and Low-Rank Coal. *Minerals* 2021, 11, 58. <https://doi.org/10.3390/min11010058>
- [15] Yao, N., Liu, J., Sun, X., Liu, Y., Chen, S. Wang, G. A Rational Interpretation of the Role of Turbulence in Particle-Bubble Interactions. *Minerals* 2021, 11, 1006. <https://doi.org/10.3390/min11091006>
- [16] Zhang, H., Xi, P., Zhuo, Q., Liu, W. Construction of Molecular Model and Adsorption of Collectors on Bulianta Coal. *Molecules* 2020, 25, 4030. <https://doi.org/10.3390/molecules25174030>
- [17] Xing, Y., Xu, M., Gui, X., Cao, Y., Babel, B., Rudolph, M., Weber, S., Kappl, M., Butt, H.-J. The application of atomic force microscopy in mineral flotation. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2018, 256, 373-392. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.01.004>
- [18] Zeng, W., Zhang, G., Shi, Q., Ou, L. Effects and Mechanism of Fe³⁺ on Flotation Separation of Feldspar and Epidote with Sodium Oleate at Natural pH. *Separations* 2022, 9, 110. <https://doi.org/10.3390/separations9050110>
- [19] Wu, D., Wang, M., Zeng, J., Yao, J., Jia, C., Zhang, H., Li, J. Preparation and Characterization of Graphene from Refined Benzene Extracted from Low-Rank Coal: Based on the CVD Technology. *Molecules* 2021, 26, 1900. <https://doi.org/10.3390/molecules26071900>
- [20] Chang, Z., Chen, X., Peng, Y. The interaction between diesel and surfactant Triton X-100 and their adsorption on coal surfaces with different degrees of oxidation. *Powder Technol.* 2019, 342, 840-847. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.047>
- [21] Wang, Y., Zhou, Y., He, Q., Xing, Y., Bao, X., Gui, X., Wang, L. Research on Mechanisms of Improving Flotation Selectivity of Coal Slime by Adding Sodium Polyphosphate. *Minerals* 2022, 12, 1392. <https://doi.org/10.3390/min12111392>
- [22] Zhu, C., Xing, Y., Xia, Y., Wang, Y., Li, G., Gui, X. Flotation intensification of low-rank coal using a new compound collector. *Powder Technol.* 2020, 370, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.027>
- [23] Zhou, W., Wang, S., Wang, L., Cai, C., Li, J., Liu, L., Zhu, J., Min, F. Study on Dispersion and Mixing Mechanism of Coal Slime Particles in Jet Mixing Flow Field. *Minerals* 2023, 13, 13. <https://doi.org/10.3390/min13010013>
- [24] Xia, Y., Fang, D., Qu, P., Li, Y. Interfacial Adhesion between Fatty Acid Collectors and Hydrophilic Surfaces: Implications for Low-Rank Coal Flotation. *Molecules* 2022, 27, 4392. <https://doi.org/10.3390/molecules27144392>
- [25] Hu, X., Tong, Z., Sha, J., Bilal, M., Sun, Y., Gu, R., Ni, C., Li, C., Deng, Y. Effects of Flotation Reagents on Flotation Kinetics of Aphanitic (Microcrystalline) Graphite. *Separations* 2022, 9, 416.

<https://doi.org/10.3390/separations9120416>

[26] Zhang, L., Sun, X., Li, B., Xie, Z., Guo, J., Liu, S. Experimental and molecular dynamics simulation study on the enhancement of low rank coal flotation by mixed collector. *Fuel* 2020, 266, 117046. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117046>

[27] Bao, X., Xing, Y., Liu, Q., Liu, J., Dai, S., Gui, X., Li, J., Yang, Z. Investigation on mechanism of the oleic acid/methyl oleate/diesel ternary compound collector in low-rank coal flotation. *Fuel* 2022, 320, 123894. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123894>

[28] Liao, Y., Yang, Z., An, M., Ma, L., Yang, A., Cao, Y., Chen, L., Ren, H. Alkanes-esters mixed collector enhanced low rank coal flotation: Interfacial interaction between oil drop and coal particle. *Fuel* 2022, 321, 124045. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124045>

[29] Xue, Z., Dong, L., Li, H., Fan, M., Ren, Z., Liu, A., Fan, P., Bao, W. Study on the mechanism of flotation of coal gasification fine slag reinforced with naphthenic acids. *Fuel* 2022, 324, 124557. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124557>

[30] Li, Y., Zhang, D., Zhang, Z., Molecular dynamics simulation of fatty acid collectors with different carbon chain lengths on the surface of low-rank coal. *Chem Phys Lett*, 2022, 806, 140068. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.140068>

[31] Wen, B., Xia, W., Sokolovic, J.M., Recent advances in effective collectors for enhancing the flotation of low rank/oxidized coals. *Powder Technol.*, 2017, 319, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.030>

[32] Vilas'o-Cadre, J.E., Avila-M'arquez, D.M., Reyes-Domínguez, I.A., Blanco-Flores, A., Guti'erreza-Castañeda, E.J., Coal flotation in a low-rank carbonaceous mineral using 3- phenyl-1-propanol as a collector reagent, *Fuel*, 2021, 304, 121363. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121363>

[33] Tian, Q., Zhang, Y., Li, G., Wang, Y., Application of Carboxylic Acid in Low-Rank Coal Flotation. *Int J Coal Prep Util.*, 2019, 39(1), 44-53. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1297299>

[34] Xia, Y., Zhang, R., Xing, Y., Gui, X., Improving the adsorption of oily collector on the surface of low-rank coal during flotation using a cationic surfactant: An experimental and molecular dynamics simulation study. *Fuel* 2019, 235, 687-95. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.059>

[35] Jia, R., Harris, G.H., Fuerstenau, D.W., An improved class of universal collectors for the flotation of oxidized and/or low-rank coal. *Int J Miner Process.*, 2000, 58(1), 99-118. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00024-1)

[36] Xia, Y., Xing, Y., Gui, X., Cao, Y., Interaction between hydrocarbon oil and hydrophilic mineral surfaces: A chemical force microscopy and molecular dynamics simulation study, *Fuel*, 2022, 323, 124402. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124402>

Study on the Flotation Beneficiation of Baganuur Lignite

Byambaa Munkhtsetseg¹, Yunchang Li², Damdindorj Mungunnaran¹, Gandandorj Shiirav¹, Barnasan Purevsuren¹, Yaowen Xing², Budeebazar Avid^{1*}

¹Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

²China University of Mining and Technology, Xuzhou, China

*avid@mas.ac.mn

Abstract. Baganuur lignite has high ash and moisture contents, making long-distance transportation uneconomical and limiting its export potential. Therefore, beneficiation is required to improve its quality and utilization value. Research on lignite beneficiation in Mongolia remains relatively limited. Furthermore, lignite is generally considered difficult to upgrade by flotation because of its high oxygen-containing functional groups and inherently hydrophilic surface. Therefore, this study investigated the mineralogical characteristics, mineral distribution, and flotation beneficiation of Baganuur lignite.

The results showed that clay minerals and pyrite were finely and uniformly disseminated throughout the coal matrix. Among the flotation tests, the best result was obtained using Collector 1100, producing a clean coal with a yield of 12.81% and an ash content of 11.93%. However, the overall flotation performance remained relatively poor because fine mineral particles coated the coal surface, gangue minerals were readily entrained into the concentrate, and coarse coal particles were difficult to float. Following a pre-desliming treatment, the flotation performance was significantly improved, producing a clean coal with a yield of 39.52% and an ash content of 12.62%.

The study demonstrated that Baganuur lignite possesses an inherently hydrophilic surface and poor floatability. In addition, the organic matter and inorganic minerals are finely and uniformly distributed, making their separation particularly challenging. The results further indicate that the flotation performance of lignite is strongly influenced by particle size distribution, surface hydrophobicity and hydrophilicity, particle–bubble and particle–particle interactions, as well as the electrokinetic properties of the coal surface. These findings provide a mechanistic basis for understanding the flotation behavior of low-rank coals and for developing more effective beneficiation strategies for Baganuur lignite.

Keywords: lignites, flotation, collector, clean coal, tailings

© Author (s), 2025



Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as 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. The images or other third-party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>