



**Зэсийн агуулга багатай полиметаллын баяжмалаас зэс ялган авах
туршилтын үр дүн**

Бямба-Очир Нарандалай, Бямбасүрэн Хулан, Түмэн-Өлзий Нарангарав, Пүрэвсүрэн Саранцэцэг, Эрдэнэбат
Өлзийбадрах, Гарнаад Ариунаа, Сүрэнжав Энхтуул, Батнасан Алтансүх, Ширчиннамжил Нямдэлгэр*

*Чухал металлын хими технологийн лаборатори, Хими, химийн технологийн хүрээлэн, Шинжлэх ухааны академи,
Улаанбаатар 13260, Монгол улс*

*E-mail: nyamdelger_sh@mas.ac.mn
ORCID: [0000-0003-1242-7776](https://orcid.org/0000-0003-1242-7776)

Хүлээн авсан: 11.11.2025

Хяналтад: 14.11.2025

Хэвлэлтэд авсан: 11.12.2025

Хураангуй: Зэсийн бага агуулгатай полиметаллын баяжмалыг нам температурт исэлдүүлэн шатааж, үүссэн зэсийн нэгдлийг ус болон хүхрийн хүчлийн уусмалд уусгаад электролизын аргаар өндөр цэвэршилттэй металл зэс (Cu^0) ялгах судалгаа хийв. Ус болон хүчлийн уусмалд ууссан зэс (Cu^{2+})-ийг органик урвалжаар хандлан, зэсийг хольц элементүүдээс салгаж, зэсийн концентрац ихтэй буюу 2764 мг/л хүртэлх концентрацтай электролит уусмалууд (CuSO_4)-ыг бэлтгэсэн. Электролизын туршилтыг зэс (Cu^{2+})-ийн агуулга, хугацаа, гүйдлийн нягтаас хамааруулан судлав. Зэс (Cu^{2+})-ийн электролит уусмалуудын цахилгаан химийн шинж чанарыг гурван электродтой цикловольтаметр багажаар тодорхойлоход катодын пикийн оргил цэг -0.3 В хүрч, уусмал дахь зэсийн ионуудын концентрац бууран, катодын гадаргуу дээр метал зэс хуримтлагдаж байсан. Зэсийн сульфатын уусмалаас катодын зэс ялган авах туршилтын гүйдлийн нягт 0.03 А/см² үед металл зэсийн ялгаралт 70.4 %, зэсийн катод дээр суух хурд 30.5 см/с, цэвэршилт 99.8 %-д хүрсэн. Ялган авсан катодын зэсийн шинж чанарыг рентгендифракц, электрон микроскоп, индукцийн холбоост плазмын спектроскопын болон химийн шинжилгээний аргуудаар тодорхойлов.

Түлхүүр үг: *цикловольтаметр, зэс авалт, цэвэршилт, зэс суух хурд, гүйдлийн нягт*

ОРШИЛ

Зэсийн хүдэр дэх зэсийн агуулга бууралтаас үүдэлтэй зэсийн хомсдол, уламжлалт ба орчин үеийн техник технологийн эрчимтэй хөгжлийг даган, аж үйлдвэрийн машин механизм, цахилгааны утас, нарны зай, цахилгаан машин зэрэг сэргээгдэх эрчим хүчний технологи [1]-той холбоотойгоор металл зэсийн эрэлт нэмэгдсээр байна. Энэ асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд зэсийн агуулга багатай хүдрээс зэсийг цэвэршүүлэн ялган авах технологийг хөгжүүлэх зорилго бүхий нэлээд судалгаа хийгдсэн байдаг [3-6]. Хамгийн гол нь зэсийн бага агуулгатай хүдэрт сурьма, хар тугалга, цайр, хүнцэл, мөнгөн ус, никель зэрэг хольц элементүүд агуулагдаж байдаг. Эдгээр хортой хольц элементүүд нь хүдрийг боловсруулах, зэсийг ялгаж авах технологийн процесст ноцтой хүндрэл учруулдаг [2, 7].

Зэсийн дийлэнх хувийг хөвүүлэн баяжуулалт, гидрометаллургийн арга, хайлуулалт, электролизын аргаар баяжуулан цэвэршүүлж үйлдвэрлэж байна [8]. Ялангуяа уусмалаас органик хандлагчаар ялган авах, электролизын аргаар баяжуулах (SX-EW) процессууд нь зэс, уран, ванади, газрын ховор элемент зэрэг чухал металлыг ялгаж авах ач холбогдол ихтэй арга болж байна [1, 11, 12].

Полиметаллын хүдрээс зэсийг сонгомлоор ялган авахын тулд янз бүрийн арга, ялангуяа хорт болон

дагалдах элементүүдийг зайлуулах шүлтийн уусгалт, усаар уусгах ба хүчлээр уусгах зэрэг гидрометаллургийн аргуудыг ашиглан полисульфидын эрдсийн талст бүтцийг эвдэх урьдчилсан боловсруулалтын процессуудыг явуулах нь онцгой ач холбогдолтой байдаг [13 -17]. Ялангуяа кетоксим ба альдоксимуудын холимог нь хандлах чадвар өндөртэй [17], кинетик хурд сайн [18], сонгомол чанар сайтай [19] зэргээс шалтгаалан хандлагчаар ашиглагддаг байна. Эдгээр урвалжууд нь зэсийг анх тооцоолж байснаас илүү хялбар хандлан ялгаж авдаг [20].

Үндсэн органик хандлагч, хандлагч уусмалын төрөл болон хандлагчийн концентрац, уусмал дахь зэсийн анхны концентрац, уусгалтын орчин (рН), органик хандлагч-усан фазын харьцаа зэрэг хүчин зүйлээс хамааран үр дүн нь харилцан адилгүй байдаг учраас зэсийн хандлалтын зэргийг 51-100%-д хүргэх талаар нэлээд олон судлаачид анхаарал хандуулан ажилласан байдаг.

Эдгээр судалгааны ажлуудад зэсийг ялган авах, боловсруулах явцад төмөр, никель, хүнцэл, висмут зэрэг хольцын нөлөөллийг бууруулсан байна [5, 6, 21, 22, 23]. Электролит уусмал бэлтгэхийн тулд харьцангуй бага өртөгтэй, тасалгааны температурт уусгах буюу ялган авах чадвартай хүхрийн хүчлийг олон судалгаанд эргүүлэн хандлагчаар сонгон

ашигласан байдаг. Зэсийг органик фазаас салгахад хүхрийн хүчлийг эргүүлэн хандлагч урвалжаар өргөн хэрэглэдэг [5, 6, 24]. Эргүүлэн хандлагч урвалжаар 15%-ийн H_2SO_4 -ийг ашиглахад 25.1 г/л зэс (II) агуулсан баян усан уусмал хандлагдаж байсан (Devi and Nayak, 2014/ Дэви, Наяк, 2014).

Suontako нар зэсээр баяжсан органик фазаас хүхрийн хүчил ашиглан 38 г/л зэс (II) агуулсан усан уусмал хандлан авсан бөгөөд уусмалын концентрац нь электролиз явуулахад тохиромжтой байсан [24].

Зарим судлаачид [25, 26, 27, 28] гидрометаллургийн дээр дурдагдсан аргууд нь байгальд ээлтэйгээр хүнцэл, сурьма, төмөр зэрэг бусад хорт металлыг ялган авах сонгомол шинж чанартай гэж тодорхойлсон байдаг. Эдгээр аргуудын хүхэрлэг хий (SO_2) ялгаруулдаггүй [2], полиметаллын баяжмалаас зэсийг бүрэн ялгаж авах боловсруулалтын явцад эрчим хүч бага зарцуулдаг зэрэг давуу талууд нь хүрээлэн буй орчинд хор хөнөөлгүй, хорт хаягдалгүй, хор хөнөөл хамгийн багатай үйлдвэрлэлийг чухалчилдаг дэлхийн эдийн засаг, байгаль орчны хандлагад нийцдэг. Түүнчлэн, SX-EW процессоор үйлдвэрлэсэн зэс нь висмут, селен, хүнцэл, сурьма зэрэг хольцын агууламж багатай тул харьцангуй өндөр чанарыг үзүүлдэг.

Электролизоор ялгах арга нь 99%-ийн цэвэршилттэй катодын зэс гаргаж авдаг болохыг харуулсан. Үүссэн зэсийн бүтэц нь эцсийн бүтээгдэхүүн болох катодын зэс (Cu^0)-ийн талст бүтэц, гадаргуугийн шинж чанарт нөлөөлж болох гүйдлийн нягт ба электролизын бусад параметрууд зэрэг цахилгаан химийн янз бүрийн хүчин зүйлээс хамаардаг. Цаашилбал, цахилгаан химийн арга техник нь өндөр цэвэршилттэй катодын зэс үйлдвэрлэхэд илүү үр дүнтэй байдаг [24].

Монгол Улс зэсийн нөөцөөрөө дэлхийд 12-т ордог ч өндөр агуулгатай зэсийн хүдэр хязгаарлагдмал байдаг. Манай улсын экспортын чухал бүтээгдэхүүний нэг бол зэсийн баяжмал [9]. Үүний зэрэгцээ, зэс үйлдвэрлэлийн дэвшилтэт технологи байхгүй учраас Монголд зэсийн бага агуулгатай полиметаллын томоохон ордууд судлагдаагүй хэвээр байна. Уламжлалт пирометаллургийн аргуудыг ашиглан полиметаллын хүдрээс зэс олборлох нь хүрээлэн буй орчинд ихээхэн сөрөг нөлөө үзүүлэхээс гадна ихээхэн хэмжээний эрчим хүч шаарддаг [10]. Иймд Монголд зэсийн бага агуулгатай полиметаллын хүдрийг боловсруулж, цэвэр зэс гаргаж авах, хэрэгжих боломжтой технологийг судлах нь нэн чухал юм.

Полиметаллын хүдрийн хөвүүлэн баяжуулалтын бүтээгдэхүүн 18.2%-ийн зэсийн агуулгатай полиметаллын баяжмалыг [13] исэлдүүлэн шатааж, ус болон хүчилд уусган, зэсийг ялгасан уусмалаас электролизоор цэвэршилт өндөртэй катодын зэс гаргаж авах технологийн судалгаа хийхийг зорьсон. Уусгах, хандлах аргыг ашиглан хүнцэл, висмут

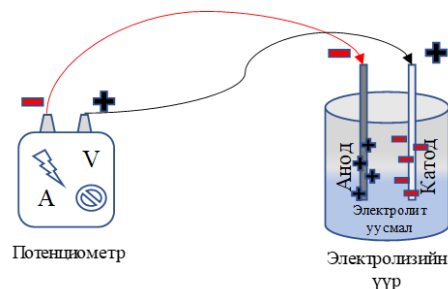
зэрэг хольц элементүүдээс цэвэрлэсний дараа зэсийг органик хандлагчаар хандлан, органик фазад оруулан ялгаж авсан. Дараа нь органик фазаас зэсийг хүхрийн хүчлийн уусмалаар эргүүлэн хандлах аргаар зэсийн концентрацыг 411-2760 мг/л хүртэл баяжуулсан зэсийн сульфатын уусмал бэлтгэсэн. Үүний дараа зэсийн сульфатын уусмалаас электролизын аргаар өндөр цэвэршилттэй зэс ялган авах хамгийн тохиромжтой нөхцөлийг тодорхойлсон.

Энэхүү судалгаа нь зэсийн агуулга багатай полиметаллын хүдрээс зэсийг бүрэн ялгаж авахтай холбоотой тулгамдсан асуудлуудын талаар чухал ойлголтыг өгч, зэсийн агуулгыг баяжуулан үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломж олоход чиглэсэн болно.

СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

Материал: Өмнөх судалгаагаар тус лабораторид гарган авсан зэсийн агуулга багатай, полиметаллын баяжмалыг шүлт-сульфидын холимог уусмалаар уусган бохирдуулагч хольц элементүүд (Sb, As, Bi)-ээс салган цэвэрлэхэд үүссэн зэсийн техноген баяжмал [13]-ыг агаарын оролцоотой шатааж, үүссэн зэсийн нэгдлийг ус болон хүхрийн хүчлийн уусмалд уусгаад цааш сонгомол органик хандлагч урвалж (German BASF Corporation-д үйлдвэрлэсэн химийн цэвэр LIX984N)-аар хандалж, зэсийг органик фазад оруулан ялгасны дараа органик фазаас зэс (II)-ийг хүхрийн хүчлийн уусмалаар эргүүлэн хандалж, зэсээр баян зэсийн сульфат ($CuSO_4$)-ын өөр өөр концентрацтай усан уусмалыг туршилтад электролит уусмалаар ашигласан.

Электролизын төхөөрөмж: Электролизын туршилтыг анод, катод бүхий 500 мл эзлэхүүнтэй, хүхрийн хүчилд тэсвэртэй электролизын шилэн үүрэнд гүйцэтгэсэн. Электролизын үүрэнд гарган авсан зэсийн сульфатын электролит уусмалаас хийн, дээрээс нь хасах цэнэгтэй анод ба нэмэх цэнэгтэй катод электродыг дүрэн, гүйдлийн эх үүсвэрийг тогтмол цахилгаан гүйдлийн тэжээлийн потенциостатометр (MS-305DS маркийн Maisheng DC цахилгаан хангамж бүхий төхөөрөмж)-ийн тусламжтайгаар өгч потенциостатик нөхцөлд электролизын туршилтыг гүйцэтгэсэн. Туршилтын төхөөрөмжийн бүдүүвч зургийг *Зураг 1*-т үзүүлэв.



Зураг 1. Электролизын туршилтын төхөөрөмжийн бүдүүвч

Электролизын үүрийн анодоор графитан саваа (≥ 1.78 г/см³ нягттай, ≤ 14 $\mu\Omega\cdot\text{m}$ хувийн эсэргүүцэлтэй, шахалтын бат бөх ≥ 60 МПа)-г, 3.25x062x1135 мм хэмжээтэй зэвэрдэггүй ган диск (SUS 316L)-ийг катодоор тус тус ашиглав.

Дээж бэлтгэл: Полиметаллын хүдрээс хөвүүлэн баяжуулах аргаар 18.2% зэс, 19.4% сурьма, 0.91% мөнгө, 2.03% хүнцэл, 1.6% висмут болон дагалдах элементүүд агуулсан полисульфидын баяжмал гарган авсан [13]. Баяжмалд үндсэн эрдсүүд болох тетраэдрит, висмутинит, халькопирит, арсенипирит, пирит ба хүдрийн бус эрдсүүд, жишээлбэл, сидерит, мусковит, кварц агуулагдаж байв [13].

Полиметаллын баяжмалыг шүлт-сульфидын холимог уусмал (140 г/л Na₂S; 60 г/л NaOH)-д уусган сурьма (Sb), хүнцэл (As), висмут (Bi)-ийг салгасан. Энэ уусгалтын үр дүнд Sb, As ба Bi -ийн салгалт/уусалтын зэрэг 99.25%, 89.0%, ба 44.5% тус тус байсан [13, 25].

Шүлт-сульфидын холимог уусгасны дараах хатуу үлдэгдэл буюу техноген баяжмал нь 33.45% Cu, 4.14% Fe, 0.73% Ag, ба 23.87% S агуулж байсан. Халькопирит (CuFeS₂), ковеллин (CuS), халькозин (Cu₂S), пирит (FeS) болон аргентит (Ag₂S)-ийн эрдсүүд хатуу үлдэгдэлд зонхилж байв. Техноген баяжмалыг 400°C-т 180 минутын турш агаарын оролцоотой шатаасан. Дээрх дээж бэлтгэлийг тус лабораторид гүйцэтгэсэн бөгөөд туршилт, судалгааны үр дүнг өмнөх өгүүлэлд тодорхой дурдсан болно [13].

Хандлалт: Өмнөх судалгаагаар гарган авсан техноген баяжмалыг агаарын оролцоотой шатаасны дараагаар дээж дэх зэс (II)-ийн нэгдлийг ус (H₂O) болон 1.6 М хүхрийн хүчлийн уусмал (H₂SO₄)-д уусгаж, органик хандлагч урвалж (LIX-984N) ашиглан зэсийг хандлан авсан [14]. Үйлдвэрийн цэвэр LIX984N ба шингэрүүлэгч (керосин)-ийг 1:9 эзлэхүүний харьцаагаар хольж, органик хандлагчийг бэлтгэсэн.

Ус болон хүхрийн хүчлээр зэсийг уусган авсан уусмалын pH-ийг 1:1 М H₂SO₄-ээр тохируулсны дараа усан фаз болон бэлтгэсэн органик фазыг 1:1 эзлэхүүний харьцаагаар ялгагч юүлүүрт хольж, 253.2 эрг/мин хурдтайгаар 2.5 минут сэгсэрсний дараа органик болон усан фазыг салгана. Органик фаз руу ачаалагдсан зэсийн хэмжээг индукцийн холбоост плазмын спектрометр (ICP-OES)-ийн багажаар тодорхойлон хандлалтын өмнөх ба дараах усан фаз дахь зэсийн агуулга (R_{ex})-ын зөрүүгээр тооцсон (Тэгш.1).

Тооцооллыг дараах математик тэгшитгэлээр тооцов:

$$R_{ex}, \% = \frac{C_0 - C_a}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

Үүнд:

C_0 - органик фаз дахь зэсийн агуулга, г/л.

C_a - усан фаз дахь зэсийн агуулга, г/л.

Эргүүлэн хандлалт: Зэсээр баян (ус ба H₂SO₄) уусмалуудыг органик хандлагчаар хандлан зэс (II)-ийг органик фазад шилжүүлсний дараа органик фазыг 1.5 М H₂SO₄ ба 3.0 М H₂SO₄-ээр угаан зэс (II)-ийг эргүүлэн сульфатын хэлбэрт шилжүүлнэ. Эргүүлэн хандлах туршилтын хатуу-шингэний харьцааг 1:25-1:75 байхаар өөрчлөн 25-70°C температурт 30-120 минутын турш 100-500 эрг/мин хугталтын хурдтайгаар гүйцэтгэж, зэсийн хандлалтын зэрэг хамгийн их утгад хүрэх оптималь нөхцөлийг тодорхойлсон [14].

Электролизын туршилт: Электролизын процессыг усан электролит уусмалын эзлэхүүн 50 мл ба электролит уусмалын анхны pH ~ 1.8 байх үед гүйдлийн нягтыг 0.005-0.07 А/см² хүртэл өөрчлөлттэйгөөр 10-360 минутын хугацаанд тасалгааны температурт хувьсах гүйдэлд гүйцэтгэсэн.

Электролизын дараа электролит уусмалд үлдсэн зэсийн концентрацийг индукцийн холбоост оптик шингээлтийн спектроскоп (ICP-OES, Thermo Scientific, iCAP 7000 Series)-ийн аргаар тодорхойлсон. Электролизын зэс авалтыг дараах тэгшитгэлээр (2) тооцов.

$$R, Cu\% = \frac{(C_0 - C) \times 100}{C_0} \quad (2)$$

Үүнд:

R - зэс (Cu%) авалт хувиар (%)

C_0 - электролит уусмал дахь зэсийн анхны концентрац (г/л)

C - t (сек)- хугацааны дараах электролит уусмал дахь зэсийн концентрац (г/л)

Гүйдлийн үр ашиг (CE)-ийг дараах тэгшитгэл (3)-ээр тооцов:

$$CE, \% = \frac{zF(C_0 - C)V \times 100}{63.5It} \quad (3)$$

Үүнд:

F - Фарадейн тогтмол (96485 Кулон/моль)

z - ион тус бүрээс шилжсэн электроны тоо (II валенттай зэсийн хувьд 2 электрон шилжсэн байна)

C_0 ба C - электролизын өмнөх $t(0)$ болон дараах t (сек) электролит уусмал дахь зэсийн концентрац (г/л)

V - электролит уусмалын эзлэхүүн (л)

I - гүйдлийн хүч (А)

t - электролизын хугацаа (сек) [28]

Электролизын механизм: Зэс (II)-ийн электролиз нь цахилгаан химийн процесс бөгөөд катод дээр зэс ангижрах урвал явагдаж, катодын гадаргуу дээр металл зэс (Cu⁰) сууж хуримтлагддаг.

Хэрэв бусад хажуугийн урвал нэгэн зэрэг тохиолдохгүй бол катодын урвал нь зөвхөн зэс (II) ангижрах урвал байна.

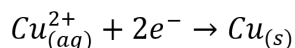
Электролизын явцад эерэг цэнэгтэй зэсийн ионууд электролит уусмалаас катод руу шилждэг [29, 30].

Хүснэгт 1. Зэсийн сульфатын болон рафинат уусмалуудын химийн найрлага

Дээжийн нэр	Хандлагдсан фаз	Cu, мг/л	Fe, мг/л	Ag, мг/л	Zn, мг/л
Зэс агуулсан / усан/ уусмал	Баяжсан уусмал	411.3	1.39	0.143	0.012
	Рафинат	2.35	19.87	1.26	6.39
Зэс агуулсан / хүчиллэг/ уусмал	Баяжсан уусмал	2764.2	0.76	0.125	0.121
	Рафинат	4.3	10.72	0	7.55

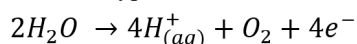
Үндсэн урвалууд:

- Катодын урвал:



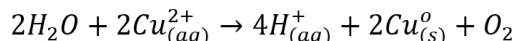
Энэ урвалаар зэсийн ионууд (Cu^{2+}) катод дээр электрон авч ангижран, катодын гадаргуу дээр металл зэс (Cu^0) хуримтлагдана.

- Анодын урвал:



Энд анод дээр ус исэлдэж, хүчилтөрөгч (O_2) ба устөрөгчийн ионууд (H^{+}) ялгарна. Анод дээр хүчилтөрөгчийн бөмбөлгүүд үүсэх үед ялгарсан устөрөгчийн ионууд электролит уусмал дахь сульфат ионууд (SO_4^{2-})-тай нэгдэж хүхрийн хүчлийг үүсгэнэ.

- Электролизын үүр дэх ерөнхий урвал:



Электролиз үүрийн нийлбэр потенциал нь хагас-урвалын ангижрах потенциал юм. Хэрэв потенциалын нийлбэр эерэг байвал урвал нь стандарт нөхцөлд аяндаа явагдана. Хэрэв сөрөг утгатай байвал урвал стандарт нөхцөлд өөрөө аяндаа явагдахгүй.

Цахилгаан химийн шинж чанарын судалгаа:

Зэсийн цахилгаан химийн шинж чанарыг тогтмол потенциалын утгын үед цикловольтаметр (CV, Epsilon-Eclipse)-ээр хэмжиж судалсан. Туршилтыг гурван стандарт электродтой үүрэнд гүйцэтгэсэн. Шил-нүүрсэн (the glassy carbon) электродыг ажлын электродоор, цагаан алтан савааг тоолуур электродоор, мөнгө-мөнгөний хлорид ($Ag/AgCl/Cl^{-}$) электродыг харьцуулах электродоор ашигласан. Потенциалыг - 0.3 В-оос + 0.4 В хүчдэлийн завсарт 10, 30, 50 ба 100 мВ/сек бичих хурдтайгаар хэмжсэн.

ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Хүчиллэг болон усан уусмал дахь зэс (II)-ийн хандлалт: Шатаасан техноген баяжмалаас ус ба хүхрийн хүчлээр уусган авсан зэсийг урьдчилан бэлтгэсэн органик хандлагч (LIX984N : керосин = 1:9) урвалжаар рН=2 орчинд 2.5 минут хандалсан. Шатаасан баяжмал дахь зэсийг усанд уусган хандлах процессын хувьд хамгийн оновчтой нөхцөл нь х:ш-ний харьцаа 1:50, температур 25°C, хутгалтын хурд 500 эрг/мин, хугацаа 60 минутад зэс авалтын зэрэг 91.68%, харин 1.6 М H_2SO_4 -д уусган

хандлахад х:ш-ний харьцаа 1:8, температур 25°C, хутгалтын хурд 200 эрг/мин, хугацаа 30 минут үед зэс авалтын зэрэг 97.16% тус тус байв [14].

Зэс(II) агуулсан хүчиллэг болон усан уусмалын химийн найрлагыг ICP-OES-ийн аргаар тодорхойлсон шинжилгээний дүнг *Хүснэгт 1*-д үзүүлэв. Хүчиллэг уусмалд Cu – 2764.2 мг/л, Fe – 0.76 мг/л, Ag – 0.125 мг/л ба Zn – 0.121 мг/л агуулгатай тодорхойлогдов.

Усан болон хүчиллэг уусмалаас зэсийг хандлан авсны дараа рафинат буюу усан фазын химийн найрлагыг ICP-OES-ийн аргаар тодорхойлсон шинжилгээний дүнг *Хүснэгт 1*-д үзүүлэв.

Органик фаз дахь зэсийн эргүүлэн хандлалт

Хүчлийн уусмал (H_2SO_4 -д уусгасан)-д уусган зэсээр баяжуулсан уусмалаас органик хандлагч (2.2% LIX987N)-аар хандлагдсан зэсийг 3 М H_2SO_4 -ийн уусмалаар 300 эрг/мин хутгалтын хурдтайгаар 20 минут сэгсрэн эргүүлэн хандлахад зэсийн хандлалтын зэрэг 93.6% байв. Харин усан (H_2O)-д уусган зэсээр баяжуулсан уусмалын хувьд 2.5% LIX987N-аар хандлагдсан зэсийг 1.5 М H_2SO_4 -ийн уусмалаар, хутгалтын хурд 272 эрг/мин, хугацаа 19 минут нөхцөлд эргүүлэн хандлахад зэсийн хандлалтын зэрэг 99.6% байв [14].

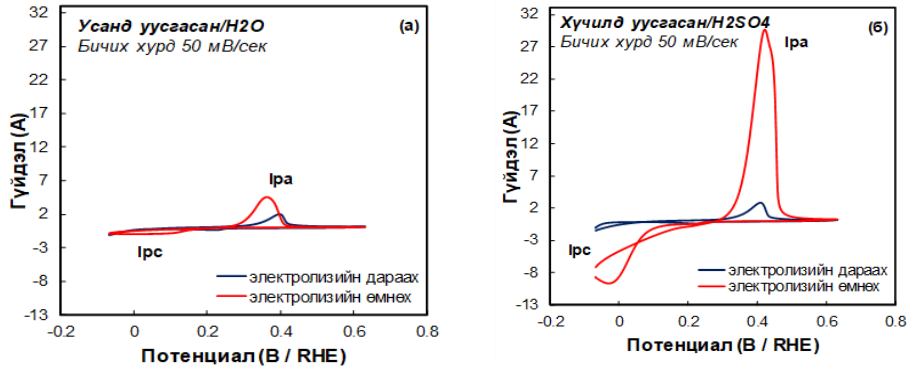
Хүчиллэг уусмал дахь Cu^{2+} ионуудын цахилгаан химийн шинж чанар:

Зэсийн сульфатын уусмалын цахилгаан химийн шинж чанарыг цикловольтаметрээр, 411.3 мг/л ба 2764.2 мг/л зэс (Cu^{2+}) агуулсан уусмалуудыг 50 мВ/сек бичих хурдтайгаар хэмжсэн вольтамограммыг *Зураг 2*-д харуулав.

Вольтамограммаас үзэхэд, потенциал хасах утгаас нэмэх утга руу шилжсэн ба *Зураг 2а*-д 411.3 мг/л зэс агуулсан сульфатын уусмалын хувьд катодын гүйдлийн хүчний пик (Ipc) бараг илрээгүй, харин анодын гүйдлийн хүчний пик (Ipa) нь потенциалын 0.37 В-д илэрч байна. Харин *Зураг 2б*-д 2764.2 мг/л зэс агуулсан сульфатын уусмалын хувьд гүйдлийн хүчний хасах утгын мужид катодын гүйдлийн хүчний пик (Ipc) потенциалын -0.02 В утгаас эхэлж, урвуу скан бичилтээр потенциалын нэмэх мужид анодын гүйдлийн хүчний пик (Ipa) 0.42 В-д илэрч байна.

Харьцуулах электрод ($Ag/AgCl$)-ын тусламжтайгаар хэмжсэн потенциалыг Нернстын тэгшитгэлийг ашиглан устөрөгчийн урвуу электрод (RHE)-тай харьцуулсан утга болгон хувиргав.

Зэсийн сульфатын уусмалын цикловольтамограмм (*Зураг 2*)-аас харахад катодын гүйдлийн пик нь



Зураг 2. Зэсийн сульфатын уусмал (а) усанд уусгасан/ H_2O , (б) хүчилд уусгасан/ H_2SO_4 -н цикловольтамограм (бичилтийн хурд 50 мВ/сек)

уусмал дахь Cu^{2+} катионуудын ангижрах процесс (металл зэс Cu^0)-ыг илэрхийлж байна. Харин анодын гүйдлийн хүчний пик нь зэс (металл зэс Cu^0) -ийн исэлдэх процесс ($Cu^0 \rightarrow Cu^{2+}$)-ыг илэрхийлнэ. Уусмалд зэс (Cu^{2+})-ийн концентрац хангалттай өндөр үед урвал илүү идэвхтэй явагдаж, илүү олон электрон дамждаг тул зэсийн агуулга харьцангуй өндөр 2764.2 мг/л (хүчилд уусгасан/ H_2SO_4) уусмалын катодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим (I_{pc}) өндөр байна (Зураг 2б).

Электролизын өмнө болон дараа катод болон анодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчмийн бууралт ба өөрчлөлт нь электролит уусмал дахь зэсийн катионуудын катод дээр бүрэн ангижрах эсэхийг илтгэнэ (Зураг 2а).

Бичилтийн хурдын өөрчлөлт: Зэсийн сульфатын уусмал (411.3 мг/л Cu^{2+})-ын цикловольтамограммыг 10, 30, 50, 100 мВ/сек хурдаар тус тус бичсэн. Үр дүнг Зураг 3а-д харуулав. Зургаас харахад катод болон анодын гүйдлийн хүчин пикүүдийн эрчим нь бичилтийн хурдын өсөлтийн дагуу шугаман хамаарлаар өссөн байна. Өөрөөр хэлбэл, энэ орчинд электродын процесс нь диффузийн хяналттай явагдаж буйг харуулж байна. Катодын гүйдлийн хүчний пикүүдийн байрлал нь потенциалын хасах утга руу бага зэрэг шилжсэн бол анодын гүйдлийн хүчний пикүүдийн байрлал нь бичилтийн хурд

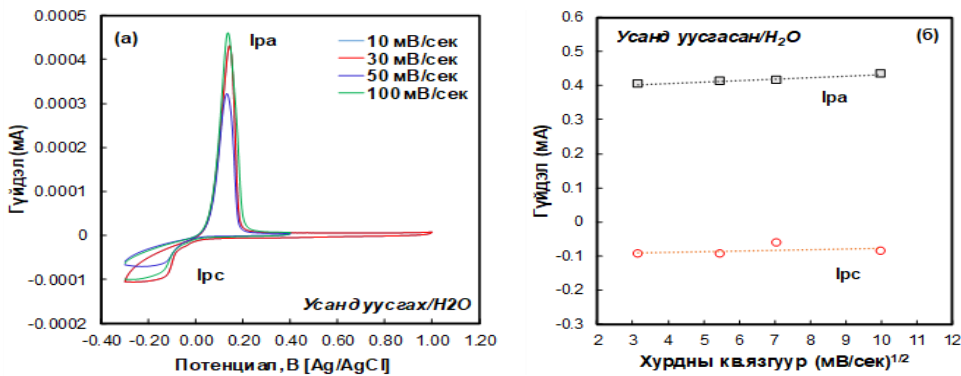
нэмэгдэх тусам потенциалын эерэг утга руу шилжиж байна. Энэ нь эргэх процесс, үл эргэх процесс руу шилжиж буйг илтгэнэ.

Cu^{2+} -ийн исэлдэн/ангижрах процессын катод ба анодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим нь бичилтийн хурдын квадрат язгууртай шугаман хамааралтайг харуулсан (Зураг 3б).

Цикловольтамограм (Зураг 3а)-аас харахад гүйдлийн хүч өсөж буй мужид хүчдэлийн бичилтийн хурдыг 10 -100 мВ/сек хүртэл өсгөхөд анодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим (I_{pa}) хамгийн өндөр болж нэмэгдсэн. Түүнд харгалзах потенциал ба гүйдлийн хүчний утга нь анодын ойр орчимд диффузийн тархалт их байгааг заана.

Зураг 3б-аас харахад катодын гүйдлийн хүчийн пик (I_{pc})-ийн эрчим -0.09 мА-аас -0.08 мА хүртэл бага зэрэг, анодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим (I_{pa}) 0.4 мА-аас 0.43 мА хүртэл тус тус нэмэгдсэн байна.

Зураг 3а-д катодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим бага нэмэгдсэн нь электролизын урвалаар завсрын бүтээгдэхүүн болох цахилгаан идэвх муутай $Cu(I)$ -ийн катионууд үүссэнтэй холбоотой байж болно. $Cu(II)/Cu(0)$ электродын хувьд $Cu(II)$ -ийн катионууд Cu^0 болж хувирах ангижрах урвалыг катодын гүйдлийн хүчний пик үзүүлнэ. Харин металл Cu^0 нь $Cu(II)$ -д хувирах исэлдэх урвалыг анодын гүйдлийн хүчний пик илэрхийлнэ. Хэмжилтийг бичих хурд



Зураг 3. (а) Зэсийн сульфатын уусмал (усанд уусгасан/ H_2O)-ын гүйдлийн хүч ба бичилтийн хурдын хамаарлын цикловольтамограм; (б) катодын гүйдлийн хүч ба бичилтийн хурд ($мВ/сек$)^{1/2}-ын хамаарал.

Хүснэгт 2. Цикловольтамометрийн хэмжилтийн үр дүн

Дээжийн нэр	Бичих хурд, мВ/сек	Бичих хурдын кв.язгуур, $\frac{1}{2}$ (мВ/сек)	Іра, мА	Ірс, мА	Ера, В	Ерс, В	Іра/Ірс	dЕр, В
Хүчилд уусгасан/ H_2SO_4 (э.өмнө)	50	7.071	27454	-7425	0.42	-0.0258	-3.70	0.45
Хүчилд уусгасан/ H_2SO_4 (э.дараа)	50	7.071	2496	-349	0.4	0.22	-7.15	0.18
Усанд уусгасан/ H_2O (э.өмнө)	50	7.071	4384	-780	0.36	0.039	-5.62	0.32
Усанд уусгасан/ H_2O (э.дараа)	50	7.071	1550	-223	0.39	0.22	-6.95	0.17
							(Іра/Ірс)≠1	dЕр>0

Тайлбар: Зэсийн сульфатын уусмал (Хүчилд уусгасан/ H_2SO_4 ба Усанд уусгасан/ H_2O)-д харгалзах цикловольтамометрийн хэмжилтэд үндэслэн тооцоолсон дүнгүүд

нэмэгдэхийн хэрээр катодын гүйдлийн хүчний пикийн байрлал нь потенциалын хасах утга руу бага зэрэг шилжсэн. Анодын гүйдлийн хүчний пикийн байрлал потенциалын эерэг утгын чиглэлд мөн бага зэрэг шилжсэн. Эдгээр нь хагас эргэх процессоос үл эргэх процесс руу чиглэн шилжиж буйг харуулж байна.

Электролизын өмнөх ба дараах зэсийн сульфатын уусмалууд (хүчилд уусгасан/ H_2SO_4 ба усанд уусгасан/ H_2O)-ын цикловольтамометрийн хэмжилтээс анод ба катодын гүйдлийн хүчний пикийн харьцаа болон потенциалын зөрүүг тооцоолж үр дүнг Хүснэгт 2-т үзүүлэв.

Хүснэгт 2-ын үр дүнгээс харахад зэсийн сульфатын уусмалуудын зэсийн өөр өөр агуулгын хувьд электролизын өмнө болон дараах анодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим адилхан өндөр (Іра) ба катодын гүйдлийн хүчний пикийн эрчим (Ірс)-д харьцуулсан харьцаа $Іра/Ірс \neq 1$ байгаа нь электродын процесс үл эргэхийг илэрхийлж байна. Энэ нь электрон дамжуулалтаас үүдэлтэй химийн урвалын үл эргэх шинж чанарыг илэрхийлдэг.

Харин анод ба катодын потенциалын ялгавар (Ера-Ерс) тэгээс их ($dЕр > 0$) байгаа нь электроны туйлшрал ба диффуз хосолсон процессыг илэрхийлж байна.

Электролизын туршилт: Зэс (Cu^{2+})-ийн сульфатын уусмалын электролизын туршилтыг зэсийн өөр өөр агуулгатай уусмалууд (411.3 мг/л ба

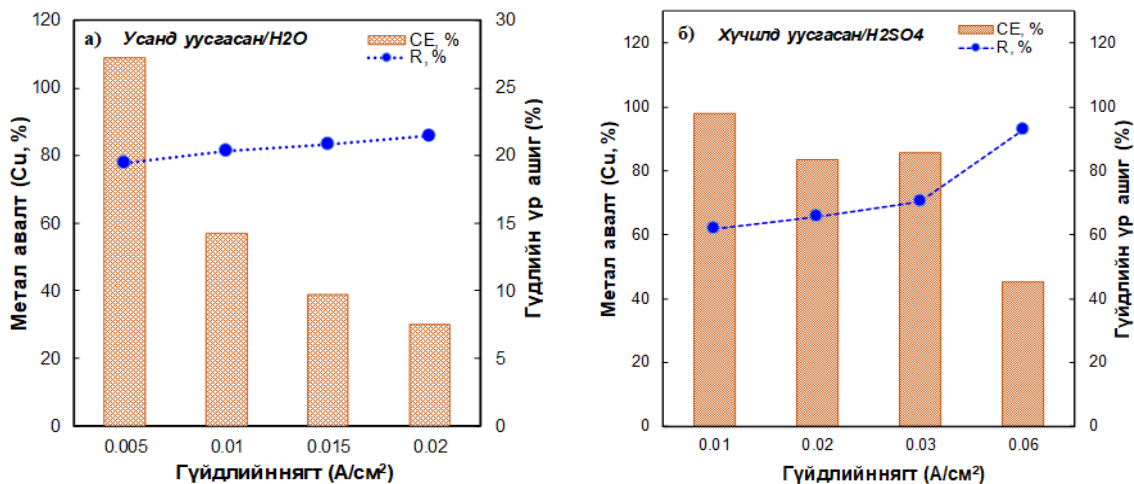
2764.2 мг/л Cu^{2+}) дээр гүйдлийн нягт (CD), электролизын хугацаа зэрэг хүчин зүйлүүдээс хамааруулан явуулж, тохиромжтой нөхцөлийг тодорхойлсон. Электролизын параметруудийг оновчтой болгосноор катодын гадаргуугийн морфологи, зэсийн катод дээр суух хурд ба гүйдлийн хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлж, зэс авалт хамгийн их, зэсийн цэвэршилт өндөр байх нөхцөл хангагдана.

Электролизын үр дүнд гүйдлийн нягтын нөлөөлөл: Электролизын явцад зэсийн сульфатын уусмалаас катод дээр суух зэсийн хэмжээ, зэсийн цэвэршилтийн зэрэгт гүйдлийн нягтын нөлөөг судалсан.

Зэсийн сульфатын 411.3 мг/л ба 2764.2 мг/л Cu^{2+} -ийн анхны концентрацтай уусмалуудаас тус бүр 50 мл-ийг авч, электролизын туршилтыг тасалгааны температурт гүйцэтгэсэн. Зэсийн сульфатын уусмалуудын анхны рН нь ойролцоогоор 0.5-2.18, тогтмол гүйдлийн нягт нь 0.005-0.02 А/см², электролизын хугацаа 120-360 минут байв. Хүснэгт 3-д зэсийн сульфатын уусмалын электролизын параметруудийг нэгтгэн харуулав.

Зэс (Cu^{2+})-ийн 411.3 мг/л ба 2764.2 мг/л концентрацтай сульфатын уусмал (хүчилд уусгасан/ H_2O), усанд уусгасан/ H_2SO_4)-аар дамжих гүйдлийн хүчний нягтаас зэс авалт ба гүйдлийн хүчний үр ашиг хэрхэн хамаарахыг Зураг 4-т үзүүлэв.

Электролизын аргаар 411.3 мг/л Cu^{2+} агуулсан



Зураг 4. Зэсийн сульфатын уусмал (а) усанд уусгасан/ H_2O ба (б) хүчилд уусгасан/ H_2SO_4 -ын электролизын гүйдлийн хүчний нягтаас зэс авалт ба гүйдлийн хүчний үр ашгийн хамаарал

Хүснэгт 3. Электролизын параметрууд

Турш. No.	Анхны конц (Cu ²⁺), мг/л	pH	Потенциал, В	Катодын талбай (S _{ка}), см ²	Гүйдлийн нягт, А/см ²	Хугацаа, мин
1	411.30	2.00	2.31	3.82	0.013	100
2	411.30	2.00	2.31	4.94	0.005	120
3	411.30	2.18	2.80	4.94	0.010	120
4	411.30	2.05	2.86	4.94	0.015	120
5	411.30	2.08	3.11	4.94	0.020	120
6	411.30	2.09	2.69	4.94	0.010	240
7	411.30	2.07	2.80	4.94	0.010	360
8	411.30	2.03	2.49	4.94	0.005	60
9	411.30	2.10	2.46	6.00	0.002	30
10	411.30	2.08	2.42	6.60	0.002	60
11	411.30	2.06	2.44	6.60	0.002	60
12	411.30	2.03	2.39	6.00	0.002	60
13	2764.2	0.5	2.60	6.00	0.060	20
14	2764.2	0.5	2.87	5.40	0.060	60
15	2764.2	0.5	2.90	6.00	0.060	40
16	2764.2	0.5	2.60	4.80	0.030	40
17	2764.2	0.5	2.50	6.00	0.010	40
18	2764.2	0.5	2.60	4.80	0.020	40

сульфатын уусмал (усанд уусгасан/H₂O)-аас гүйдлийн нягтын 0.02 А/см² байх үед зэсийг ялгахад зэс авалт хамгийн их буюу 85.9% байв (Зураг 4а). Cu²⁺-ийн 2764.2 мг/л концентрацтай уусмал (хүчилд уусгасан/H₂SO₄)-ын хувьд гүйдлийн нягт 0.06 А/см² байх үед зэс авалт 92.8%-д хүрч байгаа үр дүнг Зураг 4б харуулж байна.

Гүйдлийн нягт нэмэгдэхийн хэрээр устөрөгч (H₂)-ийн ион үүсэх хажуугийн урвалын улмаас гүйдлийн хүчний үр ашиг (CE)-ийн мэдэгдэхүйц бууралт Зураг 4-т үзүүлсэн дээжүүдэд адил ажиглагдаж байна. Гүйдлийн нягт нэмэгдэхийн хэрээр зэс (Cu²⁺)-ийн ионыг ангижруулах потенциалын утгаас давж, хэт ихсэх үед катодын хийцийн материал дахь төмөр болон бусад элементийн хажуугийн урвалууд явагдах магадлалтай. Үүний улмаас катодын гадаргуу дээр бусад металлын хольц хуримтлагдан, катодын зэсийн цэвэршилтэд сөргөөр нөлөөлөх хольцын хэмжээ ихэсдэг. Электролизын процессын параметруудийг ашиглан металл авалт, гүйдлийн хүчний үр ашгаас гадна нэгж хугацаанд катод дээр зэс суусан талбай буюу зэс суух хурдыг гүйдлийн нягтаас хэрхэн хамаарч байгааг Тэгш 4-ийн дагуу тооцож үзсэн бөгөөд катод дээр суусан зэсийн цэвэршилт, катодын гадаргуу дээр зэс суух хурд гүйдлийн нягтаас хэрхэн өөрчлөгдөж буй хамаарлыг

графикаар дүрслэн харуулав (Зураг 5). Зураг 5-д Cu²⁺-ийн 2764.2 мг/л концентрацтай уусмал (хүчилд уусгасан/H₂SO₄)-ын өөр өөр гүйдлийн нягттай үед гүйцэтгэсэн электролизын процессын катод дээр зэс суух хурд, катод дээр хуримтлагдсан зэсийн цэвэршилтийн хамаарлыг үзүүлсэн. Гүйдлийн нягт ихсэхэд катод дээр суусан зэсийн цэвэршилт, зэс суух хурд мөн шугаман хамаарлаар нэмэгдэж байна. Нэгж хугацаанд катод дээр зэс суух хурдыг дараах томъёогоор (4) тооцоолсон:

$$K_d = 2.303 \cdot V \cdot \frac{\log(C_o/C)}{S \cdot t} \quad (4)$$

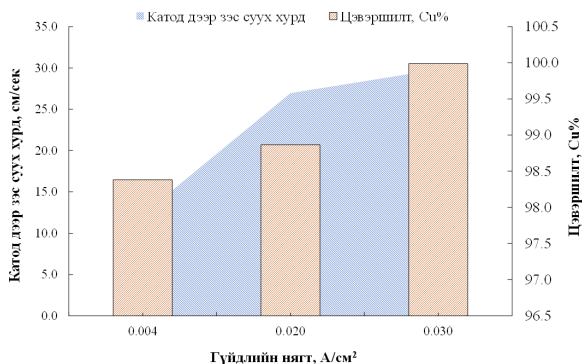
Үүнд:

- K_d - нэгж хугацаанд катод зэс суух хурд (см/сек)
- V - зэс хандлах уусмалын эзлэхүүн,
- C_o - зэсийн анхны концентрац, г/л
- C - электролитэд үлдсэн зэсийн концентрац, г/л
- S - катодын гадаргуугийн талбай, см²,
- t - электролизын хугацаа, сек

Электролит уусмал дахь зэсийн анхны концентрац (C_o) нь электролиз явах үед хангалттай байвал катод дээр хуримтлагдсан зэсийн цэвэршилт өндөр байхыг харуулна. Үүний эсрэгээр, электролит уусмалд зэсийн концентрац хангалтгүй байх үед анод электрод идэвхгүй болдог. Электролит уусмал дахь зэсийн бага концентрац нь электролизын явцад бүрэн зарцуулагдан улмаар анод дээр устөрөгчийн ионы концентрац нь уусмал дахь зэс (Cu²⁺)-ийн концентрацаас их болно. Энэ нь зэс (Cu²⁺) ангижрах урвалын үед зэсийн сульфат эсвэл бусад давс үүсгэх замаар катод дээрх зэсийн цэвэршилд нөлөөлдөг [24].

Гүйдлийн нягт нэмэгдэхийн хэрээр зэсийн суух хурд нэмэгддэг. Гэвч гүйдлийн нягт хэт их болбол катодын гадаргуугийн тэгш бус байдал ба катодын гадаргуу дээрх зэсийн цэвэршилд сөрөг нөлөө үзүүлнэ [24].

Иймээс электролизын процессын үр дүнг катод дээр суусан зэсийн цэвэршилт, металл авалт, катодын



Зураг 5. Катод дээр зэс суух хурд, цэвэршилт ба гүйдлийн нягтын хамаарал

гадаргуу дээр зэс суух хурд, гүйдлийн үр ашиг зэрэг үзүүлэлтүүдийг харгалзан үзэж үнэлдэг тул эдгээр үзүүлэлтүүдийн хамгийн өндөр утгад хүрсэн туршилтын нөхцөлийг хамгийн оновчтой нөхцөл болгон сонгосон бөгөөд *Усанд уусгасан/H₂O* ба *Хүчилд уусгасан/H₂SO₄* хоёр дээж тус бүрийн хамгийн үр ашигтай байх электролизын процессын үр дүн ба тэдгээрт харгалзах туршилтын нөхцөлийг *Хүснэгт 4*-т нэгтгэн үзүүлэв.

Хүснэгт 4. *Усанд уусгасан/H₂O* ба *Хүчилд уусгасан/H₂SO₄* зэсийн сульфатын уусмалаас зэсийг электролизоор ялгаж авах оновчтой нөхцөл, үр дүн

Электролит бэлтгэсэн арга	Усанд уусгасан/ H ₂ O	Хүчилд уусгасан/ H ₂ SO ₄
Зэсийн анхны концентрац, мг/л	411.27	2764.25
pH	2.08	0.5
Хүчдэл, В	2.42	2.6
Катодын гадаргуугийн талбай, см ²	6.6	4.8
Гүйдэл, А	0.01	0.14
Гүйдлийн нягт, А/см ²	0.002	0.03
Электролизын хугацаа, мин	60	40
Цэвэршилт, Cu%	99.56	99.91
Гүйдлийн үр ашиг, %	88.33	85.67
Металл авалт, Cu%	67.43	70.49
Суух хурд, г/см ² -сек	30.6	30.52

Электролизын туршилтаар хоёр өөр зэсийн агуулгатай электролитийн уусмал (*усанд уусгасан/H₂O* ба *хүчилд уусгасан/H₂SO₄*)-аас катодын гадаргуу дээр хуримтлагдсан зэсийн цэвэршилт тус тус 99.6% ба 99.9%-иас дээш байгааг шинжилгээний үр дүн харуулсан (*Хүснэгт 4*).

Харин зэсийн металл авалт дээж (*усанд уусгасан/H₂O*)-ийн хувьд 67.43% ба дээж (*хүчилд уусгасан/H₂SO₄*)-ийнх 70.5% байв. Үйлдвэрлэлд электролит уусмал ба анод электрод идэвхгүй болох хүртэл электролизын процесс тасралтгүй явагддаг. Хэрэв электролизын процессыг электролит уусмалд үлдэх зэсийн концентрацыг 0 болтол гүйцэтгэвэл анод

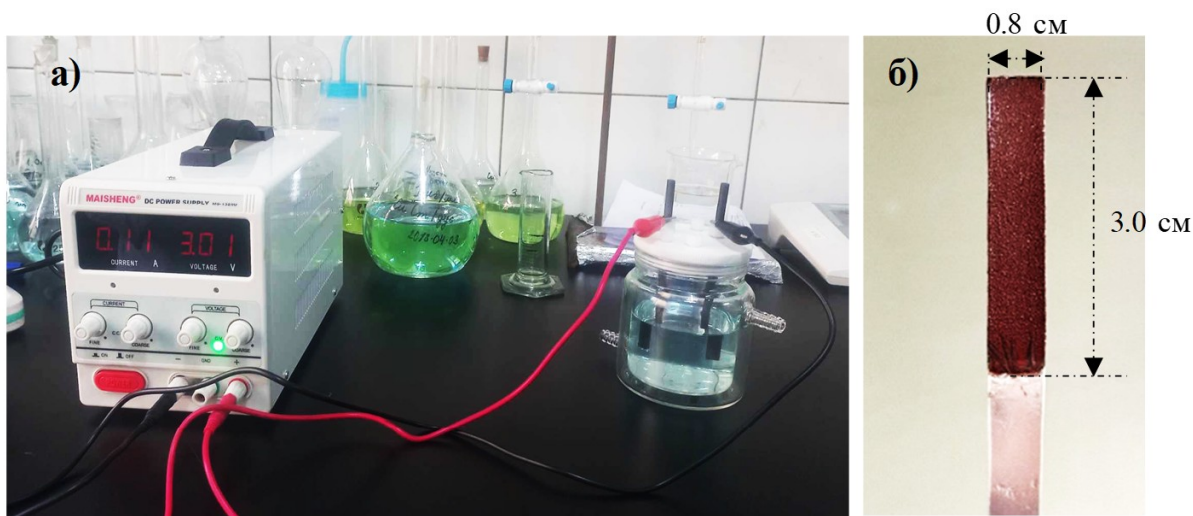
дээрх устөрөгчийн ионы концентрац нь электролит уусмал дахь SO₄²⁻ ионтой урвалд орж хүхрийн хүчил үүсгэнэ. Энэ нь катод дээр хуримтлагдсан зэс ба сульфатын ионуудын хооронд материалын шилжилт явагдаж, катодын зэсийн цэвэршилт, гарцад сөргөөр нөлөөлдөг [24]

Иймээс тус судалгаагаар электролизын процессын цикл бүр дэх зэсийг ялгах тохиромжтой горим нь зэс авалт хамгийн ихдээ 72% байвал зохистой байна.

Катодын зэсийн шинж чанар

Ялган авсан катодын зэсийн талст бүтэц ба морфологи шинж чанар: Зэсийн сульфатын уусмал (2764.2 мг/л Cu²⁺)-аас электролизоор ялган авсан өндөр цэвэршилттэй катодын зэсийг сканнинг электрон спектроскоп (SEM), энергийн тархалттай рентген спектроскопи (EDX), индукцийн холбоост плазмын оптик спектроскоп (ICP-OES)-ийн аргаар шинжлэв. Зэвэрдэггүй ган катод дээр хуримтлагдсан өндөр цэвэршилттэй катодын зэс ба электролизын туршилтын фото зургийг *Зураг 6*-д үзүүлэв.

Электролизын туршилтыг 500 мл эзлэхүүнтэй электролизын шилэн үүрэнд гарган авсан зэсийн сульфатын уусмалаас хийн, түүнд анод (графитан саваа: ≥1.78 г/см³ нягт, ≤14 μΩ·m хувийн эсэргүүцэлтэй), катод (3.0 x 0.8 см хэмжээтэй зэвэрдэггүй ган диск - SUS 316L)-ыг тогтмол гүйдлийн тэжээлийн эх үүсгэврийг потенциостатик нөхцөлд MS-305DS маркийн Maisheng DC цахилгаан хангамж бүхий төхөөрөмжид холбон электролизын туршилтыг гүйцэтгэсэн болно (*Зураг 6а*). Оновчтой нөхцөлд электролизын үүр өгсөн гүйдлийн нягт 0.03 А/см² байх үед 40 минутын хугацаанд зэсийн сульфатын уусмал (2764.2 мг/л Cu²⁺)-аас электролизоор ялган авсан өндөр цэвэршилт (99.9%)-тэй катодын зэсийн фото зургийг *Зураг 6б*-д харуулсан ба катодын материал болох зэвэрдэггүй ган хавтангийн гадаргуугийн талбай (SUS 316L) 4.8 см² байсан.



Зураг 6. Өндөр цэвэршилттэй катодын зэсийн фото зураг а). Электролизын үүр, электродууд ба потенциостатометр, б) Катодын гадаргуу дээр хуримтлагдсан зэсийн талбайн хэмжээ

Хүснэгт 5. Катодын зэсийн рентгендифрактограмм (XRD)-ын пикийн байрлал болон талстын дундаж хэмжээ

Дээж	Мюллерын индекс [hkl]	Пикийн байрлал [2 Theta]	d [Å ⁰]	I/I ₀	FWHM	Талстын хэмжээ, D [нм]
Хүчилд уусгасан/ H ₂ SO ₄	110	29.3	3.54	591.2	0.12	79.50
	111	36.9	2.83	467.2	0.12	81.09
	111	43.2	2.43	45.3	0.12	82.73
	200	50.8	2.09	1000.0	0.12	85.16
	220	59.5	1.81	371.9	0.12	88.58
	220	74.6	1.48	36.3	0.12	96.69

Рентгендифрактограммын зураг дээр Cu⁰-ээс гадна CuO болон Cu₂O-д хамаарах пикууд илэрсэн (Зураг 7). Хүснэгт 5-д 111, 110, 200, 220 бүхий Мюллерын индекс (hkl)-гэй Cu-ийн талст оронг торын хавтгайнууд, тэдгээрийн хоорондох зай (d, Å⁰) ба пикийн эрчимийг (I/I₀) үзүүлэв. XRD-ээр илрүүлсэн бүх боломжит хавтгайн байрлалууд нь Cu₂O болон Cu⁰ нь куб сингонийн талст болохыг харуулж байна. Талстын дундаж хэмжээг рентгендифрактограммаас олсон пикийн өргөн (FWHM)-ий утгаар Шеррерийн тэгшитгэл (5)-ийг ашиглан тооцоолсон.

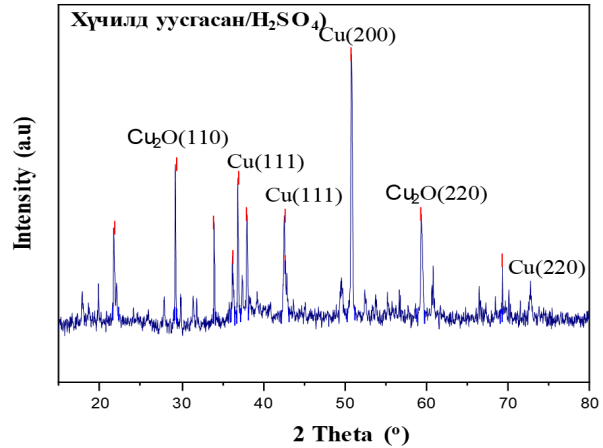
$$D = \frac{K \lambda}{FWHM \cos \theta \beta} \quad (5)$$

Үүнд:

- D - талстын хэмжээ (нм)
- λ - рентген туяаны долгионы урт (Cu Kα1, =1.79)
- FWHM - пикийн өргөн
- θ - рентген туяаны тусгалын өнцөг
- K - хэлбэржилтийн фактор (ойролцоогоор 0.9 гэсэн ердийн утгатай боловч талстын бодит хэлбэрээс хамаарч өөр өөр байдаг)

Рентгендифрактограмм дээр гурван өндөр пик илэрсэн. Ойролцоогоор 29.3⁰ (2θ утга)-д илэрсэн эхний хурц өндөр пик нь (110) талст торны хавтгайд хамаарах ба түүний хавтгай хоорондын зай (d) ~0.35 нм байна.

Дараагийн 39.93⁰ (2θ утга) дахь өндөр эрчим нь (111) талст торны хавтгайнх, түүний d ~0.28 нм. 50.82⁰-д (2θ утга)-д илэрсэн эрчим ихтэй пик нь 0.2 нм хавтгай хоорондын зай (d)-тай (200) талст торны хавтгайд хамаарна.

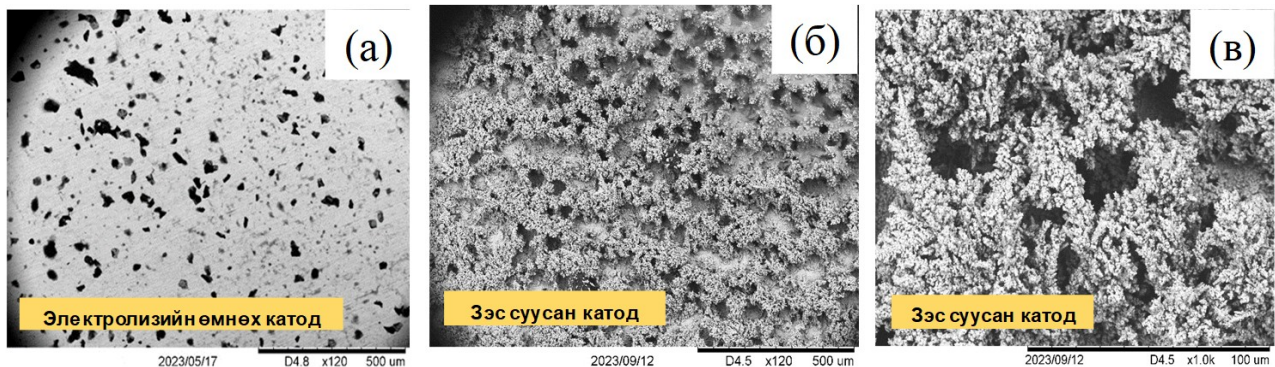


Зураг 7. Зэвэрдэггүй ган катодоос хуулсан зэсийн рентгендифрактограмм

Катодын зэсийн талстын дундаж хэмжээ тооцооллоор 79.5 нм-ээс 96.6 нм-ийн хооронд хэлбэлзэж байна (Хүснэгт 5).

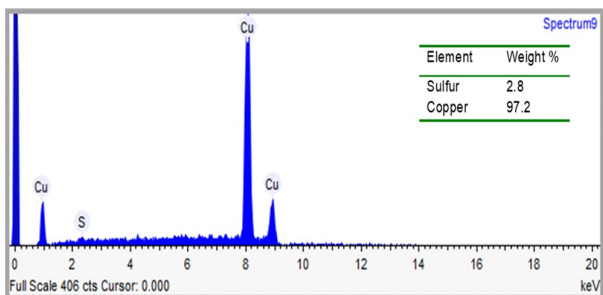
Электролизын өмнө болон дараа катодын материалын (SUS 316L) гадаргуун морфологийг сканнинг электрон микроскоп (SEM)-ээр шинжилж, морфологийн зургийг Зураг 8-д үзүүлэв.

Электролит уусмал (2764.2 мг/л Cu²⁺)-аас (Хүснэгт 2, Туршилт №6) 4.80 см² гадаргуун талбайтай катод ашиглан, гүйдлийн нягт 0.03 А/см² ба 2.60 В потенциал хүчдэлээр үйлчилж, 40 минутад ялган авсан катодын зэсийн морфологийг, Зураг 8-ийн (б) ба (в)-д тус тус үзүүлэв. Электролизын дараа катодын материалын гадаргуу илт өөрчлөгдөж, идэвхтэй хэсгүүд дэх бөөгнөрөл гүйдлийн нягтын



Зураг 8. Электролизын өмнө болон дараа катодын материалын (SUS 316L) гадаргуун морфологийн зураг (SEM). (а) электролизын зэвэрдэггүй ган (SUS 316L); (б) электролизын дараа катодын гадаргуу дээр хуримтлагдсан зэс, масштаб 500 мкм; (в) электролизын дараа катодын гадаргуу дээр хуримтлагдсан зэс, масштаб 100 мкм

улмаас илүү барзгар болсныг *Зураг 8б* ба *Зураг 8в*-аас харж болно. Гүйдлийн нягт өндөр үед олон тооны жижиг ширхгүүд аажмаар катодын гадаргуу дээр бөөгнөрөн жигд бус зузаантай зэсийн хуримтлал үүсгэж байгааг харуулж байна.



Зураг 9. Элементийн шинжилгээ (EDS)

Зураг 9-д электролизээр катод дээр хуримтлагдсан зэс (Cu^0)-ийн (*Хүснэгт 2*, *Туриилт №16*) элементийн найрлагыг (EDS)-ийн аргаар тодорхойлсон шинжилгээний дүнг үзүүлэв.

Катодын гадаргуу дээр хуримтлагдан бөөгнөрсөн сүвэрхэг зэс нь 97.2% Cu, 2.8% S-ээс бүрдэж байв (*Зураг 9*).

Катодын зэсийг хуулж аваад 60°C-т 0.5M HCl-ийн уусмалд уусгасан усан уусмалын химийн найрлагыг ICP-OES-ийн аргаар тодорхойлсон дүнг *Хүснэгт 6*-д үзүүлэв.

Хүснэгт 6. Электролизээр ялган авсан катодын зэсийн химийн найрлага

Дээж	Элемент (%)						Нийт
	Cu	Fe	Ag	Cr	Sr	Ba	
Хүчилд уусгасан /H ₂ SO ₄	99.9	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	100.0

ICP-OES -ийн шинжилгээний дүн 99.9% Cu ба 0.04% Fe, 0.01% Ag, 0.01% Cr, 0.01% Sr, 0.03% Ba зэрэг бага хэмжээний хольц элементүүд агуулсан болохыг харуулав.

Дээр үзүүлсэн судалгаа шинжилгээний үр дүнгүүд электролизээр зэсийн агуулга багатай (стандартын бус) полисульфидын баяжмалаас 99.9%-ийн өндөр цэвэршилттэй зэс ялгаж авах боломжтойг харуулж байна.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар зэсийн агуулга багатай (стандартын бус) полиметаллын баяжмалаас уусгалт, хандлалт, эргүүлэн хандлалт болон электролизын хосолсон аргаар катодын цэвэр зэс ялган авах боломжийг судалсан. Зэсээр баян зэсийн янз бүрийн агуулга (2.4 мг/л ба 4.3 мг/л)-тай уусмалыг полиметаллын баяжмалыг хүчил-шүлтийн холимогт уусгасны дараах хатуу үлдэгдэл буюу зэсийн сульфидын техноген баяжмалыг агаарын оролцоотой шатаан, хүхрийн хүчил болон усанд уусган гаргаж авав.

Энэхүү уусмалаас зэсийг хандлах, эргүүлэн хандлах, электролизээр зэс ялгах хамгийн оновчтой нөхцөлийг LIX984 органик хандлагч, эргүүлэн хандлагчаар H₂SO₄-ийн уусмал, зэвэрдэггүй ган хавтан катод ашиглан тодорхойлсон.

Зэсээр баян уусмал (усанд уусгасан/H₂O ба хүчилд уусгасан/H₂SO₄ дээжүүд)-аас зэсийг сонгон хандлах (LIX984N)-ийн хандлалтын оновчтой нөхцөлийг (pH-2, LIX984N:керосин = 1:9, усан уусмал:органик фаз=1:1, хугацаа 2.5 минут) тогтоож, тус нөхцөлд зэс хандлалтын зэрэг хамгийн их буюу харгалзан 91.6% ба 97.16% байв.

Зэсийг эргүүлэн хандлалтын тогтоосон оновчтой нөхцөл (органик фаз:хүчлийн уусмал = (1:1), 3M H₂SO₄-ийн уусмал, сэгсрэлтийн хурд 300 эрг/мин, хугацаа 14 минут)-д зэс авалт 93.6% ба 99.3%-д хүрснээр дагалдах хольц элементүүдийн нөлөөллийг бууруулж чадсан. Эргүүлэн хандлалтаар усанд уусгасан/H₂O дээжийн зэсийн концентрац 411.3 мг/л, хүчилд уусгасан/H₂SO₄ дээжийнх 2764.2 мг/л болж тус тус баяжсан.

Зэсийн сульфатын уусмалын электролизын туршилтыг электролит уусмал дахь зэсийн агуулга, гүйдлийн хүчний нягт, pH, электролизын хугацаа зэрэг параметруудээс хамааруулан судалж, тохиромжтой нөхцөлийг (усанд уусгасан/H₂O дээжийн хувьд гүйдлийн нягт 0.002 A/cm², хүчилд уусгасан/H₂SO₄ дээжийн гүйдлийн нягт 0.03 A/cm²) тодорхойлж, тохиромжтой нөхцөлд хамгийн их зэс авалт харгалзан 67.4 % ба 70.5%-д хүрэв.

Электролизын үр дүнгээс үзэхэд катод дээр электролитийн уусмалаас ялгарах зэсийн хуримтлал нь зэсийн (Cu^{2+}) ионы концентрац, гүйдлийн нягт, зэс суух хугацаа зэргээс хамгийн их хамааралтай байв.

SEM-ийн шинжилгээгээр катод дээр хуримтлагдсан зэс нь бөөгнөрсөн сүвэрхэг давхарга бүхий морфологитой ба катодын зэсийн цэвэршилтийг EDS болон ICP-OES-ийн шинжилгээгээр тодорхойлоход зэсийн цэвэршилт өндөр (99.9%) байсан.

Энэхүү судалгааны үр дүн, зэсийн агуулга багатай полиметаллын баяжмалыг уусгалт, хатуу үлдэгдлийн шатаалт, уусгалт, хандлалт, эргүүлэн хандлалт, электролиз зэрэг пиро- болон гидрометаллургийн хосолсон аргаар боловсруулан өндөр цэвэршилттэй зэс (Cu^0) ялган авч болохыг харуулав.

ТАЛАРХАЛ

Бэлтгэн гаргасан зэсээр баяжуулсан сульфатын уусмалын цахилгаан химийн шинж чанарыг ШУА-ийн Физик технологийн хүрээлэнгийн Материал судлалын салбарын цикловольтаметр (CV, Epsilon-Eclipse) багажийг ашиглан тодорхойлсон бөгөөд тус

лабораторийн доктор (Ph.D) Б. Бумаа болон бусад судлаачдад талархал илэрхийлье.
Энэхүү судалгааны ажлыг БШУЯ-ны Шинжлэх ухаан технологийн сангийн суурь судалгааны төсөл хэрэгжүүлэх No. ШУС. 2020/21 гэрээний санхүүжилтээр гүйцэтгэсэн болно.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. Т. Chepushtanova, М. Yessirkegenov, Y. Bochevskaya, А. Sharipova, О. Baigenzhenov, Y. Merkibayev, А. Altmyshbayeva. (2024) The testing results of ACORGA, LIX extractants and CR60 crud mitigation reagent influence during SX-EW copper extraction. *Sustain.*, 16(17), p.7815. <https://doi.org/10.3390/su16177815>
2. P.K. Gbor, V. Mokri, C.Q. Jia. (2000) Characterization of smelter slags. *J. Environ. Sci. Health, Part A.* 35(2), p.147-167. <https://doi.org/10.1080/10934520009376960>
3. А. Bulaev, V. Melamud. (2022) Two-stage oxidative leaching of low-grade copper–zinc sulfide concentrates. *Microorganisms*, 10(9), p.1781. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091781>
4. K. Daehn, А. Allanore. (2020) Electrolytic production of copper from chalcopyrite. *Curr. Opin. Electrochem.*, 22, p.110-119. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.04.011>
5. N.B. Devi, B. Nayak. (2014) Liquid-liquid extraction and separation of copper (II) and nickel (II) using LIX®984N. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 114, p.937-943.
6. K. Elamari, E.A. Jdid, P. Blazy. (2006) Copper solvent extraction from chalcopyrite concentrates acid leach solutions by lix 984. *J. Min. Metall., Section B.* 42, p.1-11. <https://doi.org/10.2298/JMMB0601001E>
7. M.K. Khalid, J. Hamuyuni, V. Agarwal, J. Pihlasalo, M. Haapalainen, M. Lundström. (2019) Sulfuric acid leaching for capturing value from copper rich converter slag. *J. Clean. Prod.*, 215, p.1005-1013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.083>
8. B. Han, B. Altansukh, K. Haga, Ya. Takasaki, A. Shimayama. (2017) Copper recovery from silicate-containing low-grade copper ore using flotation followed by high-pressure oxidative leaching. *Resour. Process.*, 64, p.3-14. <https://doi.org/10.4144/rpsj.64.3>
9. Facts and Details, Copper, Gold, Rare earths in Mongolia. Version April 2016. https://factsanddetails.com/central-asia/Mongolia/sub8_2f/entry-4611.html
10. R.R. Moskalyk, А.М. Alfantazi. (2003) Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow. *Miner. Eng.*, 16(10), p.893-919. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.08.002>
11. F.J. Alguacil, J.I. Robla. (2022) Solvent extraction in the recovery of metals from solutions: entering the third decade of XXI century. *Desalination and Water Treat.*, 265, p.71-93. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28604>
12. M. Prasad, V. Kenyen, D. Assar. (1992) Development of SX-EW process for copper recovery. an overview *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, 8(1-4), p.95-118. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28604>
13. Г. Ариунаа, Г. Бурмаа, Ш. Нямдэлгэр, Б. Алтансүх, М. Назгүл, Т. Нарангарав. (2021) Асгатын полиметаллын баяжмал дахь хортой элементүүдийг уусгах аргаар ялгаж авах судалгааны зарим үр дүн. *Bull. Inst. Chem. Chem. Technol.*, 9, х.17-25. <https://doi.org/10.5564/bicct.v4i9.1814>
14. S. Nyamdelger, B. Khulan, T. Narangarav, E. Ulziibadrakh, P. Sarantsetseg, T. Azzaya, S. Alen, S. Enkhtuul, G. Burmaa. (2023) Design for optimizing copper extraction from aqueous solution using LIX984N extractant. *Bull. Inst. Chem. Chem. Technol.*, 11, p.14–20. <https://doi.org/10.5564/bicct.v11i11.3283>
15. S. Aghazadeh, H. Abdollahi, M. Gharabaghi, M. Mirmohammadi. (2021) Selective leaching of antimony from tetrahedrite rich concentrate using alkaline sulfide solution with experimental design: Optimization and kinetic studies. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 119, p.298-312. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.01.0217>
16. P. Balaz, F. Sekula, S. Jakabsky, R. Kamme. (1995) Application of attrition grinding in alkaline leaching of tetrahedrite. *Miner. Eng.* 8(11), p.1299-1308. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(95\)00097-A](https://doi.org/10.1016/0892-6875(95)00097-A)
17. M. Ukasik, T. Havlik. (2005) Effect of selected parameters on tetrahedrite leaching by ozone. *Hydrometallurgy.* 77, p.139-145. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.017>
18. A.M. Wilson, P.J. Bailey, P.A. Tasker, J.R. Turkington, R.A. Grant, J.B. Love. (2013) Solvent extraction: the coordination chemistry behind extractive metallurgy. *Chem. Soc. Rev.*, 43, p.123-134. <https://dx.doi.org/10.1039/C3CS60275C>
19. M.E. Schlesinger, J.K. Matthew, K.C. Sole, W.G. Davenport. (2011) Extractive metallurgy of copper, 5th Ed., Elsevier, Amsterdam, p.323.
20. G.T. Mohanraj, M.R. Rahman, S.B. Arya, R. Barman, P. Krishnendu, S.S. Meena. (2022) Characterization study and recovery of copper from low grade copper ore through hydrometallurgical route. *Adv. Powder Technol.*, 33(1), p.103382. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.12.001>
21. B. Xiao, F. Jiang, S. Yin, L. Zhang, S. Ju, L. Zhang, S. Wang. (2018) Fast separation of Cu²⁺ and Ni²⁺ in sulfate solution by LIX984N extraction using a microchannel chip. *Green Process. Synth.*, 7(3), p.207-213. <https://doi.org/10.1515/gps-2016-0224>

22. Z. Stevanovic, M. Antonijevic, R. Jonovic, L. Avramovi, R. Markovic, M. Bugarin, V. Trujic. (2009) Leach-SX-EW copper revalorization from overburden of abandoned copper mine Cerovo, Eastern Serbia. *J. Min. Metall. Sect. B-Metall.*, 45(1), p.45-47. <https://doi.org/10.2298/JMMB0901045S>
23. K. Rotuska, T. Chmielewski. (2008) Growing role of solvent extraction in copper ores processing. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 42, p.29-36.
24. V. Suontaka, K. Saloheimo, T. Marttila, S.L. Jämsä-Jounela. (2003) A monitoring system for the copper solvent extraction - Electrowinning process. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 36(24), p.257-262. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37639-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37639-5)
25. Sh. Nyamdelger, T. Narangarav, D. Nemekhbayar, B. Khulan, P. Sarantsetseg, Ulziibadrakh E., Surenjav E. (2023) Treatment of copper-containing leaching residue by sulfation roasting followed by acid/water leaching. *Mong. J. Chem.*, 24(50), p.18-26. <https://doi.org/10.5564/mjc.v24i50.1310>
26. T. Havlik, B. Vidor e Souza, A.M. Bernardes, I.A. Schneider, A. Miskufova. (2006) Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *J. Hazard. Mater.*, 135(1-3), p.311-318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>
27. T.E. Moongo, S. Michael. (2021) A continuous quality improvement framework for electrowinning current efficiency. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 121(1), p.21-28. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1243/2021>
28. M.F. Alebrahim, I.A. Khattab, A.O. Sharif. (2015) Electrodeposition of copper from a copper sulfate solution using a packed-bed continuous-recirculation flow reactor at high applied electric current. *Egypt. J. Pet.*, 24(3), p.325-331. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.07.009>
29. C.G. Anderson. (2019) Optimization of Industrial Copper Electrowinning Solutions. In: *Prime Archives in Chemical Engineering*, Hyderabad, India.
30. Standard Electrode Potentials, Libre Texts. *The California State University Affordable Learning Solutions Program, and Merlot*. <https://chem.libretexts.org/@go/page/48909?pdf>

Experimental results of copper extraction from low-copper polymetallic concentrates

Narandalai Byamba-Ochir, Khulan Byambasuren, Narangarav Tumun-Ulzii, Sarantsetseg Purevsuren, Ulziibadrakh Erdenebat, Ariunaa Garnaad, Enkhtuul Surenjav, Altansukh Batnasan, Nyamdelger Shirchinjamjil*

Laboratory for Chemistry and Technology of Critical Metals, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13260, Mongolia

*E-mail: nyamdelger_sh@mas.ac.mn
ORCID: [0000-0003-1242-7776](https://orcid.org/0000-0003-1242-7776)

Submitted: 11.11.2025

Reviewed: 14.11.2025

Accepted: 11.12.2025

Abstract: The copper sulfide concentrate of copper was oxidizing roasting at low temperatures, and the resulting copper compound was dissolved in water and sulfuric acid solutions, and then electrolysis process was used to recovery high-purity metallic copper (Cu^0). Copper (Cu^{2+}) dissolved in water and acid solutions was extracted with organic reagent, copper was purified from unusefull impurities, and electrolyte solutions (CuSO_4) with a high copper concentration of 2764 mg/l were prepared. The electrolysis experiment of copper (Cu^{2+}) was studied depending on the copper concentration, contacting time, and current density. The electrochemical properties of the copper (Cu^{2+}) electrolytic solutions were determined by a three-electrode cyclic voltammetry instrument, and the cathode peak peak reached -0.3 V, and the concentration of copper ions in the solution decreased, and metallic copper was deposited on the cathode surface. In the electrochemical experiments for recovery of cathodic copper from copper sulfate solution at a current density of 0.03 A/cm², the recovery of metallic copper was 70.4%, the copper mass flux on the cathode surface was 30.5 cm/s, and the purity reached 99.8%. The properties of the cathodic copper were determined by X-ray diffractometry, electron microscopy, inductively coupled plasma spectroscopy, and chemical analysis methods.

Keywords: cyclic voltammetry, copper recovery, purity, copper deposition rate, current density

© 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.v13i13.5218>