

Хаягдал NiMH батарейн электродоос гарган авсан нунтаг никел (Ni)-ийн цахилгаан химийн шинж чанарын судалгаа

Б.Ихбаяр¹, Л.Сарантуяа^{1*}, Н.Тогтох¹, Б.Ану¹, Г.Сэвжидсүрэн¹

¹ ШУА-ийн Физик, технологийн хүрээлэн, Энергийн судалгааны лаборатори

Энэхүү судалгааны ажилаар нунтаг никель дээжийг хаягдал NiMH батарейн катодын материалаас химийн ангижруулан тунадасжуулах аргын тусламжтайгаар гарган авч цахилгаан химийн шинж чанарыг судаллаа. Бидний гарган авсан нунтаг дээж нь талдаа төвтэй куб бүтэцтэй, Fm-3m огторгуйн бүлэгт харьяагдах цэвэр никель болох нь рентген дифракцийн хэмжилтийн үр дүнгээр батлагдсан. Харин гарган авсан дээжийн хэт потенциалыг тодорхойлохын тулд циклик-вольтамметрийн хэмжилтээр шугаман алхамт вольтамперметрийн муруйг байгуулахад нунтаг Ni дээжийн хэт потенциалын утга нь хүчилтөрөгч болон устөрөгч ялгаруулах урвалын үед тус бүр 172 болон 338 мВ гарсан. Энэхүү утгууд нь хаягдал батарейнаас гарган авсан нунтаг Ni нь өндөр өртөг бүхий уламжлалт катализаторуудтай (RuO₂) өрсөлөхүйц үр дүн үзүүлж байгааг харуулж байна.

I. ОРШИЛ

Дэлхийн хүн амын өсөлт болон техник технологийн хурдацтай хөгжлөөс үүдэж эрчим хүчний эрэлт сүүлийн жилүүдэд тасралтгүй өссөөр байна [1]. Энэхүү эрчим хүчний хэрэгцээг ихэвчлэн уламжлалт түлш буюу шатах ашигт малтмалууд тэр дундаа төрөл бүрийн нүүрс, байгалийн хий болон нефтийн бүтээгдэхүүнүүд хангаж байна [2]. Тухайлбал нефтийн бүтээгдэхүүнийг голчлон зам тээврийн салбарт буюу дотоод шаталтын хөдөлгүүрт төрөл бүрийн суудлын автомашин, том оврын ачааны автомашин зэрэг тээврийн хэрэгслүүд ашиглаж байна [3]. Үүнээс үүдэж хот суурин газрын агаарын бохирдол нэмэгдэх, цаашлаад их хэмжээний хүлэмжийн хий ялгаруулж байгаль орчинд сөрөг нөлөө үзүүлж байна. Тийм учраас дэлхий нийтээр дотоод шаталтын хөдөлгүүрээс зайлсхийж, хосолсон эсвэл бүрэн цахилгаан автомашинуудыг ашиглах чиг хандлага нэмэгдэж байна [4].

Харин эдгээр хосолсон болон бүрэн цахилгаан автомашинуудын эрчим хүчийг хуримтлуулах зорилгоор 3 төрлийн батарейг ашиглаж байна. Үүнд: литийн ионы батарейг бүрэн цахилгаан автомашинуудад, NiMH батарейг хосолсон хөдөлгүүрт автомашинуудад, хар тугалга хүчлийн батарейг бүх төрлийн автомашинуудад хэрэглэж байна [5]. Эдгээр батарейнууд дундаас NiMH батарей нь Монгол улсад хамгийн түгээмэл хэрэглэгдэж байгаа буюу бидний сайн мэдэх Toyota Prius загварын хосолсон хөдөлгүүртэй авто автомашинуудын батарей юм. Япон улсаас

импортоор орж ирж байгаа хосолсон хөдөлгүүртэй автомашинууд нь тухайн улсдаа ашиглагдсан хуучин тээврийн хэрэгслүүд байдаг учир батарейн ашиглалтын хугацаа нь (life time) богиноссон байдаг. Үүнээс шалтгаалж хэрэглээнд явж байгаа хосолсон хөдөлгүүртэй автомашинуудын батарей богино хугацаанд нурах, багтаамж нь буурах зэрэг сөрөг нөлөө үзүүлдэг учир зайлшгүй солих нөхцөл бүрддэг. Харин эдгээр хуучирсан, багтаамж нь буурсан NiMH батарейг үргэлжлүүлэн автомашинуудад ашиглах боломжгүй тул ихэнх тохиолдолд хаягдал болж байна. Харин Монгол улсад яг одоогийн байдлаар NiMH батарейг дахин ашиглах болон боловсруулах тусгай зориулалтын үйлдвэр байгуулагдаагүй байгаа нь эдгээр батарей хогийн цэгт болон байгальд шууд хаягдах нөхцөл бүрдээд байна. Харамсалтай нь эдгээр хаягдал NiMH батарей нь хүчтэй шүлтийн электролитийн уусмал, шилжилтийн металл болон газрын ховор элемент зэрэг байгаль орчинд хортой химийн аюултай хог хаягдлуудыг ихээр үүсгэдэг [6]. Тиймээс эдгээр хаягдал NiMH батарейг дахин ашиглах боловсруулах шаардлага Монгол улсад зайлшгүй тулгараад байна.

Хаягдал NiMH батарейн электродын материалын жингийн 42%-ийг дангаараа никель бүрдүүлдэг бол харин газрын ховор элемент ойролцоогоор 17%-ийг тус бүр эзэлдэг байна [7], [8]. Эдгээр үнэт металлууд тэр дундаа никель нь цахилгаан химийн урвалын өндөр идэвхитэй учир төрөл бүрийн химийн үйлдвэрүүдэд катализатор болон металлургагт ашиглаж байна [9]. Тийм учраас хаягдал NiMH батарейнаас эдгээр үнэт болон

ховор металлуудыг ялган авч дэлхийн зах зээлд өндөр эрэлттэй байгаа металлын хэрэгцээг хангах, дэвшилтэд материал бүхий электродын материал гарган авч байгальд ээлтэй эрчим хүч үйлдвэрлэх, шинээр батарейн электродын материалыг бэлтгэхэд ашиглах зэрэг хаягдал батарейг эдийн засгийн эргэлтэнд оруулах боломж бий [10]. Энэхүү судагаагаар бид хаягдал NiMH батарейн катодын материалыг хүчилд уусгаж, Ni²⁺ ионы уусмалыг гарган авч түүнээсээ микро хэмжээтэй нунтаг Ni-ийг химийн тунадасжуулах аргаар гарган авлаа. Гарган авсан нунтаг дээжийн бүтэц болон цахилгаан химийн судалгааг бид өмнөх ажилдаа хийж гүйцэтгэсэн бол харин энэхүү ажилд байгаль орчинд ээлтэй, ногоон эрчим хүч гаргаж авахад ашиглагдах устөрөгч болон хүчилтөрөгч ялгаруулах урвалд Ni-ийг катализатороор ашиглаж цахилгаан химийн идэвхийг тодорхойллоо.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Ашигласан бодис урвалж

NiMH хаягдал батарейнаас ялгаж авсан катодын материал, концентрацитай давсны хүчил (HCl), этанол (C₂H₅O, 99.9%), Гидразин (N₂H₂, 80%), Калийн гидроксид (KOH, 99.6%), Натрийн гидроксид (NaOH, 99.6%), Нэрмэл ус.

Арга зүй

Нунтаг никель (Ni)-ийн дээжийг гаргаж авахдаа хаягдал NiMH батарейн катодын материалыг эх бодисоор ашигласан. Хаягдал NiMH батарейг механикаар задалж дотроос нь катодын хар нунтаг материалыг ялган авч уур нухуураар нунтагласан. Үүний дараагаар давсны хүчлийн шингэрүүлсэн уусмалыг pH 0.4 байхаар тохируулан найруулсан. Энэхүү бэлдсэн давсны хүчил дээр нунтагласан катодын материалыг нэмж 30 минутын турш соронзон хутгуурт хутгаж уусмалын орчинг сулруулсан давсны хүчлийн уусмалыг нэмэх замаар Ph-ийг 0.4 утгад тогтмол барьсан. Бэлдсэн Ni²⁺ ионы уусмалыг соронзон хутгуур дээр 60°C температур хүртэл халааж түүн дээрээ 10 мл 0.425M NaOH-ийн шүлтийн уусмалыг нэмж өгнө. Харин хүчтэй ангижруулагч болох гидразины уусмалаас 15.7 мл-ийг нэмж 30 минут тасралтгүй хутгасны дараа хар өнгийн тунадас үүссэнээр нунтаг Ni-ийн дээжийг гаргаж авсан. Гарган авсан нунтаг Ni-ийн дээжийг уусмалаас соронзын тусламжтай салган авч нэрмэл ус

болон этанолаар 3 удаа угааж, хатаах шүүгээнд 12 цагийн турш 50°C-д хатаасан. Гарган авсан дээжийн цахилгаан химийн хэмжилтүүдийг Epsilon Eclipse загварын циклик вольтамметрээр гүйцэтгэв. Хэмжилтэнд харьцуулагч электродоор Ag/AgCl, тоологч электродоор цагаан алт (Pt), ажлын электродоор 3 мм диаметртэй нүүрстөрөгч (glassy carbon electrode GCE)-ийн электродыг ашигласан ба хэмжилтийг 1 M-ийн KOH-ийн электролитийн уумалын орчинд хийж гүйцэтгэсэн. Электродын материалыг бэлтгэхдээ 20 мг нунтаг Ni-ийн дээжийг 20 мл этанолд 40 мкл Nafion solution барьцалдуулагчтай хамт хийж сайтар хутгаж зуурмаг байдлаар бэлдсэн. Энэхүү зуурмагаас 40 мкл-ийг таслан авч GCE дээр дусааж хатаасан. Цахилгаан химийн импеданс спектроскоп (EIS)-ийн хэмжилтийг 0.1-ээс 10 кГц давтамжийн мужид хийсэн. Цахилгаан химийн хэмжилтээс тодорхойлсон потенциалыг тэгшитгэл 1-д харуулсны дагуу устөрөгчийн исэлдэн ангижрах потенциал руу хөрвүүлсэн. Үүнд: E_{RHE} нь устөрөгчийн исэлдэн ангижрах урвалын потенциал, E_{Ag/AgCl} нь Ag/AgCl-ийн харьцуулагч электрод ашиглан хэмжиж авсан потенциал, pH нь уусмалын орчин, харин IR нь гүйдлийн уналт болно.

$$E_{RHE} = E_{Ag/AgCl} + 0.21 + 0.059 \times pH - IR \quad (1)$$

III. ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

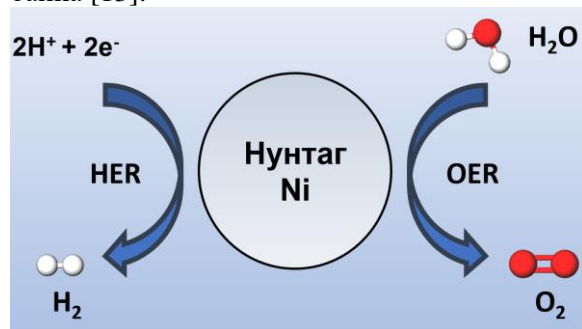
Бүтцийн анализ:

Бидний гаргаж авсан нунтаг Ni-ийн дээжийн бүтэц болон морфологийн анализийг өмнө хэвлэгдсэн ажилд дэлгэрэнгүй дурьдсан болно [11]. Рентген дифракцийн хэмжилтийн үр дүнгээс харахад гидразинаар ангижруулан тунадасжуулж гарган авсан нунтаг никель дээж нь Fm-3m огторгуйн бүлэгт харьяалагдах, куб бүтэцтэй кристаллографын (111), (200), (222) хатгайд харгалзах, 2θ өнцгийн 44.54°, 51.90° болон 76.48° утгуудад дифракцийн пикүүд тус тус илэрсэн. Рентген дифракцийн хэмжилтийн үр дүнгээс харахад ямар нэгэн бохирдол болон нэмэлт фаз илрээгүй нь NiMH хаягдал батарейн катодын материалыг давсны хүчлээр уусгасан NiCl₂-ийн уусмалаас нунтаг Ni-ийг цэврээр ялган авч чадсаныг илэрхийлж байна. Гарган авсан дээжийн дундаж кристаллитийн хэмжээг Шеррерийн тэгшитгэлээр бодож тооцоолоход нунтаг Ni дээжийн хувьд 14.12 нм байсан [11].

Гаргаж авсан Ni дээж нь 40-50 нм хэмжээтэй жижиг партиклуудаас бүрдэж байгааг бидний өмнөх судалгааны ажлаас харж болно. Харин тухайн партиклууд урвалын үед хоорондоо бөөгнөрч 1.5 мкм хэмжээтэй микробүтэц үүсгэсэн болох нь тогтоогдсон. Мөн тухайн дээжийн элементийн агуулгыг тодорхойлохын тулд EDS-ийн хэмжилт хийсэн бөгөөд бидний гаргаж авсан нунтаг Ni дээжид ямар нэгэн өөр төрлийн бохирдол буюу металлын ионууд илрээгүй, дан ганц цэвэр никель байгааг харуулж байсан [11].

Цахилгаан химийн анализ:

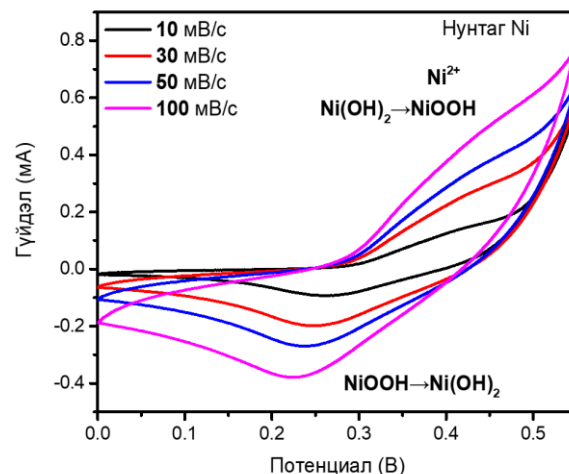
Бидний гаргаж авсан нунтаг Ni-ийн хамгийн түгээмэл хэрэглээ нь ногоон эрчим хүч буюу устөрөгчийн эрчим хүчний гол эх үүсвэр болох устөрөгчийн хийг гаргаж авах урвалд ашиглах юм. Энэхүү урвалын үеэр хамгийн түрүүнд шүлтийн орчинд нунтаг никелийн гадаргуу дээр эерэг цэнэгтэй устөрөгчийн ион физик адсорбицод орж устөрөгчийн ионыг хуримтлуулах ба үүний дараагаар хэлхээнд үүсч байгаа гүйдлийн зөрүүгээр никелийн гадаргуу дээр цахилгаан гүйдэл гүйснээр H^+ ион нь ангижарч H^0 болно. Харин эдгээр саармаг цэнэгтэй устөрөгчийн ионууд хоорондоо ковалент холбоогоор холбогдож H_2 хий буюу устөрөгчийн хийг үүсгэнэ [12]. Харин хүчилтөрөгч ялгаруулах процессын үед үүний эсэргээр буюу нунтаг никель дээжийн гадаргуу дээр адсорбицлогдсон устөрөгчийн ионууд хэлхээнээс өгч буй гүйдлийн нөлөөгөөр исэлдэж O_2 хий үүсдэг байна [13].



Зураг 1. Нунтаг Ni дээжийн гадаргуу дээр явагдах цахилгаан химийн урвалын механизм.

Нунтаг Ni нь исэлдэн ангижрах урвалын катализатор болон бусад төрлийн батарейн электродын материал болох боломжтой эсэхийг тодорхойлох зорилгоор циклик-вольтаметрийн хэмжилтийг хийж гүйцэтгэсэн. Зураг 2-т үзүүлснээр нунтаг Ni дээжийн CV хэмжилтийн үр дүнд исэлдэн ангижрах хос пик илэрсэн. Энэхүү исэлдэн

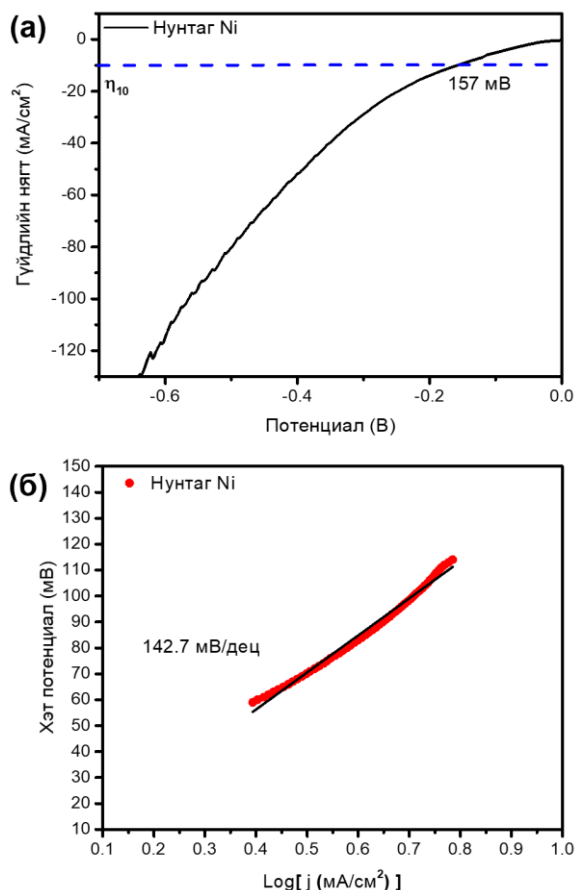
ангижрах урвалын хос пикүүдэд харгалзах гүйдлийн утгууд хэмжилтийн алхмыг нэмэх тусам өсөх үзэгдэл ажиглагдсан. Мөн нунтаг Ni дээжийн исэлдэх урвалын пик нь хэмжилтийн алхмыг нэмэх тусам гүйдлийн утгын ихсэх чиглэлрүү шилжиж байсан бол харин эсэргээрээ ангижрах урвалын пик нь гүйдлийн утга буурах чиглэлрүү шилжиж байгаа нь харагдсан. Үүнээс харахад бидний гаргаж авсан нунтаг Ni дээж нь гадаргуу дээр цахилгаан химийн исэлдэн ангижрах урвал буюу Фарадын урвалыг явуулах өндөр идэвхитэй болох нь батлагдсан. Учир нь нунтаг никель нь КОН-ийн шүлтийн электролитийн уусмалын орчинд исэлдэж $Ni(OH)_2$ нэгдлийг үүсгэдэгтэй холбоотой ба энэхүү нэгдэл нь цаашид исэлдэн ангижрах урвалд орох замаар $NiOOH$ болон $Ni(OH)_2$ гэсэн ялгаатай 2 фазыг үүсгэж байгааг харж болно [14].



Зураг 2. (а) Нунтаг Ni дээжийн циклик-вольтаметрийн хэмжилтийн үр дүн

Зураг 3-т нунтаг Ni дээжийг устөрөгч ялгаруулах цахилгаан химийн урвалд катализатороор ашигласан үр дүнг харуулж байна. Зураг 3а-д харуулснаар тухайн дээжийн гүйдлийн нягт хүчдэлийн сөрөг утгад огцом буурч байгаа нь тухайн дээжийн гадаргуу дээр H^+ ион ангижирч H_2 буюу устөрөгчийн молекул болж байгааг илтгэж байна. Үүнээс бид устөрөгч ялгаруулах урвалын хэт потенциалыг тодорхойлсон. Ингэхдээ гүйдлийн нягтыг $-10\text{mA}/\text{cm}^2$ утгад хүргэхэд шаардлагатай хүчдэлийн утгаас устөрөгчийн стандарт исэлдэн ангижрах урвалын потенциал болох 0В-ийг хасаж тооцоолсон. Бидний гаргаж авсан нунтаг Ni дээж нь устөрөгч ялгаруулах урвалд 157 мВ хэт хүчдэл үзүүлсэн. Зураг 3б-д устөрөгч

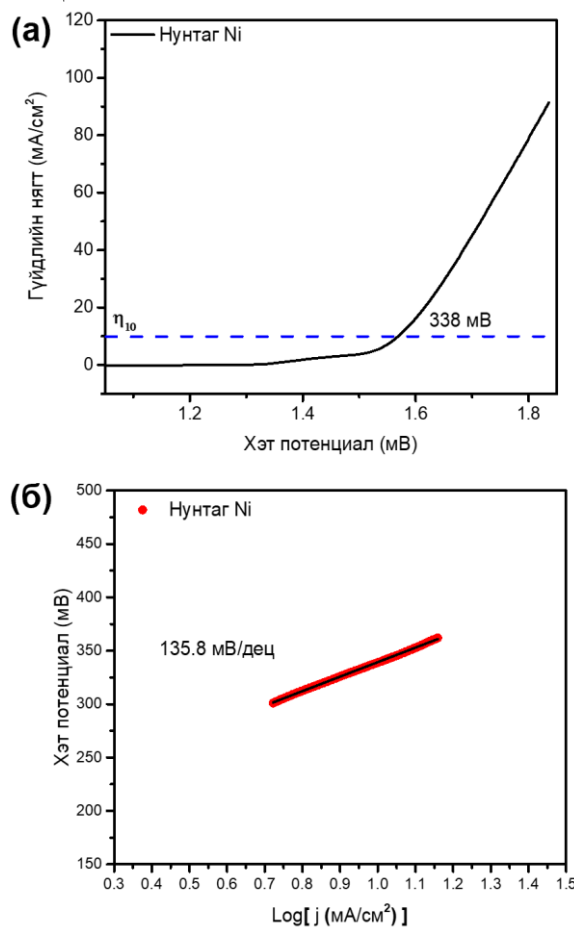
ялгаруулах урвалын Тафелийн налалтийг (Tafel slop) байгуулж налуугийн коэффициентыг тодорхойлоход 142.7 мВ/дец гарсан. Бидний гаргаж авсан дээж харьцангуй бага хэт хүчдэлтэй боловч гүйдлийн утгыг нэмэгдүүлэх тохиолдолд харьцангуй өндөр хүчдэлийн утга шаардаж байгааг харуулж байна.



Зураг 3. (a) Нунтаг Ni дээжийн Устөрөгч ялгаруулах урвалын циклик-вольтамметрийн хэмжилтийн үр дүн, (б) Тафелийн налалт.

Зураг 4-т гаргаж авсан нунтаг никелийн цахилгаан химийн катализаторын идэвхийг хүчилтөрөгч ялгаруулах урвал (oxygen evolution reaction OER)-д ашигласан үр дүнг харуулав. Зураг 4а-д харуулснаар нунтаг Ni дээж нь исэлдэн ангижрах урвалын хүчдэлийн мужаас цааш буюу 1.4 В-оос их хүчдэлийн утга дээр огцом өсөлт үзүүлсэн. Энэхүү өсөлт нь шүлтийн орчинд хүчилтөрөгчийн сөрөг цэнэгтэй ионыг исэлдүүлж O_2 буюу хүчилтөрөгчийн молекулыг үүсгэж байгааг харуулж байна. Энэхүү үр дүнгээс бидний гаргаж авсан нунтаг никелийн хэт потенциал буюу гүйдлийн утгыг 10 mA/cm^2 утгад хүргэхэд шаардлагатай хүчдэлийн утгыг тооцоолж

олсон. Хэмжилтээр тодорхойлсон хүчдэлийн утгаас устөрөгчийн исэлдэн ангижрах урвалын потенциал болох 1.23 В-ийг хасаж тооцоолсон.



Зураг 4. (a) Нунтаг Ni дээжийн хүчилтөрөгч ялгаруулах урвалын циклик-вольтамметрийн хэмжилтийн үр дүн, (б) Тафелийн налалт.

Гарган авсан нунтаг никель дээжийн хэт хүчдэл нь 338мВ гарсан нь түгээмэл хэрэглэгддэг уламжлалт RuO_2 -ийн катализаторын хэт хүчдэл 320мВ байдагтай харьцуулж үзэхэд тун ойролцоо буюу зөрүү нь 18мВ байгаа нь бидний гарган авсан дээж цахилгаан химийн урвалын катализаторын өндөр идэвхитэй байгааг харуулж байна [15], [16]. Мөн зураг 4б-д тухайн дээжийн Тафелийн налалтийг байгуулж налуугийн коэффициентыг тодорхойлоход 135.8 мВ/дец гарсан нь харьцангуй бага хэт хүчдэлтэй боловч гүйдлийн утгыг нэмэгдүүлэх тохиолдолд харьцангуй өндөр хүчдэлийн утга шаардаж байгааг харуулж байна.

IV. ДҮГНЭЛТ

Хаягдал NiMH батарейн катодын материалаас гаргаж авсан нунтаг Ni дээжийг

устөрөгч болон хүчилтөрөгч ялгаруулах урвалд катализатороор ашиглах үед хэт хүчдэл нь тус бүр 197 болон 338 мВ байгаа нь уламжлалт катализаторуудтай өрсөлдөхүйц катализаторын материал болох нь тогтоогдлоо. Харин Тафелийн налалтаас тодорхойлсон хүчдэлийн утгууд нь харьцангуй өндөр байсан нь бидний гаргаж авсан дээжийн R_{ct} буюу цэнэг дамжуулах эсэргүүцэл хэт өндөр байгаатай холбоотой гэж таамаглаж байна. Тийм учраас нунтаг Ni дээжийн морфологийг илүү жижиг хэмжээтэй гарган авч эсэргүүцлийг бууруулж, илүү катализаторын идэвхи сайтай дээж гарган авах боломжтой гэж үзэж байна.

IV. ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгаа нь ШУТС-ийн 2022/102 тоот дугаартай төслийн санхүүжилтийн хүрээнд хийгдэв.

V. АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] R. Nepal and N. Paija, “Energy security, electricity, population and economic growth: The case of a developing South Asian resource-rich economy,” *Energy Policy*, vol. 132, pp. 771–781, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.054>.
- [2] J. Wang and W. Azam, “Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries,” *Geoscience Frontiers*, vol. 15, no. 2, p. 101757, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>.
- [3] E. Lindstad, T. Ø. Ask, P. Cariou, G. S. Eskeland, and A. Riialand, “Wise use of renewable energy in transport,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 119, p. 103713, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103713>.
- [4] I. Veza, M. Z. Asy’ari, M. Idris, V. Epin, I. M. Rizwanul Fattah, and M. Spraggon, “Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 82, pp. 459–467, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.020>.

- [5] F. Mohammadi and M. Saif, “A comprehensive overview of electric vehicle batteries market,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 3, p. 100127, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100127>.
- [6] D. A. Bertuol, A. M. Bernardes, and J. A. S. Tenório, “Spent NiMH batteries—The role of selective precipitation in the recovery of valuable metals,” *J Power Sources*, vol. 193, no. 2, pp. 914–923, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.05.014>.
- [7] B. Ebin, M. Petranikova, and C. Ekberg, “Physical separation, mechanical enrichment and recycling-oriented characterization of spent NiMH batteries,” *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 20, no. 4, pp. 2018–2027, 2018, doi: [10.1007/s10163-018-0751-4](https://doi.org/10.1007/s10163-018-0751-4).
- [8] S.-L. Lin *et al.*, “Characterization of spent nickel–metal hydride batteries and a preliminary economic evaluation of the recovery processes,” *J Air Waste Manage Assoc*, vol. 66, no. 3, pp. 296–306, Mar. 2016, doi: [10.1080/10962247.2015.1131206](https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1131206).
- [9] V. P. Ananikov, “Nickel: The ‘Spirited Horse’ of Transition Metal Catalysis,” *ACS Catal*, vol. 5, no. 3, pp. 1964–1971, Mar. 2015, doi: [10.1021/acscatal.5b00072](https://doi.org/10.1021/acscatal.5b00072).
- [10] C. O. Iloeje *et al.*, “A systematic analysis of the costs and environmental impacts of critical materials recovery from hybrid electric vehicle batteries in the U.S.,” *iScience*, vol. 25, no. 9, p. 104830, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104830>.
- [11] I. Batsukh, M. Adiya, S. Lkhagvajav, S. Galsan, M. Gansukh, and M. Batmunkh, “Recovering Nickel-Based Materials from Spent NiMH Batteries for Electrochemical Applications,” *ChemElectroChem*, vol. 11, no. 12, p. e202400135, 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/celec.202400135>.
- [12] K. Gothandapani *et al.*, “Nickel nanoparticles supported on carbon surface as an electrocatalyst for hydrogen

- evolution reaction,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1137–1146, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.027>.
- [13] P. Acharya *et al.*, “Chemical Structure of Fe–Ni Nanoparticles for Efficient Oxygen Evolution Reaction Electrocatalysis,” *ACS Omega*, vol. 4, no. 17, pp. 17209–17222, Oct. 2019, doi: [10.1021/acsomega.9b01692](https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01692).
- [14] A. Seghioer, J. Chevalet, A. Barhoun, and F. Lantelme, “Electrochemical oxidation of nickel in alkaline solutions: a voltammetric study and modelling,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 442, no. 1, pp. 113–123, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(97\)00498-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(97)00498-1).
- [15] N. Cong *et al.*, “Nanoporous RuO₂ characterized by RuO(OH)₂ surface phase as an efficient bifunctional catalyst for overall water splitting in alkaline solution,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 881, p. 114955, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114955>.
- [16] Y. Qin *et al.*, “RuO₂ electronic structure and lattice strain dual engineering for enhanced acidic oxygen evolution reaction performance,” *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, p. 3784, 2022, doi: [10.1038/s41467-022-31468-0](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31468-0).

ABSTRACT

In this study, we examined the electrochemical applications of powder nickel synthesized from the cathode material of spent NiMH batteries. X-ray diffraction measurements indicated that our synthesized powder sample exhibited phase purity and possessed a cubic structure with a space group of Fm-3m. Powder nickel samples attached to the surface of a glassy carbon electrode (GCE) are used as an electrochemical catalyst and showed overpotential values of 172 mV and 338 mV for HER and OER respectively. The overpotentials obtained for Ni microparticles were relatively closer to RuO₂ conventional noble metal catalysts for electrochemical water splitting technologies. Therefore, we assume that further compositional, and morphological modification for powder nickel recovered from spent NiMH batteries can result in increased electrochemical activity toward water-splitting reactions.