



Хүрэн нүүрсний хийжүүлэлтийн процессын параметрийн оновчтой утгыг тодорхойлсон судалгааны үр дүнгээс

Авирмэд Түмэнбаяр^{1*}, Бүдээбазар Авид², Болд Тунгалагтамир³, Чойдорж Дашпунцаг¹

¹Эрчим Хүчний Сургууль, Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Улаанбаатар 14191, Монгол улс
²Нүүрсний хими технологийн лаборатори, Хими, Химийн Технологийн Хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар 13330, Монгол улс

³Хэрэглээний Шинжлэх Ухааны Сургууль, Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Улаанбаатар 14191, Монгол улс

*E-mail: tumee_79@must.edu.mn

ORCID: [0000-0002-5460-6054](https://orcid.org/0000-0002-5460-6054)

Хүлээн авсан: 18.11.2022

Хяналтанд: 25.11.2022

Хэвлэлтэнд авсан: 30.12.2022

Хураангуй: Хүрэн нүүрснийг эрчим хүчний зориулалтаар хийжүүлж, түүнд нөлөөлөх үндсэн параметруудийн оновчтой утгыг тодорхойлох замаар шатах хийн илчлэгийг дээшлүүлж, импортоор авдаг мазутыг орлуулан эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, өртөг зардлыг бууруулах боломжийг тооцоход энэхүү судалгааны ажил зорьсон болно. Ингэхдээ хийжүүлэлтийн даралтыг 1-25 бар, температур нь 200-1000°C, үлээлгийн агаарын зарцуулалт 50-250 кг/ц, усны уурын зарцуулалт 5-50 кг/ц байх хязгаарт 3073 удаагийн туршилтыг гүйцэтгэсэн. Судалгааны ажлын үр дүнд Багануур ба Шивээ-Овоогийн хүрэн нүүрсний Аспен плас (Aspen plus) программ дээр хийсэн хийжүүлэлтийн процессоос үүсэх шатах хийн найрлага, илчлэгийг илэрхийлэх зохих шинжүүрүүдээр шалгагдсан, үнэмшил өндөртэй шугаман биш регрессийн математик загваруудыг гарган үр дүнг Matlab программ дээр кодлон параметруудийн оновчтой утгыг Багануурын нүүрсэнд $P^*=8$ бар, $T^*=700^\circ\text{C}$, $G_{\text{aг}}^*=100$ кг/ц, $G_{\text{уур}}^*=5$ кг/ц байхад нүүрсний шатах хийн найрлага дахь $\text{CO}=40.8\%$, $\text{H}_2=23.16\%$, $\text{CH}_4=4.5\%$, илчлэг нь $Q_{\text{до}}^{\text{аж}} = 2346.4$ ккал/м³, Шивээ-Овоогийн нүүрсэнд $P^*=10$ бар, $T^*=700^\circ\text{C}$, $G_{\text{аг}}^*=80$ кг/ц, $G_{\text{уур}}^*=5$ кг/ц байхад нүүрсний шатах хийн найрлага дахь $\text{CO}=28.7\%$, $\text{H}_2=25.5\%$, $\text{CH}_4=3.4\%$, илчлэг нь $Q_{\text{до}}^{\text{аж}} = 1740$ ккал/м³ гэж тодорхойлсон. Судалгааны ажлын хүрээнд гаргаж авсан дээрх үр дүн, математик загварыг ашиглан үйлдвэрлэлийн процессыг урьдчилан тооцоолох, төлөвлөх, удирдах болон эрчим хүчний зориулалттай шатах хий үйлдвэрлэх хийжүүлэлтийн ТЭЗҮ-ийг боловсруулахад зарцуулагдах цаг хугацаа, хөрөнгө мөнгийг хэмнэх давуу талтай. Энэхүү технологийг нэвтрүүлснээр 1 Гкал дулаан боловсруулахад Багануурын нүүрсийг хийжүүлэн ашиглахад гарах зардал нь мазутыг түлэхэд гарах зардлаас 6.41 дахин бага байх боломжтой гэсэн тойм тооцоо учир цаашдаа эрчим хүчний зориулалттай шатах хий үйлдвэрлэх технологийг эрчим хүчний үйлдвэрүүдийг түшиглэн барих тал дээр судалгаа, тооцооллыг хийх нь ач холбогдолтой.

Түлхүүр үг: хийн генератор, уур-агаар, үлээлэг, даралт, температур

ОРШИЛ

Монгол улсын түлш, эрчим хүчний балансад хатуу түлш болох нүүрс зонхилдог бөгөөд нарийвчилсан хайгуулаар баталгаажсан 37.4 тэрбум тонн [1,2] нүүрсний ихэнх хэсгийг түүхийгээр шууд шатаах, экспортлох, зарим хэсгийг баяжуулан [3] нэмүү өртөг шингэсэн бүтээгдэхүүн болгон экспортолж байна.

Дэлхийн хөгжингүй орнуудад дэлхийн дулаарал, байгаль орчны бохирдол, эдийн засгийн үр ашгийн үүднээс нүүрсийг дулааны аргаар боловсруулалт хийх, хийжүүлэлт, шингэрүүлэлт, баяжуулалтын аргууд [2]-ыг ашиглан илүү өндөр үр ашигтай, нэмүү өртөг шингэсэн, байгаль орчинд хал багатай бүтээгдэхүүн болгон хувиргаж нүүрсний үйлдвэрлэлийг түшиглэсэн химийн болон металлургийн үйлдвэрүүдийг хөгжүүлж байна [4]. Иймд манай орны хувьд цаашдаа нүүрснийг эрчим хүчний зориулалтаар гүнзгий боловсруулан ашиглах шаардлага урган гарч байна.

Хүрэн нүүрсийг эрчим хүчний зориулалтаар хийжүүлж, түүнд нөлөөлөх үндсэн параметруудийн оновчтой утгыг тодорхойлох замаар шатах хийн дулаан гаргах чадвар буюу илчлэгийг дээшлүүлж, импортын шингэн түлш мазутыг орлуулан ашигласнаар эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, өртөг зардал, бүтээгдэхүүний өөрийн өртгийг бууруулах, үндэсний мэргэжлийн боловсон хүчнийг бэлдэх, улмаар хийжүүлэлтийн технологиудыг нутагшуулах, ашиглах боломжтой. Хэдийгээр хүрэн нүүрснээс гарган авсан эрчим хүчний зориулалттай шатах хий нь харьцангуй илчлэг бага [5]-тай ч импортын түлшнээс өртөг хямд, ашиглахад байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөлөл түүхий нүүрс, мазутаас бага байх давуу талууд [6]-тай байх болно.

Түүхэн хөгжлийн явцаас харахад нүүрсний судалгааны салбар өндөр хөгжсөн Англи, АНУ, ОХУ, БНСУ, Япон, Герман зэрэг олон орны

эрдэмтэн судлаачид ихэвчлэн хийж ирсэн бөгөөд ингэхдээ өөр өөр цаг хугацаа, орон зайд хийжүүлэх процессын судалгааг явуулж, мөн өөрсдийн арга, судалгаанд үндэслэсэн хийжүүлэлтийн онол, арга технологийг боловсруулж ирсэн.

Ялангуяа өнгөрсөн зууны эхний хагаст, хуучнаар ЗСБНХУ-ын Шинжлэх ухааны академийн харьяа хүрээлэнгүүд, ХБНГУ-ын Макс-Планкийн Нүүрсний судалгааны хүрээлэн болон Берлины инженерийн Их Сургуулийн Судалгааны хүрээлэн, БергБау-Форшенгийн хүрээлэнгүүд энэ чиглэлээр ихээхэн судалгаа, туршилтын ажлуудыг гүйцэтгэсэн нь хүрэн нүүрсийг хийжүүлэн үйлдвэрлэлд ашиглах технологийг хөгжүүлэх асуудал давамгайлж байсныг харуулж байна [4-9].

Хийжүүлэлтийн технологийн эхэн үеийн дан агаарын үлээлгэтэй, атмосферийн даралт дор хийжүүлэлттэй хийн генераторуудыг технологийн дэвшил гарсанаар халж, орчин цагт Лурги, Винклер, Копперс-Тотцекийн, Велман-Галушийн болон бусад олон төрлийн [8,10-15] үйлдвэрлэлийн зориулалттай хүчилтөрөгч, усны уурын үлээлгэтэйгээр өндөр даралт дор ажиллах ойролцоогоор 1800°K температурт хийжүүлэлттэй хийн генераторуудыг ашигласнаар үр дүнд шатах хийн метаны агууламжийг өсгөж, 30 МДж/м³ хүртэл илчлэгтэй хийг хатуу түлшний хийжүүлэлтээр гаргах боломжтой болж байна. Хийжүүлэлтийн голлох судалгааны ажилд түлш-агаарын урвалын стехиометрийн эквивалент харьцаа, агаар-түлшний, уур-түлшний, уур-хүчилтөрөгчийн харьцаа, хийжүүлэлтийн температурын хоорондын хамаарал, Гиббсийн энергийн хамгийн бага утгыг тодорхойлох аргачлал зэргийг ашиглан загварчлалын төрөл бүрийн программ хэрэглэсэн үр дүн нэлээд байна [16-19].

Сүүлийн жилүүдэд хийжүүлэх процессын онолын судалгаанд Массачусеттсийн их сургуулиас гаралтай Аспен плас (Aspen plus) програмыг өргөн ашиглаж даралт, температур, нүүрс ба хийжүүлэгч агентын төрөл, агентын агаар, усны уурын харьцаан дээр суурилсан [20-24] судалгаануудыг хийж байна. Тухайлбал, К.Ананд, Кишори нар биомассын хийжүүлэлтийн процессыг буцлах давхаргатай хийн генераторт явуулж, түүний хийн найрлагыг усны уур-биомасс, агаар-биомассын харьцаа болон температураас хамааруулан тодорхойлсон [20] бол С.Илайх нар мөн аргачлалыг ашиглан хийн найрлагыг усны уур-биомасс, агаар-биомассын харьцаа болон даралт, температураас хамааруулан тодорхойлсон байна [21]. Рамзан тэргүүтэй эрдэмтэд хүрэн нүүрсийг хийжүүлэх процессыг загварчлан түүний стехиометрийн харьцаа, уур-нүүрсний харьцаа, хийжүүлэлтийн температур, агентын температур зэргийн нөлөөллийг тооцон хийн илчлэг хийжүүлэлтийн агаарын зарцуулалтаас

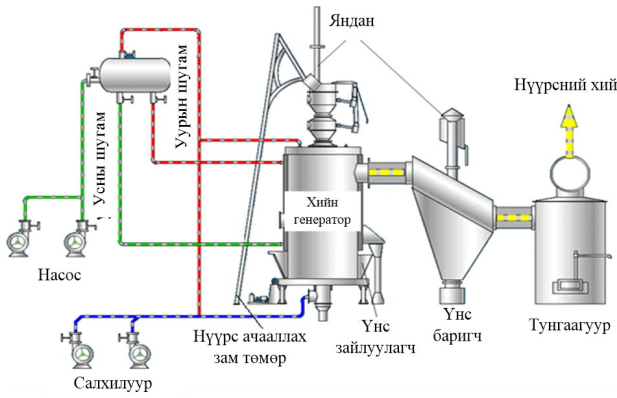
урвуу, усны уурын зарцуулалт болон хийжүүлэлтийн агентын температураас шууд хамаардгийг тогтоожээ [24].

Шиндон зэрэг судлаачид гурван үет урсгалд нь хийжүүлэх Тексако маягийн хийн генераторын Аспен плас дээрх загварчлалыг хийж, хийн найрлага, шилжсэн нүүрстөрөгч, хийжүүлэлтийн температур зэргийг тооцож, загварын үр дүнг бусад судлаачдын гүйцэтгэсэн туршилтын үр дүнтэй харьцуулан бодит үр дүнг урьдчилан таамаглах боломжтой гэсэн дүгнэлтийг хийсэн байна [25]. Түүнчлэн зарим судлаачид Пакистаны томоохон нүүрсний ордын нүүрсийг хийжүүлэх процессын мэдрэмжийн шинжилгээг Аспен плас програмд байдаг RK-Soave аргаар хийж, усны уур ба нүүрсний харьцаанаас хамааруулан устөрөгч ба нүүрстөрөгчийн монооксидын гарцыг тогтооход 95.76%, хийжүүлэлтийн ашигт үйлийн коэффициент 54.41%-д хүрсэн байна [26]. Мөн Гиббсийн чөлөөт энергийн хамгийн бага утга дахь хийжүүлэлтийн тэнцвэрийн тогтмолыг илэрхийлж, түүнээс хамааруулан хийн найрлагыг тооцох аргачлалыг зарим судлаачид ашиглажээ [27-31]. Энэ аргаар тооцоход хийжүүлэлтийн температур, даралтын нөлөөллийг илүү авч үздэг бөгөөд үүнийг бас Аспен плас програмд Gibbs reactor гэсэн хийн генераторын сонголтоор оруулж өгсөн байдаг.

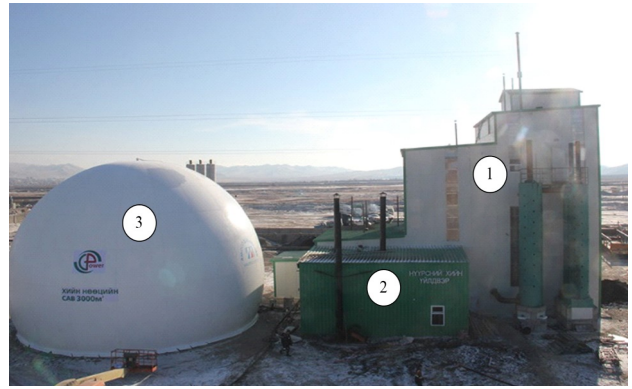
Энэхүү програмаар Багануур ба Шивээ-Овоогийн хүрэн нүүрсний хийжүүлэлтийн загваруудыг хийж, хийжүүлэлтийн процессын голлох параметрууд болон хийн гарцын хоорондын хамаарлаас тэдгээрийн регрессийн математик загваруудыг боловсруулж, улмаар шатах хийн илчлэг хамгийн өндөр утгатай байх нөхцөлийг хангах параметруудийн оновчтой утгыг тогтоож болох шугаман биш математик загварыг гаргалаа.

СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

Бид судалгаандаа манайд цөөн тоогоор ашиглаж буй бусад улсуудад түгээмэл ашиглагдаж байгаа нүүрснээс эрчим хүчний зориулалттай шатах хий үйлдвэрлэх хөдөлгөөнгүй үет хийжүүлэх генераторын төрөл болох нэг үет даралтад ажиллах хийн генераторыг сонгов. Энэ хийн генератор нь уур-агаарын үлээлгэтэй, атмосферийн ба түүнээс дээш даралт дор ажиллах боломжтой, энгийн хийц технологитой, хямд өртөгтэй учир манай оронд нутагшуулан ашиглахад ихээхэн тохиромжтой юм. Энэ хийн генераторын технологийн бүдүүвчийг 1 дугаар зурагт харуулав. Энэ зурагт үзүүлсэн хийн генераторын хувьд ихэвчлэн атмосферийн даралтад уур-агаарын холимог үлээлгээр 900-1200°С хүртэл температурт хийжүүлэлт явуулдаг онцлогтой. Аспен плас програмын хувьд аливаа хийжүүлэлтийн загварчлалыг хийхдээ дараах арга зүй дээр тулгуурлан тооцоолдог.



Зураг 1. Нүүрс хийжүүлэх технологийн бүдүүвч



Зураг 2. Гранд Повер нүүрсний хийн үйлдвэр. 1-Үйлдвэрийн гол барилга, 2-Халаалтын зуухны газар, 3-Хий хадгалах сав.

Пенг-Робинсоны төлөвийн тэгшитгэл. 1976 онд Канадын Албертын их сургуулийн профессор Д.Б.Робинсон болон түүний шавь Д.Пенг нарын баталсан тохируулагч хэмжигдэхүүнээс хамаарсан хийн төлөвийн үндсэн тэгшитгэл [31, 32]-ээр тооцоолсон аргачлал (Peng-Rob) -ыг сонгон өгөгдөл, нөхцөлүүдээ оруулан хийсэн.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (1)$$

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij})$$

$$b = \sum_i x_i b_i \quad k_{ij} = k_{ji}$$

$$a_i = fcn(T, T_{ci}, P_{ci}, \omega_i) \quad b_i = fcn(T_{ci}, P_{ci})$$

Редлих-Квонгийн төлөвийн тэгшитгэл: 1949 онд Австрийн химийн инженер Отто Редлих болон АНУ-ын Хятад гаралтай химийн инженер Жозеф Нэнг Шүн Квон нар физик, термодинамикийн хувьд критик температураас дээш төлөвд байгаа хийн температур, даралт, эзлэхүүн илэрхийлэх [33] тэгшитгэлийг гаргажээ.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a/\sqrt{T}}{V(V+b)} \quad (2)$$

$$\sqrt{a} = \sum_i x_i \sqrt{a_i} \quad a_i = 0.42748023R^2 T_{ci}^{1.5} / P_{ci}$$

$$b = \sum_i x_i b_i \quad b_i = 0.08664035R T_{ci} / P_{ci}$$

Бид хийжүүлэлтийн процессыг туршин судлахдаа эмпирик судалгааны хэмжих, турших, загварчлах аргуудыг ашигласан бөгөөд эдгээр аргад үндэслэн өөрсдийн дэвшүүлж буй “уур-агаарын үлээлгэтэй хөдөлгөөнгүй үед хийжүүлэлт явуулах хийн генераторын үндсэн параметр буюу хувьсагч параметруудийн утгыг оновчлох замаар түүнээс гарах нүүрсний шатах хийн найрлагыг тодорхойлж,

улмаар хийн илчлэгийг нэмэгдүүлэх боломжтой” болохыг дээрх аргуудыг ашигласан хэд хэдэн туршилт, судалгааны ажлыг дараах байдлаар төлөвлөн холбогдох объект, туршилтын төхөөрөмжүүдээр технологийн дагуу гүйцэтгэсэн. Үүнд: Ажиглалт болон харьцуулалт, хэмжилтийн аргад тулгуурлан “Гранд Повер” ХХК-ийн нүүрсний хийн үйлдвэрт 2015 оны 11-р сараас 2016 оны 04-р сар хүртэл хугацаанд 4 удаа тус үйлдвэрийн нүүрсний хийн генераторын ажиллагаатай танилцан судалгаа, хэмжилтийг хийсэн бөгөөд үйлдвэрийн ерөнхий байдал, тоног төхөөрөмжийн техникийн үзүүлэлтийг хүснэгтээр харуулав.

Хүснэгт 1. Нүүрс хийжүүлэгч төхөөрөмжийн техникийн үзүүлэлт

Үзүүлэлтүүд	Хэмжих нэгж	Тоо хэмжээ
Хийн генераторын их биеийн диаметр	Мм	2000
Нүүрсний ширхэглэгийн хэмжээ	Мм	20-40 25-50 30-60
Нүүрсний зарцуулалт	кг/ц	800-900
Нүүрсний хийн хэмжээ	м ³ /ц	2500-2800
Нүүрсний хийн илчлэг (бага)	кДж/м ³	5300-7000
Тохирох түлшний төрөл	Исэлдсэн хүрэн нүүрс, барьцалдаггүй ба барьцалдах чадвар муу чулуун нүүрс	

Тус үйлдвэр нь 1 иж бүрдэл бүхий хийжүүлэх төхөөрөмж, тоос барих циклон, агаар хөргөгч, 2 иж бүрдэл давирхай барих цахилгаан шүүлтүүр, 2 иж бүрдэл чийг баригч, 3000 м³ хий хадгалах савтай [34]. Бид загварчилсан туршилтыг хийхдээ Аспен Плас v8.4 загварчлалын програм хангамж ашиглан уур-агаарын үлээлгэтэй, атмосферийн ба түүнээс дээш даралтад хүрэн нүүрсний хийжүүлэлтийн туршилтыг хийсвэр загвараар хийж, нийт 3073 удаагийн үр дүн гарган авч, тооцооллыг хийсэн. Ингэхдээ хийн генераторт орох нүүрсний

зарцуулалт (100 кг/ц) болон бусад параметруудийг тогтмол байхаар тооцож, үндсэн параметр хийжүүлэлтийн даралт, температур, үлээлгийн агент дахь агаар, усны уурын хэмжээг өөрчлөх замаар олон хувилбарт туршилтуудыг хийсэн. Үүнд:

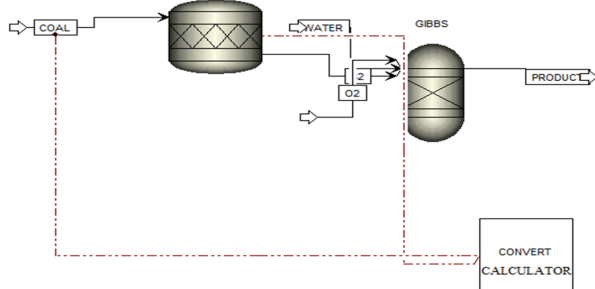
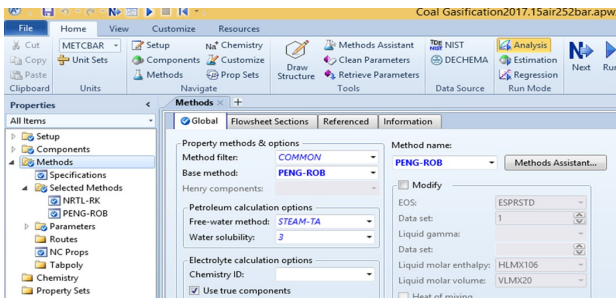
Даралт, бар – 1-25 (0.5 ба 5 бар алхамтайгаар),

Температур, °C – 200-1000 (50 ба 100°C алхамтайгаар),

Агаарын зарцуулалт, кг/ц – 50-250 (5, 10, 20 кг/ц алхамтайгаар),

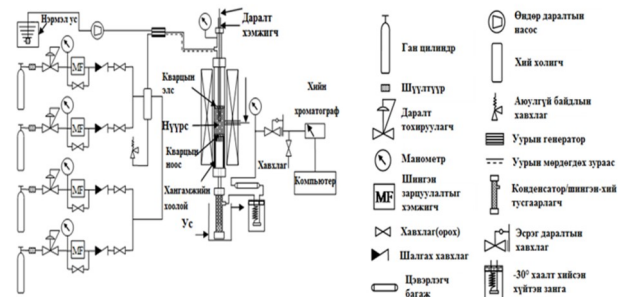
Усны уурын зарцуулалт, кг/ц -5-50 (5 кг/ц алхамтайгаар)

Тус програм хангамжийн тооцооны арга зүй болон түүнд өгөгдөл оруулах, технологийн загвар боловсруулсан байдлыг дор тайлбарлан зургуудад харуулав. Аспен плас програмд загварчлалыг дэс дараалсан үйлдлээр өгөгдөл, нөхцөлийг оруулах ба хийжүүлэлтийн загварыг гүйцэтгэнэ [37].



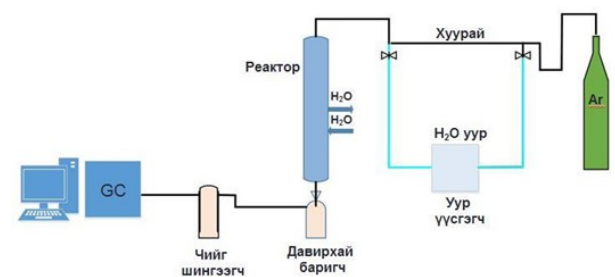
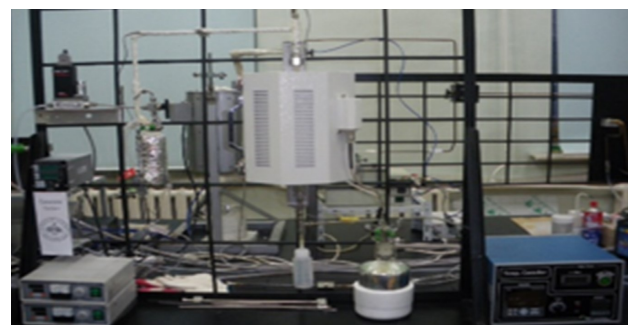
Зураг 3. Аспен плас програмд өгөгдөл оруулах болон байгуулсан хийжүүлэлтийн загвар

Өвөрмонголын Хөх хотын Аж үйлдвэрийн их сургуулийн, Химийн инженерингийн дээд сургуулийн “ӨМӨЗО-ны доод гарлын хүрэн нүүрсний цөм лаборатори”-ийн WFSM-3060TL загварын “Нүүрсний химийн үйлдвэрийн катализаторын идэвхийн үнэлгээний төхөөрөмж” дээр усны уурын үлээлгэтэй аргон хий зөөгч бие ашигласан туршилтыг гүйцэтгэсэн. Туршилтын нөхцөл: нүүрсний дээж 0.15 г, хийжүүлэлтийн даралт 0.3 МПа, урсгалын хурд 30 мл/мин (аргон-Аг), реактор халаах температурын хурд 500°C хүртэл 15°C/мин, 200°C хүрэх үед өгөх усны уур 0.057 мл/мин. Реакторын температур 500-850°C хүртэл өсгөх хурд 1.2°C/мин. Нийлэг хийн найрлагыг хийн хроматографын багажаар 5 минутын зайтайгаар хэмжиж тодорхойлсон ба туршилтын төхөөрөмж, түүний ажиллагааны схемийг дараах зурагт харуулав.



Зураг 4. FSM-3060TL загварын туршилтын төхөөрөмж ба ажиллагааны схем

Монгол улсын их сургуулийн, Шинжлэх ухааны сургуулийн “Цэвэр энергийн технологийн хөгжүүлэлтийн судалгаа” – ны лабораторид усны уурын үлээлгэтэй аргон хий зөөгч бие ашигласан туршилтыг гүйцэтгэсэн. Туршилтын нөхцөл: нүүрсний дээж 0.5 г, хийжүүлэлтийн даралт нь 0.5 МПа, урсгалын хурд 200 мл/мин (аргон-Аг), реактор халаах температурын хурд 700°C хүртэл 24°C/мин-аар 32 минут, 700°C хүргэн усны уурыг мөн адил 200 мл/мин хэмжээгээр нэмж өгөв. Реакторын температур 800°C үед хийжүүлэлтийг явуулж үүссэн нийлэг хийн найрлагыг хийн хроматографын багажаар 2 минутын зайтайгаар хэмжиж тодорхойлсон ба туршилтын төхөөрөмж, түүний ажиллагааны схемийг дараах зургуудад харуулав.



Зураг 5. Туршилтын төхөөрөмжийн харагдах байдал ба туршилт явуулах схем

ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Судалгаанд ашигласан Багануурын 2 дугаар давхаргын болон Шивээ-Овоогийн 1 дүгээр давхаргын хүрэн нүүрсний дээжийн техникийн ба элементийн шинжилгээний дүнг дараах хүснэгтүүдэд (Хүснэгт 2 ба 3) үзүүлэв.

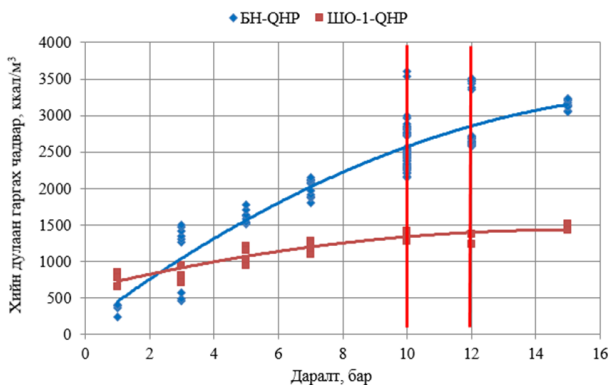
Хүснэгт 2. Багануурын нүүрсний техникийн ба элементийн шинжилгээний дүн

Техникийн шинжилгээ		
Ажлын чийг, %	W ^a	10.12
Үнслэг, %	A ^a	9.54
	A ^x	11.16
Дэгдэмхий бодис, %	V ^a	48.71
	V ^ш	58.57
Хүхэр, %	S	0.26
Дулаан гаргах чадвар, ккал/кг	Q ^{аж} _{дэ}	5689
Элементийн шинжилгээ		
Нүүрстөрөгч, %	C ^ш	60.99
Устөрөгч, %	H ^ш	3.89
Азот, %	N ^ш	1.38
Хүхэр, %	S ^{нийт}	0.47
Хүчилтөрөгч, %	O ^ш	33.27

Хүснэгт 3. Шивээ-Овоогийн нүүрсний техникийн ба элементийн шинжилгээний дүн

Техникийн шинжилгээ		
Ажлын чийг, %	W ^a	5.1
Үнслэг, %	A ^a	8.16
	A ^x	8.6
Дэгдэмхий бодис, %	V ^a	37.38
	V ^ш	43.09
Хүхэр, %	S	0.51
Элементийн шинжилгээ		
Нүүрстөрөгч, %	C ^ш	70.94
Устөрөгч, %	H ^ш	4.99
Азот, %	N ^ш	0.95
Хүхэр, %	S ^{нийт}	0.22
Хүчилтөрөгч, %	O ^ш	14.95

Хүрэн нүүрсийг эрчим хүчний зориулалттай хийжүүлэн шатах хий үйлдвэрлэх процессын загварчлалын туршилтыг анх төлөвлөхдөө параметруудийн хязгаарыг харьцангуй өргөн хязгаарт авсан боловч судалгааны явцад олон



Зураг 6. Хийжүүлэлтийн процессын даралт ба хийн илчлэг хоорондын хамаарал

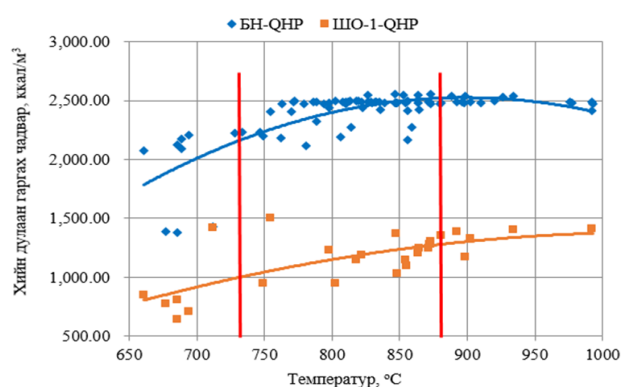
удаагийн туршилтын дүнд үндэслэн хийжүүлэх процессын үр ашигтай мужийг нарийвчлан тогтоох нь зөв гэж үзсэн бөгөөд үүн дээрээ үндэслэн зааглалтын мужийг тогтоон математик загварыг боловсруулахад ашигласан. Багануур болон Шивээ-Овоогийн ордын нүүрсний шатах хийн илчлэг нь даралт, температур, агаар ба уурын зарцуулалтаас хэрхэн хамаарах зүй тогтлыг судалсан үр дүнг Зураг 6 ба 7-д харууллаа.

Доорх 6 дугаар зургаас харахад хийжүүлэлтийн процесс дахь даралтын нөлөөлөл нь ерөнхийдөө даралтын тодорхой утга хүртэл хийн илчлэгт эерэг нөлөө үзүүлж байна. Даралтын утга харьцангуй бага буюу 5 бар хүртэл хоёр уурхайн нүүрсний шатах хийн илчлэг нь ойролцоо байхад даралтын утга цаашид нэмэгдэхэд Багануурын нүүрсний хийн илчлэг нь илүү нэмэгдсэн байна. Энэ нь даралт нэмэгдэх тутам метаны агууламж өсдөгтэй холбоотой гэж үзэж байгаа ба Багануурын нүүрснээс үүсэх метаны хэмжээ Шивээ-овоогийнхоос илүү өндөр байна гэж үзэж болно.

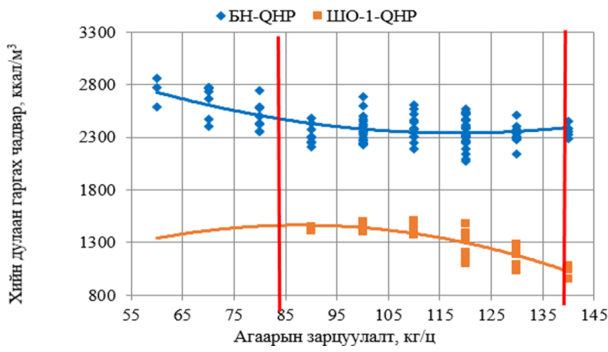
Хийжүүлэлтийн процессын температурыг 50°C-ийн алхамтайгаар 500-1300°C хүртэл нэмэгдүүлэн хийн найрлага, түүний илчлэгийг тооцож, хоёр ордын нүүрсний хувьд хий тус бүрээр харьцуулсан 7 дугаар зургаас харахад хийжүүлэлтийн температурын утга нэмэгдэхэд шатах хийн илчлэг нь түүний тодорхой утга хүртэл өсөөд түүнээс цааш нэмэгдэхэд буурах хандлагатай байна. Энэ нь шатах хийн найрлага дахь CH₄-ны агууламж 800°C, CO ба H₂-ийн агууламж 900°C хүрээд цаашид буурч байгаатай холбоотой байна.

Хийжүүлэлтэд өгөх хийжүүлэгч агент болох үлээлгийн агаарын зарцуулалтыг 10 кг/ц-ийн алхамтайгаар 80-160 кг/ц, уурын зарцуулалтыг 5кг/ц -ийн алхамтайгаар 10-50 кг/ц хүртэл нэмэгдүүлэн хийн найрлага, илчлэгийг тооцож, хоёр ордын нүүрсний хувьд хий тус бүрээр харьцуулсан үр дүнгүүдийг 8 ба 9 дүгээр зургуудад харуулав.

8 дугаар зургаас харахад хийжүүлэлтийн үлээлгийн агаарын зарцуулалтын хэмжээ нэмэгдэхэд хийн илчлэг буурч байгаа нь агаарыг хэт их өгснөөр



Зураг 7. Хийжүүлэлтийн процессын температур ба хийн илчлэг хоорондын хамаарал



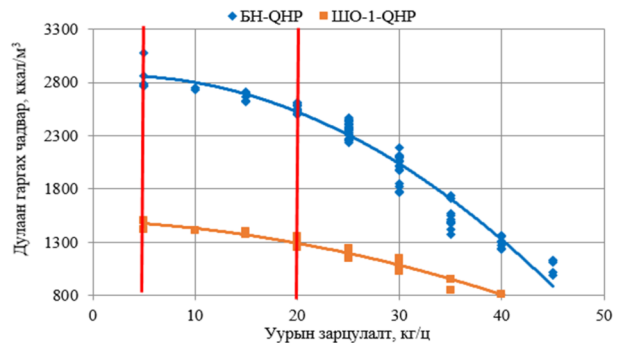
Зураг 8. Үлээлгийн агаарын зарцуулалт ба хийн илчлэг хоорондын хамаарал

температурын утга өсөж, исэлдүүлэлтийн урвал идэвхжиж, улмаар шатах хийн найрлага дахь шатамхай хэсгийн эзлэхүүний хувь харьцангуй багасаж байгаатай холбоотой байна. Харин 9 дүгээр зургаас харахад уурын зарцуулалтын хэмжээ нэмэгдэхэд хийн илчлэг нь буурч байна. Энэ нь усны уурын үлээлгэ нэмэгдэхэд H₂O бүрэн задарч амжихгүй тул хийжүүлэлтээс үүсэх H₂O болон CO₂-ийн агууламж өсөж, улмаар CO, H₂ ба CH₄-ийн агууламж багасаж байгаатай холбоотойгоор түүний илчлэг буурч байна. Дээрх бүх туршилтуудаас дүгнэн үзэхэд уур-агаарын үлээлэгтэй хийжүүлэлтийн процессыг хөдөлгөөнгүй үет хийжүүлэх хийн генераторт явуулахад түүний даралт 8-13 бар, хийжүүлэлтийн температур нь 700-950°C, үлээлгийн агаарын зарцуулалт 80-120 кг/ц, усны уурын зарцуулалт 5-20 кг/ц байх нь тохиромжтой бөгөөд энэ хязгаарт Багануурын нүүрснээс үүсэх шатах хийн найрлага дахь хийн агууламж нүүрстөрөгчийн дан исэл 30-45%, устөрөгч 24-34%, метан 7-15% үүсэж, хийн илчлэг

Хүснэгт 4. Мазут ба нүүрсний шатах хийн зардлын тойм тооцоо

Үзүүлэлт	Тоон утга
Мазутын үнэ, төг/т*	1474063
Мазутын зарцуулалт, т/жил	863.6
Мазутын зардал, сая төг	1273.0
Мазутын илчлэг, ккал/кг	9800
Нүүрсний үнэ, төг/т**	33000
1 т нүүрс хийжүүлэх үйлдвэрлэлийн зардал, төг	55000
1 т нүүрснээс үүсэх шатах хийн гарц, м ³	2500
1 м ³ шатах хийн өртөг, төг/м ³	35.2
1 м ³ шатах хийн илчлэг, ккал/м ³	1500
1 Гкал дулаан боловсруулахад зарцуулах мазутын хэмжээ, кг/Гкал	127.55
1 Гкал дулаан боловсруулахад зарцуулах шатах хийн хэмжээ, м ³ /Гкал	833.33
1 Гкал дулаан боловсруулах мазутын өртөг, төг/Гкал	150414.59
1 Гкал дулаан боловсруулах шатах хийн өртөг, төг/Гкал	23466.67
Зөрүү, төг	126947.93

*, ** - ДЦС-3 ТӨХК-ийн 2019 онд худалдан авсан 1 тонн мазут ба 1 тонн Багануурын нүүрсний үнэ.



Зураг 9. Үлээлгийн уурын зарцуулалт ба хийн илчлэг хоорондын хамаарал

2200-2800 ккал/м³ байх боломжтой байна. Харин Шивээ-Овоогийн нүүрсний хувьд шатах хийн найрлага дахь хийн агууламж нүүрстөрөгчийн дан исэл 20-30%, устөрөгч 18-23%, метан 1.5-7.5% үүсэж, хийн илчлэг 1150-1600 ккал/м³ байна. Багануурын нүүрсийг хийжүүлэн мазутын оронд ашиглах зардлын харьцуулсан тойм тооцооллыг ДЦС-3 ТӨХК-ийн 2019 онд хэрэглэсэн 863.6 тонн мазутыг тухайн станцын түлж буй Багануурын нүүрсийг хийжүүлэхэд үүссэн шатах хийтэй харьцуулан тэдгээрийн үнийг 2019 оны худалдан авалтын үнээр тоймлон тооцоож, 4 дүгээр хүснэгтэд тооцооны үр дүнг үзүүлэв.

Зардлын тооцооноос харахад 1 Гкал дулаан боловсруулахад мазутыг түлэхэд гарах зардал нь шууд худалдан авалтын дүнгээр тооцоход 150414.59 төгрөг, харин Багануурын нүүрсийг хийжүүлэн ашиглахад гарах зардал нь 23466.67 төгрөг буюу 126947.93 төгрөгөөр хэмнэлттэй ажиллаж болохоор байна. Иймд цаашдаа энэхүү тооцооллыг ашиглан үйлдвэрлэлийн бүсэд нүүрсний хийн станц барихаар төлөвлөн нарийн тооцоолол хийж үзэх хэрэгтэй. Хийн дулаан гаргах чадвар болон түүнд нөлөөлөх параметруудийн математик боловсруулалтыг хийхдээ Багануур ба Шивээ-Овоогийн нүүрсийг хийжүүлэх технологийн процесст нөлөөлөх хийжүүлэлтийн даралт (P), температур (T), үлээлгийн агент агаарын зарцуулалт (Gag) болон уурын зарцуулалт (Guur)-аас хамаарсан олон удаагийн туршилтын үр дүнг ашигласан болно. Математик боловсруулалтын зорилго нь нүүрсний хийжүүлэх процесст нөлөөлөх гол хүчин зүйл болох дээрх параметруудээс хамаарсан нүүрстөрөгчийн дан исэл (CO), устөрөгч (H₂), метаны (CH₄) эзлэхүүний агууламж болон үүссэн шатах хийн илчлэгийг илэрхийлэх математик статистик загварыг гарган авахад оршино.

Математик загварын боловсруулалтыг зохих аргачлалын дагуу хийж, Багануур ба Шивээ-Овоогийн нүүрсийг хийжүүлэх процессын гаралтын бүтээгдэхүүнүүд болох CO, H₂, CH₄ болон тэдгээрээс хамаарсан илчлэгийг илэрхийлэх үл хамаарах хувьсах P, T, Gag, Guur –ын утгуудаас

хамааруулсан регрессийн шугаман ба шугаман бус, зэрэгт функцын загваруудыг гарган Стьюдент, Фишер нарын шинжүүрээр үнэлэхэд итгэл үнэмшил нь хамгийн өндөр гарсан шугаман биш регрессийн загвараар хийжүүлэлтийн процессын бүтээгдэхүүн, шатах хийн илчлэгийг илэрхийлэх нь илүү тохиромжтой гэж үзлээ. Гарган авсан шугаман биш регрессийн загвараар Багануур ба Шивээ-Овоогийн нүүрсний шатах хийн илчлэгийг тодорхойлоход дараах үр дүн гарч байна. Багануурын нүүрсний хувьд:

$$Q_H^P = 30.21 \cdot CO + 25.69 \cdot H_2 + 85.5 \cdot CH_4, \text{ ккал/м}^3 \quad (3)$$

Шивээ-Овоогийн нүүрсний хувьд:

$$Q_H^P = 30.21 \cdot CO + 25.69 \cdot H_2 + 85.5 \cdot CH_4, \text{ ккал/м}^3 \quad (4)$$

Ингэж гаргасан нь тэгшитгэл нь Оросын инженер Н.Г.Юдушкины томъёолсон хийн илчлэгийг илэрхийлсэн тэгшитгэл [35]-ийн хий тус бүрийн илчлэгийн тоон утгатай харьцуулахад үндсэндээ яв цав давхцаж байна. Бидний тохиолдолд үл хамаарах ба хамаарах хувьсахуудын хооронд уялдаа холбоог илэрхийлэх нэгдсэн холбооны тэгшитгэл байхгүй учир даралт (P), температур (T), үлээлгийн агент агаарын зарцуулалт (Gag), уурын зарцуулалт (Guyp) -уудаас нүүрстөрөгчийн дан исэл (CO), устөрөгч (H₂), метаны (CH₄) эзлэхүүний агууламжийг илэрхийлсэн математик загварууд (Зааглалтын функц) болон шатах хийн илчлэгийн загвар (Зорилгын функц)-ыг өндөр нарийвчлалтайгаар байгуулсан тул дараах загвар нь хийжүүлэлтийн процессын оновчлолын судалгааг зохих түвшинд хийгдсэн болохыг харуулж байна

$$\begin{aligned} CO &= f_1(P, T, Gag, Guyp); \\ H_2 &= f_2(P, T, Gag, Guyp); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} CH_4 &= f_3(P, T, Gag, Guyp); \\ Q_{до}^{аж} &= f_4(P, T, Gag, Guyp); \end{aligned} \quad (6)$$

Дээрх 5 дугаар тэгшитгэлүүд нь зааглалтын функцыг, 6 дугаар тэгшитгэл нь зорилгын функцыг илэрхийлж байна. Эдгээр тэгшитгэлүүдээр Шивээ-Овоо ба Багануурын нүүрсэн дээр регрессийн шугаман ба шугаман биш, зэрэгт функцын хэлбэртэй загваруудыг байгуулж, коэффициентүүдийн оновчтой утгуудыг олж, загваруудын үнэмшлийг зохих шинжүүрүүдээр шалгаж, цаашдын судалгаанд хэрэглэж болох хамгийн өндөр үнэмшилтэй шугаман биш загваруудыг сонгосон болно. Шивээ-Овоогийн нүүрсний хувьд дээрх математик загварууд нь дараах хэлбэртэй болно.

$$Q_{до}^{аж} = 2051.6191 + 30.4067 \cdot P_i - 0.0522 \cdot T_i - 5.1032 \cdot Gag_i - 4.3736 \cdot Guyp_i - 0.168 \cdot P_i \cdot Gag_i - 0.28 \cdot P_i \cdot Guyp_i \Rightarrow \max; \quad (7)$$

$$\begin{cases} CO = 40.5179 - 1.2726 \cdot P_i - 0.09592 \cdot Gag_i - 0.1925 \cdot Guyp_i + \\ + 0.00177 \cdot P_i \cdot T_i - 0.00353 \cdot P_i \cdot Gag_i > 0; \\ H_2 = 35.1231 - 0.5742 \cdot P_i - 0.09138 \cdot Gag_i + 0.000985 \cdot P_i \cdot T_i - \\ - 0.00404 \cdot P_i \cdot Gag_i - 0.00507 \cdot P_i \cdot Guyp_i > 0; \\ CH_4 = 0.5191 + 0.8781 \cdot P_i - 0.000896 \cdot P_i \cdot T_i + \\ - 0.000767 \cdot P_i \cdot Gag_i - 0.00299 \cdot P_i \cdot Guyp_i > 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Даралт, бар} &- 1 < P < 25, \\ \text{Температур, } ^\circ\text{C} &- 500 < 1000, \\ \text{Агаарын зарцуулалт, кг/ц} &- 80 < Gag < 150, \\ \text{Усны уурыг зарцуулалт, кг/ц} &- 5 < Guyp < 30 \end{aligned} \quad (9)$$

Шатах хийн илчлэг буюу зорилгын функцыг 7, хийн бүрэлдэхүүний шатах хэсэг буюу CO, H₂, CH₄-ийн утгууд болон зааглалтын мужуудыг 8, 9 дүгээр томъёогоор илэрхийлэн харуулав. Дээрх нөхцөлд шугаман биш програмчлалын аргыг ашиглан оновчлолын бодлогыг бодож параметруудийг утгыг тодорхойлоход:

P*=10 бар, T*=700°C, Gag*=80 кг/ц, Guyp*=5 кг/ц байхад нүүрсний шатах хийн найрлага дахь CO=28.7%, H₂=25.5%, CH₄=3.4%, илчлэг нь Q_{до}^{аж} = 1740 ккал/м³ байна. Харин Багануурын нүүрсний хувьд дээрх математик загварууд нь дараах хэлбэртэй болно.

$$Q_{до}^{аж} = 2596.6565 + 85.1525 \cdot P_i + 0.08064 \cdot T_i - 6.2506 \cdot Gag_i - 0.01254 \cdot P_i \cdot T_i - 0.3091 \cdot P_i \cdot Gag_i - 1.1334 \cdot P_i \cdot Guyp_i \Rightarrow \max; \quad (10)$$

$$\begin{cases} CO = 57.5666 - 0.602 \cdot P_i - 0.1297 \cdot Gag_i - 0.6602 \cdot Guyp_i + \\ + 0.000512 \cdot P_i \cdot T_i + 0.000437 \cdot T_i \cdot Guyp_i > 0; \\ H_2 = 75.0738 - 4.8543 \cdot P_i - 0.02813 \cdot T_i - 0.1403 \cdot Gag_i - 0.8809 \cdot Guyp_i + 0.00202 \cdot P_i \cdot T_i + \\ + 0.01146 \cdot P_i \cdot Gag_i + 0.004108 \cdot P_i \cdot Guyp_i + 0.000835 \cdot T_i \cdot Guyp_i > 0; \\ CH_4 = -18.865 + 2.7841 \cdot P_i + 0.01737 \cdot T_i + 0.7487 \cdot Guyp_i - 0.00119 \cdot P_i \cdot T_i - \\ - 0.00601 \cdot P_i \cdot Gag_i - 0.0267 \cdot P_i \cdot Guyp_i - 0.000627 \cdot T_i \cdot Guyp_i > 0; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Даралт, бар} &- 1 < P < 25, \\ \text{Температур, } ^\circ\text{C} &- 500 < 1000, \\ \text{Агаарын зарцуулалт, кг/ц} &- 80 < Gag < 150, \\ \text{Усны уурыг зарцуулалт, кг/ц} &- 5 < Guyp < 30 \end{aligned} \quad (12)$$

Шатах хийн илчлэг буюу зорилгын функцыг 10, хийн бүрэлдэхүүний шатах хэсэг буюу CO, H₂, CH₄-ийн утгууд болон зааглалтын мужуудыг 11, 12 дугаар томъёогоор илэрхийлэн харуулав. Дээрх нөхцөлд шугаман биш програмчлалын аргыг ашиглан оновчлолын бодлогыг бодож параметруудийг утгыг тодорхойлоход:

P*=8 бар, T*=700°C, Gag*=100 кг/ц, Guyp*=5 кг/ц байхад нүүрсний шатах хийн найрлага дахь CO=40.8%, H₂=23.16%, CH₄=4.5%, илчлэг нь Q_{до}^{аж} = 2346.4 ккал/м³ байна. Иймд хүрэн нүүрсийг эрчим хүчний зориулалттай хийжүүлэх процессын параметрийн оновчтой утгыг тодорхойлох судалгааны ажлыг онолын тодорхой түвшинд гүйцэтгэсэн гэж үзэж байна.

ДУГНЭЛТ

Судалгаанаас харахад хийжүүлэлтийн температурыг 700-850°C температурт, харин даралтыг 30 атм хүртэл хэмжээнд барьж, хийжүүлэгч агент дахь уур, агаарын хэмжээг тохируулан (уур/нүүрсний харьцааг 0.25, агаар/нүүрсний харьцааг 1-ээс бага) ашиглах нь илүү үр дүнтэй байна.

Судалгаа, тооцооноос үзэхэд хийжүүлэлтийн даралт 10-15 бар, хийжүүлэлтийн температур нь 700-900 °C, үлээлгийн агаарын зарцуулалт 100-120 кг/ц, усны уурын зарцуулалт 5-20 кг/ц байх нөхцөл нь Монгол орны зарим ордын хүрэн нүүрсний хийжүүлэлтийн тохиромжтой горим болохыг тогтоон, улмаар энэ хязгаарт Багануурын нүүрснээс 30-45% -ийн нүүрстөрөгчийн дан исэл, 24-34%-ийн устөрөгч, 7-15%-ийн метаны агуулга бүхий, 2200-2800 ккал/м³ илчлэгтэй, Шивээ-Овоогийн нүүрснээс 20-30% -ийн нүүрстөрөгчийн дан исэл, 18-23%-ийн устөрөгч, 1.5-7.5%-ийн метан агуулсан 1150-1600 ккал/м³ илчлэгтэй шатах хийн хольц тус тус гарган авах боломжтойг тогтоолоо.

Уурын үлээлэг бүхий хийжүүлэлтийн туршилт ба Аспен плас дээр хийсэн түүний загварчлалын үр дүнг харьцуулахад (-5.94)-0.0%-ийн ялгаатай буюу бие биеэ нөхсөн үр дүн гарсан нь нэг талаас хийжүүлэлтийн туршилт, нөгөө талаас загварчлал зөв хийгджээ гэдгийг батлаж байна.

Судалгааны ажлын үр дүнд хийжүүлэлтийн гол параметруудийн оновчтой утгыг Багануурын нүүрсэн дээр $P^*=8$ бар, $T^*=700^{\circ}\text{C}$, $G_{ar}^*=100$ кг/ц, $G_{уур}^*=5$ кг/ц байхаар явуулахад нүүрсний шатах хийн найрлага дахь $\text{CO}=40.8\%$, $\text{H}_2=23.16\%$, $\text{CH}_4=4.5\%$, илчлэг нь $Q_{до}^{аж} = 2346.4$ ккал/м³, Шивээ-Овоогийн нүүрсний хувьд $P^*=10$ бар, $t^* = 700^{\circ}\text{C}$, $G_{ar}^* = 80$ кг/ц, $G_{уур}^* = 5$ кг/ц байхаар явуулахад нүүрсний шатах хийн найрлага дахь $\text{CO}=28.7\%$, $\text{H}_2=25.5\%$, $\text{CH}_4=3.4\%$, илчлэг нь $Q_{до}^{аж} = 1740$ ккал/м³ байна.

Энэхүү технологийг нэвтрүүлснээр гарах эдийн засгийн харьцуулсан тойм тооцооллыг хийхэд нэг Гкал дулаан боловсруулахад Багануурын нүүрсийг хийжүүлэн ашиглахад гарах зардал нь мазутыг түлэхэд гарах зардлаас 6.41 дахин бага байх боломжтой гэж гарсан. Иймээс цаашдаа эрчим хүчний зориулалттай шатах хий үйлдвэрлэх технологийг зарим томоохон Дулааны цахилгаан станцуудын дэргэд барих тал дээр судалгаа, тооцоог нарийвчлан хийх нь зүйтэй гэж үзэж байна.

Судалгааны ажлын хүрээнд гаргаж авсан дээрх үр дүн, математик загварыг ашиглан нүүрсийг хийжүүлэх урьдчилсан тооцоо хийх, төлөвлөх болон эрчим хүчний зориулалттай шатах хий үйлдвэрлэх ТЭЗҮ-ийг боловсруулахад анхдагч материал болгон ашиглах зэрэг практик ач холбогдолтой болно.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. Монгол улсын геологи, уул уурхай, газрын тос, хүнд үйлдвэрийн салбар, АМГТГ-ын 2016 оны үйл ажиллагааны тайлан, 2017-2020 оны төсөөлөл, хүрэх үр дүн. *Ашигт малтмал, газрын тосны газар*. Улаанбаатар. 46х.
2. Б.Авид (2018). Нүүрсний хими, технологи. Улаанбаатар. 8х, 11х, 93х, 104х.
3. Монгол улсын нүүрсний салбарын өнөөгийн байдал. <http://www.coalmining.mn/танин-мэдэхүй/-/МОНГОЛ-УЛСЫН-НҮҮРСНИЙ-САЛБАРЫН-ӨНӨӨГИЙН-БАЙДАЛ>
4. Ж.Нарангэрэл (2012). Нүүрсний хими, технологийн үндэс. Хоёр дахь хэвлэл. Улаанбаатар. 9х, 12-14х, 123-124х, 311х, 314х, 316х.
5. Ч.Дашпунцаг, Д.Хишигсайхан (2015). Нүүрсийг түлш, эрчим хүч-технологийн зориулалтаар ашиглах арга зүйн үндэс. Улаанбаатар. 19х, 39х, 79х, 82-84х.
6. В.П.Латышев, С.В.Мельник (2004). Технология производства горючего газа из бурых углей в газогенераторе кипящего слоя. *Химия и металлургия*. Вестник ИрГТУ. 3(19):115-117.
7. D.A.Bell, V.F.Towler, M.Fan (2011). Coal Gasification and its applications. William Andrew Applied Science Publisher. 38-45, 73-98 <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20067-5>
8. G.J.Speight (2013). The Chemistry and technology of coal. Third Edition. CRC Press, 1, 616, 618, 635-644.
9. И.В.Калечица (1980). Химические вещества из угля. М.:Химия. стр 157, 161-164, 168-190.
10. В.Г.Липович, Г.А.Калабин, Г.А.Калечица (1988). Химия и переработка угля. Москва. Химия, стр.39-40, 247.
11. N.V.Kharchenko, V.M.Kharchenko (2014). Advanced energy systems. Second Edition. CRC Press p.40-41, 61-63, 65-71.
12. P.A.Nikrityuk, B.Meyer (2014). Gasification processes: Modeling and Simulation. Wiley-VCH, Germany. ISBN: 978-3-527-67321-6. p.29-36.
13. C.Higman, M.van der Burgt (2003). Gasification. Gulf professional Publishing. p.3-5, 10, 22, 92-123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7707-3.X5000-1>
14. S.Lee, J.G.Speight, S.K.Loyalka (2007). Handbook of alternative fuel technologies. CRC Press. p.33, 35, 37, 62-63.
15. L.Shadle, D.Berry, M.Syamlal (2007). Coal gasification (Chapter only). p.771-799.
16. V.Dillibabu, E.Natarajan (2015). Green energy from biomass gasification. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 7:183-185.
17. M.Ściężko, L.Stępień (2015). A modified Gibbs free

- energy minimisation model for fluid bed coal gasification. *Chemical and Process Engineering*. 36(1):73-87. DOI: [10.1515/cpe-2015-0006](https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0006)
18. R.Fernando (2014). Developments in modelling and simulation of coal gasification. *IEA Clean coal centre*. 1-77. ISBN 978-92-9029-552-5
 19. X.T.Li, J.R.Grace, C.J.Lim, A.P.Watkinson, H.P.Chen, J.R.Kim (2004). Biomass gasification in a circulating fluidized bed. *Biomass and Bioenergy*. 26(12):171-193. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00084-9)
 20. A.Kishore, K.A.V.Ramanjaneyulu (2015). Simulation of biomass gasification in fluidized bed using Aspen plus. *Sixth International Conference on Chemical, Biological and Environment Sciences*. Dubai. Corpus. ID:10290124.
 21. S.Ilaiah, D.V.Sasikanth, B.Satyavathi (2016). Process simulation of an entrained fluidized bed biomass gasification using Aspen plus. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 5(4):274-281.
 22. H.Chang, F.Xiao, K.H.Chu, L.Anxue, L.Yongjian (2014). Industrial-scale fixed-bed coal gasification: Modeling, simulation and thermodynamic analysis. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 22 (5):522-530. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(14\)60066-5](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(14)60066-5)
 23. E.J.Preciado, J.J.Ortiz-Martinez, J.C.Gonzalez-Rivera, R.Sierra-Ramirez, G.Gordillo (2012). Simulation of synthesis gas production from steam oxygen gasification of Colombian coal using Aspen plus, *Energies*. 5(12):4924-4940. <https://doi.org/10.3390/en5124924>
 24. N.Ramzan, M.Athar, S.Begum, S.W.Ahmad, S.Naveed. Simulation of circulating fluidized bed gasification for characteristic study of Pakistani coal. *Polish Journal of Chemical Technology*. 17 (1):66-78. <https://doi.org/10.1515/pjct-2015-0011>
 25. K.Xiangdong, Z.Weimin, D.Wenli, Q.Feng (2013). Three stage equilibrium model for coal gasification in entrained flow gasifiers based on aspen plus. *Process systems engineering and process safety Chinese Journal of Chemical Engineering*. 21(1):79-84. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(13\)60444-9](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60444-9)
 26. F.Uddin, S.A.Taqvi, I.Memon (2016). Process simulation and sensitivity analysis of indirect coal gasification using Aspen plus model, *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 11(17):10546-10552.
 27. X.Li, J.R.Grace, A.P.Watkinson, C.J.Lim, A.Ergu (2001). Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier, *Fuel*. 80 (2):195-207. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00074-0)
 28. S.Syed, I.Janajreh, C.Ghenai (2012). Thermodynamics equilibrium analysis within the entrained flow gasifier environment. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*. 4(1):47-54.
 29. A.Żogała (2014). Equilibrium simulations of coal gasification – factors affecting syngas composition. *Journal of Sustainable Mining*. 13(2):30-38.
 30. Ю.С.Кузнецов, Г.Г.Михайлов, О.И.Качурина (2014). Термодинамический анализ реакции водяного газа, Вестник ЮУрГУ. Серия *Металлургия*. 14(1):5-11.
 31. C.B.Magdalenaz, M.Jacek Łączny, A.Smoliński, S.Iwaszenko (2013). Equilibrium model of steam gasification of coal. *Journal of Sustainable Mining*. 12(2):21-28. <https://doi.org/10.7424/jsm130203>
 32. <https://www.aspentech.com/en/about-aspentech>
 33. https://en.wikipedia.org/wiki/Redlich%E2%80%9393Kwong_equation_of_state
 34. Гранд Повер” ХХК-н вэб хуудас: www.gpower.mn
 35. Н.Г.Юдушкин. *Газогенераторные тракторы*. Москва. 1955. стр-10, 12-13, 31, 85.

The results of the research on determining the optimal values of the parameters for brown coal gasification process

Avirmed Tumenbayar^{1*}, Budeebazar Avid², Bold Tungalagtamir³, Choidorj Dashpuntsag¹

¹School of Power Energy, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar 14191, Mongolia

²Laboratory of Coal Chemistry and Technology, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13330, Mongolia

³School of Applied Sciences, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar 14191, Mongolia

*E-mail: tumee_79@must.edu.mn

ORCID: [0000-0002-5460-6054](https://orcid.org/0000-0002-5460-6054)

Submitted: 18.11.2022

Reviewed: 25.11.2022

Accepted: 30.12.2022

Abstract: This research aims to calculate the possibility of increasing the efficiency of energy production and reducing costs by replacing imported fuel oil by gasification of lignite for energy purposes and by determining the optimal values of the main parameters affecting it. For this study, 3073 tests were performed in the range of gasification pressure 1-25 bar, temperature 200-1000°C, blowing air consumption 50-250 kg/h, water vapor consumption 5-50 kg/h. As a result of the research work, highly plausible non-linear regression mathematical models were developed, which were checked with appropriate parameters to express the composition and calorific value of the combustion gas produced by the gasification process of Baganuur and Shivee-Ovoo lignite using the Aspen plus program. The results were coded in the Matlab program and the optimal values of the parameters were obtained. When $P^*=8$ bar, $T^*=700^\circ\text{C}$, $G_{\text{air}}^*=100$ kg/h, and $G_{\text{steam}}^*=5$ kg/h in Baganuur coal, $\text{CO}=40.8\%$, $\text{H}_2=23.16\%$, $\text{CH}_4=4.5\%$ in the composition of coal combustion gas and calorific value $Q=2346.4$ kcal/m³, Shivee-Ovoo coal has $P^*=10$ bar, $T^*=700^\circ\text{C}$, $G_{\text{air}}^*=80$ kg/h, $G_{\text{steam}}^*=5$ kg/h while $\text{CO}=28.7\%$, $\text{H}_2=25.5\%$, $\text{CH}_4=3.4\%$, calorific value of coal combustion gas is defined as $Q=1740$ kcal/m³. Using the above results and mathematical models obtained in the research work, it has the advantage of saving time and money to be spent on pre-calculating, planning, managing the production process and developing a feasibility study for the gasification of gasification for energy purposes. With the introduction of this technology, it is estimated that the cost of gasification of Baganuur coal for 1 Gcal of heat treatment can be 6.41 times lower than the cost of burning fuel oil, so it is important to conduct research and calculations on the basis of the technology of producing combustion gas for energy purposes in the future.

Keywords: *gas generator, blowing air and steam, pressure, temperature*

© The Author(s). 2022 **Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

DOI:<https://doi.org/10.5564/bicct.v10i10.2594>