



OPEN ACCESS

## \*CORRESPONDENCE

Enkhbayar Shagdar  
E-mail address:  
[enkhbayar.sh@must.edu.mn](mailto:enkhbayar.sh@must.edu.mn)

RECEIVED: November 18, 2024  
ACCEPTED: December 22, 2024  
PUBLISHED: December 29, 2024

## CITATION

B. Khurelbaatar, E. Shagdar,  
“Simulation Study of the 18 MW  
Condensing Power Plant at Coke-  
Oven Plant”, Journal of Energy  
Transition, vol. 2, no. 1, pp. 22–30,  
Dec. 2024.

## COPYRIGHT

©2024 by the authors. Submitted for  
possible open access publication under  
the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution (CC BY) license.

# Simulation Study of the 18 MW Condensing Power Plant at Coke-Oven Plant

Batsuuri Khurelbaatar<sup>1</sup>, Enkhbayar Shagdar<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Thermal power plant No4” SOJSC, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>2</sup>School of Power Engineering, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>3</sup>Institute of Thermal Engineering and Industrial Ecology, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

\*Corresponding author. E-mail address: [enkhbayar.sh@must.edu.mn](mailto:enkhbayar.sh@must.edu.mn)

**Abstract** - Due to climate change, air pollution, greenhouse gas emissions, and the scarcity of energy resources worldwide, coupled with a sharp increase in prices, countries face an urgent need to review their energy policies. They need to shift away from solid fuels toward renewable energy and waste heat from industrial processes for energy production. Using heat recovery steam generators (HRSGs) in industrial processes can reduce fuel consumption and repurpose high-potential flue gases from coke, cement, and chemical plants to heat water, produce steam, and generate electricity in thermal power plants. Heat recovery steam generators enable the most efficient use of waste gas heat from industrial processes. This research paper presents a thermodynamic model of an 18 MW condensing power plant (CPP), featuring three boilers and three turbines. The model utilizes a heat recovery steam generator operating at 950°C with a mass flow rate of 72 t/h from the waste gas heat of the coke-oven plant. This study examines the 18 MW condensing power plant's operating performance and techno-economic indices under design and off-design conditions. The impact of changes in waste gas parameters (temperature and mass flow rate) from the coke-oven plant on the operating performance and techno-economic indices of the 18 MW condensing power plant was also studied. A simulation was developed to install an additional gas fuel burner in the heat recovery steam generator that utilizes waste gas heat, aiming to maintain the operating performance and techno-economic indices of the 18 MW condensing power plant at a nominal load when the flue gas parameters change.

**Keywords** - Coke-oven plant; Feasibility study; Performance analysis; Heat recovery steam generators; Additional gas burner; CO<sub>2</sub> reduction.

## Кокс-Эрчим Хүчний Үйлдвэрийн Дэргэдэх 18 МВт Чадалтай Конденсацийн Цахилгаан Станцын Загварчлалын Судалгаа

Хүрэлбаатарын Батсуурь<sup>1</sup>, Шагдарын Энхбаяр<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Зуухан цех, ДЦС-4 ТӨХК, Улаанбаатар, Монгол улс

<sup>2</sup>Дулааны инженерийн салбар, Эрчим хүчний сургууль, ШУТИС, Улаанбаатар, Монгол улс

<sup>3</sup>Дулааны техник, үйлдвэрлэлийн экологийн хүрээлэн, ШУТИС, Улаанбаатар, Монгол улс

\*Холбоо барих зохиогч. И-мэйл: [enkhbayar.sh@must.edu.mn](mailto:enkhbayar.sh@must.edu.mn)

**Хураангуй** - Дэлхий даяар цаг уурын өөрчлөлт, агаарын бохирдол, хүлэмжийн хийн ялгарал болоод эрчим хүчний нөөцийн хомсдол, түүнээс улбаатай үнийн огцом өсөлт зэргээс шалтгаалан улс орнууд эрчим хүчний бодлогоо эргэн харж, хатуу түлшнээс татгалзаж сэргээгдэх эрчим хүч, мөн үйлдвэрийн процессын хаягдал дулааныг ашиглан эрчим хүчийг үйлдвэрлэх зайлшгүй шаардлагатай тулгараад байна. Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухыг үйлдвэрийн процесст ашигласнаар хатуу түлшний хэрэглээг бууруулж, коксын болон цементийн үйлдвэр, химийн үйлдвэрүүдээс хаягдаж байгаа өндөр потенциалтай хаягдал утааны хийг дахин ашиглаж усыг халааж, уур үйлдвэрлэж улмаар дулаан хүчний төхөөрөмжид цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжтой юм. Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух нь үйлдвэрийн процессоос хаягдах утааны хийн дулааныг хамгийн ихээр үр ашигтай ашиглах боломжийг олгодог. Энэхүү өгүүлэлд коксын үйлдвэрээс хаягдаж буй 950°C температуртай 72 т/ц зарцуулалттай утааны хийг хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух ашиглан цагт 35 ата даралттай 435°C температуртай уур үйлдвэрлэх 3-н

зуухтай, К-6-35 маягийн 3-н турбинтай 18 МВт конденсацйн цахилгаан станц (КЦС)-ын термодинамик загварыг дизайны горимд хийж, дизайны болон хувьсах горимын үед 18 МВт КЦС-ын ажиллагааны гүйцэтгэл, техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг судалсан болно. Мөн коксын үйлдвэрээс хаягдах утааны хийн параметруудын (температур, зарцуулалт) өөрчлөлт 18 МВт КЦС-ын техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдэд нөлөөлөх нөлөөллийг судалсан ба хаягдал утааны хийн параметр өөрчлөгдөх үед 18 МВт КЦС-ын техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг хэвийн хэмжээнд барьж ажиллуулах зорилгоор хаягдал хийн дулааныг ашиглах зууханд нэмэлт хийн түлшний асаагуур суурилуулах үеийн загварыг боловсруулсан.

**Түлхүүр үг** - Кокс-эрчим хүчний үйлдвэр; Техник эдийн засгийн үзүүлэлт, Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух; Нэмэлт хийн түлшний асаагуур; CO<sub>2</sub>-ийн бууралт.

## I. УДИРТГАЛ

Кокс нь төмрийн хүдрийг хайлуулахад ашиглагддаг хатуу нүүрстөрөгчийн түлш, нүүрстөрөгчийн эх үүсвэр юм. Коксыг хуурайгаар бөхөөх (унтраах) арга нь коксын үйлдвэрээс ялгарах агаарын бохирдлыг бууруулах боломжит технологиудын нэг юм. Нийт гангын үйлдвэрүүдэд эрчим хүчний хэрэглэний 7-8%-ийг коксын зуух эзэлдэг. Үүний 35-45% нь коксын зуухнаас ялгарах өндөр температуртай хаягдал утааны хийн дулаан юм. Яг энэ процесст зориулж хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух суурилуулснаар хаягдал дулааны энергийг цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргаж, мөнгө санхүүг хэмнэж, нүүрстөрөгчийн ялгаруулалтыг бууруулж, усны хэрэглээг багасгаж, хүрээлэн буй орчныг хорт бодисоор бохирдуулахгүй зэрэг олон давуу талуудыг бий болгож байна [1].

Төрөл бүрийн зориулалттай зуух, хийн турбины цахилгаан станц, хийн шахуургын төхөөрөмж зэрэг технологийн зарим байгууламжийг ажиллуулах явцад хаягдал хийн температур нь хэдэн зуун градуст хүрдэг. Энэ бол асар их хэмжээний дулааны энерги бөгөөд үүнийг агаар мандалд хаях нь зөвхөн мөнгө үрэхээс гадна байгаль орчинд ихээхэн хор хөнөөл учруулдаг [2].

Эдгээр үйлдвэрийн процессоос хаягдаж буй утааны хийн дулааныг үр ашигтай ашиглахын тулд хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухыг бүтээсэн. Нүүрс коксжих процесст 1 тонн хуурай нүүрснээс эцсийн дүнд нь 700-800 кг хуурай кокс, 280-320 нм<sup>3</sup> коксжих хий, 25-40 кг давирхай, 10-13 кг аммонийн сульфат, 6-10 кг бензол зэрэг дайвар бүтээгдэхүүнүүд ялгардаг. Судалгаанаас харахад 1 тонн кокс үйлдвэрлэлээс хаягдал утааны хийн дулааныг ашиглах замаар 550-650 кг уур гаргах боломжтой [1].

Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухнууд нь уурын зуух болон бусад дулааны тоног төхөөрөмжөөс хаягдал хийн энергийг тухайлбал түлш шатаах явцад үүссэн яндангаас ялгарах утааны хийн дулааны энергийг ашигладгаараа ялгаатай буюу энэхүү төхөөрөмж нь түлшийг шатаах галын хотолгүй зуух гэдгээрээ онцлог юм. Ажиллагааны зарчим нь аливаа үйлдвэрлэлийн процесс, жишээлбэл металлургийн үйлдвэрт халуун утааны хий ялгарах үед тухайн хаягдал утааны хийн дулааныг ашиглах зорилгоор суурилуулдаг. Хаягдал утааны хийн дулааныг ашигласнаар агаар мандалд хаягдах бохирдуулагч бодисын ялгаралт буурах, хий

цэвэршүүлэх зардал буурах, түлшийг оновчтой ашиглах зэрэг давуу талууд бий болно [3].

Сүүлийн жилүүдэд хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухтай, коксыг хуурайгаар бөхөөх үйлдвэрүүдийн талаарх судалгааны ажлууд эрчимтэй хийгдэж байгаа бөгөөд хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухны шинэ дизайны техник-эдийн засгийн анализ [4], коксыг үйлдвэрлэх процесс ба түүний термодинамикийн болон техник эдийн засгийн анализ [5], хаягдал дулааныг дахин ашиглах технологи түүний хэрэглээ [6], коксыг хуурайгаар бөхөөх системийн эксергийн шинжилгээ [7], дэвшилтэд технологи ба том хэмжээний коксыг хуурайгаар бөхөөх системийн хэрэглээ [8], коксыг хуурайгаар бөхөөх цахилгаан станцын уурын үйлдвэрлэлийг сайжруулах [9], коксыг хуурайгаар бөхөөх процесст хаягдал дулааны ашиглалтыг сайжруулах урьдчилсан хяналтын загвар [10], нөхөн сэргээгдэхгүй эрчим хүч ба дулаан ашиглаж коксжуулах технологи [11] зэрэг судалгааны ажлууд хийгдсэн байна.

Сүүлийн 10-аад жилийн хугацаанд түүхий эдийн үйлдвэрлэлийн процесс эрчимтэй хөгжиж, хаягдал дээр суурилсан үйлдвэрүүд мөн даган хөгжиж байна. Төмөр, гангийн үйлдвэр нь ажлын хамгийн өндөр температуртай байдаг. Төмрийн болон гангийн үйлдвэрлэлийн явцад тэдгээрээс хаягдах утааны хийн температурыг бусад үйлдвэрийн процессоос хаягдах утааны хийн температуртай харьцуулан 1-р хүснэгтэд үзүүлэв [12].

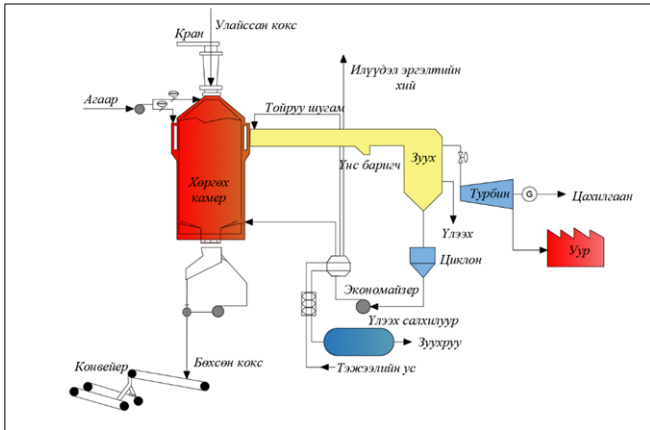
**ХҮСНЭГТ 1. ҮЙЛДВЭРЛЭЛИЙН ПРОЦЕСС ЯНДАНГААС ХАЯГДАХ УТААНЫ ХИЙН ТЕМПЕРАТУР**

Д.д	Үйлдвэрлэлийн процесс	Яндангаас гарах температур, °C
1	Төмөр ба гангийн үйлдвэр	1500-1600°C
2	Домен зуухны галын хотол	1400-1700°C
3	Хүчилтөрөгчийн зуух	1100-1300°C
4	Мартен зуухны галын хотол	950-1050°C
5	Коксын зуух	650-1000°C
6	Генератортой халаалтын зуух	700-1200°C
7	Генераторгүй халаалтын зуух	550-750°C
8	Хайлах зуух	400-700°C
9	Керамик зуух	150-1000°C

Кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн технологийн процессийг 1-р зурагт харуулав. Коксыг хуурайгаар бөхөөх систем нь коксын зуухнаас гаргаж авсан халуун коксыг 1000°C орчим температурт инертийн хийгээр

хөргөж, хаягдал хийн дулааны зууханд үйлдвэрлэсэн уураар цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх систем юм.

Хөргөх камер дахь дулаан солилцооны үр дүнд ялгарсан дулааныг уур үйлдвэрлэхэд ашигладаг тул коксыг хуурайгаар бөхөөх системд үйлдвэрлэсэн цахилгаан эрчим хүч нь байгаль орчинд ээлтэй, цэвэр эрчим хүч юм. Нэмж дурдахад, энэхүү систем нь ердийн нойтон аргаар коксыг бөхөөх системтэй харьцуулахад тоосжилтыг бууруулах, коксын чанарыг сайжруулах зэрэг давуу талтай.



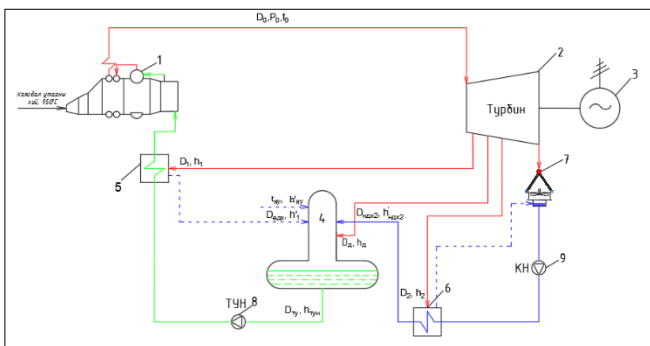
Зураг 1. Коксыг хуурайгаар бөхөөх системтэй кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн процессын схем

Энэхүү өгүүлэлд кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн дэргэдэх 18 МВт чадалтай КЦС-ын термодинамикийн загварыг боловсруулж, түүнийгээ ашиглан дизайны болон хувьсах горимын үеийн 18 МВт КЦС-ын техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг судалсан болно.

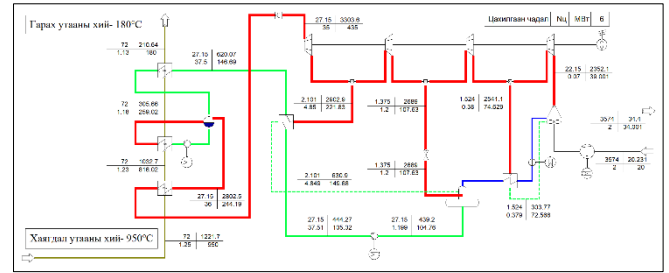
## II. СИСТЕМИЙН ТАЙЛБАР

18 МВт чадалтай КЦС-д К-6-35 маягийн уурын турбиныг ашиглахаар төлөвлөсөн бөгөөд 6.0 МВт-ын уурын турбины дулааны зарчмын схем [13] ба түүний термодинамик загварыг 2-р зурагт үзүүлэв.

6.0 МВт-ын уурын турбины тэжээлийн ус халаах систем нь нэг өндөр даралтын халаагуур (ӨДХ-1), нэг деаэратор, нэг нам даралтын халаагуур (НДХ-1)-аас тус тус бүрдэнэ.



(a)



(б)

Зураг 2. 6.0 МВт чадалтай уурын турбины (а) процессын схем ба (б) түүний термодинамикийн загвар

18 МВт КЦС нь 6 МВт-ын 3-н блокоос бүрдэх ба 6.0 МВт чадалтай уурын турбины термодинамикийн загварыг үйлдвэрлэгчийн техникийн үзүүлэлтүүдийн дагуу IPSEpro программ хангамж ашиглан дизайны горимд боловсруулсан. Дулааны зарчмын схемийн термодинамикийн загварын үр дүнг үйлдвэрлэгчийн техникийн үзүүлэлттэй харьцуулан загварыг баталгаажуулсан.

Үйлдвэрлэгчийн техникийн үзүүлэлт болон дулааны зарчмын схемийн загварын үр дүнгийн харьцуулалтыг 2-р хүснэгтэд үзүүлэв. 2-р хүснэгтээс харахад загварын харьцангуй алдааны хамгийн их утга 0.41% байгаа нь 6 МВт-ын уурын турбины дулааны зарчмын схемийн загвар үнэн зөв болсон тул, цаашид судалгаанд ашиглаж болох нь гэж үзсэн.

## ХҮСНЭГТ 2. 6.0 МВТ УУРЫН ТУРБИНЫ ҮЙЛДВЭРИЙН ӨГӨГДӨЛ БОЛОН ЗАГВАРЫН ҮР ДҮНГИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Үзүүлэлт	Үйлдвэрийн өгөгдөл	Загварын үр дүн	Харцангуй алдаа, %
Хэвийн цахилгаан чадал, МВт	16	16	0
Хэт халсан уурын даралт, бар	35	35	0
Хэт халсан уурын температур, °C	435	435	0
Ажилласан уурын даралт, бар	0.04	0.04	0
Тэжээлийн усны температур, °C	146	146.6	0.41
Хэт халсан уурын зарцуулалт, т/ц	27.2	27.15	0.25
Уурын хувийн зарцуулалт, кг/кВт·ц	4.53	4.53	0

## III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

18 МВт чадалтай КЦС-ын загварчлалын судалгааг үйлдвэрлэгчийн тоног төхөөрөмжүүдийн техникийн үзүүлэлтүүд, бодит КЦС-ын ажиллагааны өгөгдлүүдийг

ашиглан IPSEpro программ хангамжийн тусламжтай гүйцэтгэсэн.

IPSEpro нь дулаан, массын балансыг тооцоолох, процессыг загварчлах програм хангамжийн систем юм. Энэ нь өргөн хүрээний хэрэглээний процессын загварыг бий болгох, эдгээр загваруудыг технологийн үйлдвэрүүдийн амьдралын мөчлөгийн туршид ашиглах боломжтой программ хангамжийн модулиудын багцаас бүрдэнэ.

Энэхүү судалгаанд тоон загварчлал, техник-эдийн засаг анализ болон системийн шинжилгээ зэрэг аргуудыг ашигласан ба загварт ашиглагдсан зарим тэгшитгэл, томъёонуудыг дараах байдлаар өгөв.

#### A. КЦС-ын техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүд:

КЦС-ын жилд боловсруулах цахилгаан эрчим хүч, кВт-ц/ж.

$$\mathcal{E}_{\text{бол}}^{\text{жил}} = n \cdot N_{\text{ц}} \cdot \tau_{\text{схч}}; \quad (1)$$

Энд:  $n$  – турбины тоо, (ш);  $N_{\text{ц}}$  – турбины хэвийн чадал, (кВт);  $\tau_{\text{схч}}$  – станцын суурилагдсан хүчин чадал ашиглах цаг, (ц).

КЦС-ын дотоод хэрэгцээнд зарцуулсан цахилгаан эрчим хүч, кВт-ц/ж.

$$\mathcal{E}_{\text{дх}} = \frac{K_{\text{дх}} \cdot \mathcal{E}_{\text{бол}}^{\text{жил}}}{100}; \quad (2)$$

Энд:  $K_{\text{дх}}$  – КЦС-ын цахилгаан эрчим хүчний дотоод хэрэгцээний хувь, (%);  $\mathcal{E}_{\text{бол}}^{\text{жил}}$  – жилд боловсруулах цахилгаан эрчим хүч, кВт-ц/ж.

КЦС-ын түгээсэн цахилгаан эрчим хүч, кВт-ц/ж.

$$\mathcal{E}_{\text{түг}} = \mathcal{E}_{\text{бол}}^{\text{жил}} - \mathcal{E}_{\text{дх}}; \quad (3)$$

КЦС-ын ашигт үйлийн коэффициент (АҮК), %.

$$\eta_{\text{кцс}} = \frac{N_{\text{ц}}}{D_{\text{yx}} \cdot (h_{\text{yx}}^{950} - h_{\text{yx}}^{180})}; \quad (4)$$

Энд:  $D_{\text{yx}}$  – утааны хийн зарцуулалт, (т/ц);  $h_{\text{yx}}^{950}$  – 950°C температурт харгалзах утааны хийн дулаан агуулалт, (кДж/кг);  $h_{\text{yx}}^{180}$  – 180°C температурт харгалзах утааны хийн дулаан агуулалт, (кДж/кг).

1 кВт-ц цахилгаан эрчим хүчийг үйлдвэрлэх өөрийн өртөг, төг.

$$S_{\text{ц}} = \frac{\sum \mathcal{E}_{\text{кцс}}}{\mathcal{E}_{\text{түг}}}; \quad (5)$$

#### B. Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухны загвар:

Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухны дулааны тооцооны үндсэн тэгшитгэл нь дулааны балансын тэгшитгэл болон дулаан дамжуулах тэгшитгэл юм.

$$Q_{\Gamma} = D_{\text{хху}} \cdot (h_{\text{хху}} - h'_{\text{тү}}) + D_{\text{үл}} \cdot (h' - h_{\text{үл}}); \quad (6)$$

Энд:  $D_{\text{хху}}$  – хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухны хурц уурын зарцуулалт, (кг/с);  $h_{\text{хху}}$  – хурц уурын дулаан агуулалт, (кДж/кг);  $h'_{\text{тү}}$  – тэжээлийн усны дулаан агуулалт, (кДж/кг);  $D_{\text{үл}}$  – үлээлгийн усны зарцуулалт, (т/ц).

Хаягдал утааны хийн дулаан, кВт.

$$Q_{\text{yx}} = \varphi \cdot G_0 \cdot (h'_{\text{yx}} \cdot h''_{\text{yx}}); \quad (7)$$

Энд:  $\varphi$  – дулаан хадгалалтын коэффициент;  $G_0$  – хэвийн нөхцөл дэх утааны хийн зарцуулалт, (м<sup>3</sup>/ц).

Тооцоот халах гадаргууд шингэсэн дулаан, кВт.

$$Q_{\Gamma} = k \cdot F \cdot \Delta t; \quad (8)$$

Энд:  $k$  – дулаан дамжуулалтын коэффициент, (Вт/м<sup>2</sup>·К);  $F$  – тооцоот халах гадаргуу, (м<sup>2</sup>);  $\Delta t$  – температурын зөрүү, (°C);

C. Турбин-генераторын загвар:

Турбинд орох уурын цагийн зарцуулалт, т/ц.

$$D_0 = \left\{ \frac{3600 \cdot N_{\text{ц}}}{(h_0 - h_{\text{к}}) \cdot \eta_{\text{цм}}} \right\} \cdot K_{\text{пер}}; \quad (9)$$

Энд:  $N_{\text{ц}}$  – турбины хэвийн чадал, (кВт);  $h_0$  – турбинд орох уурын дулаан агуулалт, (кДж/кг);  $h_{\text{к}}$  – турбинаас гарах уурын дулаан агуулалт, (кДж/кг);  $\eta_{\text{цм}}$  – турбины цахилгаан механикийн АҮК;  $K_{\text{пер}}$  – сэргээн халаалтыг тооцсон коэффициент.

Турбины уурын хувийн зарцуулалт, кг/кВт-ц.

$$d_0 = \frac{D_0}{N_{\text{ц}}}; \quad (10)$$

Турбины төхөөрөмжийн материалын болон дулааны баланс.

$$\begin{cases} m_f - m_d = 0.0 \\ h_f - h_d = 0.0 \end{cases}; \quad (11)$$

Турбины изоэнтропи АҮК.

$$\eta_s = \left( \frac{h_f - h_d}{h_f - h_{d1}} \right); \quad (12)$$

Цахилгаан үйлдвэрлэл.

$$(h_f - h_d) \cdot \eta_m \cdot m_f + W_{in} - W_{out} = 0.0; \quad (13)$$

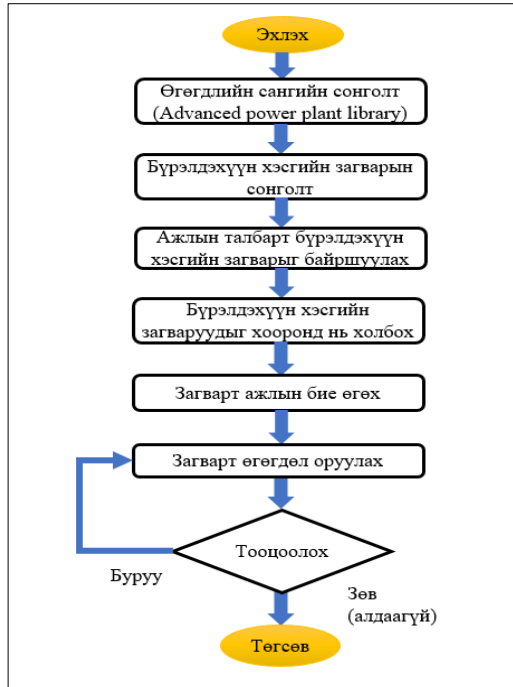
Генераторын үйлдвэрлэх цахилгаан эрчим хүч.

$$W - \eta_{el} \cdot \eta_m \cdot W_{shaft.in} = 0.0; \quad (14)$$

Энд:  $m$  – массын зарцуулалт, (кг/с);  $h$  – дулаан агуулалт, (кДж/кг);  $W$  – цахилгаан чадал, (кВт);  $\eta$  – АҮК,  $f$  – оролт (feed);  $d$  – гаралт (drain);  $in$  – оролт;  $out$  – гаралт;  $m$  – механик;  $el$  – цахилгаан.

3-р зурагт 18 МВт КЦС-ын процессын схемийн термодинамикийн загварыг IPSEpro программ хангамж

ашиглан боловсруулах хялбаршуулсан логик схемийг үзүүлэв.



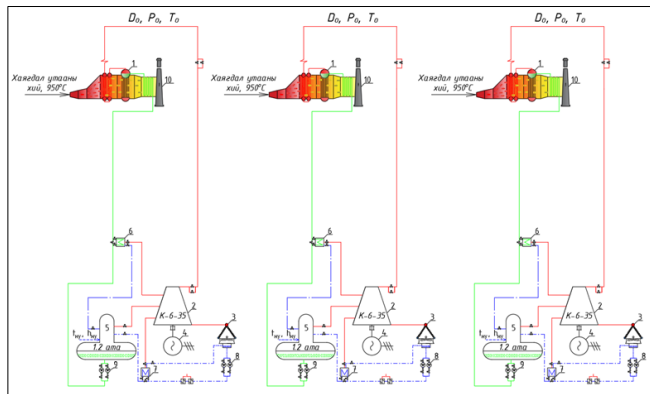
Зураг 3. 18 МВт КЦС-ын процессын схемийг загварчлах хялбаршуулсан схем.

IV. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

A. 18 МВт чадалтай КЦС-ын дизайны горим

Цахилгаан станцын зуух турбиныг холбох үндсэн схемийг блок холболттой болон хөндлөн холболттой гэж хоёр ангилал ба энэхүү 18 МВт-ын КЦС-ыг блок холболттой байхаар төлөвлөсөн ба 3-н эрчим хүчний блокоос бүрдэнэ.

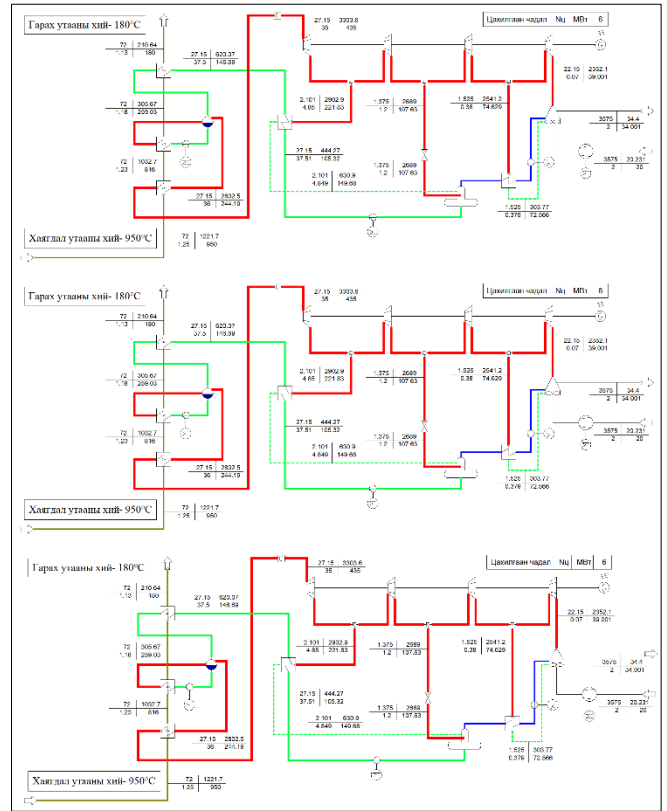
18 МВт конденсацын цахилгаан станцын процессын схемийг 4-р зурагт үзүүлэв. 18 МВт КЦС-ын уурын турбины конденсацын системд агаарын хөргөлттэй конденсатор суурилуулахаар төлөвлөсөн.



Зураг 4. 18 МВт конденсацын цахилгаан станцын процессын схем: 1- хаягдал утааны хийн дулааныг ашиглах зуух, 2- уурын

турбин, 3- агаарын хөргөлттэй конденсатор, 4- цахилгаан генератор, 5- деазератор, 6- өндөр даралтын халаагуур, 7- нам даралтын халаагуур, 8- конденсацын насос, 9- тэжээлийн усны насос, 10- утааны яндан.

5-р зурагт IPSEpro программ хангамж ашиглан боловсруулсан кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн дэргэдэх 18 МВт-ын чадалтай КЦС-ын процессын схемийн термодинамикийн загварыг үзүүлэв.



Зураг 3. 18 МВт КЦС-ын процессын схемийн термодинамикийн загвар (IPSEpro загвар).

3-р хүснэгтэд кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн дэргэдэх 18 МВт чадалтай КЦС-ын техник эдийн засгийн зарим үзүүлэлтүүдийг нэгтгэн харуулав. 3-р хүснэгтээс харахад 18 МВт КЦС нь жилд 115.92 сая кВт-ц цахилгаан эрчим хүчийг түгээх боломжтой бөгөөд 1 кВт-ц цахилгаан эрчим хүчний өөрийн өртөг 31.25 төгрөг байна.

ХҮСНЭГТ 3. 18 МВТ КЦС-ЫН ДИЗАЙНЫ ГОРИМ ДАХЬ ТЕХНИК-ЭДИЙН ЗАСГИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

Үзүүлэлт	Нэгж	Загварын үр дүн
Жилд боловсруулсан цахилгаан эрчим хүч	кВт-ц/ж	126000000
Жилд түгээсэн цахилгаан эрчим хүч	кВт-ц/ж	115920000
Анхны хөрөнгө оруулалт	тэрбум.төг	109.35
1 кВт цахилгаан эрчим хүчний өөрийн өртөг	төг/кВт.ц	31.25
Ашиглалтын жил	жил	40

κ=5% үеийн эргэн төлөгдөх хугацаа	жил	20
Уурын хувийн зарцуулалт	кг/кВт·ц	4.53
Дулааны хувийн зарцуулалт	кДж/кВт·ц	12079
КЦС-ын бохир АҮК	%	31

**В. 18 МВт чадалтай КЦС-ын хувьсах горим**

КЦС-ын ажиллагааны горим нь цахилгаан, дулааны хэрэглээний олон жилийн судалгааг үндэслэн цахилгаан эрчим хүчний дотоодын үйлдвэрлэл, импортын хэмжээг техникийн найдвартай ажиллагаа, хамгийн бага өртгийн шалгуур болон авч болох нөөц чадалд тулгуурлан горим схемийг цаг уурын нөхцөл, технологийн шаардлага, системийн тогтворжилтыг тооцон оновчтой боловсруулан, их бага ачаалал, сар, улирал, жилийн чадал, цахилгаан дулааны хэрэглээний хэтийн төлөв, алдагдлыг тодорхойлж горим ажиллагаанд өдөр тутам тасралтгүй хяналт тавьж ажиллахыг хэлнэ [14].

Коксын зуухны ажиллагааны горимоос хамааран түүнээс хаягдаж буй утааны хийн параметрууд (даралт, температур, зарцуулалт) хувьсах боломжтой. Үүнээс хамааран турбины цахилгаан үйлдвэрлэл, КЦС-ын АҮК дагаад хувьсадаг.

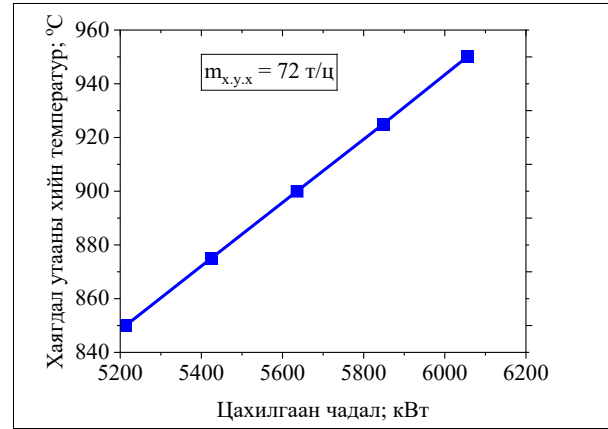
К-6-35 маркын турбин нь дизайны горимд хэвийн хүчин чадлаараа ажиллахад шаардагдах уурыг үйлдвэрлэхэд хаягдал утааны хийн параметрууд болох температур 950°C, зарцуулалт 72 т/ц байх шаардлагатай. Коксын зуухны ажиллагааны горимоос хамаарч хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох энэхүү хаягдал утааны хийн температур болон зарцуулалт өөрчлөгдөж болно.

4-р хүснэгтэд хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох утааны хийн температур хэлбэлзэх үед турбинд орох уурын зарцуулалт, турбины цахилгаан чадал, КЦС-ын АҮК-д хэрхэн нөлөөлөх нөлөөллийг харуулав.

**ХҮСНЭГТ 4. ХАЯГДАЛ УТААНЫ ХИЙН ТЕМПЕРАТУРЫН ӨӨРЧЛӨЛТ**

Үзүүлэлт	Утааны хийн температур, °C				
	950	925	900	875	850
Турбины уурын зарцуулалт, т/ц	27.15	26.2	25.25	24.3	23.35
Турбины цахилгаан чадал, кВт	6055	5848	5635	5424	5213
Хаягдал утааны хийн зарцуулалт, т/ц	72	72	72	72	72
Станцын АҮК, %	31.29	30.18	29.09	27.9	26.9

6-р зурагт хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох утааны хийн зарцуулалт тогтмол (72 т/ц), харин хаягдал хийн температур хэлбэлзэх үед турбины цахилгаан чадал хэрхэн өөрчлөгдөх өөрчлөлтийг харуулав. 6-р зургаас харахад хаягдаж байгаа утааны хийн температур 850°C болж буурах үед турбины хурц уурын зарцуулалт 23.35 т/ц болж, дагаад турбины цахилгаан чадал 5213.3 кВт хүртэл буурч байна.



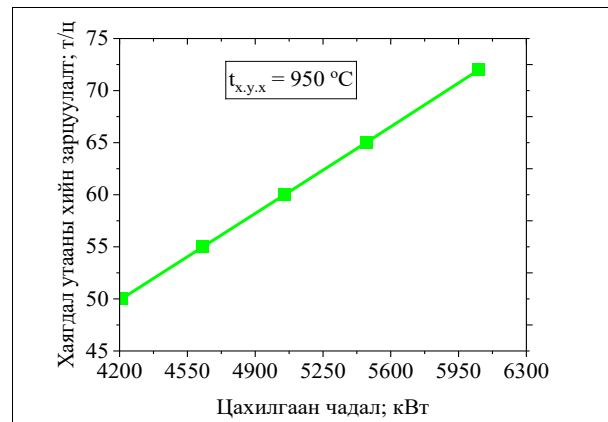
**Зураг 6. Турбины цахилгаан чадал утааны хийн температураас хамаарах хамаарал.**

5-р хүснэгтэд хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох утааны хийн зарцуулалт хэлбэлзэх үед турбинд орох уурын зарцуулалт, турбины цахилгаан чадал, КЦС-ын АҮК-д хэрхэн нөлөөлөхийг нөлөөллийг харуулав.

**ХҮСНЭГТ 5. ХАЯГДАЛ УТААНЫ ХИЙН ЗАРЦУУЛАЛТЫН ӨӨРЧЛӨЛТ**

Үзүүлэлт	Утааны хийн зарцуулалт, т/ц				
	72	65	60	55	50
Турбины уурын зарцуулалт, т/ц	27.15	24.51	22.63	20.74	18.86
Цахилгаан чадал, кВт	6055	5472	5051	4631	4210
Хаягдал утааны хийн температур, °C	950	950	950	950	950
Станцын АҮК, %	31.29	28.25	26.08	23.9	21.73

7-р зурагт хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох утааны хийн температур тогтмол (950°C), харин хаягдал хийн зарцуулалт хэлбэлзэх үед турбины цахилгаан чадал хэрхэн өөрчлөгдөх өөрчлөлтийг харуулав. 7-р зургаас харахад хаягдаж байгаа утааны хийн зарцуулалт 50 т/ц хүртэл буурах үед турбины хурц уурын зарцуулалт 18.86 т/ц хүртэл буурч, дагаад турбины цахилгаан чадал 5158 кВт болж буурахаар байна.



**Зураг 7. Турбины цахилгаан чадал утааны хийн зарцуулалтаас хамаарах хамаарал.**

*С. Нэмэлт хийн түлшний асаагууртай үеийн загвар*

Хувьсах горимын үеийн судалгаанаас харахад 18 МВт КЦС-ын горим ажиллагаа, техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүд коксын зуухны ажиллагаанаас шууд хамаарч байна. Тиймээс коксын зуухны ажиллагаанаас хамаарахгүй 18 МВт КЦС-ын горим ажиллагаа, техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг хэвийн хэмжээнд барьж ажиллуулах зорилгоор хаягдал хийн дулааныг ашиглах зууханд нэмэлт хийн түлшний асаагуур суурилуулах үеийн судалгааг IPSErgo программ ашиглан гүйцэтгэлээ.

Нэмэлт хийн түлшний асаагуурт байгалийн хий ашиглахаар сонгосон бөгөөд байгалийн хийн элементийн бүтцийг 6-р хүснэгтэд харуулав [15].

**ХҮСНЭГТ 6. БАЙГАЛИЙН ХИЙН ЭЛЕМЕНТИЙН БҮТЭЦ**

Д.д	Элементийн бүтэц	Тоон утга, %
1	Метан	62.77
2	Этан	15.07
3	Пропан	6.64
4	Бутан	2.4
5	Пентан	1.12
6	Хүхрийн сульфит	2.8
7	Нүүрсхүчлийн хий	9.2
8	Азот	-

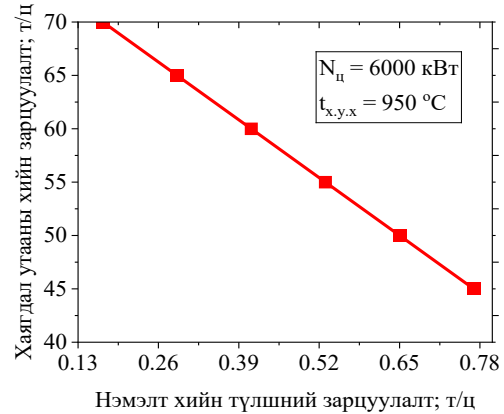
Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох утааны хийн температур тогтмол 950°C байхад утааны хийн зарцуулалт 70 т/ц-аас 45 т/ц хүртэл өөрчлөгдөх үед турбины цахилгаан чадлыг хэвийн хэмжээнд (6.0 МВт) барьж ажиллахад шаардагдах хийн түлшний зарцуулалтыг 7-р хүснэгтэд харуулав.

**ХҮСНЭГТ 7. НЭМЭЛТ ХИЙН ТҮЛШНИЙ ЗАРЦУУЛАЛТ УТААНЫ ХИЙН ЗАРЦУУЛАЛТААС ХАМААРАХ ХАМААРАЛ**

Үзүүлэлт	Утааны хийн зарцуулалт, т/ц					
	70	65	60	55	50	45
Хаягдал утааны хийн температур, °C	950	950	950	950	950	950
Турбины цахилгаан чадал, кВт	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Нэмэлт хийн түлшний зарцуулалт, т/ц	0.17	0.29	0.41	0.53	0.65	0.77

8-р зурагт нэмэлт хийн түлшний асаагуурт өгөгдөх хийн түлшний зарцуулалт хаягдал утааны хийн зарцуулалтаас хамаарах хамаарлыг үзүүлэв. 8-р зургаас харахад зуух руу орох хаягдал хийн зарцуулалт 50 т/ц хүртэл буурахад турбиныг хэвийн ачаалалтай ажиллуулахад шаардагдах уурыг үйлдвэрлэх нэмэлт хийн түлшний зарцуулалт 0.65 т/ц байхаар байна.

Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуух руу орох утааны хийн зарцуулалт тогтмол 72 т/ц байхад утааны хийн температур 925°C-аас 800°C хүртэл өөрчлөгдөх үед турбины цахилгаан чадлыг хэвийн хэмжээнд (6.0 МВт) барьж ажиллахад шаардагдах хийн түлшний зарцуулалтыг 8-р хүснэгтэд харуулав.

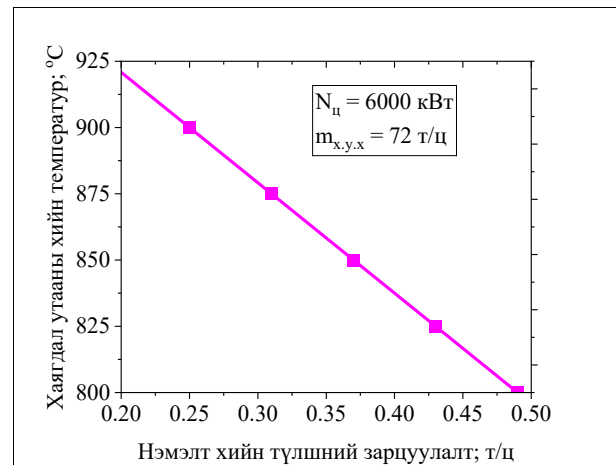


Зураг 8. Хаягдал хийн зарцуулалтаас нэмэлт хийн түлшний зарцуулалт хамаарах хамаарал.

**ХҮСНЭГТ 8. НЭМЭЛТ ХИЙН ТҮЛШНИЙ ЗАРЦУУЛАЛТ УТААНЫ ХИЙН ТЕМПЕРАТУРААС ХАМААРАХ ХАМААРАЛ**

Үзүүлэлт	Утааны хийн температур, °C					
	925	900	875	850	825	800
Хаягдал утааны хийн зарцуулалт, т/ц	72	72	72	72	72	72
Турбины цахилгаан чадал, кВт	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Нэмэлт хийн түлшний зарцуулалт, т/ц	0.18	0.25	0.31	0.37	0.43	0.49

9-р зурагт нэмэлт хийн түлшний асаагуурт өгөгдөх хийн түлшний зарцуулалт хаягдал утааны хийн температураас хамаарах хамаарлыг үзүүлэв.

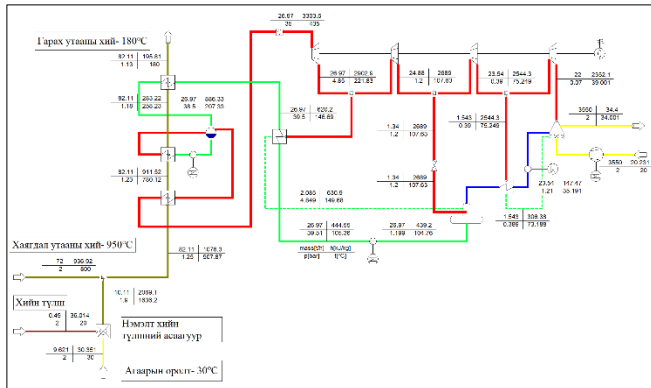


Зураг 9. Хаягдал хийн температураас нэмэлт хийн түлшний зарцуулалт хамаарах хамаарал.

9-р зургаас харахад зуух руу орох хаягдал хийн зарцуулалт тогтмол, температур нь 850°C хүртэл буурахад турбиныг хэвийн ачаалалтай ажиллуулахад

шаардагдах уурыг үйлдвэрлэх нэмэлт хийн түлшний зарцуулалт 0.375 т/ц байхаар байна. Мөн турбиныг хэвийн чадлаар ажиллахад шаардагдах нэмэлт хийн түлшний зарцуулалтад утааны хийн зарцуулалтын өөрчлөлт утааны хийн температурын өөрчлөлтөөс илүү хүчтэй нөлөөлж байна.

Хаягдал утааны хийгээр ажилладаг нэмэлт хийн түлшний асаагууртай 18 МВт КЦС-ын 1 блокын дулааны зарчмын схемийн загварыг 10-р зурагт харуулав.



Зураг 10. Нэмэлт хийн түлшний асаагууртай 18 МВт-ын КЦС-ын 1-р блокын дулааны зарчмын схемийн загвар.

## ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүлэлд кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн дэргэдэх 18 МВт чадалтай КЦС-ын процессын схемийн термодинамикийн загварыг IPSErgo програм хангамж ашиглан дизайны горимд боловсруулж, техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг тооцоолсон. Мөн боловсруулсан загвараа ашиглан 18 МВт КЦС-ын ажиллагааны гүйцэтгэл, техник-эдийн засгийн үндсэн үзүүлэлтүүдийг коксын зуухны ажиллагаанаас хамаарсан хувьсах горимын үед судлав.

Тооцооллын үр дүнгээс харахад хувьсах горимын үед буюу коксын үйлдвэрээс хаягдах хаягдал утааны хийн параметрийн өөрчлөлтөөс хамааран 18 МВт КЦС-ын ажиллагааны гүйцэтгэл, техник-эдийн засгийн үндсэн үзүүлэлтүүд болох турбинд орох уурын зарцуулалт, турбо-генераторын цахилгаан чадал, КЦС-ын цахилгаан үйлдвэрлэх үеийн АҮК зэрэг нь ихээхэн хувьсаж байна. Иймд 18 МВт КЦС-ын ажиллагааны гүйцэтгэл, техник-эдийн засгийн үндсэн үзүүлэлтүүдийн коксын зуухнаас хаягдах утааны хийн параметрийн өөрчлөлтөөс хамаарсан хамаарлыг арилгах зорилгоор хаягдал хийн дулааныг ашиглах зууханд нэмэлт хийн түлшний асаагуур суурилуулсан загварыг боловсруулсан бөгөөд нэмэлт хийн түлшний асаагуур суурилуулснаар 18 МВт КЦС-ын ажиллагааны гүйцэтгэл, техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүд хэрхэн хэвийн хэмжээнд хүрч ажиллах боломжтойг нотлон харуулсан.

Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухтай 18 МВт КЦС нь кокс-эрчим хүчний үйлдвэрийн дэргэд баригдах тул

үйлдвэрийн ажиллагаанаас хамаарч суурилагдсан хүчин чадал ашиглах цаг өндөртэй, жилд 126 сая кВт-ц цахилгаан эрчим хүч боловсруулж, 10.08 сая кВт-ц цахилгаан эрчим хүчийг дотооддоо хэрэглэж, 115.92 сая кВт-ц цахилгаан эрчим хүчийг түгээх боломжтой байна. Мөн 18 МВт КЦС-ын цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх үеийн бохир АҮК 31% байгаа нь ойролцоо бага чадлын нүүрсээр ажилладаг ДЦС-тай харьцуулахад өндөр үзүүлэлт юм.

Энэхүү 18 МВт КЦС-ын ашиглалтын хугацааг 40 жилээр тооцсон ба энэхүү КЦС-ыг барихад шаардагдах анхны хөрөнгө оруулалт 109.35 тэрбум төгрөг байна. Эдийн засгийн тооцооллоос харахад 18 МВт КЦС-ын 1 кВт-ц цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх өөрийн өртөг 31.25 төгрөг гарсан ба энэ нь түлштэй холбоотой зардлууд байхгүйтэй холбоотой бөгөөд эдийн засгийн хувьд ихээхэн сонирхол татахуйц төсөл болохоор байна.

## ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг ЭХС-ийн Дулааны инженерийн салбарын “Дулааны цахилгаан станцын симулятор лаборатори”-д хийж гүйцэтгэв.

## НОМ ЗҮЙ

- <http://www.chinawasteheatboiler.com/Coke-Dry-Quenching-Power-Plant-Waste-Heat-Boiler-pd42026975.html>
- В.А.Глухарев, Д.В.Сивицкий “Методические указания по выполнению курсовой работы «Определение эффективности применения котла-утилизатора» по дисциплине «Энергосбережение в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях»” 2019 он, хуудас 6
- Зайцев Виталий Константинович “Анализ конструкций, выбор и поверочный расчет котла утилизатора для парогазовой установки мощностью 500 МВт” 2016 он, хуудас 13-14
- Yunli Jin, Naiping Gao, Tong Zhu “Techno-economic analysis on a new conceptual design of waste heat recovery for boiler exhaust flue gas of coal-fired power plants” 21 September 2019, Energy Conversion and Management. Vol 200. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112097>
- Shiyue Qin, Shiyan Chang “Modeling, thermodynamic and techno-economic analysis of coke production process with waste heat recovery” Energy Vol. 80 (2015) 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.105>
- Hussam Jouhara, Navid Khordehghah, Sulaiman Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A. Tassou “Waste heat recovery technologies and applications” Thermal Science and Engineering



Progress. Vol 6. (2018) 268-289.  
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>

7. Pei-Hsun Lin, Pai-Hsiang Wang, An-Tsu Huang "Exergy Analysis of a Coke Dry Quenching System" China Steel Technical Report, No. 22, pp. 63-67, (2009)
8. Masayuki Watanabe, Naruo Hamasaki "Advanced Technology and Application of Large-Scale CDQ" Yokohama 221-0056, Japan
9. [9] Gaddi Rudramuni1, Sri C N Nataraj "Enhancement of steam generation in CDQ Power plant" International Research Journal of Engineering and Technology Volume 03, May-2016
10. Kai Sun, Chen-Ting Tseng, David Shan-Hill Wong, Shyan-Shu Shieh, Shi-Shang Jang, Jia-Lin Kang, Wei-Dong Hsieh "Model predictive control for improving waste heat recovery in coke dry quenching processes" Energy 80 (2015) 275-283
11. Hardarshan S. Valia "Nonrecovery and Heat recovery cokemaking technology" Coal Science Inc., Highland, IN, United States. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00010-8>
12. Abrar Inayat "Current progress of process integration for waste heat recovery in steel and iron industries" Fuel 338 (2023) 127237. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127237>
13. П.Н. Шляхин, М.Л. Бершадский, "Краткий справочник по паротурбинным установкам", Москва 1970, 28-32.
14. <https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId=204848>
15. M.A.Al-Saleh, S.O.Duffuaa, M.A.Al-Marhouan, J.A.Al-Zayer, "Impact of Crude Oil Production on the Petrochemical Industry in Saudi Arabia," Energy Volume 16 (1991) 1089-1099. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(91\)90141-8](https://doi.org/10.1016/0360-5442(91)90141-8)

Зохиогчид

### Хүрэлбаатарын Батсуурь



хаягдал дулааныг ашиглах уурын генератор.

Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Эрчим хүчний сургуульд 2020 онд элсэн орж 2024 онд "Дулааны цахилгаан станц" мэргэжлээр бакалаврын зэрэгтэй төгссөн. 2024 оноос Дулааны 4-р цахилгаан станц "ТӨХК"-ий зуухан цехд ажиллаж байна. Судалгааны ажлын чиглэл: уурын зуухны горим ажиллагаа, тоос бэлтгэлийн систем,

### Шагдарын Энхбаяр



Доктор (Ph.D), Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Эрчим хүчний сургуулийн "Дулааны инженерийн салбар"-ын ахлах багш.

2010, 2012 онуудад Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Эрчим хүчний инженерийн сургуулийг "Дулааны цахилгаан станц" мэргэжлээр бакалавр, магистрийн зэрэгтэй төгссөн. 2022 онд БНХАУ-ын Харбины Технологийн Институтэд техникийн ухааны докторын зэрэг хамгаалсан.

Судалгааны ажлын чиглэл (үүгээр хязгаарлагдахгүй):

*Нарны дулааны эрчим хүчний хэрэглээний чиглэлүүд:*

- Нар нүүрс хосолсон дулааны цахилгаан станц;
- Нарны эрчим хүчийг төвлөрүүлэх технологи (concentrating solar power-CSP);
- Нарны эрчим хүчийг төвлөрүүлэх технологийг процессын дулаан ба төвлөрсөн дулаан хангамжид хэрэглэх;
- Нарны эрчим хүчийг төвлөрүүлэх технологийг металлургийн процесст хэрэглэх;
- Дулааны энерги хуримтлуурын технологи;
- Нарны эрчим хүчний материал судлал.

*Нүүрстөрөгч бага ялгаруулдаг технологийн чиглэлүүд:*

- Нүүрстөрөгч багатай устөрөгчийн үйлдвэрлэл;
- CO<sub>2</sub> бууруулах ба түүнийг ашигтай бүтээгдэхүүнд хувиргах технологи;
- Дулааны цахилгаан станцын утааны хийг цэвэрлэх технологи;
- Эрчим хүчний материал судлал;
- Хатуу хог хаягдлаас эрчим хүч үйлдвэрлэх;
- Хаягдал хийн дулааныг ашиглах зуухны технологи.

*Уламжлалт эрчим хүч үйлдвэрлэх технологийн чиглэлүүд:*

- Процессын загварчлалын тоон аргууд;
- Дулааны инженерийн хэрэглээний CFD аргууд;
- Эргэх буцлах давхаргатай шаталтын технологи;
- Нүүрсээр ажилладаг дулааны цахилгаан станцын технологи;
- Уур-хийн хосолсон цахилгаан станцын технологи.