



OPEN ACCESS

*CORRESPONDENCE

Enkhbayar Shagdar

E-mail address:

enkhbayar.sh@must.edu.mn

RECEIVED: December 05, 2025

ACCEPTED: December 12, 2025

PUBLISHED: December 29, 2025

CITATION

A. Amgalanbaatar, E. Shagdar, "Feasibility Study on Using Air-Cooled Condensers in the Condensing System of a Combined-Cycle Power Plant", Journal of Energy Transition, vol. 3, no. 1, pp. 24–32, Dec. 2025.

COPYRIGHT

©2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Feasibility Study on Using Air-Cooled Condensers in the Condensing System of a Combined-Cycle Power Plant

Anarjargal Amgalanbaatar¹, Enkhbayar Shagdar^{2,3*}¹Thermal power plant No4" SOJSC, Ulaanbaatar, Mongolia²(School of Power Engineering, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia)³(Institute of Thermal Engineering and Industrial Ecology, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia).

*Corresponding author: enkhbayar.sh@must.edu.mn

Abstract – In modern energy production, countries are increasingly prioritizing the adoption of environmentally sustainable technologies that enhance energy efficiency while minimizing ecological impact. For Mongolia, with its arid climate and limited water resources, the traditional use of water-cooled systems in power plants poses significant environmental challenges. As a result, the adoption of innovative solutions, such as air-cooled condensers (ACCs), is becoming crucial. ACCs offer a viable alternative in water-scarce regions, especially in arid areas like the Gobi Desert, where they can help conserve local water resources without disrupting the ecological balance or the water needs of communities and wildlife. This study examines the feasibility of integrating an ACC into the K-12-35 steam turbine cooling system of a planned 124 MW combined-cycle power plant (CCPP) near the Tavan Tolgoi coal mine in Tsogtsetsii, Omnogobi Province. A performance comparison between ACCs and water-cooled condensers (WCCs) is conducted using ambient air temperatures representative of all four seasons. For the K-12-35 steam turbine, a WCC requires 1,795.8 tons of cooling water per hour to condense 54.35 tons of exhaust steam, with approximately 1.6% of this water lost to evaporation. ACCs, on the other hand, eliminate water loss entirely, providing a significant advantage in arid climates. This study also evaluates the operational performance of ACCs under Mongolia's extreme weather conditions, with ambient temperatures ranging from -20°C to 20°C. Key parameters such as air flow rates, fan power consumption, steam exhaust pressure, turbine power output, and overall thermal efficiency of power generation are analyzed to determine the suitability of ACCs for the region.

Keywords – Thermodynamic modeling, Air cooled condensers, Ambient temperature, Air flow, Fan power.

Уур-хий Хосолсон Цахилгаан Станцын Конденсацийн Системд Агаарын Хөргөлттэй Конденсатор Ашиглах Боломжийн Судалгаа

Амгаланбаатарын Анаржаргал¹, Шагдарын Энхбаяр^{2,3*}¹(Дулааны 4-р цахилгаан станц ТӨХК, Улаанбаатар, Монгол улс)²(Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, ШУТИС, Улаанбаатар, Монгол улс)³(Дулааны техник, үйлдвэрлэлийн экологийн хүрээлэн, ШУТИС, Улаанбаатар, Монгол улс)

*Холбоо барих зохиогч: enkhbayar.sh@must.edu.mn

Хураангуй – Орчин үед эрчим хүчний салбарт эрчим хүчний үр ашигтай байдлаас гадна байгаль орчинд хор хөнөөл багатай технологийг нэвтрүүлэхийг улс орнууд зорьж байна. Монгол улсын хувьд хуурай уур амьсгалтай, усны нөөц хязгаарлагдмал бүс нутагт оршдог учир уламжлалт цахилгаан станцуудад өргөн хэрэглэгдэж байгаа усан хөргөлтийн системийг ашиглах нь байгаль орчинд сөрөг нөлөөтэй тул шинэ шийдлүүдийг эрэлхийлэх нь чухал байна. Тиймээс цахилгаан станцын усны ашиглалтыг бууруулах арга нь агаарын хөргөлттэй конденсатор (АХК) хэрэглэх юм. Агаарын хөргөлттэй конденсаторыг усны нөөц бага, хэт хуурай газар буюу говийн бүсэд байгуулах нь тухайн нутаг дэвсгэрийн тэнцвэрт байдал болон хүн амьтны ахуйн усны хэрэглээнд сөрөг нөлөөлөл үзүүлэхгүй давуу талтай. Энэхүү өгүүлэлд Өмнөговь аймгийн Цогтцэций суманд байрлах Тавантолгойн уурхайн дэргэд баригдах 124 МВт чадалтай уур-хий хосолсон цахилгаан станц (УХХЦС)-ын К-12-35 маркийн уурын турбины конденсацын системд агаарын хөргөлттэй

конденсаторыг хэрэглэх боломжийг судлан, усан хөргөлттэй конденсатортай харьцуулсан бөгөөд дөрвөн улирлыг төлөөлөх 4 өөр өдрийн гадна агаарын температураас хамаарах агаарын хөргөлттэй конденсаторын ажиллагааны үзүүлэлтүүдийг судалсан. Усан хөргөлттэй конденсаторын хувьд K-12-35 маркийн уурын турбинаас цагт гарах 54.35 тонн ажилласан уурыг шингэрүүлэхэд цагт 1795.8 тонн хөргөлтийн ус шаардагдах ба үүний 1.6% нь хөргөх цамхагаас агаартай орчинд хаягддаг. Харин АХК ашигласнаар энэхүү алдагдлыг бууруулах боломжтой. Мөн Монгол орны эрс тэс уур амьсгалын нөхцөлд -20°C-аас 20°C температурын зайцад АХК ашиглах үеийн шаардлагатай агаарын зарцуулалт болон тэрхүү агаарыг шахах вентиляторын чадлыг тооцоолсон. Мөн гадна агаарын температураас хамаарах турбины уурын эцсийн даралт болон турбины цахилгаан чадал, ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК-ын хоорондын хамаарлыг судалсан.

Түлхүүр үг – Термодинамикийн загварчлал, Агаарын хөргөлттэй конденсатор, Гадна агаарын температур, Агаарын зарцуулалт, Вентиляторын чадал

I. УДИРТГАЛ

Монгол улсын усны нийт нөөц 564.8 км³ бөгөөд үүний 10.5 км³ усыг ашиглах боломжит нөөц гэж тооцдог. Ус ашиглалтын 90 орчим хувийг газар доорх гүний усаар хангадаг. 2022 оны байдлаар нийт ус ашиглалтын 56 хувийг хөдөө аж ахуй, уул уурхайн салбар 15 хувийг, унд ахуйн хэрэглээ 14 хувийг, эрчим хүч дулааны үйлдвэрлэлд 8 хувийг, үйлдвэр ахуйн үйлчилгээ 7 хувийг ашиглажээ [1].

Эрчим хүчний салбарын жилийн ус ашиглалт 2020 онд 40.8 сая м³, 2021 онд 41.5 сая м³, 2022 онд 46.2 сая м³ болон өссөн байгаа нь жил ирэх тусам усны хэрэглээ нэмэгдэх хандлагатай байгааг харуулж байна [2]. Тиймээс манай орон шиг хуурай уур амьсгалтай, усны хязгаарлагдмал нөөцтэй бүс нутагт усны хэмнэлттэй технологийг нэвтрүүлэх хэрэгтэй.

Сүүлийн жилүүдэд эрчим хүчний үйлдвэрлэлд агаарын хөргөлттэй конденсаторыг уламжлалт усан хөргөлттэй конденсатор (УХК)-ын оронд ашиглах талаар судалгаанууд, бодит төслүүд нэмэгдэж байна. АХК нь эрчим хүчний үйлдвэрлэлд усны хэрэглээг багасгах, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөллийг бууруулах зорилгоор сүүлийн жилүүдэд өргөн судлагдаж, ашиглагдаж буй технологийн нэг юм [3]. Мөн усны алдагдалгүйгээр орчны агаарын тусламжтайгаар турбины ажилласан уурын шингэрүүлдэг давуу талтай [4]. Энэ технологи нь байгаль орчинд ээлтэй шийдэл болдог бөгөөд Хятад, Япон, АНУ, Канад зэрэг орны усны хомсдолтой бүс нутагт өргөн хэрэглэгддэг. Мөн Монгол орон шиг усны хомсдолтой, хуурай уур амьсгалтай бүс нутгийн эрчим хүчний үйлдвэрлэлд нэвтрүүлэхэд ихээхэн тохиромжтой.

Гэвч уг төхөөрөмжийн ажиллагааны явцад гардаг хүйтний улиралд багц хоолойн хөлдөлт, гадна агаарын өндөр температурын үед үр ашиг бага байх, дулаан солилцооны гадаргуу дахь дулааны жигд бүс урсгал гэх мэт зарим хүндрэлтэй асуудлууд шийдэгдээгүй хэвээр байна. АХК-ын ажиллагааны гүйцэтгэл нь орчны агаарын температураас ихээхэн хамааралтай байдаг бөгөөд өндөр температуртай үед хөргөлтийн чадвар нь буурдаг. Мөн АХК-ийн ажиллагаа нь гадна агаарын температураас гадна салхины хурдтай хамааралтай бөгөөд агаарын урсгалын зарцуулалт нэмэгдэхэд эрчим хүчний дотоод хэрэглээ өсөх учир эрчим хүчний үр ашгийг бууруулдаг

[5]. Иймд гадна агаарын температурын өөрчлөлтийг харгалзан уурын эцсийн даралтыг өөрчлөн АХК-т орох агаарын хэмжээ болон агаарыг шахахад шаардагдах вентиляторын чадлыг тохируулах нь технологийн ажиллагааг сайжруулах боломжтой [6].

Мөн энэ технологийн чиглэлээр дулааны цахилгаан станцын агаарын хөргөлттэй конденсаторын ажиллагааны үзүүлэлтүүдийн судалгаа, агаар мандлын өөрчлөлт нь энтропид хэрхэн нөлөөлж АХК-ын үр ашгийг бууруулж байгаа [7] болон ДЦС-ын агаарын хөргөлттэй конденсаторуудын агаарын талын дулаан дамжуулалтыг сайжруулах [8], цахилгаан станцын агаарын хөргөлттэй конденсаторуудын гүйцэтгэлийн алдагдлыг бууруулах [9] болон агаарын хөргөлттэй конденсаторын төхөөрөмжийг хөлдөлтөөс хамгаалах [10], АХК болон УХК-ын ажиллагааны гүйцэтгэл, үзүүлэлтийг харьцуулалт [11] зэрэг олон талын судалгааны ажлууд хийгдээд байна.

2000-2005 оны байдлаар олон тооны АХК бүхий ДЦС-ууд Хятад (49%), АНУ (26%), Европ (Итали, Испани) (16%), Орос болон бусад орнуудад (2%) ашиглалтад орсон байна. Дэлхийн хэмжээнд 2007 оны байдлаар АХК бүхий ДЦС-уудын нийт хүчин чадал 81.4 ГВт хүрсэн бол 2013 оны байдлаар 115.9 ГВт, 2017 онд нийт хүчин чадал нь 150.6 ГВт-д хүрсэн [12].

Харин Монгол улсын хувьд анх удаа “Ухаа худаг” 18 МВт чадалтай ДЦС-д АХК хэрэглэж буй туршлага байна [13]. Мөн одоо хэрэгжиж буй Бөөрөлжүүтийн цахилгаан станцын төсөл нь хөргөлтийн системдээ АХК-ыг ашиглаж байна [14]. Үүнээс харахад манай оронд энэ төрлийн технологийн хэрэглээ нэмэгдэх хандлагатай байна.

Энэхүү өгүүлэлд 124 МВт чадалтай УХХЦС-ын K-12-35 маркийн турбины конденсацын системд агаарын хөргөлттэй конденсатор хэрэглэх үеийн цахилгаан станцын ажиллагааны болон техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг судалсан.

Энэхүү судалгааны ажлын шинэлэг тал нь дараах зүйлсэд оршино. Үүнд:

1. УХХЦС-ын K-12-35 маркийн турбины конденсацын системд агаарын болон усан хөргөлттэй конденсатор хэрэглэх үеийн цахилгаан станцын ажиллагааны болон техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг харьцуулан судалсан.

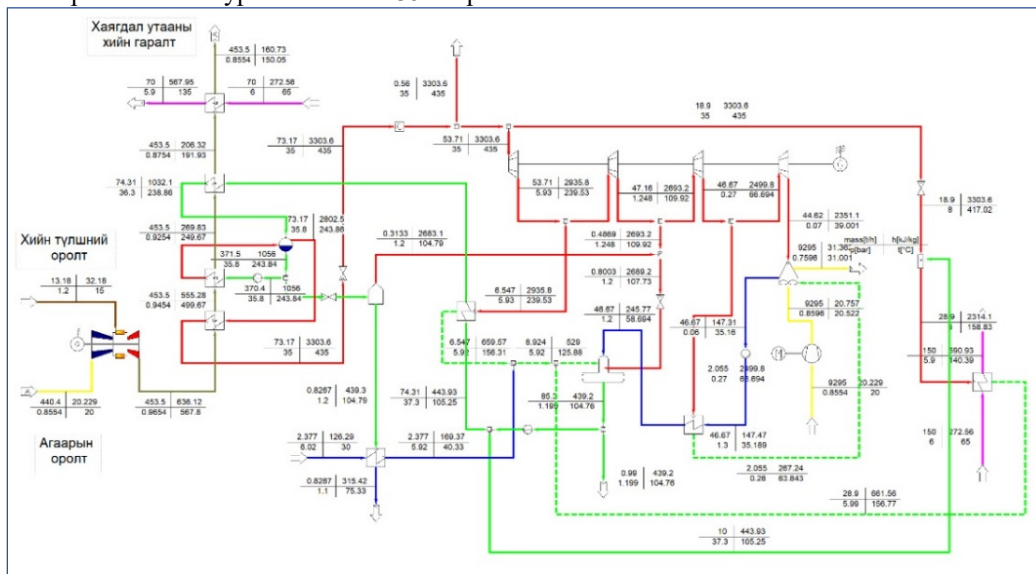
- Гадна агаарын температураас хамаарах АХК-т орох агаарын хэмжээ болон агаарыг шахах вентиляторын чадлыг тооцоолсон.
- Мөн уурын эцсийн даралт болон уурын турбины цахилгаан чадал, ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК нь гадна агаарын температураас хэрхэн хамаарахыг судалсан.
- К-12-35 маркийн турбины конденсацын системийн горим ажиллагааг дөрвөн улирлыг төлөөлөх 4 өөр өдөр сонгон авч, харьцуулан судалсан.

II. СИСТЕМИЙН ТАЙЛБАР

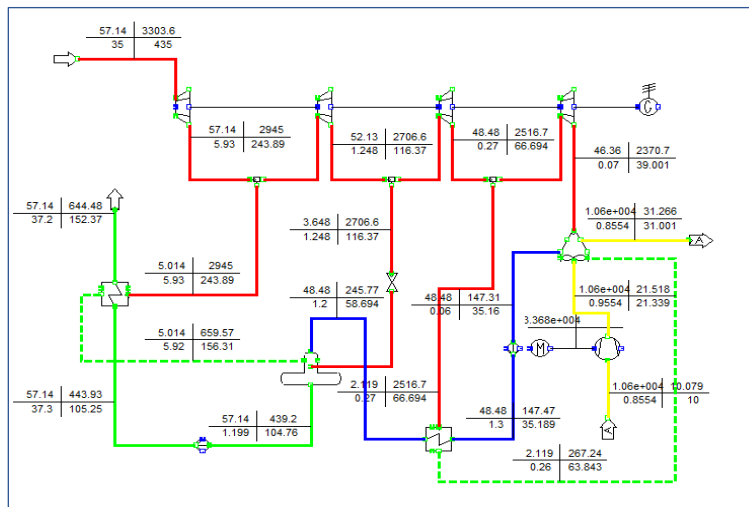
124 МВт УХХЦС нь 50 МВт цахилгаан чадалтай SGT-800 маркийн 2 ширхэг хийн турбин болон 35 бар

даралттай, 435 °С температуртай уураар ажилладаг 2 ширхэг К-12-35 маркийн турбинтай бөгөөд түүний конденсацын системд агаарын хөргөлттэй конденсатор суурилуулахаар төлөвлөсөн [15]. Түүний термодинамикийн загварыг 1-р зурагт үзүүлэв.

Энэхүү өгүүлэлд конденсацын системд АХК-ыг ашиглах үеийн ажиллагааг судлах учир К-12-35 маркийн уурын турбины хэсгийн термодинамикийн загварыг тусгайлан авч үзсэнийг 2-р зурагт харуулав.



Зураг 1. УХХЦС-ын 62 МВт чадалтай эхний блокийн процессийн схемийн термодинамикийн загвар



Зураг 2. АХК бүхий К-12-35 маркийн уурын турбины дулааны зарчмын схемийн загвар

Тооцоонд ашиглагдсан тоон мэдээллийг К-12-35 маркийн турбины үйлдвэрлэгчийн техникийн үзүүлэлт болон дулааны зарчмын схемийн термодинамикийн загварын үр дүнтэй харьцуулан загварыг

баталгаажуулсан. Харьцуулсан үр дүнг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

Хүснэгт 1. К-12-35 маркийн уурын турбины техникийн үзүүлэлт, IPSEpro программ хангамж дээр гараас өгсөн болон тооцооны утга

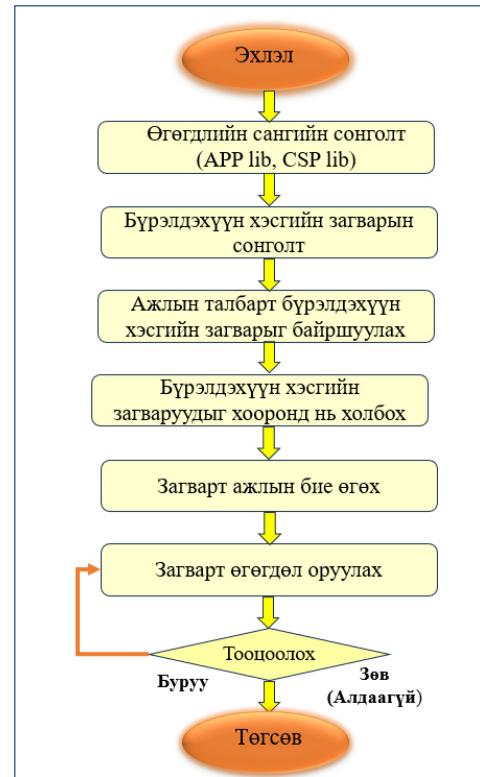
Параметр	Нэгж	Төслийн утга	Программд гарнаас өгсөн утга	Программын тооцоолсон утга
Турбогенераторын хэвийн чадал	кВт	12000	12000	-
Хэт халсан уурын даралт	бар	35	35	-
Хэт халсан уурын температур	°C	435	435	-
Ажилласан уурын даралт	бар	0.07	0.07	-
Тохируулгагүй авлагын тоо	ш	3	3	-
Тэжээлийн усны температур	°C	152	-	152.37
Хэвийн ачааллын үеийн хэт халсан уурын зарцуулалт	т/ц	53.64	-	57.14
Уурын хувийн зарцуулалт	кг/кВт.ц	4.14	-	4.76
Дулааны хувийн зарцуулалт	кДж/кВт.ц	11898	-	12662

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгааны ажлыг дулааны цахилгаан станцын дулааны гүйцэтгэлийн загварыг бий болгох, үр дүнг тооцоолох болон дүн шинжилгээ хийхэд тохиромжтой IPSEpro программ хангамжийг ашиглан гүйцэтгэсэн.

IPSEpro нь өгөгдлийн сангийн тусламжтайгаар системийг илүү нарийвчлалтай загварчлах боломжийг олгодог. Боловсруулсан загварыг симуляцид оруулж, математик тэгшитгэлүүдийг бодож системийн ажиллагааны үзүүлэлтүүд, эрчим хүчний хэрэглээ, алдагдал зэрэг үр дүнг тодорхойлно. Боловсруулсан загвар болон симуляцийн үр дүнг хадгалж, янз бүрийн нөхцөлд дахин ашиглах боломжтой. Энэхүү программ хангамж нь инженерүүдэд нарийн төвөгтэй системүүдийг хялбарчилж оновчтой шийдвэр гаргах нөхцөлийг бүрдүүлэхэд тусалдаг [16].

3-р зурагт 124 МВт уур-хий хосолсон ЦС-ын К-12-35 маркийн уурын турбины дулааны зарчмын схемийг IPSEpro программ хангамж ашиглан боловсруулах хялбаршуулсан логик схемийг үзүүлэв.



Зураг 3. 124 МВт уур-хий хосолсон ЦС-ын процессын схемийг загварчлах хялбаршуулсан схем

К-12-35 маркийн уурын турбины дулааны схемийн загварт ашиглагдсан термодинамикийн томъёонуудыг бүрэлдэхүүн хэсгийн загвар тус бүрээр дараах байдлаар өгөв [17].

А. Турбины загвар.

Материалын болон дулааны баланс:

$$\begin{cases} m_f - m_d = 0.0 \\ h_f - h_d = 0.0 \end{cases} \quad (1)$$

Турбины изоэнтроп ашигт үйлийн коэффициент:

$$\eta_s = \left(\frac{h_f - h_d}{h_f - h_{d1}} \right); \quad (2)$$

Цахилгаан үйлдвэрлэл:

$$(h_f - h_d) \cdot \eta_m \cdot m_f + W_{in} - W_{out} = 0.0; \quad (3)$$

Генераторын үйлдвэрлэх цахилгаан чадал:

$$W - \eta_{el} \cdot \eta_m \cdot W_{shaft.in} = 0.0; \quad (4)$$

Энд: m – массын зарцуулалт, (т/ц); h – дулаан агуулалт, (кДж/кг); W – цахилгаан чадал, (кВт); η – АЙК, f – оролт (feed); d – гаралт (drain); in – оролт; out – гаралт; m – механик; el – цахилгаан.

В. Конденсаторын загвар.

Материалын болон дулааны баланс (ууран тал):

$$\left\{ \begin{array}{l} m_f^h + m_{f,rc} = m_d^h \\ h_f^h \cdot m_f^h + h_{f,rc} \cdot m_{f,rc} - h_f^c \cdot m_f^c = q_{trans} \end{array} \right\}; \quad (5)$$

Халуун талын даралтын уналт:

$$p_{f,rc} - \Delta p_{rc} = p_d^h; \quad (6)$$

Материалын болон дулааны баланс (усан тал):

$$\left\{ \begin{array}{l} m_f^c = m_d^c \\ m_f^c \cdot h_f^c - m_d^h \cdot h_d^h + q_{trans} = 0.0 \end{array} \right\}; \quad (7)$$

Хүйтэн талын даралтын уналт:

$$p_f^c - \Delta p_c = p_d^c; \quad (8)$$

C. АХК-ын салхилуурын загвар.

Материалын болон дулааны баланс (ууран тал):

$$\left\{ \begin{array}{l} m_f = m_d \\ (h_f - h_d) \cdot \frac{m_f}{\eta_m} + W_{shaft\ in} - W_{shaft\ out} = 0.0 \end{array} \right\}; \quad (9)$$

Даралтын харьцаа:

$$p_f \cdot \text{pressure ratio} = p_d \quad (10)$$

D. Насосны загвар.

Материалын баланс:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_f = m_d \\ (h_f - h_d) \cdot \frac{m_f}{\eta_m} + W_{shaft\ in} - W_{shaft\ out} = 0.0 \end{array} \right\}; \quad (11)$$

E. Хөдөлгүүрийн загвар.

Насосны хэрэглэх цахилгаан чадал:

$$\eta_{el} \cdot \eta_m + W_{shaft\ in} = 0.0 \quad (12)$$

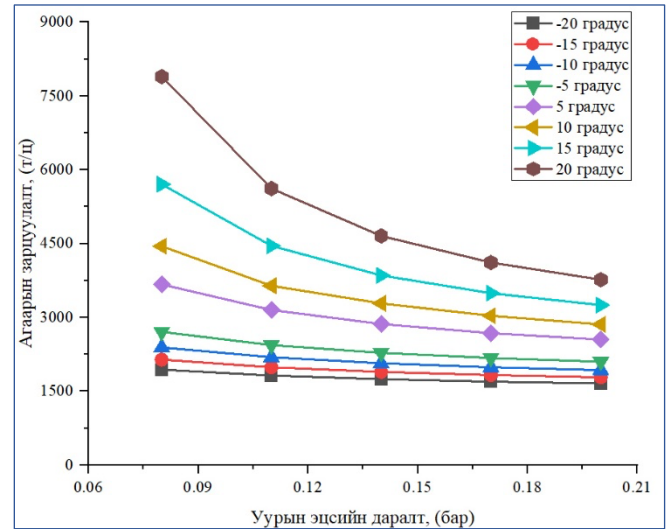
Энд: m – массын зарцуулалт, (т/ц); h – дулаан агуулалт, (кДж/кг); W – цахилгаан чадал, (кВт); p – даралт, (бар); η – АУК, f – оролт (feed); d – гаралт (drain); in – оролт; out – гаралт; m – механик; el – цахилгаан

Хаягдал утааны хийн дулааныг дахин ашиглах уурын генераторын термодинамикийн загварчлал, ажиллагааны гүйцэтгэлийн судалгааг IPSEpro программ хангамж ашиглан Х.Батсуурь болон Ш.Энхбаяр нар [18] кокс эрчим хүчний цахилгаан станцын жишээн дээр гүйцэтгэсэн байна.

IV. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

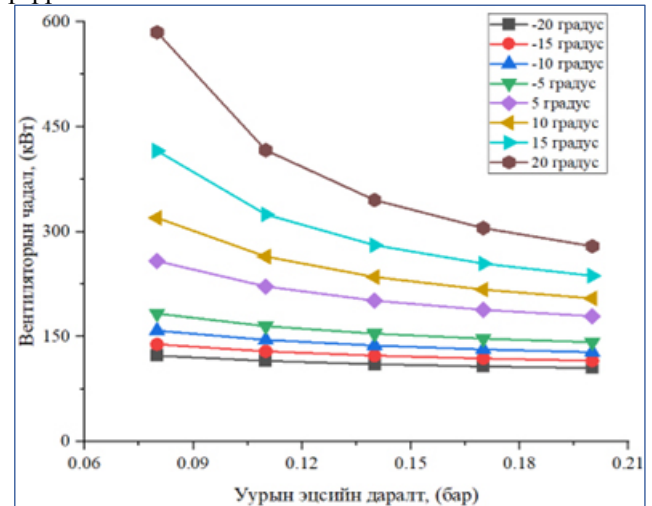
К-12-35 маягийн турбин хэвийн хүчин чадлаараа ажиллаж байх үед гарч буй уурын эцсийн даралтыг 0.08 бар – 0.2 бар хүртэл авч, турбинаас гарч буй уурын даралтад нэг бүрчлэн гадна агаарын температурыг +20 °С-аас -20°С хүртэл өөрчлөн агаарын зарцуулалтыг тооцоолон 4-р зурагт үзүүлэв. Уурын турбинаас ажиллаад гарах уурын эцсийн даралт нэмэгдэх тусам агаарын зарцуулалт буурсан бөгөөд гадна агаарын температураас ихээхэн хамаарч буйг 5.4-р зургаас харж болно. Уурын эцсийн даралт 0.08 бар, гадна агаарын температур -20 °С

байхад агаарын зарцуулалт цагт 1657 тонн, +20 °С үеийн агаарын зарцуулалт цагт 1938 тонн ба энэ нь турбинаас гарч буй ажилласан уурыг шингэрүүлэхэд шаардагдах агаарын хэмжээ юм.



Зураг 4. Уурын эцсийн даралт болон гадна агаарын температураас хамаарсан агаарын зарцуулалт

Агаарын хөргөлттэй конденсатор нь агаарыг шахахын тулд вентилятор ажилладаг тул дотоод эрчим хүчний хэрэглээ усан хөргөлттэй конденсатортай харьцуулахад их ба үүнийг дагаад дотоод хэрэгцээний ЦЭХ-ний хэмжээ өсдөг. Хэвийн хүчин чадлаараа ажиллаж байх үед гадна агаарын температурыг -20 °С аас +20 °С хооронд өөрчлөн уурын эцсийн даралтын өөр өөр утгад агаарыг шахахад шаардлагатай вентиляторын чадлыг тооцоолон 5-р зурагт үзүүлэв.



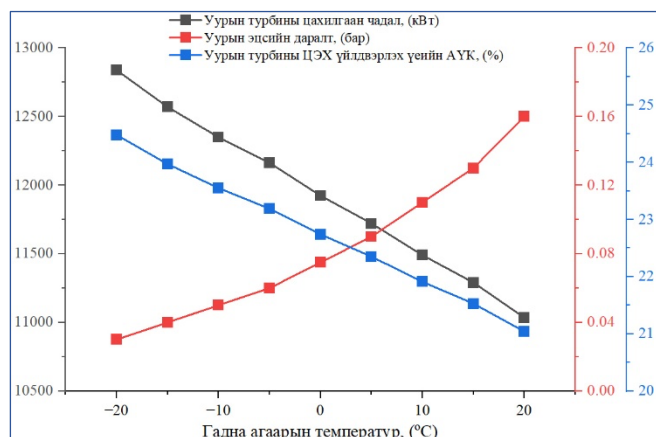
Зураг 5. Гадна агаарын температур болон уурын эцсийн даралтаас хамаарсан вентиляторын чадал

Уурын эцсийн даралт 0.08 бар, гадна агаарын температур +20 °С үед шаардагдах агаар цагт 1938 тонн байхад вентиляторын чадал 122.8 кВт, -20 °С үеийн агаарын зарцуулалт цагт 1657 тонн байх бөгөөд үүнийг шахахын тулд 104.9 кВт цахилгаан эрчим хүч шаардагдахаар байна.

АХК-тай үеийн турбо-генераторын цахилгаан чадал болон ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК нь уурын эцсийн даралтаас хэрхэн хамаарч буй хамаарлыг 6-р зурагт үзүүлэв.

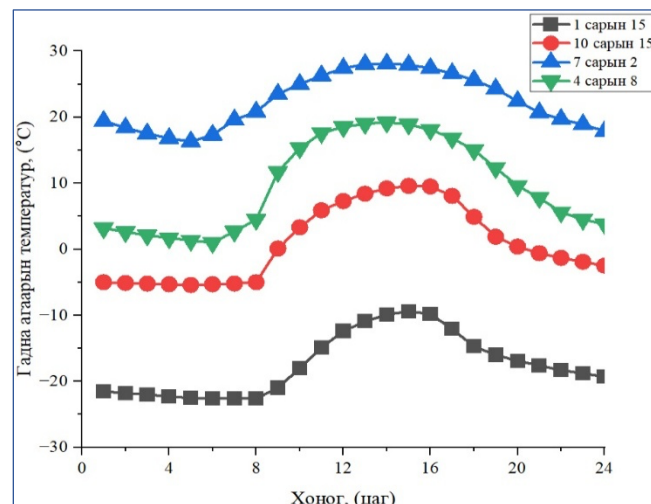
УХХЦС-ын АҮК-д ихээхэн нөлөөлдөг хүчин зүйл бол уурын турбины цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх үеийн АҮК юм. Тиймээс агаарын хөргөлттэй конденсаторыг ашиглах тохиолдолд уурын турбины хэвийн ажиллагааг хангахын тулд гадна агаарын температураас хамааруулан уурын эцсийн даралтыг өөрчлөх шаардлагатай. Гадна агаарын температур ихсэх тусам агаарын нягт, дулаан багтаамж зэргээс хамааран конденсаторт орох агаарын хэмжээ огцом нэмэгдэх учир уурын эцсийн даралтыг ихэсгэх шаардлагатай. Уурын эцсийн даралт өөрчлөгдсөнөөр уурын турбины цахилгаан чадал болон ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК даган хувьсдаг.

Гадна агаарын температур -10°C үед уурын эцсийн даралт $P_k = 0.05$ бар, уурын турбины цахилгаан чадал 12163 кВт, ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК 23.55%, харин гадна агаарын температур 15°C хүрэхэд P_k нь 0.13 бар, цахилгаан чадал 11291 кВт, ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК нь 21.53% хүртэл буурсан. Үүнээс дүгнэхэд гадна агаарын температураас уурын турбины цахилгаан чадал болон ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК урвуу харин уурын эцсийн даралт нь шууд хамаарч байгаа нь харагдаж байна.



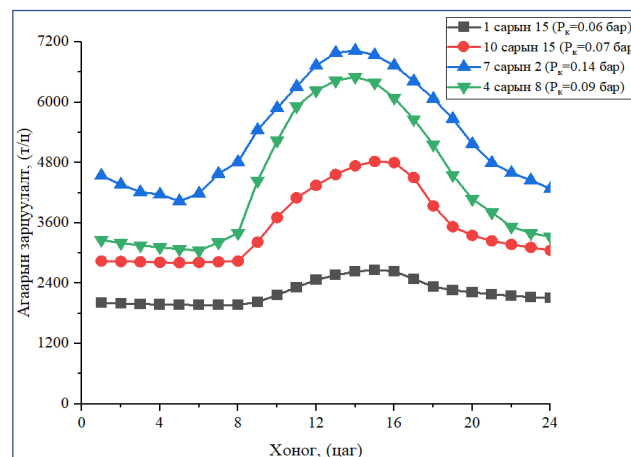
Зураг 6. Гадна агаарын температураас хамаарах уурын уурын эцсийн даралт болон турбины цахилгаан чадал, ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК-ын хамаарал

Монгол орны эрс тэс уур амьсгалд уур-хий хосолсон цахилгаан станцын уурын турбины хэсгийн агаарын хөргөлттэй конденсаторын ажиллагаа гадна агаарын температураас хэрхэн хамаарахыг судлахын тулд жилийн дөрвөн улирлыг төлөөлөх нэг, нэг өдөр сонгон авсан бөгөөд тухайн өдрүүдийн гадна агаарын температурын өөрчлөлтийг 7-р зурагт үзүүлэв.



Зураг 7. Дөрвөн улирлыг төлөөлөх дурын сонгосон 4 өдрийн гадна агаарын температурын өөрчлөлт

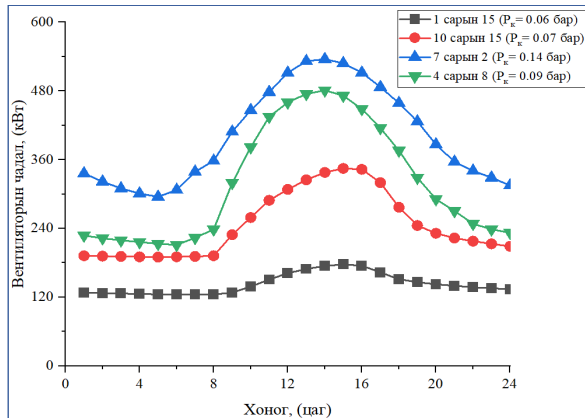
Уур-хий хосолсон ЦС-ын уурын турбины ЦЭХ-ний үйлдвэрлэлийг жилийн дөрвөн улирлыг төлөөлөх 4 өдөр сонгож авч ЦЭХ-ний үйлдвэрлэлд шаардагдах агаарын хөргөлттэй конденсаторт орох агаарын хэмжээг 8-р зурагт харуулав. Үүнээс харахад гадна агаарын температураас шууд хамаарах нь харагдаж байна. Мөн гадна агаарын температураас хамааруулан уурын эцсийн даралтын өөр өөр утгад тооцоолсон. Дөрвөн улирлыг төлөөлөх 4 өдрийн хөргөлтийн системд шаардагдах агаарын хэмжээ 7 сарын 2-нд гадна агаарын температур $+28.1^{\circ}\text{C}$ хүрэхэд уурын эцсийн даралтыг 0.14 бар гэж сонгоход цагт 7028 тонн, 10 сарын 15-нд гадна агаарын температур 9.6°C хүрч $P_k = 0.07$ бар үед цагт 4824 тонн, 4 сарын 8-нд $P_k = 0.09$ бар, гадна агаарын температур 19.2°C байхад цагт 6507 тонн агаар шаардагдах бол өвлийн улирлын 1 сарын 15-нд гадна агаарын температур хамгийн дулаандаа -9.4°C хүрэхэд цагт 2667 тонн агаар шаардлагатай.



Зураг 8. Дөрвөн улирлаас дурын сонгосон 4 өдрийн уурын турбины конденсацийн системд шаардагдах АХК-т орох агаарын хэмжээ

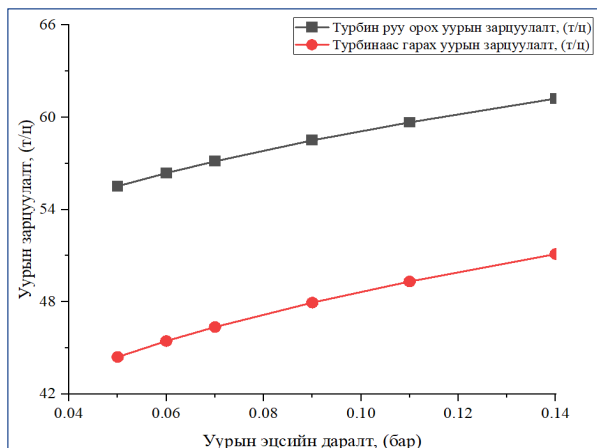
Зураг 8-т харуулсан агаарыг шахахад шаардагдах вентиляторын чадлыг зураг 9-т харуулав. Дөрвөн улирлыг төлөөлөх 4 өдрийн агаарын хөргөлттэй конденсаторт орох агаарыг шахахад 7 сарын 2-нд цагт

7028 тонн агаарыг 535.4 кВт, 10 сарын 15-нд цагт 4824 тонн агаарыг 344.9 кВт, 4 сарын 8-нд цагт 6507 тонн агаарыг 481.1 кВт чадлаар шахах бол өвлийн улирлын 1 сарын 15-нд цагт 2667 тонн агаарыг шахахад шаардагдах вентиляторын чадал 177.2 кВт байна.



Зураг 9. АХК-т орох агаарыг шахахад шаардагдах вентиляторын чадал

Гадна агаарын температураас хамаараад АХК-т орох агаарын хэмжээ, болон үүнийг шахахад шаардагдах вентиляторын чадал өөрчлөгдөнө. Тиймээс хөргөлтийн системийн найдвартай, бодит ажиллагааг хангахын тулд дөрвөн улирлыг төлөөлөх өдөр тус бүрийн уурын эцсийн даралтыг өөрчлөн тооцоолол хийсэн. Үүнтэй холбогдуулан уурын турбинд орох болон түүнээс гарах уурын зарцуулалт уурын эцсийн даралтаас хэрхэн хамаарах хамаарлыг 10-р зурагт үзүүлэв.

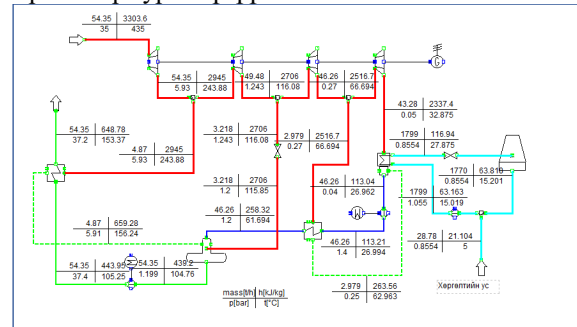


Зураг 10. Уурын эцсийн даралтаас хамаарах уурын турбинд орох болон түүнээс гарах уурын зарцуулалтын хамаарал

Уурын эцсийн даралтыг 0.05-аас 0.14 бар хүртэл өөрчлөн авсан ба $P_k = 0.06$ бар үед уурын турбин руу орох уурын зарцуулалт (D_0) 56.37 т/ц, уурын турбинаас гарах уурын зарцуулалт (D_k) 45.45 т/ц бол уурын эцсийн даралт 0.14 бар хүрэхэд $D_0 = 61.22$ т/ц, $D_k = 51.11$ т/ц байсан. Эндээс харахад уурын турбин руу орох болон түүнээс ажиллаад гарах уурын зарцуулалт нь уурын эцсийн даралтаас шууд хамаарч байна.

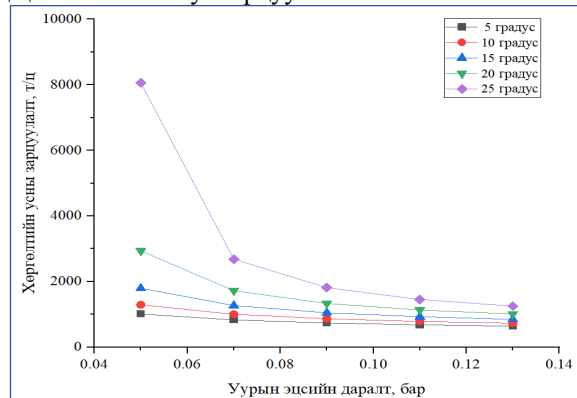
К-12-35 турбинд АХК болон УХК ашиглах үеийн эрчим хүчний үзүүлэлтийн харьцуулалт

Агаарын хөргөлттэй давуу болон сул талыг судлахын тулд усан хөргөлттэй цахилгаан станцын загвар боловсруулж, тооцоолол хийсэн. К-12-35 турбинтай усан хөргөлттэй К-12-35 маркийн турбины дулааны схемийг IPSEpro программ хангамж ашиглаж, боловсруулсан загварыг 11-р зурагт үзүүлэв.



Зураг 11. УХК-тай К-12-35 маркийн уурын турбины дулааны зарчмын схемийн загвар

К-12-35 маягийн турбин усан хөргөлттэй конденсаторын ажлын гормын үед ашиглах усны хэмжээг тооцоолон, уурын эцсийн даралт, хөргөлтийн усны температураас хэрхэн хамаарч өөрчлөгдөж байгааг тооцоолж агаарын хөргөлттэй конденсаторт ашиглах усыг 5.12-р зурагт үзүүлсэн. Уурын турбинаас гарж буй уурын даралт 0.05 бар, хөргөлтийн усны температур +15 °C үед цагт 1795.84 тонн ус зарцуулах буюу 12 МВт үйлдвэрлэхийн тулд шаардагдах хөргөлтийн усны зарцуулалт юм. Харин хөргөлтийн усны температур +5 °C үед цагт 1009 тонн ус зарцуулна.



Зураг 12. Уурын эцсийн даралт болон хөргөлтийн усны температураас хамаарах хөргөлтийн усны зарцуулалт

К-12-35 турбины хөргөлтийн системд усан хөргөлттэй конденсатор болон агаарын хөргөлттэй конденсаторыг ашиглах үеийн харьцуулсан судалгааны тооцоолсон утгуудыг 2-р хүснэгтэд үзүүлэв.

Хүснэгт 2. Усан болон агаарын хөргөлттэй конденсаторыг харьцуулан тооцоолсон утгууд

Нэр	Тэмдэглэгээ	Нэгж	УХК	АХК
Уурын турбины чадал	$N_{ц}$	кВт	12000	12000

Турбинд орох уурын зарцуулалт	D_0	т/ц	54.35	57.14
Уурын хувийн зарцуулалт	d_0		4.53	4.76
Дулааны хувийн зарцуулалт	q_0	кДж/кг	12023.39	12962.29
Хөргөлтийн биеийн зарцуулалт	$G_{ус}$ $G_{агаар}$	т/ц	1795.8 ($P_k=0.05$ бар)	4918 ($P_k=0.07$ бар)
Дотоод хэрэгцээний ЦЭХ	$N_{дх}$	кВт	16.71	352.1
Уурын турбины ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК	η	%	24.05	22.88
Станцын жилийн усны алдагдал	-	т	172200	0

Усан хөргөлттэй конденсатор нь агаарын хөргөлттэй конденсатортой харьцуулахад дотоод хэрэгцээний цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ багатай, уурын турбины ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК өндөртэй байгаа нь 2-р хүснэгтээс харагдаж байна. Гэвч Монгол орны усны нөөц нь жигд бус тархсан байдаг тул дан ганц усан хөргөлттэй конденсаторыг ашиглах нь тохиромжгүй юм.

Усан хөргөлттэй конденсатор бүхий хөргөлтийн системийг ашиглах үед хөргөх цамхгийн оройгоор агаартай цуг цагт хөргөлтийн усны 1-2% нь алдагддаг. Энэхүү алдагдлыг 1.6% гэж тооцвол цагт 28.73 тонн, жилд 172200 тонн хөргөлтийн ус ууршилтаар алдагдана. Харин агаарын хөргөлттэй конденсаторыг ашигласнаар усны алдагдалгүй учир усны нөөц бага буюу говийн бүс нутгийн тэнцвэрт байдал, хүн амьтны амьдралын хэв маягт сөрөг нөлөө бага үзүүлнэ.

ДүГНЭЛТ

Энэхүү өгүүлэлд 124 МВт чадалтай уур-хий хосолсон станцын уурын циклийн хэсэгт ажиллах К-12-35 маркийн турбины хөргөлтийн системд агаарын хөргөлттэй конденсаторыг ашиглах боломжийн судалгааг хийж гүйцэтгэв.

Уурын турбин нь хэвийн чадлаараа ажиллах үед гадна агаарын температураас хамааран агаарын хөргөлттэй конденсатор луу орох агаарын зарцуулалт болон агаарыг шахах вентиляторын чадал хэрхэн өөрчлөгдөхийг судлахад уурын эцсийн даралт 0.08 бар үед гадна агаарын температур 15 °C байхад АХК-т орох агаарын хэмжээ цагт 5704 тонн, үүнийг шахах вентиляторын чадал 415.7 кВт байна. Харин гадна агаарын температур -15°C болж буурахад АХК-т орох агаарын хэмжээ цагт 2142 тонн, үүнийг шахах вентиляторын чадал 139.8 кВт болсон. Уурын эцсийн даралтыг өсгөн 0.2 бар болгоход гадна агаарын температур 15°C үед АХК-т агаарын хэмжээ цагт 3249 тонн, энэ агаарыг шахахад шаардагдах вентиляторын чадал 236.8 кВт байсан бол -15°C температуртай үед 1785 тонн агаар цагт АХК-т орох ба үүнийг шахахад шаардагдах вентиляторын чадал 116.3 кВт болон буурсан. Эндээс дүгнэхэд гадна агаарын температураас АХК-ын ажиллагаа шууд хамаарч байгааг харж болно. Мөн АХК-ын найдвартай ажиллуулахын тулд гадна агаарын температурт харгалзуулан уурын эцсийн даралтыг өөрчлөх шаардлагатай.

Тиймээс дөрвөн улирал тус бүрээс дурын нэг, нэг өдөр сонгон авч агаарын хөргөлттэй конденсаторын ажиллагааг судлахдаа гадна агаарын температур болон АХК-ыг найдвартай ажиллах нөхцөлийг харгалзан үзэж уурын эцсийн даралтыг 0.06-аас 0.14 бар даралтын хооронд ялгаатай сонгон авсан. Зуны улиралд гадна агаарын температур өндөр байдаг учир АХК-т орох агаарын зарцуулалт өссөнөөр вентиляторын чадал өсч ашигт ажиллагаа буурдаг тул уурын эцсийн даралтыг 0.14 бар даралтаар сонгосон. Бодит ажиллагаанд үүнээс өндөр (0.22 бар) байх боломжтой. Энэ уурын турбины уурын хувийн зарцуулалтыг өсгөх сул талтай ч зуны улиралд ажиллах АХК-ыг горим ажиллагааг сайжруулна.

АХК-ыг усан хөргөлттэй конденсатортой харьцуулахад уурын орох болон түүнээс гарах уурын зарцуулалт ихтэй, уурын болон дулааны хувийн зарцуулалт өндөртэй. Мөн хөргөлтийн системд ашиглах цахилгаан эрчим хүчний хэмжээ нь АХК-т илүү байдаг. Тиймээс ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК нь усан хөргөлттэй конденсатортай үед 24.05% харин АХК-тай үеийн ЦЭХ үйлдвэрлэх үеийн АҮК 22.88% байгаа нь эрчим хүчний үзүүлэлтийн хувьд агаарын хөргөлттэй конденсатор нь УХК-аас үр ашиг муутай болохыг харуулж байна.

Гэвч УХК-ыг ашиглах үеийн хөргөх цамхгаас орчинд алдагдах хөргөлтийн усны алдагдлыг арилгах давуу талтай. К-12-35 маркийн турбины цагт 43.28 тонн ажилласан уурыг шингэрүүлэхэд 1795.8 тонн хөргөлтийн ус шаардагдах ба түүний 1.6%-ыг хөргөх цамхгаас алдагдана гэж тооцоход цагт 28.7 тонн, жилд 172200 тонн хөргөлтийн ус алдагдахаар байна. АХК-ыг ашигласнаараа энэхүү алдагдлыг арилгаж байгаа нь байгальд ээлтэй технологи болохыг харуулж байна.

ТАЛАРХАЛ

Судалгааны ажлыг хэвлүүлэхэд Энэхүү судалгааны ажлыг ЭХИС-ийн ДЦС-ын тэнхимийн “Дулааны цахилгаан станцын симулятор лаборатори”-д хийж гүйцэтгэв. *Холбогдох зохиогчийн мэдээлэл: 94490717, enkhbayar.sh@must.edu.mn.

НОМ ЗҮЙ

1. <https://zogii.mn/post/7581907>
2. <https://water.gov.mn/news/stat-info>
3. D. Kroger, Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers: Thermal-Flow Performance Evaluation and Design, PennWell Books, 2004.
4. Angjun Xie, Liuming An, Heng Chen, Xiaojun Xue, Gang Xu, Performance optimization of the air-cooling system in a coal-fired power unit based on intelligent algorithms, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120791>
5. J. Harpster, Empirical Analysis of Air-Cooled Condenser Performance, Conco Systems Technical Report, 2021.
6. S. White, The Effect of Windscreens and Walkways on Air-Cooled Condenser Performance, ASME Journal of Energy Resources Technology, 2019.

7. Jovan B.S., Predrag M.Z., Milan M.T., Mladen A.T., and Christian P.B., "Investigation of air-cooled condenser's operating parameters in modern thermal power plant," 2022. [10.2298/TSCI220806203S](https://doi.org/10.2298/TSCI220806203S)
8. Jennifer Lin, Allison M., Taylor S.K., Srinivas G., "Improving Air-Side Heat Transfer Performance in Air-Cooled Power Plant Condensers," 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114913>
9. John G.B., Alexander S.R., Srinivas G., "Reducing the performance penalty of air-cooled condensers in power plants," 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.065>
10. Г.Нарандулам, "Агаарын хөргөлттэй конденсаторын төхөөрөмжийг хөдөлгөөс хамгаалах боломжийн судалгаа," Улаанбаатар хот, 2015.
11. B. Kiran Naik, P. Muthukumar, "Empirical correlation based models for estimation of air cooled and water cooled condenser's performance", 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.070>
12. Г.Нарандулам, Аронсон, К.Э., "Агаарын хөргөлттэй конденсаторын хувьсах горимын тооцоо," 2024.
13. Г.Бямбатулга, "50 МВт чадалтай нарны дулааны цахилгаан станцад агаарын хөргөлттэй конденсатор хэрэглэх боломжийн судалгаа," 2024.
14. Г.Бямбатулга, Ш.Энхбаяр, М.Тайванбат, "600 МВт чадалтай Бөөрөлжүүтийн дулааны цахилгаан станцын технологийн судалгаа," Дулааны шинжлэх ухаан ба инженерчлэл-2024 эрдэм шинжилгээний бага хурлын бүтээлийн эмхэтгэл, Улаанбаатар, 2024.
15. А.Анаржаргал, Ш.Энхбаяр, Б.Баттөр, "Уур-хий хосолсон цахилгаан станцын термодинамикийн загварчлалын судалгаа," Дулааны шинжлэх ухаан ба инженерчлэл-2024 эрдэм шинжилгээний бага хурлын бүтээлийн эмхэтгэл, Улаанбаатар, 2024.
16. <https://simtechnology.com/ipsepro/system-description> Accessed 2024.12.12.
17. Х.Тэмүүлэн, Б.Нямхүү, Б.Цэрэнжамц, Ш.Энхбаяр, "Агаарын болон усан хөргөлттэй конденсаторуудын ажиллагааны горимын харьцуулсан судалгаа (К-6-35

маягийн уурын турбины жишээн дээр)," Улаанбаатар, 2023.

18. Х.Батсуурь, Ш.Энхбаяр, "Кокс-Эрчим хүчний үйлдвэрийн дэргэдэх 18 МВт чадалтай конденсацйн цахилгаан станцын загварчлалын судалгаа," 2024.

Зохиогчид

Амгаланбаатарын Анаржаргал



Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Эрчим хүчний сургуульд 2021 онд элсэн орж 2025 онд "Дулааны цахилгаан станц" мэргэжлээр бакалаврын зэрэгтэй төгссөн. 2025 оноос Дулааны 4-р цахилгаан станц "ТӨХК"-ий турбин цехэд ажиллаж байна. Судалгааны ажлын чиглэл: хийн түлш, уур-хий хосолсон цахилгаан станцын горим ажиллагаа, агаарын хөргөлттэй конденсаторын ажиллагааны гүйцэтгэл.

<https://orcid.org/0009-0007-9746-1899>

Шагдарын Энхбаяр



Доктор (Ph.D), Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургуулийн Дулааны цахилгаан станцын тэнхимийн дэд профессор.

2010, 2012 онуудад Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Эрчим хүчний инженерийн сургуулийг "Дулааны цахилгаан станц" мэргэжлээр бакалавр, магистрын зэрэгтэй төгссөн.

2022 онд БНХАУ-ын Харбины Технологийн Институтэд техникийн ухааны докторын зэрэг хамгаалсан.

<https://orcid.org/0000-0003-0123-0943>