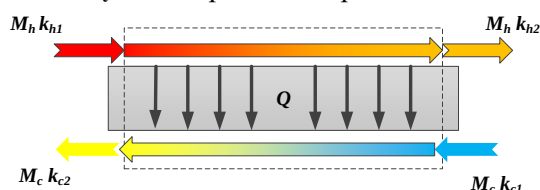


B priedas. Komponentų termodinaminės analizės modeliai

1. Dviejų srautų šilumokaitis su vienodais srautais esant kintančiai apsupties temperatūrai

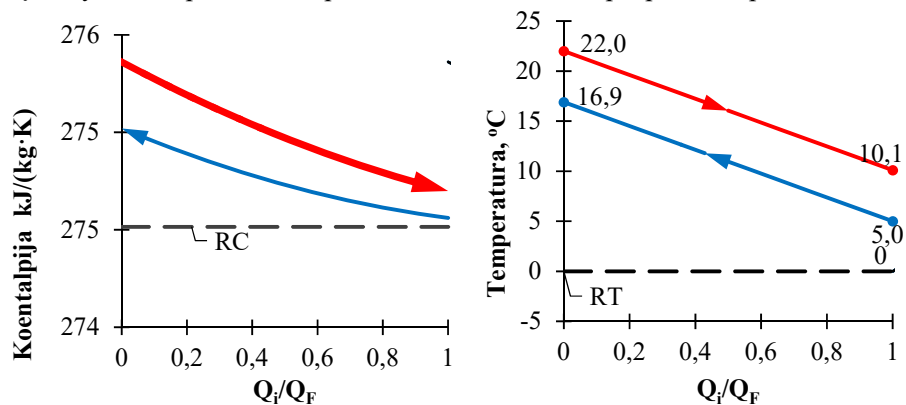
Vienas iš specifinių atvejų, kuriame galima identifikuoti nekorektišką matematinio modelio taikymo atvejį, yra dviejų srautų šilumokaičio eksergijos srautų analizė. Apsupties temperatūrai susilyginus su šilto arba šalto srauto temperatūromis arba atsidūrus tarp jų, literatūroje nurodomi matematiniai modeliai iškreipia efektyvumo rodiklio vertę, gaunant neigiamas arba 1 viršijančias vertes. (Martinaitis et. al. 2017).

Pasinaudojant entalpijos, koentalpijos (specifinės eksergijos) ir savitosios entropijos išraiškomis, gali būti suformuojamas efektyvumo skaičiavimo procesas, kurio pagalba yra išreiškiamas funkcinis efektyvumas dviejų srautų šilumokaičiui, kurio principinė srautų schema pateikiama paveiksle



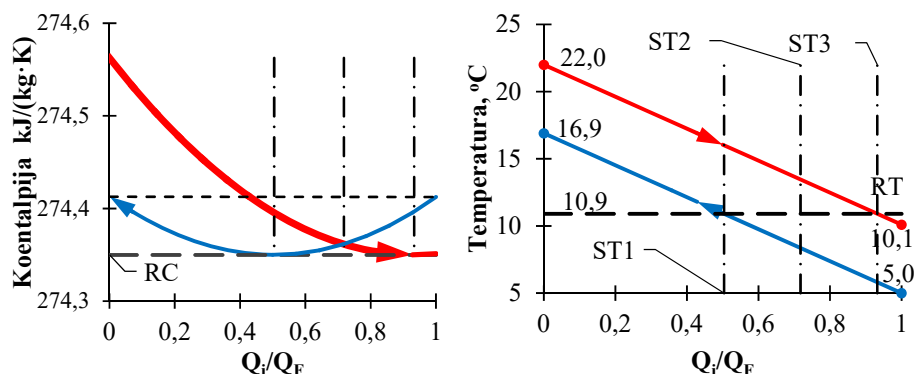
B.1 pav. Principinė šilumokaičio srautų schema
Fig. B.1. The scheme of heat exchanger flows

Atliekant analizę, pagal metodiką pateikiamą (Martinaitis et. al. 2017) galima identifikuoti specifinius koentalpijos kitimo pokyčius atsirandančius dėl šilumos mainų procese dalyvaujančių šilumnešių ir apsupties sąlygų temperatūrų santykio. Jei proceso temperatūros išsidėsto virš apsupties temperatūros



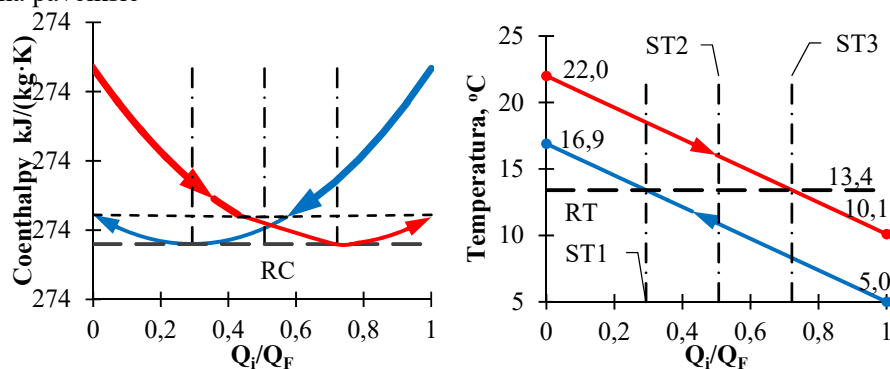
B.2 pav. Šilumos mainų procesas vykstantis virš apsupties sąlygų
Fig. B.2. Heat transfer process above ambient conditions

Proceso temperatūroms priartėjus prie apsupties temperatūros ir atsiradus sankirtos taškams tarp proceso ir apsupties temperatūrų, koentalpijos kitimas pakinta.



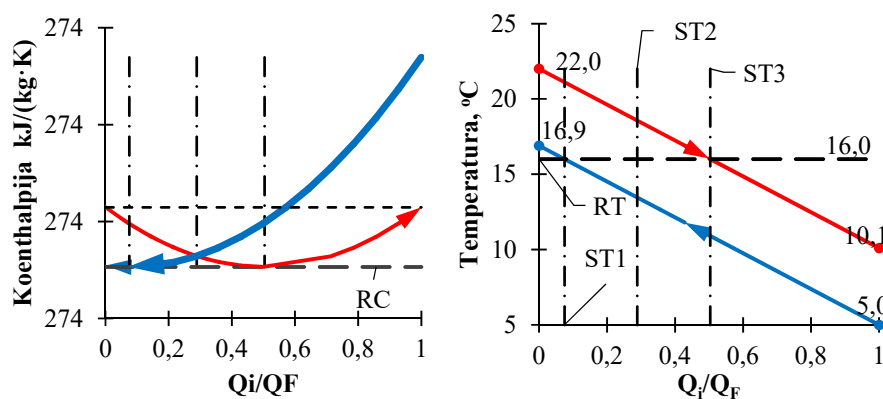
B.3 pav. Procesas kertantis apsupties sąlygas, situacija A
Fig. B.3. The process crossing reference state, condition A

Apsupties temperatūrai susitapatinus su vidutine proceso šilumnešių temperatūra (Sankirtos taškams slenkant iš dešinės į kairę) termodinaminis efektyvumas pasiekia savo minimalią vertę. Sąlygos kurioms esant pasiekiami ši vertė pateikiama paveiksle



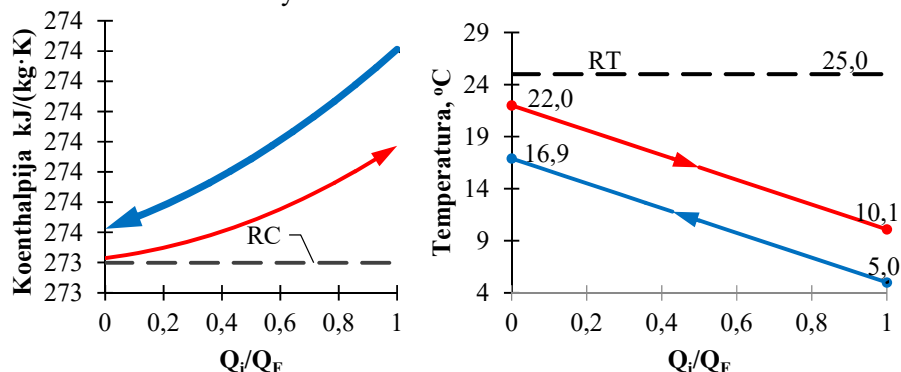
B.4 pav. Procesas kertantis apsupties sąlygas, situacija B
Fig. B.4. The process crossing reference state, condition B

Apsupties temperatūrai kylant aukštyr ir viršijus šilumokaicio srautų vidutines temperatūras (sankirtos taškai juda link kairiosios grafiko pusės) termodinaminis efektyvumas pradeda didėti.



B.5 pav. Procesas kertantis apsupties sąlygas, situacija C
Fig. B.5. The process crossing reference state, condition C

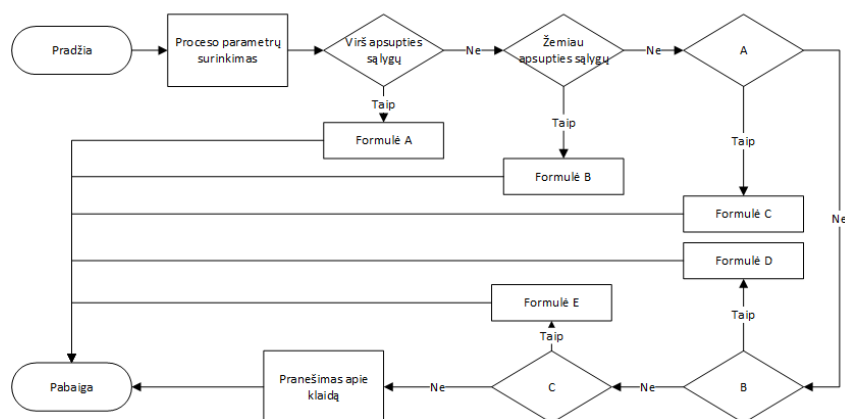
Apsupties temperatūrai pakilus virš šilumos mainų procese dalyvaujančių šilumnešių temperatūros, gali būti taikomos tradicinės termodinaminio efektyvumo išraiškos.



B.6 pav. Procesas vykstantis žemiau apsupties sąlygų
Fig. B.6. Heat transfer process below ambient conditions

Kaip galima identifikuoti iš parodyto temperatūros ir koentalpijos verčių kitimo kintant apsupties temperatūrai, susidaro skirtingi atvejai, kuriems yra suformuluojamos skirtingos termodinaminio efektyvumo išraiškos. Šios išraiškos pateikiamos lentelėje ir yra suskaidytos pagal specifinius intervalus.

Bendruoju atveju, sprendinio paieškos eiga gali būti apibrėžta procesine eiga, kurios pagalba yra identifikuojamas specifinis proceso intervalas ir pritaikomos matematinės formulės efektyvumui išreikšti.



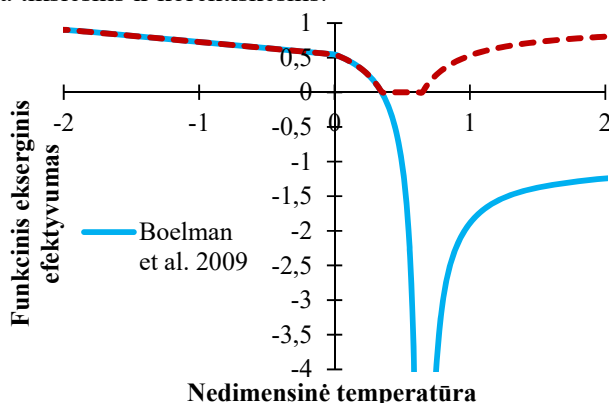
B.7 pav. Šilumokaičio termodinaminio efektyvumo skaičiavimo algoritmas
Fig. B.7. The algorithm of heat exchangers thermodynamic efficiency

Pagal pateiktą diagramą, pasirenkama išraiška užtikrinanti korektišką sprendinį

B.1 lentelė. Įeinantis ir išeinantis eksergijos srauto išraiškos skirtingomis sąlygomis
Table B.1. Entering and exiting exergy flows at different conditions

	Įeinantis eksergijos kiekis	Sunaudotas eksergijos kiekis
	e_m^+	e_{consum}^+
a)	$(k_{c1} - k_e) + (k_{h1} - k_e)$	$(k_{h1} - k_{h2})$
b)	$(k_{c1} - k_e) + (k_{h1} - k_e)$	$(k_{h1} - k_{h2}) + (k_{c1} - k_{c2})$
c)	$(k_{c1} - k_e) + (k_{h1} - k_e)$	$(k_{h1} - k_{h2}) + (k_{c1} - k_{c2})$
d)	$(k_{c1} - k_e) + (k_{h1} - k_e)$	$(k_{h1} - k_{h2}) + (k_{c1} - k_{c2})$
e)	$(k_{c1} - k_e) + (k_{h1} - k_e)$	$(k_{c1} - k_{c2})$

Pasinaudojant šia metodika, gaunamas sklandus sprendinys, kuris lyginant su kitų autorių publikuotomis skaičiavimo procedūromis yra tikslesnis ir korektiškesnis.



B.8 pav. Ekserginio efektyvumo palyginimas su Boelman et. al 2009
Fig. B.8. Exergy efficiency comparison with Boelman et.al. 2009

Analogiška logika, suskaidyti sprendimo intervalus, pritaikant skirtingas funkcinę išraiškas proceso srautams, yra adaptuota ir kitiems atvejams.

2. Šilumokaitis su viena pastovia kraštine sąlyga

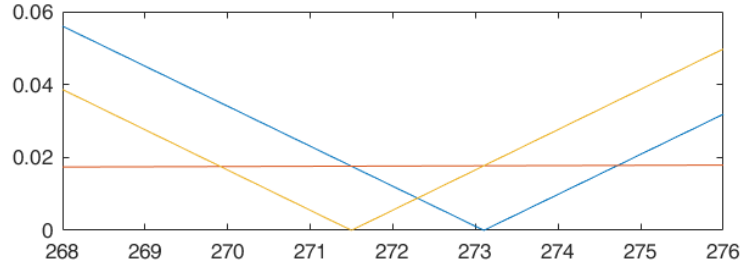
Geologinės stovymės šiluminė talpa ir nusistovėjęs temperatūrinis režimas yra dažnai išnaudojamas šilumos gamybai šilumos siurblių pagalba ir kaip vėsos šaltinis (angl. sink) pastato patalpų arba technologinių procesų aušinimui. Šio technologinio įrenginio termodinaminis vertinimas yra reikalingas siekiant atlikti visos sistemos termodinaminio efektyvumo vertinimą sezoninėje ir laiko žingsnio skalėje.

Sudaromas modelis turi tenkinti termodinaminės balanso lygtis aprašančias masės, energijos, entropijos ir eksergijos srautus kuriais disponuojama apibrėžtame analizuojamame kontroliniame turyje.

Procesui vykstant žemiau arba aukščiau apsupties temperatūros termodinaminis efektyvumas gali būti apibūdinamas šiomis išraiškomis. Šios išraiškos yra korektiškos, kai tenkinami visi anksčiau įvardytos balanso lygtys.

$$\eta = \frac{\sum (m_i \cdot e_i) - \sum (m_i \cdot e_i)}{W_p + Q_g \left(1 - \frac{T_g}{T_a}\right)} = 1 - \frac{T_a S_{gen}}{W_p + Q_g \left(1 - \frac{T_g}{T_a}\right)} \quad (1)$$

Tačiau atlikus parametrinę šio matematinio modelio analizę, visame temperatūrų intervale, kuriame gali funkcionuoti šis inžinerinis įrenginys, buvo pastebėti nuokrypiai nuo eksergijos balanso lygčių, kuomet komponento sukuriamas eksergijos produktas yra didesnis nei komponento gaunamas įtekantis eksergijos kiekis.



B.9 pav. Eksergijos srautai šilumokaityje kintant apsupties temperatūrai
Fig. B.9. Exergy flows in heat exchanger when ambient temperature varies

Matematiškai šis periodas gali būti charakteriuojamas matematine išraiška, kaip intervalas, kurio pradžia identifikuojama kai tenkinamos abi sąlygos

$$\begin{cases} Q_g \left(1 - \frac{T_a}{T_g}\right) \equiv 0 \\ Q_g \left(1 - \frac{T_a}{T_o - T_i} \ln \frac{T_o}{T_i}\right) \leq T_a S_{gen} \end{cases} \quad (2)$$

Iki ribos, kai produktą ir resursus reprezentuojantys eksergijos srautai vėl įgauna korektišką išraišką. Intervalo pabaiga identifikuojama kai tenkinamos abi sąlygos

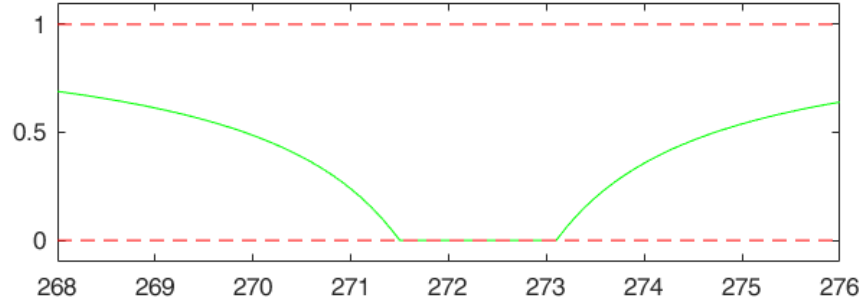
$$\begin{cases} Q_g \left(1 - \frac{T_a}{T_g}\right) \leq T_a S_{gen} \\ Q_g \left(1 - \frac{T_a}{T_o - T_i} \ln \frac{T_o}{T_i}\right) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Kadangi, pagal kumuliacinę išorės oro temperatūrų trukmę (Lietuvos klimatinėmis sąlygomis) tipiniai funkcionavimo periodai, kai yra netenkinama eksergijos balanso lygtis, trunka gana ilgą periodą – šios nekorektiškos formuluotės ignoruoti negalima.

Nesant vienareikšmiškos interpretacijos kaip turėtų būti formuluojamas proceso efektyvumas šiame intervale, siuloma naudoti interpretaciją pagrįstą supaprastinta prielaida, kad šiame intervale eksergijos produktas nėra išgaunamas ir gali būti prilyginamas 0. Tokiu atveju efektyvumo išraiška šiame intervale

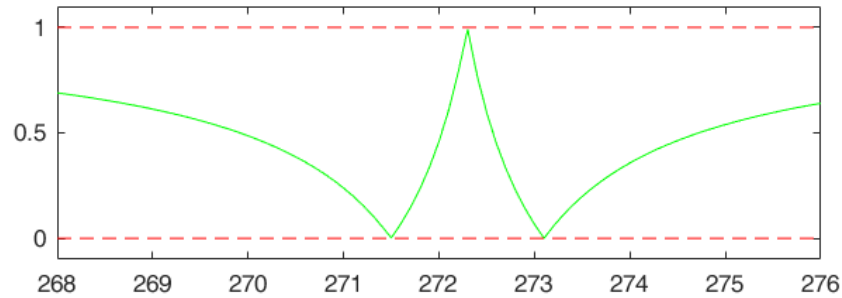
$$\eta = \frac{0}{W_p + Q_g \left(1 - \frac{T_g}{T_a}\right)} = 0 \text{ nes } T_a S_{gen} > W_p + Q_g \left(1 - \frac{T_g}{T_a}\right) \quad (4)$$

Tokiu atveju funkcinio termodinaminio efektyvumo kitimas gali būti iliustruojamas kaip nuoseklus efektyvumo rodiklio kitimas virš, žemiau ir per apsupties temperatūrą:



B.10 pav. Šilumokaičio efektyvumas kintant apsupties temperatūrai
Fig. B.10. Heat exchangers efficiency when ambient temperature varies

Alternatyvi efektyvumo išraiška gali būti suformuluota traktuojant, kad eksergijos srautų funkcijos gali įgauti neigiamas vertes, o ženklas esantis prieš vertę nurodo eksergijos judėjimo kryptį ir identifikuoja „karšta“ arba „šalta“ eksergiją.



B.11 pav. Alternatyvi šilumokaičio ekserginio efektyvumo kitimo formulė
Fig. B.11. Alternative formulation of heat exchangers exergy efficiency variation

Tačiau tokia interpretacija tampa nekorektiška, nes atvirkštinis procesas, kai iš termodinaminio efektyvumo, pasitelkiant sunaudojamą eksergijos kiekį, bandoma išreikšti entropijos generavimą, šiame specifiniame intervale gaunamas rezultatas netenkina Gouy-Stodola teoremos:

$$\frac{L}{T_a} = \frac{(1 - \eta_{II})Ex_{in}}{T_a} = \frac{(1 - \eta_{II}) \left(W_p + Q_g \left(1 - \frac{T_g}{T_a} \right) \right)}{T_a} \neq T_a S_{gen} \quad (5)$$

Kai generuojamas entropijos kiekis apskaičiuojamas pagal išraišką nepriklausomą nuo apsupties sąlygų:

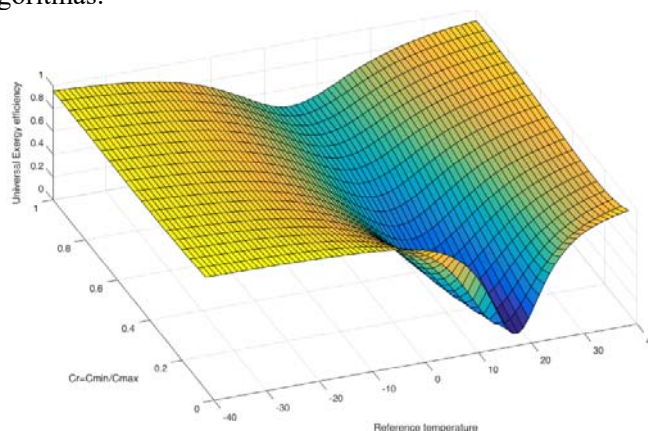
$$S_{gen} = Q_g \left[\frac{\ln \frac{T_i}{T_o}}{T_i - T_o} - \frac{1}{T_g} \right] \quad (6)$$

Atsižvelgiant į šiuos argumentus, galima teigti, kad korektiška formuluotė yra tenkinanti visus balanso dėsnius. Traktuojant, kad apsupties temperatūrai atsidūrus identifikuotame intervale visa gaunama eksergija yra sunaikinama, leidžia išlaikyti termodinaminių formuluočių korektiškumą ir išvengti nuokrypio nuo esminių postulatų teiginių.

Pateiktas sprendimo metodas yra originalus ir tinkamas integruoti į dinaminio modeliavimo įrankius vertinančius realių procesų efektyvumą.

3. Dviejų srautų šilumokaitis su skirtingais srautais esant kintančiai apsupties temperatūrai

Dėl sistemos projektinių sprendimų ir funkcionavimo specifikos, šilumokaičiai funkcionuoja neišlaikant srautų šilumonės talpos vienodumo ($C \neq 1$). Dėl šios priežasties, atvejams, kai ši sąlyga yra neišlaikoma, reikalingas alternatyvus skaičiavimo algoritmas.



B.12 pav. Šilumokaičio ekserginis efektyvumas kintant apsupties temperatūrai ir šilumos srautų santykiui
Fig. B.12. The exergy efficiency of heat exchanger with variable reference temperature and heat capacity ratio

Pagal NTU metodą, srautų šiluminių talpų santykis

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (7)$$

Universalus ekserginis efektyvumas išreiškiamas pasitelkiant alternatyvią išraišką:

$$\eta_{HX} = 1 - \frac{T_a \cdot S_{gen_HX}}{m_c \cdot k_c + m_h \cdot k_h} \quad (8)$$

Kai šilumokaityje generuotas entropijos kiekis išreiškiamas pagal formuluotę pateikiamą Bejan (1996)

$$S_{gen_HX} = m \cdot c \cdot \ln \frac{T}{T} + m \cdot c \cdot \ln \frac{T}{T} \quad (9)$$

Bandant išreikšti funkcinio termodinaminio efektyvumo kitimą analogiškai universaliam efektyvumu, galima pastebėti, kad specifiniuose intervaluose, gaunamos nekorektiškos efektyvumo vertės, kurios atsiranda dėl neišlaikomo eksergijos balanso lygties korektiškumo. Pritaikant NTU metodo principus (Incropera et. al. 2015) taikoma prielaida, kad karšto srauto atiduodamas šilumos kiekis yra tapatus šalto srauto gaunam šilumos kiekiui. Todėl perduodama šilumos srautą skirtingos šilumokaičio pusėse transformuoti į eksergijos kiekį galima pasinaudojant Carnot kokybės faktoriumi, kuris karštam srautui išreiškiamas:

$$\eta_{C.Hot} = \left[1 - \frac{T_a}{T_{H.In} - T_{H.Out}} \cdot \ln \frac{T_{H.Out}}{T_{H.In}} \right] \quad (10)$$

Šaltam srautui, Carnot kokybės faktorius išreiškiamas analogiškai:

$$\eta_{C.Cold} = \left[1 - \frac{T_a}{T_{C.Out} - T_{C.In}} \cdot \ln \frac{T_{C.Out}}{T_{C.In}} \right] \quad (11)$$

Tokiu atveju šilumokaičio efektyvumas, intervaluose, kuriuose tenkinamos visos termodinaminių balanso lygčių sąlygos, gali būti išreiškiamas kaip šių rodiklių santykis:

$$\eta_{HX} = \frac{Q_{HX} \eta_{C.Cold}}{Q_{HX} \eta_{C.Hot}} = \frac{\eta_{C.Cold}}{\eta_{C.Hot}} \quad (12)$$

Taikant prielaidą, kad eksergija visada juda link apsupties temperatūros, procesui vykstant žemiau apsupties temperatūros, termodinaminio efektyvumo išraiška įgauna tokį pavidalą:

$$\eta_{HX} = \frac{\eta_{C.Hot}}{\eta_{C.Cold}} \quad (13)$$

Siekiant išraiškos universalumo, kuris yra svarbus integruojant matematinį modelį į skaičiuojamąsias procedūras, termodinaminio efektyvumo išraišką intervalui, kai yra tenkinamos visos termodinaminės balanso lygtys gali būti suformuojama taip:

$$\eta_{HX} = \frac{\min(\eta_{C.Cold}; \eta_{C.Hot})}{\max(\eta_{C.Cold}; \eta_{C.Hot})} \quad (14)$$

Periodui, kai nėra tenkinam eksergijos balanso lygtis (periodas nustatomas analogiškia $C=0$ atvejui), funkcinio termodinaminio efektyvumo rodiklis išreiškiamas taip:

$$\eta_{HX} = \frac{0}{Q_{HX} \cdot \max(\eta_{C.Cold}; \eta_{C.Hot})} \quad (15)$$

Toks pavidalas yra tinkamas integravimui į TSE rodiklio skaičiavimo procedūras elementų lygmenyje. Pasinaudojant šiais principais gali būti analizuojamos sistemos, kurių funkcionavimo temperatūras kerta kintanti apsupties temperatūra ir be korektiško termodinaminio efektyvumo interpretavimo nėra galima išreikšti sistemos termodinaminio efektyvumo (TSE).

4. Akumuliacinio proceso kintant apsupties temperatūrai

Akumuliacinės talpos komponento termodinaminis efektyvumas yra išreiškiamas iš apibrėžtam kontroliniam tūriui užrašytų balanso lygčių, pagal pirmąjį termodinamikos dėsni, nestacionariam procesui

$$m_{in}(h_{in} - h_{out}) - (m_{out}(h_{in} - h_{out}) - Q_l) = \Delta E \quad (16)$$

Pagal antrąjį termodinamikos dėsni užrašoma balanso lygtis apibrėžia pusiausvyrą tarp kontrolinį tūrį kertančių įeinančių ir išeinančių srautų, bei sukurtos entropijos (termodinaminių negrįžtamumų)

$$m_{in}(e_{in} - e_{out}) - (m_{out}(e_{in} - e_{out}) - Q_l \eta - L) = \Delta Ex \quad (17)$$

Akumuliacinės talpos sezoninis efektyvumas yra kompleksiškas dydis, išreiškiantis eksergijos kiekį kuris buvo patalpintas ir po saugojimo periodo buvo atstatytas (atgautas). Plačiai naudojama energijos kaupimo proceso efektyvumo išraiška pasiūlyta Rosen (Rosen 2015) apibendrina esminius rodiklius:

$$\begin{aligned}
& \frac{\sum (Ex_{out}) + Ex_{st.f}}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st.i}} = \\
& \frac{\sum \Delta Ex_{st.ch}}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st.i}} \cdot \frac{\sum \Delta Ex_{st.fin}}{\sum \Delta Ex_{st.init}} \cdot \frac{\sum (Ex_{out}) + Ex_{st.f}}{\sum \Delta Ex_{st.dst}}
\end{aligned} \tag{18}$$

Arba supaprastintai :

$$\eta_{tot} = \eta_{ch} \cdot \eta_{st} \cdot \eta_{dst} \tag{19}$$

Ši išraiška gali būti išskleista ir suprantama kaip atskirų funkcionavimo periodų (įkrovimo, talpinimo ir iškrovimo) efektyvumo produktas:

$$\eta_{ch} = \frac{\sum \Delta Ex_{st.ch}}{\sum (Ex_{in})} \tag{20}$$

$$\eta_{st} = \frac{\sum \Delta Ex_{st.fin}}{\sum \Delta Ex_{st.init}} \tag{21}$$

$$\eta_{dst} = \frac{\sum (Ex_{out})}{\sum \Delta Ex_{st.dst}} \tag{22}$$

Tokia formuluotė padeda įdentifikuoti sezoninį efektyvumą, tačiau nesuteikia informacijos apie atskirų funkcionavimo rodiklių poveikį bendrojo efektyvumo išraiškai. Todėl nėra galimybės nustatyti prioritetų atskirų laiko žingsnių daromam poveikiui ir suprasti kuriuo momentu reikalingi korekciniai veiksmai efektyvumui padidinti ir kokį svorį bendrajame efektyvume turi rodiklio ekstremumai.

2.1.6.4.1. Akumuliacinės talpos efektyvumo išraiškos struktūra

Pakeitus sezoninio bendrojo efektyvumo išraišką iš tarpinių laiko žingsnių srautų sumos į sudėtinę, taikant superpozicijos principą, gaunama alternatyvi išraiška, kurioje efektyvumo ir svorinio koeficiento sandaugų suma išreiškia tapatų dydį efektyvumui. Pasitelkus šią efektyvumo išraišką, kuri TSE išreiškia, kaip atskirų efektyvumų ir jų svorio bendrajame efektyvume produktų sumą, gaunama bendrojo efektyvumo išraiška :

$$\begin{aligned}
TSE_{AT} = & \frac{\sum (Ex_{out}) + Ex_{st, final}}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st, initial}} = \frac{Ex_{st, charge, final}}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st, initial}} \cdot C_{ch} \cdot \frac{X_{ch}}{Z} + \\
& + \frac{\sum (\Delta Ex_{st, final})}{\sum (\Delta Ex_{st, initial})} \cdot C_{st} \cdot \frac{X_{st}}{Z} + \frac{\sum (Ex_{out}) + Ex_{st, final}}{Ex_{st, discharge, final}} \cdot C_{dst} \cdot \frac{X_{dst}}{Z}
\end{aligned} \tag{23}$$

Laiko žingsnių rezultatų integravimas į funkcines išraiškas

Atskirų laiko žingsnių poveikių (efektyvumų) rezultatas išreiškia funkcionavimo periodų efektyvumą

$$C_{ch} = \frac{Ex_{in}}{\sum (Ex_{in})} \tag{24}$$

$$C_{st} = \frac{\Delta Ex_{st, initial}}{\sum (\Delta Ex_{st, initial})} \tag{25}$$

$$C_{dst} = \frac{\Delta Ex_{st, discharge, final}}{\sum (\Delta Ex_{st, discharge, final})} \tag{26}$$

Funkcinių efektyvumų integracija į bendrąją akumuliacinės talpos efektyvumą

Pasinaudojant funkciniais efektyvumais, išreikšimas sezoninis talpos efektyvumas.

$$C_{ch} = \frac{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st, init}}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st, initial} + \sum (\Delta Ex_{st, init}) + \sum (\Delta Ex_{st, dis. e. final})} \tag{27}$$

$$C_{st} = \frac{\sum (\Delta Ex_{st, initial})}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st, initial} + \sum (\Delta Ex_{st, initial}) + \sum (\Delta Ex_{st, discharge, final})} \tag{28}$$

$$C_{dst} = \frac{\sum (\Delta Ex_{st, discharge, final})}{\sum (Ex_{in}) + Ex_{st, initial} + \sum (\Delta Ex_{st, initial}) + \sum (\Delta Ex_{st, discharge, final})} \tag{29}$$

Svorio koeficiento dedamosios X

$$X_{ch} = \frac{\left[\sum (EX_{out}) + EX_{st.f} \right] \cdot \left(\sum (EX_{in}) + \sum (\Delta EX_{st.initial}) + \sum (\Delta EX_{st.discharge, final}) \right) - \left[\sum (EX_{in}) + EX_{st.i} \right] \cdot \left(\sum \Delta EX_{st.fin} + \sum (EX_{out}) \right)}{\left[\sum (EX_{in}) + EX_{st.i} \right] \cdot \sum (\Delta EX_{st.initial})} \quad (30)$$

$$X_{ch} = \frac{\left[\sum (EX_{out}) + EX_{st.f} \right] \cdot \left(\sum (EX_{in}) + \sum (\Delta EX_{st.initial}) + \sum (\Delta EX_{st.discharge, final}) \right) - \left[\sum (EX_{in}) + EX_{st.i} \right] \cdot \left(\sum \Delta EX_{st.ch} + \sum (EX_{out}) \right)}{\left[\sum (EX_{in}) + EX_{st.i} \right] \cdot \sum \Delta EX_{st.fin}} \quad (31)$$

$$X_{ch} = \frac{\left[\sum (EX_{out}) + EX_{st.f} \right] \cdot \left(\sum (EX_{in}) + \sum (\Delta EX_{st.initial}) + \sum (\Delta EX_{st.discharge, final}) \right) - \left[\sum (EX_{in}) + EX_{st.i} \right] \cdot \left(\sum \Delta EX_{st.ch} + \sum \Delta EX_{st.fin} \right)}{\left[\sum (EX_{in}) + EX_{st.i} \right] \cdot \sum (EX_{out})} \quad (32)$$

Svorio koeficiento dedamoji Z

$$Z = \frac{\eta_{ch} C_{ch} X_{ch} + \eta_{st} C_{st} X_{st} + \eta_{dst} C_{dst} X_{dst}}{\left(\frac{\sum (EX_{out}) + EX_{st.f}}{\sum (EX_{in}) + EX_{st.i}} \right)} \quad (33)$$

Pasinaudojant šiomis svorio koeficientų išraiškomis, apskaičiuojama kiekvieno funkcinio efektyvumo svoris bendrajame seziniame efektyvume.

Šio algoritmo funkcionalumo demonstracija pateikiama atvejo analizės dalyje, iliustruojant atskirų periodų poveikį sezoniniam efektyvumui, atskirų laiko žingsnių efektyvumo rodiklių kitimą ir jų integraciją į akumuliacinės talpos TSE rodiklį.