

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vytautas Martinaitis

Giedrė Streckienė

Juozas Bielskus

Termodinaminė analizė pastatų techninėms sistemoms

Vadovėlis

Vilnius, 2023

Leidinių rekomendavo Vilniaus Gedimino technikos universiteto
Aplinkos inžinerijos fakulteto studijų komitetas

Recenzavo: dr. Audrius Bagdanavičius, Lesterio universitetas,
Jungtinė Karalystė (University of Leicester, UK)
dr. Karolis Januševičius, Lietuvos energetikos agentūra

Bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos integralios bibliotekų
informacinės sistemos (LIBIS) portale ibiblioteka.lt

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
mokomosios metodinės literatūros knyga (2023-043-S)

ISBN 978-609-476-345-8
eISBN 978-609-476-346-5
doi: 10.20334/2023-043-S

Šį kūrinių, esančių bibliotekose, mokymo ir mokslo įstaigų bibliotekose, muziejuose arba archyvuose, be leidėjo sutikimo draudžiama mokslinių tyrimų ar asmeninių studijų tikslais atgaminti, viešai skelbti ar padaryti viešai prieinamą kompiuterių tinklais tam skirtuose terminaluose tų įstaigų patalpose. Dėl leidimo kreiptis el. paštu eleidyba@vilniustech.lt

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2023

TURINYS

ĮVADAS	9
1. TECHNINĖS TERMODINAMIKOS PAGRINDAI	13
1.1. Glausta techninės termodinamikos apžvalga	13
1.2. Termodinaminė sistema ir jos būseną	17
1.2.1. Termodinaminės sistemos	17
1.2.2. Būseną ir jos parametrai	23
1.2.3. Terminė būsenos lygtis	24
1.2.4. Termodinaminis procesas	25
1.3. Pirmasis termodinamikos dėsnis	27
1.3.1. Energijos rūšys ir keitimosi energija (judėjimo) formos	27
1.3.2. Vidinė energija	29
1.3.3. Bendrasis PTD atvejis	31
1.3.4. Procesą savitoji šiluma	34
1.4. Antrasis termodinamikos dėsnis ir entropija	36
1.4.1. Grįžtamieji ir negrįžtamieji procesai	36
1.4.2. Entropija	37
1.4.3. Negrįžtamumas kaip energijos suprastėjimas	39
1.4.4. Šilumos mainų negrįžtamumas	41
1.5. Srautiniai procesai	45
1.5.1. Pagrindinės srautinių procesų lygtys	45
1.5.2. Darbo procesai	48
1.5.3. Tekėjimo procesai	51
1.5.4. Droseliavimas	53
1.5.5. Dujų ištekėjimas iš tūčių	55
1.6. Medžiagų termodinaminės savybės	59
1.6.1. Realiųjų dujų būsenos lygtis	61
1.6.2. Vidinė energija, entalpija ir savitoji šiluma	62
1.6.3. Garų parametrai, diagramos, lentelės	64
1.6.4. Garų būsenos, jų parametrų nustatymas ir procesai	68

1.7. Termodinaminiai ciklai	71
1.7.1. Šiluminės mašinos	71
1.7.2. Termodinaminio ciklo rodikliai.	75
Klausimai ir užduotys techninės termodinamikos pagrindams pakartoti	78
2. TERMODINAMINĖS ANALIZĖS PAGRINDAI	81
2.1. Techninės sistemos, jų analizė ir eksergija	81
2.1.1. Sistemų analizė	81
2.1.2. Techninių sistemų analizė	83
2.1.3. Techninė sistema ir jos apsuptis	88
2.1.4. Energijos rūšys ir jų virsmumas	90
2.1.5. Eksergijos apibūdinimas	91
2.1.6. Eksergijos formos	93
2.2. Ekserginės analizės formalizavimas	94
2.2.1. Eksergija – pirmasis, antrasis termodinamikos dėsniai ir aplinka kartu	94
2.2.2. Procese prarasta eksergija	95
2.2.3. Atviros sistemos ekserginio balanso lygtis	97
2.2.4. Šiluminė eksergija ir šiluminės eksergijos srautas.	99
2.2.5. Šiluminės eksergijos srauto kryptis	100
2.2.6. Ekserginės analizės terminologinė sistema	103
2.2.7. Koentalpija kaip būsenos parametras perduodant eksergiją.	105
2.3. Ekserginis efektyvumas ir prarasta eksergija	107
2.3.1. Termodinaminės sistemos efektyvumas pagal PTD	107
2.3.2. Termodinaminis (ekserginis) sistemos efektyvumas	108
2.3.3. Šilumos perdavimo proceso ekserginis efektyvumas.	111
2.3.4. Dėl trinties prarasta eksergija	112
2.3.5. Eksergija, prarasta fluidui tekant kanalu	113
2.3.6. Eksergija, prarasta išsilyginant temperatūroms	114
2.3.7. Eksergija, prarasta šilumą perduodant tarp dviejų tekančių šilumnešių	116
2.3.8. Universalus ir funkcinis ekserginis efektyvumas	118
2.4. Eksergoekonomikos pradmenys	120
2.4.1. Energijos ir eksergijos kaina	121
2.4.2. Energijos–šilumos kaina	121
2.4.3. Šilumos nuostolių kaina	124
2.4.4. Sistemos eksergijos kaina projektuojant	124
2.4.5. Techninių sistemų eksergoekonominio vertinimo loginė seka	126
Klausimai ir užduotys studijuojant termodinaminės analizės pagrindus	128

3. TERMODINAMINĖS ANALIZĖS PAVYZDŽIAI	131
3.1. Aprūpinimo energija sistema	132
3.1.1. Aprūpinimo energija sistemos struktūra.	132
3.1.2. Aprūpinimo energija sistemos analizės loginė seka	134
3.2. Elementarių šildymo atvejų termodinaminė analizė	137
3.2.1. Šildymas darbu	137
3.2.2. Stacionariojo režimo atviroji adiabatinė sistema	140
3.2.3. Uždarosios izochorinės sistemos šildymas šiluma	141
3.2.4. Patalpos šildymo būdų palyginimas	144
3.2.5. Atvirosios stacionariojo režimo sistemos šildymas šiluma	146
3.2.6. Uždarosios izochorinės sistemos šildymas virsmo energija	147
3.2.7. Srautinis šilumokaitis.	149
3.3. Energijos transformatorių ekserginė analizė	150
3.3.1. Šilumos generatorius – katilas	150
3.3.2. Paprastoji garinė elektros jėgainė.	154
3.3.3. Šilumos ir elektros bendros gamybos jėgainė – kogeneratorinė	158
3.3.4. Šilumos siurblys	161
3.3.5. Saulės kolektorių ekserginė analizė ir jų veikimas sistemoje	168
3.3.6. Saulės modulis	175
3.3.7. Vėjo jėgainė	176
Klausimai ir užduotys studijuojant termodinaminės analizės analitinius pavyzdžius	178
4. ORO PARUOŠIMO ĮRENGINIO EKSERGINĖ ANALIZĖ	180
4.1. Oro paruošimo įrenginys kaip termodinaminė sistema	180
4.1.1. Analizuojamos oro paruošimo įrenginio technologinės schemas	181
4.1.2. Oro paruošimo įrenginio šilumokaičiai	184
4.1.3. Preliminarus oro paruošimo įrenginių schemų palyginimas	186
4.2. Oro paruošimo įrenginio šilumos atgavimo šilumokaičio ekserginė analizė	189
4.2.1. Kai eksergijos srautai skaičiuojami naudojant Karno daugiklį.	189
4.2.2. Kai eksergijos srautai skaičiuojami naudojant būsenos parametą – koentalpiją.	197
4.2.3. Šilumos atgavimo šilumokaičio ekserginės analizės skaitiniai rezultatai	208
4.2.4. Charakteringos šilumos atgavimo šilumokaičio koentalpijų vertės.	211
4.3. Oro paruošimo įrenginio šilumos siurblio veikimo režimų analizė	213
4.3.1. Oro paruošimo įrenginio šilumos siurblio komponentų termodinaminės analitinės sąsajos	213
4.3.2. Šilumos siurblio veikimo režimų parametrinė analizė.	219
4.4. Apibendrinamieji 4 skyriaus analizės rezultatų komentarai.	229
Klausimai ir užduotys studijuojant OPĮ ekserginės analizės metodiką.	232

5. ORO PARUOŠIMO ĮRENGINIO ATVEJŲ LYGINAMOJI EKSERGINĖ ANALIZĖ	236
5.1. Oro paruošimo įrenginio rodiklių priklausomybė nuo kintančios aplinkos atskaitos temperatūros	237
5.1.1. Bendrieji įvesties duomenys apie oro paruošimo įrenginio atvejus.	237
5.1.2. Grafinis ekserginės analizės aiškinimas Karno ir koentalpijų metodais	239
5.1.3. Oro paruošimo įrenginių keturių schemų režimo charakteristikų palyginimas	245
5.1.4. Oro paruošimo įrenginio keturių schemų ekserginių rodiklių palyginimas.	247
5.1.5. Oro paruošimo įrenginiuose prarasta eksergija	247
5.1.6. Oro paruošimo įrenginių ekserginis efektyvumas	251
5.2. Oro paruošimo įrenginio sezoninis termodinaminis efektyvumas.	254
5.2.1. Sezoninių rodiklių nustatymas	255
5.2.2. Oro paruošimo įrenginių atskirų atvejų analizė.	257
5.3. Apibendrinamieji 5-ojo skyriaus analizės rezultatų komentarai	270
Klausimai ir užduotys studijuojant ekserginės analizės atvejų rezultatus	272
SANTRUMPOS.	275
LITERATŪRA.	281

ĮVADAS

Dėl didelių energijos vartojimo apimčių ir pagrįstų, apgalvotų sprendimų paieškos tiek naujų, tiek esamų pastatų sektorius yra ir išliks prioritetiniu tvarumo tyrimų ir sprendimų objektu. Pastatų, jų techninių sistemų energijos virsmų procesų fizikinei analizei vis plačiau taikomas sparčiai populiarėjantis energiją vartojančių įrenginių ir juose vykstančių procesų vertinimo metodas – termodinaminė, tiksliau, ekserginė analizė. Darnaus vystymosi kontekste eksergija laikoma vienu iš tvaraus vystymosi vertinimo kriterijų. Šioje knygoje dėmesys telkiamas į termodinaminių metodų taikymą pastatų techninėse sistemose, siekiant geriau suprasti tokių energijai bei ištekliams imlių sistemų veikimą ir atskleisti tinkamesnes priemones joms tobulinti.

Ekserginė analizė yra palyginti nauja ir įdomi termodinamikos priemonė, taikoma energijos transformavimo sistemoms vertinti. Kaip metodas, energijos virsmų sistemai analizuoti jungiantis masės tvermės, pirmąjį (energijos tvermės) ir antrąjį termodinamikos dėsnius bei tų sistemų veikimo aplinkos būseną, ekserginė analizė padeda tokias sistemas kurti, optimizuoti ir tobulinti.

Ekserginis metodas yra naudinga priemonė siekiant efektyviau naudoti energijos išteklius. Jis leidžia nustatyti nuostolių vietas, rūšis ir dydžius, termodinamiškai efektyviausias energijos transformavimo sąlygas. Tai gali būti pradiniai duomenys tiek įrangos kūrimo, tiek kompleksinių, sezonines oro sąlygų ypatybes įvertinančių sistemų valdymo uždaviniams spręsti. Dėl šios ypatybės ekserginis vertinimas traktuojamas kaip naudinga priemonė darnios plėtros kiekybiniais parametrams nustatyti. Jos metu gaunami fiziniai rodikliai papildo įprastinę ekonominę analizę, šiuolaikiniuose sprendimų priėmimo procesuose jie perkeliama į gyvavimo ciklo analizę. Gavus šių metodų derinių rezultatus plėtojamos ir jų kombinacijos – eksergoekonomika, emerginė analizė.

Didžiausia ekserginės analizės taikymo nauda gaunama taikant ją nuosekliam energijos transformacijų grandinės vertinimui – nuo pirminės energijos iki galutinės energinės paslaugos suteikimo (patalpų oro temperatūra, drėgnumas, apšviestumas ir pan.). Nuosekli procesų grandinės termodinaminė analizė leidžia nustatyti eksergijos praradimo vietas, atitinkamai pažymint konkrečius energijos vartojimo efektyvumo didinimo potencialo taškus. Jau dabar tai sėkmingai daroma nagrinėjant pramoninius energijos gamybos procesus, pirmiausia naudojant eksergine analize besiremiančią *Pinch* analizę. Taigi, ir pastatų energinių paslaugų technologijų energinės grandinės ekserginė analizė būtų rezultatyviausia, jeigu jos apimtis siektų nuo pirminių energijos išteklių vertinimo iki paslaugų galutiniam vartotojui.

Ekserginiai metodai sulaukė ypatingo dėmesio tik per pastaruosius kelis dešimtmečius. Nors per tą laikotarpį skiriamas dėmesys padaugėjo, jis išliko šiek tiek ribotas, nes pastatų techninėms sistemoms vis dar reikia taikyti termodinamiškai pagrįstus, universalius ekserginės analizės metodus. Taikant termodinaminės analizės metodą įrenginiuose vykstantiems energiniams procesams vertinti, ypač svarbu kalbėti apie bendrai suprantamą ir taikomą vertinimo metodiką visoje energinėje grandinėje, pirmiausia išsaugant,

puoselėjant termodinamikos kaip fundamentinio mokslo principus. Vadovėlis metodiškai išskirtinis tuo, kad jame taikomas autorių parengtas būdas ekserginėje analizėje įvertinti aplinkos atskaitos temperatūros kitimą. Termodinamiškai pagrindžiamas šilumos eksergijos srautų krypties traktavimas atskaitos temperatūrą laikant kintančia, o tų kintančios krypties srautų vertės nustatomos derinant metodikas, parengtas remiantis Karno daugikliu ir koentalpijomis. Tai leidžia termodinamiškai pagrįstai atspindėti energijos transformavimo procesus, analizuoti ir tobulinti pastato technines sistemas, dažniausiai veikiančias kintančioje aplinkos temperatūroje. Taip pat sudaromos galimybės kurti tokių sistemų dinaminis modelius, eksergija pagrįstus jų valdymo algoritmus. Studentams atveriamą galimybę savo praktinėje veikloje juos diegti į BIM (angl. *Building Information Modeling*) technologijas, taikyti LCA (angl. *Life Cycle Analysis*) principus rengiant pastatų projektus, didinti sprendimų priėmimo kokybę. Tai naudinga vertinant kitas sistemas, kurioms svarbi kintanti aplinkos atskaita.

Šiame vadovėlyje išdėstomas termodinaminis ekserginės analizės metodas, specializuotai taikomas pastato techninėms sistemoms. Knygą sudaro penki skyriai. Pirmajame glaustai pristatomi techninės (inžinerinės) termodinamikos klausimai, sudarantys tolesnio turinio teorinį pagrindą. Savo apimtimi jis nėra skirtas ir pakankamas nuoseklioms techninės termodinamikos dalyko studijoms, veikiausiai tinka joms kartoti. Antrajame skyriuje, pradedant sisteminės analizės samprata, pateikiami termodinaminės, ekserginės analizės teoriniai pagrindai. Kituose trijuose skyriuose einama nuo energijos transformatorių vertinimo analitinių pavyzdžių iki ekserginių rodiklių skaitinių sprendinių radimo ir palyginimo su tą pačią funkciją atliekančiomis, bet technologiškai skirtingomis keturiomis vėdinimo sistemomis. Taigi vadovėlyje nuosekliai pradedama teoriniais pagrindais ir baigiama algoritmų su konkrečiomis lygtimis, taikomų skaitiniams rodikliams nustatyti, pateikimu. Pristatomi pagal algoritmus atlikti skaičiavimai, jie komentuojami lyginant atskirus technologinius sprendinius ir jų taikymo vietas, nes ekserginis metodas energijos virsmų procesus susieja su jų vyksmo apsupties būsenos kaita ir trukme.

Pirmasis – techninės termodinamikos pagrindų – skyrius pradedamas glausta techninės termodinamikos apžvalga. Toliau pristatoma termodinaminė sistema ir jos būseną, pirmasis ir antrasis termodinamikos dėsniai, srautiniai procesai, medžiagų termodinaminės savybės ir termodinaminiai ciklai. Ši informacija leidžia studentui tolesniuose skyriuose atrasti taikomus teorinius pagrindus, sąvokų ir analitinio formalizavimo sistemą.

Antrajame – termodinaminės analizės pagrindų – skyriuje trumpai aptariama sistemų, pirmiausia techninių, analizė, jų modeliavimo poreikis. Eksergija pristatoma kaip termodinaminė sąvoka. Svarbiausias akcentas – ekserginės analizės formalizavimas ir ekserginio balanso lygties išvedimas, šiluminės eksergijos srauto krypties priklausomybė nuo kintančios apsupties temperatūros. Paaiškinama vadovėlyje pasirinkta L. Borelio parengta ekserginės analizės terminologinė sistema, eksergijos perdavimo būsenos parametras – koentalpija. Detalai aptariami ekserginio efektyvumo ir prarastos eksergijos klausimai. Baigiama ekserginio ir ekonominio požiūrių derinimo pavyzdžiais, vedančiais į eksergoekonomiką.

Trečiajame skyriuje pristatomi analitiniai termodinaminės analizės pavyzdžiai – pagrindinės aptariamiems atvejams pritaikytos lygtys. Pradedama nuo aprūpinimo energija sistemos struktūros, tokios sistemos analizės loginės sekos. Elementarių šildymo atvejų termodinaminė analizė apima šildymą darbu, šildymą uždarosiose ir atvirosiose sistemoje, srautinio šilumokaičio atvejus. Energijos transformatorių ekserginė analizė taikoma šilumos generatoriui – katilui, garinei elektros jėgainei, kogeneratorinei, šilumos siurbliui, saulės kolektoriams ir moduliams, vėjo jėgainei.

Ketvirtasis skyrius skirtas pastato techninės sistemos – oro paruošimo įrenginio – ekserginei analizei. Pristatomos keturios oro paruošimo įrenginio technologinės schemos, kurios preliminariai palyginamos. Taikant du skirtingus – Karno daugiklio ir koentalpijų – metodus, pristatomas oro paruošimo įrenginio šilumos atgavimo šilumokaičio ekserginės analizės algoritmas ir skaitiniai jo taikymo pavyzdžiai, taip pat šilumos siurblio veikimo režimų parametrinė skaitinė analizė.

Penktasis skyrius skirtas oro paruošimo įrenginio atvejų skaitinei lyginamajai ekserginei analizei. Ji pradedama oro paruošimo įrenginio rodiklių priklausomybe nuo kintančios aplinkos atskaitos temperatūros, tęsiama grafiniu ekserginės analizės aiškinimu Karno ir koentalpijų metodais, veikimo režimo charakteristikų bei ekserginių rodiklių palyginimu, prarandamos eksergijos ir ekserginio efektyvumo nustatymu. Toliau nagrinėjamas praktiniams tikslams aktualiausias analizuojamų sistemų sezoninis termodinaminis efektyvumas. Jo skaitiniai rodikliai pateikiami ir komentuojami šilumogražį naudojant kaip pagrindinį oro paruošimo įrenginio komponentą kartu su šilumos siurbliu. Vėdinimo šilumogražio temperatūrinio efektyvumo įtaka vertinama skirtingų vietovių klimato sąlygomis.

Visuose skyriuose yra kontroliniai klausimai, kurių dalis yra užduočių lygio. Dviejuose paskutiniuose skyriuose pateikiami skaitiniai rezultatai, apibendrinamieji komentarai, kurie padeda studentui susieti skaitinius oro paruošimo įrenginio ekserginės analizės rezultatus su jo tobulinimo, racionalių sprendimų paieškos galimybėmis.

Šis leidinys, kaip mokslinių tyrimų rezultatus pristatantis vadovėlis, apima teorinius ir skaitinius atvejus, kurie dažnai į akademinis vadovėlius neįtraukiami. Vadovėlis daugiau skirtas energijos, šilumos, mechanikos, statybos, aplinkos apsaugos inžinerinių studijų krypties magistrantams ar pažengusiems bakalaurantams, taip pat kaip esminė priemonė pastatų techninių sistemų specialistams. Ji tinkama eksergine analize besidomintiems tyrėjams, trečiosios studijų pakopos studentams, ketinantiems savo tyrimuose taikyti ekserginės analizės metodus. Tikime, kad ši knyga bus įdomi studentams ir praktikams, asmenims ir institucijoms, kurie domisi pamatinio mokslo – techninės termodinamikos – taikymu priimant sprendimus, ekserginio kaip savito metodo taikymu. Knyga pravers ir besidomintiems naujais metodais, taikomais kuriant ir naudojant šiuolaikines technologijas įvairiose srityse.