

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Justyna KOZLOVSKA

SAPROPELIO PANAUDOJIMO ŠILUMOS GAMYBAI TYRIMAI IR APLINKOSAUGINIS VERTINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (04T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Egidijus PETRAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T).

Konsultantas

habil. dr. Kazimierz GRABAS (Vroclavo technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T).

VGTV leidyklos TECHNIKA 2103-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-411-5

© VGTV leidykla TECHNIKA, 2012

© Justyna Kozlovskaja, 2012

justyna@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Justyna KOZLOVSKA

RESEARCH OF SAPROPEL USE FOR HEAT PRODUCTION AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (04T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Egidijus PETRAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Consultant

Habil Dr Kazimierz GRABAS (Wroclaw University of Technology, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos sapropelio susidarymo priežastys, analizuojamos pagrindinės jo savybės ir sudėtis, taip pat panaudojimo galimybės biokuro briketams gaminti. Pagrindinis tyrimų objektas yra sapropelis ir galimybė jį panaudoti kaip rišamąją medžiagą biokuro briketams gaminti. Pagrindinis disertacijos darbo tikslas – kompleksinių tyrimų metu šiluminiu bei aplinkosauginiu požiūriu nustatyti sapropelio tinkamumą biokuro briketų gamybai, įvertinti veiksnius, darančius įtaką jam, kaip biokuro rūšiai, ir panaudojimo šilumos energijos gamybai galimybes.

Šiame darbe sprendžiami tokie uždaviniai: ištirti cheminių sapropelio elementų sudėtį ir organinės anglies kiekį, išanalizuoti mechanines briketų su sapropelio, kaip rišiklio, savybes, nustatyti šiluminės sapropelio ir jo mišinių su kitu biokuru briketų charakteristikas bei įvertinti šių briketų deginimo proceso metu išsiskiriančių dujinių teršalų emisijas, taip pat sumodeliuoti sapropelio briketų degimo procesą bei teršalų išsiskyrimą ir pasiūlyti optimalų biokuro briketo su sapropeliu mišinio variantą.

Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autorės publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema ir darbo aktualumas, pristatomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, pateikiamas mokslinis darbo naujumas ir praktinė darbo rezultatų reikšmė, pateikiami ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos paskelbtos disertacijos tema autorės publikacijos ir pranešimai konferencijose bei apibūdinama disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai, jame nagrinėjami sapropelio susidarymo ir išgavimo būdai, aprašomos pagrindinės sapropelio savybės, aptariama cheminė sudėtis ir panaudojimo galimybės. Analizuojamas sapropelio panaudojimas biokuro: briketavimas ir šiluminė vertė, teršalų išsiskyrimas, deginimo technologijos ir skaitinio modeliavimo galimybės. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje pateikta tyrimų metodika ir rezultatų analizė, nustatomas sapropelio tinkamumas naudoti jį energetikoje. Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose pateikiami mechaninių briketų su sapropelio rišikliu savybių, šiluminių verčių ir deginimo tyrimai, pristatomas atliktas aplinkosauginis įvertinimas. Penktajame skyriuje pateiktas skaitinis briketų su sapropeliu degimo proceso modeliavimas. Šeštajame skyriuje aprašomas inžinerinis-aplinkosauginis sprendinys.

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į tarptautines duomenų bases, vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos leidinyje, įtraukta į Web of Science, Thomson Reuters duomenų bases, vienas – recenzuojamoje tarptautinėje konferencijos Lietuvoje medžiagoje, du – recenzuojamose konferencijų Lietuvoje leidiniuose, vienas – nerenzuojamoje konferencijos Lietuvoje medžiagoje. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 7 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

The thesis examines the causes for the formation of sapropel, its main properties, composition, the use for biofuel briquettes. The main object of the research is sapropel and the possibility to use it as a binder material for biofuel briquettes. The main aim of the thesis is to determine the suitability of sapropel thermally and environmentally during the comprehensive researches for the production of biofuel briquettes, and to evaluate the factors influencing its use possibilities as a biofuel type for the production of thermal energy.

The following objectives have been dealt with in the work: to examine the composition of sapropel chemical elements and content of organic carbon; to examine mechanical properties of briquettes with the sapropel binder; to determine thermal properties of sapropel and its mixtures with other biofuel briquettes, as well as to evaluate gaseous pollutant emissions released during the combustion process of briquettes; to simulate the combustion process of sapropel briquettes and pollutant emissions; to suggest optimal option for the mixture of biofuel briquette with sapropel.

The thesis consists of an introduction, six chapters, summary of results, list of used literature and the author's publications on the dissertation topic.

The introductory chapter discusses the study problem, the relevance of the work, presents the description of the research object, formulation of the aim and objectives of the work, description of the research methodology, scientific novelty of the work, the practical significance of results, and defensive statements. The final part of introduction presents the author's publications related to the topic of dissertation and reports at conferences as well as the structure of dissertation.

The first chapter is a review of literature, as well as examination of: formation of sapropel; discussion on extraction techniques; description of main properties of sapropel; chemical composition and possibilities of the use. Analysis of the use of sapropel for biofuel: briquetting and calorific value, release of pollutants, combustion technologies and possibilities for numerical simulation. The chapter ends with conclusions and revision of thesis objectives. The second chapter presents the research methodology, analysis of results, the suitability of sapropel use in energetics. The third and fourth chapters provide the researches on mechanical properties of briquettes with sapropel binder, as well as researches of thermal values and combustion, and performance of environmental assessment. The fifth chapter presents the numerical simulation of the combustion process of briquettes with sapropel. The sixth chapter describes the engineering-environmental assertion.

8 articles have been published on the topic of thesis: three – in scientific journal referred in international databases, one – international conference proceedings included in the Web of Science, Thomson Reuters, databases, one – in international Lithuanian conference material, two – in reviewed Lithuanian Conference material, and one – in other conference material. 7 reports on the topic of thesis have been read at international and Lithuanian conferences.

Žymėjimai

Simboliai

A – pelenai biokurui sudegus

C – sunkiųjų metalų koncentracija mėginyje

C_I – sunkiųjų metalų koncentracija, rasta pagal kalibracinę kreivę

CH_4 – metanas

C_{Me} – metalo koncentracija tirpale

CO – anglies monoksidas

CO_2 – anglies dioksidas

$CO_{2,maks}$ – didžiausias galimas anglies dioksido deginant tam tikrą kurą kiekis

C_xH_y – aukštesni angliavandeniliai

H_2O – vanduo

IC – neorganinė anglis

K_d – pasiskirstymo koeficientas

K_{OC} – koeficientas, koreliuojantis su teršalo tirpumu vandenyje

M – drėgmės ir mineralinių medžiagų biokure kiekis

m_0 – tuščio indelio masė

m_1 – indelio su drėgnu mėginiu masė

m_2 – indelio su sausu sapropelio mėginiu masė

NH_3 – amoniakas

NO_x – azoto oksidai

p – atmosferos slėgis

P – priedo (durpės, medžio pjuvenos, šiaudai) kiekis

Q – šiluminė vertė
 Q_{MS} – šiluminė mišinio vertė
 Q_{PS} – šiluminė priedo vertė
 Q_{SS} – šiluminė sapropelio vertė
 S – teršalo tirpumas vandenyje
 Sk – sapropelio kiekis
 TC – bendroji anglis
 w_{sm} – procentinis sausosios masės kiekis
 λ – perteklinis oro koeficientas

Santrumpos

DLK – didžiausia leistina koncentracija
DLL – didžiausias leidžiamas lygis
ES – Europos Sąjunga
HN – higienos norma
KTU – Kauno technologijos universitetas
LEI – Lietuvos energetikos institutas
LOJ – lakieji organiniai junginiai
PAH – policikliniai aromatiniai angliavandeniliai
SM – sunkieji metalai
VGTU – Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Mokslinis darbo naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	5
1. SAPROPELIO SAVYBĖS IR PANAUDOJIMO GALIMYBĖS	7
1.1. Ežerų uždumblėjimas ir jo priežastys	7
1.2. Pagrindinių sapropelio savybių ir sudėties analizė	12
1.3. Sunkiųjų metalų ežerų nuosėdose susidarymo ypatumai	18
1.4. Uždumblėjusių vandens telkinių valymas ir sapropelio išgavimas	21
1.5. Sapropelio panaudojimo galimybės	23
1.6. Sapropelio panaudojimas biokuro gamybai	27
1.7. Užsienio šalių patirtis naudojant sapropelį energetikoje	34
1.8. Biokuro deginimo ir teršalų sklaidos modeliavimo galimybės	39
1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	42

2. SAPROPELIO CHEMINĖS SUDĖTIES IR FIZINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI	43
2.1. Sapropelio mėginių ėmimo metodika	44
2.2. Cheminės sapropelio sudėties ir drėgnio nustatymo metodikos	48
2.2.1. Sapropelio drėgnio kiekio tyrimų rezultatai	51
2.2.2. Cheminės sapropelio sudėties tyrimų rezultatai ir jų analizė	52
2.2.3. Sapropelio bendrosios anglies kiekio tyrimų rezultatai	54
2.2.4. Sapropelio sunkiųjų metalų tyrimų rezultatai	58
2.3. Antrojo skyriaus išvados	64
3. BRIKETŲ SU SAPROPELIU MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS	67
3.1. Sapropelio briketų paruošimo metodika	68
3.2. Briketų su sapropeliu atsparumo gniuždant ir stiprio lenkiant tyrimai	73
3.2.1. Briketų atsparumo gniuždatant ir stiprio lenkiant tyrimų metodika	73
3.2.2. Briketų atsparumo gniuždant tyrimų rezultatai	74
3.2.3. Briketų stiprio lenkiant tyrimų rezultatai	78
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	80
4. SAPROPELIO BRIKETŲ DEGINIMAS IR APLINKOSAUGINIS VERTINIMAS	81
4.1. Dujinių teršalų koncentracijų nustatymo metodika	82
4.2. Sapropelio ir kitų briketų komponentų šiluminių verčių nustatymas	85
4.3. Sapropelio mišinių su kitu kuru šiluminių verčių nustatymas ir analizė	90
4.4. Briketų su sapropelio riškiu deginių koncentracijų tyrimai ir analizė	94
4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados	100
5. SKAITINIS SAPROPELIO DEGINIMO IR TERŠALŲ IŠSISKYRIMŲ MODELIAVIMAS	103
5.1. Sapropelio briketų deginimo metodika ir modeliavimo galimybės	104
5.2. Apibrėžtoje erdvėje vykstančių degimo procesų skaitinio modeliavimo metodika	108
5.3. Skaitinio modelio sudarymas	115
5.4. Skaitinis šiluminių verčių modeliavimas	118
5.5. Katilė susidarančių teršalų skaitinis modeliavimas	121
5.6. Penktojo skyriaus išvados	128
6. APLINKOSAUGINIS SPRENDIMAS	131
6.1. Optimalus sapropelio kiekis briketė	131
6.2. Šeštojo skyriaus išvados	134
BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	137
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	139
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	153

Contents

INTRODUCTION	1
Problem of the work	1
Topicality of the work	2
Object of the research	3
Aim of the work	3
Tasks of the work	3
Methodology of research	4
Scientific novelty of the work	4
Practical value of the work	4
Defended propositions	4
Approbation of the scientific work	5
Structure of the scientific work	5
1. PROPERTIES OF SAPROPEL AND POTENTIAL FOR ITS USE	7
1.1. Siltation of lakes and its causes	7
1.2. Analysis of sapropel basic properties and composition	12
1.3. Peculiarity of heavy metals formation in sediments of lake	18
1.4. Purification and extraction of sapropel from silt lakes	21
1.5. Possibility of sapropel usability	23
1.6. Usability of sapropel for biofuel production	27
1.7. Experience of foreign countries' in the use of sapropel in energetics	34
1.8. Possibility of biofuel combustion and pollutant dispersion modeling	39

1.9. First chapter conclusions and formulation of dissertation tasks	42
2. RESEARCHES OF SAPROPEL CHEMICAL COMPOSITION AND PHYSICAL PROPERTIES	43
2.1. Sapropel sampling methodology	44
2.2. Methodology of sapropel chemical composition and moisture content determination	48
2.2.1. The results of sapropel moisture content	51
2.2.2. The results of research of sapropel chemical composition and their analysis	52
2.2.3. The results of research of sapropel total carbon content	54
2.2.4. The results of research of sapropel heavy metals.....	58
2.3. Second chapter conclusions	64
3. RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF BRIQUETTES WITH SAPROPEL	67
3.1. Metodology of sapropel briquettes preparation	68
3.2. The research of briquettes with sapropel compressive strength and flexural strength	73
3.2.1. Methodology of briquettes compressive strength and flexural strength	73
3.2.2. The results of research of briquettes compressive strength.....	74
3.2.3. The results of research of briquettes flexural strength	78
3.3. Third chapter conclusions	80
4. COMBUSTION OF SAPROPEL BRIQUETTES AND ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION.....	81
4.1. Methodology of determination of gaseous pollutant concentrations	82
4.2. Determination of the calorific value of sapropel and other briquettes components	85
4.3. Determination and analysis of the calorific value of sapropel mixtures with other biomass	90
4.4. Research and analysis of combustion gases concentrations of briquettes with sapropel binder	94
4.3. Fourth chapter conclusions	100
5. NUMERICAL SIMULATION OF SAPROPEL COMBUSTION AND POLLUTANT EMISSIONS	103
5.1. Sapropel briquettes burning techniques and modeling opportunities	104
5.2. Metodology of numerical simulation of burning process in defined space	108
5.3. Composition of numerical model	115
5.4. Numerical simulation of calorific values	118
5.5. Numerical simulations in the boiler formed emissions.....	121
5.6. Fifth chapter conclusions	128

6. ENVIRONMENTAL SOLUTION	131
6.1. The optimal amount of sapropel in the briquette	131
6.2. Sixth chapter conclusions	134
GENERAL CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	137
REFERENCES	139
LIST OF THE AUTHOR'S PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION .	153

Išvadas

Problemos formulavimas

Lietuvos ežerai yra svarbi kraštovaizdžio dalis, todėl labai svarbūs ir juose vykstantys procesai, kurie priklauso nuo daugelio tarpusavyje sąveikaujančių fizinių, cheminių ir biologinių reiškinių. Didelė nuosėdų ežeruose įvairovė priverė mokslininkus jas klasifikuoti ir nors nuosėdos buvo ir yra tiriamos įvairiais aspektais, tačiau akivaizdu, kad bendros jų klasifikacijos nėra iki šiol. Norint išsaugoti gėlą vandenį yra svarbūs ežerai, todėl jie turėtų būti valomi. Ežerų valymo metu yra išgaunami dideli kiekiai sapropelio, kuris saugomas ilgai ant kranto, kol nusausėja, bet vėliau nėra toliau panaudojamas. Supiltas šalia ežero sapropelis ne tik doko kraštovaizdį, bet ir reikalauja didelių plotų. Išgautą nenušausintą ežerų sapropelį galima būtų naudoti kaip rišamąją medžiagą įvairių rūšių biokurui gaminti, juolab, kad šiuo metu vietinių energijos išteklių (biokuro iš biomasės) gamybos ir naudojimo plėtra yra vienas pagrindinių Lietuvos energetikos strategijos tikslų.

Rekonstruotose šilumą ir elektros energiją gaminančiose katilinėse siekiama, kad vietoj iškastinio neatsinaujinančio kuro būtų naudojamas biokuras. Biokuro briketų su sapropelio rišikliu degimo proceso metu į atmosferą išmetama mažiau dujinių teršalų, o susidarantys pelenai yra nepavojingos atliekos ir gali būti panaudoti žemės ūkyje kaip trąšos. Lietuvoje yra labai maži ir riboti vietinio

iškastinio kuro ištekliai. Naudojant energijos šaltinius, tokius kaip sapropelis, reikia ne tik mažiau importuojamo iškastinio kuro, bet ir sprendžiama labai aktuali aplinkos taršos mažinimo problema. Tokiu būdu pasiekiamas tiek ekonominis, tiek aplinkosauginis efektas.

Įvertinus aplinkos komponentų, ypač geologinės aplinkos (dirvožemio, vandens telkinių dugno nuosėdų – sapropelio) taršą, galima kiekybiškai įvertinti antropogeninės įtakos mastą, o dažnai ir to masto pavojingumą biotai, taip pat ir žmogui.

Darbo aktualumas

Intensyvinant bei plėtojant gamybinius procesus didėja neigiama žmogaus veiklos įtaka gamtai bei visai supančiai aplinkai. Šiuo metu aplinkos taršai mažinti stengiamasi tobulinti bei taikyti įvairias aplinkosaugines technologijas, siekiant kuo geriau apsaugoti žmogų ir jį supančią aplinką. Vienas perspektyviausių atsinaujinančių energijos šaltinių yra įvairių rūšių bioenergija iš medienos, energetinių plantacijų, šiaudų, biodujų, sąvartynų dujų. Atitinkamai apdorota energetinė biomasė gali būti saugoma gana ilgą laiką. Įvairios biomasės rūšys gali būti naudojamos šilumai, elektrai, degalams ir dujų kurui gaminti. Energetiniai biomasės ištekliai apima ne tik žemės, miškų ūkio produkciją, jos apdorojimo ir perdirbimo atliekas, bet ir iki šiol visuomenei mažiau žinomus išteklius.

Lietuvos ežeruose sapropelis sudaro didžiausią organinių nuosėdų dalį. Šios vertingos organinės ir kalkinės medžiagos panaudojama labai nedaug – tik pavieniais atvejais kaip ežero valymo produktą. Daugiau dėmesio skiriama sapropelio panaudojimui tręšti dirvas, gerinti dirvožemio derlingumą ir tik nedaugelis mokslininkų tyrinėja galimybes panaudoti jį kaip rišamąją medžiagą biokurui. Plačiau sapropelio deginimo galimybes savo darbuose nagrinėja Rusijos mokslininkai V. I. Kosov (Kocob 2004; 2007) ir L. A. Petrova (2007). Deginimo tyrimai bei aplinkosauginės šio proceso problemos, deginant biokurą su sapropeliu, aprašyti V. I. Kosovo ir A. S. Beliakovo (2004), L. A. Petrovos (2007) bei L. A. Nikolajevos (2009) darbuose, bet reikia atkreipti dėmesį, kad visuose darbuose sapropelis buvo vertinamas kaip homogeninis kuras arba kaip mažoji kito biokuro sudedamoji dalis.

Nuo 1965 metų, kai sapropelis, kaip rišiklis, nedideliais kiekiais buvo pradėtas naudoti gaminant briketus ir granules su iškastiniu kuru, atlikta nedidelis kiekis tyrimų. Buvo siūlomi įvairūs briketų mišinių ruošimo būdai (sapropelio kiekis iki 10 % nuo bendros masės), sudėtis, briketų gamybos metodai ir dydžiai, pagrindinį dėmesį skiriant arba šiluminingumui, arba mechaninėms savybėms, bet ne jų sinergetiniam poveikiui. Trūksta daugiakriterių (aplinkosauginių, energetinių bei mechaninių) tyrimų, kuriuose rišamoji degi medžiaga – saprope-

lis – būtų naudojamas su medžio pjuvenomis, šiaudais arba durpėmis ir sudarytų briketų mišinyje daugiau kaip 10 % masės. Taip pat iki šiol nėra nustatytas optimalus sapropelio kiekis biokuro briketė, kuris būtų didelės energetinės vertės, pasižymėtų mažu teršalų išskyrimu ir būtų mechaniškai patvarus.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – sapropelis ir galimybė panaudoti jį biokuro briketams kaip rišamąją degią medžiagą.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – kompleksinių tyrimų metu šiluminiu bei aplinkosauginiu požiūriais nustatyti sapropelio tinkamumą biokuro briketų gamybai ir įvertinti veiksnius, lemiančius jo, kaip biokuro rūšies, panaudojimo galimybes šilumos energijos gamybai.

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti reikia išspręsti tokius uždavinius:

1. Nustatyti cheminę sapropelio sudėtį ir organinės anglies kiekį, galinčius turėti įtakos sapropelio, kaip biokuro, kokybei.
2. Ištirti mechanines briketų su sapropelio rišikliu savybes, galinčias lemti jų tinkamumą panaudoti alternatyviojo biokuro gamybai.
3. Nustatyti šilumines sapropelio ir jo mišinių su kitu biokuru (šiaudais, medžio pjuvenomis ir durpėmis) briketų charakteristikas bei įvertinti šių briketų deginimo proceso metu išsiskiriančių dujinių teršalų emisijas.
4. Taikant skaitinį modeliavimą išanalizuoti sapropelio briketų degimo procesą ir teršalų išsiskyrimo tendencijas.
5. Pasiūlyti aplinkosauginį sprendinį – optimalų biokuro briketo su sapropeliu mišinio variantą.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti sapropelio ir briketų su sapropeliu cheminės sudėties, fizinių parametrų, šilumos pernašos ir deginimo produktų nustatymo metodai. Siekiant įvertinti briketų su sapropeliu degimo metu susidarančių teršalų koncentracijas, naudotos empirinės formulės. Šilumos pernašoms, azoto oksidų, anglies monoksidų, sieros dioksidų ir kietųjų dalelių emisijoms briketų su sapropeliu deginimo metu modeliuoti naudotas *COMSOL Multiphysics* programinės įrangos paketas.

Mokslinis darbo naujumas

Atlikti taikomieji teoriniai ir eksperimentiniai sapropelio tyrimai apima analizuotų biokuro briketų gamybos, panaudojant kaip rišiklį sapropelį, galimybes, deginimo proceso metu išsiskiriančių teršalų tyrimus, skaitinį šiluminių verčių ir teršalų emisijų degimo produktuose modeliavimą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Biokuro naudojimą Lietuvoje skatina tarptautiniai įsipareigojimai, susiję su šiltnamio dujų emisijų mažinimu. Rišiklio sapropelio panaudojimas biokuro gamybai leidžia racionaliai panaudoti Lietuvoje turimus iškastinius energijos išteklius, mažinant priklausomybę nuo importuojamo kuro.

Atitinkamų priedų bei rišamosios medžiagos – sapropelio panaudojimas briketų gamybai ir perspektyvios technologijos sukūrimas padidins šiluminę gaminamojo biokuro vertę, užtikrins briketų mechaninį patvarumą ir sumažins oro taršą, nes degimo proceso metu degimo produktuose susidarys mažesni teršalų kiekiai.

Ginamieji teiginiai

1. Mišinys sudarytas iš 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų yra tinkamiausias biokuro briketų gamybai.
2. Degimo metu išsiskiriančių į aplinkos orą teršalų kiekiai priklauso nuo briketų sudėtyje esančio sapropelio kiekio ir prigimties.
3. Mechaninės biokuro briketų savybės yra geriausios, kai į briketą kaip rišiklio įterpiama 20–30 % sapropelio.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į tarptautines duomenų bazines (Dumčius *et al.* 2011; Kozlovskė-Kędziora, Petraitis 2011; Kozlovskė *et al.* 2012a), vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos leidinyje, įtrauktuose į Web of Science, Thomson Reuters duomenų bazines (Kozlovskė *et al.* 2012b), vienas – recenzuojamoje tarptautinėje konferencijos Lietuvoje medžiagoje (Kozlovskė-Kędziora *et al.* 2011), du – recenzuojamų konferencijų Lietuvoje leidiniuose (Kozlovskė-Kędziora, Petraitis 2010a; Kozlovskė-Kędziora, Petraitis 2010b), vienas – nerecenzuojamoje konferencijos Lietuvoje medžiagoje (Kozlovskė-Kędziora, Petraitis 2009).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2009 m. Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2010 m. Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2011 m. Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2012 m. Vilniuje;
- Mokslininkų konferencijoje „*Šilumos energetika ir technologijos*“, 2010 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2011 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Central European Conference ECO-pole'11*“ 2011 m. Zakopanėje (Lenkijoje).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, šeši tiriamąją medžiagą atskleidžiantys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Darbo apimtis – 169 puslapiai, tekste panaudotos 45 numeruotos formulės, 47 paveikslai ir 17 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 220 literatūros šaltinių.

Sapropelio savybės ir panaudojimo galimybės

Skyriuje apžvelgiamos ežerų uždumblėjimo ir sapropelio susidarymo priežastys, aptariami sapropelio išgavimo būdai. Aprašomos pagrindinės dugno nuosėdų (sapropelio) savybės ir cheminė sudėtis, atskleidžiamos panaudojimo įvairiose srityse galimybės. Analizuojamas sapropelio panaudojimas biokurui, tokio kuro briketavimas ir šiluminė vertė. Aprašomas teršalų išsiskyrimas, jų kiekiai deginant biokurą, deginimo technologijos ir skaitinio teršalų modeliavimo galimybės.

Skyriaus tematika paskelbti du autorės straipsniai (Kozlovskā-Kędziora, Petraitis 2009; Kozlovskā-Kędziora, Petraitis 2010a).

1.1. Ežerų uždumblėjimas ir jo priežastys

Iš visų šalies vandens telkinių ežerai ištirti bene geriausiai (Jablonskis, Jurgelėnaitė 2007). Literatūroje aptinkami įvairūs ežero apibūdinimai, o vienas iš jų, kad „ežeras – tai dalį sausumos paviršiaus įdubimo ilgą laiką užimantis stovinčio vandens telkinys, neturintis tiesioginio ryšio su pasauliniu vandenynu“ (Valiuškevičius 2005).

Nustatyta, jog du trečdaliai Lietuvos pelkių – tai uždumblėję arba užžėlę ežerai (1.1 pav.). Viršutinis jų sluoksnis (2–4 m) yra sudarytas iš durpių, o 5–12 metrų gylyje slūgso sapropelio sluoksnis (Ciūnys 1997).

Sapropelis – sudurtinis graikų kalbos žodis („sapos” – supuvęs, „pelos” – purvas, dumblas) (Sapropel 2008) – tai senovinių gėlo vandens telkinių dugno dumblas, biologinių procesų medžiaga, susidariusi iš žuvusių augalų ir gyvūnų liekanų, pragulėjusių šimtmečius (Žak, Ossowski 2003). Ši masė, išvengusi rūgimo ir puvimo, per ilgą laiką įgavo vertingų savybių, kitaip tariant, sapropelis – tai organinių ir mineralinių medžiagų turintis dumblas, susikaupęs ežeruose ir pelkėse po durpėmis. Jo telkiniai Lietuvoje žinomi 436 ežeruose ir 370 pelkių, ištiekiai sudaro apie 10 mlrd. m³ (Katkevičius *et al.* 1998).

Limnologų manymu, maždaug prieš 10 tūkstančių metų Lietuvos teritorijoje buvo ne mažiau kaip 20 tūkst. ežerų, kurie buvo apėmę apie 4 % visos teritorijos. Ežerų dugne kaupiasi nuosėdos bei dumblas, ežerų pakrantės yra užžėlusios ir reikalauja valymo darbų. Kaip pavyzdys pateikiama Masčio ežero dalis prieš valymą ir po valymo darbų (1.1 a, b pav.) (Masčio ežero... 2007).



a)



b)

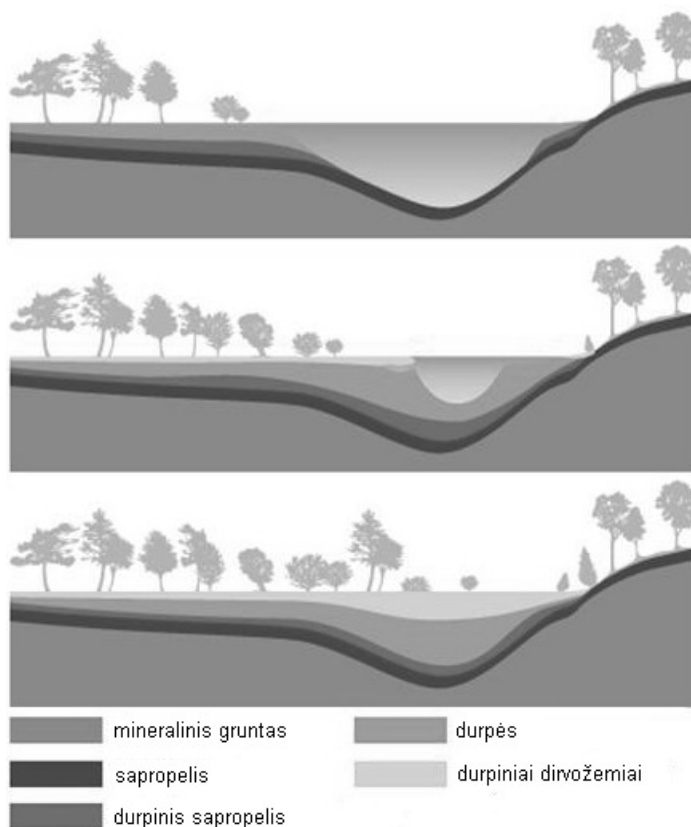
1.1 pav. Masčio ežeras: a) užžėlęs ir uždumblėjęs (prieš valymo darbus);
b) išvalytas ežeras (Masčio ežero... 2007)

Fig. 1.1. The Mastis lake: a) rank and silty (before cleaning); b) cleaned lake (Masčio ežero... 2007)

Lietuvoje priskaičiuojama apie 2850 ežerų, didesnių nei 0,5 ha, ir apie 3358, mažesnių nei 0,5 ha. Bendras jų plotas – tai 91368 ha (Jablonskis, Jurgelėnaitė 2007). Nemažai Lietuvos ežerų yra jau pasenę arba visai nykstantys, virstantys pelkėmis, tokių ežerų pakrantės yra užpelkėjusios, vanduo neskaidrus, blogos kokybės, ežero krantai vešliai apaugę žolėmis bei krūmais, vandens augalija išplitusi po visą ežerą (Katkevičius *et al.* 1998). Tačiau kitą Lietuvos ežerų dalį sudaro subrendę vandens telkiniai, kurių pakrantės neužpelkėjusios, mažai arba

visai neapaugusios žolėmis, vanduo skaidrus, atabradas smėlingas – tokių ežerų nuosėdų sluoksnis yra plonas (Ciūnys *et al.* 1994; Kilkus 2005).

Pagrindinė ežerų nykimo priežastis yra jų užaugimas vandens augalija ir virtimas pelkėmis, šis procesas vyksta labai lėtai ir gali trukti šimtus ir tūkstančius metų (Kongiel, Rakowski 1929; Alikonis *et al.* 1994; Kilkus 2005). Natūraliomis sąlygomis ežeruose kaupiasi pirminė organinių medžiagų produkcija, vyksta vadinamoji ežerų eutrofikacija, kuri reiškia jų senėjimą (1.2 pav.). Šis procesas yra labai priklausomas nuo ežerų „maitinimo“ biogeninėmis medžiagomis, o ypač azotu bei fosforu, būtent jie ir skatina vandens augalijos augimą ir vystymąsi (Ciūnys *et al.* 1994).



1.2 pav. Ežerų uždumblėjimo procesas (Происхождение болот... 2012)

Fig. 1.2. The process of the lakes silting (Происхождение болот... 2012)

Norint įvertinti ežerų eutrofikaciją, būtina išmatuoti vandens gylį, vandens pritekėjimo baseiną, vandens paviršiaus plotą, metinį vandens pritekėjimą, eže-

rinių nuosėdų gylį, jų kiekį ir kokybę, taigi ežerų būklei įvertinti reikalingi gana išsamūs tyrimai (Бракш 1971; Kilkus 2005; Valuškevičius 2007).

Vykstant eutrofikacijos procesams, ežerų dugne kaupiasi nuosėdos ir vandens augalai, vis daugiau ežero ploto užima makrofitai, todėl mažiau lieka veidrodinio jo paviršiaus. Ežerai pelkėja labai įvairiai, priklausomai nuo vietinių ežerų raidos sąlygų (Kilkus 1998). Ežerų uždumblėjimas nėra mechaninis nuosėdų kaupimasis – tai sudėtingas mikrobiologinis, cheminis procesas, kuris vyksta ežero dugne, esant deguonies trūkumui (Tarling, Turner 1999; Wagner *et al.* 2000; Кочов 2007a). Visos nuosėdos: vandens augalijos ir gyvūnijos liekanos, su polaidžio ir lietaus vandenimis atneštos ištirpusios ir kietos nuosėdos, vėjo suneštos dulkės, medžių lapai ir kitokios, patekusios į ežerą, yra veikiamos įvairių mikroorganizmų. Papildomai šias nuosėdas dar veikia temperatūra ir cheminiai procesai (Лопотко *et al.* 1992; Ciūnys 1997).

Lietuvoje yra labai daug uždumblėjusių ežerų, juose susikaupusio sapropelio kiekis pateiktas 1.1 lentelėje (Ciūnys *et al.* 1994; Katkevičius *et al.* 1998).

1.1 lentelė. Sapropelio kiekis uždumblėjusiuose Lietuvos ežeruose (Ciūnys *et al.* 1994; Katkevičius *et al.* 1998)

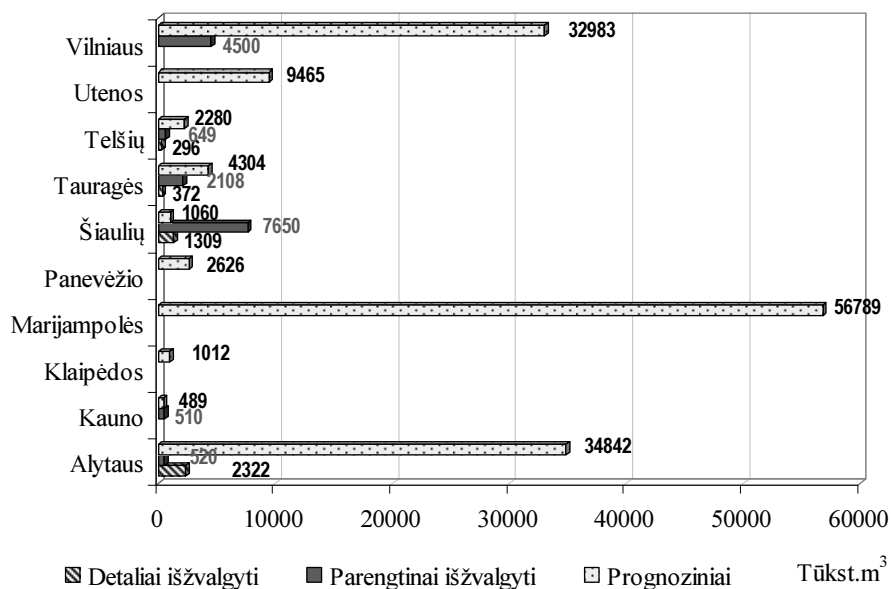
Table 1.1. Sapropel amount in silted Lithuanian lakes (Ciūnys *et al.* 1994; Katkevičius *et al.* 1998)

Ežerų plotas, ha	Ežerų skaičius	Uždumblėjusių ežerų skaičius	Uždumblėję ežerai, %	Sapropelio kiekis	
				mln. m ³	mln. t
0,5–10	1908	1717	90	330	103
10–50	644	450	70	440	138
50–100	138	55	40	185	58
100–500	128	26	20	331	103
500–1000	18	2	10	72	22
daugiau kaip 1000	14	2	10	110	35
Iš viso	2850	2252		1468	459

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apie 80 % Lietuvos ežerų yra uždumblėję, vandens gylis juose siekia iki 5,0 m, vandens kokybė bloga, susikaupusių organogeninių nuogulų (dumblo, sapropelio, durpių) kiekis labai didelis. Uždumblėjusiuose ežeruose susikaupę apie 1,47 mlrd. m³ (arba 460 mln. t) orausio sapropelio (50–55 % drėgnumas). Tai tikrai didžiuliai organinių medžiagų klodai, susiformavę per ilgą laiką. Per visą ežerų vystimosi laikotarpį ežeruose susikau-

pę apie 5,8 mlrd. m^3 sapropelio, o dar 4,5 mlrd. m^3 jo slūgso po durpėmis ežerų kilmės pelkėse (Ciūnys *et al.* 1994; Katkevičius *et al.* 1998; Bukantis *et al.* 2008).

Mokslininkų teigimu, Rusijoje uždumblėjusiuose telkiniuose susikaupusio sapropelio skaičiuojama nuo 38 iki 250 mlrd. m^3 , spėjama, kad orasausio sapropelio yra nuo 40 iki 92 mlrd. tonų (Плаксин, Кривонос 2007). Ežerai yra reikšmingi rekreacijai, žmonių poilsiui, kultūriniais poreikiams bei sportui. Šiuo požiūriu jie yra labai vertingi ir svarbūs prie sodybų, miestelių bei didelių Lietuvos miestų. Ežerai švelnina klimatą, taip pat yra labai svarbūs norint išsaugoti gėlą vandenį. Lietuvos geologijos tarnybos duomenimis, Lietuvos ežeruose detaliai ir parengtinai išžvalgytų ir galimų prognozinių sapropelio išteklių kiekiai pateikti 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Sapropelio išteklių pasiskirstymas Lietuvoje pagal apskritis (Lietuvos geologijos tarnyba 2009)

Fig. 1.3. The distribution of sapropel resources in Lithuania by county (Lietuvos geologijos tarnyba 2009)

Tipiniu sapropeliu laikomos nuosėdos, kuriose daugiau kaip 50 % sudaro organinės medžiagos, tačiau priimta manyti, kad organinių medžiagų kiekis kinta nuo 15 iki 95 %, priklausomai nuo ežero raidos, geografinių ir vietinių gamtos sąlygų (Balevičius *et al.* 2007).

Sapropelis pagal savo nuosėdų sudėtį dažniausiai išskiriamas į organinį, kalkinį, mineralinį (silikatinį arba silicinį) bei mišrų (organinis – kalkinis, organinis – silicinis) (Лопотко 1974; Косов 2007a). Praktiniu ir ekologiniu požiūriu

mokslininkus daugiausia domina sapropelis, esantis nykstančiuose bei pasenusiuose ežeruose, kadangi tokius ežerus reikia valyti (Бракш 1971; Лопотко 1974).

Sapropelio kaupimasis ežeruose yra lėtas procesas – per metus susikaupia vos apie 1–3 mm sluoksnis, daugiau jo susikaupia gausiau želiant vandens augalijai – tada sapropelio kaupimasis padidėja dešimteriopai. Mokslininkų teigimu, dideli sapropelio kiekiai pagreitina vandens telkinių senėjimą ir uždumblėjimą (Бракш 1971; Лопотко 1974; Ciūnys *et al.* 1994; Katkevičius *et al.* 1998; Kocob 2007a; Bukantis *et al.* 2008; Pekarskas 2008).

1.2. Pagrindinių sapropelio savybių ir sudėties analizė

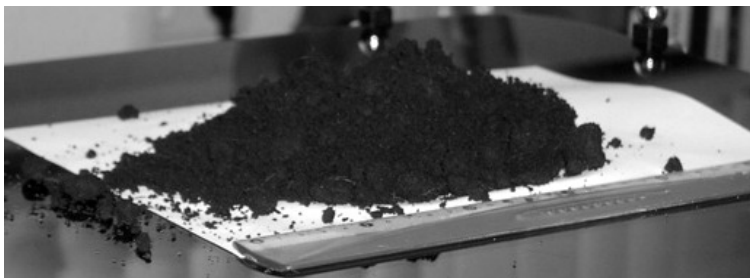
Įvairių mokslininkų nuomone, sapropelis – tai pati švariausia, šimtmečių suformuota ir iki mūsų dienų išsaugota trąša, veiksmingesnė nei kitos organinės trąšos (substratai ir kompostai), taip pat rišamoji medžiaga biokuro gamybai. Viename sapropelio grame priskaičiuojama net iki 1,5 mlrd. bakterijų kolonijų, paprastame komposte jų randama iki 0,4 mlrd., o mėšle – tik 150–350 mln. (Bakšienė, Janušienė 2005; Katkevičius *et al.* 1998). Sapropelis – tai koloidinė struktūra, kurios 80–95 % sudaro vanduo. Sapropelio vanduo naikina nepageidautinus kvapus. Viršutinysis sapropelio sluoksnis yra panašus į drebučius, o gilesnieji – sviesto konsistencijos. Spalva gali būti žalsva, alyvinė, rusva arba pilka (Kocob 2007a).

Atskirų vandens telkinių sapropelių sudėtis yra nevienoda. Juose randama apie 15–90 % organinės medžiagos, 5–60 % kalcio karbonatų, silicio, magnio, geležies, aliuminio, mangano, fosforo, kalio, natrio oksidų, įvairių mikroelementų: cinko, vario, molibdeno, kobalto, boro ir kt. (Bakšienė, Ciūnys 2007). Sapropelyje yra ir vitaminų, aminorūgščių bei kitokių biologiškai aktyvių medžiagų (Degens, Ross 1972; Лопотко 1974).

Ežerų eutrofikacija susijusi su padidėjusiu biogeninių medžiagų kiekiu, kuris skatina vandens augalijos augimą, dėl to ežeruose kaupiasi dideli kiekiai organinės medžiagos, vadinamos sapropeliu (1.4 pav.). Viršutinieji sapropelio sluoksniai yra labai vandeningi, praskiesti, dar nepakankamai susiformavę, jie vadinami pelogenu. Šiuose sluoksniuose, skaidantis mirusiam planktonui, vyksta pagrindiniai mikrobiologiniai sapropelio formavimosi procesai (Ciūnys *et al.* 1994). Lietuvos ežeruose, ypač tuose, kurie maitinami paviršiniu vandeniu, sapropelis sudaro didžiausią organinių nuosėdų dalį.

Sapropelio sluoksnio storis būna įvairus ir svyruoja nuo kelių iki 18 metrų, priklausomai nuo vandenyje esančio augalinių ir gyvulinių organizmų kiekio. Vandens telkiniuose, kuriuose gausiai želia augalija, nuosėdos per metus sudaro

keletą centimetrų – tokios nuosėdos formavimosi pradžioje yra labai purios, tiesiog kabo vandenyje, bet vėliau greitai susmenga, irsta (Бракш 1971).



1.4 pav. Sapropelio mėginys
Fig. 1.4. The sample of sapropel

Sapropelis gali būti įvairių spalvų. Spalva yra sudėties indikatorius, nes parodo organinių ir neorganinių medžiagų kiekius: žalsva rodo esant jame chlorofilo, rožinė – karotino, žydra – vivianito, pilka – kalkių priemaišų, juoda arba greitai tamsėjanti rodo geležį. Išsiurbtas iš ežero sapropelis greitai oksiduoja ir netenka natūralios spalvos (Žvironaitė *et al.* 2002; Katkevičius *et al.* 1998; Bakšienė, Janušienė 2005; Кочов 2007a).

Sapropelis gali būti labai skirtingas įvairiuose ežeruose, netgi to paties ežero įvairiose zonose (Kasza 1994; Bristow, Jol 2007; Bakšienė, Ciūnys 2007). Ežeruose, kur slūgso organinis sapropelis, tarp viršutinių bei apatinių sluoksnių nėra didelio organinių medžiagų kiekio skirtumo. Kai kuriuose ežeruose sapropelio apatiniuosiuose sluoksniuose kur kas daugiau mineralinių medžiagų arba einant palaipsniui gilyn matomas jų gausėjimas (Katkevičius *et al.* 1998).

Atšilus klimatui ir atsiradus gyviesiems organizmams, sapropelyje gausiau kaupiasi organinės medžiagos, jų kiekis gali svyruoti nuo 30 iki 90 %. Randama huminių rūgščių, angliavandenių, taip pat dideli kiekiai biochemiškai aktyvių medžiagų – aminorūgščių, fermentų. Sapropelyje labai mažai aptinkama nitratų, visiškai nėra pesticidų ir kitų žalingų priemaišų (Sachs, Repeta 1999; Bakšienė, Janušienė 2005). Sapropelis yra itin turtingas vitaminų, ypač – augalams būtino inozitolio. Didelė B ir PP grupės vitaminų koncentracija bei dominuojantis B12 suteikia šiai biomasei ypatingų gydomųjų ir maitinamųjų savybių (Лопотко 1974; Žvironaitė *et al.* 2002; Pekarskas 2008). Bendras azotas sudaro 3–6 % organinės medžiagos (Bakšienė 2007). Sapropelio organinė medžiaga yra maitinimosi terpė mikroorganizmams (O’Neil 1998; Kroon *et al.* 2001; Bakšienė, Ciūnys 2007). Didelis organinės medžiagos kiekis rodo, kad sapropelis, kaip rišamoji medžiaga, gali būti naudojamas biokuro gamybai.

Daugelio mokslininkų nuomone, efektyviausias ir tinkamiausias įvairaus tipo bandymams yra organinis sapropelis. Organiniame sapropelyje gausu anglies

junginių, todėl iš sapropelio pagaminti briketai gerai degtų, palikdami mažą pelenų kiekį.

Fizinės sapropelio savybės

Fizines sapropelio savybes ryškiausiai atspindi jo drėgnis, peleningumas ir mineralinių medžiagų kiekis. Drėgnis ir peleningumas yra taip pat susiję tarpusavyje: kuo didesnis peleningumas, tuo mažesnis būna natūralus sapropelio drėgnis (Бракш 1971; Лопотко 1974; Ciūnys *et al.* 1994).

Drėgnis. Paviršiniuose sluoksniuose drėgnis yra didžiausias, o gilesniuose sluoksniuose, veikiant viršutiniųjų sluoksnių svoriui, sapropelis pasidaro tankesnis, drėgnis palaipsniui mažėja (Кочов, Беляков 2004). Pasak Katkevičiaus, ne visuose ežeruose sapropelio drėgnis pagal gylį kinta tolygiai, pvz., Kvietkinės ežere (Marijampolės raj.) per visą 0,5–10 m klodo storį sapropelio drėgnis yra vienodas (93–94 %), tačiau Kemsynės ežere (Ignalinos raj.) einant gilyn sapropelio drėgnis kinta (87–92 %) (Katkevičius *et al.* 1998).

Išgaunant sapropelį iš ežero, jo sluoksniai susimaišo, išpylus jį krante išlieka didelis drėgnis, kadangi sapropelis turi koloidinę struktūrą, kuri suformuota didelio organinių medžiagų kiekio (Лопотко 1974; Niegodysz 1990).

Poringumas ir imlumas. Sapropelis labai sunkiai išskiria drėgmę ir lėtai sausėja – tai pagrindinė kliūtis platesniam sapropelio naudojimui. Sapropelis blogiau už molį išskiria vandenį, todėl garuojant vandeniui jis lėtai sausėja (Jankevičius *et al.* 1997). Sapropelio laidumas vandeniui yra labai mažas – jo filtracijos koeficientas siekia 0,0035–0,0001 m/per parą (organinio – 0,0001 m/per parą, kalkinio – 0,0035 m/per parą).

Sapropelio vandens imlumas – didžiausias vandens kiekis, kurį gali absorbuoti būdamas vandenyje – priklauso nuo jo pradinio drėgnio, organinių medžiagų kiekio ir dispersiškumo. Vandens imlumas gali siekti nuo 10–20 % iki 250–300 %. Šis sapropelio rodiklis yra didesnis nei molio, kurio imlumas siekia 75–85 %. Orasausis sapropelis yra visiškai neimlus vandeniui (Лопотко 1974; Katkevičius *et al.* 1998; Кочов 2007a).

Tankis. Mažėjant drėgniui sapropelio tankis didėja nuo 1,05–1,07 t/m³ iki 1,25–1,35 t/m³. Sapropelis virsta į mechanškai labai atsparius gabalus – išdžiūvęs iki 30–40 % drėgnio jis gali atlaikyti 120–160 kg/cm² slėgį. Tokie sapropelio gabalai yra atsparūs vandeniui, jie suyra tik tuomet, kai būna peršaldyti (Ciūnys *et al.* 1994; Katkevičius *et al.* 1998; Кочов 2007a).

Susitraukimas. Garuojant drėgmei, koloidinės gardelės traukiasi, kadangi, mažėjant drėgniui, sapropelio tūris irgi mažėja (Бракш 1971; Лопотко 1974; Кочов 2007a). Kai sapropelio drėgnis sumažėja nuo 90 iki 80 %, jo tūris sumažėja du kartus, o kai drėgnis sumažėja nuo 90 iki 60 % – keturis kartus. Džiovinant sapropelį iki orasausės būklės, kai drėgnis 50–55 %, jo tūris sumažėja apie 5 kartus (Katkevičius *et al.* 1998; Кочов 2007a).

Lipnumas. Labai svarbus technologinis sapropelio rodiklis – lipnumas, kuris priklauso nuo drėgnio. Didžiausias sapropelio lipnumo dydis pasireiškia tik esant tam tikram drėgniui (Лопотко *et al.* 1992). Mažėjant drėgniui, sapropelio paviršius sutrūkinėja į netaisyklingus daugiakampius, jo tūris taip pat pasidaro mažesnis. Peršaldytas sapropelis tiek savo išvaizda, tiek savybėmis pasikeičia negrįžtamai. Sudžiūvę gabalai suyra, sapropelis pasidaro purus, struktūringas. Peršaldyto sapropelio vandens imlumas didėja (Katkevičius *et al.* 1998; Косов, Беляков 2004; Malanotte-Rizzoli, Robinson 1994). Sapropelio fizinės savybės nusako jo tinkamumą naudoti energetikoje. Didelis drėgmės kiekis ir lipnumas leidžia sapropelį, kaip rišamąją medžiagą, naudoti briketų arba granulių gamybai.

Cheminės sapropelio savybės

Naudojant sapropelį svarbią reikšmę turi cheminė jo sudėtis. Aptinkama ir sunkiųjų metalų: švino, kadmio, nikelio, chromo, cinko, vario, mangano ir kt. (Киреичева, Khokhlova 2000; Žvironaitė *et al.* 2002; Borgendahl, Westman 2006). Pagal pagrindinius komponentus ir pelenų sudėtį sapropelis skirstomas į organinį, arba mažai peleningą, turintį iki 30 % pelenų, ir labai peleningą (30–85 % pelenų). Priklausomai nuo pelenų sudėties, labai peleningas dalijamas į silicinį, kuriame vyrauja silicis, kalkinį sapropelį, kuriame vyrauja kalcio karbonatai, ir mišrųjį, kuris turi vienodą kiekį kalcio ir silicio oksidų (Лопотко 1974; Katkevičius *et al.* 1998; Bakšienė, Janušienė 2005).

Mikro– ir makroelementai

Sapropelyje aptinkama šių makroelementų: kalcio karbonatų (CaCO_3), silicio (SiO_2), aliuminio (Al_2O_3), geležies (Fe_2O_3), kalcio (CaO), magnio (MgO), sieros (SO_3), fosforo (P_2O_5), kalio (K_2O) oksidų, bendrojo azoto (Демек 1977; Budavičius, Kadūnas 1999; Косов 2007a).

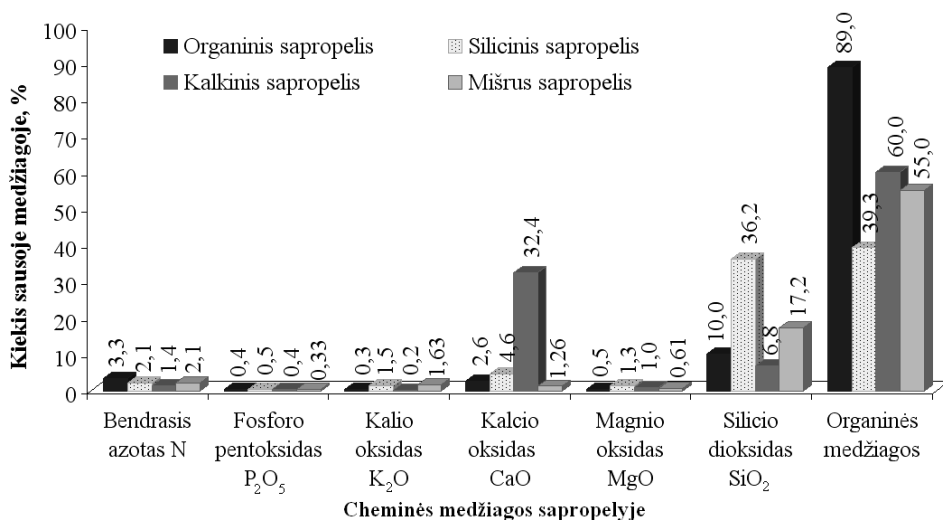
Organiniame sapropelyje pagrindinis pelenų komponentas – tai kristalinis SiO_2 (8–10 %), o kitų komponentų nėra daug: CaO ir MgO suma siekia apie 3–6 %, SO_3 kiekis svyruoja nuo 0,1–2,9 %, P_2O_5 yra 0,2–2,4 %, K_2O – 0,1–0,8 %. Kadangi tarp organinės medžiagos ir bendrojo azoto kiekio yra tiesioginis ryšys, tai organiniame sapropelyje randamas pats didžiausias bendrojo azoto kiekis (vidutiniškai 3,3 %), palyginti su kitais sapropelio tipais (Лопотко 1974; Katkevičius 1997; Katkevičius *et al.* 1998; Косов, Беляков 2004; Косов 2007a).

Silicinio sapropelio pelenuose yra 30–70 % SiO_2 . Šis cheminis elementas, kaip ir organiniame sapropelyje, randamas kristalų pavidalo. Siliciniame sapropelyje randami dideli kiekiai geležies oksido (7,0–11,3 %), taip pat randama apie 3,9 % Al_2O_3 , kurio kiekį atitinka padidėjęs K_2O kiekis (apie 1,5 %). Siliciniame sapropelyje yra apie 2,1 % bendrojo azoto (Лопотко 1974; Katkevičius 1997; Katkevičius *et al.* 1998; Косов 2007a).

Kalkiniame sapropelyje pagrindinis mineralinis komponentas yra kalcio karbonatai, kurių yra apie 30–80 %. SiO_2 ir Fe_2O_3 kiekis daugiausia priklauso

nuo CaCO_3 kiekio. Kalkiniame sapropelyje mažiausiai randama fosforo ir kalio oksidų, kurių dydis svyruoja atitinkamai nuo 0,1 iki 0,5 % (Лопотко 1974; Katkevičius 1997; Katkevičius *et al.* 1998; Косов 2007a).

Mišriojo sapropelio pelenai išsiskiria cheminių elementų įvairove. Apie 30 % sapropelio, į kurio pelenų sudėtį įeina kristalinis SiO_2 , įskaitant P_2O_5 (0,1–1,0 %) ir K_2O (0,4–1,1 %), yra panašus į organinį sapropelį ir praktiškai gali būti naudojamas kaip organinis sapropelis. Tuo tarpu mėšle, kurio kaip trąšos savybės prilyginamos sapropeliui, randama 2,1 % azoto, 0,33 % fosforo, 1,63 % kalio, 1,26 % kalcio, 0,61 % mangano (1.5 pav.) (Katkevičius 1997; Косов 2007a).



1.5 pav. Procentinis cheminių medžiagų skirtingų sapropelio tipų sudėtyje pasiskirstymas (Katkevičius 1997; Косов 2007a; Pekarskas 2008)

Fig. 1.5. The distribution of percentage chemical composition in different types of sapropel (Katkevičius 1997; Косов 2007a; Pekarskas 2008)

Cheminė Lietuvos telkinių sapropelio sudėtis yra labai įvairi. Azoto daugiausia yra organiniame sapropelyje, nuo organinių medžiagų kiekio priklauso fosforo ir kalio kiekis (Bakšienė 2001). Geležies ir sieros junginių sapropelyje negausu (0,01–2,3 %). Kai kurių Lietuvos ežerų sapropelyje randama nemažai jodo ir bromo (atitinkamai 29–495 mg/kg ir 0,6–5,8 mg/kg sauso sapropelio). Šie mikroelementai paprastai įeina į sapropelio organinių medžiagų sudėtį (Kilkus 2005).

Pagrindiniai organinių medžiagų komponentai yra humusinės medžiagos, lengvai ir sunkiai hidrolizuojamos ir nehidrolizuojamos medžiagos, bitumo ir vaško junginiai. Sapropelio komponentų grupių sudėtis charakterizuoja jo organines medžiagas (Юдина *et al.* 1998; Kireicheva, Khokhlova 2000 Экологически чистое... 2007; Pekarskas 2008). Organinio tipo sapropelyje organinės

medžiagos sudaro 70–93 %, silikatiniam ir kalkiniam 15–60 %, mišriam – 43–58 % sausųjų medžiagų (Katkevičius 1997). Lengvai hidrolizuojamos medžiagos dažniausiai yra biologinės kilmės, intensyviai kaupiasi ten, kur yra daug dumblių. Sunkiai hidrolizuojamų medžiagų daugiausia yra pelkių sapropelyje. Didžiausią dalį humusinių medžiagų sudaro huminės rūgštys. Fulvorūgščių randama nedaug (1–3 %) arba visai nerandama (Balevičius *et al.* 2007).

Organinio bei mišraus tipo sapropelyje humusinės medžiagos sudaro 14–17 %, didelė dalis jų – huminės rūgštys (10–48 %). Lengvai hidrolizuojamos medžiagos sudaro 8–50 %, monosacharidai 4,2–16,5 %, vandenilis 5,6–7,8 %. Mišraus ir silikatinio tipo sapropelyje randama 15 % huminių rūgščių. Pagal komponentų sudėtį kalkinis sapropelis skirstomas į turintį daug lengvai hidrolizuojamų medžiagų (25–40 % sausosiose medžiagose) ir į turintį daug nehidrolizuojamų liekanų (35–43 % sausosiose medžiagose), be to, gali būti pastebimi įvairūs komponentų santykiai (Katkevičius *et al.* 1998; Kireicheva, Khokhlova 2000; Кочов 2007a).

Priklausomai nuo to, kokiomis sąlygomis sapropelis formavosi viename ar kitame telkinyje, organinių medžiagų sudėtis jame gali žymiai skirtis (Balevičius *et al.* 2007). Įvairaus tipo sapropelio organinių medžiagų elementinė sudėtis daug nesiskiria (Gorlach, Mazur 2001; Balevičius *et al.* 2007), todėl šis rodiklis nėra esminis. Jis gali turėti įtakos vertinant mažo peleningumo sapropelį, kuriame anglies, vandenilio ir azoto kiekis priklauso nuo sapropelyje esančių komponentų santykio.

Pagrindinis azoto junginių šaltinis sapropelyje yra ežerų flora ir fauna, t. y. zoo– ir fitoplanktonas, aukštesnieji vandens augalai. Todėl sapropelyje esantiems mikro– ir makroorganizmams būdingas didelis azoto junginių kiekis: visuomet gerokai didesnis negu kitose organinėse nuosėdose. Vandenyje tirpių ir lengvai hidrolizuojamų medžiagų suma siekia 30–60 %, iš jų hemiceliuliozės – 10–27 %, celiuliozės – 9–39 % (Katkevičius 1997).

Organinių medžiagų prigimtis sapropelyje įvairiuose ežeruose yra skirtinga, kadangi ji priklauso ir nuo vandens telkinio biologinių objektų rūšinės sudėties ir ypatumų (Юдина *et al.* 1998; Kireicheva, Khokhlova 2000; Middleton 2003). Vandenyje tirpiosios medžiagos sapropelio organinėje medžiagoje sudaro 1,9–7,0 %. Po inversijos sapropelio organinėje medžiagoje randama 0,3–0,5 % cukraus ir 1–3 % bendrojo azoto. Lengvai ir sunkiai hidrolizuojamų medžiagų suma lygi 33,5–74,1 %, redukuojamųjų medžiagų kiekis – 1,3–33,0 %, monosacharidų organinėje medžiagoje suma – 0,6–26,0 %. Hemiceliuliozinis cukrus sudaro 80 % bendro cukraus, tarp lengvai hidrolizuojamų medžiagų monosacharidai organinėje medžiagoje dažniausia sudaro 6–16 % (Katkevičius *et al.* 1998).

Naudingiausias biokuro gamybai yra tas sapropelis, kuris yra susidaręs dumblių pagrindu ir kurio organinės medžiagos kiekiai siekia apie 70 % (Лопотко 1974; Jankevičius *et al.* 1997).

Durpiniame sapropelyje mažiau hemiceliuliozės (9,3 %), bet daugiau celiuliozės (1,8 %). Hemiceliuliozė sapropelio organinėje medžiagoje sudaro vidutiniškai 5–8 %. Mažai peleningame sapropelyje hemiceliuliozės gausiau (iki 8–20 %), nes jis susidaro dažniausiai iš dumblių. Celiuliozė sapropelio organinėje medžiagoje sudaro vidutiniškai 1–2 %. Durpiningesniame sapropelyje celiuliozės randama daugiau (4–6 %).

Sapropelio angliavandenių kompleksą daugiausia sudaro hemiceliuliozė (iki 80 % ir daugiau), todėl sapropelio pagrindu galima ruošti trąšas ir pašarų priedus (Balevičius *et al.* 2007).

Lietuvos ežerų sapropelio vitaminus, o ypač B₁₂, 1962 metais tyrinėjo Lietuvos mokslų akademijos Biochemijos instituto darbuotojai. Pastebėta, jog vitamino B₁₂ kiekis, priklausomai nuo metų laiko, sapropelyje skiriasi: gausiausia jo pavasarį ir rudenį, o žiemos ir vasaros laiku jo sumažėja iki 50 %. Taip pat pastebėta, kad iš ežero išgautą sapropelį laikant atvira ore, vitamino B₁₂ po truputį mažėja (Канопкайтė *et al.* 1962).

1997 metais Lietuvos botanikos instituto hidrobotanikos laboratorijoje detaliau ištirta B grupės vitaminų sudėtis Lietuvos uždumblėjusių ežerų sapropelyje (Katkevičius *et al.* 1998). B grupės vitaminų kiekis sapropelyje, palyginti su vidutinio derlingumo dirvožemiu, yra didesnis: izonito, pantoteno rūgšties (vitaminas B₃) ir tiamino (vitaminas B₁) iki 14 kartų, biotino (H) – 12 kartų, pirodoksinio (vitamino B₆) ir nikotino rūgšties (PP) – 4 kartus, paraamino benzoinės rūgšties bei vitamino B₁₂ net 25 kartus (Лопотко 1974; Adamiec, Helios-Rybicka 2002; Helios-Rybicka *et al.* 2005).

Sapropelio sudėtyje esančiose amino rūgštyse vyrauja lizinas, argininas, aspargino ir glutamino rūgštys, treoninas, alaninas, leicinas. Amino rūgščių kiekis organiniame sapropelyje gali siekti 12,4 %, siliciniame 12,3 %, mišriojo tipo sapropelyje 13,0 %, o kalkiniame net iki 13,2 %, taigi atskirų tipų sapropelyje šis kiekis yra nevienodas (Bakšienė 2001), tačiau amino rūgščių sudėtis pagal sapropelio tipą skiriasi labai nežymiais kiekiais.

1.3. Sunkiųjų metalų ežerų nuosėdose susidarymo ypatumai

Sunkieji metalai yra amžini teršalai, jie nesuyra, o tik keliauja iš vienos ekologinės nišos į kitą, grėsdami menkai nusakomomis pasekmėmis (Trojanowski 1973). Svarbu, kad sunkieji metalai į aplinką iš viso nepatektų. Priešingu atveju jie pasklistų ir vienokiu ar kitokiu būdu patektų į žmogaus organizmą (Maher, Thompson 1999). Šiuo metu viena iš svarbių problemų tampa požeminio bei paviršinio vandens apsauga nuo teršiančių medžiagų ir jų migracinių savybių nustatymas (Valiuškevičius 1997; Budavičius 2003).

Kadangi vienos cheminės medžiagos, teršiančios aplinką, yra pavojingos labiau, o kitos – mažiau, jų didžiausios leistinos koncentracijos skiriasi. Jų dydį nustato mokslininkai, tiriantys skirtingų teršalo koncentracijų poveikį gyviesiems organizmams – augalams, žuvims, aplinkos komponentams ir kt. Teršalo kiekis, kuris jau nebesukelia neigiamų pakitimų tiriamuosiuose organizmuose, yra didžiausia leistina koncentracija (Osipov *et al.* 2004; Robert 2008). Sąveika tarp atmosferos ir hidrosferos teršalų ir bioorganizmų yra labai svarbi problema. Dažniausiai sunkiųjų metalų bioakumuliacija yra pasyvus procesas, ir tai suteikia galimybę kai kuriuos bioorganizmus panaudoti kaip atmosferos ar hidrosferos taršos indikatorius. Tačiau visada yra tam tikri kritiniai biologiniai procesai ir mikroaplinkos sąlygos, kurios veikia sunkiųjų metalų įsisavinimą (Alloway, Ayres 1999).

Daugiausia į aplinką patenkančių cheminių elementų kaupiasi dirvožemyje ir vandens baseinų dugno nuosėdose (Martyshev 1983; Budavičius 2003; Myślińska 2006; Yanko-Hombach, Dolukhanov 2007). Dirvožemis yra laikomas ir teršalus kaupiančia, ir pernašos terpe (Gornitz 2009). Teršalai, patekę į dirvožemį su dulkėmis, krituliais ar kitu būdu, čia kaupiasi įvairių junginių pavidalu. Iš dirvožemio jie gali patekti į augalus, o per juos – į mitybines grandines. Taip pat gali migruoti į paviršinius, gruntinius bei požeminius vandenis ir išplisti dideliais atstumais, o iš čia vėl patekti į mitybines grandines ir nuodėti gyvus organizmus (Katkevičius *et al.* 1998; Mažvila 2001).

Sunkieji metalai į vandens telkinius, tuo pačiu ir į sapropelį, patenka iš atmosferos ir su paviršiniais bei požeminiais vandenimis (Yanko-Hombach, Dolukhanov 2007). Iš atmosferos sunkieji metalai (bei jų junginiai) patenka ant vandens ir ant žemės paviršiaus. Dalis sunkiųjų metalų bei jų junginių, iškritusių ant žemės paviršiaus, su nutekančiu vandeniu, dirvožemio nuoplovomis bei su vėjo pernešamomis dulkėmis patenka į vandens telkinius. Bet sunkieji metalai į ežerų sapropelį patenka ne vien iš atmosferos. Dalis sunkiųjų metalų, kurie aptinkami gilesniuose sapropelio sluoksniuose, susidarė natūraliai, vykstant sudėtingiems hidrocheminiams ir hidrobiologiniams procesams, kurie formavosi ilgus tūkstantmečius, kai atmosfera ir vandenys dar nebuvo taip užteršti kaip dabar (Katkevičius *et al.* 1998).

Naudojant sapropelį deginimui ir dirvoms tręšti svarbu, kad jis nebūtų užterštas sunkiaisiais metalais. Sunkieji metalai po deginimo lieka sapropelio pelenuose, todėl, padidėjus jų koncentracijai, iš dirvos sunkieji metalai patenka į žemės ūkio produkciją, o su maistu – į žmogaus organizmą (Helios-Rybicka *et al.* 2005; Kadūnas 1998; Siani *et al.* 2001).

Lietuvos Respublikos higienos centras susistemino, o Sveikatos apsaugos ministerija patvirtino tokias sunkiųjų metalų didžiausias leistinas koncentracijas (DLK) dirvožemyje: Cd – 3 mg/kg, Ni – 75 mg/kg, Zn – 300 mg/kg, Pb – 100 mg/kg, Cr – 100 mg/kg, Cu – 100 mg/kg, Mn – 1500 mg/kg, Hg – 1,5 mg/kg dirvožemio (HN 60: 2004). Tais atvejais, kai sunkiųjų metalų koncentracija di-

desnė už DLK dirvožemyje, galima naudoti tik tokį sapropelio kiekį, kurį įterpus sunkiųjų metalų koncentracija dirvožemyje neviršytų DLK (Katkevičius *et al.* 1998; Bakšienė 2007).

Kadangi sapropelis nėra plačiai naudojamas deginimui ir nėra reglamentuota, kokios gali būti sunkiųjų metalų koncentracijos jame, todėl sunkiųjų metalų koncentracijos yra lyginamos su nuotekų dumbliui pateiktas reikalavimais LAND 20–2005. Deginimas yra vienas iš nuotekų dumblo šalinimo metodų, jis gali būti deginamas vienas arba sumaišytas su kitu kuru (anglimi, šiaudais, medienos apdirbimo, komunalinėmis atliekomis ir kt.) (Cartmell *et al.* 2006). Sapropelis yra švaresnė ir mažiau užteršta organinės kilmės medžiaga, todėl ir sunkiųjų metalų koncentracija bendroje jo masėje būna kelis kartus mažesnė negu nuotekų dumble. Sapropelio sunkiųjų metalų kiekiai yra lyginami su nuotekų dublo I kategorija, toks dumblas gali būti naudojamas tręšimui, karjerų rekultivavimui ir deginimui. Pagal LAND 20–2005, didžiausios leistinos sunkiųjų metalų koncentracijos dumblyje gali būti šios: Ni – 50 mg/kg, Zn – 300 mg/kg, Pb – 140 mg/kg, Cr – 140 mg/kg, Cu – 75 mg/kg.

1.2 lentelė. Sunkiųjų metalų kiekis Lietuvos ir užsienio ežerų sapropelyje (Katkevičius *et al.* 1998; Vallius, Leivouri 1999; Kadūnas, Budavičius, 2001; Kocob 2007a; Cieślewicz, Róžański 2010)

Table 1.2. The amount of heavy metals in the Lithuanian and foreign lakes sapropel (Katkevičius *et al.* 1998; Vallius, Leivouri 1999; Kadūnas, Budavičius, 2001; Kocob 2007a; Cieślewicz, Róžański 2010)

Ežero pavadinimas (šalis)	Sunkiųjų metalų kiekiai, mg/kg sausųjų medžiagų					
	Pb	Ni	Cr	Zn	Cu	Mn
Sedos ež. (Lietuva)	42	17	37	84	17	950
Galvės ež. (Lietuva)	90	26	56	140	22	442
Ilgučio ež. (Lietuva)	31	13	9	47	6	224
Guobsto ež. (Lietuva)	11	6	3	48	6	53
Seremo ež. (Rusija)	1	-	3	27	3	58
Berezovskio ež. (Rusija)	10	-	7	62	22	518
Suomijos įlanka (Suomija)	52	-	87	209	43	-
Piaseczno Male ež. (Lenkija)	136	8	-	184	13	-
Jelenie ež. (Lenkija)	48	6	-	106	9	-

Lietuvos ir užsienio šalių ežerų sapropelyje randami skirtingi sunkiųjų metalų kiekiai (1.2 lentelė). Lietuvos mokslininkų tyrimų duomenys rodo, kad sun-

kiųjų metalų koncentracijos sapropelyje daugelyje telkinių yra gerokai mažesnės už DLK. Tačiau kai kuriais atvejais sunkiųjų metalų koncentracija yra artima arba net viršija DLK, todėl prieita prie išvados, kad reikia detalesnių tyrimų apie sunkiųjų metalų pasiskirstymą ežero sapropelio klode, kadangi sunkiųjų metalų pasiskirstymas sapropelio sluoksnyje labai skirtingas (Katkevičius 1997).

Kai kurių sunkiųjų metalų koncentracija paviršiniame sluoksnyje yra mažiausia, kitų – viršuje didelė, viduryje mažiausia, o po to vėl didėjanti (Baojun, Sitian 1997; Geištoraitis, Ciūnys 2001; Budavičius 2003), o nikelio ir chromo koncentracija per visą klodą gali išlikti beveik vienoda (Nieč 2006). Deginimui ir trąšai sapropelis imamas ne tik iš viršutinių sluoksnių, bet ir iš gilesnių sluoksnių (Hart 2004), o paėmimo ir transportavimo procese sapropelis susimaišo, todėl, sprendžiant apie sapropelio užterštumą sunkiaisiais metalais, reikia imti vidutinę jų koncentraciją iš to sluoksnio, iš kurio bus imamas sapropelis (Katkevičius *et al.* 1998; Bakšienė 2007).

1.4. Uždumblėjusių vandens telkinių valymas ir sapropelio išgavimas

Uždumblėjusių ežerų atgaivinimas yra sudėtinga problema. Ežerų vandens gylis anksčiau buvo didinamas, užtvėnkus ištekančius iš ežerų upelius, tačiau patirtis parodė, kad ši priemonė ežerų negelbsti, o tik pailgina keliais dešimtmečiais jų pelkėjimo procesą (Balevičius 2007). Pakėlus vandens lygį (paprastai 1,0–1,5 m), žūsta tik dalis vandens augalijos, o vandens kokybė vis tiek lieka bloga. Ežere jau po kelių užtvėnkimo metų pagausėja vandens augalų. Kai augalų gausu, kaupiasi vandenyje jų liekanos, didėja biogeninių elementų ir sparčiai vystosi dumblėjimo procesas. Siekiant atgaivinti ežerą, būtina jį pagilinti, išgaunant susikaupusį dumblą (visą ar tik dalį). Susikaupusį dumblą išgauti galima hidrauliiniu (žemsiurbėmis) ar mechaniniu (ekskavatoriais, greiferiais) būdais, taip pat mišriuoju būdu, kai naudojama tiek žemsiurbės, tiek ekskavatoriai (Лопотко 1974; Ciūnys 1997; Katkevičius *et al.* 1998; Мисников *et al.* 2008).

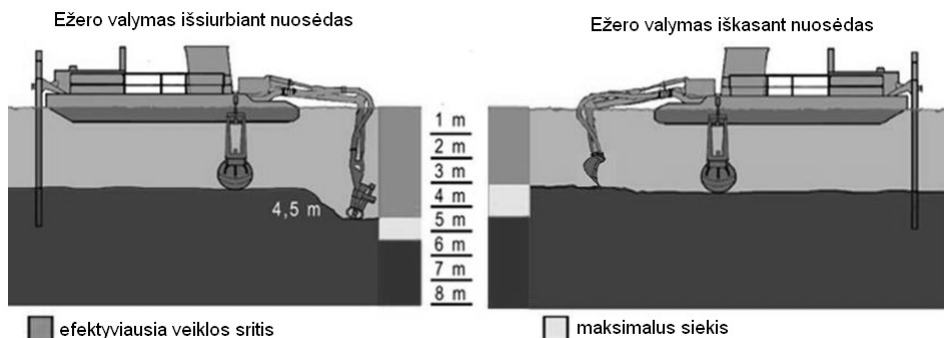
Hidraulinis sapropelio gavybos būdas

Žemsiurbę sudaro pontonai, grunto siurblys, čiulpvamzdis, pulpovamzdžiai, judėjimo įranga: gervės su lynais bei poliai.

Sapropelio išgavimas vyksta tokiu būdu: veikiant grunto siurbliui, sudaromas vakuumas ir čiulpvamzdžio mechanizmas siurbia sapropelį kartu su vandeniu (ši masė vadinama pulpa). Siurblio darbinis ratas sudaro slėgimą, dėl kurio pulpa pulpovamzdžiais iškeliama ant kranto. Žemsiurbės darbas yra nenutrūkstamas, mechanizmai nesudėtingi, aptarnavimas nesunkus. Hidraulinis sapropelio

gavybos būdas yra našiausias. Žemsiurbės našumas priklauso nuo grunto siurblio ir čilpvamzdžio gebėjimo paimti kuo tirštesnę pulpą (Ciūnys 1997).

Žemsiurbė (1.6 pav.) – tai daigafunkcė mašina, kuri gali dirbti ir kaip žemsiurbė, ir kaip kasimo įrenginys su atbuliniu kaušu. Dėl nedidelės masės ir universalumo ji gali pakeisti kelias mašinas, todėl minimaliai žaloja aplinką ir idealiai tinka uždumblėjusiems ežerams valyti.



1.6 pav. Žemsiurbė atlieka ežero valymo darbus (Watermaster Classic...2007)

Fig. 1.6. Dredge cleaning the lake (Watermaster Classic...2007)

Žemsiurbė gali dirbti sunkiai pasiekiamose vietose, t. y. ten, kur įprastinės žemsiurbės dėl sudėtingų aplinkos sąlygų negali dirbti. Ji gali laisvai judėti tiek vandenyje, tiek ant kranto, naudodama savo strėlę ir unikalios konstrukcijos stabilizatorius (Дноуглубительные работы...2008).

Turint visą sapropelio siurbimo kompleksą (žemsiurbę, plaukiojančius ir krantinius pulpovamzdžius), galima sėkmingai vykdyti ežerų valymo ir sapropelio gavybos darbus. Prieš pradėdant ežero valymo darbus, atvežama ir surenkama žemsiurbė, pontonai, nutiesiamas krantinis pulpovamzdis. Ežeras padalijamas į atskirus sektorius, nustatoma atskirų ežero sektorių išvalymo eilės tvarka. Žemsiurbė pastatoma kasimo vietoje ir nuosekliai siurbia sapropelį paskirtoje juostoje. Sapropelis imamas pasluoksniui iki dugno ar numatyto gylio. Juostos ilgis priklauso nuo plūduriuojančio pulpovamzdžio ilgio (Ciūnys 1997; New possibilities... 2006).

Mechaninis sapropelio gavybos būdas

Skiriami du mechaninio ežerų valymo atvejai: kai uždumblėjęs ežeras nėra visiškai užpelkėjęs ir kai ežeras jau yra virtęs pelke. Kai ežeras nėra visiškai virtęs pelke, jame yra vandens sluoksnis, iš kurio sapropelis išgaunamas greiferiu. Sapropelis kasamas greiferiniu kaušu ir pilamas į baržą. Barža su sapropeliu prie kranto plukdoma kateriu arba gerve sukant lyną. Iš baržos sapropelis iškabina-

mas kitu ekskavatoriumi su greiferiniu kaušu arba grunto siurbliu, supilamas į cisternas ir išvežamas į džiovinimo ar laikymo vietą. Labai svarbus procesas – baržos iškrovimas. Organinio, silikatinio sapropelio masė baržoje gana tanki ir jis gali būti išsiurbiamas gruntiniu siurbliu, o esant kalkiniam sapropeliui – iškraunama tik greideriais (Ciūnys 1997; Katkevičius *et al.* 1998).

Kai ežeras jau virtęs pelke, ant sapropelio sluoksnio būna susidaręs 1–3 m storio durpių sluoksnis. Jeigu durpės nenukastos, jas nusausinusi galima paviršiumi važiuoti įprasta technika. Tačiau kai durpių likę 0,3–0,6 m, jų sluoksnio tvirtumas yra nedidelis – gali atlaikyti iki 19–23 kPa ir mažesnę spaudimą. Tokiais atvejais būtinos papildomos priemonės, kurios užtikrintų mechanizmų stabilumą. Sapropelis kartu su durpėmis kasamas ekskavatoriais – draglainais, kraunamas į metalines plačiavikšres savivarčių priekabas, kurias traukia traktoriai.

Ekskavatorius tokiu būdu kasa sapropelį iki ežero dugno. Besikaupiantis iškasoje vanduo išsiurbiamas siurbliais. Sapropelis traktoriumi išvežamas už tvenkinio (pelkės) ribų ir paskleidžiamas džiovinti. Pradžiūvęs sapropelis sustumdomas į krūvas ir išvežamas į pramonės objektus trąšoms, pašarų priedams, termoizoliacinėms plokštėms, biokuro briketams arba granulėms ir t. t. gaminti (Ciūnys 1997; Balevičius *et al.* 2007; Косов 2007a). Ežerų valymo ir sapropelio gavybos darbų sezonas gali būti vykdomas ir žiemos sąlygomis.

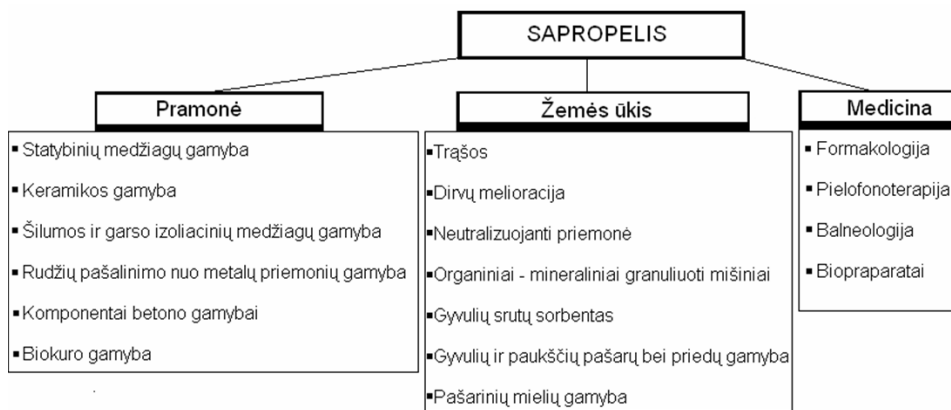
1.5. Saproelio panaudojimo galimybės

Daugiausia natūralus sapropelis naudojamas tręsimui, kadangi jame yra organinių medžiagų, karbonatų, mikroelementų, ir jų nemažą dalį gali įsisavinti augalai (Лопотко, Евдокимова 1986; Amend *et al.* 2004; Czamara A., Czamara W. 2008; Baran *et al.* 2009; Ciesielczuk *et al.* 2011). Sapropelis taip pat gali būti dedamas į gyvulių, paukščių, žuvų pašarą kaip mineralinis ir biologiškai aktyvių medžiagų turintis priedas, kuriame gausu B grupės vitaminų, aminorūgščių bei kitų junginių (Лопотко 1974; Ciūnys *et al.* 1994; Карабанов *et al.* 2003; Добрецов 2005; Bakšienė, Ciūnys 2007).

Sapropelis gali būti žaliava chemijos pramonei, statybinėms medžiagoms, tokioms kaip drenažiniai vamzdžiai, palengvintos sieninės plytos, keramzitas, gaminti. Be kita ko, sapropelis naudojamas kosmetikoje bei medicinoje. Purvonioms jis yra tinkamesnis negu durpės, kadangi yra biologiškai aktyvesnis ir sterilesnis. Sapropelis taip pat naudojamas biokuro gamybai, kaip rišamoji sudėtinė briketų arba granulių dalis, maišant jį su kitu biokuru (Торф и сапропель... 2004; Косов, Беяков 2004; Косов 2007a). Sapropelį galima labai plačiai panaudoti kaip (1.7 pav.):

- gydomąją priemonę augalams, gyvūnams bei žmonėms;
- purvą fizioterapijai ir gydomosios kosmetikos procedūroms;

- biologiškai aktyvų vitaminų ir mineralų priedą, stimuliuojantį fiziologinius procesus, augimą, produktyvumą ir dauginimąsi, taip pat kaip profilaktinę priemonę gyvulininkystės ir žuvininkystės srityje;
- baktericidinę medžiagą, ne tik gausinančią, bet ir apsaugančią derlių nuo kenkėjų, gerinančią sėklos kokybę, užtikrinančią sveikų daigų vystymąsi;
- efektyvią organinę trąšą, ilgam laikui praturtinančią bet kokią dirvą naudingų mineralinių ir organinių medžiagų;
- žaliavą ekologiškai švarioms statybinėms medžiagoms gaminti, gręžimo instrumentams tepti (Katkevičius *et al.* 1998);
- žaliavą (rišiklį) biokuro gamybai (Бракш 1971; Безруких *et al.* 2002; Косов, Беляков 2004; Петрова *et al.* 2007; Косов 2007a; Nikolaeva *et al.* 2009; Николаева 2011).



1.7 pav. Sapropelio panaudojimo galimybės (Katkevičius *et al.* 1998; Косов 2007a)

Fig. 1.7. Possibility of sapropels usability (Katkevičius *et al.* 1998; Косов 2007a)

Tokias dideles sapropelio naudojimo galimybes lemia unikalūs jį sudarančių medžiagų santykis. Sapropelio taikymo galimybės yra daug geresnės perdirbus jį termiškai arba paveikus cheminiais reagentais, nes išryškėja jo hidrofobinės savybės, kurias lemia aukštesnėje temperatūroje (≥ 140 °C) besilydantis vaškas ir bitumas (Žvironaitė *et al.* 2002). Sapropelis naudojamas ne tik kaip klįjuojamoji ar rišamoji medžiaga, bet, chemiškai jį perdirbus, gaunama įvairių cheminių produktų, tokių kaip koksas, metilo spiritas, acto rūgštis, amoniakinis vanduo, įvairaus tipo aliejai (lengvieji, vidutiniai ir sunkieji), benzinas, žibalas, mašinų tepalas, parafino alyva, lakas ir kt. (Плаксин, Кривонос 2007; Косов 2007a).

Atlikus išsamią literatūros šaltinių analizę, buvo įvertinta galimybė gaminti iš sapropelio biodyzeliną, o geriausiai tinkantis tam metodas – tai Fišerio–Tropšo sintezė.

Fišerio–Tropšo sintezė – tai pramoninis skystų ir kietų angliavandenilių gamybos iš anglies monoksido ir vandenilio dujų metodas, naudojant metalinius katalizatorius. Jį sukūrė ir 1925 m. užpatentavo vokiečių chemikai Francas Fišeris (*Franz Fischer*) ir Hansas Tropšas (*Hanz Tropsch*). Gautus skystus angliavandenilius galima naudoti kaip degalus, kieti angliavandeniliai yra itin švelnūs ir naudojami kaip žaliava chemijos arba farmacijos pramonėje. Šio metodo sukūrimo tikslas buvo vis didėjantis tuo metu vidaus degimo variklių naudojimas ir noras turėti nepriklausomą degalų ir žaliavų šaltinį chemijos pramonei. Reikalingas mišinys iš anglies monoksido ir vandenilio – vadinamosios sintezės dujos buvo gaunamos iš kokso ar anglies (Slavinskas 2007).

Degalų gamybos iš anglies idėjos šiandien vėl atgimsta, tokias gamyklas planuoja statyti šalyse, kuriose yra didelės akmens anglies atsargos: JAV, Kinija ir kitos (Synteza Fischera... 2008). Griežtėjantys reikalavimai variklių išmetamųjų deginių toksiškumui verčia toliau tobulinti ne tik variklius, bet ir degalus. Šiandien yra neišvengiamas optimalus variklio ir degalų tarpusavio pritaikymas. Variklių konstruktoriai į degalus jau žiūri kaip į konstrukcinį elementą, kuris turi būti kuriamas kartu su varikliu.

Sapropelio panaudojimas medicinoje ir kosmetologijoje

Sapropelis – tai unikalus gamtinis junginys, jau daug metų naudojamas kosmetologijoje, jis šalina sudribimą, lėtina odos senėjimo procesą, aprūpina odą energija, greitina regeneraciją, stimuliuoja jauno kolageno sintezę, turi vitaminų ir nepakeičiamų aminorūgščių (Лопотко, Евдокимова 1986; Косов 2007a). Daugelis užsienio parfumerijos bei kosmetikos įmonių gaminius, kurių sudėtyje yra sapropelis, vadina XXI amžiaus kosmetika.

Sapropelis labai intensyviai naudojamas Latvijoje, Rusijoje, Baltarusijoje ir Ukrainoje kosmetikos pramonėje – iš jo gaminamas muilas, balzamai, purvo kaukės, net dantų pastos (Бракш 1971; Лопотко, Евдокимова 1986; Кирейчева, Хохлова 1998; Юдина *et al.* 1998; Косов 2007a). Sapropelio panaudojimas kosmetikos tikslams yra gana platus: jis naudojamas bendrai odos būklei gerinti, odai maitinti ir jos poroms mažinti, be to, jis baltina odą, šalina strazdanas, naikina pigmentines dėmes, išlygina nelygias nudegimo zonas, stiprina nagus ir plaukus.

Medicininėje kosmetologijoje sapropelis naudojamas gydomiesiems tikslams, pvz., procedūrų metu iš organizmo šalinamos susikaupusios kenksmingos medžiagos, šlakai, taip pat gerėja kraujotaka, nes oda iš sapropelio pasisavina biologiškai aktyvius mikroelementus. Lietuvoje tokios gydomosios procedūros plačiai naudojamos sanatorijose.

Sapropelio panaudojimas žemės ūkyje

Užsienio šalių, tokių kaip Rusija, Baltarusija, Ukraina bei Lenkija, mokslininkų teigimu, sapropelis – tai ekologiška trąša, tinkama visiems žemės ūkio augalams tręšti (Мярикянов *et al.* 1991; Лопотко *et al.* 1992; Кирейчева, Хохлова 1998; Карабанов *et al.* 2003; Żak, Ossowski 2003; Miś 2005; Добрецов 2005; Косов 2007a; Czamara A., Czamara W. 2008; Baran *et al.* 2009; Ciesielczuk *et al.* 2011). Šių šalių mokslininkų atlikti agrocheminiai tręšimo sapropeliu tyrimai rodo, kad jis labai veiksmingai didina augalų derlių, be to, išauginama kokybiška produkcija. Vienaime grame sapropelio priskaičiuojama iki 1,5 milijardo bakterijų kolonijų, tuo tarpu paprastame komposte jų randama iki 0,4 milijardų, o mėšle tik 150–350 mln. Sapropelis – nepakeičiamas vystant netradicinius verslus kaime, pvz., tokius kaip grybų, sraigių, sliėkų auginimas. Akivaizdus sapropelio, kaip trąšų, poveikis vaismedžiams bei gėlėms: gaunamas ankstyvesnis derlius, iki 1,5 karto padidinamas dirvos derlingumas, gaunama ekologiškai švari žemės ūkio produkcija, vaismedžių ir vynuogių vaisiuose 14 % padidėja cukringumas. Jis atgaivina skurstančius augalus, iš jų ir daržoves, stimuliuoja daigų augimą ir didina augalų derlingumą iki 40 %. Be to, jis ne tik atgaivina dirvą, bet ir panaikina joje kenksmingus junginius, apsaugo augalus nuo ligų, sumažina radioaktyviųjų medžiagų, sunkiųjų metalų, nitratų patekimą į augalus. Kaip trąša sapropelis lėtai mineralizuojasi, jo poveikis jaučiamas 5 metus, o humusiniai sapropelio junginiai suteikia dirvai juodžemio savybių.

Lenkijos mokslininkų tyrimų duomenimis, sapropelis patikimai padidina ridikėlių, salotų, pomidorų ir paprikos derlių. Pvz., pastebėtas padidėjęs Mg kiekis paprikoje, Ca kiekis salotose bei K, Mg ir Ca kiekis pomidorų vaisiuose (Kostecki, Kowalski 2007; Baran *et al.* 2009). Rusijos mokslininkų bandymų duomenimis, dirvožemį, kuriame augo paprika, patręšus 3 t/ha sapropeliu, paprikos derlius padidėjo net 85 %. Pvz., sausųjų medžiagų ir cukraus vaisiuose buvo iki 14 % daugiau nei kontrolinių bandinių. Papriką patręšus 150 g/augalui, paprikos vaisiuose nitratų sumažėjo iki 34,5 %. Sapropelis didina žemės ūkio augalų imunitetą, gerina augimą ir vystymąsi, mažina užsikrėtimą ligomis ir kenkėjais (Мярикянов *et al.* 1991; Kireicheva, Khokhlova 2000). Buvo atlikta nemažai bandymų tiriant sapropelio įtaką daržovėms. Naudojant sapropelį galima žymiai pagerinti dirvožemio derlingumą, sumažinti nitratų patekimą į žmogaus organizmą.

Latvijos, Ukrainos, Baltarusijos ir Rusijos mokslininkų darbai įrodė, jog sapropeliu galima šerti kiaules, galvijus, paukščius. Gardino žemės ūkio institute nustatyta, jog gavusių sapropelio paršelių žinduklių produktyvumas padidėjo 7,8 %, o ėriukų – 25 %, ypač sapropelis stimuliuavo 2–4 mėn. amžiaus paršelius. Mažiausias šio pašaro poveikis – 0–2 mėn. amžiaus paršeliams. Pasak tyrėjų, sapropelio priedai leidžia sumažinti pašarų sąnaudas, pagerinti kai ku-

riuos morfologinius ir biocheminius kraujo rodiklius, pagerinti mėsos kokybę (Бракш 1971; Малашкайте 1962; Лопотко, Евдокимова 1986; Мрякянов *et al.* 1991; Добрецов 2005).

Ežerų dumblė gali būti įvairių medžiagų, netgi gyvuliams nuodingų, todėl sapropelį reikia nuodugniai ištirti. Ežere esantis natūralus sapropelis yra labai drėgnas. Paviršiniuose sluoksniuose drėgnis yra didesnis, o gilesniuose sluoksniuose, veikiant viršutiniųjų sluoksnių svoriui ir drėgniui palaipsniui mažėjant, sapropelis darosi tankesnis (Лопотко 1974; Кирейчева, Khokhlova 2000; Modrzejewski 2005; Штин 2005; Николаева 2011).

1.6. Sapropelio panaudojimas biokuro gamybai

Pagal formą kietasis kuras gali būti malkų, drožlių, pjuvenų, ryšulių, briketų, granulių bei miltų pavidalo. Vertinant energetinį biomasės potencialą iki šiol didžiausias dėmesys buvo skiriamas medienos kurui bei biodegalams (Šateikis 2006; Yoshioka *et al.* 2006; Zhou, Zhang 2007), tačiau dabartiniu metu ieškoma galimybių naudoti kitus atsinaujinančiuosius energijos šaltinius, iš kurių vienas gali būti sapropelis.

Briketai su sapropelio rišikliu turi ekologiškai subalansuotą organinę sudėtį ir kartais nežymius kiekius kenksmingų medžiagų (Гамаюнов *et al.* 2002; Добрецов 2005; Штин 2005). Degimo metu susidarantys teršalai yra nekenksmingi aplinkai, o pelenai gali būti naudojami tręšimui. Pelenų kiekis, kuris sudaro deginant briketus su sapropeliu, yra ženkliai mažesnis, negu deginant plačiai paplitusias medžio anglis (Кирейчева, Хохлова 1998; Безруких *et al.* 2002; Косов, Беляков 2004; Cuiping *et al.* 2004).

Didelį dėmesį Baltarusijoje ir Rusijoje skiriama sapropelio panaudojimui briketams ir granulėms gaminti. Baltarusijos durpių institutas ne tik plačiai tyrė sapropelį, bet ir paruošė jo klasifikaciją, kurioje sapropelis suskirstytas į grupes: mažai peleningas (organinis), turintis iki 30 % pelenų, labai peleningas (30–85 % pelenų). Labai peleningas, atsižvelgiant į pelenų sudėtį, skirstomas į silicinį – vyrauja silicis, karbonatinį – vyrauja karbonatai ir mišrųjį, turintį vienodą kiekį kalcio ir silicio oksidų (Лопотко 1974; Bakšienė, Janušienė 2005). Rusijos mokslininkų tyrimai parodė, jog organinis sapropelis mišinyje su pjuvenomis arba durpėmis – tai perspektyvus ateities energetikos sektoriaus produktas. Formuojant sapropelio ir pjuvenų briketus arba granules, svarbus ir neatsiejamas faktorius yra organinės dalies kiekis sapropelyje, taip pat jo drėgnis – rekomenduotinas drėgmės kiekis sapropelyje yra 78–82 %. Mokslininkai briketų ir granulių gamybai su sapropelio rišikliu naudoja tas pačias technologijas ir įrengimus kaip ir briketų arba granulių gamybai iš durpių (Кирейчева, Хохлова 1998; Косов 2007a).

Sapropelio ir durpių briketus bei granules pirmieji pradėjo gaminti bei analizuoti Rusijos mokslininkai dar 1965 metais. Atlikti tyrimai parodė, jog maišant tam tikru santykiu sapropelį ir durpes / arba medžio pjuvenas, gaunami geresnės kokybės briketai, t. y. padidėja jų atsparumas gniuždymui ir lenkimui (svarbi briketų savybė transportavimo metu), padidėja šiluminė vertė, taip pat tokių briketų degimo procesas vyksta ilgiau nei įprastinių briketų (Косов, Беяков 2004; Косов 2007a; Петрова *et al.* 2007; Мисников *et al.* 2008; Николаева 2011).

Drėgmės kiekis sapropelyje gaminant granules gali būti mažesnis negu gaminant briketus. Mokslininkai nurodo, jog 52–60 % drėgmės kiekis yra pakankamas ir patenkinamas, tačiau rekomenduoja sapropelį maišyti su pjuvenomis, drožlėmis arba medžio atraižomis, tokiu būdu gerinant jo, kaip biokuro, kokybę (Бракш 1971; Косов 2007a).

Sapropelio ir įvairių priedų briketai ir granulės turi didelę šiluminę vertę, kadangi degimo proceso metu išsiskiria mažesnės teršalų koncentracijos nei deginant akmens anglį, taip pat būdingas mažas pelenų kiekis (Мярикянов *et al.* 1991; Николаева 2011).

Rusijos mokslininkai nustatė, jog, pašalinus iš sapropelio vandens perteklių, dėl savo koloidinės struktūros jis turi labai geras sorbcines savybes. Sapropelis turi gebėjimą surišti arba suklijuoti kitas medžiagas (maltus spalius, durpes, pjuvenas), todėl buvo pagaminti briketai, kuriuose organinio sapropelio kiekis siekė 10 %, deguto – 15 % ir medžio anglies – 75 %. Šios sudėties briketams buvo atlikti medžiagos atsparumo, lenkimo ir peleningumo tyrimai, lakiųjų medžiagų kiekių, bendrosios sieros ir vandenilio kiekių analizės, drėgnumo, taip pat šiluminės vertės tyrimai. Teoriniai ir eksperimentiniai tyrimų rezultatai parodė, jog naudojant net nedidelį sapropelio (10 %), kaip rišamosios medžiagos, kiekį gaunamas aukštos kokybės biokuras (Петрова *et al.* 2007).

Nustatyta, jog sapropelio naudojimas briketams / granulėms kai kuriais atvejais gali padėti taupyti kitus energetinius išteklius. Tokių briketų degimo procesas vyksta ilgiau nei įprastinių briketų, kadangi sapropelis intensyvina degimo procesą.

Lietuvoje iki šiol nėra paruošta standartų bei techninių specifikacijų, reglamentuojančių biokuro kokybę, tačiau kai kurios šalys (Austrija, Vokietija, Švedija, JAV *et al.*) turi paruošę savo nacionalinius standartus, reglamentuojančius kietojo biokuro terminiją, kokybės parametrus, ėminių atrankos bei analizės metodus. Šios šalys yra priėmusios techninius briketų ir granulių kokybės standartus, nors atskirų šalių kokybės standartai ne visiškai sutampa, tačiau pagrindiniai normose nustatyti parametrai yra beveik tie patys. Kitos šalys, iš jų ir tokios, kuriose yra gerai išplėtos granulių kuro rinkos (pvz., Danija ir Suomija), yra nusprendusios palaukti, kol įsigalios bendrieji Europos Sąjungos standartai. Austrijoje galiojantys standartai ÖNORM M7135 reglamentuoja tiek granulių, tiek briketų gamybą. Švedijos standartas SS 187120 yra skirtas granulių kokybės

reglamentavimui, kai tuo tarpu standartas SS 187121 aprašo briketų kokybės reikalavimus. Vokietijoje galiojantis standartas DIN 51731, kaip ir Austrijoje, nusako reikalavimus granulėms ir briketams. Pasiūlymai bendrajam Europos Sąjungos šalių standartui pateikti atliktoje ataskaitoje CEN/TC 14961, o konkrečiai – Priede A (Liubarskis 2006; Biekša *et al.* 2007).

Pagrindiniai parametrai, kuriuos reglamentuoja išvardyti standartai, yra:

Briketų/granulių dydis – parametras, kuris veikia kuro transportavimo ir tiekimą į degimo kamerą įrangos pasirinkimą. Kuro elementų dydis veikia ir patį degimo procesą. Vienodos formos ir dydžio kuro elementai leido išvystyti automatizuotą biokuro panaudojimą energetiniams tikslams. Santykinai mažas *briketų / granulių piltinis tankis* neigiamai veikia energetinę briketų ir granulių vertę ir didina kuro transportavimo ir saugojimo išlaidas. Kuo didesnis *briketų / granulių tankis*, tuo ilgiau briketai arba granulės dega. *Briketų / granulių šiurkštumas*, t. y. nelygus kuro elementų paviršius (daug briaunų, atplaišų, šerpetų) mažina automatizuoto katilo kuro tiekimo sistemos patikimumą. Taip pat dėl esančių šerpetų didėja dulkių išlakos degimo metu. *Drėgnis* veikia energetinę briketų ir granulių vertę, degimo proceso efektyvumą ir temperatūrą, kuri pasiekama degimo proceso metu. *Peleningumas* yra labiausiai nepageidaujamas individualių gyvenamųjų namų šilumos tiekimo sektoriuje. Tai pirmiausia yra susiję su padidėjusia būtinybe periodiškai šalinti susidariusius pelenus. Didelis kuro peleningumas taip pat didina šlako, kietųjų nuogulų susiformavimo galimybę bei išmetamų dulkių kiekius. Didesnis kuro peleningumas yra leistinas dideliems energetiniams projektams dėl jų geresnio degimo proceso ir juose įrengtų išlakų valymo įrenginių (jei tokie yra sumontuoti). Kuo didesnė *energetinė kuro vertė*, tuo labiau sumažinamos transportavimo ir saugojimo sąnaudos. *Azoto kiekiai briketuose / granulėse* yra ribojami siekiant išvengti draudžiamų medžiagų naudojimo biokuro gamybai ir didesnių azoto oksidų emisijų. *Sieros ir chloro kiekiai briketuose / granulėse* dažniausiai didėja naudojant įvairius priedus arba, pvz., medienos atliekas, padengtas klijais, lakais ar kitomis cheminėmis medžiagomis. Sieros ir chloro kiekiai kure yra ribojami dėl neigiamos jų junginių įtakos degimo procesui, padidėjusių kietųjų nuogulų ir koroziją skatinančių medžiagų susidarymo tikimybės. *Kalio kiekis kure* yra svarbus dėl jo įtakos pelenų dūlėjimo ir aerosolių susidarymo procesams. Padidėjęs kalio kiekis kure sumažina pelenų dūlėjimo spartą ir dėl to gali pradėti formuotis šlakas arba kietosios nuogulos degimo kameroje. Taip pat padidėjusi kalio koncentracija didina degimo metu susiformavusių aerosolių kiekį, taip užteršiant katilus (Janulis *et al.* 2006; Medienos briketų... 2008).

Kiekvienu atskiru gamybos atveju briketų sudėtis priklauso nuo šių medžiagos rodiklių: drėgnio, frakcijos dydžio, žaliavų kaupimo vietos, priedų (pjuvenos, šiaudai, durpės) kiekio, gaminant briketus su sapropelio rišikliu, žaliavų teikimo organizavimo sąlygų, paruoštos produkcijos įpakavimo ir sandėliavimo vietos.

Biokuro degieji elementai yra anglis (C), vandenilis (H) ir siera (S). Su šiais elementais jungiasi deguonis (O) ir azotas (N), sudarydami vidinį kuro balansą. Kure taip pat yra drėgmės (M) ir mineralinių medžiagų, kurios, sudegus kurui, virsta pelenais (A). Toks kuras, koks patenka vartotojui, vadinamas naudojamuoju kuru, o jo masė – naudojamoji masė. Iš kuro pašalinus drėgmę lieka sausoji masė. Sudeginus sausąją kuro masę lieka pelenai.

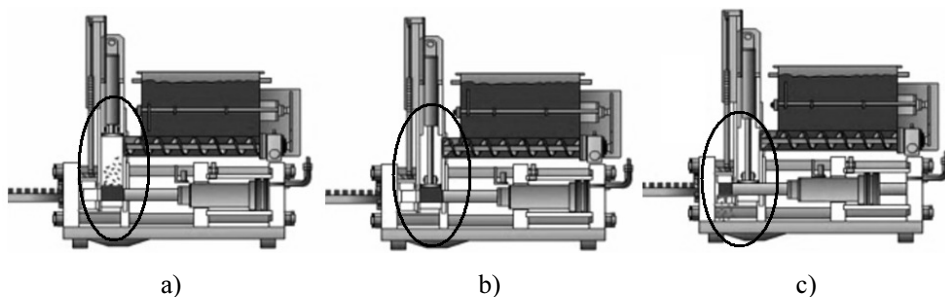
Kuro naudojamosios masės cheminę sudėtį galima išreikšti taip:

$$C^n + H^n + S^n + O^n + N^n + A^n + M^n = 100\% \quad (1.1)$$

Kuro degiosios masės cheminė sudėtis, pašalinus drėgmę ir pelenus, užrašoma taip:

$$C^d + H^d + S^d + O^d + N^d = 100\% \quad (1.2)$$

Kadangi azotas ir siera yra cheminiuose junginiuose su degiaisiais anglies, vandenilio ir sieros elementais, todėl jie yra sausosios ir degiosios kuro masės sudėties lygtyse (Liubarskis 2006). Iškastinis kuras naudojamas jau nuo neatmenamų laikų, vos žmogui išmokus naudotis ugnimi, todėl biomasės deginimą pagrįstai galima laikyti ne tik pirmuoju energijos gamybos būdu, bet ir pirmuoju gerokai aplinką veikiančiu antropogeniniu procesu (Budrys 2007; Higgins *et al.* 2010; Wilk, Magdziarz 2010). Sapropelio ir priedų briketus galima būtų gaminti ir automatizuotai (1.8 pav.).



1.8 pav. Briketų technologinės linijos schema: a) mišinio tiekimas į cilindrą; b) mišinio spaudimas; c) vandens išspaudimas ir briketo formavimas (Brykieciarki hidrauliczne... 2006)

Fig. 1.8. The scheme of briquettes technology line: a) the supply of the mixture into the cylinder, b) the mixture pressure; c) the water extrusion and briquette formation (Brykieciarki hidrauliczne... 2006)

Gamybos principas: drėgna masė, skirta briketavimui, sraigtiniu transportu tiekama į priėmimo bunkerį, iš jo keliauja į briketavimo cilindro formos talpą, kur vertikalusis strypas pradeda spaudimo etapą nuo viršaus, tada horizonta-

lusis strypas pradeda spaudimą iš šono. Spaudimo metu iš drėgnos masės išspaudžiamas vandens perteklius, o norint gauti daugiau arba mažiau suspaustus briketus, reikia nustatyti atitinkamą spaudimo slėgį mechanizme, tokiu būdu gaminamas pageidaujamo dydžio briketas. Pagamintas briketas juostiniu transporteriu keliauja į džiovyklą arba gali būti paliktas džiūti natūralioje aplinkoje.

Katilinėse vietose naftos produktų ir kitų rūšių kuro naudojant sapropelio briketus / granules, pasiekiamas teigiamas aplinkosauginis efektas, nes į atmosferą išmetama mažiau sieros ir azoto oksidų (pvz., akmens anglį pakeitus mediena, šių teršalų sumažėja dvigubai) (Pedišius 2001; Miszczyk, Darowicki 2002; Zielińska, Wojnowska-Baryła 2004). Deginant sapropelį, susidarantys pelenai nėra pavojingos atliekos ir netgi gali būti panaudoti žemės ūkyje ir miškuose kaip trąšos.

Sapropelio briketams gaminti naudojami priedai

Analizuojant kuro rūšių panaudojimą, matyti, jog kiekviena iš jų turi savo privalumų ir trūkumų. Sapropelis yra perspektyvi, užtikrinanti mažesnę energetinę priklausomybę nuo užsienio šalių bei mažinanti aplinkos taršą, vietinio kuro rūšis. Tokio biokuro, kaip sapropelis, naudojimas turi būti plačiai siejamas su tolesne šilumos gamyba.

Lietuvoje nuo seno pagrindinis kuro šaltinis buvo mediena. Ji dažniausiai buvo naudojama kurui. Tai lėmė kelios priežastys: mediena pasižymi gera energetine verte (degiosios medžiagos – vandenilis ir anglis – sudaro 54–58 % sausos masės), ją patogu transportuoti ir laikyti (sandėliuoti). Danijoje, Švedijoje, Suomijoje ir Vokietijoje šiaudų ir žolių biomase kaimo vietovėse šildomos patalpos bei tenkinami kiti buitiniai-ūkiniai poreikiai (Povilaitis *et al.* 2006; Kvasauskas, Baltrėnas 2009). Nedideliais kiekiais briketai ir granulės gaminami iš įvairių biomasės žaliavų – šiaudų, durpių, spalių ir pan. Didžioji dalis medienos briketų ir per 90 % granulių iš Lietuvos eksportuojama į Skandinavijos šalis, Vokietiją ir Didžiąją Britaniją, kadangi šios šalys skatina natūralaus biokuro vidaus rinkoje naudojimą. Pasaulyje daugiau kaip 13 % pirminės energijos poreikių tenkinama naudojant atsinaujinančiuosius energijos šaltinius, kurių didžiąją dalį (apie 80 %) sudaro biomasė. Europos Komisija siekia, kad ES šalyse iki 2020 m. ne mažiau kaip 20 % energijos būtų pagaminta, naudojant atsinaujinančiuosius energijos šaltinius (LST TK 71... 2008).

Ypač pigios medžio atliekų rūšys – tai *pjuvenos ir drožlės*. Paprastai šios medžio atliekos dėl technologinių kūryklų apribojimų naudojamos tik nedideliais kiekiais įmaišomos į bendrą medžio atliekų kuro masę, todėl šį priedą siūloma naudoti ir sapropelio briketų gamybai. Pjuvenos ir drožlės puikiai tinka briketams bei granulėms gaminti (Medžio atliekų... 2005; Gimbutaitė, Venckus 2008). Smulkintos medienos priedas padidina iš biomasės pagamintų granulių ir briketų kokybę. Jų smulkinimas technologiniu požiūriu nesudaro problemų, ta-

čia labai didina energijos sąnaudas ir gamybos išlaidas, todėl geriausia naudoti medienos perdirbimo įmonės atliekas. Pagrindinė briketų bei granulių gamybos problema yra žaliavos drėgmė. Drėgnas pjuvenas ir drožles rekomenduotina maišyti su kitomis biokuro rūšimis (durpės, sapropelis, šiaudai) – tai yra vienas iš būdų gaminti kokybiškus briketus ir granules. Briketų ir granulių kokybei pagerinti gali būti naudojamos įvairios rišamosios medžiagos. Aplinkosauginiu ir ekologiniu požiūriu reikėtų orientuotis į sapropelio, durpių arba augalinės kilmės medžiagas.

Sausų medienos pjuvenų bei drožlių šiluminė vertė yra apie 16,0–19,0 MJ/kg. Energijos kiekis, išsiskiriantis iš vieno kilogramo medienos pjuvenų, beveik lygus kiekiui, išsiskyrusiam iš pusės litro skysto kuro degalų (dyzelino). Po deginimo likę pelenai gali būti naudojami kaip trąšos ir yra lengvai pašalinami, kadangi pelenai sudaro tik 1,5 % pjuvenų bei drožlių kuro masės. Šiuolaikiniuose katiluose pelenai šalinami vos kartą per mėnesį.

Vietinio kuro išteklį dalis bendrojo kuro balanso atžvilgiu kasmet auga, tačiau vietinio kuro rūšių indėlis energetikoje nevienodas ir jo naudojimo tendencijos skirtingos. Pastaruoju metu sumažėjo durpių ir durpių briketų suvartojimas (Medienos kuro... 2001). *Durpės* – tai vietinis kuro šaltinis, kuris, maišomas į biomasę, žymiai pagerina jos energetines savybes. Durpės energijos gamyboje gali būti naudojamos ir kaip apdorotas produktas – durpių granulės. Planuojama, kad durpės ateityje sudarys ne mažiau kaip 30 % visų katilinėse deginamų biokuro rūšių.

Svarbiausios durpių savybės yra kaitrumas, šiluminė kuro vertė (kaloringumas), drėgnumas. Durpių kuro savybės priklauso ne tik nuo durpių susiskaidymo, rūšies, telkinio tipo, bet ir nuo ruošimo ir sandėliavimo sąlygų. Durpių sudėtyje yra anglies (52–65 %) ir deguonies (26–36 %). Nedidelę dalį sudaro vandenilis (5–6 %), azotas (0,6–2,3 %) ir siera (0,1–1,5 %). Durpių užsiliepsnojimo temperatūra siekia 225°C, pradinė durpių kuro lakiųjų medžiagų išsiskyrimo temperatūra yra 100–110 °C. Durpių kuro peleningumas gali siekti apie 6 %. Durpių kuro šiluminė vertė (kaloringumas) priklauso ir nuo durpių susiskaidymo laipsnio. Vidutinis dydis siekia artimą medienai apie 20 MJ/kg. Durpių briketų energinė vertė lygi 4,7 MWh/t arba 16,7 MJ/kg, drėgnis siekia 16,4 % (Гамаюнов *et al.* 2002; Parent, Ilnicki 2003; Косов 2007b; Мисников *et al.* 2008). Durpes siūloma naudoti ir gaminant sapropelio briketus, nes jos yra sausos ir turi mažą drėgmės kiekį, o kadangi sapropelis turi sukaupęs didelį drėgmės kiekį savyje, todėl pagamintas briketas greitai ir gerai džiūti.

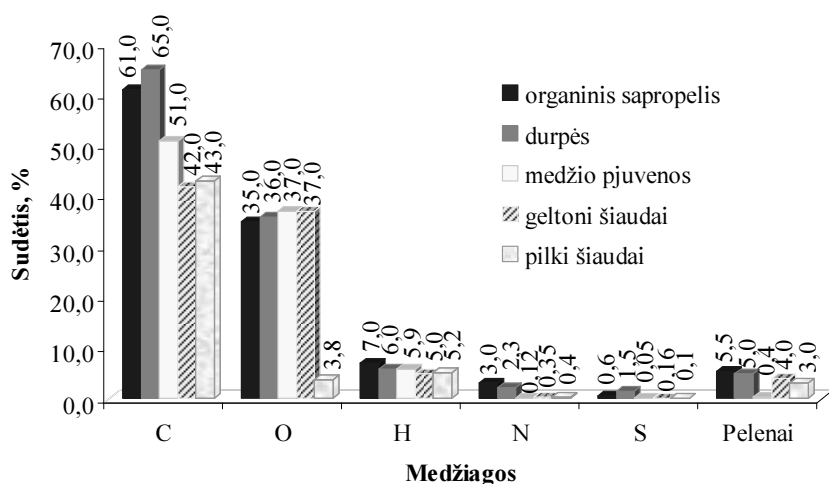
Šiaudai yra šalutinis grūdų gamybos produktas. Šiaudų kiekį lemia javų pasėlių plotai, derlingumas, biologinės augalų savybės ir agrotechnika. Lietuvoje kasmet javais apsėjama apie 1 mln. ha ir prikuliama vidutiniškai po 2,7–3,2 t/ha grūdų. Apie šiaudų kiekį statistinių duomenų nėra, tačiau jį apytikriai galima apskaičiuoti pagal grūdų ir šiaudų santykį. Šiaudai – tai vietinis energijos šalti-

nis, kuris turi didžiulį ateities potencialą. Lietuvoje susidaro daugiau nei 3 mln. tonų šiaudų, tačiau tik nedidelė jų dalis naudojama energijos gamybai (Atsinaujinančių energijos... 2009). Įvairių rūšių šiaudai dega skirtingai. Vieni sudega staigiai, beveik nepalikdami pelenų, kiti dega lėtai. Degimo procesas priklauso nuo cheminės šiaudų sudėties komponentų. Siekiant parinkti tinkamus šiaudus, būtina žinoti cheminę įvairios brandos biomasės sudėtį bei šiluminę vertę (Liubarskis 2006; Biekša *et al.* 2007). Šiaudų cheminę sudėtį ir šiluminę vertę lemia jų naudojimo laikas. Geltonųjų šiaudų, kurie yra surinkti iš karto po nupjovimo kombainu, ir pilkųjų šiaudų, kurie yra išlaikyti pradalgėse ir paveikti lietaus, elementinė sudėtis bei šiluminė vertė skiriasi. Pilkųjų šiaudų šiluminė vertė didesnė negu geltonųjų šiaudų. Geltonųjų šiaudų naudojamos masės žemutinioji šiluminė vertė sudaro 14,4 MJ/kg, o degiosios masės – 18,2 MJ/kg, pilkųjų šiaudų atitinkamai: 15,0 MJ/kg ir 18,7 MJ/kg. Įvairių šiaudų šiluminę vertę (kJ/kg) galima nustatyti pagal Mendelevjevo formulę, jeigu žinoma elementinė sudėtis:

$$Q_z = 339C + 1035H - 109(O-S) - 25W \quad (1.3)$$

Į formulę įeina degieji biokuro elementai: anglis (C), vandenilis (H), siera (S), deguonis (O) ir volframas (W) (Liubarskis 2006).

Briketams naudojamų komponentų ir organinio sapropelio elementinė sudėtis pateikta 1.9 pav. (Liubarskis 2006; Biekša *et al.* 2007; Kocob 2007a,b; Vares *et al.* 2007; Nakagawa *et al.* 2011)



1.9 pav. Briketų komponentų elementinė sudėtis (Liubarskis 2006; Biekša *et al.* 2007; Kocob 2007a,b; Vares *et al.* 2007; Nakagawa *et al.* 2011)

Fig. 1.9. The elemental composition of the briquettes components (Liubarskis 2006; Biekša *et al.* 2007; Kocob 2007a,b; Vares *et al.* 2007; Nakagawa *et al.* 2011)

Išsiplėtus medžio apdirbimo pramonei, pabrangus kietajam ir skystajam iškastiniam ir ekologiškai pavojingesniam kurui (mazutui, krosnių kurui, anglims), tiek didesnėse katilinėse, tiek mažo galingumo buitiniuose katiluose ar paprastose namų krosnyse sudeginama vis daugiau medienos, kurios nemažą dalį sudaro medienos atliekos (Revoldas, Denafas 2002; Čepanko, Baltrėnas 2007).

Sapropelį charakterizuoja degių elementų – anglies, vandenilio, sieros ir į junginių su šiais elementais, taip pat įeinančio deguonies bei azoto kiekis. Be degių elementų, sapropelyje yra nedidelis kiekis fosforo, kalio, natrio, chloro, silicio ir labai nedidelis kiekis elementų, kurie degimo metu sudaro pelenus, be to, sapropelyje visuomet būna tam tikras kiekis vandens.

Darbe siūloma naudoti sapropelio ir atitinkamų priedų mišinį (pjuvenos, šiaudai arba durpės) briketų gamybai. Tradicinis briketų deginimas krosnyse gali būti nesudėtingas ir neproblemiškas, esant nedidelėms energijos gamybos apimtims. Nors sapropelio išgavimas yra brangus ir, kai kurių mokslininkų teigimu, jis nėra energinė žaliava, tačiau jo naudojimas išskirtiniais atvejais gali padėti taupyti energijos išteklius. Gaminant sapropelio briketus atsiranda papildomų išlaidų, susijusių su jų džioviniu ir suspaudimu – tai padidina šio kuro kainą, tačiau akivaizdu, kad šio tipo biokuras turi daugiau privalumų nei trūkumų.

1.7. Užsienio šalių patirtis naudojant sapropelį energetikoje

Baltarusijos mokslininko M. Z. Lopotko (Лопотко 1974; Лопотко *et al.* 1992) ir jo tyrėjų grupės atlikti sapropelio tyrimai parodė, jog jis yra gausiai praturtintas fiziologiškai aktyvių medžiagų (vitaminai, amino rūgštys), todėl jį patariama naudoti kaip pašarinį priedą. Pašariniai priedai gaminami granulių arba miltelių pavidalu. Atlikdami tolesnius sapropelio tyrimus jie nustatė, jog pagamintas sapropelio ir pjuvenų granules galima naudoti ne tik pašarams, bet ir deginimui, tokiu būdu taupant kitus senkančius energetinius išteklius (Лопотко *et al.* 1992).

Rusijos mokslininkas V. I. Kosovas (Косов) savo patente (RU2255955) siūlo naudoti sapropelio, durpių ir medžio atliekų mišinius buitinio biokuro gamybai. Jis užpatentavo 25–35 mm skersmens ir 40–60 mm ilgio briketus. Briketų mišinys sudaromas iš medienos atliekų ir akmens anglių miltelių (dalelių), kurie iš anksto buvo įmirkyti dyzeliniuose degaluose arba degioje skalūnų alyvoje, t. y. 40–65 % durpių bei 85–94 % drėgnio sapropelio. Sapropelyje dėl jo koloidinės struktūros po džiovavimo padidėjo priedų tarpusavio sąveika ir jis atlieka „klijų“ vaidmenį. Be to, briketų masėje esantis sapropelis 1,5 karto pagerintina džiovimo intensyvumą. Tokiu būdu pagaminti briketai su ženkliai pagerintomis kokybės charakteristikomis sumažina kenksmingų medžiagų išmetimus į aplinką (Косов, Беляков 2004).

Švedų mokslininko P. Börjessono atlikti tyrimai parodė, kad sapropeliu patręštos dirvos ir pasodinti energetiniai miškai gali pagerinti aplinkos kokybę. Šie energetiniai miškai greičiau auga, o sapropelis pagerina ir pagreitina augimo procesą. Šiltnamio dujų išmetimą galimą sumažinti pakeitus įprastinį kurą energetiniu kuru – taip sumažėtų anglies dioksido patekimas į atmosferą. Maistingųjų medžiagų išplovimas iš dirvožemio gali būti sumažintas naudojant kaip apsaugines juostas energetinių augalų kultūras. Auginant energetinius miškus gali būti naudojamas buitinių nuotekų dumblas, tačiau geriausiai tinkamas yra sapropelis, nes tokiu būdu padidinama auginamo miško biomasė. Nustatyta, kad auginant trumpos rotacijos miškus buvo padidinta ir biologinė įvairovė, o tokie miškai teikia visapusišką naudą žmogui ir aplinkai (Börjesson 2000).

Latvijoje sapropelio tyrimams buvo skiriama mažiau dėmesio. N. A. Brakšas (Бракш) savo darbuose tyrinėjo sapropelio nuosėdas ir jų panaudojimo galimybes, sapropelio užterštumą sunkiaisiais metalais ir kitais pavojingais cheminiais elementais. Visi šio mokslininko tyrimai parodė, kad dėl savo mikroelementinės sudėties ir koloidinės struktūros sapropelis yra tinkamas naudoti tręšimui, taip pat jis gali būti kaip papildas pašarams, be to, jis gali būti panaudotas granulijų gamyboje kaip medžiagų sukibimą gerinantis priedas (Бракш 1971).

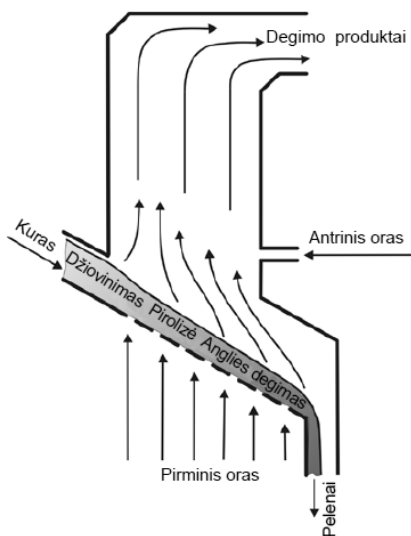
Lenkijos mokslininkai eksperimentų metu įrodė gluosnių auginimo ant sapropelio tirpalo efektyvumą. Taip pat du dešimtmečius vykdomais moksliniais tyrimais augalų mitybos srityje buvo įrodyta, kad gluosniai turi gebėjimą veiksmingai įsisavinti tiek makro, tiek mikro maistines medžiagas, kurios ir atspindi didelį jų produktyvumą. Tokiu būdu jie siekė įrodyti dvejopą naudojimo naudą tiek aplinkai (pvz., mažesnę oro taršą), tiek ekonomikai (vertinant valymo ir kuro gamybą) (Gierasimczuk *et al.* 2009).

Vokietijoje atlikti tyrimai parodė, kad net neturtingos sudėties žemėse puikiai auga trumpos rotacijos miškai, o tokių miškų geresniam augimui kaip trąša buvo naudojamas sapropelis. Tyrimas buvo atliktas kalnakasybos rajone – neturtingo substrato žemėje, kuriame buvo užsodinta 2,5 ha trumpos rotacijos miškų. Tyrimai parodė, kad antžeminės biomasės kiekiai po 4 metų svyravo nuo 5,3 iki 19,6 tonų sausųjų medžiagų vienam hektarui (Landberg, Greger 1996).

Sapropelio ir kitų rūšių biokuro deginimo technologijos

Pasaulyje ir Europos Sąjungos šalyse biožaliavų naudojimas dėl paprasto ir pigaus jų atliekų utilizavimo, lengvo suirimo gamtoje bei netoksiškumo yra visokeriopai skatinamas (Menzell *et al.* 2003; Cuiping *et al.* 2004; Zielińska, Wojnowska-Baryła 2004; Yoshioka *et al.* 2006; Zhou, Zhang 2007; Gierasimczuk *et al.* 2009; Wilk, Magdziarz 2010; Misz-Kennan, Fabiańska 2010). Lietuvos energetikos strategijoje vietiniai energijos šaltiniai laikomi prioritetine energetikos plėtros sritimi, tam tikslui numatoma naudoti biomasės išteklius, kurie tinka biokuro gamybai (Liubarskis 2006; Buinevičius, Puida 2005).

Daugelio rūšių kietojo kuro degimo ypatybės galima tyrinėti remiantis degimo ant ardyno pavyzdžiu, kur kai kurie procesai vyksta kuro sluoksnyje, o kiti – degimo kameroje. Ant ardyno vyksta tokie procesai (1.10 pav.): kai kuras patenka ant ardyno, tuomet kuro sluoksnio temperatūra pradeda kilti ir prasideda džiovinimo procesas. Kai kuro temperatūra pakyla iki 100–105 °C, išsiskiria lakiosios medžiagos (pirmiausia angliavandeniliai), dėl šio proceso kuro dalelės tampa akytos. Priklausomai nuo kuro rūšies, jis užsidega, esant 220–300 °C temperatūrai, pvz.: spygliuočių mediena – esant 220 °C temperatūrai, skietmedis – iki 300 °C, o sausi durpių su sapropeliu briketai – esant 230–300 °C. Anglies degimas baigiasi esant 800–900 °C temperatūrai ir pelenai nukrenta nuo ardyno.



1.10 pav. Drėgno biokuro degimas ant pasvirojo ardyno (Vares *et al.* 2007)

Fig. 1.10. Combustion of wet biofuel on the sloping grate (Vares *et al.* 2007)

Ant ardyno vykstančius procesus būtų galima suskirstyti į džiovinimą ir pirolizę, kurių metu sugerama šiluma, ir deginimą, kurio metu išsiskiria šiluma. Kadangi tarp kuro dalelių, esančių degimo ir džiovinimo zonose, tiesioginio sąlyčio nėra, džiovinimo zonoje ir viršutinėje pirolizės zonos dalyje kuro sluoksnis daugiausia kaista dėl spinduliavimo nuo liepsnos ir karštų kūryklos paviršių. Kuo drėgnesnis kuras, tuo daugiau šilumos reikia išdžiovinimui ir įkaitinimui iki užsiliepsnojimo, todėl, kai deginamas drėgnas kuras, kūrykloje neturi būti šilumą sugeriančių paviršių (t. y. santykinai šaltų paviršių) arba jų poveikis turi būti nereikšmingas.

Pastovi aukšta keraminių kūryklos sienelių temperatūra yra būtina tam, kad džiovinimo zona išliktų viršutiniojoje ardyno dalyje ir kad būtų užtikrintos geros

sąlygos kurui užsiliepsnoti. Deginant sausą kurą, gali būti reikalingas kūryklos sienelių aušinimas. Sausam kurui nereikia tiek daug šilumos džiovinimui, taigi dėl spinduliavimo nuo labai karštų paviršių ir liepsnos kuro sluoksnio temperatūra gali pakilti aukščiau pelenų minkštėjimo taško, dėl to pelenai gali pasidaryti lipnūs arba imti lydytis.

Dėl pelenų lydymosi vyksta ardyno šlakavimasis ir pro ardyną nebepraėina pirminis oras. Be to, keraminių paviršių temperatūra kūrykloje gali pakilti iki pavojingo lygio ir keramika gali pradėti lydytis, todėl dažniausiai kiekvienos kūryklos konstrukcijoje yra numatyta, kokio drėgnumo kuras joje bus deginamas.

Deginant biokurą (medieną, durpes, sapropelį) dėl didelio lakiųjų medžiagų kiekio didžioji dalis šilumos išsiskiria degimo kameroje, o ne kuro sluoksnyje. Lakiųjų medžiagų (pirolizės produktų) degimas kūryklos tūryje prasideda, esant 500–600 °C temperatūrai. Lakiosios medžiagos užsidega esant tam tikrai temperatūrai, be to, būtinas šviežias ir daug deguonies turintis oras. Oras, tiekiamas pro ardyno apačią, vadinamas pirminiu oru, o papildomas oras, reikalingas lakiųjų medžiagų degimui, vadinamas antriniu. Deginant kurą, kuriame yra didelis lakiųjų medžiagų kiekis (biokurą, durpes ir sapropelį), antrinio oro poreikis viršija pirminio oro poreikį (Švenčianas 2003; Šateikis 2006; Vares *et al.* 2007).

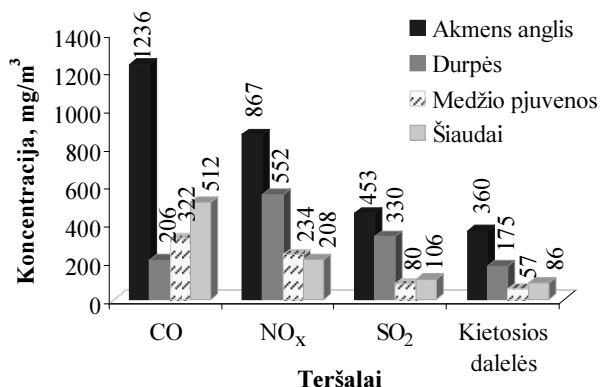
Deginimo proceso metu stengiamasi kiek įmanoma pilniau panaudoti tiekiamąją šiluminę kuro galią. Degimo šilumos nuostolių skaičiavimas paremtas degimo produktų (išmetamųjų dujų) analize. Praktiškai šilumos nuostoliai degimo metu nustatomi analizuojant degimo produktus. Pasitelkus matavimo rezultatus ir duomenis apie kuro savybes, galima lengvai apskaičiuoti ir pavaizduoti pagrindinius šilumos degimo metu nuostolius. Paprastai praktiškai galima neatšizvelgti į kitus mažesnius šilumos nuostolius. Ženkliausiais šilumos nuostoliais paprastai būna susiję su fizine degimo produktų šiluma nuostoliai, kurie priklauso nuo temperatūros ir oro pertekliaus koeficiento λ . Pastarasis apibrėžiamas kaip santykis tarp tikrojo oro kiekio, sunaudoto deginimui, ir teoriškai reikalingo oro kiekio, kad kuras visiškai sudegtų. Perteklinio oro koeficientas λ naudojamas kaip viena svarbiausių charakteristikų, apibūdinančių degimo procesą. Remiantis degimo produktų analize, oro pertekliaus koeficientą galima išreikšti šiuo supaprastintu santykiu:

$$\lambda = CO_{2,maks}/CO_{2,išmatuotasis} \quad (1.4)$$

čia: $CO_{2,maks}$ – didžiausias galimas anglies dioksido kiekis deginant tam tikrą kurą, kurio reikšmė priklauso nuo kuro rūšies.

Kai kurie dujų analizatoriai tiesiogiai nematuoja anglies dioksido kiekio, bet jį apskaičiuoja pagal deguonies kiekį: $CO_{2,išmatuotasis} = CO_{2,maks} \cdot (1 - O_2 / 20,94)$. Optimali oro pertekliaus koeficiento reikšmė labai priklauso ir nuo deginimo technologijos, ir nuo kuro rūšies, bet kad kuras visiškai sudegtų, jo reikšmė turi būti didesnė negu 1,0. Deginant medienos kurą, durpes arba briketus su saprope-

liu, gana sudėtinga vienodai paskirstyti degimo orą virš visos degimo zonos, todėl, norint užtikrinti visišką sudegimą, oro pertekliaus koeficiento reikšmė turi būti didesnė kaip 1,4. Deginant skystąjį arba dujinį kurą, optimalus oro pertekliaus koeficientas svyruoja tarp 1,02–1,10 ribų. Šilumos nuostolius dėl chemiškai neviseiško sudegimo galima nustatyti labai tiksliai pagal CO kiekį degimo produktuose. Didelis CO kiekis (didesnis negu 0,5 %) rodo, kad degimo produktuose gali būti nesudegusios anglies dalelių, kurios gali būti lengvai nustatomos pagal tamsią dūmų spalvą. Siekiant sumažinti šilumos nuostolius dėl chemiškai neviseiško sudegimo, išmetamosiose dujose yra labai svarbu išlaikyti kaip įmanoma mažesnę CO kiekį (Vares *et al.* 2007). Plačiai naudojamo biokuro ir akmens anglies deginimo metu išsiskiriančių teršalų kiekiai pateikti 1.11 paveiksle.



1.11 pav. Deginimo metu išsiskiriančios teršalų koncentracijos (Adáñez *et al.* 2003; Xue-dong *et al.* 2007; Vares *et al.* 2007; Gimbutaitė, Venckus 2008; Ambrulevičius 2010)

Fig. 1.11. The concentrations of pollutant released during combustion (Adáñez *et al.* 2003; Xue-dong *et al.* 2007; Vares *et al.* 2007; Gimbutaitė, Venckus 2008; Ambrulevičius 2010)

Tiesioginiam biomasės deginimui būtinas šiai kuro rūšiai pritaikytas katilas. Didelę reikšmę degimo procesui turi kuro susmulkinimas, veikiantis oro ir degimo produktų cirkuliaciją pakuroje. Atsižvelgiant į didelę biokuro, durpių ir sapropelio savybių įvairovę, šių kuro rūšių deginimui gali būti taikomos įvairios skirtingos technologijos:

- dulkinio kuro deginimas, jis naudojamas retai, pvz., kai tuo pačiu metu deginamos medienos šlifavimo dulkės su skystuoju kuru;
- sluoksninio deginimo ant ardynų technologijos, tuomet naudojami įvairių konstrukcijų ardynai, kuriuos galima suskirstyti į dvi grupes – stacionarieji ir judantys ardynai;

- deginimas verdančiame sluoksnyje – naudojamas verdantis arba cirkuliuojantis verdantis sluoksnis;
- kuro gazifikacija ir deginimas dujomis arba mazutu kūrenamame katile.

Kiekvienai deginimo technologijai susiformavo tam tikra katilų galingumų amplitudė, kuriai šios technologijos naudojimas yra techniškai ir ekonomiškai tikslingas. Katiluose, kurių galingumas iki 5 MW, paprastai naudojama sluoksninio deginimo ant ardynų technologija, o deginimo verdančiame sluoksnyje technologijos daugiausia taikomos stambiesiems katilams. Skirtingai nei Suomijoje ar kitose Skandinavijos šalyse, deginimo verdančiame sluoksnyje technologijos medienos kuro, durpių ir sapropelio deginimui neįgijo populiarumo nei Baltijos šalyse, nei Lenkijoje ar Rusijoje. Katilus galima skirstyti ir pagal jų panaudojimo sritį. Kiekvienoje srityje tikslinga naudoti tam tikros galios katilus, tinkamiausius technologinius sprendimus ir reikiamą automatizavimo lygį (Vares *et al.* 2007).

1.8. Biokuro deginimo ir teršalų sklaidos modeliavimo galimybės

Programinė RETScreen įranga

RETScreen tarptautinė švarios energijos projektų analizės programinė įranga (The RETScreen International Clean Energy Project Analysis Software). Programą sudaro šie programų paketai: 1. Kogeneracijos (trigeneracijos) programos paketas (Tinkamas analizuoti įvairias kombinacijas – šildymo, šalčio, elektros); 2. Mažų hidroelektrinių programos paketas; 3. Vėjo energijos programos paketas; 4. Šildymo biomase programų paketas; 5. Oro šildymo saulės energija programos paketas; 6. Vandens šildymo saulės energija programos paketas; 7. Pasyvaus šildymo saulės energija programos paketas; 8. Šilumos siurblių programos paketas; 9. Arenų ir kitų didelių objektų energijos aprūpinimo tyrimo programų paketas.

Programinė įranga veikia *Microsoft Excel* aplinkoje, ir kiekvienam žingsniui atlikti reikia užpildyti po vieną ar kelis darbalaukius: 1 žingsnis – energijos modelis: šiame darbalaukyje nurodomi parametrai, tokie kaip vietovė, kurioje įgyvendinamas energijos projektas, naudojamos sistemos tipas, technologija. Šiame skyriuje apskaičiuojami metiniai energijos poreikiai bei galimi sutaupymai įrengiant siūlomą sistemą; 2 žingsnis – išlaidų analizė: šiame darbalaukyje siūlomai sistemai įvedamos pirminės, metinės, periodinės ar kitokios išlaidos; 3 žingsnis – teršalų analizė: šis darbalaukis padeda nustatyti siūlomos technologijos metinę šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją ir galimą jos sutaupymą, palyginti su nagrinėjamąja alternatyva; 4 žingsnis – finansų suvestinė: šiame skyriuje reikia

nurodyti finansinius parametrus, veikiančius energijos kainą – tai yra gamybos išlaidos, šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos mokestis, infliacija, diskonto norma, skolos ir mokesčiai; 5 žingsnis – rizikos analizė: šiame skyriuje galima nustatyti, kaip įvairių pagrindinių parametrų vertės gali turėti įtakos finansiniam projekto gyvybingumui – galima atlikti jautrumo analizę arba rizikos analizę, arba abi iš karto.

BOILER 2004 programa

Pasitelkus naujas technologijas, biomasė gali būti naudojama vietoj įprasto kuro energetikos ir transporto sistemose. Svarbiausios priežastys, įgalinančios tai daryti, yra ekologinio pobūdžio. Deginant biomasę į atmosferą išmetamas anglies dioksidas priklauso gamtinio anglies apytakos ciklo srautui ir nedidina šiltnamio efekto. Deginant biomasę daug mažiau išleidžiama sieros dioksido. Šis junginys turi didžiausią įtaką lietaus rūgštėjimui ir sąlygoja visas atitinkamas pasekmes hidrosferai, augalijai ir materialinėms vertybėms.

BOILER 2004 programa leidžia atlikti išmetamųjų teršalų kiekių skaičiavimus į atmosferą iš energetinių (stacionariųjų) taršos šaltinių (iš katilo, krosnių). Ši programa sukurta, remiantis Rusijos metodika "ГКД 34.02.305-2002.Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от энергетических установок. Методика определения".

Naudojantis *BOILER 2004* modeliavimo programa, gali būti modeliuojamas briketų su sapropeliu degimo procesas katile ir degimo metu išsiskiriančių teršalų kiekiai.

MINTEQA2/PRODEFA2 modeliavimas

Didelio kiekio mėginių paėmimas ir analizė yra brangi, tačiau pritaikius modelius galima gauti patikimus rezultatus, naudojant nedidelius bandinių kiekius. Procesų modeliavimas ypač naudingas, kai reikia įvertinti tolesnę taršos sklaidą. Sapropelyje vykstantiems procesams aiškinti V. Dokučiajovas (1846-1903) pasiūlė labai paprastą, aiškią, bet iki šiol perdėm sudėtingą išspręsti formulę:

$$D = f(d.u., b., k., r., \dot{z}.\dot{u}.\dot{v}.) \cdot t \quad (1.5)$$

čia: D – sapropelyje vykstantys procesai; $d.u.$ – dirvodarinė uoliena; b – biota; k – klimatas; r – reljefas; $\dot{z}.\dot{u}.\dot{v}.$ – žmogaus ūkinė veikla; t – laikas.

Visapusiško teršalų sklaidimo sapropelyje matematinio modelio sudėtinėmis dalimis turėtų būti medžiagos masės tvermės dėsnis kiekvienam teršalui, masių pasiskirstymo sapropelio fazėse (kietosiose dalelėse, sapropelio tirpale, biomasėje ir vandenyje) dėsniai, teršalų sklaidos srautų dėsniai bei reakcijų laikas. Vienas plačiai taikomų matematinių modelių sunkiųjų metalų sąveikai su sapropeliu tyrinėti yra *MINTEQA2/PRODEFA2* ir jo modifikacijos.

Teršalų srautus ir sklidimą sapropelyje apibūdina jų sorbcijos, arba pasiskirstymo tarp sapropelio tirpalo ir jo kietosios fazės koeficientai K_d ir K_p reakcijų pusiausvyros sąlygomis. Teršalų sorbcija sapropelyje priklauso nuo pH, organinės medžiagos kiekio ir kokybės, bendrosios teršalų koncentracijos sapropelyje ir kitų veiksnių. Kiekybiškai K_d išreiškiamas šiuo santykiu:

$$K_d = \frac{M_k}{M_s} \quad (1.6)$$

čia: K_d – pasiskirstymo koeficientas; M_k – metalo masė sapropelio kietojoje fazėje; M_s – metalo masė sapropelio tirpale.

Organinių teršalų pasiskirstymo sapropelyje organinėje medžiagoje ir tirpale koeficientas K_{OC} koreliuoja su teršalo tirpumu vandenyje:

$$\log(K_{OC}) = 4,273 - 0,686 \log(S) \quad (1.7)$$

čia: S – teršalo tirpumas vandenyje mg/l. Tokiu atveju:

$$K_p = K_{OC} \cdot \text{organinės medžiagos masės dalis} \quad (1.8)$$

Žinant teršalo tirpumą vandenyje (informaciją galimą surasti duomenų bazėje internetiniu adresu <http://ibmlc2.chem.uga.edu/sparc/>), galima apskaičiuoti jo pasiskirstymo sapropelio fazėse (komponentuose) koeficientą. Sunkiųjų metalų pasiskirstymo koeficientas K_d nėra pastovus ir priklauso nuo elemento savybių bei sapropelio kietosios ir skystosios fazių charakteristikų, nuo metalo koncentracijos sapropelyje, karbonatų kiekio, Fe ir Al oksihidroksidų, organinės medžiagos, molio mineralų, dirvožemio terpės pH. Siekiant prognozuoti sunkiųjų metalų poveikį aplinkai, įvairiais laboratoriniais ir lauko tyrimais ieškomos koreliacijos tarp sunkiųjų metalų bendrųjų ir judriųjų jonų koncentracijų įvairiuose ekstrahentuose bei augaluose.

Sunkiųjų metalų sorbcijos procesus sapropelyje galima nagrinėti ir pagal kationų mainų modelį. Kiekybinė sorbcijos procesų išraiška – sorbcijos izotermės (linijinė Henrio, Freundlichio, Langmiuro, dviejų paviršių Langmiuro, konkurencinė Langmiuro ir kitos), išreiškiančios pasiskirstymo koeficiento K_d pobūdį esant reakcijų pusiausvyrai pastovioje temperatūroje. Visos izotermės paremtos termodinaminiais dėsniais. Sorbcijos izotermės plačiai naudojamos tiriant cheminių medžiagų judrumą ir imobilizavimą sapropeliuose (arba dirvožemiuose). Iš modeliinių laboratorinių eksperimentų išvestos sorbcijos izotermės yra patogios nagrinėjant sunkiųjų metalų pasiskirstymą pasirinktų medžiagų (dirvožemis arba sapropelis) tirpale ir kietojoje fazėje. Jų svarbą iliustruoja faktas, kad jos įtrauktos į svarbias matematines aplinkos tyrimų programas, tokias, kaip *MINTEQA2*.

Modeliavimo programų pritaikymas aplinkosaugoje labai palengvina aplinkos procesų tyrimą ir leidžia prognozuoti procesų pabaigą.

1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Siekiant išsaugoti uždumblėjusius ir užžėlusius ežerus ir jų gėlo vandens išteklius, juos reikia valyti – šio proceso metu išgaunamas sapropelis. Jis gali skirtis elementine sudėtimi, organinių medžiagų kiekiu ir energetinėmis savybėmis.
2. Mokslinėje literatūroje teigiama, kad, priklausomai nuo išgauto sapropelio cheminių ir fizinių charakteristikų, jis yra naudojamas kaip trąša augalininkystėje, kaip pašaras gyvulininkystėje, taip pat kosmetikos, statybos medžiagų gamyboje ir kaip rišamoji degi medžiaga briketų arba granuliuose gamyboje.
3. Lietuvoje nėra reglamentuotos leistinos sunkiųjų metalų koncentracijos sapropelyje, todėl jos lyginamos su nuotekų dumbliui taikomais LAND 20–2005 reikalavimais. Sunkiųjų metalų kiekiai sapropelyje lyginami su jų kiekiais I kategorijos nuotekų dumble, šis dumbblas naudojamas tręšimui, karjerų rekultivavimui ir deginimui.
4. Organinės medžiagos kiekis sapropelyje nusako jo tinkamumą naudoti biokuro gamybai. Organinį sapropelį galima panaudoti kaip rišamąją degią medžiagą biokuro briketams gaminti. Gaminant briketus geriausios sapropelio rišamosios savybės išryškėja kai jo drėgnis siekia 78–82 %, o gaminant granules drėgnis gali siekti 52–60 %.
5. Organinio sapropelio šiluminė vertė yra artima durpėms, suformuoti briketai arba granulės turi didelį mechaninį patvarumą, šiluminį, o degimo proceso metu išsiskiria iki 5 kartų mažesnės teršalų koncentracijos nei deginant akmens anglį.
6. Išanalizavus mokslinę literatūrą, nustatyta, kad išsamių kryptingų tyrimų apie briketų su sapropelio rišikliu panaudojimo galimybes atlikta mažai. Beveik nėra informacijos apie degiosios rišamosios medžiagos – sapropelio kiekio briketė įtaką šilumingumui, mechaniniam patvarumui ir teršalų degimo metu išsiskyrimui.

Todėl šiame disertaciniame darbe nuspręsta atlikti kompleksinius eksperimentinius sapropelio ėminių tyrimus, apimančius briketų su sapropelio rišikliu tyrimus, įvertinant briketų mechaninį patvarumą (atsparumas gniuždymui ir lenkimui), šilumingumą ir teršalų emisijas briketų degimo metu bei nustatant optimalų sapropelio kiekį biokuro briketė.

Sapropelio cheminės sudėties ir fizinių savybių tyrimai

Ežerai yra vieni iš rekreacinių gamtinės aplinkos objektų, todėl jų dugno nuosėdų cheminių elementų sudėtis yra svarbus šios aplinkos kokybės rodiklis. Ežerai nyksta, kadangi juose kaupiasi dugno nuosėdos (sapropelis), krantai apauga pertekline augalija, o tai sukelia ežerų eutrofikaciją (Bakšienė, Ciūnys 2007; Valiuškevičius 2007; Kocov 2007a). Kai kurie Lietuvos ežerai yra urbanizuotose teritorijose arba jų technogeninio poveikio zonose. Juose sapropelio sudėtis priklauso ne tik nuo gamtinių sedimentacijos procesų, bet ir nuo antropogeninės taršos. Padidėję sunkiųjų metalų kiekiai ežerų sapropelyje parodo technogenezės poveikį sedimentacijai (Taraškevičius, Gregorauskas 1993; Kadūnas, Budavičius 2001). Nuo cheminių elementų, sunkiųjų metalų ir organinės medžiagos kiekių priklauso sapropelio tipas (prigimtis) ir panaudojimo sritis.

Šiame skyriuje aprašyti sapropelio mėginių ėmimo taškai, metodika, pateikta atliktų tyrimų metodika bei gautų rezultatų analizė. Šiame skyriuje aprašyti tyrimai paskelbti 4 autorės straipsniuose (Kozlovskā-Kędziora, Petrāitis 2010b; Dumčius *et al.* 2011; Kozlovskā-Kędziora *et al.* 2011; Kozlovskā *et al.* 2012b).

Šių eksperimentų tikslas – nustatyti drėgmės kiekį, pH, bendrosios ir organinės anglies kiekius sapropelyje, cheminių elementų sudėtį bei vyraujančias sunkiųjų metalų koncentracijas, taip pat nustatyti sapropelio tinkamumą naudoti energetikoje.

2.1. Sapropelio mėginių ėmimo metodika

Upių ir kitų paviršinių vandens telkinių baseinų ribos paprastai sutampa su natūralių tam tikros hierarchijos kraštovaizdžių ribomis, todėl cheminė jų dugno nuosėdų sudėtis parodo geocheminius viso baseino ypatumus. Smulkiadisversė dugno nuosėdų dalis, pasižyminti dideliu sorbciniu imlumu, labai gerai apibūdina cheminius technogeninius pokyčius žemiau už taršos židinio. Ežerų dugno nuosėdų mėginiai specialiais semtuvais renkami vasarą iš valtys arba cilindriniais gruntotraukiais ar durpių grąžtais žiemą nuo ledo (ISO 5667–12; Domaševičius *et al.* 1999; Kadūnas, Budavičius 2000; Kadūnas *et al.* 2003).

Mokslininkų teigimu, nuo sapropelio tipo priklauso jo panaudojimo sritis. Biokuro briketų gamybai su sapropelio rišikliu tinkamiausias yra organinis sapropelis, kur organinės anglies kiekis siekia apie 70 % (Žvironaitė *et al.* 2002; Косов 2007a; Bakšienė, Ciūnys 2007; Baran *et al.* 2009; Николаева 2011). Norint įvertinti sapropelio panaudojimo energetikoje galimybes, buvo ištirti skirtingų tipų sapropelio mėginiai iš trijų Lietuvos ežerų: Poežerių (I mėginys), Medžialenkės (II mėginys) ir Talkšos (III mėginys) (2.1 pav.). Poežerių ežero sapropelis pagal prigimtį priskiriamas organiniam ir silicio-organiniam tipui, Medžialenkės ežero sapropelis – organiniam, tuo tarpu Talkšos ežero sapropelis priskiriamas kalkiniam ir siliciniam tipui. Mokslininkų teigimu, Talkšos ežeras praeityje buvo paveiktas didelės antropogeninės apkrovos ir yra užterštas. Tyrimų metu buvo vertinamas Talkšos ežero sapropelio užterštumo lygis ir jo tinkamumas biokuro briketų gamybai (Ciūnys 1997; Katkevičius *et al.* 1998; Kadūnas *et al.* 2003; Frisk *et al.* 2004; Balevičienė *et al.* 2009).



2.1 pav. Tirtųjų ežerų vietos žemėlapyje (Lietuvos žemėlapis 2012)

Fig. 2.1. Places of investigated lakes in map (Lietuvos žemėlapis 2012)

Poežerių ežeras yra Vidurio Žemaičių aukštumos pietinėje dalyje, apie 1 km piečiau magistralinio Kaunas–Klaipėda plento, apie 3 km šiauriau Upynos km. Ežero plotas siekia 52,9 ha, maksimalus vandens gylis ekskavatoriumi išvalytoje pietrytinėje vietoje siekia 2,05 m (prieš pradedant kasybą buvo 1,6 m), o vidutinis vandens gylis – 1,2 m. Vandens tūris sudaro 584 tūkst. m³. Poežerių ežeras labai uždumblėjęs, apaugęs vandens augalija (beveik ištisinė nendrių juosta), pakrantės krūmais, lapuočiais medžiais. Ežeras maitinamas atmosferiniais krituliais, taip pat paviršiniu nuotėkiu, kuris surenkamas iš maždaug 6 km² ploto. Poežerių ežere slūgso dideli klodai sapropelio, jo maksimalus sluoksnio storis siekia 13,8 m, o vidutinis – 7,4 m. Daugiausia tai mišraus, organinio silicinio tipo, mažai karbonatingas sapropelis (Restauruotinių Lietuvos... 2008; Balevičienė *et al.* 2009).

Medžialenkės ežeras yra Mažeikių raj., Tirkšlių seniūnijoje (ribojasi su Vieksnių seniūnija), jo 5,1 ha yra Medžialenkės kaimo teritorijoje, kita dalis priklauso Žibikų kaimui. Ežeras apaugęs krūmais ir nendrėmis, jo žemi krantai. Seniau jis buvo vadinamas Bobežeriu, šio ežero gylis dabar – 3–5 m, anksčiau buvo smarkiai uždumblėjęs, todėl buvo valytas ir vietomis išgilintas iki 6 m.

Talkšos ežeras tvyro 1 km nuo Šiaulių miesto centro. Ežero plotas – 56,2 ha, ilgis – 2 km, didžiausias plotis – 550 m. Šiaurinėje dalyje Talkšos ežeras per nendrėmis apaugusį 150 m ilgio ir 5 m pločio Kulpės kanalą susisiečia su 16 ha ploto Ginkūnų ežeru. Beveik visose ežero pakrantėse veši tankūs augalų sąžalynai.

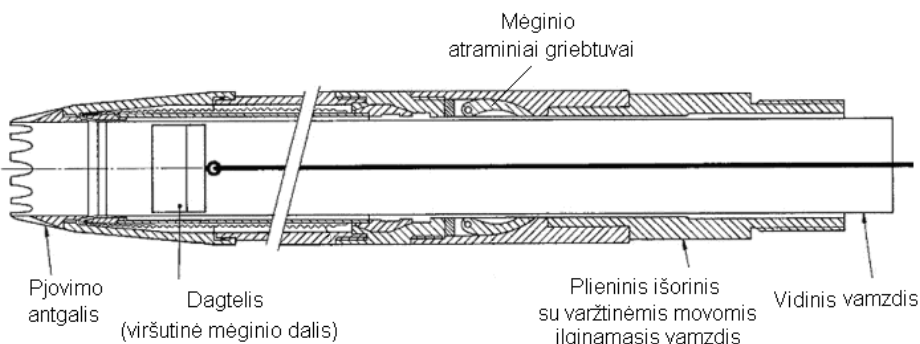
Ežerų dugno nuosėdų (saproelio) mėginiai imami atsižvelgiant į daugelį faktorių, kurie gali paveikti mikroelementų bei sunkiųjų metalų kaupimąsi dugno nuosėdose. Paviršinių ežerų dugno nuosėdų mėginiai imami žiauniniais semtuvais, iš gilesnių sluoksnių (iki 80 cm) – *Nemisto* tipo gravitaciniu vamzdžiu arba gruntotraukiu (2.2 pav.), o iš labai gilaus nuosėdų sluoksnio mėginiai imami durpinio tipo grąžtais (2.3 pav.) (Domaševičius *et al.* 1999; Кадунас *et al.* 2001).

Gruntotraukis yra sudarytas iš 3 metalinių vamzdžių ir bendras jo ilgis gali siekti iki 230 cm. Apatinioji vamzdžio dalis yra 5,5 cm skersmens, 100 cm ilgio su smailia apačia, kad būtų galima lengviau įsiskverbti į nuosėdas. Vidurinioji ir viršutinioji vamzdžio dalys turi sriegius, kad būtų galima sujungti atskiras vamzdžių dalis. Apatiniojoje įrenginio dalyje nėra skylių, tokiu būdu stengiamasi palaikyti mėginius natūraliomis sąlygomis. Vidurinė įrenginio dalis yra 45 cm ilgio su 5 eilėmis kas 5 cm skylučių. Kai įrenginys panardinamas į vandenį, vanduo išbėga pro skylutes. Tokiu būdu sumažinamas vandens slėgis į mėginį ir taip išvengiama mėginio judėjimo ar išstūmimo iš įrenginio. Viršutinioji dalis yra 90 cm ilgio, o konstrukcija panaši į viduriniąją įrenginio dalį. Ši dalis lengvai gali būti prijungta prie vidurinėsios įrenginio dalies siekiant gauti ilgesnį įrenginio ilgį atsižvelgiant į vandens gylį. Geležinis stūmoklis yra naudojamas paimtam mėgi-

niui iš įrenginio išstumti. Jo konstrukcija paprasta: prie 100 cm ilgio geležinio strypo pritvirtinta metalinė 4 cm skersmens plokštelė (Somsiri *et al.* 2006; Schulz, Zabel 2006; Rothwell 2006).



a)

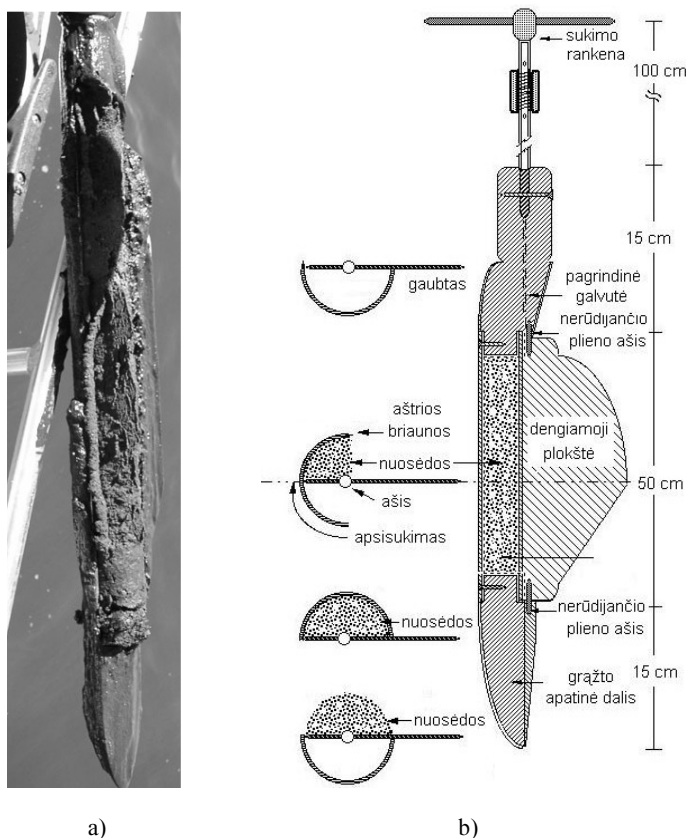


b)

2.2 pav. Gruntotraukis: a) nuotrauka; b) schema

Fig. 2.2. Soil puller: a) foto; b) scheme

Gręžinių tankis ežere priklauso nuo ežero dydžio ir dugno banguotumo. Mažuose ežeruose (iki 3,0 ha dydžio) ar sekliose didelių ežerų įlankose gręžiama kas 100 m; 3,0–10,0 ha – kas 200 m; 10–50 ha – kas 300 m; didesnių kaip 50 ha – kas 300–500 m. Bent 1 gręžinys būtinai gręžiamas ties vandens linija. Jeigu ežeras apsuptas pelkės, pelkėje gręžiama kas 30–100 m, užfiksuojant pelkės pakraštį. Jeigu 2 gretimų gręžinių gyliai arba organogeninių nuosėdų tipai labai skiriasi, tarp šių gręžinių gręžiamas papildomas gręžinys. Gręžiant būtinai fiksuojamas vandens lygis. Jeigu ežere susiformavęs vizualiai vienodas sapropelis, pavyzdžiai imami iš charakteringų vietų (iš ežero vidurio, iš jo pakraščių). Pavyzdžių skaičių lemia kranto linijos vingiuotumas, intakai / ištakai, potencialios taršos iš laukų ar gyvenviečių tikimybė ir kiti faktoriai (Balevičienė *et al.* 2009).



2.3 pav. Durpinio tipo grąžtas: a) nuotrauka; b) schema

Fig. 2.3. Peat type drill: a) foto; b) scheme

Talkšos ežero sapropelio mėginiai imti gruntotraukiu (2.2 pav.) ir durpinio tipo grąžtu (2.3 pav.). Tais atvejais, kai turėjo būti užtikrintos tvirtos atramos, mėginiai imti žiemos metu nuo ledo.

Kadangi sapropelio išgavimo metu, atliekant ežero valymo darbus, sluoksniai tarpusavyje susimaišo, todėl Poežerių ir Medžialenkės ežerų sapropelio ėminiai imti prie kranto išgautoje bendroje masėje.

Talkšos ežero sapropelis buvo ištirtas detaliau. Tyrinėtas Lietuvos ir užsienio mokslininkų Talkšos ežeras praityje buvo stipriai paveiktas antropogeninės veiklos dėl taršos odos perdirbimo įmonės nuotekomis. Sapropelio ėminiai imti iš Talkšos ežero šiaurinės dalies. Ežerų dugno nuosėdų ėminiai imti atsižvelgiant į ankstesnių tyrėjų duomenis, kuriuose buvo nurodyta didžiausia tarša (Frisk *et al.* 2004; Baubinas 2003).

Gręžiniai gręžti esant ledui, pragręžus ledą buvo įleidžiamas zondas ir nustatomas vandens gylis, taip pat pažymimos gręžinių GPS koordinatės, tada mėginiai iki 80 cm imti gruntotraukiu, gilesnieji sluoksniai – durpinio tipo grąžtu. Lauko darbų metu (2010 m.) padaryti trys gręžiniai (2.4 pav.), kurių koordinatės yra tokios: 1 gręžinio – $55^{\circ}56'40.65''\text{N}$, $23^{\circ}20'16.00''\text{E}$; 2 gręžinio – $55^{\circ}56'41.34''\text{N}$, $23^{\circ}20'24.15''\text{E}$; 3 gręžinio – $55^{\circ}56'65.10''\text{N}$, $23^{\circ}20'32.00''\text{E}$.



2.4 pav. Sapropelio ėminių ėmimo vietos Talkšos ežere

Fig. 2.4. Places of bores sampling in Talkša Lake

Dugno nuosėdų gręžiniai gręžti iki 270 cm gylio į nuosėdų sluoksnį. Iš gręžinių ėminiai surinkti kas 10 cm intervalais. Visų trijų gręžinių ėminiai iš to paties nuosėdų gylio homogenizuoti į vieną reprezentatyvųjį ėminį. Iš viso buvo surinkti ir išanalizuoti 27 ėminiai.

2.2. Sapropelio cheminės sudėties ir drėgnio nustatymo metodikos

Sapropelio drėgnio nustatymas

Sapropelis paskleidžiamas ant švaraus paviršiaus, kuris neabsorbuoja drėgmės (ant stiklinės lėkštės) ir gerai išmaišomas. Indelis išdžiovinamas 100–105 °C temperatūroje ir atvėsinaamas (apie 45 min.), nustatoma indelio ma-

sė (m_0). Šaukšteliu į indelį įdedama 30–40 g sapropelio mėginio. Nustatoma indelio masė (m_1). Indelis su mėginiu įdedamas į termostatą ir džiovinamas 100–105 °C temperatūroje iki pastovaus svorio ir apie 45 min. paliekamas atvėsti. Nustatoma indelio su sausu mėginiu masė (m_2). Sveriamas svarstyklėmis, kurių svėrimo paklaida – $\pm 0,2$ g.

Procentinis sausosios masės kiekis (w_{sm}) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_{sm} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

čia: m_0 – tuščio indelio masė (g); m_1 – indelio su drėgnu mėginiu masė (g); m_2 – indelio su sauso sapropelio mėginiu masė (g).

Gauti matavimų rezultatai apskaičiuojami nustačius aritmetinį trijų mėginių drėgmės kiekio vidurkį.

Sapropelio cheminės sudėties nustatymas

Sapropelio mėginių elementinė analizė atlikta Vilniaus universiteto Chemijos institute. Analizei naudotas prietaisas „EVO 50 XVP“ („Carl Zeiss SMT AG“) su energijos dispersijos ir bendrų dispersijos rentgeno spindulių spektrometrais. EVO 50 XVP įrenginys nustato bendrus mikroelementų Ti, K, S, P, Si, Na, O, N, C kiekius, taip pat bendrus makroelementų Al, Fe, Ca ir Mg kiekius.

Paimti iš skirtingų Lietuvos ežerų visi sapropelio mėginiai išdžiovinti kambario temperatūroje ir vėliau susmulkinti iki miltelių. Miltelių mikro– ir makroelementų kiekiai nustatyti Poežerių (I mėginys), Medžialenkės (II mėginys) ir Talkšos (III mėginys) ežerų sapropelio bandiniuose, taip pat palyginimui ir durpėse.

Sapropelio bendrosios anglies kiekio nustatymas

Bendroji anglis (TC) ir neorganinė anglis (IC) nustatoma bendrosios anglies analizatoriumi TOC-V SHIMADZU. Anglies degimo oksidacijos reakcijos naudingumo koeficientas (bendroji anglis) ir anglies rūgštinimo reakcija (neorganinė anglis) gali, priklausomai nuo mėginio tipo, kisti. Neorganinės anglies matavimo metu krosnelėje darbinė temperatūra yra 200 °C. Bendrosios anglies matavimo metu krosnelėje darbinė temperatūra siekia 900 °C.

Mėginių ruošimas analizei. Iš mėginio pašalinamos tyrimui nereikalingos medžiagos (akmenukai, kriauklytės ir pan.). Imami keli ėminiai iš skirtingų vietų. Smulkintuvu ar grūstuvu ėminys kruopščiai susmulkinamas ir sumaišomas į skirtingus mėginius. Susmulkintas mėginys persijojamas per 2 mm tankumo sietą. Neišsijotos dalelės susmulkinamos iš naujo. Prieš pasveriant mėginius jie yra džiovinami. Norint nustatyti bendrąją ir neorganinę anglį, sapropelis sutrinamas ir homogenizuojamas. Analizei imama iki 50 mg mėginio.

Kietieji mėginiai. Svėrimo tikslumas tiesiogiai susijęs su tyrimo rezultatų tikslumu, todėl naudotos analitinės svarstyklės.

Sapropelio pH nustatymas

Sapropelio pH nustatymo metodika parengta pagal ISO 10390:2005(E) standartą. pH nustatymui naudojamas stiklinis elektrodas, esant distiliuoto vandens ir mėginio santykiui 5 : 1, 0,01 mol/l kalcio chlorido tirpale (pH kalcio chlorido CaCl_2).

Nustatymo metodo principas. Naudojamas distiliuotas vanduo; kalio chlorido distiliuotame vandenyje tirpalas, $c=1$ mol/l; kalcio chlorido distiliuotame vandenyje tirpalas, $c=1$ mol/l.

Analizei naudota 2–4 mm sapropelio frakcija. Mėginys prieš analizę džiovintas ne didesnėje nei 40 °C temperatūroje. 5 ml paruošto sapropelio supilama į konusinę kolbutę. Mėginys užpilamas 25 ml kalcio chlorido tirpalu, maišomas 60 min, naudojant laboratorinį *Gerhardt, Rotoshake RS 12* kratytuvą. Sapropelio pH matuojamas 3 kartus pH-metru *pH 538 WTV*. pH reikšmė pateikiama dviejų ženklų po kablelio tikslumu.

Sapropelio sunkiųjų metalų nustatymas

Metodas remiasi elemento koncentracijos matavimais mėginyje naudojant atominę absorbcinę liepsnos spektrometriją. Sunkiųjų metalų mikrokiekiai buvo nustatomi tiesiog paruoštuose tirpaluose – atomų absorbcijos spektrometrijos metodu ištirtos medžiagos sapropelio ištraukose (ekstraktuose). Sunkiųjų metalų instrumentinė analizė atlikta VGTU Aplinkos chemijos mokslo laboratorijoje. Prietaisu buvo atlikti 3 to paties mėginio koncentracijos matavimai.

Kiekvienam mėginiui buvo daromos trys ištraukos ir galutinis analizės rezultatas išreikštas kaip jų vidurkis. Nepatikimi duomenys atmesti, o tyrimas pakartotas. Standartinių tirpalų bei sapropelio atveju sunkiųjų metalų koncentracija išreikšta mg/kg. Sunkieji metalai (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Mn) nustatyti „*Buck Scientific*“ 210 VGP atominės absorbcijos spektrometru liepsnos režimu.

Reagentai, indai, prietaisai. Buvo naudota: dejonizuotas vanduo, kurio elektrinis laidis neviršija 0,08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (jame tiriamojo metalo koncentracija neviršija 0,001 mg/l), 37 % HCl tirpalas, 1,0 ml, 5,0 ml pipetės, 50 ml matavimo kolbos, popieriniai filtrai, analitinės svarstyklės *KERN – 770*, atominis absorbcinis spektrometras, *Milestone Ethos* mikrobangų mineralizatorius.

Kalibracinei kreivei sudaryti buvo naudojami metalų (chromo, vario, mangano, nikelio, cinko ir švino) tirpalai, paruošti iš standartinių metalų tirpalų (≈ 1000 mg/l metalo, 2 % HNO_3).

Nustatymo sąlygos pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Sąlygos liepsnos atominėi absorbcinei spektrometrijai
Table 2.1. Conditions for atomic absorptive spectrometry of flame

Elementas	Bangos ilgis, nm	Liepsnos tipas	Fono korekcija
Chromas	357,9	Redukuojanti oro/acetileno	Tuščiavidurio katodo lempa
Varis	324,7	Oksiduojanti oro/acetileno	Deuterio lempa
Švinas	283,2	Oksiduojanti oro/acetileno	Deuterio lempa
Manganas	279,5	Oksiduojanti oro/acetileno	Deuterio lempa
Nikelis	232,0	Oksiduojanti oro/acetileno	Deuterio lempa
Cinkas	213,9	Oksiduojanti oro/acetileno	Deuterio lempa

Kalibravimas. Remiantis gamintojo rekomendacijomis ir 2.1 lentele, nustatomas degiklio aukštis ir padėtis, įvertinamos tirpalo siurbimo greičio, bangos ilgio, plyšio pločio bei liepsnos sąlygos.

Sunkiųjų metalų bendro kiekio sapropelyje koncentracijos nustatymas AAS metodu. 10 g kieto mėginio (sapropelio) 2 valandas džiovinama 100–105 °C temperatūroje. Ataušinama eksikatoriuje, po to 0,001 g tikslumu pasveriamas 0,5 g. Pasvertasis mėginys supilamas į plastikinį indelį. Maža srovele sumaišoma 2 ml vandenilio peroksido (H₂O₂) ir 10 ml azoto rūgšties (HNO₃). Po to esant 200 °C temperatūrai mėginys 1 valandą mineralizuojamas mineralizatoriuje. Po mineralizavimo indelis su mėginiu atvėsinaamas iki 50–70 °C temperatūros. Tada tirpalas iš indelio filtruojamas per 0,45 µm stiklo filtrą į 50 ml matavimo kolbutę. Nufiltravus iki žymės kolbutėje skiedžiama su dejonizuotu vandeniu. Po to matuojamos metalų koncentracijos spektrometru *Buck Scientific 210 VGP* su oro-acetileno liepsna. Tiriamojo elemento koncentracija apskaičiuojama pagal formulę:

$$C = (C_{Me} \cdot f \cdot V) / m \quad (2.2)$$

čia: C – metalo koncentracija sapropelio mėginyje, mg/kg; C_{Me} – metalo koncentracija tirpale, mg/l; f – skiedimo faktorius; V – analizei paimtas tūris, l; m – sapropelio mėginio masė, kg, perskaičiuota į sauso mėginio masę.

2.2.1. Saproelio drėgnio kiekio tyrimų rezultatai

Šių tyrimų tikslas – nustatyti sapropelio mėginių drėgnį (%). Gaminant briketus su sapropelio rišikliu svarbus ir neatsiejamas faktorius yra drėgmės kiekis sapropelyje. Rusijos mokslininkų teigimu, rekomenduotinas drėgmės kiekis mė-

ginyje yra 78–82 %, sapropelio priedų granulių gamyboje drėgmės kiekis mėginyje gali būti mažesnis, t. y. 52–60 % (Кирейчева, Хохлова 1998; Косов 2007a; Петрова *et al.* 2007).

Pirmiesiems tyrimams buvo naudojamas Poežerių ežero sapropelis. Šio sapropelio drėgmė siekia 58,7 %.

Kitam tyrimui naudotas Medžialenkės ežero sapropelio mėginys. Šis sapropelis yra plačiai parduodamas Lietuvoje ir užsienio šalyse kaip trąša ir pašarų priedas gyvūnams bei paukščiams. Medžialenkės ežero sapropelio mėginyje drėgmės kiekis siekia 73 %.

Trečiasis sapropelio mėginys paimtas iš Talkšos ežero. Jo drėgmė siekia 80 %.

Gaminant briketus su sapropeliu ir atitinkamais priedais (šiaudai, pjuvenos, durpės) drėgmė yra būtina tam, kad spaudimo metu geriau sukibtų biomasė. Medžialenkės ir Talkšos ežerų sapropelio mėginių drėgmė yra artima rekomenduotinai briketų gamybai, o Poežerių ežero sapropelio drėgmės kiekis tinkamas naudoti granulių gamybai. Briketų gamybai su sapropelio rišikliu tinkamiausi yra Medžialenkės ir Talkšos ežerų mėginiai, pagal drėgmės kiekį bandiniuose gali būti naudojami biokuro briketų gamyboje.

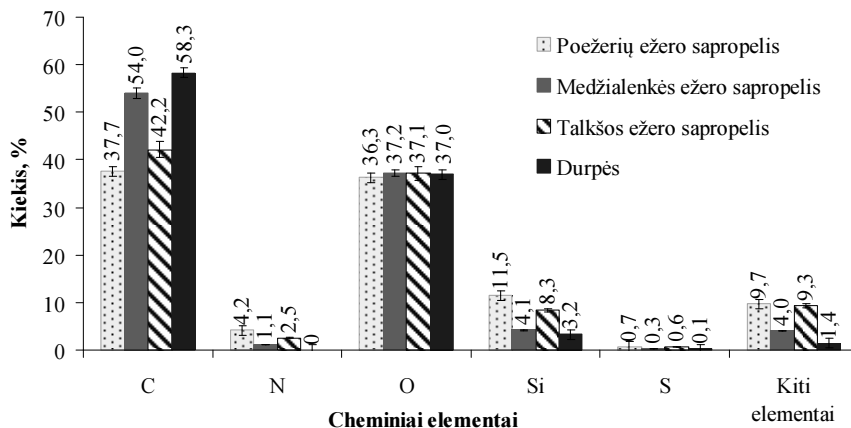
2.2.2. Sapropelio cheminės sudėties tyrimų rezultatai ir jų analizė

Ežerų sapropelis dažniausiai yra praturtintas organinės medžiagos ir molio mineralų, kurie yra geri sunkiųjų metalų sorbentai. Jame gerai atsispindi bet kuri vietovėje esanti tarša. Ežerų dugno nuosėdos tiriamos nuo praėjusio šimtmečio pradžios (Kongiel, Rakowski 1929; Wielowicz 1934). Aprašant mikroelementus jie dažniausiai yra grupuojami atsižvelgiant į pagrindines jų būvio formas nuosėdose. Kai kurių Lietuvos ežerų dugno nuosėdose dėl gamtinių ir technogeninių priežasčių yra padidėjęs tam tikrų mikroelementų kiekis. Mikroelementai yra labai svarbi sudėtinė švarios genezės dugno nuosėdų dalis, kuri jautriai reaguoja į sedimentacijos ir postsedimentacinių sąlygų pokyčius.

Sapropelis randamas ne tik ežerų dugne, bet ir po durpėmis. Durpės yra organinės nuosėdos, susidariusios kaupiantis suirusioms augalų liekanoms mažai deguonies, bet daug vandens turinčioje terpėje. Tai ekologiškas kietojo kuro produktas, priklausantis biokuro grupei. Pagal savo cheminių elementų sudėtį jis yra prilyginamas sapropeliui, todėl gautieji sapropelio cheminės analizės rezultatai yra lyginami su durpėmis (2.5 pav.).

Aprašant mikroelementus jie dažniausiai yra grupuojami atsižvelgiant į pagrindines jų būvio formas sapropelyje. Mikro– ir makroelementų kiekis sapropelyje labiausiai priklauso nuo nuosėdų tipo. Nereti atvejai, kai to paties tipo sapropelyje kai kurių elementų kiekis gerokai skiriasi. Tai priklauso nuo daugelio

priežasčių, iš kurių viena yra sapropelio susidarymo gylis. Tokia priklausomybė yra pastebėta tiriant ne tik Lietuvos, bet ir kitų šalių ežerų dugno nuosėdas.



2.5 pav. Cheminių elementų kiekiai sapropelio mėginiuose ir dūrpėse
Fig. 2.5. Variations of chemical elements concentration in the sapropel and peat samples

Iš 2.5 paveikslo matyti, jog durpių ir sapropelio sudėtyje vyrauja anglis (38–58 %) ir deguonis (37 %), nedidelę dalį sudaro azotas (1,1–4,2 %) ir siera (0,1–0,7 %). Ištirtuose mėginiuose rasta ir silicio (3,2–11,5 %), mažiausiai jo rasta dūrpėse, o daugiausiai – 11,5 % Poežerių ežero sapropelio mėginyje, kuris dėl didelio silicio kiekio nėra tinkamas naudoti briketų arba granulių gamybai. Daugiausiai anglies rasta dūrpėse – 58,3 %, kiek mažiau Medžialenkės ežero sapropelio mėginyje – 54,0 %. Poežerių ežero sapropelyje rasta apie 38 % anglies, Talkšos ežero – 42 %. Likusiąją dalį sudaro mineralinės medžiagos, sunkieji metalai ir kiti mikroelementai (N, CaO, P₂O₅, K₂O, SiO₂, Al, Ca, Co, Cu, Fe, K, Mo, Zn, Se; B, Br, C, J, N, P, S, Si ir kt.) (Mikulionienė, Baležtienė 2009). Kitų cheminių elementų sapropelio mėginiuose aptinkama nedaug, jų suma siekia 1–10 %. Mažiausias jų kiekis – 1,4 % išmatuotas dūrpėse ir Medžialenkės ežero sapropelyje – 4 %. Daugiausiai jų rasta Poežerių ir Talkšos ežerų sapropelio mėginiuose.

Gamtinėje aplinkoje susikaupęs sapropelis, arba ežerų dumbblas, yra unikali ir vertinga nuosėda (Лопотко 1974; Bucksch 1997; Knicker, Hatcher 2001; Rohling *et al.* 2004; Плаксин, Кривonos 2007; Mikulionienė, Baležtienė 2009), kompleksinė organinės ir mineralinės kilmės medžiaga, kurios didžiąją dalį sudaro planktono, bentoso, dumblių ir kitų hidrofītų liekanos, susisluoksnia-vusios su smėlio, molio ir klinčių dalelėmis (Гамаюнов *et al.* 2002; Mikulionienė, Baležtienė 2009). Atlikta skirtingų sapropelio mėginių analizė parodė, jog

pagal degių cheminių elementų kiekius deginimui tinkamiausias yra Medžialenkės ežero sapropelio mėginys, nes jo vertės yra artimiausios durpėms, kurios yra plačiai žinomos kaip biokuras.

2.2.3. Sapropelio bendrosios anglies kiekio tyrimų rezultatai

Šių tyrimų tikslas – nustatyti sapropelio organinės anglies kiekius (%). Sapropelio kokybę dažnai nusako jame esančios organinės anglies kiekis, kuris priklauso nuo sapropelio cheminių bei fizinių savybių (Юдина *et al.* 1998; Kireicheva, Khokhlova 2000; Post *et al.* 2001; Плаксин, Кривонос 2007; Vaitkutė, Baltrėnas 2011). Organinės anglies kiekis sapropelio mėginyje nusako, kuriai sapropelio kategorijai mėginys priklauso. Ežerų dugno nuosėdos, kuriose organinės anglies kiekis siekia mažiau kaip 50 % ir randami dideli silicio kiekiai, vadinamas siliciniu sapropeliu. Sapropelis, kuriame organinės anglies kiekis siekia 70 % ir daugiau, įvardijamas kaip organinis (Лопотко 1974; Юдина *et al.* 1998; Карабанов *et al.* 2003).

Visuose sapropelio mėginiuose buvo nustatyti organinės ir neorganinės anglies kiekiai. Bendroji ir neorganinė anglis buvo matuojama bendrosios anglies analizatoriumi tiesiogiai. Organinės anglies kiekis randamas netiesioginiu būdu iš bendrosios anglies ir neorganinės anglies išmatuotų verčių skirtumo. Didelis organinės anglies kiekis rodo, jog sapropelis gali būti naudingas dirvožemio derlingumui gerinti maistinėmis medžiagomis, kurios yra reikalingos augalų augimui ir vystymuisi, taip pat gali būti naudojamas kaip rišamoji medžiaga biokuro gamybai.

Poežerių ir Medžialenkės ežerų sapropelio mėginiuose buvo ištirtas organinių medžiagų kiekis bendrojoje masėje, neįvertinus gylio. Poežerių ežero sapropelio mėginyje organinių medžiagų kiekis siekia apie 44 ± 2 %, Medžialenkės ežero sapropelyje – 85 ± 2 %, Talkšos ežero sapropelyje – 37 ± 2 %. Gauti tyrimų rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

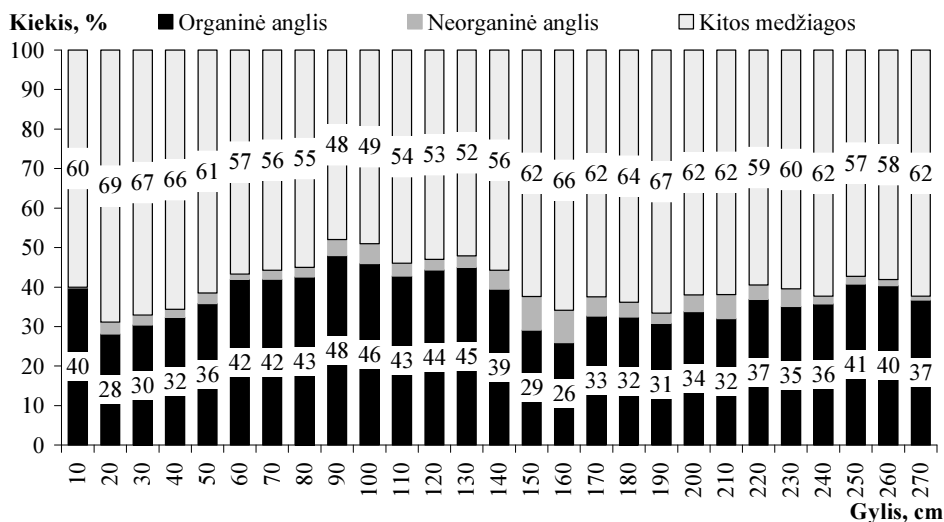
2.2 lentelė. Anglies kiekis sapropelio mėginiuose

Table 2.2. Carbon content in sapropel samples

Ežeras	Bendrosios anglies kiekis, %	Neorganinės anglies kiekis, %	Organinės anglies kiekis, %	Sapropelio rūšis
Poežerių	47	3	44	silicio – organinis
Medžialenkės	89	4	85	organinis
Talkšos	40	3	37	silicinis

Ištirti trijų skirtingų Lietuvos ežerų sapropelio mėginiai pagal organinių medžiagų kiekį (kuris yra svarbus faktorius norint gaminti briketus) pasiskiriami siliciniam, silicio – organiniam (vidutinis) ir organiniam tipui. *Poežerių ežero* sapropelis priskiriamas silicio – organinių sapropelių grupei, kadangi maksimalus organinių medžiagų kiekis jame siekia apie 50 %. *Talkšos ežero* sapropelis po atliktų tyrimų įvardijamas kaip silicinis, kadangi organinių medžiagų kiekis jame siekia apie 40 %. *Medžialenkės ežero* sapropelis dėl didelio organinio kiekio (85 ± 2 %) bus naudojamas kaip rišamoji medžiaga briketų gamyboje ir yra įvardinamas kaip organinis.

Svarbi sudėtinė ežerų dugno nuosėdų dalis yra organinė medžiaga, kuri organiniame sapropelyje yra dominuojantis komponentas (Лопотко 1974; Tan 2000; Budavičius 2003; Плаксин, Кривонос 2007; Woodward 2009). Organinė medžiaga yra svarbi sorbcinė terpė metalų jonams, kadangi su jais gali sudaryti metaloorganinius junginius ir daryti įtaką mikroelementinei nuosėdų sudėčiai (Лопотко *et al.* 1992; Budavičius, Kadūnas 1999; Штин 2005). Ežerų, esančių urbanizuotose teritorijose, dugno nuosėdų sudėtyje yra didesni anglies kiekiai nei nutolusiose nuo miestų ežeruose. Kadangi Talkšos ežeras buvo antropogeniškai užterštas, jame buvo atlikti išsamesni anglies tyrimai. Siekta išsiaiškinti, ar padidėjusi tarša turi įtakos organinių medžiagų kiekiams sapropelyje. Talkšos ežero mėginyje ištirtas procentinis bendrosios (organinės ir neorganinės) anglies pasiskirstymas sapropelio sluoksniuose pateiktas 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Bendrosios anglies (organinės ir neorganinės) kiekis Talkšos ežero sapropelyje

Fig. 2.4. Total carbon (organic and inorganic) content in sapropel in Talkša lake

Pagal kitų tyrėjų (V. Kadūnas, R. Budavičius) duomenis, tiriamosiose Talkšos ežero dugno nuosėdose organinių medžiagų kiekis svyravo nuo 34,0 iki 59,8 %, vidutiniškai organinė medžiaga nuosėdose sudarė $48,5 \pm 0,3$ %. Šitoks organinės medžiagos kiekis lemia mažesnius sunkiųjų metalų kiekius, palyginti su kitomis ežero vietomis, kur dugno nuosėdose organinės medžiagos yra iki 40 % (Budavičius, Kadūnas 1999; Kadūnas *et al.* 2003; Budavičius 2003).

Talkšos ežero sapropelyje organinių medžiagų kiekis svyruoja 26–48 %. Didesnę bendrosios anglies dalį sudaro organinė anglis, o likusiąją dalį sudaro neorganinė anglis – nuo 1 iki 8 %. Talkšos ežero sapropelyje išmatuotos bendrosios anglies koncentracijos kito nuo 31 iki 52 %. Tyrimai parodė, kad Talkšos ežero sapropelyje didelis kiekis organinės anglies randamas 60–130 cm sapropelio sluoksnyje ir sudaro 42–48 %, o gilesniuosiuose 150–160 cm sluoksniuose organinės anglies kiekis mažėja iki 26–29 %, tačiau 160–270 cm gylyje palaipsniui didėja ir išlieka tolygus – apie 40 %.

Sapropelio pH nustatymas ir rezultatų analizė

Klasikinė tradicinė ežerų klasifikacija remiasi vienu požymiu – ežerai klasifikuojami, pavyzdžiui, pagal gylį, plotą ar temperatūrą. Dabar vis dažniau klasifikuojama remiantis keliais požymiais, pavyzdžiui, pagal didžiausią gylį, vandens pH ir temperatūrą (Kilkus 2005; Daubarienė, Valiuškevičius 2009).

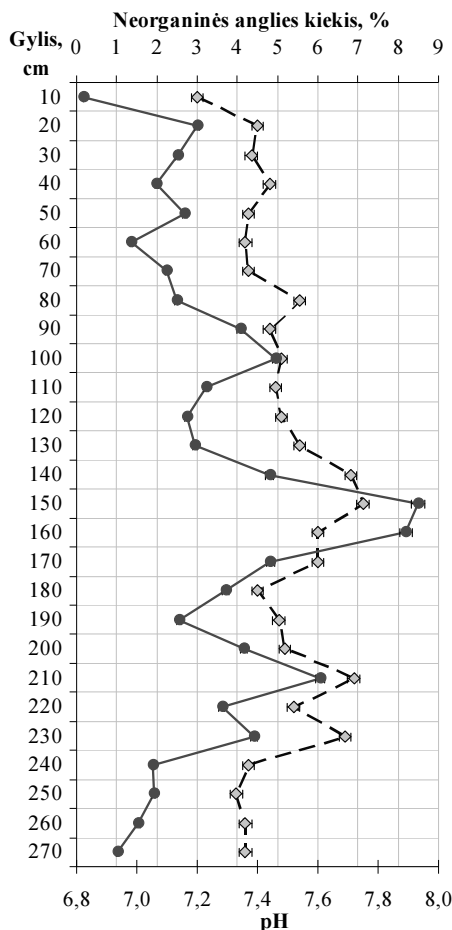
Vandenilinis rodiklis pH – tai dydis, nusakantis vandenilio jonų koncentraciją tirpale. Užterštų paviršinių vandenų pH gali pakisti dėl jame esančių rūgščių bei šarmų (Boudreau *et al.* 1992; Sakalauskienė 2001; Kadūnas, Budavičius 2001; Mierauskas 2009).

Mokslininkų teigimu, pH ir organinės anglies kiekiai mėginiuose gali būti tarpusavyje priklausomi, kadangi tarp gautų duomenų dažnai randama stipri teigiama koreliacija (Post *et al.* 2001; Vaitkutė, Baltrėnas 2011). pH tyrimų tikslas yra nustatyti sapropelio tipą bei patikrinti koreliacijos ryšius tarp pH ir organinės bei neorganinės anglies kiekio sapropelio mėginiuose.

Nustatyta stipri koreliacija tarp tirtų Talkšos ežero sapropelio mėginių pH ir neorganinės anglies kiekio ($R=0,82$).

Sapropelio pH rodiklio pokytį dažnai lemia vandens aplinkos fizinės-cheminės sąlygos, kurios priklauso nuo ežero gylio bei sapropelio litologinių, regioninių ir paleogeografinių ypatybių. Iš 2.7 paveikslu matyti, jog pH rodiklis Talkšos ežero sapropelio mėginiuose kinta nežymiai – nuo 7,20 iki 7,75 – o tai apibūdina jį kaip silpnai šarminį sapropelį. Mažesnės pH rodiklio vertės randamos paviršiniuose sapropelio sluoksniuose, tada palaipsniui matomas pH vertės didėjimas. Didelių pH verčių pokyčių mėginiuose nėra ir vidutinė pH rodiklio vertė 7,5 apibūdina Talkšos ežero sapropelį kaip neutralų. Neorganinės anglies kiekiai kinta panašiai kaip ir pH. Mažiausias neorganinės anglies kiekis išmatuotas paviršiniuose (10 cm) bei gilesniuosiuose (240–270 cm) sluoksniuose. Neor-

ganinė anglis ir pH pagal slūgsojimo gylį kinta panašiai. Didžiausios pH ir neorganinės anglies išmatuotos vertės randamos 140–160 cm gylyje.



2.7 pav. Talkšos ežero sapropelio mėginių neorganinės anglies (●) ir pH (◊) rodiklio pokytis

Fig. 2.7. Change of inorganic carbon (●) and pH (◊) in the Talkša lake sapropel samples

Vertinant vandens kokybę pH rodiklis yra labai svarbus, kadangi nuo vandens terpės (šarminė ar rūgšti) priklauso vandenyje vykstančių biologinių ir biocheminių procesų greitis, vandens augalijos raida, cheminių elementų migracijos formos, taip pat dugno nuosėdų ir sapropelio formavimasis. Intensyviausi procesai dažniausiai matomi viršutiniuosiuose sapropelio sluoksniuose. Visų ištirtų ežerų sapropelio pH rodiklio vertės pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Sapropelio mėginių pH**Table 2.3.** pH content in sapropel samples

Ežeras	pH vertė	Terpės tipas	Sapropelio rūšis
Poežerių	6,2±0,3	silpnai rūgštus	silicio – organinis
Medžialenkės	5,9±0,4	silpnai rūgštus	organinis
Talkšos	7,5±0,4	silpnai šarminis	silicinis

Ištirti trijų skirtingų Lietuvos ežerų sapropelio mėginiai: silicio – organinis (Poežerių ežero), silicinis (Talkšos ežero) ir organinis (Medžialenkės ežero). Poežerių ežero sapropelyje pH siekia 6,2±0,3; Medžialenkės ežero sapropelyje – pH = 5,9±0,4 ir tai šiuos sapropelio mėginius apibūdina kaip neutralius arba silpnai rūgščius. Talkšos ežero sapropelyje pH siekia 7,5±0,4. pH duomenų variacija vertikaliajame nuosėdų profilyje buvo 0,02, o tai parodo didelį duomenų homogeniškumą.

2.2.4. Sapropelio sunkiųjų metalų tyrimų rezultatai

Sapropelis pagal klasifikaciją skirstomas į skirtingus tipus, klases bei rūšis. Jo sudėtis, fizinės ir cheminės savybės nusako praktinę reikšmę (Battarbee *et al.* 2004; Anderson *et al.* 2007), o kadangi sapropelis yra įvairių rūšių, tai skiriasi ir panaudojimo sritys.

Technogeniškai teršiamų Lietuvos ežerų sapropelio sudėtis rodo technogenezės poveikį sedimentacijai. Tokių ežerų dugno nuosėdose padidėja sunkiųjų metalų ir kitų biotai pavojingų cheminių elementų kiekis. Didžiausiomis koncentracijomis pasižymi Ag, Cr, Zn ir Pb. Jie yra svarbiausi besikaupiantys elementai asociacijose, kurios yra panašios į Lietuvos urbanizuotų teritorijų dirvožemio elementų – teršalų asociacijas, tik jų koncentracijos laipsnis nuosėdose yra gerokai didesnis (Kadūnas, Budavičius 2001).

Kadangi sapropelis nėra plačiai naudojamas kaip rišamoji medžiaga briketų arba granulių gamybai, todėl nėra reglamentuota, kokios jame gali būti sunkiųjų metalų koncentracijos. Sapropelio užterštumas paprastai vertinamas pagal nuotekų dumblo naudojimo tręšimui bei rekultivavimui reikalavimus LAND 20–2005 (2.4 lentelė). Nuotekų dumblas yra deginamas vienas arba sumaišytas su kitu kuru, todėl sapropelio mėginių sunkiųjų metalų koncentracijos yra lyginamos su nuotekų dumbliui pateikiamomis leistinomis koncentracijomis. I dumblo kategorijai priskiriamas dumblas, kuris gali būti naudojamas tręšimui, karjerų rekultivavimui ir deginimui. II kategorijos dumblas gali būti deginamas, bet tokiu dumbliu draudžiama tręšti plotus, kurie skirti daržovėms ir vaismedžiams auginti, tačiau galima auginti lauko kultūras praėjus 1 metams po paskleidimo ant sėjamųjų paviršių. Numačius dirvas tręšti dumbliu arba jį deginti, būtina nu-

statyti dirvožemio kokybės rodiklius: sunkiųjų metalų kiekius (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn ir Hg), granulimetrinę sudėtį ir pH. Nuo pH rodiklio vertės dažnai priklauso sunkiųjų metalų migracija tiek dumble, tiek sapropelyje.

Skirtingai nei Vakarų Europoje, kur XIX–XX a. pramonė vystėsi žymiai greičiau nei aplinkosaugos normos, absoliuti dauguma Lietuvos ežerų nėra užteršti sunkiaisiais metalais ir kitomis kenksmingomis medžiagomis (tik keletu miestuose esančių ir / arba ilgą laiką pramonines nuotekas gavusių ežerų dumble sunkiųjų metalų koncentracijos viršija DLK). Sapropelyje sunkieji metalai daugeliu atvejų yra inkorporuoti ir / arba imobilizuoti organogeninės kilmės junginiuose, o nuotekų dumble – paprastai būna technogeninės kilmės sunkieji metalai (Balevičienė *et al.* 2009).

2.4 lentelė. Didžiausi leidžiami užterštumo lygiai dumble

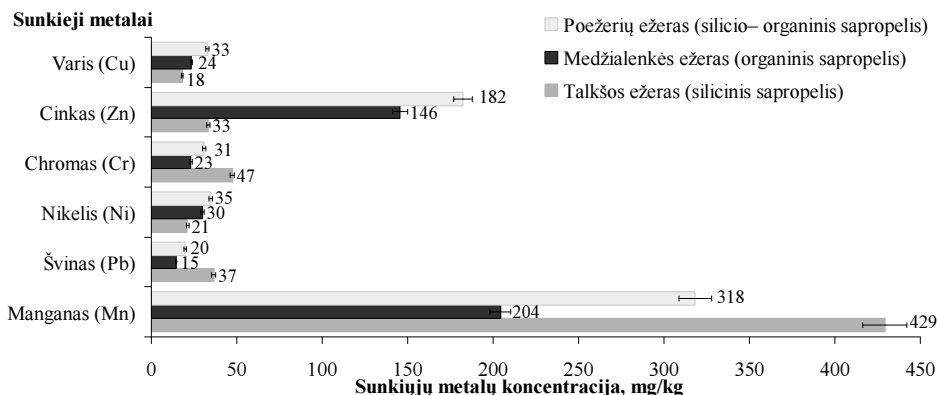
Table 2.4. Maximum limit values for concentration in sludge

Dumblo kategorija	Sunkiųjų metalų kiekiai, mg/kg				
	Pb	Ni	Cr	Zn	Cu
I	<140	<50	<140	<300	<75
II	140–750	50–300	140–400	300–2500	75–1000

Silicio – organinio (Poežerių ežeras), organinio (Medžialenkės ežeras) ir siličinio (Talkšos ežeras) sapropelio mėginiuose nustatytos sunkiųjų metalų koncentracijos. Įvertinus, jog pagal organinės anglies ir drėgmės kiekį bandinyje Medžialenkės sapropelis yra tinkamas naudoti kaip rišamoji medžiaga briketams gaminti, būtina ištirti, ar sunkiųjų metalų koncentracijos jame neviršija leistinų normų (2.8 pav.).

Silicio – organiniame, organiniame ir siličiniam sapropelyje nustatyti sunkiųjų metalų kiekiai neviršija LAND 20–2005 normatyvo didžiausių leidžiamų užterštumo lygių nuotekų dumble, kuris gali būti naudojamas tręšimui, rekultivavimui ir deginimui. Pagal sunkiųjų metalų kiekius silicio – organinis, organinis ir siličinis sapropelis priskiriami I dumblo kategorijai (žiūrėti 2.4 lentelę) ir gali būti naudojamas be apribojimų.

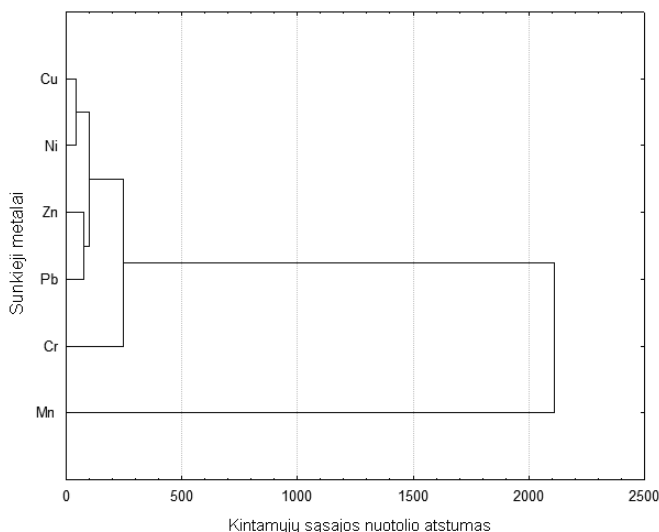
Atlikti mokslininkų tyrimai parodė, jog ežerų viršutiniajame sapropelio sluoksnyje yra susiformavusios didesnės sunkiųjų metalų koncentracijos, palyginti su gilesniaisiais sluoksniais. Nors telkinių sapropelis yra dinamiška terpė, tačiau jo užterštumas dažniausiai išlieka ilgą laiką (Kadūnas, Radzevičius 2001; Kadūnas, Budavičius 2001; Kadūnas, Radzevičius 2003; Parent, Ilnicki 2003; Moratti, Chalouan 2006).



2.8 pav. Sunkiųjų metalų koncentracijos skirtingo sapropelio mėginiuose
Fig. 2.8. Variations of heavy metal concentration in the sapropel of Lakes

Talkšos ežero sapropeliui (silicinis sapropelis) atliktas nuodugnesnis sunkiųjų metalų tyrimas. Talkšos ežeras praeityje patyrė didelę antropogeninę apkrovą, ypač svarbus „Elnio“ odos perdirbimo įmonės poveikis ežero dugno nuosėdų mikroelementinei sudėčiai. Odų perdirbimo pramonė nulėmė tokių teršalų, kaip Cr ir Mn koncentracijos, dugno nuosėdose padidėjimą. Dugno nuosėdų mikroelementinei sudėčiai svarbią įtaką darė miesto nuotekos, pakliūvančios į ežerą. Miesto nuotekos formuoja padidėjusius Ag, Cr, Zn kiekius. Taip pat su padidėjusiomis Pb koncentracijomis glaudžiai siejasi transporto išmetamosios dujos (Taraškevičius, Gregorauskas 1993; Kadūnas, Budavičius 2001). Kietosios dalelės (dulkės), kurios nusėda tiesiogiai ar patenka su lietaus nuotekų vandeniu į ežerą, taip pat keičia natūralius mikroelementų kiekius ir jų asociacijas (Radzevičius *et al.* 2006). Anksčiau atlikti mokslininkų tyrimai parodė, kad į ežerą patenka nemaži kiekiai lietaus nuotekų iš pietvakarinėje ežero pakrantėje esančių privačių namų kvartalų (Frisk *et al.* 2004), todėl ištirta sunkiųjų metalų priklausomybė nuo sapropelio slūgsojimo gylio Talkšos ežere.

Analizuojant sunkiųjų metalų pasiskirstymą vertikaliajame Talkšos ežero dugno nuosėdų pjūvyje, visus elementus galima suskirstyti į dvi grupes: pirmajai priskiriami Cu, Zn, Cr, Ni ir Pb, o antrajai – Mn (2.9 pav.). Pirmosios grupės elementai labai panašūs pagal savo pasiskirstymo pobūdį vertikaliajame dugno nuosėdų pjūvyje. Šios grupės elementai – biogeniniai-technogeniniai. Jų kiekius ir pasiskirstymą lėmė antropogeninė veikla (Budavičius 2003; Budavičius, Kadūnas 1999). Mangano pasiskirstymą vertikaliajame profilyje veikė kiti veiksniai, nenulemti antropogeninio poveikio, todėl šis metalas formuoja atskirą grupę.



2.9 pav. Sunkiųjų metalų ryšiai Takšos ežero sapropelyje (visame vertikaliajame pjūvyje)

Fig. 2.9. Cohesion of heavy metals in sapropel of Talkša Lake (within entire vertical section)

Klasterinės analizės (2.9 pav.) rezultatai parodė, kad savo duomenų išsidėstymo homogeniškumais labiau pasižymi Cu, Ni, Zn ir Pb, o chromo analizės rezultatai išsidėstę šiek tiek kitokia tvarka ir suformuoja atskirą pirmosios grupės skirsnį. Chromas yra šalutinis odos perdirbimo produktas, kuriuo buvo teršiamas ežeras, veikiant „Elnio“ odos perdirbimo įmonei. Chromo kiekių nuosėdose formavimasis yra specifinis, palyginti su kitais sunkiaisiais metalais, kurių pasiskirstymą nuosėdose lėmė iš miesto su oro ir nuotekų tarša atnešti mikroelementai.

Faktorinė analizė išskyrė dvi sunkiųjų metalų grupes, kurios jau išskirtoms grupėms formuoja du identiškus faktorius. Pirmoji grupė paaiškina 60,9 %, o antroji 21 % duomenų dispersijos, t. y. abi grupės nulemia 82,0 % visos duomenų dispersijos.

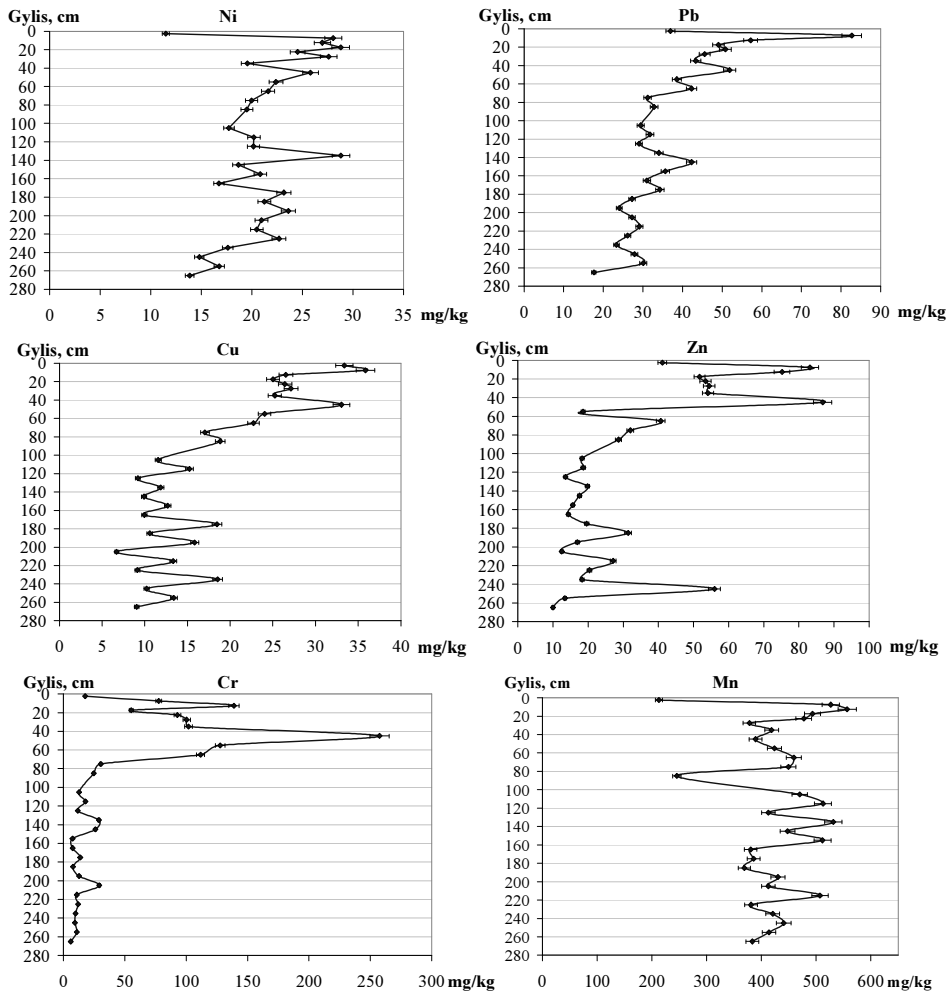
Analizuodami dugno nuosėdų cheminių elementų pasiskirstymą vertikaliuose dugno nuosėdų pjūviuose, kiti autoriai dugno nuosėdas skirsto į tris horizontus, t. y.: pirmasis horizontas – 0–0,5 m, antrasis – 0,5–12 m, o trečiasis – 12–13 m gylyje, kur išsiskiria skirtingos mikroelementų asociacijos. Lyginant pirmojo ir antrojo horizonto mikroelementų kiekius, Cr pirmajame horizonte yra daugiau 4,17, Zn–2,8, Cu–2,12, Pb–1,7, Ni–1,2 karto. Tai taip pat rodo technogeninės apkrovos įtaką didesniems antropogeninės kilmės mikroelementų kiekiams pirmajame horizonte (Budavičius 2003).

Pirmojo sluoksnio faktorinėje analizėje Cr ir Mn formuoja kiekvienas sau atskirus faktorius, o likę Cu, Ni, Zn ir Pb formuoja kitą faktorių. Pirmajame horizonte šie 3 faktoriai paaiškina 96,2 % duomenų dispersijos. Antrojo sluoksnio faktorinės analizės metu išskirti du pagrindiniai faktoriai, paaiškinantys 61,7 % duomenų dispersijos. Pirmąjį faktorių formuoja Cu, Cr ir Pb, o antrąjį Mn. Zn ir Ni tarp minėtų faktorių užima tarpinės padėties ir jų reikšmingumas visai duomenų dispersijai yra per mažas, kad susiformuotų atskiri faktoriai, tačiau jų savarankiškumas nulemia sąlygiškai mažą (61,7 %) faktorių duomenų dispersijos paaiškinamumą.

Kitų tyrėjų atlikti tyrimai Varėnio, Glėbo, Balčio ir Lydekio ežeruose parodė panašias tendencijas kaip ir Talkšos ežere. Autoriai nurodo, kad viršutiniuose sapropelio sluoksniuose Cr koncentracijos padidėja 8 kartus (Budavičius 2003). Atlikti tyrimai Talkšos ežero sapropelyje parodė, kad viršutiniojo 0–0,5 m sluoksnio Cr koncentracija didesnė daugiau kaip 4 kartus, Ni – 3,8 karto. Tačiau palyginus 0,25–0,65 gylyje esančias Cr koncentracijas sapropelyje su gilesniuose sluoksniuose nustatytomis šio metalo koncentracijomis, gaunamos kaip ir R. Budavičiaus (Budavičius 2003) atliktuose tyrimuose labai panašios – t. y. 8,6 karto didesnės Cr koncentracijos.

Kiti atlikti sunkiųjų metalų Talkšos ežero sapropelyje tyrimai parodė skirtingus rezultatus. Talkšos ežero irklavimo trasos inžinerinių geologinių tyrimų ataskaitoje nurodomi Cr ir Ni kiekiai ežero biogeniniame dumble fonines koncentracijas viršija atitinkamai 16,8 ir 8,2 karto (Keraševičius *et al.* 2008).

Talkšos ežero valymo darbų tyrimų ataskaitoje nurodoma, kad tyrimams ėminiai buvo imti iš ežero dugno nuosėdų fragmentiškai skirtingose vietose ir iš skirtingų gylių, dėl to rezultatai labai nesistemiški. Ataskaitoje pateikta didžiausia Cr koncentracija buvo nustatyta 2,3–3,0 m gylyje šiaurinėje ežero dalyje ir ji foninę koncentraciją biogeninėse nuosėdose viršijo 13,5 karto, Ni koncentracijos šie mokslininkai netyrė (Frisk *et al.* 2004). Tokią duomenų tyrimų neatitiktį galėjo nulemti skirtingos tyrimų vietų pasirinkimas, ėminių paėmimo gylių ir metodų skirtumas, analizės paruošimo metodų ir prietaisų skirtumai, tačiau nemažą įtaką turėjo ir mėginiuose esančių organinių medžiagų kiekiai. Kaip buvo minėta anksčiau, analizuotuose mėginiuose organinės medžiagos kiekiai buvo didesni ir tokiam sapropelyje sunkieji metalai yra šiek tiek praskiesti. Galima teigti, kad paimtuose mėginiuose iš kitų ežero vietų, kur organinės medžiagos yra iki 40 %, sunkiųjų metalų kiekiai bus didesni. Talkšos ežero sapropelio mėginio sunkiųjų metalų pokytis, priklausomai nuo slūgsojimo gylio, pateiktas 2.10 paveiksle.



2.10 pav. Sunkiųjų metalų (Ni, Pb, Cu, Zn, Cr, Mn) koncentracijos Talkšos ežero sapropelyje (gylis matuojamas nuo ežero dugno paviršiaus)

Fig. 2.10. The concentration of heavy metals (Ni, Pb, Cu, Zn, Cr, Mn) in Talkša lake sapropel (depth measured from the bottom of the lake surface)

Vertinant Talkšos ežero sapropelį pagal LAND 20–2005, matyti, kad dumblo sluoksniai (horizontai) nėra užteršti sunkiaisiais metalais, o jame esančias metalų koncentracijas galima traktuoti kaip vertingų mikroelementų kiekius. Talkšos ežero sapropelis yra priskiriamas I kategorijos dumbliui, nors ežere esančio sapropelio vertikaliajame pjūvyje yra sluoksnių, kurie yra labiau užteršti sunkiaisiais metalais

(40–50 cm gylyje $Cr = 257,5$ mg/kg), tačiau kituose gyliuose šios koncentracijos labai sumažėja ir didelės įtakos visam sapropelio sluoksniui neturi.

Šiaulių miesto Talkšos ežero ir jo prieigų kompleksinio sutvarkymo ir tarptautinės irklavimo bazės įrengimo poveikio aplinkai vertinimo ataskaitoje nurodoma, kad ežero dumbblas priskiriama I nuotekų dumblo kategorijai (Baubinas 2003). Skirtingų tyrėjų atlikti tyrimai skirtingais laikotarpiais nurodo skirtingo lygio užterštumą sunkiaisiais metalais Talkšos ežero sapropelyje (Taraškevičius, Gregorauskas 1993; Budavičius, Kadūnas 1999; Budavičius 2003; Baubinas 2003; Frisk *et al.* 2004; Keraševičius *et al.* 2008). Norint tiksliau įvertinti ežero sapropelio užterštumo lygius, reikėtų atlikti detalesnius nuosėdų tyrimus skirtingose ežero vietose, nuodugniai analizuojant apie 1 m ežero sapropelio sluoksnį.

Sapropelio cheminė sudėtis ir užterštumo laipsnis priklauso nuo daugelio faktorių. Urbanizuotuose teritorijose esantys vandens telkiniai ir jų dugno nuosėdos yra labiau užterštos, negu toliau nuo miestų esantys telkiniai. Lietuvos ežeruose susikaupia skirtingos sudėties sapropelis, kurio užterštumas sunkiaisiais metalais skiriasi. Sapropelis pasižymi didelėmis sorbcinėmis savybėmis, todėl didžiausios sunkiųjų metalų koncentracijos visuose gręžiniuose randamos paviršiniuose sluoksniuose, o gilesniuose sluoksniuose sunkiųjų metalų koncentracijos palaipsniui mažėja.

Vertinant Talkšos ežero šiaurinės ežero pakrantės sapropelį pagal LAND 20–2005, matyti, kad sapropelis nėra užterštas sunkiaisiais metalais, o jame esančias šių metalų koncentracijas galima traktuoti kaip vertingų mikroelementų kiekius. Išgautas iš šios ežero dalies sapropelis dėl skirtingų sluoksnių susimaišymo galėtų tapti vertinga bei plačiai ūkinėms reikmėms panaudojama iškaskena.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Ištirti trijų Lietuvos ežerų skirtingų tipų sapropelio mėginiai: Poežerių, Medžialenkės ir Talkšos. Gaminant briketus su sapropeliu ir priedais drėgmė yra būtina tam, kad spaudimo metu biomasė geriau sukibtų. Medžialenkės ir Talkšos ežerų sapropelio mėginių drėgmė yra artima rekomenduotinai briketų gamybai (73 % ir 80 %), o Poežerių ežero sapropelis pagal drėgmės kiekį (58,7 %) tinka granulių gamybai.
2. Ištirtuose sapropelio mėginiuose vyrauja anglis – 38–58 %, deguonis – 37 %, nedidelę dalį sudaro azotas – 1,1–4,2 % ir siera – 0,1–0,7 %, kitų elementų randami labai maži kiekiai. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais, pagal cheminių elementų ir anglies kiekius organinis (Medžialenkės ežero) sapropelis tinka deginimui.

3. Atsižvelgiant į organinių medžiagų kiekį, kuris yra svarbiausias šilumingumo faktorius, tirtųjų Lietuvos ežerų sapropelio mėginiai skirstomi į skirtingas kategorijas: Poežerių ežero sapropelyje organinės anglies kiekis siekia apie 44,0 %, t. y. silicio – organinis sapropelis, Talkšos ežero sapropelyje svyravo – 26,0–48,0 %, jis įvardijamas kaip silicinis, Medžialenkės ežero sapropelyje organinių medžiagų kiekis siekia 85 %, t. y. organinis sapropelis, jis gali būti naudojamas biokuro briketų gamybai ir deginimui.
4. Atlikus sunkiųjų metalų koncentracijų tyrimus gauta, kad silicio – organiniame, organiniame ir siliciniame sapropelyje nustatyti sunkiųjų metalų kiekiai neviršija LAND 20–2005 normatyve nurodytų didžiausių leidžiamų užterštumo lygių nuotekų dumblo kiekių, todėl jis gali būti naudojamas tręšimui, rekultivavimui ir deginimui. Visi sapropelio mėginiai priskiriami I dumblo kategorijai ir gali būti naudojami be apribojimų.
5. Atlikus antropogeniškai užteršto Talkšos ežero sapropelio sunkiųjų metalų koncentracijų tyrimus nustatyta, kad, priklausomai nuo slūgsojimo gylio, didžiausios sunkiųjų metalų koncentracijos randamos paviršiniuose sluoksniuose todėl, kad sapropelis pasižymi geromis sorbcinėmis savybėmis. Gilesniuose sapropelio sluoksniuose sunkiųjų metalų koncentracijos palaipsniui mažėja.
6. Išanalizavus atliktus skirtingų Lietuvos ežerų sapropelio tyrimų rezultatus nustatyta, kad biokuro briketų gamybai su sapropelio rišiklio tinkamiausias yra organinis Medžialenkės ežero sapropelis. Šio sapropelio drėgnis yra 73 % ir artimas rekomenduojamajam, sunkiųjų metalų koncentracijos neviršija LAND 20–2005 nustatytų reikšmių, organinių medžiagų kiekis siekia 85 %, taigi tolesniems tyrimams bus naudojamas Medžialenkės ežero sapropelis.

Briketų su sapropeliu mechaninių savybių tyrimas

Lietuvoje bei užsienyje sparčiai populiarėja biokuro briketų ir granulių panaudojimas šilumos gamybai. Siekiant plėtoti Lietuvos biokuro gamybos ir naudojimo sektorių, reikia tobulinti pirminių biokuro produktų gavybą, pradėti naujų biomasės rūšių arba mišinių naudojimą.

Siekiant gauti didesnio šilumingumo biokurą yra naudojamas presavimas. Presuotas biokuras gaminamas briketų (dydis 30–100 mm) ir granulių (6–12 mm) pavidalu. Perdirbimo metu, esant aukštam slėgiui, biokure esančios ertmės suspaudžiamos. Presavimo metu nevyksta jokie cheminiai procesai, kuro šiluminė vertė masės vienetui nedidėja, tačiau didėja tūrio vienetui. Supresuotas sausas biokuras veikiant grybams ir mikroorganizmams nepradedą irti, todėl jį galima saugoti ilgesnį laiką. Dėl mažo drėgnumo ir didelės šiluminės vertės briketų ir granulių gabenimas ir saugojimas yra pigesnis (Петрова *et al.* 2007; Vares *et al.* 2007).

Svarbi briketų savybė yra jų mechaninis patvarumas, t. y. atsparumas gniuždant ir lenkiant. Ši savybė labai svarbi briketus sandėliuojant, perkraunant arba transportuojant.

Sapropelio, kaip rišiklio, panaudojimo statybinių medžiagų gamybai tyrimai buvusioje Sovietų Sąjungoje buvo pradėti dar XX a. 6-ajame dešimtmetyje. Susidomėta sapropelio klijingumu, jis būdingas organiniam sapropeliui, turinčiam 2–5 % azoto. Nustatyta, kad, formuojant įvairius gaminius, sapropelis suteikia

jiems didesnio tvirtumo (Бракш 1971; Лопотко 1974). Lipnumas ir didelis drėgmės kiekis leidžia sapropelį naudoti kaip rišamąją medžiagą statybos pramonėje ir biokuro briketų gamyboje padidinant bandinių mechaninį patvarumą.

Šio tyrimo tikslas yra nustatyti mišrios sudėties biokuro briketų su sapropelio rišikliu formavimo masės sudėtį, sapropelio įtaką biokuro briketų mechaniniam patvarumui (atsparumas gniuždant ir stipris lenkiant). Tyrimams atlikti buvo pagaminti briketai (sapropelio ir durpių, durpių, sapropelio ir medžio pjuvenų, medžio pjuvenų, sapropelio ir šiaudų, šiaudų). Skyriaus tematika paskelbtas vienas autorės straipsnis (Kozlovskā *et al.* 2012a).

3.1. Saproelio briketų paruošimo metodika

Atlikti sapropelio mėginių iš skirtingų Lietuvos ežerų tyrimai parodė, jog sapropelis skiriasi cheminių elementų sudėtimi, organinės anglies bei sunkiųjų metalų kiekiais. Saproelio mėginių analizė (2 skyrius) parodė, jog pagal cheminių elementų ir organinės anglies kiekius briketams gaminti ir deginti tinkamas organinis Medžialenkės ežero sapropelis. Organinis sapropelis turi rišamųjų savybių, jo gavybos ištekliai ir panaudojimo galimybės Lietuvoje yra gana didelės, todėl jis buvo panaudotas kaip rišamoji degi medžiaga briketų su kitu kuru gamybai.

Briketams su sapropelio rišikliu gaminti buvo naudojami: organinis sapropelis (kuriame organinių medžiagų kiekis sausoje masėje siekia $85 \pm 2\%$, $\text{pH} = 5,9 \pm 0,4$), durpės (organinių medžiagų kiekis sausoje masėje siekia $87 \pm 2\%$, $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$), medienos apdirbimo atliekos – medžio pjuvenos (drėgmės kiekis siekia $7 \pm 1\%$), šiaudai (jų drėgnis siekia $10 \pm 1\%$). Buvo naudojamas nepersijotas ($< 5\text{ mm}$) sapropelio mėginys, kuriame drėgmės kiekis siekia 73% . Briketai su sapropelio rišikliu susideda iš organinio sapropelio ir organinių priedų. Kaip organiniai priedai buvo naudojami durpės, medžio pjuvenos ir šiaudai.

3.1 paveiksle pateiktas presavimo įrenginys, kuriuo buvo gaminami įvairios sudėties briketai. Šia presavimo forma galima suformuoti 22 cm ilgio, 10 cm pločio ir 7 cm storio (arba aukščio) briketus. Viršutinėje ir apatinėje presavimo formos dalyje, tarp kurių spaudžiamas mėginys, išgręžtos skylutės vandeniui iš sapropelio mišinių ištekti. Briketai buvo presuojami 26 kPa slėgiu išlaikant vienodas presavimo sąlygas, t. y. bandinys buvo išlaikomas po 92 kg apkrova 15 sekundžių , kad iš mėginio pasišalintų didžioji dalis vandens ir susiformuotų patvarus kuro briketas. Nustatyta, kad ilgesnis presavimo laikas didesnės įtakos rezultatams neturi.



3.1 pav. Biokuro briketų (220 x 100 x 70 mm) gamybos įrenginys
Fig. 3.1. Device for biofuel briquettes (220 x 100 x 70 mm) production

Tyrimams naudota 10 litrų talpa, kur atitinkamu santykiu gaunami šie mišiniai: sapropelis su durpėmis; sapropelis su medžio pjuvenomis; sapropelis su šiaudais (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Briketų su sapropelio rišikliu mišiniai

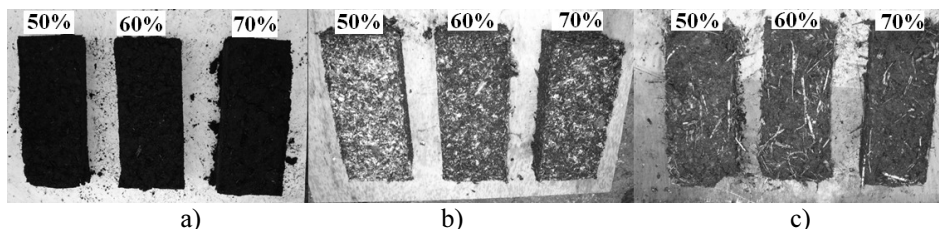
Table 3.1. The mixture of briquettes with sapropel binder

	Sapropelio kiekis, %	Durpių kiekis, %
Sapropelio ir durpių briketai	50	50
	60	40
	70	30
	Sapropelio kiekis, %	Pjuvenų kiekis, %
Sapropelio ir pjuvenų briketai	50	50
	60	40
	70	30
	Sapropelio kiekis, %	Šiaudų kiekis, %
Sapropelio ir šiaudų briketai	50	50
	60	40
	70	30

Briketai su sapropelio rišikliu – tai ekologiškas kieto kuro produktas, kuris gali būti naudojamas buitiniuose visų tipų kietojo kuro katiluose ir krosnyse šiluminei energijai gaminti. Sapropelio ir priedų mišinį tikslinga briketuoti presuojant į stačiakampius. Šios formos briketai gali būti deginami krosnyse ir buitiniuose katiluose, tačiau automatiškai tiekti į pakurą jie nėra tinkami, nes yra didesni nei įprastiniai briketai. Automatinio tiekimo metu tokie briketai pradėtų trupėti, o tuo pačiu sumažėtų jų šiluminė vertė.

Tyrimams naudoti briketai, kurie pagaminti anksčiau nurodytu atitinkamu santykiu, pateikti 3.2 paveiksle.

Mišinio masės džiovimo metu sapropelio ir durpių briketų (3.2a pav.), kuriuose yra po 50 % komponentų, atsirado smulkių įtrūkimų, tačiau išdžiūvę briketai stabiliai sukibo. Durpės sugėrė dalį sapropelio drėgmės, todėl biomase spaudimo metu gerai sukibo. Nestabiliausiai sukibo briketas, kuriame sapropelio buvo daugiausiai, t. y. 70 %, kadangi mišinio masėje esantis per didelis drėgmės kiekis sutrukdė briketui susiformuoti. Dėl didelio sapropelio kiekio bandinyje briketas pasidaro purus ir išdžiūvęs suyra.



3.2 pav. Briketai su sapropelio rišikliu: a) sapropelis ir durpės; b) sapropelis ir pjuvenos; c) sapropelis ir šiaudai

Fig. 3.2. Briquettes with sapropel binder: a) sapropel and peat; b) sapropel and sawdust; c) sapropel and straw

Sapropelio ir pjuvenų briketai (3.2b pav.) pagaminti atitinkamu santykiu kaip ir sapropelio su durpėmis briketai. Visi šio tipo briketai gamybos metu labai gerai sukibo ir jokių įtrūkimų nebuvo pastebėta. Briketai, kurių sudėtyje buvo 70 % sapropelio, išdžiūvę lengvai suyra, kaip ir sapropelio su durpėmis briketų atveju.

Sapropelio ir šiaudų briketų (3.2c pav.) gamybos principas toks pats, kaip ir prieš tai minėtų sapropelio ir durpių, sapropelio ir pjuvenų briketų. Geriausias ir tvirčiausias yra briketas, kurio mišinio sudėtyje yra 50 % sapropelio, panašiai kaip ir sapropelio su durpėmis briketuose.

Briketai su sapropelio rišikliu ruošti natūraliomis oro sąlygomis. Vasaros metu pagaminti briketai buvo palikti džiūti lauke po stogu, rudens laikotarpiu pagaminti briketai džiūvo uždaroje ir gerai vėdinamoje patalpoje. Natūraliai džiūdami briketai šiek tiek deformuodavosi dėl nevienodo vandens pašalinimo. Mišiniai, kuriuose priedų yra daugiausiai (50 %), džiūsta daug greičiau, palyginti su kitais mišiniais. Išdžiūvę skirtingos sudėties briketai su sapropelio rišikliu deginti pagal parengtą metodiką.

Taigi akivaizdu, kad šalia tradicinio biokuro atsiranda geros perspektyvos diegti naujas technologijas naudojant energijos šaltinius, tokius kaip sapropelis. Įvertinus briketų džiovimo metu atsiradusius įtrūkumus ir suirimo požy-

mius, nustatyta, kad geriausiai tinkami eksploatuoti (transportuoti, sandėliuoti ir t. t.) briketai, kurių sudėtyje yra ne daugiau kaip 50 % sapropelio ir ne mažiau 50 % priedų.

Sapropelio ir pjuvenų briketų paruošimo metodika

Atlikti briketų bandinių gamybos tyrimai parodė, kad briketai, į kurių sudėtį įeina ne daugiau kaip 50 % sapropelio, eksploatavimo atžvilgiu yra geriausi. Remiantis užsienio autorių patirtimi gaminant briketus su sapropelio rišikliu (Кирейчева, Хохлова 1998; Карабанов *et al.* 2003; Косов, Беляков 2004; Петрова *et al.* 2007; Nikolaeva *et al.* 2009), nuspręsta sapropelį naudoti tik kaip rišamąją medžiagą gaminant papildomus sapropelio ir pjuvenų briketus. Pagrindinis šių briketų mišinio komponentas yra medžio pjuvenos.

Nustatant optimalų sapropelio ir pjuvenų kiekį formavimo masėje sapropelio santykiai buvo pasirinkti atsižvelgiant į užsienio bei Lietuvos autorių atliktų tyrimų rezultatus (Кирейчева, Хохлова 1998; Geištoraitis, Ciūnys 2001; Карабанов *et al.* 2003; Косов, Беляков 2004; Петрова *et al.* 2007; Bieliauskas 2007; Nikolaeva *et al.* 2009; Germanavičius 2009).

Rusijos mokslininkų (Косов, Беляков 2004) patente pateikiama, jog optimalus organinio sapropelio kiekis briketų mišinyje su kitu kuru (medžio pjuvenos ir durpės) turi būti iki 30 %. Šie mokslininkai teigia, kad padidėja šiluminė tokių briketų vertė, mechaninis patvarumas ir degimo procesas vyksta ilgiau nei briketų be sapropelio. N. Bieliausko (2007) ir G. Germanavičiaus (2009) darbuose rišamoji medžiaga – organinis sapropelis yra naudojamas termoizoliacinių plokščių gamybai. Šių mokslininkų teigimu, didžiausias sapropelio kiekis mėginyje su šiaudais arba medžio pjuvenomis gali siekti iki 35 %. Termoizoliacinės plokštės, į kurių sudėtį įeina 35 % sapropelio, yra mechanškai patvaresnės už plokštes su mažesniu sapropelio kiekiu mėginiuose (Bieliauskas 2007; Germanavičius 2009). Akmens anglies briketų bandinių mechaniniam patvarumui pagerinti buvo naudojama 10 % organinio sapropelio, kaip tai nurodyta L. A. Petrovos (2007) ir L. Nikolajevos (2009, 2011) darbuose (Петрова *et al.* 2007; Nikolaeva *et al.* 2009; Николаева 2011).

Per mažas sapropelio kiekis neleidžia mišiniui sukibti ir kuro briketas būna nepatvarus, o per didelis sapropelio kiekis tam tikru atveju trukdo suformuoti mėginį dėl didelio vandens kiekio formavimo masėje, dėl to briketas praranda stabilią formą.

Briketų gamybos procese naudojamos tik švarios medžio pjuvenos ir organinis sapropelis, jokie papildomi komponentai ar lipalai nėra maišomi. Sapropelio–pjuvenų briketams pagaminti naudoti šie komponentai: medienos apdirbimo atliekos – medžio pjuvenos (organinės medžiagos kiekis sausoje masėje siekia 43 ± 1 %, drėgmės kiekis siekia 7 ± 1 %) ir organinis sapropelis (organinės medžiagos kiekis sausoje masėje siekia 85 ± 2 %, pH = $5,9 \pm 0,4$). Medienos apdir-

bimo atliekų mišinio sudėtyje yra skirtingų medienos rūšių (lapuočių ir spygliuočių) medžio pjuvenų, o taip pat susmulkintos žievės drožlių. Briketams formuoti naudojama medžio pjuvenų frakcija kinta 1–5 mm ribose. Kadangi natūralus sapropelis turi daug drėgmės, o jam paruošti (džiovinti, briketuoti, granuliuoti, smulkinti) reikia nemažai sąnaudų, racionaliausia naudoti natūralios drėgmės sapropelį. Naudojamas nepersijotas sapropelio mėginys, kurio drėgmės kiekis siekia 73 %.

Tyrimams naudota 10 litrų talpa, kur atitinkamu santykiu maišomos medžio pjuvenos ir sapropelis (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. Pjuvenų briketų su sapropelio rišikliu mišiniai

Table 3.2. The mixture of sawdust briquettes with sapropel binder

	Sapropelio kiekis, %	Pjuvenų kiekis, %
Sapropelio ir pjuvenų briketai	40	60
	30	70
	20	80

Šios sudėties briketai presuoti 26 kPa slėgiu 15 sekundžių. Tiek laiko užtenka, kad iš briketo pasišalintų dalis vandens ir susiformuotų patvarus kuro briketas. Esant trumpesniai presavimo laikui, bandinys netinkamai susiformuodavo, t. y. neišimtas iš briketavimo formos pradėdavo trupėti ir lūžinėti. Pagaminti sapropelio su pjuvenomis briketai pateikti 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Pagaminti ir palikti džiuoti natūraliomis sąlygomis sapropelio – pjuvenų briketai

Fig. 3.3. Produced sapropel – sawdust briquettes are drying naturally

Gaminant sapropelio ir pjuvenų briketus svarbus ir neatsiejamas faktorius yra drėgmės kiekis medžiagoje: kuo didesnė yra drėgmė, tuo geriau vyksta medžiagų tarpusavio sukibimas. Būtina pagamintus briketus kuo geriau išdžiovinti, kadangi drėgmės kiekio svyravimas kure trikdo optimalų katilo darbo režimą, sunkina procesų kontrolę ir valdymą. Rekomenduojama briketus su sapropelio

rišikliu gaminti pavasario arba vasaros laikotarpiais tam, kad pagaminti briketai be papildomų energijos sąnaudų galėtų išdžiūti natūraliai, nepakenkiant medžiagų tarpusavio sukibimo procesui.

3.2. Briketų su sapropeliu atsparumo gniuždant ir stiprio lenkiant tyrimai

Sapropelis pagal savo struktūrą ir cheminę sudėtį gali būti naudojamas kaip rišamoji medžiaga briketų, statybinių medžiagų ir keramikos gamyboje. Rusijoje, Baltarusijoje ir Latvijoje dar praeitajame šimtetyje susidomėta organinio sapropelio klijuojamomis savybėmis, siekiant nors iš dalies pakeisti brangius ir aplinkai kenksmingus sintetinius rišiklius.

Nuo tokių mechaninių parametrų, kaip atsparumas gniuždant ir stipris lenkiant, priklauso, koku būdu pagaminti briketai su sapropelio rišikliu turi būti sudedami ir pakuojami (gulsčiai ar stačiai). Tokių briketų sandėliuoti palaidų maišuose negalima, kadangi sandėliavimo ir transportavimo metu jie gali trupėti. Pažeistų ir sutrūkinėjusių briketų šiluminė vertė mažėja, todėl svarbu, kad pagaminti briketai būtų mechaniškai patvarūs.

3.2.1. Briketų atsparumo gniuždant ir stiprio lenkiant tyrimų metodika

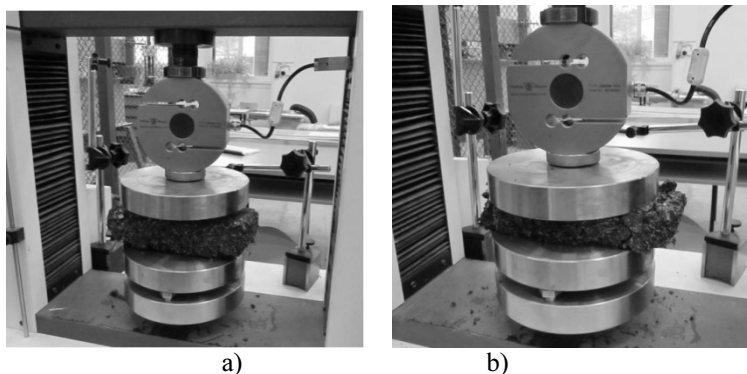
Gniuždymo ir stiprio lenkiant bandymai buvo atlikti mokomojoje VGTU Metalinių ir medinių konstrukcijų katedros laboratorijoje. Atliekant briketavimo bandymus naudota forma, iš kurios briketai išimami jų nesulaužius ar kaip nors kitaip nepažeidus. Bandymai atlikti panaudojus *Tinius Olsen H75kS* gniuždymo mašiną (3.4 pav.).

Prieš atliekant atsparumo gniuždant ir stiprio lenkiant tyrimus, išmatuotas kiekvieno suformuoto briketo gniuždomas plotas. Tyrime naudoti skirtingos sudėties briketai, kiekvienos sudėties briketų panaudota nuo 3 iki 5 vienetų. Parinkti kuro briketai buvo $22 \pm 0,5$ cm ilgio, $10 \pm 0,5$ cm pločio ir $7,0 \pm 0,5$ cm aukščio. Kiekvienas briketas buvo gniuždomas tol, kol gniuždymo jėga matavimo prietaise didėjo. Jėgai pradėjus mažėti, gniuždymas buvo stabdomas. Briketų stipris lenkiant buvo matuojamas analogiškai.

Pagamintų briketų atsparumas gniuždymui (R) apskaičiuojamas pagal formulę (Buska, Gailius 2005):

$$R = F/A \quad (3.1)$$

čia: F – gniuždymo jėga, kN; A – gniuždomas plotas, m^2 ($0,022 m^2$).



3.4 pav. Briketų atsparumo gniuždant bandymas: a) briketo paruošimas gniuždymui; b) briketo gniuždymas

Fig. 3.4. Briquette compressive strength test: a) briquette preparation to compress; b) briquette compression

Briketų stipris lenkiant (f_m) išreiškiamas mėginio irimą sukeliančio maksimalaus lenkimo momento ir skerspjuvio ašinio atsparumo momento santykiui ir yra apskaičiuojamas pagal 3.2 formulę:

$$f_m = M/W \quad (3.2)$$

$$W = b \cdot h^2 / 6 \quad (3.3)$$

čia: b – briketo plotis, m; h – briketo aukštis, m; M – maksimalus lenkimo momentas, N·m; W – briketo skerspjuvio atsparumo momentas, m³ ($0,817 \cdot 10^{-4}$ m³).

3.2.2. Briketų atsparumo gniuždant tyrimų rezultatai

Atlikus skirtingos sudėties briketų atsparumo gniuždant tyrimus, nustatyta kad didžiausia gniuždymo jėga – 15,3 kN išmatuota, esant 30 % sapropelio brikete su medžio pjuvenomis, – 14,3 kN, esant 20 % sapropelio brikete su medžio pjuvenomis. Mažiausia 8,6 kN gniuždymo jėga išmatuota 70 % sapropelio ir 30 % šiaudų brikete (3.3 lentelė).

Šiaudų, kaip ir medžio pjuvenų, sandara susideda iš trijų tipų angliavandenių molekulių: celiuliozės, hemi-celiuliozės ir lignino. Ligninas atlieka klijų vaidmenį, sujungdamas ląsteles bei formuodamas audinį. Didžiausias skirtumas palyginti su medžio pjuvenų ir šiaudų audiniais, yra tas, jog šiauduose yra didesnė dalis hemi-celiuliozės bei mažiau lignino. Dėl šios priežasties šiaudų ląstelės pasižymi mažesniu atsparumu gniuždymui, o tuo pačiu ir lenkimui (Liubarskis 2006; Biekša *et al.* 2007). R. Ambrulevičiaus (2009) atlikti atsparumo gniuždant tyrimai su skirtingos sudėties biokuro briketais parodė, kad atsparumui padidinti

į briketuojamus šiaudus galima pridėti medienos pjuvenų. Pridėjus 50 % medienos, briketų atsparumas padidėja nuo 32–38 N iki 50–55 N. Didžiausio tankio briketai gaunami, briketuojant apie 10 % drėgmės šiaudus, tokių briketų mechaninis atsparumas trupinimui yra apie 20 % didesnis negu pagamintų iš 16–18 % drėgmės šiaudų (Ambrulevičius 2009).

3.3 lentelė. Briketų su sapropelio rišiklio gniuždymo jėgos rezultatai

Table 3.3. The compressive strength results of briquettes with sapropel binder

	Sapropelio kiekis, %	Durpių kiekis, %	F, kN
Sapropelio ir durpių briketai	50	50	13,5
	60	40	10,8
	70	30	9,6
	Sapropelio kiekis, %	Pjuvenų kiekis, %	
Sapropelio ir pjuvenų briketai	20	80	14,3
	30	70	15,3
	40	60	12,9
	50	50	12,1
	60	40	11,0
	70	30	9,2
	Sapropelio kiekis, %	Šiaudų kiekis, %	
Sapropelio ir šiaudų briketai	50	50	9,7
	60	40	9,5
	70	30	8,6

Atlikus briketų su sapropelio rišiklio atsparumo gniuždant tyrimus matyti, kad mažiausia 8,6 kN (86 N) jėga išmatuota 70 % sapropelio ir 30 % šiaudų briketuose yra 1,6 karto didesnė, palyginti su R. Ambrulevičiaus (2009) šiaudų ir medienos pjuvenų briketais (55 N), o didžiausia išmatuota jėga 15,3 kN (153 N) 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketuose yra 2,8 karto didesnė.

Kitų Lietuvos mokslininkų atlikti tyrimai (Bieliauskas 2007; Germanavičius 2009) su sapropeliu, naudojant jį kaip rišamąją medžiagą termoizoliacinių plokščių gamyboje, parodė, jog mėginių stipris gniuždant didėja didėjant sapropelio kiekiui plokštelėse nuo 15 iki 35 %. Mokslininko G. Germanavičiaus (2009) teigimu, formuojant mėginius mažesniu slėgiu mažiau išsisunkia vandens, o kartu su juo sumažėja rišamųjų medžiagų. Taip paaiškinamas didesnis stiprumas gniuždant esant mažesnio presavimo slėgiui.

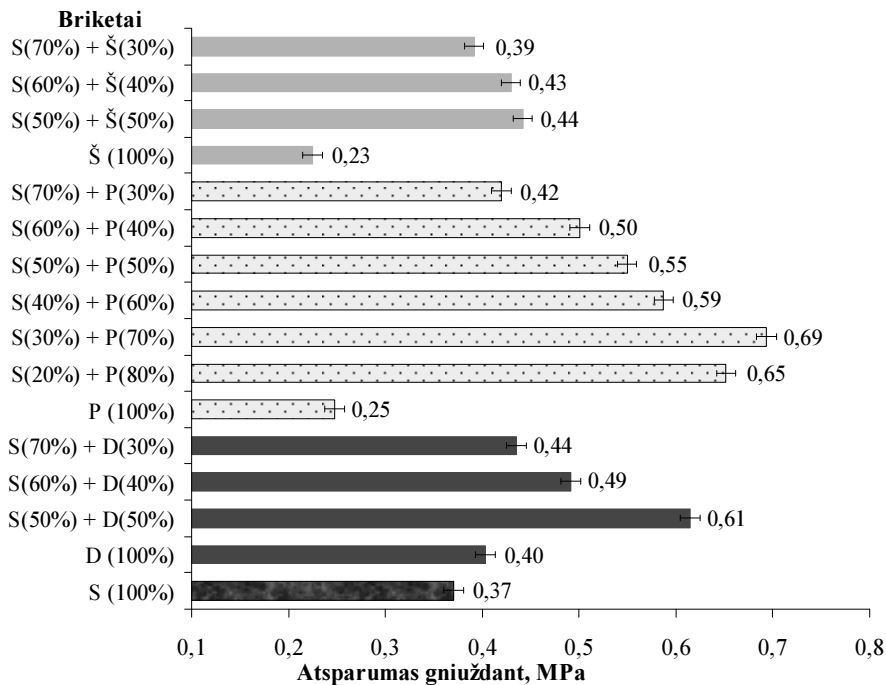
Rusijos mokslininkų (Петрова *et al.* 2007) atlikti bandymai parodė, jog panaudojus 10 % sapropelio, kaip rišamosios medžiagos, didėja gaminamųjų briketų atsparumas gniuždymui. Rekomenduojama gaminant briketus arba granules naudoti organinį sapropelį, kur organinis kiekis siekia apie 75 %, o drėgmė 70–75 %. Šių mokslininkų teigimu, organinis sapropelis, naudojamas kaip rišiklis, dėl lipnumo leidžia gauti briketą su geromis fizinėmis ir mechaninėmis savybėmis. Atlikti gniuždymo bandymai parodė, jog briketų gamybai panaudojus 10 % sapropelio kuro briketų atsparumas padidėjo nuo 6,12 iki 12,13 MPa.

L. A. Nikolajeva (2011) gamino skirtingos sudėties briketus be sapropelio ir kaip rišamąją medžiagą panaudojo sapropelį. Briketai formuoti 180 minučių esant 230 °C temperatūrai ir 150 MPa suspaudimo jėgai. Briketai, į kurių sudėtį įėjo 10 % sapropelio, buvo mechanškai patvaresni nei briketai, kurių sudėtyje nebuvo sapropelio. 75 % akmens anglies, 15 % deguto ir 10 % sapropelio briketų atsparumas gniuždant siekė 14 MPa, 80 % akmens anglies– ir 20 % deguto briketų siekė 9 MPa, tuo tarpu 85 % akmens anglies ir 15 % deguto briketų atsparumas gniuždant siekė tik 7 MPa (Николаева 2011). Šios mokslininkės tyrimų rezultatai parodė, jog panaudojus kaip rišamąją medžiagą nedidelį kiekį sapropelio (10 %) gaunami aukštos kokybės ir didelio atsparumo kuro briketai.

Briketų stiprio gniuždant tyrimai parodė, jog didžiausią atsparumą turi sapropelio su medžio pjuvenomis briketai. Mažiausias atsparumas gniuždymui išmatuotas briketuose, kurių sudėtyje buvo 70 % sapropelio ir 30 % priedų (3.5 pav.).

Mažiausias 0,39 MPa atsparumas gniuždant išmatuotas 70 % sapropelio ir 30 % šiaudų briketuose, panašios vertės 0,44 MPa išmatuotos 70 % sapropelio ir 30 % durpių bei 0,42 MPa 70 % sapropelio ir 30 % medžio pjuvenų briketuose. Iš 3.5 paveikslą matyti, kad briketai, kuriuose sapropelio kiekis siekia 30 %, o medžio pjuvenų 70 %, yra tvirčiausi, jų atsparumas gniuždant siekia 0,69 MPa. Mažesnis 0,65 MPa atsparumas gniuždant išmatuotas 20 % sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų kuro briketuose.

Palyginimui, pagal anksčiau pateiktą briketų paruošimo metodiką, buvo pagaminti 100 % šiaudų, 100 % durpių, 100 % medžio pjuvenų ir 100 % sapropelio briketai. Atlikti 100 % šiaudų briketų atsparumo gniuždant tyrimai, parodė, kad 50 % sapropelio ir 50 % šiaudų briketų atsparumas gniuždant yra didesnis 1,9 karto. Medžio pjuvenų (100 %) briketų atsparumas gniuždant yra mažesnis net 2,8 karto, palyginti su 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenomų briketais. 100 % durpių briketų atsparumas gniuždant siekia 0,40 MPa ir yra didesnis už 70 % sapropelio ir 30 % šiaudų briketuose išmatuotą vertę. Tuo tarpu 100 % sapropelio briketų atsparumas gniuždant siekė 0,37 MPa ir yra didesnis 1,6 karto už 100 % šiaudų briketų atsparumą gniuždant, tačiau mažesnis už 100 % durpių briketų.



3.5 pav. Suformuotų briketų su sapropelio rišikliu atsparumas gniuždant (S – sapropelis; D – durpės; P – medžio pjuvenos; Š – šiaudai)

Fig. 3.5. The compressive strength in briquettes with the sapropel binder (S – sapropel; P – peat; SW – sawdust; ST – straw)

Mokslininko N. Bieliausko (2007) atlikti tyrimai gniuždant pjuvenų termozoliacines plokštes su sapropelio rišikliu parodė, jog naudojant plokštėms 35 % sapropelio, jų atsparumas gniuždant yra didžiausias 1,69 MPa, kai bandinių presavimo slėgis yra 4,5 MPa. Panaudojus 25 % sapropelio, plokščių atsparumas gniuždant yra mažesnis 0,68 MPa, o bandinių presavimo slėgis yra 0,5 MPa.

Atlikti atsparumo gniuždant bandymai su briketais, presuotais rankiniu būdu, parodė, jog panaudojus 30 % sapropelio gaunama 0,69 MPa vertė, kuri yra artima kitų mokslininkų gautiems rezultatams. Briketų bandiniuose, kuriuose sapropelio ir durpių buvo po 50 %, atsparumas gniuždant siekė 0,61 MPa, ši vertė yra artima 20 % sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketų vertei. Sapropelio, naudojamo briketų gamybai, drėgmė siekė 73 %. Kuro briketai, turintys 70 % sapropelio, rankinio presavimo metu blogiau sukibo, dėl to jų atsparumas gniuždant buvo mažesnis, negu mėginiuose, kuriuose sapropelio buvo 50 %. Įvertinus šiuos faktus, galima teigti, kad tyrimų rezultatams įtakos galėjo turėti tiek didelės drėgmės kiekis bandiniuose, tiek per mažas presavimo slėgis.

Skirtingos sudėties briketų stiprio gniuždant tyrimai parodė, jog didžiausią atsparumą turi 20 % ir 30 % sapropelio turintys briketai. Atsižvelgus į atsparumo gniuždant tyrimų rezultatus bei briketų gamybos metu atsiradusius bandinių defektus, nustatyta, kad tinkamiausi eksploatavimui yra briketai, kurių sudėtyje yra ne daugiau kaip 50 % sapropelio.

Atlikti tyrimai parodė, jog naudojant vietines žaliavas – ežerų sapropelį kaip rišamąją medžiagą biokuro briketams gaminti, gaunamas atsparesnis gniuždynui ir kokybiškesnis kuro briketas.

3.2.3. Briketų stiprio lenkiant tyrimų rezultatai

Pagaminti su sapropelio rišikliu briketai turi visapusiškai pasižymėti gerais parametrais, todėl buvo atliekami ne tik atsparumo gniuždant, bet ir stiprio lenkiant tyrimai. Sandėliavimo ir transportavimo metu briketai gali apsiversti ar būti kitaip paveikti, todėl svarbu, kad pagamintų briketų stipris lenkiant turėtų aukštą vertę.

3.4 lentelė. Briketų su sapropelio rišikliu stiprio lenkiant rezultatai

Table 3.4. The flexural strength results of briquettes with sapropel binder

	Sapropelio kiekis, %	Durpių kiekis, %	Stipris lenkiant f_m , MPa
Sapropelio ir durpių briketai	50	50	0,45
	60	40	0,43
	70	30	0,43
	Sapropelio kiekis, %	Pjuvenų kiekis, %	
Sapropelio ir pjuvenų briketai	20	80	0,58
	30	70	0,56
	40	60	0,50
	50	50	0,46
	60	40	0,45
	70	30	0,41
	Sapropelio kiekis, %	Šiaudų kiekis, %	
Sapropelio ir šiaudų briketai	50	50	0,41
	60	40	0,40
	70	30	0,41

Pagamintų briketų su sapropelio rišikliu stiprio lenkiant rezultatai pateikti 3.4 lentelėje, iš kurios matyti, kad didžiausia vertė gaunama sapropelio ir pjuvenų briketų bandymų metu. Didžiausias 0,58 MPa stipris lenkiant išmatuotas 20 % sapropelio ir 80 % pjuvenų briketuose. Mažesnis 0,56 MPa stipris lenkiant pasiekiamas esant 30 % sapropelio briquete su medžio pjuvenomis.

Kitų tyrime naudojamų briketų su sapropeliu stiprio lenkiant bandymų rezultatai tarpusavyje mažai skiriasi, jų stipris lenkiant kinta nuo 0,40 iki 0,50 MPa. Įtakos tokiems rezultatams galėjo turėti per didelis sapropelio kiekis mėginiuose, dėl to masė visiškai nesukibo. Briketų mišiniuose, kurių sudėtyje buvo daugiau kaip 30 % sapropelio, biomasės spaudimo metu sapropelio išamosios medžiagos pašalinio kartu su vandens pertekliumi, todėl didėjant sapropelio kiekiui mišinyje stipris lenkiant mažėja.

Mokslininkas N. Bieliauskas (2007) nustatė, kad įtakos mėginių atsparumui lenkiant turi apkrovos išlaikymo trukmė. Trumpam apkrovus mėginį jo atsparumas lenkiant didesnis negu apkrovą išlaikius ilgesnį laiko tarpą (15 min). Išlaikius apkrovą trumpai (apie 1–5 minutes) iš mėginio nespėja išsisunkti visas vanduo, todėl sapropelis lieka tokio drėgnio, kokiam esant jo lipnumas didesnis. Laikant apkrovą 10–15 min, iš bandinio išsisunkia daugiau vandens – sapropelis tampa sausesnis ir ne toks lipnus, tokiu būdu sumažinamas bandinių stipris lenkiant. Tačiau šis mokslininkas taip pat nustatė, kad, išlaikius apkrovą dar ilgiau, vanduo beveik nustoja sunktis, todėl sapropelio drėgnis, kaip ir lipnumas, nebesikeičia arba keičiasi nežymiai, taigi bandinio stipris lenkiant vėl ima didėti, kadangi, veikiant apkrovai ilgesnį laiką, sapropelio ir pjuvenų dalelės gali viena su kita geriau suartėti ir tvirčiau sulipti.

A. Germanavičius (2009) nustatė, jog esant didžiausiam sapropelio (35 %) kiekiui mišinyje su šiaudais (65 %) gaunamas didžiausias 0,26 MPa stiprumas esant mažiausiam 0,25 MPa presavimo slėgiui. Mažiausias 0,013 MPa stipris lenkiant išmatuotas plokštėje, kurios sudėtyje buvo 15 % sapropelio (Germanavičius 2009).

Lyginant tyrimo metu gautus rezultatus su kitų mokslininkų rezultatais, matyti, kad briketų iš sapropelio ir šiaudų stipris lenkiant, nepriklausomai nuo sapropelio kiekio bandiniuose, siekia 0,40 ir 0,41 MPa, tačiau atsparumo gniuždant tyrimai parodė, jog esant atitinkamam (iki 50 %) sapropelio kiekiui briketuose su šiaudais gaunamas mechanškai patvaresnis briketas.

Mokslininko N. Bieliausko (2007) atlikti stiprio lenkiant tyrimai parodė, kad pjuvenų termoizoliacinėms plokštėms naudojant 20 % sapropelio, jų stipris lenkiant siekia 0,63 MPa, kai bandinių presavimo slėgis yra 1,5 MPa. Išmatuotas didžiausias 0,58 MPa stipris lenkiant 20 % sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketuose yra artimas šio mokslininko gautiems rezultatams.

Plačiai naudojamas ir žinomas yra medžio pjuvenų arba šiaudų briketų spaudimo būdas – šaltasis presavimas. Tokiu būdu supresuoti briketai netrupa,

nes išsiskiria natūrali medžiaga – ligninas. Šiauduose, skirtingai nei medžio pjuvenose, lignino kiekis yra mažesnis, todėl dažnai reikalingas papildomas procesas, kuris užtikrintų briketų tvirtumą ir neleistų jiems saugojimo metu suirti. Šiaudus veikiant garu arba karštu vandeniu pasireiškia rišamosios lignino savybės. Dažniausiai patiekiamas garas, kurio temperatūra siekia 90–100 °C. Nenaudojant garus arba esant per mažam preso galingumui ligninas neišsiskiria ir tuomet reikia dėti klijų. Norint gaminti šiaudų arba medžio pjuvenų briketus rekomenduojama kaip rišamąją medžiagą naudoti organinį sapropelį, kuris padidintų ne tik atsparumą gniuždant, bet ir stiprį lenkiant. Nuo šių mechaninių savybių priklauso briketų kokybė (ypač šiluminė vertė), jeigu sandėliavimo ar transportavimo metu briketai pradėtų sutrupėti ar irti. Pagaminti briketai su sapropeliu krovimo ir transportavimo metu turi būti tvirti ir gerai atlaikyti smūgius.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atsižvelgus į briketų su sapropelio rišikliu gamybos ir džiūvimo metu atsirandančius defektus bei tolesnio irimo požymius, nustatyta, kad geriausiai tinkantys eksploatavimui briketai yra tada, kai jų sudėtyje naudojama ne daugiau kaip 50 % sapropelio.
2. Atlikti kuro briketų, kurių matmenys 220 x 100 x 70 mm, atsparumo gniuždant tyrimai parodė, jog didžiausiu 0,69 MPa atsparumu gniuždant pasižymi 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai. Atitinkamas sapropelio santykis briketė su priedais didina briketų atsparumą gniuždant. 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketų išmatuotas atsparumas gniuždant yra 2,8 karto didesnis, nei 100 % medžio pjuvenų briketų.
3. Briketų mišinių, kurių sudėtyje yra daugiau kaip 30 % sapropelio, formavimo metu sapropelis praranda rišamosios medžiagos savybes, todėl, didėjant sapropelio kiekiui mišinyje, stipris lenkiant mažėja 1,2 ir daugiau karto.
4. Gaminant briketus, rekomenduojama kaip rišamąją degią medžiagą naudoti organinį sapropelį, kuris galėtų padidinti ne tik briketų atsparumą gniuždant, bet ir stiprį lenkiant. Pagaminti aukšto šiluminingumo briketai su sapropeliu yra tvirti ir krovimo bei transportavimo metu gerai atlaiko smūgius. Eksperimentiniais tyrimai nustatyta, kad sapropelio, kaip rišamosios medžiagos, briketų gamybai panaudojimas suteikia medžiagai tvirtumo, todėl kuro briketas gaunamas kokybiškesnis.

Sapropelio briketų deginimas ir aplinkosauginis vertinimas

Lietuvos energetikos sektoriuje vis dar vyrauja energijos, naudojant importuojamus kuro išteklius, gamyba, todėl kuriant naujus produktus ir diegiant naujas technologijas būtina ieškoti galimybių, kurios didintų biomasės gamybos bei naudojimo potencialą.

Geras kuro sudegimas laikomas tada, kai kuras yra visiškai sudeginamas, o dūmuose lieka minimalus NO_x ir CO kiekis ir kai išsiskiria mažiausiai suodžių bei lakiųjų organinių junginių (LOJ).

Naudojant kaip rišamąją medžiagą biokuro gamybai sapropelį, galima pagaminti didelės energetinės vertės, mechaniskai patvarų ir aplinkai nekenksmingą biokurą. Rišamoji medžiaga – organinis sapropelis – dėl didelio šilumininkumo ir gero lipnumo gali būti naudojamas biokuroi gaminti. Briketų su sapropelio rišikliu degimo metu susidarantys teršalai yra nekenksmingi aplinkai, o susidarę pelenai gali būti naudojami tręšimui (Кирейчева, Хохлова 1998; Безруких *et al.* 2002; Косов, Беляков 2004).

Šio tyrimo tikslas – nustatyti briketų komponentų ir briketams gaminti naudojamų mišinių su sapropelio rišikliu šiluminės vertės ir išmatuoti išsiskiriančių dujinių teršalų koncentracijas briketų su sapropeliu degimo metu. Pagaminti briketai (sapropelio ir durpių, sapropelio ir medžio pjūvenų, sapropelio ir šiaudų) buvo deginami buitiniame katile, o degimo proceso metu matuojama išsiskirian-

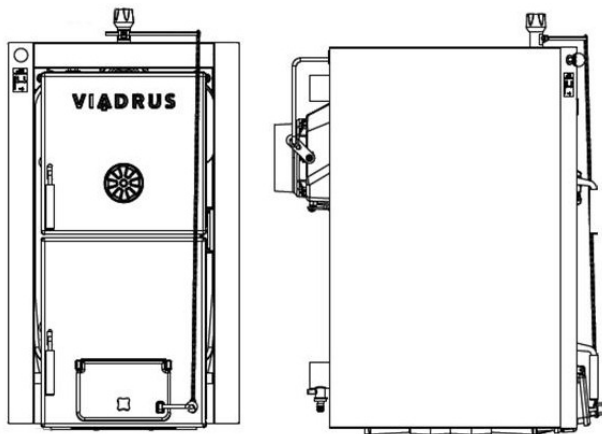
čių dujinių teršalų koncentracija. Skyriaus tematika paskelbti 2 autorės straipsniai (Kozlovskā-Kędziora, Petraitis 2009; Kozlovskā-Kędziora, Petraitis 2011; Kozlovskā *et al.* 2012a).

4.1. Dujinių teršalų koncentracijų nustatymo metodika

Sapropelio briketų deginimo įrenginys

Tyrimams pasirinktas 25 kW galingumo buitinis katilas su savaimine trauka (4.1 pav.). 25 kW galingumo universalus kietojo kuro katilas gali veikti gravitacinėse ir priverstinėse cirkuliacijos sistemose, jis naudojamas individualiam namui šildyti. Katilas turi 5 sekcijas, jo ilgis – 845 mm, plotis – 520 mm, aukštis – 1004 mm, svoris – 304 kg, degimo kameros ilgis – 434 mm, maksimali degimo produktų temperatūra – 280 °C, rekomenduotina temperatūra – 85 °C, dūmtraukio skersmuo – 156 mm, triukšmo lygis – 65 dB.

Prieš pradėdant tyrimą išvalomas deginimo įrenginys – krosnis, pašalinami visi pelenai. Į krosnį sudedami briketai ir uždegami. Nusistovėjus degimui oro mėginių ėmimo vietoje matuojamos degimo metu išsiskiriančios dujinių teršalų koncentracijos. Tyrimų metu periodiškai nustatomos anglies monoksido (CO), sieros dioksido (SO₂), azoto oksidų (NO_x), deguonies (O₂) ir kietųjų dalelių (KD) dūmuose koncentracijos, taip pat dūmų temperatūra teršalų matavimo vietoje bei temperatūra degimo kameroje. Sudegus vienam mėginiui imamas pelenų mėginys. Paėmus pelenų mėginį išvaloma ta krosnies dalis, kurioje kaupiasi pelenai. Tokia pačia tvarka deginami ir kiti briketai.



4.1 pav. Briketų deginimo įrenginys
Fig. 4.1. Briquettes combustion device

Temperatūra bei dujinių komponentų koncentracijos nustatomos „TESTO 350XL“ prietaisu. Dujos nuo kietųjų dalelių apvalomos– perleidžiamos per pluoštinį filtrą, ir tada analizės metu nustatomos anglies monoksido, sieros dioksido, azoto monoksido, azoto dioksido ir deguonies koncentracijos. Kietųjų dalelių koncentracija nustatoma svorio metodu.

Pagal reikalaujamą išvystyti galingumą biokurui deginti naudojami įrenginiai gali būti suskirstyti į atskiras grupes. Mažiausios galios (intervalas nuo 1 iki 10 kW) dažniausiai yra krosnys ir židiniai, kuriuose kuro tiekimas gali būti tiek automatizuotas (granulės), tiek rankinis (briketai). Tuo tarpu didžiausios galios įrenginiai naudojami jėgainėse, jų galingumas dažnai būna didesnis nei 5 MW. Likę vidutinės galios katilai naudojami individualių ir daugiabučių namų apšildinimui, taip pat centralizuotos šilumos tiekimo sistemose (Börjesson 2000; Bieksa *et al.* 2007).

Deginant kurą, kurio sudėtyje yra azoto (N), sieros (S) ir chloro (Cl), gaunamos azoto oksidų (NO_x), sieros dioksido (SO_2), chloro vandenilio (HCl) ir chlorintų angliavandenilių teršalų emisijos. Papildomai chloras veikia dioksidų ir furanų formavimąsi. Taip pat gali susiformuoti teršalų emisijos dėl nevisiško kuro sudegimo (Denafas *et al.* 2001).

Dujinių teršalų koncentracijų nustatymo prietaiso „TESTO-350XL“ charakteristika

Išmetamųjų teršalų koncentracijos, deginant skirtingos sudėties briketus, išmatuotos naudojant Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos ir darbo sąlygų mokslinio tyrimo laboratorijos turimą prietaisą „TESTO 350XL“ (4.2 pav.), kurio veikimas paremtas elektrocheminiu principu.

„TESTO 350XL“ įrenginys yra nešiojamasis matavimo prietaisas, skirtas atrankiniams tikrinimams ir matavimams vietoje. Jis turi daugiajutiklę įvestį ir integruotą diferencialinio slėgio zondą. Daugiajutiklei įvesčiai tinka labai didelis diapazonas zondu ir tai leidžia atlikti tikslius temperatūros, drėgmės, greičio, sūkuriavimosi, slėgio, apsisukimų per minutę (ppm), srovės ir įtampos matavimus. Vienu metu grafiniame displėjuje gali būti parodyta iki 6 matavimo kanalų. Kartu su „TESTO 350XL“ dujotakio dujų analizatoriaus dėžute valdymo įrenginys sudaro matavimo prietaisą, skirtą paprastam sudėtinių terminų procesų matavimui.

Diferencialinio slėgio matavimas. Valdymo įrenginys turi įtaisyta integruotą diferencialinio slėgio matavimo funkciją, t. y. funkciją, skirtą matavimams arba greičio matavimams.

Duomenų registratorius. Priklausomai nuo naudojimo, tarpusavyje per magistralę galima sujungti iki 8 dujotiekio dujų analizavimo įrenginių su skirtingais zondais ir iki 20 duomenų registratorių. Duomenų registratorius matuoja ir išsaugo dydžius, net jei yra neprijungtas prie valdymo įrenginio.



4.2 pav. Matavimo įrenginys „TESTO 350XL“
Fig. 4.2. „TESTO 350XL“ measuring instrument

Matavimas. Duomenų registratorius turi vidines atminties mikroschemas. Be programos kodo, programos atmintyje išsaugomi papildomi kalibraciniai duomenys. Matavimo įrašai, jų dydžiai ir konfigūraciniai duomenys išsaugomi duomenų atmintyje. Duomenų registratoriaus atmintyje gali būti įrašyta daugiausiai 250000 matavimo dydžių.

Standartiniai mėginio ėmimo zondai: standartinis mėginio ėmimo zondas – ilgis 335/700 mm; žarnos ilgis: standartinis – 2,2 m; medžiagos mėginio velenas – $T_{\max}$ - $+500^{\circ}\text{C}$, nerūdijantis plienas – 1,4361. Standartiniai mėginio ėmimo zondai turi termoelementus dujotiekio dujų temperatūrai matuoti.

Kietųjų dalelių koncentracijos dūmuose nustatymo metodika

Šis metodas yra skirtas kietųjų dalelių (dulkių) koncentracijai į atmosferą išmetamosiose dujose (LAND 28-98/M-08) nustatyti.

Metodo principas. Išorinio filtravimo būdu dulkių bandinys imamas, siurbiant dujas per bandinių ėmimo vamzdelį iš ortakio ir sulaikant dulkes filtravimo patrone, esančiame ortakio išorėje. Dujų srauto dulkėtumas nustatomas pagal filtro masių skirtumą. Nustatant dujų srauto dulkėtumą ortakyje, svarbiausi faktoriai yra bandinio ėmimo vietos parinkimas, dujų siurbimo greitis ir pasiurbtas dujų tūris, imant dulkių bandinį. Bandinį būtina paimti, esant pastoviam technologiniam režimui.

Prietaisai ir kita įranga: bandinių ėmimo vamzdelis su antgalių rinkiniu; filtravimo patronas, skirtas išoriniam filtravimui; aspiratorius *Migunov-822*; sekundmatis; analitinės svarstyklės 2 kl., padalos vertė – 0,1 mg; džiovavimo spinta; eksikatorius; filtrai AFA-VP-10 ir AFA-VP-20.

Filtrai, jų paruošimas. Mėginiai imti naudojant AFA-VP-10 ir AFA-VP-20 filtrus. Prieš svėrimą filtrai 20–30 minučių džiovinami eksikatoriuje (džioviklis – lydytas kalcio chloridas). Pasverti filtrai pincetu įdedami į permatomo popieriaus vokelius, po to dar į polietileninius maišelius.

Mėginio ėmimas. Siekiant gauti tikslius ir patikimus dulkių kiekių išmetamosiose dujose rezultatus, dulkių mėginiai imami tose vietose, kuriose buvo matuotas srauto greitis. Dulkėtumas matuojamas ortakio centre. Dulkėtos dujos iš ortakio siurbiamos bandinių ėmimo vamzdeliu ir nusodinamos ant pasverto filtro, kuris įstatytas į filtravimo patroną. Mėginio ėmimo trukmė – 2 minutės. Baigus vieno mėginio ėmimą, išjungiamo orapūtė, filtras su dulkėmis atsargiai išimamas iš patrono ir pakeičiamas nauju. Imami 3 mėginiai, o pagal gautus rezultatus apskaičiuojamas aritmetinis vidurkis.

Filtrų svėrimas. Paėmus dulkių mėginius, filtrai laikomi eksikatoriuje 2 valandas, po to pasveriami kartu su kontroliniais (tuščiais) filtrais, taip pat laikytais eksikatoriuje.

4.2. Sapropelio ir kitų briketų komponentų šiluminių verčių nustatymas

Kuro degimo šiluma vadinamas šilumos kiekis, gautas visiškai sudeginus 1 kg kietojo bei skystojo arba 1 n.m³ dujinio kuro. Skiriamos dvi kuro šiluminės vertės: aukšutinė ir žemutinė. Skirtumas tarp jų yra toks, kad į aukštutinę kuro degimo šilumą įeina šiluma, išsiskirianti kondensuojantis dūmuose esantiems vandens garams, kurie susidaro garuojant kure esančiai drėgmei ir degant vandeniliui (Švenčianas 2003; Niedziółka, Zuchniarz 2006; Biekša *et al.* 2007; The production... 2008). Aukšutinė šilumos vertė priklauso nuo cheminės kuro sudėties ir gali būti nustatoma laboratoriniu būdu, visų rūšių biomasei yra priimta $Q_a = 20,4$ MJ/kg. Žemutinė šiluminė vertė reikšmė gaunama iš aukšutinės šiluminės vertės atėmus šilumos kiekį, sukauptą vandens garuose.

Kieto kuro šilumingumas gali kisti dideliu intervalu – nuo 8 iki 30 MJ/kg (2000 kcal/kg – 7000 kcal/kg). Jei yra žinoma elementinė kietojo kuro sudėtis, galima apytiksliai paskaičiuoti šilumingumą naudojant empirines formules (Jaskelevičius 2009) (4.1):

$$K = 2,326 \left[145C + 610 \left(H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 40S + 10N_2 \right] \quad (4.1)$$

čia: K – šiluminė vertė, MJ/kg; C – anglies dalis bendroje sudėtyje, masės %; H_2 – vandenilio dalis bendroje sudėtyje, masės %; O_2 – deguonies dalis ben-

droje sudėtyje, masės %; S – sieros dalis bendroje sudėtyje, masės %; N_2 – azoto dalis bendroje sudėtyje, masės %.

Šiluminingumą galima nustatyti ir laboratoriniais bandymais naudojant kalorimetrą – prietaisą, skirtą cheminio arba biologinio proceso metu išsiskyrusiam šilumos kiekiui matuoti.

Šiluminių verčių nustatymo metodika

Briketams gaminti atskirų komponentų šiluminės vertės buvo nustatytos Latvijos valstybiniame medienos chemijos institute, kur bandinių šiluminė vertė buvo nustatoma peršaldytų sapropelių mėginiuose, Vroclavo technologijos universiteto Šiluminės technikos ir skysčių mechanikos institute, taip pat Lietuvos energetikos institute Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijoje, naudojant *IKA C5000* tipo kalorimetrą (4.3 pav.), kuris skirtas skystųjų ir kietųjų kuro mėginių energetinėms vertėms nustatyti. Šiluminė vertė matuota vadinamąja kalorimetrine bomba.

Naudojant kalorimetrinį metodą, kuro bandinys buvo deginamas deguonies pripildytoje kalorimetrinėje bomboje, kuri buvo panardinta į vandenį. Kuro šilumingumas apskaičiuotas pagal vandens temperatūros pakilimą. Kalorimetrinėje bomboje buvo deginamas sausas kuras. Kalorimetrinė bomba – cilindro formos indas, pagamintas iš nerūdijančio plieno. Ji susideda iš korpuso, dangčio ir tvirtinimo veržlės, taip pat skirtos sandarinti guminės tarpinės, įdėtos tarp korpuso ir dangčio. Du atvamzdžiai yra išvesti virš bombos dangčio – jie skirti deguoniui įleisti ir dujoms, gautoms įvykus degimo reakcijai, išleisti. Išleidimo mazgas yra uždarytas vožtuvu, kuris užsidaro savaime, kai tik bomboje sukuriama slėgis. Kol bomboje nėra perteklinio slėgio, jis uždaromas spyruokle. Deguonies išleidimo vamzdis, kuris taip pat yra vienas iš elektrodų, yra prijungtas vožtuvo apačioje. Išleidimo mazgas, vožtuvas ir vamzdelis nuo bombos dangčio yra izoliuoti. Antrasis elektrodas yra įsukamas į dangtį, apačioje jis susukamas į žiedo formą, į kurią įdedamas indelis su kuro bandiniu. Abu mazgai yra susukami su cilindru, kuris sujungtas su elektros laidu.

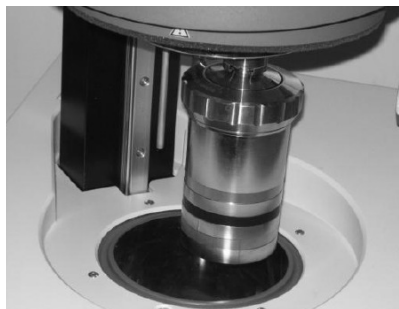
Kiekvienas mėginys, prieš patekdamas į kalorimetrinę bombą, supresuojamas į 1 g masės bandinį (4.3a pav.). Paruošus kalorimetrinę bombą (4.3b pav.) bandinys pamerkiamas į indą su vandeniu ir dedamas į kalorimetrą (4.3c pav.). Vandens temperatūra yra išlyginama maišant mentelėmis ir matuojama termometru. Norint užtikrinti pastovų degimo šilumos registravimą ir minimalią aplinkos įtaką matavimo sistemai, vandens indas dedamas į gerai izoliuotą kalorimetrinį indą. Izoliacijos paskirtis – išvengti šilumos nuostolių nuo vidinio indo ir tuo pačiu matavimą padaryti nepriklausomą nuo aplinkos poveikio.

Į laikiklį įdedamas tiglis, uždegimo vielyte sujungiami elektrodai, ant vielytės užvyniojamas medvilnės siūlas ir bomba uždaroma. Tuomet, naudojant de-

guonies pildymo stotelę, bomba pripildoma $20 \cdot 10^5$ Pa slėgiu. Tokiu būdu mėginys bomboje yra paruoštas matavimams.



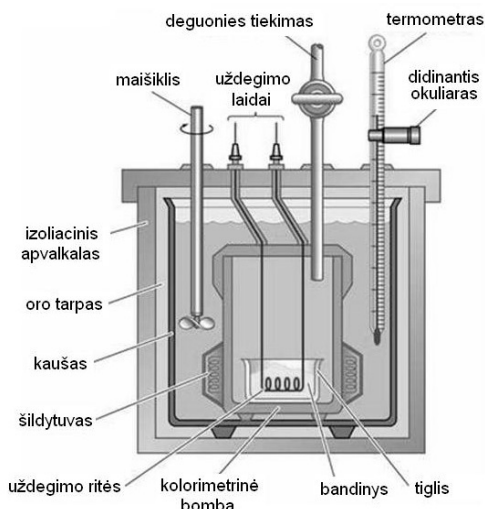
a)



b)



c)



d)

4.3 pav. Šiluminės vertės nustatymas: a) 1 g masės bandinys; b) bandinys kolorimetrinėje bomboje; c) kalorimetras; d) kalorimetro schema

Fig. 4.3. Identification of calorific value: a) 1 g size sample; b) a sample in calorimetric bomb; c) calorimeter; d) the calorimeter's scheme

Vidinis indas (kaušas) pripildomas apie 1800 g vandens, kurio temperatūra – 25 °C. Absolūtus vandens kiekis nėra svarbus, tačiau bomba su kiekvienu bandymu turi būti pripildoma vandens iš naujo. Indas dedamas į kolorimetrą su įstatyta bomba. Įdėjus į prietaisą kolorimetro dangtis uždaromas. Pradedant uždegimą, jungtukas yra lengvai paspaudžiamas. Elektronika užtikrina optimalų mėginio uždegimą. Po dangčio uždarymo procesas stebimas, o jam nusistovėjus

uždegimo mygtukas paspaudžiamas ir eksperimentas pradedamas. Jei procesas nenusistovi per 3 minutes, paruošimo procesas sustabdomas. Po uždegimo raktelio paspaudimo ir po viena laiko elektroninio tikrinimo bandinys yra uždegamas. Tai užtikrina saugų uždegimą. Vėliau yra stebimas pagrindinis bandymas. Kai saviėigos laikas pasibaigia, pasigirsta signalas. Temperatūra turi būti nuskaitoma per tris minutes. Atidarius prietaiso dangtį, testas baigiamas.

Šiluminių verčių nustatymo rezultatai

Pagrindiniai parametrai, nusakantys biokuro kokybę, yra šiluminė vertė, drėgmės kiekis, tankis, peleningumas ir lakiųjų medžiagų kiekis. Šiluminė vertė yra svarbiausias kiekvieno kuro energetinis parametras, ji nusako kuro degimo metu išsiskiriantį šilumos kiekį. Šiluminė vertė mažėja, kai didėja drėgmės kiekis kure, tuomet brangsta kuro transportavimas, sandėliavimas ir deginimas.

Briketams gaminti naudojamų komponentų bei skirtingų sapropelio rūšių nustatytos žemutinės šiluminės vertės (sausioje medžiagoje) pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Briketų komponentų šiluminės vertės

Table 4.1. The calorific value of briquettes components

Komponentas	Organinės anglies kiekis, %	Šiluminė vertė, MJ/kg
Durpės	87	22,0
Medžio pjuvenos	43	14,5
Šiaudai	44	15,0
Organinis sapropelis	85	20,6
Silicio – organinis sapropelis	44	14,3
Silicinis sapropelis	37	11,0

Matyti, jog išmatuota didžiausia 22,0 MJ/kg šiluminė vertė yra durpių, mažesnė – 20,6 MJ/kg organiniame sapropelyje (Medžialenkės ežero). Mažiausia šiluminė vertė išmatuota siliciniame sapropelyje (Talkšos ežero) – 11,0 MJ/kg, didesnė – 14,3 MJ/kg išmatuota silicio – organiniame sapropelyje (Poežerių ežero). Silicio – organinio sapropelio išmatuota vertė yra artima medžio pjuvenų šiluminei vertėi, kuri siekia 14,5 MJ/kg. Briketams formuoti naudojamųjų šiaudų šiluminė vertė siekia 15,0 MJ/kg.

Vien tik uždumblėjusiose Lietuvos ežeruose yra susikaupę apie 460 mln. t orausio sapropelio. Tyrimų metu gauta, kad organinio sapropelio išmatuotas energijos kiekis siekia 20,6 MJ/kg. Literatūroje pateikiama, kad 1 MJ energijos

lygus $2,388 \cdot 10^5$ toe (naftos ekvivalento). Apskaičiuota, kad iš 460 mln. t organinio sapropelio galima gauti $2,26 \cdot 10^8$ toe energijos (Convert energy 2012).

Šiluminės vertės rezultatai parodė, jog briketams su sapropelio rišikliu gaminti tinkamas yra organinis sapropelis (Medžialenkės ežero), kadangi jo šiluminė vertė didelė ir yra artima durpėms.

Mokslininkų nuomone, organinis sapropelis gali būti lyginamas su durpėmis, kadangi yra panašios pagrindinės jų charakteristikos. Durpėse ir organiniame sapropelyje sudėtine dalimi yra anglis ir deguonis. Priklausomai nuo to, iš kokio telkinio buvo išgautas sapropelis, dėl didelio organinės anglies kiekio jo šiluminė vertė gali siekti iki 26 MJ/kg (Плаксин, Кривонос 2007).

Briketams gaminti naudojamas organinis sapropelis, todėl organinis sapropelis palygintas su kitomis biokuro rūšimis. 4.2 lentelėje nurodomos šiaudų, medienos granulių, jų žaliavų, taip pat akmens anglies ir organinio sapropelio charakteristikos.

4.2 lentelė. Energetikoje naudojamųjų žaliavų charakteristikos (Biekša *et al.* 2007; Xue-dong *et al.* 2007; Косов 2007a)

Table 4.2. Characteristics of the raw materials used in energetics (Biekša *et al.* 2007; Xue-dong *et al.* 2007; Косов 2007a)

Kuro rūšis	Tankis, (kg/m ³)	Drėgmė, %	Šiluminė vertė, MJ/kg	Pelenai, %
Šiaudų granulės	450–650	<10	15,0	5,0
Medienos skiedra	250	10–50	11,0–17,0	0,5
Medienos pjuvenos	200	20–50	12,0–17,0	0,5
Medienos granulės	650	<10	17,5	0,5
Sapropelis (organinis)	850–1250	10–30	18,0–21,0	~5,5
Durpių briketai	650–750	6–15	20,0–22,0	4,8
Akmens anglis	1250–1500	10–15	30,0–35,0	~15,0

Iš 4.1 ir 4.2 lentelėse nurodytų duomenų matyti, jog be jokių papildomų priemonių silicinio sapropelio mėginio šiluminė vertė 11,0 MJ/kg yra artima medienos skiedrų šiluminei vertei – 11,0–17,0 MJ/kg, silicio – organinio sapropelio bandinio šiluminė vertė (14,3 MJ/kg) – artima šiaudų granulių šiluminei vertei (15,0 MJ/kg), tuo tarpu organinio sapropelio bandinio šiluminė vertė siekia 20,6 MJ/kg ir yra artima durpių briketų – 20,0–22,0 MJ/kg šiluminei vertei.

Atlikus skaičiavimus gauta, jog, norint išgauti 1 MJ energijos, reikia 0,07 kg medienos skiedrų arba 0,05 kg durpių briketų, tuo tarpu tokiam pačiam energijos kiekiui išgauti reikėtų 0,10 kg silicinio sapropelio arba 0,05 kg organinio sapro-

pelio be papildomų priemonių. Lyginant atskiras kuro rūšis pagal jų šiluminę vertę ir pagal užimamą tūrį gaunama tokia ekvivalentiškumo grandinė:

$1 \text{ m}^3 \text{ naftos} = 6 \text{ m}^3 \text{ medienos} = 18 \text{ m}^3 \text{ skiedrų (arba silicinio sapropelio)} = 3 \text{ m}^3 \text{ medžio granulių} = 4 \text{ m}^3 \text{ šiaudų granulių (arba silicio – organinio sapropelio)} = 5 \text{ m}^3 \text{ šiaudų briketų (Biekša et al. 2007)}.$

Atskirų mišinių komponentų tyrimų rezultatai parodė, jog briketams arba granulėms gaminti tinkamas yra organinis sapropelis, kadangi jo šiluminė vertė siekia 20,6 MJ/kg.

4.3. Saproelio mišinių su kitu kuru šiluminių verčių nustatymas ir analizė

Šiluminė vertė – tai šilumos, išsiskyrusios visiškai sudegus tam tikrai kuro masei, kiekis. Šiluminė vertė paprastai išreiškiama MJ/kg arba kJ/kg, o kaip pagrindas gali būti paimta drėgno, sauso arba sauso be pelenų kuro masė (Vares et al. 2007). Didelę įtaką sapropelio kuro šiluminei vertei turi drėgmės kiekis. Drėgmės buvimas kure mažina jo šiluminę vertę bei spartina briketų su sapropeliu biodegradaciją – patiriami sandėliavimo nuostoliai, mažas drėgmės kiekis briketuose su sapropeliu gali būti pasiekiamas papildomai juos džiovinant.

Atlikti mišinių su sapropeliu šiluminių verčių skaičiavimai pagal gautus 4.2 skyriuje briketų komponentų rezultatus. Kiekvieno briketo mišinį sudaro 100 %. Mišinių šiluminės vertės apskaičiuotos pagal galimą komponentų santykį skirtingo tipo briketuose. Mišinių šiluminės vertės nustatomos pagal 4.2 formulę:

$$Q_{MS} = Sk \cdot Q_{SS} + P \cdot Q_{PS} \quad (4.2)$$

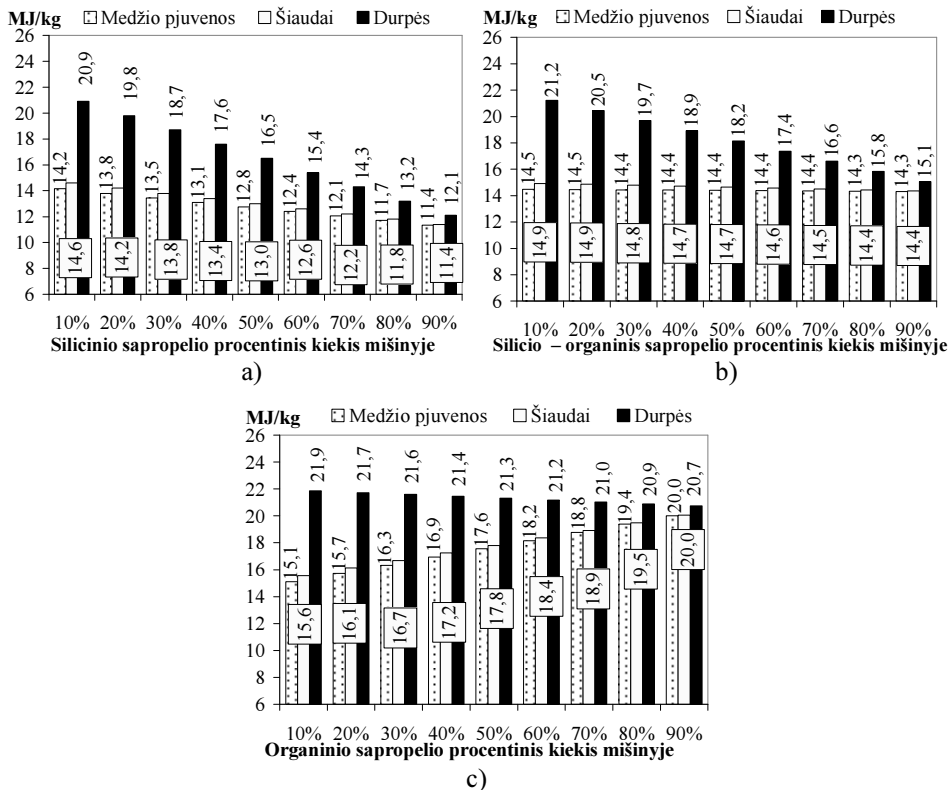
$$Sk + P = 100\% \quad (4.3)$$

čia: Q_{MS} – mišinio šiluminė vertė, MJ/kg; Sk – sapropelio kiekis, %; Q_{SS} – sapropelio šiluminė vertė, MJ/kg (silicinis 11,0 MJ/kg, silicio – organinis 14,3 MJ/kg, organinis 20,6 MJ/kg); P – priedo (durpės, medžio pjuvenos, šiaudai) kiekis, %; Q_{PS} – priedo šiluminė vertė, MJ/kg (durpių – 22,0 MJ/kg, medžio pjuvenų – 14,5 MJ/kg, šiaudų – 15,0 MJ/kg).

Kaip ir kiekviename gamybiniame procese, gaminant biokurą iš esamų šalių resursų, yra siekiama mažinti gamybos sąnaudas ir kartu užtikrinti reikiamą produkcijos kokybę. Žaliavos pasirinkimas šiuo požiūriu turi ypatingą reikšmę. 4.4 pav. pateikiamos apskaičiuotos skirtingų sapropelio tipų (silicinio, silicio – organinio ir organinio) bei priedų šiluminės vertės.

4.4a paveiksle pateiktos silicinio sapropelio – durpių / šiaudų / pjuvenų apskaičiuotos šiluminės vertės, ruošiant skirtingu santykiu mišinius, tinkamus briketavimui arba granuliuvimui. Didžiausia šiluminė vertė – 20,9 MJ/kg gaunama

10 % sapropelio ir 90 % durpių mišinyje, kiek mažesnė – 19,8 MJ/kg 20 % sapropelio ir 80 % durpių mišinyje. Mažiausia šios sudėties mišinio šiluminė vertė – 12,1 MJ/kg apskaičiuota, kai sapropelio – 90 %, o durpių – 10 %. Atlikti skaičiavimo rezultatai rodo, jog toks mišinys yra nelabai efektyvus. Kadangi šiluminė durpių vertė yra didesnė nei sapropelio, tokių briketų atveju sapropelis mažina šiluminę vertę. Panašūs rezultatai gauti ir mišiniuose su medžio pjuvenomis bei šiaudais.



4.4 pav. Sapropelio mišinių su priedais šiluminės vertės: a) silicinio; b) silicio – organinio; c) organinio

Fig. 4.4. Calorific values of sapropel mixtures with different additives: a) siliceous; b) siliceous – organic; c) organic

4.4b paveiksle pateiktos apskaičiuotos šiluminės silicio – organinio sapropelio – durpių / šiaudų / pjuvenų vertės. Gauti skaičiavimo rezultatai yra analogiški kaip ir silicinio sapropelio atveju. Nerekomenduojama naudoti silicinį arba silicio – organinį sapropelį kaip rišamąją medžiagą briketų gamyboje, kadangi jis sumažina šiluminę vertę. Rekomenduojama sapropelio ir šiaudų arba sapropelio

ir medžio pjuvenų briketų bei granulių gamybai naudoti tik didesne šilumine verte pasižyminčius sapropelius nei priedai, tokiu būdu didinant energetinę biokuro vertę.

Mokslininkų (Петрова *et al.* 2007; Николаева 2011) teigimu, organinio sapropelio panaudojimas biokurui gaminti padidina briketo atsparumą gniuždymui ir šiluminę vertę. Briketų mechaninių savybių tyrimai parodė, jog 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai yra patvarūs tiek gniuždymui, tiek lenkimui. Tokio mišinio atskirų komponentų apskaičiuota šiluminė vertė siekia: 6,2 MJ/kg organinio sapropelio ir 10,2 MJ/kg medžio pjuvenų. Mišinyje su medžio pjuvenomis didžiausia šiluminė 20 MJ/kg vertė pasiekama, kai organinio sapropelio yra 90 %, o medžio pjuvenų – 10 % (4.4c pav.). Organinis sapropelis mišinyje su durpėmis, kur sapropelio – 10 % ir durpių – 90 %, yra pats geriausias šiluminės vertės požiūriu (21,9 MJ/kg). Kadangi šiluminė durpių vertė yra didesnė nei organinio sapropelio, nerekomenduojama gaminti tokios sudėties briketų. Durpių briketai su sapropelio rišikliu gali būti gaminami tik tuo atveju, kai šiluminė organinio sapropelio vertė yra didesnei nei durpių.

Kadangi natūralus sapropelis turi daug drėgmės, o jam paruošti (džiovinti, briketuoti, granuliuoti, smulkinti) reikėtų nemažų sąnaudų, racionaliausia naudoti natūralios drėgmės sapropelį. Sapropelio klįjuojamąsias savybes nulemia jame esančios organinės dalies koloidinė frakcija, turinti daug azoto junginių, huminių rūgščių. Pakankamas klįjuojamąsias savybes turi tik organinis sapropelis, kurio peleningumas siekia iki 10 %. Lipniausias sapropelis tas, kuriame azoto kiekis sudaro 5–7 %. Mokslininkų teigimu, sapropelio klįjuojamosios savybės pagerėja, modifikavus jį šarminiais priedais (natrio šarmu, kalkėmis ir pan.), tačiau šiuo atveju pablogėja suklijuotų gaminių atsparumas drėgmei bei vandeniui.

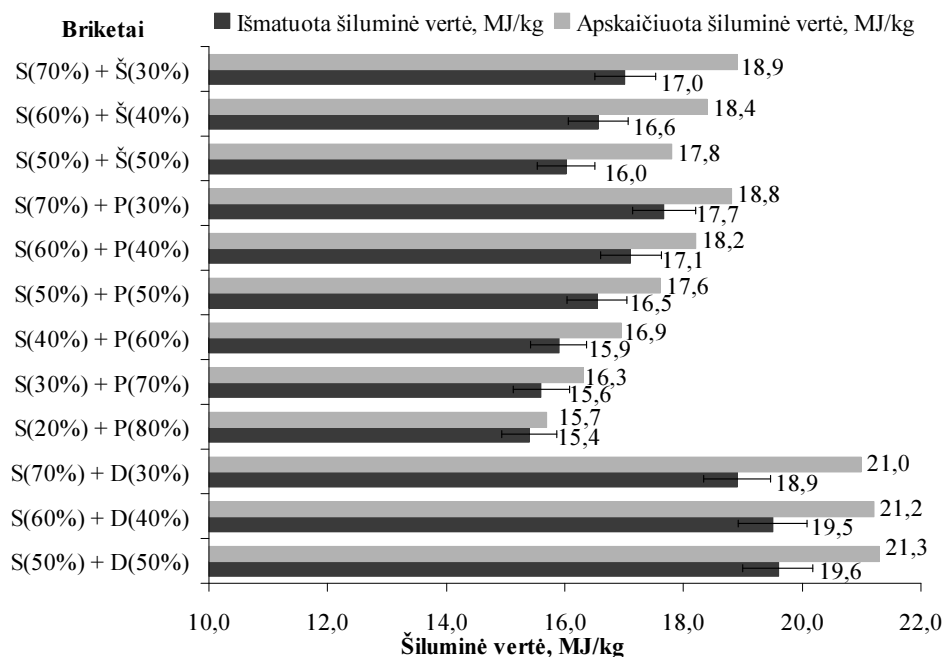
Mokslininkai (Петрова *et al.* 2007) įrodė, jog panaudojus organinį sapropelį gaminant akmens anglies – deguto – sapropelio kuro briketus, jų išsiskiriamos šilumos kiekis padidėjo iki 6840 kcal/kg, palyginti su akmens anglies ir deguto briketais, kurių išsiskiriamos šilumos kiekis siekia tik 6673 kcal/kg.

Apskaičiuotos šiluminės vertės įvertinus kiekvieno komponento šilumingumą palygintos su išmatuotomis briketams gaminti paruoštų mišinių šiluminėmis vertėmis (4.5 pav.). Apskaičiuotos šiluminės vertės visų briketų atveju yra didesnės už išmatuotąsias vertes. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad apskaičiuotų verčių rezultatai remiasi absoliutiniais (idealizuotais) pirminiais duomenimis, tuo tarpu išmatuotos vertės įvertina neorganinių priemaišų kiekį mėginyje. Išmatuotos vertės nuo apskaičiuotų skiriasi nuo 1 iki 10 %, o tai parodo patikimą rezultatų atitikimą.

Šiluminės vertės požiūriu geriausi yra 50 % sapropelio ir 50 % durpių briketai, kurių išmatuota šiluminė vertė siekia 19,6 MJ/kg. Kadangi durpių šiluminė vertė yra didesnė negu sapropelio, todėl ir briketų, kurių sudėtyje yra daugiausiai durpių (50 %), šiluminė vertė yra didžiausia, palyginti su kitais briketais. Durpių

briketų su sapropeliu šiluminei vertei apskaičiuoti rezultatai nuo išmatuotų vidutiniškai skiriasi 8 %.

Šiaudų šiluminė vertė yra mažesnė nei organinio sapropelio, todėl 70 % sapropelio ir 30 % šiaudų briketuose išmatuota (17,0 MJ/kg) didesnė šiluminė vertė nei 50 % sapropelio ir 50 % šiaudų briketuose (16,0 MJ/kg). Apskaičiuota šiluminė vertė nuo išmatuotos skiriasi 10 % sapropelio ir šiaudų briketuose. Organinio sapropelio panaudojimas briketų mišinyje su šiaudais padidina tokių briketų šiluminę vertę.



4.5 pav. Briketų su sapropeliu šiluminės vertės
Fig. 4.5. The calorific values in briquette with sapropel

70 % sapropelio ir 30 % medžio pjuvenų briketuose išmatuota (17,7 MJ/kg) šiluminė vertė nuo apskaičiuotos (18,8 MJ/kg) skiriasi 6 %. Sapropelio ir pjuvenų briketų atveju šiluminė vertė padidėja esant didesniai sapropelio (70 %) kiekiui briketė. Tačiau briketų gamybos ir atsparumo gniuždymui rezultatai parodė, jog tvirčiausias yra briketas, kurio sudėtyje sapropelio kiekis yra ne didesnis negu 50 %. Šiluminės vertės požiūriu kuo daugiau sapropelio briketė, tuo didesnė sapropelio ir medžio pjuvenų briketo šiluminė vertė. Įvertinus atsparumo gniuždymui rezultatus, nustatyta, kad tvirčiausias yra 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketas, o tokio briketo išmatuota šiluminė vertė siekia 15,6 MJ/kg ir yra didesnė nei medžio pjuvenų (14,5 MJ/kg) šiluminė vertė.

Lyginant šiluminės vertės skaičiavimo ir matavimo rezultatus, matyti, kad mažiausia 6 % paklaida gaunama sapropelio ir medžio pjuvenų briketų atveju. Saproelio ir medžio pjuvenų mišinių šiluminės vertės išmatuotos nuo apskaičiuotų skiriasi apie 1 MJ/kg. Galima daryti išvadą, kad norint gaminti sapropelio ir medžio pjuvenų briketus arba granules nėra būtina matuoti mišinių šiluminių verčių. Pakanka žinoti atskirų komponentų šiluminės vertes ir pagal jų santykį mišinys galima apskaičiuoti briketo arba granulės šilumingumą.

Analizės rezultatai (4.5 pav.) parodė, kad didžiausia energetinę vertę galima pasiekti maišant sapropelį su durpėmis. Bet toks biokuro derinys nėra efektyvus, nes sapropelio kiekio didinimas briketė mažina mišinio šiluminę vertę, be to, durpių briketams sapropelis, kaip rišamoji medžiaga, nėra būtinas. Priešinga situacija yra maišant sapropelį su šiaudais ir medžio pjuvenomis, kurių briketams yra reikalinga rišamoji degi medžiaga – sapropelis. Svarbiausia tai, kad sapropelio kiekio didėjimas minėto biokuro briketuose didina jų energetinę vertę. Briketė su medžio pjuvenomis didinant sapropelio kiekį mišinio šiluminę vertę padidėja nuo 14,5 iki 17,7 MJ/kg, o su šiaudais – nuo 15 iki 17 MJ/kg.

4.4. Briketų su sapropelio rišikliu deginių koncentracijų tyrimai ir analizė

Biomasės degimas yra sudėtingas procesas, susidedantis iš keleto nuosekiai vienas paskui kitą einančių etapų: drėgmės garavimas, kaitimas, dujinimas, anglies degimas ir dujinės fazės oksidacija. Kiekvienam etapui reikalingas laiko tarpas priklauso nuo kuro savybių, temperatūros ir degimo sąlygų. Pirmosios fazės metu iš kuro išgaruoja buvusi drėgmė. Dujinimo metu išsiskiria lakiosios degiosios medžiagos. Tarp emisijų visada aptinkama anglies monoksido (CO), vandenilio (H_2), metano (CH_4) ir kitų angliavandenilių. Išsiskyrusios lakiosios medžiagos sudega. Jeigu yra tiekiamas pakankamas deguonies kiekis, dujos visiškai sudega, pagamindamos likutinius produktus – anglies dioksidą (CO_2) ir vandenį. Jeigu į kūryklą tiekiamas nepakankamas deguonies kiekis, dalis degių medžiagų nesudega arba sudega nevistiškai. Šiuo atveju degimo produktuose galima aptikti anglies monoksido (CO), suodžių, dervų ir nesudegusių angliavandenilių. Po to vyksta anglies degimas. Pasibaigus biomasės degimo procesui lieka pelenai, sudaryti iš nedegusių neorganinių medžiagų (Biekša *et al.* 2007; Raw materials... 2007).

Deginant vis daugiau biomasės ypač aktualūs tampa aplinkosauginiai jos panaudojimo aspektai. Nepaisant to, kad biomasė yra neutralus anglies dioksido atžvilgiu atsinaujinantis energijos šaltinis, be anglies dioksido, į aplinką patenka daug nuodingų degimo produktų ir kietųjų dalelių. Biomasės degimo procesas yra daug sudėtingesnis nei dujų ir skystojo kuro, o jo optimizavimą degimo metu

komplikuoja įvairūs fiziniai ir cheminiai procesai, didelis drėgmės, susmulkinimo laipsnio ir kitų savybių kitimo intervalas (Ambrulevičius 2010; Hu *et al.* 2010).

Aukšta degimo proceso kokybė, kai kuras visiškai sudeginamas, labai svarbi sąlyga norint pasiekti žemą susidarančių teršalų lygį. Degimo proceso efektyvumas priklauso nuo degimo kameros temperatūros, degiųjų dujų ir oro susimaišymo lygio, degimo kameroje trukmės ir tiekiamo deguonies kiekio. Šias sąlygas savo ruožtu veikia tokie veiksniai, kaip naudojama deginimo technologija, degimo proceso suderinimas parenkant optimalų oro pertekliaus koeficientą, įrenginių veikimo režimas (visu pajėgumu ar iš dalies apkrautas) ir pagaliau nuo pačių naudojamų kuro savybių (forma, dydis, drėgmės kiekis ir pan.) (Denafas *et al.* 2001; Šlančiauskas 2006; Biekša *et al.* 2007; Budrys 2007; Production of... 2007).

Kenksmingi dujiniai išmetimai – visų pirma tai sieros dioksidas (SO_2), azoto oksidas (NO_x), anglies monoksidas (CO), nesudegę angliavandeniliai ir anglies dioksidas (CO_2). Sieros dioksidų ir azoto oksidų emisijos priklauso ir nuo jų kiekio kure, ir nuo degimo proceso. Daugelio rūšių biokure azoto ir sieros kiekis nedidelis, todėl šių junginių sulaikymo įrenginiai biokuru kūrenamose katilinėse naudojami retai. Biomassę ar biokurą sudaro visas kompleksas cheminių elementų. Didžiausią įtaką kuro savybėms turi šeši pagrindiniai elementai (C, H, O, N, S, Cl) ir aštuoni kiti elementai (Si, Al, Ca, K, Mg, Na, P, Fe). Pagrindiniai elementai turi įtakos kuro energetinėms savybėms, o kiti elementai – degimo produktų charakteristikoms (Jaskelevičius, Liuga 1997; Vares *et al.* 2007; Yong-jun *et al.* 2008).

Biomassės deginimas, panaudojant pažangias technologijas komunaliniame buitiniame sektoriuje – vienas iš „kelių“ gerokai sumažinti aplinkos taršą. Naujaujų konstrukcijų katilų naudingumo koeficientas yra gana didelis (per 80 %). Tačiau emisijų problema išlieka pakankamai svarbi. Mažos galios neautomatizuotuose katiluose daugiausia išsiskiria anglies monoksido ir kietųjų dalelių (Ambrulevičius 2010). Deginamo kuro degimo produktuose susidarę teršalai neturi viršyti nustatytų leistinų deginamam kurui normų. Kombinuotos sudėties degimo produktuose esantiems teršalams Lietuvoje taikomos skirtingos normos atliekoms, kietajam kurui ar biokurui. 4.3 lentelėje pateikiamos koncentracijų normos deginant biokurą. (Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas „Dėl išmetamų teršalų iš didelių kurą deginančių įrenginių normų ir išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normų LAND 43 – 2001 nustatymo“).

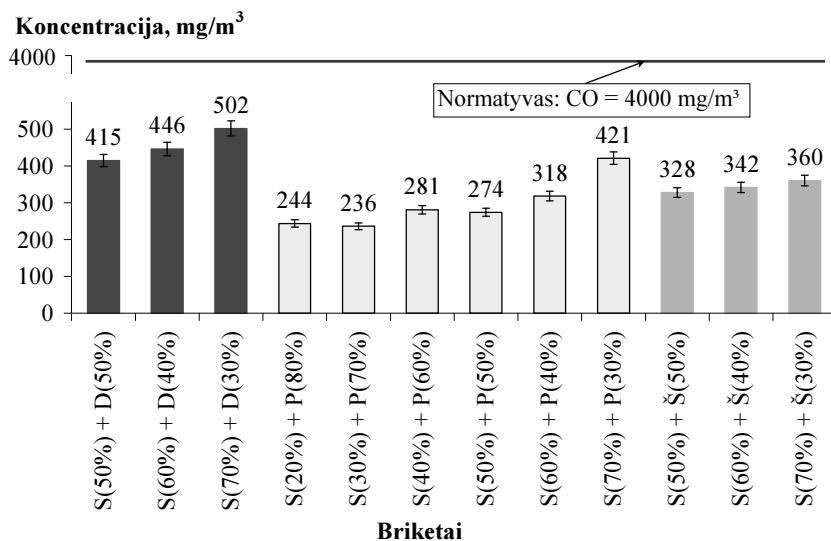
Kiekvienam matavimui atlikti du ne mažesnės kaip 20 minučių trukmės parkojimai registruojant visus tiriamuosius parametrus. Visų atliktų matavimų metu katilas dirbo su pastovia ir ne mažesne kaip 50 % vardinės galios apkrova. Degimo proceso efektyvumą ir temperatūrą, kuri yra pasiekama degimo proceso metu, veikia briketų drėgnis. Nepageidajamu rodikliu yra peleningumas, kadangi tai padidina būtinybę periodiškai šalinti susidariusius pelenus.

4.3 lentelė. Teršalų koncentracijų normos, deginant biokurą

Table 4.3. Standard limits of pollutant concentrations burning biofuels

Teršalai	Kuras	
	Biokuras <1 MW	Biokuras <50 MW
Azoto oksidai (NO _x), mg/m ³	750	650
Anglies monoksidai (CO), mg/m ³	4000	4000
Sieros dioksidai (SO ₂), mg/m ³	2000	2000
Kietosios dalelės (KD), mg/m ³	800	500

Tyrimo tikslas – nustatyti, ar pagaminti briketai (durpių, medžio pjuvenų ir šiaudų) su sapropelio rišikliu gali būti deginami, taip pat įvertinti, ar teršalų koncentracijos degimo produktuose atitinka teršalų emisijų normas. Sapropelio ir durpių, sapropelio ir šiaudų bei sapropelio ir medžio pjuvenų briketų deginimo rezultatai pateikiami 4.6–4.9 paveiksluose.



4.6 pav. Išmatuotos CO koncentracijos skirtingų briketų degimo metu (S – sapropelis; D – durpės; P – pjuvenos; Š – šiaudai)

Fig. 4.6. CO concentration during burning briquettes (S – sapropel, P – peat, SW – sawdust, ST – straw)

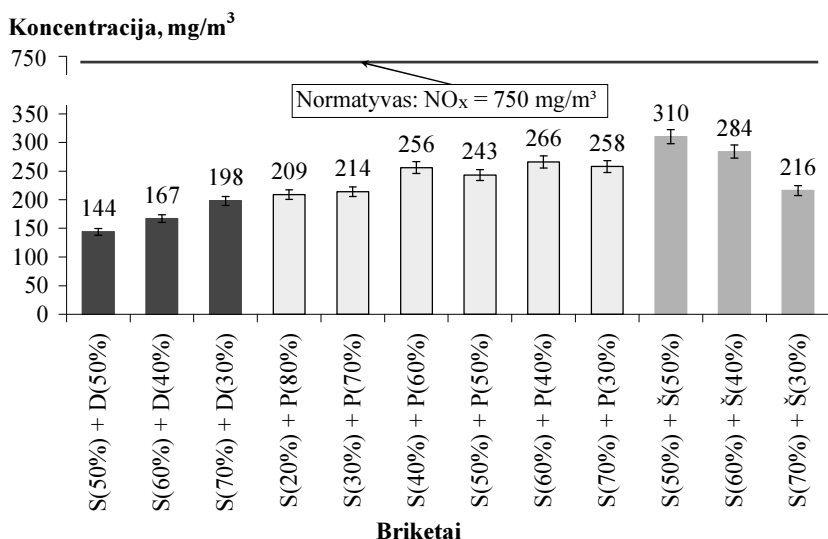
4.6 paveiksle pateikiamos išmatuotos CO koncentracijos deginant skirtingos sudėties briketus su sapropeliu. Didelis CO kiekis parodo, kad pagamintuose

briketuose liko nesudegusios anglies dalelių. Didžiausia (502 mg/m^3) CO koncentracija išmatuota 70 % sapropelio ir 30 % durpių briketuose. Nors durpės yra biologinės kilmės, tačiau jos laikomos ne atsinaujinančiu biokuru, o lėtai atsinaujinančiu biologinės kilmės iškastiniu kuru. CO, išsiskyręs į atmosferą durpių deginimo metu, panašiai kaip ir iškastinio kuro atveju, yra klasifikuojamas kaip šiltnamio efektą sukeliančios dujos, todėl labai svarbu, kad sapropelio ir durpių briketų deginimo metu būtų kuo mažesnės šių teršalų koncentracijos. Mažiausia (236 mg/m^3) CO koncentracija išmatuota deginant 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketus. Skirtingos sudėties sapropelio su šiaudais briketuose išmatuota CO koncentracija kinta nuo 328 iki 360 mg/m^3 . Deginant sapropelio ir priedų briketus mažiausia ir didžiausia išmatuotos CO koncentracijos skiriasi 2 kartus. Briketų degimo metu CO išsiskirimams įtakos turi organinės medžiagos kiekis atskiruose komponentuose, cheminė sudėtis, mėginių drėgmė ir pats degimo procesas. CO kiekis dūmuose rodo briketų degimo kokybę ir turi būti kiek galima mažesnis. Didelis CO kiekio svyravimas būna dėl nevienodo briketų drėgno, kuris daro didelę įtaką degimo procesui.

Biokuro deginimas, esant blogai sureguliuotam degimo procesui, ne visada užtikrina visišką biokuro sudeginimą, dėl to nepasiekiamas maksimalus teigiamas aplinkosauginis efektas, nes į atmosferą patenka ne tik pelenai, bet ir nesudegusios kuro dalelės bei dujiniai nevisiško sudegimo produktai (Jarmokas 1999). Geras kuro sudegimas konstatuojamas tada, kai kuras yra visiškai sunaudotas ir sudegintas, kai dūmuose lieka minimaliausias NO_x , CO kiekis ir kai lieka mažiausiai suodžių, lakiųjų organinių junginių (LOJ).

NO_x susidaro iš oro azoto ir briketuose esančio azoto (4.7 pav.). NO_x susidaro mažiau, kai būna mažesnis oro perteklius, žemesnė degimo temperatūra, degimo produktai greitai ataušinami.

4.7 paveiksle pateiktos briketų degimo metu išsiskiriančios NO_x koncentracijos. Didžiausia (310 mg/m^3) NO_x koncentracija išmatuota 50 % sapropelio ir 50 % šiaudų briketuose, mažiausia (144 mg/m^3) NO_x koncentracija išmatuota 50 % sapropelio ir 50 % durpių briketuose. Skirtumas tarp mažiausios ir didžiausios išmatuotos NO_x koncentracijos, skirtingos sudėties briketų degimo metu, sudaro 2,2 karto. Deginant sapropelio su medžio pjuvenomis briketus NO_x koncentracija kinta nuo 209 iki 266 mg/m^3 . Visų briketų degimo metu nėra viršijamos CO ir NO_x ribinės vertės, kurias reglamentuoja Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2001 metų rugsėjo 28 d. įsakymu Nr. 486 patvirtintos Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos LAND 43–2001.



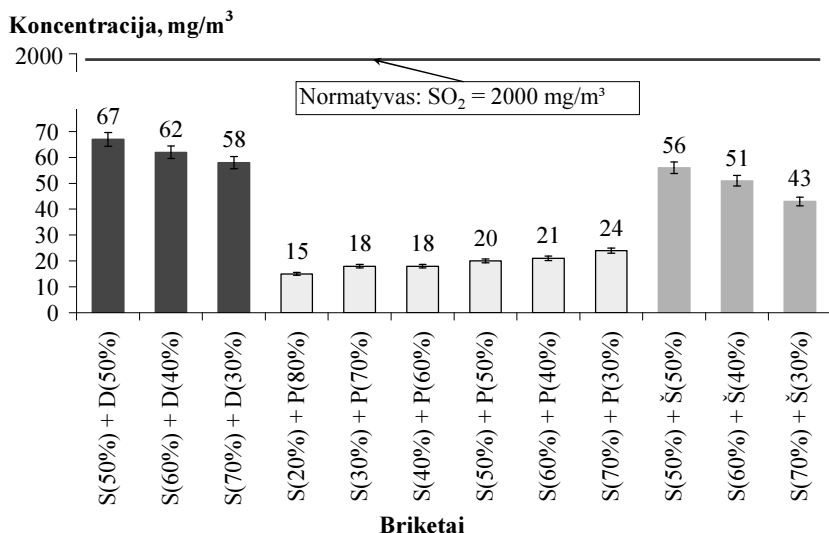
4.7 pav. Išmatuotos NO_x koncentracijos skirtingų briketų degimo metu (S – sapropelis; D – durpės; P – pjuvenos; Š – šiaudai)

Fig. 4.7. NO_x concentration during burning briquettes (S – sapropel, P – peat, SW – sawdust, ST – straw)

Pirmasis briketų degimo etapas yra vadinamas kuro sudegimo zona, kai išmetimo dujų temperatūra pakyla iki maksimalios vertės ir deguonies kiekis sumažėja, o po to temperatūrai laiko atžvilgiu nusistovėjus ir nežymiai kintant (mažėjant) – vyksta galutinis briketų sudegimas. Tokio tipo deginimas suteikia vertingos informacijos apie azoto oksidų susidarymą pirmojoje degimo fazėje, kai kuras tik įkaista (išyla) ir vyksta dujų fiksavimo procesai.

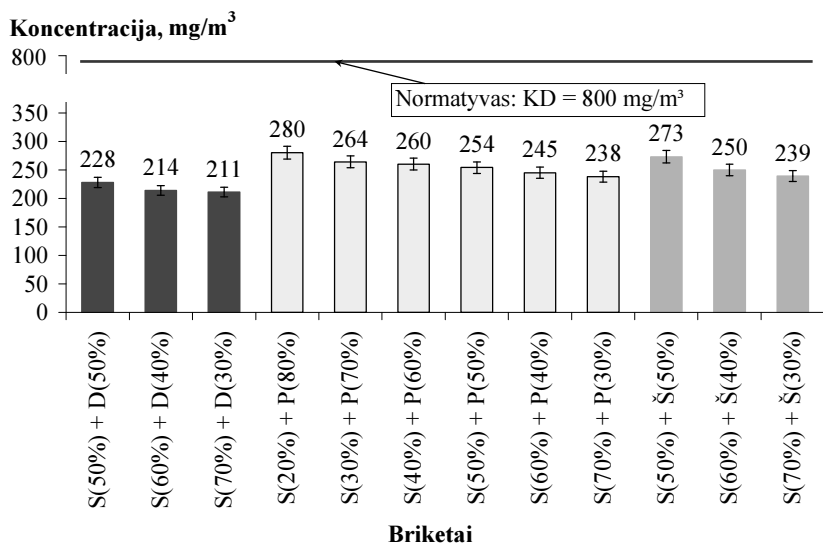
Deginant kurą taip pat svarbu nuolat mažinti CO₂, SO₂ kiekius. Biokuro deginimui naudojami įrenginiai gali būti suskirstyti į atskiras grupes pagal reikalaujamą išvystyti galingumą. Mažiausios galios intervalą nuo 1 iki 10 kW dažniausiai atitinka krosnys ir židiniai. Didžiausios galios įrenginiai naudojami jėgainėse, jų galingumas dažnai būna didesnis nei 5 MW. Likę vidutinės galios katilai naudojami individualių ir daugiabučių namų apšildinimui.

Deginamai biomasei būdinga nedidelė sieros oksido emisija. SO₂ kiekis dūmuose priklauso nuo sieros (S) kiekio briketų komponentuose ir yra mažesnis negu kūrenant mazutu ar akmens anglimi (4.8 pav.).



4.8 pav. Išmatuotos SO₂ koncentracijos skirtingų briketų degimo metu (S – sapropelis; D – durpės; P – pjuvenos; Š – šiaudai)

Fig. 4.8. SO₂ concentration during burning briquettes (S – sapropel, P – peat, SW – sawdust, ST – straw)



4.9 pav. Išmatuotos KD koncentracijos skirtingų briketų degimo metu (S – sapropelis; D – durpės; P – pjuvenos; Š – šiaudai)

Fig. 4.9. PM concentration during burning briquettes (S – sapropel, P – peat, SW – sawdust, ST – straw)

Išmatuotos SO_2 koncentracijos degant skirtingos rūšies briketams pateiktos 4.8 pav. Visų pagamintų briketų degimo atvejais nebuvo viršytos normos. Mažiausios ($15\text{--}21 \text{ mg/m}^3$) SO_2 koncentracijos išmatuotos sapropelio su medžio pjuvenomis briketuose. Didžiausia (67 mg/m^3) SO_2 koncentracija išmatuota degant 50 % sapropelio ir 50 % durpių briketams. Iš pateikto 4.8 paveikslą matyti, kad mažėjant durpių kiekiui kure ir didėjant sapropelio kiekiui mažėja SO_2 koncentracijos. Tuo tarpu mažėjant pjuvenų kiekiui briketuose SO_2 koncentracijos didėja. Atlikti tyrimai ir matavimo rezultatai, parodė, kad, priklausomai nuo komponentuose esančio sieros kiekio, priklauso SO_2 koncentracija. Kuo daugiau kure yra sieros, tuo didesni SO_2 išsiskyrimai.

Išmatuotos kietųjų dalelių koncentracijos deginant skirtingos sudėties briketus pateikiamos 4.9 paveiksle. Išmetamas kietųjų dalelių kiekis su dūmais iš kaitalo siekia nuo 211 iki 280 mg/m^3 . Daugiausiai (280 mg/m^3) kietųjų dalelių išmatuota 20 % sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketų degimo metu, mažiausiai (211 mg/m^3) – 70 % sapropelio ir 30 % durpių briketų.

Įvertinus eksperimento rezultatus, galima teigti, kad esant dideliame kiekiui pjuvenų ir mažam kiekiui sapropelio brikete padidėja kietųjų dalelių išsiskyrimai. Esant mažiems kietųjų dalelių išsiskyrimams, padidėja kuro pelningumas, t. y. esant dideliame kiekiui sapropelio brikete susidaro daugiau pelenų, nors kietųjų dalelių koncentracija mažėja. Išmatuotos kietųjų dalelių vertės visų briketų degimo atveju neviršija reglamentuojamų LR normų.

Šilumos ir energijos gamyba visuomet siejasi su poveikiu aplinkai. Briketai su sapropeliu – ne išimtis, juos deginant į atmosferą išmetamas anglies dioksidas (CO_2) ir žalingi aplinkai produktai: anglies monoksidas (CO), sieros dioksidas (SO_2), azoto oksidai (NO_x) ir kietosios dalelės. Skirtingos sudėties briketų deginimo metu nustatyta, kad nėra viršijamos CO , NO_x , SO_2 ir kietųjų dalelių ribinės vertės, kurias reglamentuoja Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2001 metų rugsėjo 28 d. įsakymu Nr. 486 patvirtintos išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos LAND 43–2001.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Tyrimais nustatyta, kad geriausiai briketų gamybai tinka organinis sapropelis, kurio pelningumas siekia apie 6 %, o šiluminė vertė siekia $20,6 \text{ MJ/kg}$. Ši reikšmė yra artima šiluminei durpių vertei.
2. Tyrimai rodo, kad neefektyvu maišyti sapropelį su durpėmis, nes jo šiluminė vertė yra mažesnė nei durpių. Brikete su durpėmis sapropelis mažina kuro šiluminę vertę 14 %, be to, jis nėra būtinas kaip rišamoji medžiaga. Maišant sapropelį su medžio pjuvenomis arba

šiaudais, jis yra ne tik rišiklis, bet ir didina energetinę tokių briketų vertę 1,2 karto.

3. Gaminant biokuro briketus, rekomenduojamas sapropelio kiekis briketė yra iki 50 %, maišant briketus lygiomis dalimis su medžio pjuvenomis arba šiaudais, atitinkamai apskaičiuotos tokių briketų šiluminės vertės yra 16,5 MJ/kg ir 16,0 MJ/kg. Tyrimuose naudojamųjų briketų apskaičiuotos ir išmatuotos šiluminės vertės tarpusavyje skiriasi iki 10 %.
4. Atlikus tyrimus, galima daryti išvadą, kad norint įvertinti šiluminės vertės pakanka nustatyti šiluminės atskirų komponentų vertes ir pagal jų santykį mišinys apskaičiuoti briketo šilumingumą, kadangi lyginant skaičiavimo ir matavimo rezultatus gauta, kad sapropelio ir medžio pjuvenų briketuose išmatuota šiluminė vertė nuo apskaičiuotosios skiriasi 6 %.
5. Deginant sapropelio ir durpių, sapropelio ir šiaudų bei sapropelio ir medžio pjuvenų briketus, degimo metu išsiskyrę azoto oksidai (NO_x) ir CO neviršija biokurai nustatytų leistinų normų. Didžiausia išmatuota NO_x reikšmė siekė 310 mg/m^3 50 % sapropelio ir 50 % šiaudų briketų deginimo metu. Mažiausia išmatuota NO_x reikšmė siekė 144 mg/m^3 50 % sapropelio ir 50 % durpių briketų deginimo metu.
6. Didžiausia išmatuota CO reikšmė siekė 502 mg/m^3 70 % sapropelio ir 30 % durpių briketų deginimo metu. Mažiausia išmatuota CO reikšmė siekė 236 mg/m^3 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketų deginimo metu. Nustatyta, kad briketų deginimo metu didžiausi (67 mg/m^3) SO_2 išsiskyrimai buvo išmatuoti degant sapropelio su durpėmis briketams, kietųjų dalelių didžiausios (280 mg/m^3) koncentracijos išmatuotos degant sapropelio ir medžio pjuvenų briketams, tačiau ribinės vertės, deginant biokurą, nebuvo viršijamos.

Skaitinis sapropelio deginimo ir teršalų išsiskyrimo modeliavimas

Šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracijų didėjimas atmosferoje daugiausia yra susijęs su kuro deginimu. Lietuvoje naudojamoms buitinėms biomasės deginimo technologijoms, įskaitant ir paprastas malkomis kūrenamas namų krosnis, būdingas svyruojantis atmosferos teršalų – anglies monoksido, azoto oksidų ir kietųjų dalelių susidarymas, o tai rodo šių deginimo technologijų netobulumą. Aplinkosauginiai reikalavimai, kurie apibūdina patį degimo procesą su minimaliomis emisijomis, pačiam emisijų dydžiui įveda ekologinio degimo sąvoką (Revoldas, Denafas 2002; Ambrulevičius 2010). Emisijoms mažinti galimos dvi priemonės – tai kuro deginimo efektyvumo didinimas ir kuro rūšių pakeitimas mažiau aplinką teršiančiu kuru.

Kietojo kuro šiluminiai virsmai, tokie kaip ir kuro deginimas, yra sudėtingas procesas. Šiluminiai virsmai apima kietųjų dalelių judėjimus, šilumos mainus, chemines reakcijas ir pan. Kuro degimo modelis visada apima daug skirtingų procesų, todėl modeliavimo rezultatų apdorojimas yra sudėtinga tyrimų dalis. Tiesioginio tyrimo ir modeliavimo rezultatai gali gerokai skirtis tarpusavyje.

Kuro deginimo procesus, šilumos mainus ir išsiskiriančias emisijas galima vertinti naudojant ir netiesioginį matavimo metodą – modeliavimą. Šiems sudėtingiems procesams ir teršalams modeliuoti naudojamos įvairios programos: *BOILER 2004*, *ANSYS Fluent*, *PHOENICS*, *COMSOL Multiphysics* ir kt.

Šiame skyriuje supažindinama su biomasės deginimo metodų taikomaisiais modeliais. Pagrindinis dėmesys skiriamas kietosios biomasės deginimo skirtingų etapų reakcijų aprašymams. Pateikiama briketų su sapropelio rišikliu deginimo skaitinio modeliavimo metodika bei gauti šilumos mainų ir išsiskiriančių teršalų rezultatai.

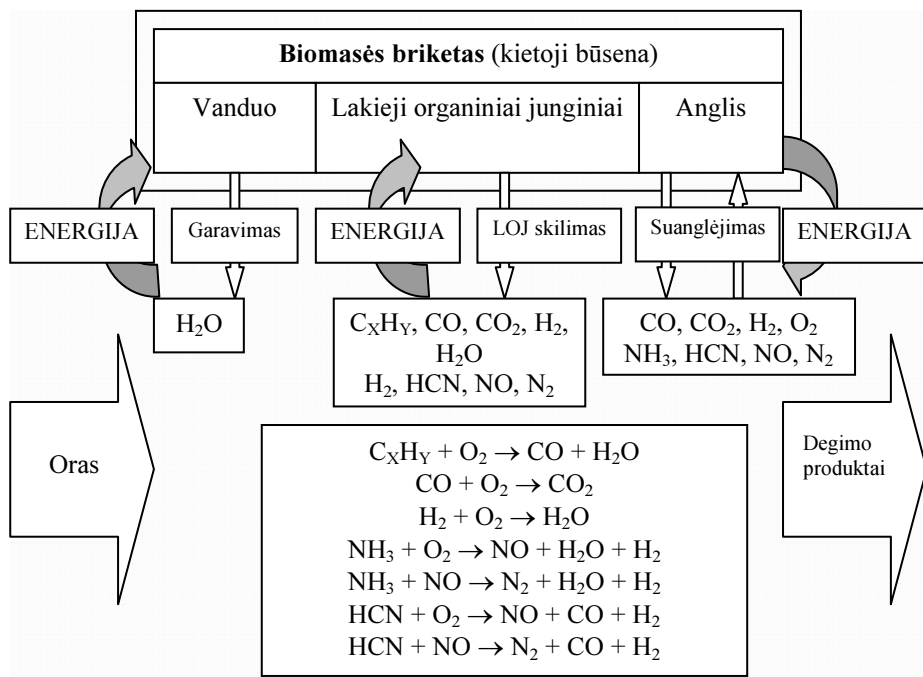
5.1. Sapropelio briketų deginimo metodika ir modeliavimo galimybės

Degimo procesų aprašymas. *Drėgmės išgarinimas.* Garavimas – medžiagos virsmas iš skystos į dujinę agregatinę būseną – tai paviršinis procesas. Garavimui priešingas procesas yra kondensacija. Garai yra iš skystčio išlėkusios molekulės: jei atomo (molekulės) kinetinė energija viršija skystčio paviršinę atomų (molekulių) ryšio energiją, jis palieka skystį. Didėjant temperatūrai, garavimas intensyvėja, nors garavimas vyksta nuolat ir esant bet kokiai temperatūrai (aukštesnei nei 0 Kelvinų). Kai kurie metalai garuoja ne iš skystos fazės, t. y. garavimas vyksta tiesiogiai iš kietos fazės, pastarasis procesas vadinamas sublimacija. Kiekybiškai perėjimą iš skystos į dujinę būseną apibūdinantis dydis yra garavimo šiluma.

Lakiųjų organinių junginių (LOJ) skilimas (devolitizacija). Palyginti su anglimi, biomasėje yra didelis kiekis (iki 75% masės) lakiųjų komponentų, kurie, kaip degimo produktai, išsiskiria devolitizacijos etape. Esančių dujinių lakiųjų junginių, kurie yra pritaikyti biomasės kuro analizei, sudėtis pateikiama J. Adanez (2003), H. Zhou (2005) darbuose. Modelyje naudojamos kuro dalys – tai CO, CO₂, H₂, H₂O, ir C_xH_y, kurių sudėtyje yra didesnis angliavandenilių kiekis ir kurios jungiasi su išmetamuoju NO_x. Terminio skilimo lygis kietosios biomasės kure taip pat yra analizuojamas naudojantis termografinę analizę (TGA). *Suanglejimas.* Suanglejimo fazės metu suanglejusios dalelės, iš biomasės degimo liekanų susijungusios su deguonimi, sudaro trečiąjį degimo etapą.

Šilumos šaltinio – kietojo kuro katilo efektyvumas. Katilo efektyvumą lemia naudingosios šilumos ir nuostolių santykis. Jeigu kuro degimo metu išsiskyręs šilumos kiekis (šiluma, kurią išskiria sudegdamas kuro vienetas, pvz., kWh/kg) yra 100 %, tai ta dalis, kurią gauna cirkuliuojantis vanduo, vadinama naudingąja (katilo naudingumo koeficientas), o likusioji šiluma prarandama su įvairiais nuostoliais. Katilo šiluminio naudingumo koeficiento (NK) reikšmė nustatoma laboratorijose ir nurodoma techninėje dokumentacijoje. Realus eksploatuojant nustatytas naudingumo koeficiento dydis paprastai yra mažesnis, tačiau jis parodo galimybes efektyvumui gerinti, nes kuro sunaudojimas šilumos vienetui pagaminti tiesiogiai proporcingas šiluminio NK.

5.1 paveiksle trumpai pristatyti taikomi standartiniai modeliavimo būdai ir naudojamų pagrindinės lygtys (Miltner *et al.* 2006).



5.1 pav. Nevienalytės biomasės deginimo schema
Fig. 5.1. The reaction scheme concerning heterogeneous biomass combustion

Šilumos nuostolių dydis vertinamas procentais nuo katilė sudegusio kuro išskirto šilumos kiekio (kuro degimo šiluma), iš 100 % atėmus santykinų šilumos nuostolių dydį, gaunamas katilo NK. Šis NK nustatymo būdas vadinamas „atvirkštinio balanso“ metodu. Šilumos nuostoliai, kuriuos norint įvertinti katilo efektyvumą būtina nustatyti, yra šie:

- a) su išeinančiais dūmais;
- b) dėl cheminio nesudegimo;
- c) dėl mechaninio nesudegimo;
- d) per katilo sienelės į aplinką;
- e) su pašalinamu iš katilo šlaku.

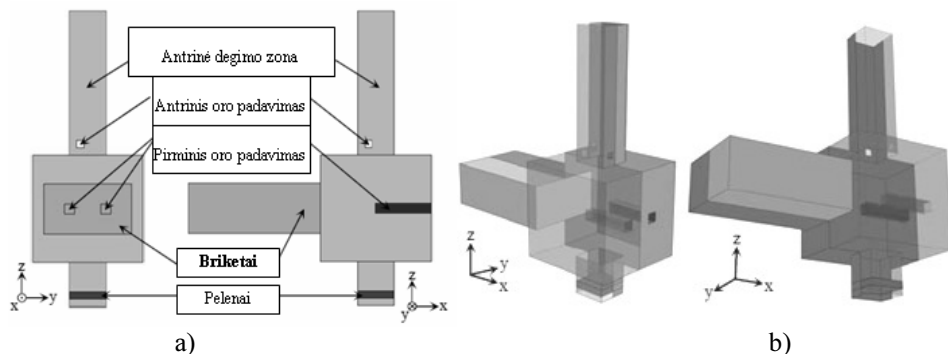
20–100 kW galios skystojo kuro katilų šiluminio NK iš esmės lemia šilumos nuostoliai dėl ištekančių dūmų, todėl NK gali siekti iki 95 %. Tuo tarpu kietojo kuro katiluose patiriama ir kitų šilumos nuostolių, kurių visuma lemia

tai, kad NK net ir gerai prižiūrimame katile dažniausiai neviršija 85 %. Ilgalaikis (sezoninis) šiluminio NK yra mažesnis už čia pateiktus, nes papildomai atsiranda stovėjimo (ventiliavimo į kaminą) šilumos nuostolių. Kuro sunaudojimą bet kokiam šilumos kiekiui pagaminti galima suskaičiuoti pagal 5.1 formulę:

$$\text{Kuro sunaudojimas} = \text{šilumos kiekis} / (\text{kuro degimo šiluma NK}) \quad (5.1)$$

Pvz.: žinant, kad dyzelino arba krosnių kuro degimo šiluma yra apie 12 kWh/kg, akmens anglies – 4–7 kWh/kg ir t. t., nesunku suskaičiuoti, kiek kuro būtų suvartojama vienai kWh ar kitokiam šilumos kiekiui pagaminti, esant įvairioms naudingumo koeficiento (NK) reikšmėms.

Biomasės deginimo modeliavimo pavyzdys. Siekiant parengti ir parametrizuoti deginimo iš kietosios biomasės modelį, originali degimo kameros geometrija yra supaprastinama, nors nepaisant to fluido dinamika, originali geometrija ir pagrindiniai ribiniai parametrai yra išlaikomi (5.2 pav.).



5.2 pav. Geometrinis skaitmeninis degimo kameros aprašymas degimui modeliuoti

Fig. 5.2. Geometrical numerical description of the combustion chamber for combustion modeling

COMSOL Multiphysics programų paketas

COMSOL Multiphysics – tai programa, kuri leidžia modeliuoti procesus ir reiškinius įvairiose mokslo bei technikos srityse. Ši programa turi netiesinių dalinių diferencialinių lygčių paketo įrankius dalinėms diferencialinėms lygtims analizuoti ir spręsti vienmatėje, dvimatėje bei trimatėje erdvėje, naudojant baigtinių elementų metodą.

COMSOL Multiphysics leidžia spręsti baigtinių elementų metodu (FEA) pačius sudėtingiausius mokslinius ir inžinerinius uždavinius, kurti nuosavus medžiagų modelius, baigtinių elementų elgseną, skaičiavimo procedūras elektronikos, optikos, mechatronikos, energetikos, alternatyviosios energetikos bei

chemijos srityse nuo skysčių tekėjimo ir šilumos perdavimo mechanikos iki elektromagnetinės analizės. *COMSOL Multiphysics* programinė modeliavimo įranga palengvina visus modeliavimo proceso etapus – apibrėžiant pasirinktą geometriją, suliejant ją su formulynu, sprendžiant ir vizualizuojant rezultatus. Modelio formavimas yra greitas dėl daugelio iš anksto nustatytų fizikinių dydžių sąsajų. Medžiagų savybės, procesai ir kraštinės sąlygos gali būti aprašomi kaip priklausomų kintamųjų funkcijos.

Cheminės reakcijos inžinerijos modulis. Cheminės reakcijos inžinerijos modulyje yra kuriami reakcijų sistemų modeliai, naudojančys reakcijų formules. Šiuo atveju sąvoka „modelis“ reiškia medžiagos (masės), energijos (šilumos) ir momento sistemos balansą. Cheminės reakcijos inžinerijos modulis ne tik apibrėžia, bet ir nustato medžiagų bei energijos balansą nuo erdvės nepriklausomiems modeliams (t. y., modeliams, kuriuose sudėtis ir temperatūra reakcijos sistemoje kinta tik laiko atžvilgiu) ir nuo erdvės priklausomiems modeliams. Tokiu būdu galima kurti modelius, tiesiogiai iš reakcijos formulių rinkinio įtraukiant medžiagų, energijos ir momento balansą. Į šiuos modelius taip pat įeina reakcijos sistamai skirtos kinetinės išraiškos, kurios cheminės reakcijos inžinerijos modulyje yra automatiškai arba rankiniu būdu apibrėžiamos. Be to, yra prieiga prie įvairių paruoštų reiškinių (pateikčių), skirtų sistemos termodinamikos ir pernašos savybių apskaičiavimui.

Cheminės reakcijos inžinerijos modulis pasižymi puikia cheminės inžinerijos modeliavimo įranga ir procesais. Jame yra individualiam vartotojui pritaikomos fizikos sąsajos ir formulės drauge su cheminėmis reakcijomis momentui, masei, šilumos pernašai. Jos skirtos tokioms sritims, kaip šios:

- Reakcijų inžinerija ir konstravimas;
- Heterogeninė katalizė;
- Atskyrimo procesai;
- Kuro elementai ir pramoninė elektrolizė;
- Proceso kontrolė.

COMSOL Multiphysics programa tinka sujungtų netiesinių diferencialinių lygčių sistemų, kurios apima šilumos pernašą, masių pernašą per difuziją, konvekciją ir migraciją, fluidų dinamiką, cheminių reakcijų kinetiką, kintančias medžiagų savybes, sprendimui.

Dėl *COMSOL Multiphysics* programos multifizikinių funkcijų galima susieti ir tuo pačiu modeliuoti fluidų srautą, masę ir šilumos pernašą bei chemines reakcijas. Modulio fizikos sąsajos apima šias sritis:

- cheminė elementų pernaša (reakcijų inžinerija, atskiestų cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų transportavimas per difuziją, konvekciją ir migraciją elektriniuose laukuose, koncentruotų cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų transportavimas naudojant vieną iš difuzijos modelių: mišinio vidurkis, Maksvelio-Stefano arba Fiko dėsnis – Nernsto Planko lygtys),

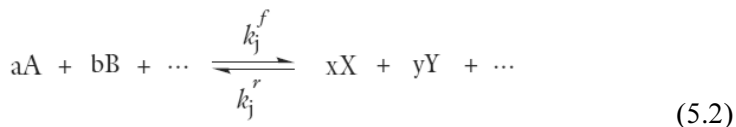
- šilumos pernaša fluiduose, kietuosiuose kūnuose ir akytoje terpėje;
- fluidų srautas (Vienos fazės srautas (nesuspaudžiamumo Navjė-Stokso lygtys), Darsi dėsnis, Brinkman lygtys, Laisvasis srautas ir srautas per akytąją terpę) (Comsol Multiphysics... 2012).

5.2. Apibrėžtoje erdvėje vykstančių degimo procesų skaitinio modeliavimo metodika

Panaudojant skaitinio modeliavimo programą *COMSOL Multiphysics* atliktas multifizikinių procesų modelio sprendimas. Sprendimo metu buvo panaudota keletas programinio paketo modulių – tai cheminės inžinerijos modulis „*Chemical Engineering Module*“ ir degimo procesų ir produktų modulis „*Products of combustion engineering*“. Šie moduliai leidžia modeliuoti procesus, kurie paremti cheminėmis reakcijomis, kurios vyksta kartu su energijos virsmas, masės ir šilumos pernašos procesais. Modelyje vertinama ūkių procesų įtaka teršalų išsiskyrimui. Viena šio kompleksiško modulio ypatybių yra galimybė matematiškai įvertinti heterogenines katalitines šiluminių procesų reakcijas, vykstančias katiluose.

COMSOL Multiphysics pasižymi galimybe spręsti jungtines netiesinių dalių diferencialinių lygčių sistemas, kurios įvertina šilumos masės pernašą dėl difuzijos, konvekcijos ir judėjimo, fluido dinamiką, cheminės reakcijos kinetiką bei įvairias medžiagų savybes.

„*Chemical Engineering Module*“ ir „*Products of combustion engineering*“ moduluose vykstantys procesai paremti inžinerijos reakcijos sąsaja su masių dėsniu, iš jo ir šilumos pernašos. Bendroji reakcija, priklausanti j reakcijų rinkiniui ir apimanti i elementus, gali būti užrašyta taip:



čia: A, B – atitinkamai pirminis ir antrinis cheminės reakcijos elementai; k_j^f ir k_j^r – atitinkamai reakcijos pirmyn ir atgal greičio konstantos, 1/s;

Pagal veikiančių masių dėsni tokiam reakcijų rinkiniui galima apibrėžti reakcijos greitį r_j (mol/(m³·s)):

$$r_j = k_j^f \prod_{i \in react} c_i^{-v_{ij}} - k_j^r \prod_{i \in prod} c_i^{v_{ij}} \quad (5.3)$$

čia: k_f ir k_r – atitinkamai reakcijos pirmyn ir atgal greičio konstantos, 1/s; c_i – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų i koncentracija, mol/m³; ν_{ij} – stoechiometriniai koeficientai (neigiami reagentų ir teigiami produktų atveju).

Be priklausomybės nuo medžiagos kiekio, galima užrašyti ir reakcijos / proceso greičio priklausomybę nuo temperatūros. Tam naudojama iš anksto apibrėžta Arenijaus išraiška cheminės reakcijos greičio konstantoms (tos pačios cheminės reakcijos greičio konstantos naudojamos ir modeliuojant katilo viduje vykstančius šilumos mainų procesus, ir teršiančių medžiagų išsiskyrimo tendencijas, kadangi čia vykstantys procesai taip pat gali būti aprašyti cheminėmis reakcijomis, tik kitos fazės, todėl toliau tekste aprašant modeliuojamame katile vykstančius procesus jie bus įvardijami tik kaip „cheminės reakcijos“ arba „reakcijos“ procesai):

$$k = AT^n \exp\left(-\frac{E}{R_g T}\right) \quad (5.4)$$

čia: A – eksponentinis faktorius; E – aktyvavimo energija, J/mol; R_g – dujų konstanta; T^n – temperatūros faktorius; T – temperatūra, K.

Iš anksto apibrėžta cheminių reakcijų išraiška, esant pusiausvyrai, gali būti užrašyta taip:

$$K_{0,j}^{eq} = \exp\left(-\frac{H_j}{R_g T} + \frac{S_j}{R_g}\right) \quad (5.5)$$

čia: H_j – entalpija, J; S_j – entropija, J/K.

Eksponentinė išraiška 5.5 lygtyje yra susijusi su Gibso laisvąja reakcijos energija:

$$G_j = H_j - TS_j \quad (5.6)$$

čia: G_j – Gibso laisvoji energija, J/mol;

Atlikus 5.2 lygtyje išreikštos reakcijos nustatymus, darant pusiausvyros prielaidą, generuojama pusiausvyros išraiška:

$$K^{eq} = \frac{c_x^x c_y^y \dots}{c_A^a c_B^b \dots} \quad (5.7)$$

čia: c_A , c_B – atitinkamai pirminių A ir antrinių B reakcijos elementų koncentracijos, mol/m³; c_x , c_y – atitinkamai susidariusių elementų koncentracija, mol/m³.

5.2–5.7 lygtys rodo, kaip „*Chemical Engineering Module*“ modulio reakcijos inžinerijos sąsajoje modeliuojamos pusiausvyros reakcijos, naudojant medžiagų pusiausvyros lygčių formuluotes. Gali būti nagrinėjama ir tokia reakcija:



čia: A , B – atitinkamai pirminis ir antrinis cheminės reakcijos elementai; k^f ir k^r – atitinkamai reakcijos pirmyn ir atgal greičio konstantos, 1/s.

Remiantis 5.3 lygtimi, cheminės reakcijos greitis išreiškiamas:

$$r = k^f c_A - k^r c_B \quad (5.9)$$

čia: r – cheminės reakcijos greitis, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; k^f ir k^r – atitinkamai reakcijos pirmyn ir atgal greičio konstantos, 1/s; c_A , c_B – atitinkamai pirminių A ir antrinių B reakcijos elementų koncentracijos, mol/m^3 .

Galutinės cheminės reakcijos greičio išraiškos A ir B cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų atžvilgiu yra:

$$R_A = -k^f c_A + k^r c_B = -r \quad (5.10)$$

$$R_B = k^f c_A - k^r c_B = r \quad (5.11)$$

čia: R_A , R_B – A ir B elementų galutinis cheminės reakcijos greitis, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

Užrašius cheminėje reakcijoje dalyvaujančių A ir B elementų medžiagų balansą, gaunama:

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} + \nabla \cdot N_A = R_A = -r \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial c_B}{\partial t} + \nabla \cdot N_B = R_B = r \quad (5.13)$$

čia: N_A ir N_B – molių srauto vektoriai atitinkamai A ir B elementams, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; c_A , c_B – atitinkamai pirminių A ir antrinių B reakcijos elementų koncentracijos, mol/m^3 ; r – cheminės reakcijos greitis atitinkamai A ir B elementams, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

Elementų A sureagavimo greitis yra lygus B elementų susidarymo greičiui, kaip parodyta 5.12 ir 5.13 lygtyse. Darant prielaidą, kad 5.8 lygtis – tai yra pusiausvyra, iškyla problema, kadangi r reikšmė nėra aiški. Tačiau toliau pateiktas santykis nurodo ryšį tarp reakcijos greičio į priekį ir atgal 5.8 lygtyje:

$$K^{eq} = \frac{k^f}{k^r} = \frac{c_B}{c_A} \quad (5.14)$$

čia: k' ir k'' – atitinkamai reakcijos pirmyn ir atgal greičio konstantos, 1/s; c_A , c_B – atitinkamai pirminių A ir antrinių B reakcijos elementų koncentracijos, mol/m³.

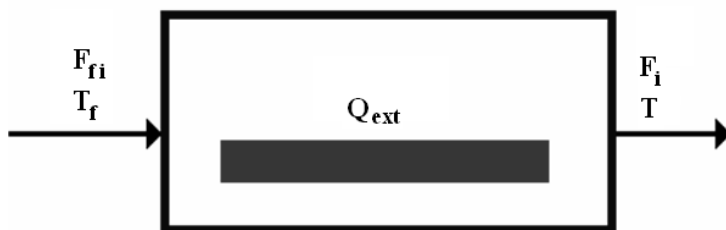
Turint bendrą 5.12, 5.13, 5.14 lygčių informaciją, modeliavimo programos reakcijos inžinerijos paprogramė gali apibrėžti masės balansą pusiausvyrai sistemai nežinant reakcijos greičio išraiškos. Reakcijos inžinerijos paprogramė (sąsaja) pašalina reakcijos greičio išraiškas, tiesiniu būdu derindama masės balansus, todėl lygčių sistema tampa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_A + c_B) + \nabla \cdot (N_A + N_B) = 0 \quad (5.15)$$

$$K^{eq} = \frac{c_B}{c_A} \quad (5.16)$$

čia: N_A ir N_B – molekulių srauto vektoriai atitinkamai A ir B elementams, mol/(m²·s); c_A , c_B – atitinkamai pirminių A ir antrinių B reakcijos elementų koncentracijos, mol/m³.

Prieš modeliuojant svarbu nurodyti, kokio tipo procesai vyks tiriamojoje erdvėje, kokios reakcijos vyks, kokia tiriamoji fazė ir panašiai. Buvo pasirinktas iš dalies srautinio katilo / reaktoriaus tipas – tai yra pakura yra stacionari, bet yra nuolat „įnešamas“ kuras (kietoji fazė) ir yra pastovus oro (dujinės fazės) papildymas tiriamojoje erdvėje, kadangi be papildomo dujinės fazės įnešimo uždaroje kameroje vykstantys procesai bus baigtiniai laiko kitimo erdvėje. Srautiniame reaktoriuje cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracija ir temperatūra kinta kartu su fluideo ir kietosios fazės komponentų padėties vieta katile. Esant vamzdinei katilo konstrukcijai (5.3 pav.), koncentracijos ir temperatūros gradientams leidžiama kisti ašine, tačiau ne spinduline kryptimi.



5.3 pav. Teorinio srautinio katilo vamzdinė konstrukcija katilo pakuros modeliavimo programoje

Fig. 5.3. Tubular construction of theoretical blast boiler in simulation programme for boiler kindler

Cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų masės balansas išreiškiamas tokiu būdu:

$$\frac{dF_i}{dV} = R_i \quad (5.17)$$

čia: F_i – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų molių srautas, mol/s; V – reaktoriaus tūris, m^3 ; R_i – cheminių elementų reakcijos greitis, $mol/(m^3 \cdot s)$.

Siekiant įvertinti greičio R_i išraiškas, kurios yra cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracijų funkcijos, reakcijos inžinerijos sąsaja modeliavimo programoje įvertina tokią lygtį:

$$c_i = \frac{F_i}{v} \quad (5.18)$$

čia: F_i – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų molių srautas, mol/s; c_i – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracija, mol/m^3 ; v – tūrio debitas, m^3/s .

Idealiųjų dujų atveju gaunama:

$$v = \frac{R_g T}{p} \sum_i F_i \quad (5.19)$$

čia: F_i – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų molių srautas, mol/s; R_g – dujų konstanta; T – temperatūra, K; p – slėgis, Pa.

Į 5.17 lygtį įrašius 5.18 lygtį gaunama cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracijos išraiška:

$$c_i = \frac{p}{R_g T} \frac{F_i}{\sum_i F_i} \quad (5.20)$$

čia: c_i – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracija, mol/m^3 ;

Ignoruojant slėgio mažėjimą, idealiųjų reaguojančių dujų bei nespūdaus, idealiai sumaišyto reaguojančio skysčio energijos balansas yra:

$$\sum_i F_i C_{p,i} \frac{dT}{dV} = w_s + Q + Q_{ext} \quad (5.21)$$

čia: $C_{p,i}$ – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų molių šiluminė talpa, $J/(mol \cdot K)$; w_s – papildomas darbas, $J/(m^3 \cdot s)$; Q_{ext} – vienam sistemos tūrio sistemos suteikta šiluma, $J/(m^3 \cdot s)$; Q – cheminės reakcijos sąlygota šiluma, $J/(m^3 \cdot s)$.

Cheminės reakcijos sąlygota šiluma apskaičiuojama:

$$Q = - \sum_j H_j r_j \quad (5.22)$$

čia: H_j – reakcijos šiluma, J/mol; r_j – reakcijos greitis, mol/(m³·s).

Pernašos parametrai. Dujinės sistemos atveju *COMSOL Multiphysics* reakcijos inžinerijos sąsaja, remdamasi 5.22 lygtimi, kuri yra pagrįsta kinetine dujų teorija, apskaičiuoja difuzijos koeficientus:

$$D_{AB} = 2,66 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{T^3 (M_A + M_B) / (2 \cdot 10^3 M_A M_B)}}{p \sigma_A \sigma_B \Omega_D} \quad (5.23)$$

čia: D_{AB} – dvigubos difuzijos koeficientas, m²/s; M – molekulinė masė, kg/mol; T – temperatūra, K; p – slėgis, Pa; σ – Lenardo-Džonso/Stockmayer potencialo charakteringas ilgis, Å; Ω_D – susidūrimo integralas.

Chemiškai atskiestų elementų pernaša. Atskiestų elementų pernašos sąsaja modeliuoja cheminių elementų pernašą per difuziją ir konvekciją bei sprendžia masės balanso lygtį:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c = \nabla \cdot (D \nabla c) + R \quad (5.24)$$

čia: c – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracija, mol/m³; D – difuzijos koeficientas, m²/s; R – cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų reakcijos greičio išraiška, mol/(m³·s); u – greičio vektorius, m/s.

Pirmoji kairėje 5.24 lygties pusėje esanti išraiška atitinka cheminėje reakcijoje dalyvaujančių elementų koncentracijos kitimą. Antroji išraiška reiškia konvekcine pernašą dėl greičio lauko u .

Dešinėje masės balanso 5.24 lygties pusėje esanti pirmoji išraiška apibūdina difuzijos pernašą, pasireiškiančią dėl sąveikos tarp atskiestų cheminių elementų ir tirpiklio. Antroji išraiška, esanti 5.24 lygties dešinėje pusėje, simbolizuoja reakcijos greitį, pasireiškiantį dėl cheminės reakcijos.

Šilumos pernaša. Pagrindinis dėsnis, aiškinantis visas šilumos pernašas, yra pirmasis termodinamikos dėsnis, paprastai vadinamas energijos išsaugojimo principu. Vis dėlto vidinė energija u yra itin nepatogus matavimams ir modeliavimui dydis. Dėl šios priežasties pagrindinis dėsnis dažniausiai perrašomas, pasitelkiant temperatūrą, T . Fluidų atveju pasireiškia tokia šilumos lygis:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla) p \right) + Q \quad (5.25)$$

čia: ρ – tankis, kg/m^3 ; C_p – savitoji šilumos talpa, esant pastoviam slėgiui, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T – absoliučioji temperatūra, K; u – greičio vektorius, m/s ; q – šilumos srautas, W/m^2 ; p – slėgis, Pa; τ – klampos įtempimo tenzorius, Pa; S – įtempimo greičio tenzorius, $1/\text{s}$; Q – šilumos kiekis, W/m^3 .

Įtempimo greičio tenzorius apskaičiuojamas:

$$S = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (5.26)$$

Išvedant 5.25 lygtį, naudojami įvairūs termodinaminiai ryšiai. Šioje lygtyje daroma prielaida, kad masė visada išlaikoma, todėl tarp tankio ir greičio yra toks ryšys:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (5.27)$$

čia: ρ – tankis, kg/m^3 ; v – greitis, m/s ;

Šilumos pernašos modeliavimo procese taip pat naudojamas Furjė šiluminio laidumo dėsnis, kuris teigia, kad laidžios šilumos srautas q yra proporcingas temperatūros gradientui:

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.28)$$

čia: q – šilumos srautas, W/m^2 ; k – šiluminis laidumas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Įterpus 5.27 lygtį į 5.24 lygtį, pertvarkius išraiškas ir nepaisant klampaus įšilimo bei slėgio, gaunama labiau žinomos lygties forma:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5.29)$$

čia: ρ – tankis, kg/m^3 ; C_p – savitoji šilumos talpa, esant pastoviam slėgiui, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T – absoliučioji temperatūra, K; u – greičio vektorius, m/s ; k – šiluminis laidumas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Q – šilumos kiekis, W/m^3 .

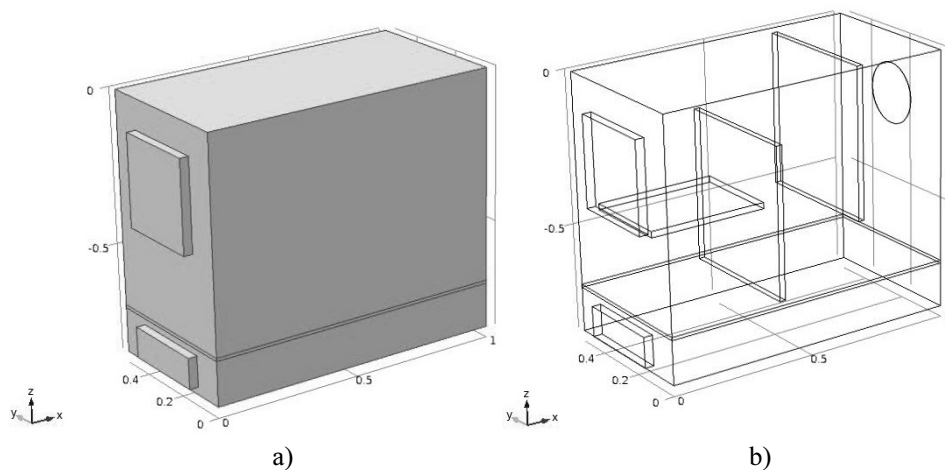
COMSOL Multiphysics modeliavimo programos šilumos pernašos ir šilumos pernašos fluiduose sąsaja sprendžia 5.28 lygtį temperatūros T atžvilgiu. „*Chemical Engineering Module*“ modulis anksčiau pateiktas lygtis sprendžia tiesiogiai. Paprastai sistemos, kurią sudaro reakcijos, generuojančios n masės balansą su m reakcijomis, joms esant pusiausvyroje atveju, supaprastina lygčių sistemą ir sudaro $n - m$ masės balanso ir m pusiausvyros išraiškas. Anksčiau

minėtą lygčių sistemą generuojantis pašalinimo procesas cheminės reakcijos inžinerijos modulyje yra automatizuotas, todėl galima modeliuoti cheminės pusiausvyros lygtis drauge su grįžtančiomis ir negrįžtančiomis reakcijomis.

5.3. Skaitinio modelio sudarymas

Sprendžiant uždaroje erdvėje vykstančių procesų modeliavimo uždavinį – projektuojamame katile vykstančio degimo proceso modeliavimą, pirmiausia yra sukuriamas pradinėmis sąlygomis aprašytas tyrimo objektas. Skaičiavimo erdvėje sudarytas katilo maketas (5.4 pav.).

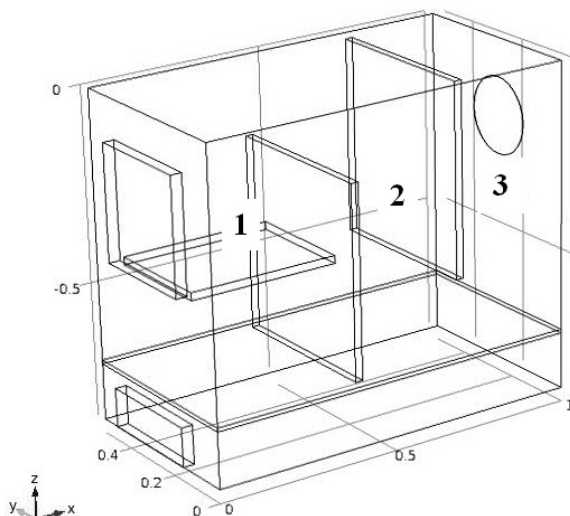
Šio katilo pagrindiniai matmenys ir parametrai yra panašūs į briketų deginimo tyrimams naudojamo katilo parametrus. Katilo ilgis siekia 90 cm, plotis – 52 cm, aukštis – 100 cm.



5.4 pav. Teorinio katilo modelio maketo sukūrimas: a) – bendras vaizdas;
b) – vidinis vaizdas

Fig. 5.4. Creation of theoretical boiler model layout: a) – general view;
b) – inside view

Pagrindiniai tiriamojo maketo parametrai: katilas yra suskirstytas į tris dalis, pirmojoje dalyje vyksta degimas, antroji katilo dalis skirta procesų stabilizavimui (pagal šioje zonoje sumodeliuotus parametrus toliau yra analizuojami rezultatai), trečioji dalis skirta degimo proceso metu susidariusių degimo produktų pašalinimui.

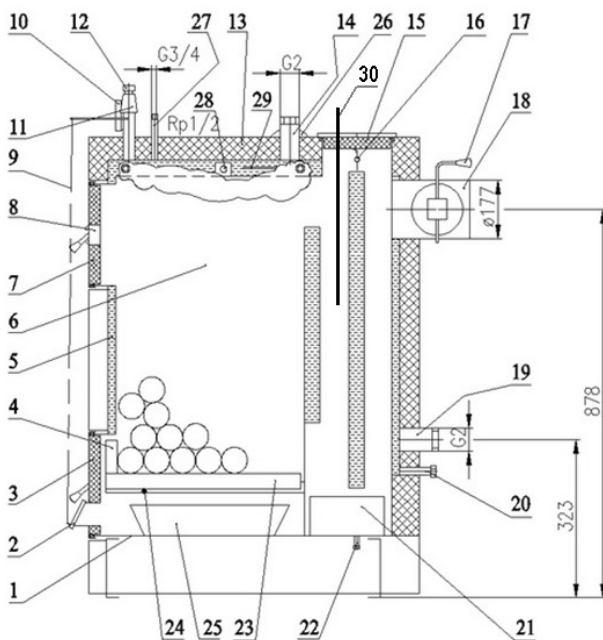


5.5 pav. Teorinio katilo modelio maketo suskirstymas į dalis: 1 dalis – vyksta degimas; 2 dalis – procesų stabilizavimas; 3 dalis – degimo produktų pašalinimas

Fig. 5.5. Breakdown into the parts of theoretical boiler model: part 1 – combustion takes place; part 2 – stabilization processes; part 3 – removal of combustion products

Katilo maketas buvo sudarytas pagal dabar smulkiuosiuose ūkiuose plačiai naudojamus vandens šildymo katilus, kuriuose yra viršutiniojo degimo su ant-riniu oro tiekimu sistema.

Katilas suprojektuotas pagal Europos bendrijos (EB) tarybos direktyvos 97/23 EEB „Slėginiai įrenginiai“ reikalavimus bei atitinka standartų LST EN 303-5:2000 „Šildymo katilai. Rankomis ir automatiškai pakraunami kieto kuro šildymo katilai, kurių vardinė galia iki 300 kW“ ir LST EN 12828:2003 „Pastatų šildymo sistemos. Vandeninių šildymo sistemų projektavimas“ reikalavimus. Vandens šildymo katilo principinė schema pateikta 5.6 paveiksle.



5.6 pav. Vandens šildymo katilo principinė schema: 1 – pagrindas; 2 – oro padavimo durelės; 3 – apatinės durelės; 4 – vidinės durelės; 5 – šilumokaitis; 6 – pakura; 7 – viršutinės durelės; 8 – antrinio oro tiekimo sklendė; 9 – grandinė; 10 – termomanometras; 11 – oro traukos reguliatorius; 12 – apsauginis vožtuvas; 13 – dekoratyvinis skydas; 14 – vandens ištekėjimo atvamzdis; 15 – suodžių valymo dangtis; 16 – dūmų paskirstymo sklendė; 17 – traukos reguliavimo sklendė; 18 – dūmtraukis; 19 – vandens įtekėjimo atvamzdis; 20 – vandens išleidimo atvamzdis su akle; 21 – suodžių valymo dangtis; 22 – kondensato išleidimo atvamzdis su akle; 23 – grotelės; 24 – grotelių pajudavimo rankena; 25 – pelenų dėžė; 26 – gaubtelis; 27 – temperatūros viršijimo apsauginio vožtuvo atvamzdis; 28 – temperatūros jutiklio atvamzdis; 29 – saugos šilumokaitis; 30 – matavimo zondas

Fig. 5.6. Principled diagram of water heating boiler: 1 – base, 2 – door for air supply, 3 – lower door, 4 – interior door, 5 – heat exchanger, 6 – kindler, 7 – upper door, 8 – valve for feed of secondary air, 9 – chain, 10 – thermomanometer, 11 – air traction regulator, 12 – safety valve, 13 – decorative panel, 14 – water discharge outlet, 15 – soot cleaning lid, 16 – smoke distribution valve, 17 – traction control valve, 18 – chimney, 19 – water inflow outlet, 20 – water discharge outlet with drain plug, 21 – soot cleaning lid, 22 – condensate discharge outlet with drain plug, 23 – grid, 24 – grid moving handle, 25 – ash box, 26 – cap, 27 – safety valve outlet of temperature excess, 28 – temperature sensor outlet, 29 – safety heat exchanger, 30 – probe

Atlikti kompleksiniai briketų su sapropeliu tyrimai parodė, jog tvirčiausi mechaniniu požiūriu yra sapropelio su medžio pjuvenomis briketai, kurių sudėtyje yra iki 30 % organinio sapropelio. Sapropelio ir medžio pjuvenų briketų deginimo tyrimais nustatyta, jog šios sudėties briketuose išmatuotos mažiausios CO ir SO₂ emisijos. Modeliavimui pasirinkti 3 skirtingos rūšies briketai: du briketų mišiniai su organiniu sapropeliu ir palyginimui vienas mišinys su siliciniu sapropeliu. Briketams gaminti nebuvo naudojamas silicinis sapropelis, tačiau jis buvo vertinamas skaičiuojant šilumines vertes. Gauti briketų su siliciniu sapropeliu modeliavimo rezultatai buvo lyginami su šiluminių verčių skaičiavimo rezultatais. Briketų su organiniu sapropeliu šiluminių verčių ir teršalų emisijų rezultatai buvo lyginami su atliktų tyrimų metu gautomis vertėmis. Sumodeliuotas katilas užkrautas skirtingos sudėties briketais, kurių sudėtis pateikta 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Modeliavimui naudoti sapropelio ir pjuvenų briketai

Table 5.1. Briquetted of sapropel and sawdust used for modeling

Sapropelio kiekis ir tipas	Medžio pjuvenų kiekis, %
30 % (silicinis sapropelis)	70
20 % (organinis sapropelis)	80
30 % (organinis sapropelis)	70

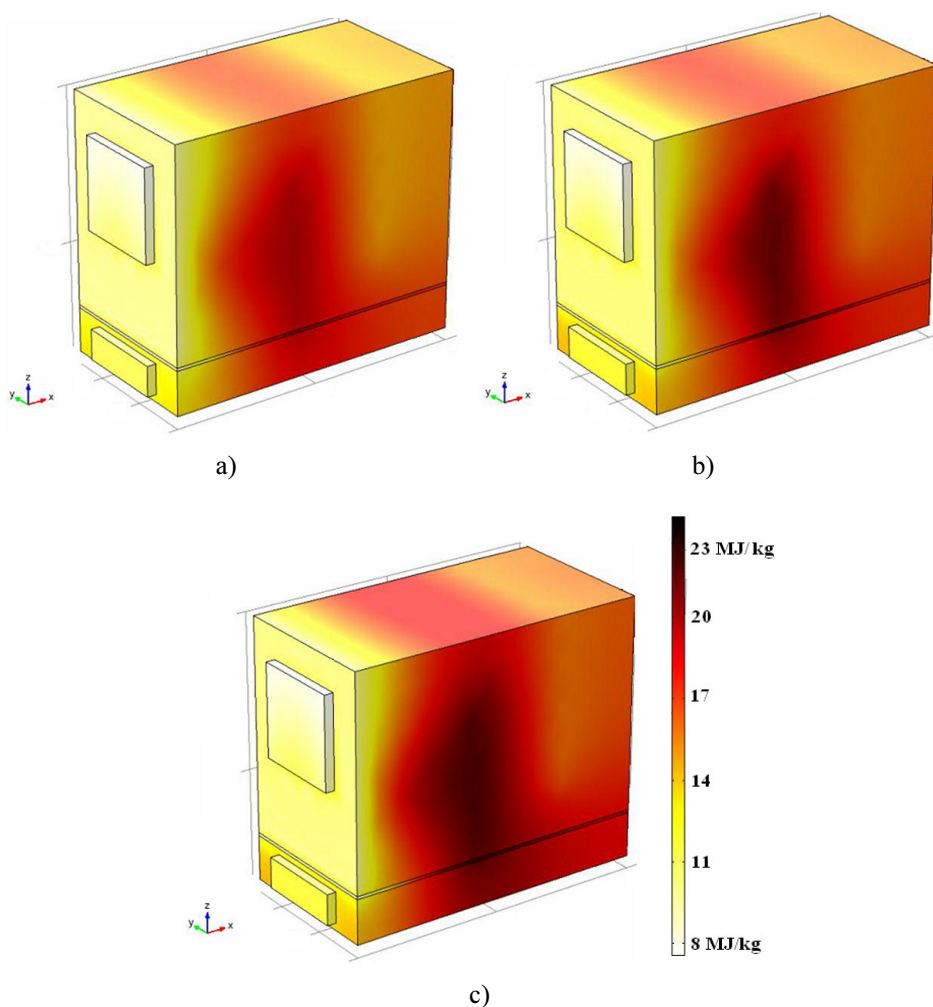
Modelyje įtraukiama sąlyga, kad vyksta pilnas degimo procesas. Priimama, kad katilo naudingumo koeficientas – 0,85 (pagal siūlomą *COMSOL Multiphysics* metodiką). Modelyje nėra projektuojamas vandens pritekėjimas ir su tuo susiję šilumos perdavimo procesai.

Vienu metu dėl pakuros dydžio ir siekiant užtikrinti efektyviausią degimo procesą modeliuotos šiluminės vertės ir teršalų emisijos iš katilo, kuriame buvo 4 briketai (bendra jų masė – 1,5 kg).

5.4. Šiluminių verčių skaitinis modeliavimas

Pirmasis skaitinio modeliavimo uždavinys buvo nustatyti degimo metu gaminamą energijos kiekį, kuris tiesiogiai priklauso nuo kokybinės į pakurą užkraunamo kuro sudėties.

Skaitinio modeliavimo metu pirmiausiai sudarytas modelis, kuriame buvo naudojami briketai, pagaminti panaudojant 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų. Vertinant gautus rezultatus (5.7a pav.) matyti, kad didžiausias išsiskyrusios energijos kiekis gaunamas pačioje pakuroje ir siekia 18 MJ/kg.



5.7 pav. Energijos kiekio pasiskirstymas modelyje, kai naudojami:
 a) 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai; b) 20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketai; c) 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų sudėties briketai

Fig. 5.7. The amount of energy distribution in model, when used:
 a) 30% siliceous sapropel and 70% sawdust briquette; b) 20% organic sapropel and 80% sawdust briquette; c) 30% organic sapropel and 70% sawdust briquette

Antrojoje katilo dalyje energijos kiekis lygus 15,3 MJ/kg ir galime daryti išvadą, kad, palyginti su pačioje pakuroje gautomis reikšmėmis, energijos kiekis

kinta 1,3 karto. Tai visiškai atitinka modeliavimo uždavinyje iškeltą prielaidą, kad katilo efektyvumo koeficientas yra lygus 0,85. Lyginant su apskaičiuotomis vertėmis tyrimais (4.3 skyrius) ir vertinant su naudojamų briketų šiluminių vertčių reikšmėmis, gaunama, kad pakuroje sumodeliuota reikšmė yra 12 % didesnė nei apskaičiuota (13,5 MJ/kg) reikšmė, bet, įvertinus tai, kad katilo efektyvumo koeficientas yra lygus 0,85, šis netikslumas sumažėja iki 1,1. Gautas skirtumas įrodo, kad skaitinis modelis yra sudarytas korektiškai ir koreliuoja su eksperimentinių tyrimų metu gautais rezultatais.

Antruoju atveju į pakurą yra įdedami 20 % organinio sapropeilio ir 80 % medžio pjuvenų briketai. Kaip ir pirmuoju atveju maksimalus energijos išsiskyrimas fiksuojamas pirmojoje katilo dalyje (5.7b pav.). Kadangi tiriamuosiuose briketuose yra organinis sapropeilis, todėl modeliavimo rezultatuose akivaizdžiai matyti, kad gaunama didesnė šiluminė vertė. Lyginant su pirmuoju modeliu ši vertė didesnė 1,1 karto, o lyginant su antrojoje katilo dalyje sumodeliuota šilumine verte ir eksperimentiniais tyrimais, 1,2 karto didesnė. Paklaida su eksperimentiniais tyrimais sudaro 9 %. Modeliuojant gautos reikšmės atitinka realius rezultatus, nes gauta mažos paklaidos vertė. Jeigu lygintume gaunamą šiluminę vertę su kitų kuro rūšių šiluminėmis vertėmis, tai gautume, kad ji yra mažesnė nei durpių kuro (22 MJ/kg) 1,1 karto, bet didesnė nei medžio pjuvenų kuro (14,5 MJ/kg) 1,4 karto, todėl šio mišinio briketai gali būti naudojami mažų galių katiluose ir nenusileisti šiuo metu vyraujančioms šiame sektoriuje kuro rūšimis.

Atlikus eksperimentinius tyrimus buvo nustatyta, kad didžiausią šiluminę vertę turi briketai, sudaryti iš 30 % organinio sapropeilio ir 70 % medžio pjuvenų. Įvedus kokybinius šio briketo parametrus gauti rezultatai (5.7c pav.), kurie aiškiai rodo, kad gaunamos šiluminės vertės yra pačios didžiausios (5.7 pav.). Lyginant su pirmuoju variantu (5.7a pav.), kai yra naudojami 30 % silicinio sapropeilio ir 70 % medžio pjuvenų briketai, tai šiluminė vertė didesnė 1,3 karto. Atitinkamai lyginant su antrojoje katilo dalyje sumodeliuota (20 MJ/kg) šilumine verte ir eksperimentiniais tyrimais gauta vertė (15,6 MJ/kg), modeliavimo rezultatai yra 1,3 karto didesni, nei nustatyta eksperimentiškai. Lyginant gautus rezultatus su antruoju variantu (5.7b pav.), kai yra naudojami 20 % organinio sapropeilio ir 80 % medžio pjuvenų briketai, šiluminė vertė didesnė 1,2 karto.

Apibendrinant gautus rezultatus gauta, kad, remiantis eksperimentiniais tyrimais ir modeliavimo rezultatais, labiausiai tinkami deginimui briketai turi būti sudaryti iš 30 % sapropeilio ir 70 % medžio pjuvenų. Šios sudėties briketai degimo metu išskiria 23 MJ/kg šiluminę vertę, o antrojoje katilo dalyje 20 MJ/kg. Lyginant su eksperimentiniais tyrimais nesutapimas sudarė apie 20 %. Vertinant kitas kuro rūšis – medžio pjuvenas (14,5 MJ/kg), gauta šiluminė vertė yra 1,4 kartų didesnė, o lyginant su šiaudais (15,0 MJ/kg) – atitinkamai 1,3 kartų didesnė.

Antrojoje katilo dalyje gauti briketų su sapropeiliu modeliavimo duomenys ir tyrimų rezultatai pateikti 5.2 lentelėje.

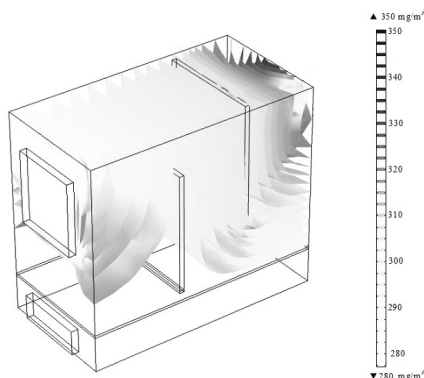
5.2 lentelė. Šiluminių verčių rezultatai**Table 5.2.** Calorific values results

Briketai	Tyrimų metu gauta vertė, MJ/kg	Sumodeliuota vertė, MJ/kg
30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų	13,5	15,3
20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų	15,4	16,8
30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų	15,6	20,0

Gauti skaitinio modeliavimo duomenys įrodo, kad parinkus kiekybiškai (priklausomai nuo naudojamų medžiagų kiekio) tinkamą briketų sudėtį gaunama šiluminė vertė yra pakankamai aukšta – 20 MJ/kg, todėl 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai yra perspektyvūs naudoti mažuose organinio kuro deginimo ūkio objektuose.

5.5. Katile susidarančių teršalų skaitinis modeliavimas

Kietųjų dalelių išsiskyrimo modeliavimas. Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą bei eksperimentinius tyrimus buvo nustatyta, kad sapropelis pagal savo sudėtį, labai veikia į aplinkos orą išsiskiriančių teršalų koncentracijas ir ypač kietųjų dalelių koncentracijas.



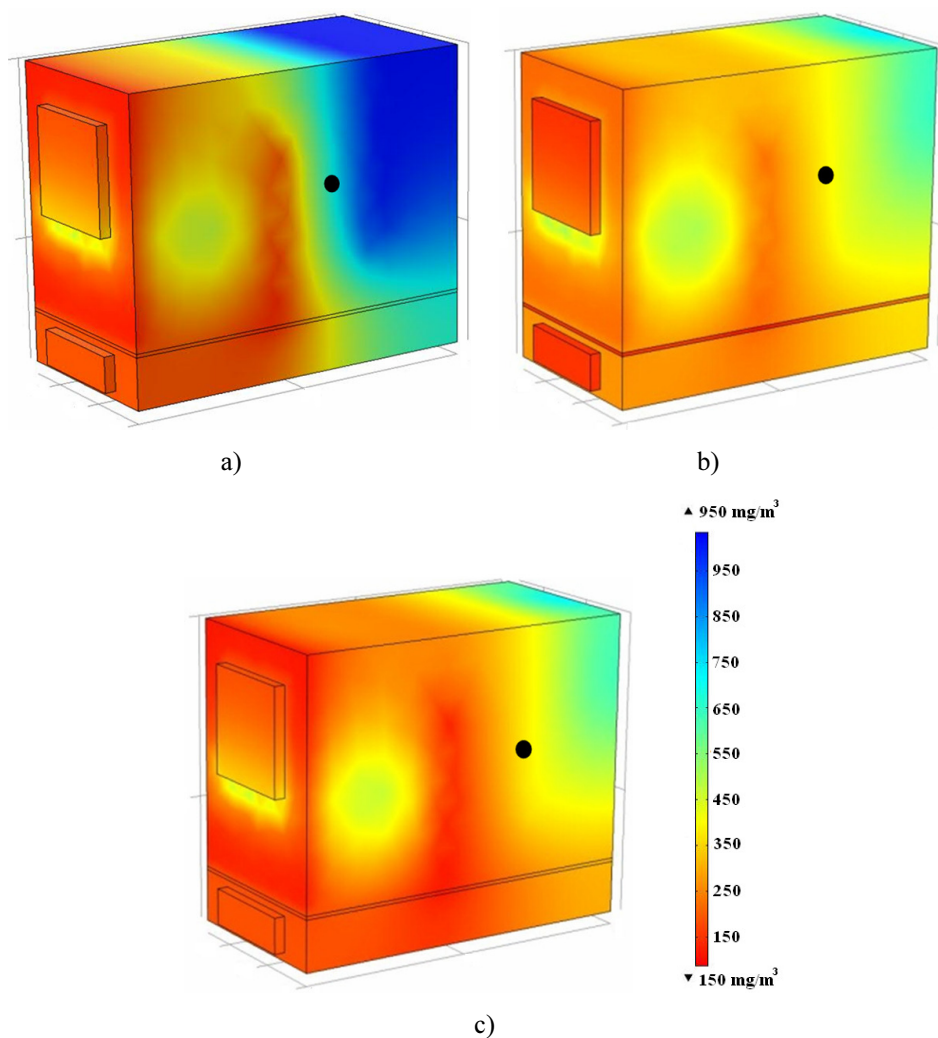
5.8 pav. Kietųjų dalelių išsiskyrimas, kai naudojami 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai

Fig. 5.8. Particulate matter emissions, with the use of 30% siliceous sapropel and 70% sawdust briquettes

Sapropelio sudėtis yra artima durpėms ar dumbliui, todėl jo peleningumas yra didelis. Iš mokslinės literatūros nustatyta, kad sapropelis būna: mažai peleningas (organinis), turintis iki 30 % pelenų arba labai peleningas (30–85 % pelenų), kai tuo tarpu durpių 5 %, medienos 0,5 %, šiaudų 5 %, naudojamo tyrimui ir modeliavimui organinio sapropelio peleningumas siekia iki 10 %, silicinio sapropelio – 30 %. Atsižvelgiant į tai pirmiausiai sumodeliuoti kietųjų dalelių išsiskyrimai iš „veikiančio“ katilo. Panaudojus pirmosios sudėties briketus, kai silicinio sapropelio yra 30 %, o medžio pjuvenų – 70 %, buvo gauta, kad į aplinką išsiskirs 350 mg/m^3 kietųjų dalelių (5.8 pav.). Iš pateikto 5.8 paveikslo matyti, kad kietųjų dalelių pasiskirstymas katilo skerspjuvyje yra nevienodas. Vertinant bendrą išmetimo lygį galima sakyti, kad kietųjų dalelių koncentracijos yra didelės, tačiau kadangi pagal šiuo metu galiojantį teisės aktą – LAND 43–2001 mažiesiems katilams kietųjų dalelių normatyvo nėra, todėl gautą reikšmę galima tik sąlygiškai vertinti kaip „didelę“.

Kadangi kietųjų dalelių koncentracija nesusijusi su cheminėmis reakcijomis, vykstančiomis katilo viduje, todėl jų išsiskyrimas į aplinkos orą yra tiesiogiai proporcingas naudojamo kuro peleningumui. Kadangi modeliavimo metu gauti rezultatai, pateikti paveiksluose, yra panašūs (skiriasi tik koncentracijos lygį žyminčios skalės duomuo), todėl palyginimui pateikiami tokie gauti rezultatai: kai naudojamas antrasis variantas – 20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketo mišinys, kietųjų dalelių kiekis išmetamosiose dujose padidėjo 1,1 karto, palyginti su eksperimento metu gautais rezultatais, ko tai atitiko 80 % peleningumo dėl briketų sudėties pokyčio padidėjimą. Panaudojus trečiąją briketų sudėtį (30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų gaunami analogiški rezultatai – išsiskiriančių kietųjų dalelių kiekis padidėjo dar 1,2 karto, o tai atitiko 80 % peleningumo dėl kokybinės briketų sudėties padidėjimą. Modeliavimo metu gauti duomenys įrodo, kad išmetamojo srauto sudėtyje esančių kietųjų dalelių kiekis tiesiogiai proporcingai (pastebėta 80 % padidėjimo tendencija) padidėja, priklausomai nuo to, kokią dalį sudaro organinis sapropelis.

Anglies monoksido išsiskyrimo modeliavimas. Deginant bet kokią iškastinį kurą į aplinkos orą yra išmetami cheminiai teršalai, todėl trečiajame etape buvo sumodeliuotas anglies monoksido išsiskyrimas panaudojant anksčiau minėtus įvairios sudėties briketus. Anglies monoksidas taip pat priklauso nuo briketų sudėties, todėl pirmiausia buvo sumodeliuotas anglies monoksido išsiskyrimas naudojant 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų mišinio briketus (5.9 a pav.).



5.9 pav. Anglies monoksido išsiskyrimas, kai naudojami: a) 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai; b) 20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketai; c) 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų sudėties briketai; ● – teršalų matavimo taškas

Fig. 5.9. Carbon monoxide emissions when used: a) 30% siliceous sapropel and 70% sawdust briquettes; b) 20% organic sapropel and 80% sawdust briquettes; c) 30% organic sapropel and 70% sawdust briquettes;

● – emission measurement point

Atlikus skaičiavimus, nustatyta tendencija, kad išsiskiriančio į aplinkos orą anglies monoksido kiekis tiesiogiai koreliuoja su briketuose esančiu anglies kiekiu – tai yra su organinės dalies kiekiu. Atlikus skaitinį modeliavimą gauta, kad kuo mažiau organinių medžiagų briketuose, tuo blogiau vyksta degimo procesas ir lieka daugiau nesudegusios organinės ir neorganinės dalies, atitinkamai daugiau į aplinkos orą išsiskiria anglies monoksido. Tai, gretinant rezultatus su eksperimentiniais tyrimais, įrodo kad silicinio sapropelio mišinio briketai deginimui nėra tinkami.

Vertinant 5.9 a paveiksle pateiktus rezultatus ir katile vykstančius procesus aiškiai matyti, kad panaudojant 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų sudėties briketus ir atitinkamai esant sąlygiškai nedideliame degimo procesui, daugiau vyksta smilkimo procesai, todėl intensyviausio degimo proceso zonoje gautos CO reikšmės sudarė 300 mg/m^3 , tolesnėje srauto nusistovėjimo zonoje (antrojoje dalyje) koncentracija pakyla iki 600 mg/m^3 , trečiojoje dalyje prie išmetimo koncentracija pakyla ir nusistovi 900 mg/m^3 . Mažesnės katilo pradžioje reikšmės gautos dėl degimo ir sraute vykstančių oksidacijos procesų. Kai katile vykstantys procesai nusistovi, gautos CO koncentracijos padidėjo iki 1,5 karto. Lyginant su pirminių eksperimentinių tyrimų metu gautomis didžiausiomis koncentracijomis deginant organinį sapropelį, nesutaptis sudaro 44 %. Skaitinio modeliavimo metu gauti duomenys siliciniam sapropeliui smarkiai skiriasi nuo eksperimentinių rezultatų, kadangi degimo proceso modelyje naudojant mažai organinės medžiagos turintį sapropelį nenusistovi degimo procesas ir į aplinkos orą išsiskiria dideli teršalų kiekiai. Analizuojant modeliavimo metu gautus duomenis galima daryti išvadą, kad silicinis sapropelis nėra tinkamas briketų gamybai.

Skaitiniam modeliavimui antruoju atveju buvo pasirinkti briketai, kuriuose organinio sapropelio yra 20 %, o medžio pjuvenų – 80 %. Išsprendus skaitinio modeliavimo uždavinį gauti rezultatai pateikti 5.9 b paveiksle. Lyginant su anksčiau tyrimu anglies monoksido kiekis sumažėjo 3,3 karto. Reikia atkreipti dėmesį, kad modeliuojant aiškiai matyti tendencija, kad toliau nuo pakuros CO kiekiai tampa mažesni vykstant cheminėms reakcijoms katilo viduje. Vėliau šis procesas stabilizuojasi ir po antrosios zonos kitimas sudaro tik 2–5 % nuo bendro išsiskyrusio į antrąją zoną patekusio anglies monoksido kiekio. Katilo trečiojoje dalyje anglies monoksido koncentracija padidėja dėl oksidacijos procesų ir padidėja iki 370 mg/m^3 , o tai sudarė 28 % daugiau, palyginti su srauto nusistovėjimo zona.

Lyginant su eksperimentiniais tyrimais matoma tam tikra koreliacija – pakėitus briketų mišinį 20 % organinio sapropelio kiekiu į aplinkos orą išmetama 270 mg/m^3 anglies monoksido. Lyginant su eksperimentiniais tyrimais paklaida, lyginant išsiskyrusio teršalo kiekį, sudaro apie 9,6 %. Vertinant rezultatus galime daryti išvadą, kad naudojant skaitinį modeliavimą paklaidą tarp eksperimen-

tinių tyrimų ir modeliavimu sudaro 10 %, o tai leidžia teigti, jog gauti duomenys koreliuoja ir gali būti naudojami. Analogiškai ankstesniam skaitinio modeliavimo uždavinio sprendimui gaunama, kad išsiskyręs anglies monoksido kiekis tiesiogiai proporcingas organinės dalies kiekiui briketuose. Šiuo atveju briketuose organinės dalies buvo 50 % daugiau, todėl proporcingai sumažėjusio išsiskiriančio tiriamojo teršalo kiekis sumažėjo 1,1 karto. Tai įrodo, kad esant didesniam kietajame kure organinės dalies kiekiui, geriau vyksta degimo procesas ir į aplinkos orą išmetami mažesni anglies monoksido kiekiai.

Eksperimentiniams tyrimams skaitiniam modeliavimui panaudojus trečiosios sudėties briketus, sudarytus iš 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų, gauta, kad į aplinkos orą išsiskiria patys mažiausi anglies monoksido kiekiai (5.9 c pav.). Jie 3,6 karto mažesni nei pirmojo mišinio atveju ir 1,1 karto antrojo mišinio atveju. Aiškiai matyti tendencija, kad vykstant pilnam degimui į aplinkos orą anglies monoksido išsiskiria mažiau tuo metu, kai sapropelio sudėtyje yra daugiausiai organinės medžiagos. Pastebima tendencija, kad maksimalios teršalų išsiskyrimo zonos yra ties katilo trečiąja dalimi, kur pilnai įvyksta oksidacijos procesai ir nusistovi pastovios koncentracijos. Šioje zonoje nustatytos koncentracijos visais atvejais buvo didesnės 1,3–1,5 karto nei antrojoje zonoje, kur buvo vykdomi eksperimentiniai tyrimai. Taip pat buvo stebima „anomalinė“ zona prie katilo modeliuojamų durelių, pro kurias vyko oro pritekėjimas, palaikantis degimo procesą. Šioje zonoje nustatytos reikšmės visų modeliavimų metu svyravo tarp 230–250 mg/m³ ribų.

5.3 lentelė. Anglies monoksido išsiskyrimų rezultatai

Table 5.3. The results of carbon monoxide emissions

Briketai	Išmatuota vertė, mg/m ³	Sumodeliuota vertė, mg/m ³
30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų	-	900
20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų	244	270
30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų	236	250

Apibendrinant anglies monoksido išsiskyrimo tendencijas aiškiai matoma priklausomybė nuo teršalo kiekio ir organinės anglies kiekio mišinyje. Atitinkamai tai patvirtina iškeltą hipotezę, kad briketų gamybai turi būti naudojamas organinis sapropelis, kuris užtikrina gerą degimo procesą ir atitinkamai mažą CO išsiskyrimą.

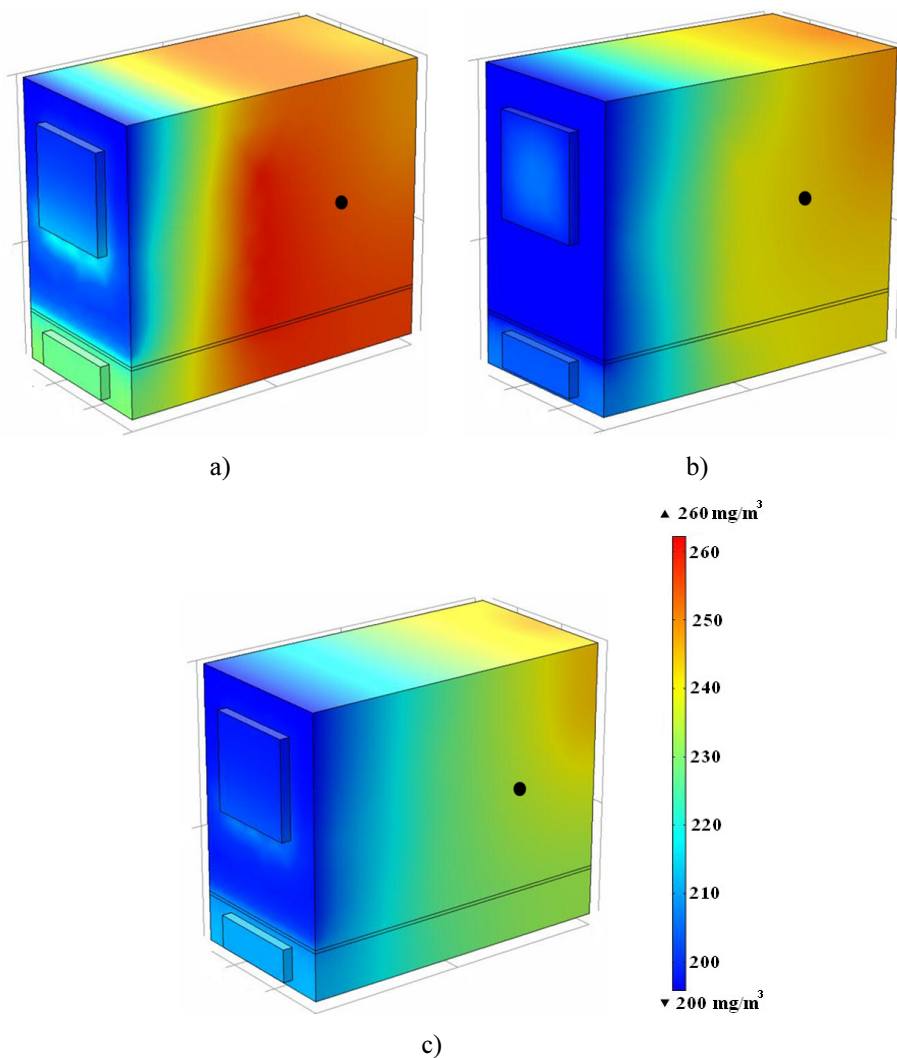
Azoto oksidų išsiskyrimo modeliavimas. Organinio kuro degimo proceso metu į aplinkos orą be kietųjų dalelių ir anglies monoksido išsiskiria azoto oksi-

dai. Azoto oksidų išsiskyrimo intensyvumą sąlygoja briketo sudėtis ir katilo pakuroje vykstantys degimo procesai. Skirtingai nuo anglies monoksido, kurui degant ir oro srautui judant link išmetimo angos, azoto koncentracijos kitimas yra labai nežymus. Tai galima paaiškinti tuo, kad išsiskyrę degimo metu azoto oksidai yra mažai aktyvūs vertinant chemines reakcijas, vykstančias antrojoje ir trečiojoje katilo zonose. Pastebima tendencija, kad dujų srautui judant iš antrosios zonos į trečiąją anglies monoksido koncentracijos didėja, atitinkamai dėl vykstančių procesų azoto oksidų koncentracijos sumažėja.

Sprendžiant skaitinio modeliavimo uždavinį, kai pakura yra užkraunama briketais, sudarytas iš 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų, buvo gauta, kad išsiskyrusių azoto oksidų koncentracijos lygios 260 mg/m^3 (5.10 a pav.). Palyginę su preliminariais eksperimentų metu gautais didžiausiais išsiskyrimais gauname, kad šis kiekis yra 1,1 karto mažesnis. Tai gali būti sąlygota to, kad skaitinio modelio uždavinyje degimo procesas vyksta pagal iš anksto numatytas sąlygas ir yra pastovus, o eksperimentinio tyrimo metu degimas dėl organinės dalies trūkumo yra nepastovus ir veikiamas įvairių šalutinių priežasčių, dėl kurių azoto oksidų koncentracija nebuvo pastovi ir dėl papildomo deguonies patekimo į pakurą galėjo padidinti išsiskiriančio teršalo kiekius. Skirtingai nei modeliuojant anglies monoksido išsiskyrimus, prie pakuros durelių nustatytos mažesnės teršiančių medžiagų reikšmės nei trečiojoje katilo dalyje.

Vertinant azoto oksidų pasiskirstymą modeliuojamame katile, kuris yra prikraunamas antrosios sudėties briketų (organinio sapropelio –20 %, o medžio pjuvenų – 80 %), matyti, kad, kaip ir pirmuoju atveju, azoto oksidų pasiskirstymas nuo pakuros iki išmetimo angos pakinta tik 7 % ribose, o tai patvirtina prielaidą, jog azoto oksidų koncentracija mažai kinta po degimo proceso (5.10 b pav.). Modeliavimo metu nustatyta maksimali azoto oksidų koncentracija buvo 240 mg/m^3 . Lyginant su eksperimentiniais tyrimais gautos koncentracijos yra didesnės 1,2 karto. Kadangi paklaida sudaro 13 %, todėl galima tvirtinti, kad gauti modeliavimo rezultatai koreliuoja su eksperimentinių tyrimų metu gautomis reikšmėmis. Kaip ir pirmuoju atveju, didžiausios azoto oksidų koncentracijos nustatytos kuro degimo zonoje, vėliau intensyvumas mažėja 5–10 % ir antrojoje bei trečiojoje katilo dalyje beveik nekinta.

Atliekant skaičiavimus, kai pakuroje dega 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų (briketai, gautos azoto oksidų išsiskyrimo tendencijos atkartoja prieš tai atliktų uždavinių rezultatus – azoto oksidų išsiskyrimas mažai kinta tostant nuo pakuros, o didžiausios koncentracijos nustatytos pačioje pakuroje ir sudaro 230 mg/m^3 (5.10 c pav.). Lyginant azoto oksidų kiekius antrojoje katilo dalyje ir eksperimentinius tyrimų rezultatus, gauta paklaida iki 3 % – tai galima paaiškinti tuo, kad modeliavimo uždavinyje išlaikytos „gero“ degimo sąlygos ir į aplinkos orą išsiskiriančių teršalų kiekis yra mažesnis nei natūraliai.



5.10 pav. Azoto oksidų išsiskyrimas, kai naudojami: a) 30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai; b) 20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų briketai; c) 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų sudėties briketai; ● – teršalų matavimo taškas

Fig. 5.10. Nitrogen oxides emissions when used: a) 30% siliceous sapropel and 70% sawdust briquettes; b) 20% organic sapropel and 80% sawdust briquettes; c) 30% organic sapropel and 70% sawdust briquettes; ● – emission measurement point

Analizuojant gautus rezultatus matyti, kad, skirtingai nei su anglies monoksido išsiskyrimais, ties degimo zona nėra ūmaus teršalų išsiskyrimo. Lyginant azoto oksidų kiekius antrojoje ir trečiojoje zonoje matyti, kad skirtumas sudaro iki 5 %, iš to galima daryti išvadą, kad azoto oksidų, skirtingai nei anglies monoksido, koncentracijos kitimas katilė yra nežymus ir nedaug priklauso nuo vykstančių cheminių reakcijų.

5.4 lentelė. Azoto oksidų išsiskyrimų rezultatai

Table 5.4. The results of nitrogen oxides emissions

Briketai	Išmatuota vertė, mg/m ³	Sumodeliuota vertė, mg/m ³
30 % silicinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų	-	253
20 % organinio sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų	209	234
30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų	214	221

Panaudojus skaitinį modeliavimą gauti rezultatai patvirtina eksperimentinių tyrimų metu gautus rezultatus ir išvadas – briketai, kurių sudėtyje yra silicinio sapropelio ir medžio pjuvenų, netinkami naudoti tiek dėl mažos šiluminės vertės, tiek ir dėl išmetamų į aplinkos orą teršalų kiekio. Antrosios sudėties briketai atitinka keliamus reikalavimus – šiluminė vertė siekia 20 MJ/kg ir todėl jie gali būti naudojami mažų galių katiluose, bet dėl išmetamų į aplinkos orą teršalų kiekio jie yra blogesni, nei trečiosios sudėties mišinio briketai. Atlikus skaitinio modeliavimo būdu gautų rezultatų analizę galima daryti išvadą, kad geriausia yra naudoti briketus, kurių sudėtis yra 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų – tada gaunamos didžiausios šiluminės vertės, vyksta geras degimo procesas ir tai lemia mažus išsiskyrusių teršalų kiekius.

Galima daryti išvadą, kad trečiosios sudėties sapropelio briketai yra tinkami naudoti mažos galios katiluose ir atitinka jiems keliamus reikalavimus – didelė šiluminė vertė ir sąlygiškai maža aplinkos oro tarša.

5.6. Penktojo skyriaus išvados

1. Skaitinio modeliavimo metu nustatyta, kad šiluminės vertės požiūriu tinkamiausi deginimui yra 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai, kuriems degimo metu būdinga didžiausia 23 MJ/kg šiluminė vertė. Antrojoje katilo dalyje gaunama 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketų šiluminė vertė yra gana

aukšta – 20 MJ/kg, lyginant su eksperimentų duomenimis, nesutaptis sudaro 20 %.

2. Mažiausiai 350 mg/m³ kietųjų dalelių išsiskiria 30 % silicinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketų atveju, tačiau susidaro labai didelis pelenų kiekis. Išmetamojo srauto sudėtyje esančių kietųjų dalelių kiekis tiesiogiai proporcingai didėja didėjant organinio spropelio kiekiui briketė.
3. Skaitiniam modeliavimui panaudojus 30 % organinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketus gauta, kad į aplinkos orą išsiskiria mažiausi anglies monoksido kiekiai (250 mg/m³). Jie 3,6 karto mažesni nei 30 % silicinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketų.
4. Vykstant pilnam degimui į aplinkos orą anglies monoksido išsiskiria mažiau tuo metu, kai spropelio sudėtyje yra daugiausiai organinės medžiagos. Duomenys koreliuoja, nes paklaida tarp skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų siekia tik 10 %.
5. Skaitinio modeliavimo metu nustatyta maksimali 260 mg/m³ azoto oksidų koncentracija 30 % silicinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketams, mažesnė – 240 mg/m³ 30 % organinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketams. Modeliavimo rezultatai koreliuoja su eksperimentinių tyrimų duomenimis, kadangi paklaida sudaro tik 13 %.
6. Didžiausios azoto oksidų koncentracijos nustatytos kuro degimo zonoje, intensyvumas sumažėja 5–10 % antrojoje bei trečiojoje katilo dalyje. Kai pakuroje dega 30 % organinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai, nustatyta, kad azoto oksidų išsiskyrimas mažai kinta tolstant nuo pakuros, didžiausios koncentracijos nustatytos pačioje pakuroje ir sudaro 230 mg/m³.
7. Gauti skaitinio modeliavimo šiluminių verčių ir išmetamų teršalų į aplinkos orą rezultatai patvirtina eksperimentinių tyrimų metu gautus rezultatus. 30 % organinio spropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketai yra tinkami naudoti mažos galios katiluose ir atitinka jiems keliamus reikalavimus – didelė šiluminė vertė ir mažas teršalų išsiskyrimas į aplinkos orą.

Aplinkosauginis sprendimas

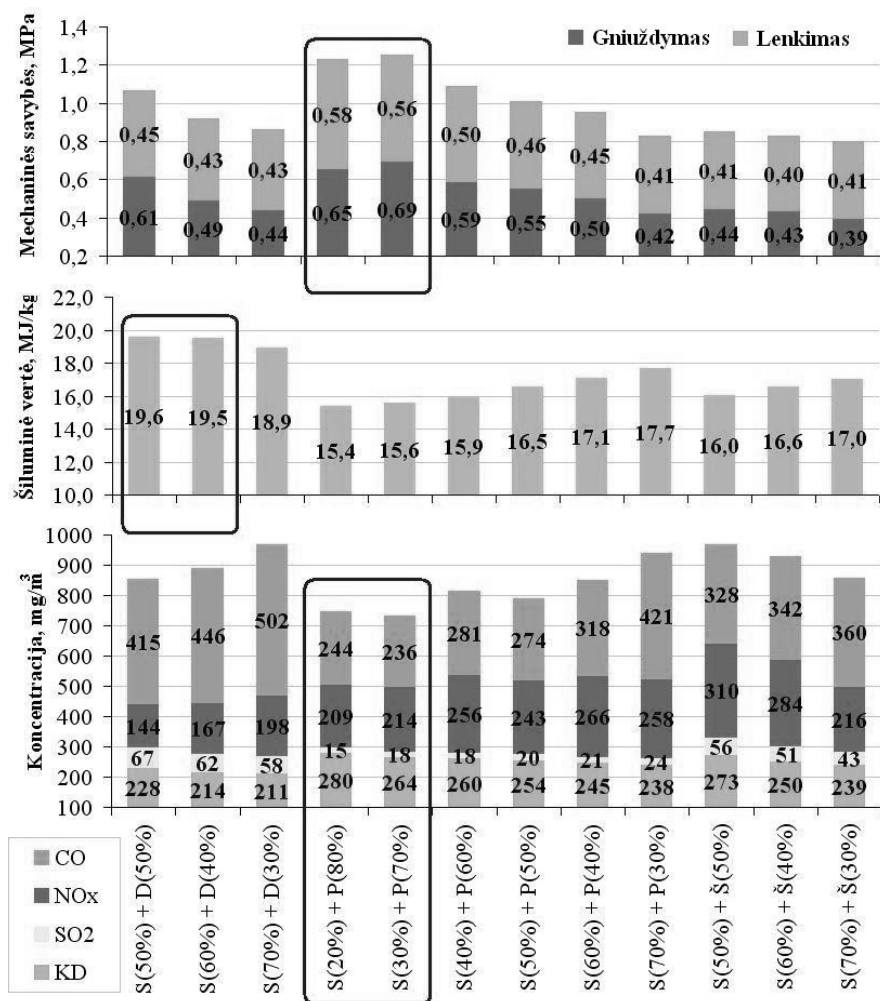
Šiame skyriuje pateiktas optimalus organinio sapropelio kiekis biomasės mišinyje, kuris gali būti naudojamas briketų gamybai.

Svarbu, kad pagamintas geras biokuro briketas su sapropelio rišikliu būtų mechaniškai patvarus jį transportuojant ar sandėliuojant, energetiniu požiūriu turėtų didelę šiluminę vertę, o dūmuose liktų minimalūs teršalų kiekiai.

6.1. Optimalus sapropelio kiekis brikete

Disertacinis darbas pradėtas atliekant sapropelio ir jo panaudojimo briketams gaminti galimybių literatūros analizę. Išnagrinėjus pasaulyje ir Lietuvoje sapropelio ir biokuro naudojimą buvo pastebėta, kad sudarant mišinius su sapropeliu galima patobulinti biokuro briketus.

Eksperimentiškai ištirtų briketų su sapropeliu praktinio panaudojimo tinkamumo įvertinimas pateikiamas 6.1 paveiksle.



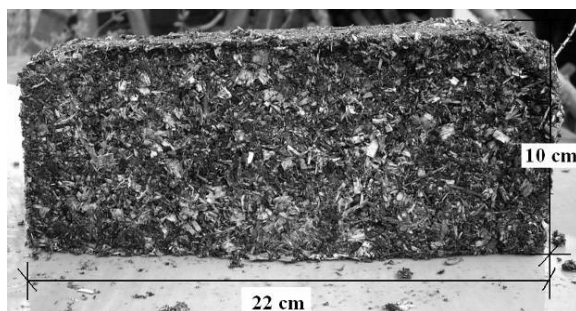
6.1 pav. Briketų su sapropeliu tinkamumas deginti
Fig. 6.1. Suitability of briquette with sapropel for burning

Iš 6.1 paveiklo matyti, kad panaudojus briketų biomasėje daugiau kaip 50 % sapropelio, briketų degimo metu didėja išsiskiriančių į aplinkos orą teršalų kiekiai. Briketų deginimo tyrimo metu pastebėta, kad ilgiausiai dega ir daugiausiai išskiria šilumos briketai, kurių sudėtyje yra iki 30 % sapropelio. Esant didesniai sapropelio kiekiui brikete, jie blogai įsidega, išskiria mažai energijos, todėl energetiniu požiūriu tokie briketai nėra efektyvus biokuras. Nors sapropelio šiluminė vertė yra didesnė nei medžio pjuvenų, bet panaudojus daugiau kaip 30 % jis praranda savo, kaip biokuro, vertę.

Pagaminti biokuro briketai turi būti tvirti ir gerai atlaikyti smūgius krovimo ir transportavimo metu – tai rodo tokių mechaninių savybių, kaip atsparumo gniuždant ir lenkiant svarbą. Organinio sapropelio panaudojimas briketams su medžio pjuvenomis didina mechaninį biokuro patvarumą. Didžiausias mechaninis patvarumas nustatytas briketams, kurių sudėtyje buvo iki 30 % sapropelio, o likusiąją dalį sudarė medžio pjuvenos.

Atlikti tyrimai parodė, kad neverta naudoti sapropelio briketų mišiniuose su durpėmis, kadangi durpių šiluminė vertė yra didesnė nei sapropelio. Durpės yra plačiai žinomas ir naudojamas biokuras, kuris mišinyje su sapropeliu praranda savo šiluminingumą. Geriausia sapropelį naudoti briketų mišiniuose su kitos rūšies priedais, pvz., medžio pjuvenomis, skiedromis arba šiaudais, kurių šiluminė vertė yra mažesnė nei sapropelio, tokiu būdu didinant energetinę biokuro vertę.

Verinant daugiakriteriu (aplinkosauginiu, energetiniu bei mechaniniu) požiūriu ir priimant aplinkosauginį faktorių kaip lemiamą – optimalus aplinkosauginis sprendinys yra 20 % sapropelio ir 80 % medžio pjuvenų bei 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų biokuro briketai (6.2 pav.).



6.2 pav. Optimalus biokuro briketas su sapropelio rišikliu
Fig. 6.2. The optimal biofuel briquette with sapropel binder

6.2 paveiksle pateiktas optimalus 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų biokuro briketas, kuris yra 22 cm ilgio, 10 cm pločio ir 7 cm storio. Optimalus biokuro briketas lyginamas su Švedijos SS 187121 standarte pateikiamais reikalavimais medienos briketams, kadangi Lietuvoje nėra specialių standartų skirtų medžio pjuvenų su kitu kuru briketams reikalavimų. 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų briketų šiluminė vertė siekia apie 16 MJ/kg ir atitinka Švedijos SS 187121 standarto 1 grupės briketų kokybės reikalavimus. 1 grupės briketų reglamentuojama energetinė vertė turėtų būti ≥ 16 MJ/kg. Švedijoje briketai yra suskaidyti į tris grupes. 1 grupės briketai yra geriausios kokybės ir atitinka mažų vartotojų poreikius.

Įvertinus visus anksčiau minėtus parametrus ir kriterijus, nuspręsta, jog geriausia briketų gamybai naudoti organinį sapropelį kaip rišamąją medžiagą su medžio pjuvenomis. Organinis sapropelis pagerina mechanines briketų savybes ir padidina šiluminę vertę. Svarbiausiu faktoriumi yra nedidelis teršalų išsiskyrimas į aplinkos orą. Šių briketų deginimo metu nėra viršijamos CO, NO_x, SO₂ ir kietųjų dalelių ribinės vertės, kurias reglamentuoja Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2001 metų rugsėjo 28 d. įsakymu Nr. 486 patvirtintos „Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos LAND 43–2001“.

Siekiant kompleksiskai įvertinti įvairių faktorių įtaką tiriamojo briketų gamybai, buvo vertinama daugiafaktorinė rezultatų analizė, kuri remiasi trimis parametrais: mechaninėmis savybėmis, šilumine verte bei skaitinėmis išmetamųjų teršalų reikšmėmis.

Daugiafaktorinės analizės rezultatai pateikti 6.1 lentelėje.

6.1 lentelė. Daugiafaktorinės analizės rezultatai

Table 6.1. Results of multivariate analysis

Briketai	Reikšmės							Balas
	Gniuždynas, MPa	Lenkimas, MPa	Šiluminė vertė, MJ/kg	CO, mg/m ³	NO _x , mg/m ³	SO ₂ , mg/m ³	KD, mg/m ³	
S(50%) + D(50%)	0,45	0,61	19,6	415	144	67	228	0,57
S(60%) + D(40%)	0,43	0,49	19,5	446	167	62	214	0,54
S(70%) + D(30%)	0,43	0,44	18,9	502	198	58	211	0,50
S(20%) + P(80%)	0,58	0,65	15,4	244	209	15	280	0,62
S(30%) + P(70%)	0,56	0,69	15,6	236	214	18	264	0,63
S(40%) + P(60%)	0,5	0,59	15,9	281	156	18	260	0,61
S(50%) + P(50%)	0,46	0,55	16,5	274	243	20	254	0,58
S(60%) + P(40%)	0,45	0,5	17,1	318	266	21	245	0,57
S(70%) + P(30%)	0,41	0,42	17,7	421	258	24	238	0,52
S(50%) + Š(50%)	0,41	0,44	16,0	328	310	26	273	0,50
S(60%) + Š(40%)	0,40	0,43	16,6	342	284	51	250	0,49
S(70%) + Š(30%)	0,41	0,39	17,0	360	216	43	239	0,51

Remiantis atliktais moksliniais tyrimais, buvo sudaryta prioritentinė „indėlių“ grupė, priimant aplinkosauginį faktorių kaip pirmąjį (lemiamą), energetinį – antrąjį ir tuomet mechaninį faktorių. Parengta „indėlių“ grupė, kurioje mecha-

ninių savybių įtakos koeficientas sudarė 0,2 indėlį, šiluminė vertė sudarė 0,3 indėlį, o didžiausią indėlį sudarė į aplinkos orą išmetamų teršalų indėlis – tai yra 0,5. Bendrojoje formulėje mechaninių savybių įtakos koeficientą sudarė gniuždymo indėlio ir lenkimo indėlio koeficiento reikšmės, šiluminės vertės indėlio koeficientą – šiluminės vertės vertė konkrečiam tiriamajam objektui ir išmetamųjų teršalų (anglies monoksido, azoto oksidų, sieros dioksido, kietųjų dalelių) įtakos koeficientas, kuriame CO reikšmė sudaro 0,4, NO_x sudaro 0,15, SO₂ 0,15 ir kietųjų dalelių 0,3 indėlis nuo bendro išmetamų teršalų kiekio.

Daugiakriterinės analizės rezultatai parodė, jog aplinkosauginiu, energetiniu bei mechaniniu požiūriu geriausias briketo mišinio variantas yra organinio sapropelio (30 %) – medžio pjuvenų (70 %) kuro briketas.

6.2. Šeštojo skyriaus išvados

1. Panaudojus briketų biomasėje daugiau kaip 50 % sapropelio, didėja išsiskiriančių teršalų kiekiai į aplinkos orą, briketai blogai įsidega, išskiria mažai energijos, jie nėra mechanškai patvarūs.
2. Mechaninį biokuro patvarumą ir šiluminę vertę padidina organinio sapropelio panaudojimas biokuro briketams su medžio pjuvenomis, kai sapropelio kiekis siekia 30 %.
3. Aplinkosauginiu požiūriu optimali briketo sudėtis yra 30 % sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų, tokio briketo degimo metu nėra viršijamos reglamentuojamos CO, NO_x, SO₂ ir kietųjų dalelių teršalų koncentracijų deginant biokurą normos.

Bendrosios išvados

1. Sapropelio fizinės ir cheminės savybės nusako jo tinkamumą naudoti kaip rišamąją medžiagą statybos pramonėje ir energetikoje. Organinį sapropelį galima panaudoti kaip rišamąją degią medžiagą biokuro briketams gaminti. Gaminant briketus geriausias sapropelio rišamosios savybės išryškėja tada, kai jo drėgnis siekia 78–82 %, o gaminant granules – 52–60 %.
2. Tyrimais nustatyta, kad skirtinguose sapropelio mėginiuose vyrauja anglis – 38–58 %, deguonis – 37 %, nedidelę dalį sudaro azotas – 1,1–4,2 % ir siera – 0,1–0,7 %, kitų elementų randami labai maži kiekiai. Atsižvelgiant į organinių medžiagų kiekį, kuris yra svarbiausias šilumingumo faktorius, sapropelio mėginiai priskiriami skirtingiems tipams: silicio – organinis sapropelis, kuriame organinės anglies kiekis siekia apie 44,0 %, silicinis – 26,0–48,0 % ir organinis, kuriame organinių medžiagų kiekis siekia 85 %, jis buvo naudotas kaip rišamoji degi medžiaga biokuro briketų gamyboje.
3. Atlikti kuro briketų, kurių matmenys 220 x 100 x 70 mm, mechaninio patvarumo tyrimai parodė, jog didžiausiu atsparumu gniuždant 0,69 MPa pasižymi 30 % sapropelio ir 70 % pjuvenų briketai. Šių briketų atsparumas gniuždant yra 2,8 karto didesnis nei 100 % me-

džio pjuvenų briketų. Briketų mišiniuose, kurių sudėtyje yra daugiau kaip 30 % sapropelio, briketų formavimo metu sapropelis praranda rišamosios medžiagos savybes, todėl didėjant sapropelio kiekiui mišinyje stipris lenkiant mažėja 1,2 ir daugiau karto.

4. Tyrimais nustatyta, kad organinio sapropelio panaudojimas briketams su medžio pjuvenomis padidina mechaninį briketų patvarumą ir padidina jų šiluminę vertę. Brikete su medžio pjuvenomis didinant sapropelio kiekį iki 30 % kuro briketo šiluminė vertė padidėja nuo 14,5 iki 16,3 MJ/kg. Deginant skirtingos sudėties briketus su sapropelio rišikliu, degimo metu susidarę teršalai neviršija biokurui nustatytų leistinų normų.
5. Pagal gautus skaitinio modeliavimo rezultatus, kurie patvirtina eksperimentinių tyrimų rezultatus, briketai sudaryti iš 30 % organinio sapropelio ir 70 % medžio pjuvenų yra tinkamiausi naudoti mažos galios katiluose, kadangi jų šiluminė vertė didžiausia, o teršalų išsiskyrimas mažiausias.

Literatūra ir šaltiniai

Adamiec, E.; Helios-Rybicka, E. 2002. Distribution of pollutants in the Odra River system. Pt. 4: Heavy metal distribution in water of the upper and middle Odra River, 1998–2000. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11(6): 669–673.

Adánez, J.; Gayán, P.; de Diego, L. F.; García-Labiano, F.; Abad, A. 2003. Combustion of wood chips in a CFBC: modelling and validation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(5): 987–999.

Alikonis, A.; Ignatavičius, V.; Furmonavičius, L. *et al.* 1994. Gruntų tankumo tyrimai plūktinių pamatų statybai. Gelmių geologinio tyrimo naudojimo ir apsaugos problemos. Lietuvos geologų septintos mokslinės konferencijos medžiaga. Vilnius. 120.

Alloway, B. J.; Ayres, D. C. 1999. *Chemiczne podstawy zanieczyszczenia środowiska*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa. 423.

Ambrulevičius, R. 2009. Kuro gamyba iš biomasės ir medienos. *Mano ūkis*, 12 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012 m. kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.manoukis.lt/>

Ambrulevičius, R. 2010. Biomasės deginimas mažos bei vidutinės galios katilinėse ir emisijų problemos. *Energetika*, 56(2): 103–109.

Amend, J. P.; Edwards, K. J.; Lyons, T. W. 2004. *Sulfur biogeochemistry. Past and present*. Colorado. 205.

Anderson, D. E.; Goudie, A.; Parker, A. 2007. *Global environments through the Quaternary. Exploring environmental change*. Oxford.: Oxford University Press. 359.

Atsinaujinančių energijos išteklių resursai [interaktyvus]. 2009 [Žiūrėta 2009 m. balandžio 10 d.] Prieiga per internetą: <http://www.biokuras.lt/lt/veiklos-kryptys/siaudu-rapsu-siaudu-biokuras.html>

Bakšienė, E. 2001. Ežerų sapropelio panaudojimas nenašių dirvožemio savybėms gerinti. Vandens ūkio inžinerija: Lietuvos žemės ūkio universiteto ir Lietuvos vandens ūkio instituto mokslo darbai, 17(39): 10–15.

Bakšienė, E. 2007. Priesmėlio rudžemio dirvožemio savybių pasikeitimai, tręšiant karbonatiniu sapropeliu ir klintmilčiais. LŽŪU Mokslo darbai, 77(30): 7–13.

Bakšienė, E.; Ciūnys, A. 2007. Ilgučio ežero sapropelio panaudojimas dirvožemiui gerinti. Žemės ūkio mokslai. Dirvotyra ir agrochemija, 14(1): 1–8.

Bakšienė, E.; Janušienė, V. 2005. Ilgalaikiai karbonatinio sapropelio tyrimai priesmėlio paprastojo išplautžemio dirvožemyje. Žemdirbystė. Mokslo darbai, 1(89): 3–17.

Balevičienė, J.; Balevičius, A.; Bukelskis, E.; Ciūnys, A.; Stanevičius, V.; Vaitkus, G.; Valiuškevičius, G.; Kalytė, D.; Ūselytė, R.; Balčiūnienė, R. 2009. Restauruotinių Lietuvos ežerų nustatymas ir preliminarus restauravimo priemonių parinkimas šiems ežerams, siekiant pagerinti jų būklę. Galutinė ataskaita I dalis. 265 p.

Balevičius, A.; Ciūnys, A.; Bukelskis, E. 2007. Aplinkosaugos reikalavimų paviršinio vandens telkinių valymo darbams parengimas. Galimybių studijos galutinė ataskaita. Vilnius. 77.

Baojun, L.; Sitian, L. 1997. Basin analysis, global sedimentary geology and sedimentology. Proceedings of the 30th international geological congress vol.8. Ridderkerk (Netherland). 363.

Baran, A.; Jasiewicz, Cz.; Tarnawski, M. 2009. Wpływ zbiornikowego osadu dennego na zmiany właściwości fizykochemicznych gleby lekkiej. Proceedings of ECOpole, 3(2): 403–408.

Battarbee, R. W.; Gasse, F.; Stickley, C. E. 2004. Past climate variability through Europe and Africa Vol.6. Dordrecht. 638.

Baubinas, R. 2003. Šiaulių m. Talkšos ežero ir jo prieigų kompleksinis sutvarkymas ir tarptautinės irklavimo bazės įrengimas/2003-07-18. Planuojamos ūkinės veiklos poveikio aplinkai vertinimo ataskaita. Vilnius: Geologijos ir geografijos institutas. 19–41 p.

Biekša, D.; Janulis, M.; Plankis, V.; Jaraminienė, E.; Barauskas, A. 2007. Šiaudų kuro naudojimo technologijų įvertinimas ir rekomendacijų tolimesniai jų naudojimui bei biokuro briketų iš smulkių šiaudų ir žolinių augalų paruošimo technologijos parengimas. Ataskaita Lietuvos Respublikos ūkio ministerijai. Vilnius. 50.

Bieliauskas, N. 2007. Termoizoliacinių plokščių iš pjuvenų ir sapropelio gamybos tyrimai. Magistrantūros studijų baigiamasis darbas. LŽŪU. 45.

Biokuro gamintojų ir tiekėjų sekcija [interaktyvus]. 2009 [Žiūrėta 2009 m. balandžio 10 d.] Prieiga per internetą: <http://www.biokuras.lt/lt/veiklos-kryptys/biokuro-gamintoju-ir-tiekeju-sekcija.html>

Bobé, R.; Zeresenay, A.; Behrensmeyer, A. K. 2007. Hominin Environments in the East African Pliocene: An Assessment of the Faunal Evidence. Dordrecht (Netherland). 354

Borgendahl, J.; Westman, P. 2006. Cyanobacteria as a trigger for increased primary productivity during sapropel formation in the Baltic Sea — a study of the Ancy-lus/Litorina transition. *Environmental Microbiology*, 9(1): 1–12.

Börjesson, P. 2000. Economic valuation of the environmental impact of logging residue recovery and nutrient compensation. *Biomass and Bioenergy*, 19: 137–152.

Boudreau, B. P.; Canfield, D. E.; Mucci, A. 1992. Early diagenesis in a marine sapropel, Mangrove Lake, Bermuda. *Limnology and Oceanography*, 37(8): 1738–1753.

Briquetting Machine [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2009 m. vasario 20 d.] Prieiga per internetą: <http://www.riotec.com.sg/briquetting/briquetting-machine.php>

Bristow, C. S.; Jol, H. M. 2003. Ground penetrating radar in sediments. Geological Society Special Publication No.211. Geological Society of London. Hampshire.: Hobbs the Printers Ltd. 330.

Brykieciarki hydrauliczne [interaktyvus]. 2006. [Žiūrėta 2009 m. vasario 20 d.] Prieiga per internetą: <http://www.brykietowanie.com/brykieciarkihydrauliczne.html>

Bucksch, H. 1997. Wörterbuch GeoTechnik. Brühl. 688.

Budavičius, R. 2003. Lietuvos ežerų nuosėdų mikroelementinės sudėties formavimosi ypatumai. Daktaro disertacija. Vilnius. 96.

Budavičius, R.; Kadūnas, V. 1999. Mikroelementų pasiskirstymo ryšys su organinės medžiagos kiekiu Lietuvos ežerų dugno nuosėdose. *Geologija*, 28: 32–38

Budrys, R. 2007. Biokuro gamyba. Lututė. Girionys. 52.

Buinevičius, K.; Puida, E. 2005. Reduction of NO_x concentra-tions in boiler flue gas by injecting selective reagents. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Man-agement*, 13(2): 91–96.

Bukantis, A.; Gedžiūnas, P.; Giedraitienė, J.; Ignatavičius, G.; Jonynas, J.; Kavaliauskas, P.; Lajauskienė, J.; Reipšleger, R.; Sakalauskienė, G.; Sinkevičius, S.; Šulijienė, G.; Žilinskas, G.; Valiukevičius, G. 2008. Lietuvos gamtinė aplinka, būklė, procesai ir raida. Vilnius. 238.

Buska, A.; Gailius, A. 2005. Akmens vatos plokščių gniuždomojo įtempimo nustatymas pagal skirtingus standartus. 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietu-va be mokslo – Lietuva be ateities“ įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 24–25 d, medžiaga: statyba. Vilnius.: Technika: 3–11.

Capozzi, R.; Picotti, V. 2003. Pliocene sequence stratigraphy, climatic trends and sapro-pel formation in the Northern Apennines (Italy). *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol-ogy*, 190: 349–371.

Cartmell, E.; Gostelow, P.; Riddel-Black, D.; Simms, N.; Oakey, J.; Morris, J.; Jeffrey, P.; Howsam, P.; Pollard, J. S. 2006. Biosolids – a fuel or a waste? An integrated appraisal of five co-combustion scenarios with policy analysis. *Environmental Science and Technology*, 40: 649–658.

Čepanko, V.; Baltrėnas, P. 2007. Naujų biokuro rūšių naudojimo energetikos ūkyje gal-imybės. 10 - osios jaunųjų mokslininkų konferencijos “Mokslas–Lietuvos ateitis”, įvykusios Vilniuje 2007 m. kovo 29 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika. 36–43.

Čiegis, R. 2009. Gamtos išteklių ir aplinkos ekonomika. Klaipėda. 772.

Ciesielczuk, T.; Kusza, G.; Karwaczyńska, U. 2011. Przyrodnicze wykorzystanie osadów dennych w świetle obowiązujących przepisów. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 13: 1327–1338.

Ciešlewicz, J.; Róžański, Sz. 2010. Metale ciężkie w osadach dennych jezior. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 4: 72–82.

Ciūnys, A. 1997. Ežerų valymas ir sapropelio paruošimo technologijos. *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba*, 1(4): 55–60.

Ciūnys, A.; Lajauskienė, L. L.; Katkevičius, L. 1994. Sapropelis – mūsų lobis. Vilnius.: Baltic ECO. 31.

Comsol Multiphysics [interaktyvus]. 2012 [Žiūrėta 2012 balandžio 12 d.] Prieiga per internetą: <http://www.comsol.com/support/releasenotes/4.2a/>

Convert energy [interaktyvus]. 2012 [Žiūrėta 2012 birželio 22 d.] Prieiga per internetą: <http://www.unitjuggler.com/convert-energy-from-MJ-to-toe.html>

Cuiping, L.; Chuangzhi, W.; Haitao, Y. H. 2004. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass and Bioenergy*, 27(2): 119–130.

Cutter Suction dredge [interaktyvus]. 2004 [Žiūrėta 2009 m. gruodžio 09 d.] Prieiga per internetą: <http://trinusa.com/Cutter-Suction-dredge.asp>

Czamara, A.; Czamara, W. 2008. Metale ciężkie w systemie ekologicznym zbiornika Mściwojów. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich= Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 9: 283–296.

Daubarienė, J.; Valiuškevičius, G. 2009. Lietuvoje naudojamų ežerų klasifikacijos: sistema ir pritaikymo galimybės. *Geografija*, 45(2): 111–121.

Degens, E.T.; Ross, D.A. 1972. Chronology of the Black Sea over the last 25,000 years. *Chemical Geology*, 10(1): 1–16.

Denafas, G.; Žaliauskienė, A.; Revoldas, V. 2001. Atliekų ir biomasės panaudojimo energetikos ir transporto reikmėms ekologiškumas. *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba (Environmental Research, Engineering and Management)*, 4(18): 30–39.

Domaševičius, A.; Giedraitienė, J.; Gregorauskienė, V.; Kadūnas, K.; Marcionis, A.; Šečkus, R.; Štriupkuvienė, N. Lietuvos geologijos tarnyba. 1999. Požeminio vandens monitoringas: metodinės rekomendacijos. Vilnius. 69.

Frisk, T.; Šemeta, R.; Paananen, A.; Bilaletdin, Ä.; Kaipainen, H.; Strandén, L. 2004. Restoration Investigation of lake Talša. Tempere: Yliopistopaino Oy. 77.

Geištoraitis, E.; Ciūnys, A. 2001 11 26. Sapropelio trąšos ir jų gavimo būdas. Lietuvos patentas Nr. LT 4864 B.7 p.

Geištoraitis, E.; Ciūnys, A.; Lajauskienė, L. L. 2002 09 25. Birius gruntus ir erozijos pažeistas dirvas stabilizuojanti medžiaga, jos gavimo būdas ir panaudojimas. Lietuvos patentas Nr. LT 4951 B. 6 p.

Germanavičius, G. 2009. Termoizoliacinių plokščių su sapropelio rišikliu ir šiaudais tyrimai. Magistrantūros studijų baigiamasis darbas. LŽŪU. 64.

Gierasimczuk, A.; Lewandowski, W.; Jordan, A. 2009. Możliwości wykorzystania biomasy do celów energetycznych. *Energetyka i Ekologia*, 9: 707–714.

Gimbutaitė, I.; Venckus, Z. 2008. Air Pollution Burning Different Kinds of Wood in Small Power Boilers. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 16(2): 97–103.

Gorlach, E.; Mazur, T. 2001. *Chemia rolna*. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa. 311.

Gornitz, V. 2009. *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*. Dordrecht. 1047.

Hart, M. B. 2000. *Climates: past and present*. Geological Society Special Publication No.181. Geological Society of London. Oxford.: Alden Press. 218

Helios-Rybicka, E.; Adamiec, E.; Aleksander-Kwaterczak, U. 2005. Distribution of trace metals in the Odra River system: Water-suspended matter-sediments. *Limnologica*, 35: 185–198.

Higgins, B.; Yan, L.; Gadalla, H.; Meier, J.; Fareid, T.; Liu, G.; Milewicz, M.; Repczyński, A.; Ryding, M.; Blasiak, W. 2010. Biomass Co-Firing Retrofit with ROFA for NO_x Reduction. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(6): 1185–1197.

Hill, R. J.; Kaplan, I. R. 2004. *Geochemical investigations in earth and space science: a tribute to Isaac R. Kaplan*. Amsterdam. 466.

HN 60:2004. Pavojingų cheminių medžiagų didžiausios leidžiamos koncentracijos dirvožemyje. Valstybės žinios, 41–1357.

Hu, S.; Haipu, B.; Xiaohong, L.; Chunhe, Y. 2010. Environmental evaluation for sustainable development of coal mining in Qijiang, Western China. *International Journal of Coal Geology*, 81: 163–168.

Idzelis, L. R.; Kesminas, V.; Svecevičius, G.; Misius, V. 2008. Sunkųjų metalų (Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, Cd) kaupimasis ešerio Perca fluviatilis L. ir kuojos Rutilus rutilus (L.) audiniuose eksperimento sąlygomis, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 16(4): 205–212.

Igwe, J. C.; Nnorom, I. C.; Grabuko, B. C. 2005. Kinetics of radionuclides and heavy metals behaviour in soils: Implications for plant growth. *African Journal of Biotechnology*, 4(13):1541–1547.

Yanko-Hombach, V.; Dolukhanov, P. M. 2007. *The Black Sea flood question. Changes in coastline, climate and human settlement*. Dordrecht. 971.

Yong-jun, L.; Chong, L.; Yun, X.; Yan-dong, Ch. 2008. Discussion on rheology in petroleum and nature gas teservoir stimulation. *Journal of Central South University of Technology*, 15: 362–368.

Yoshioka, T.; Aruga, K.; Nitami, T.; Sakai, H.; Kobayashi, H. 2006. A case study on the costs and the fuel consumption of harvesting, transporting, and chipping chains for logging residues in Japan. *Biomass and Bioenergy*; 30: 342–348.

Jablonskis, J.; Jurgelėnaitė, A. 2007. Lietuvos ežerų statistika. *Geografija*, 43(2): 16–26.

- Jankauskaitė, M. 2004. Kraštovaizdžio ekologinių (geoekologinių) tyrimų metodologiniai pagrindai. Vilnius.: Vilniaus Universitetas. 86.
- Jankevičius, K.; Ciūnys, A.; Antanyrienė, A.; Šlapkauskaitė, G. 1997. Sapropelio ekogeocheminis vertinimas ir jo fiziologiškai aktyvios medžiagos. Vandens telkinių būklė ir gerinimo būdai: straipsnių rinkinys. Kaunas: Akademija. 69–71.
- Janulis, P. P.; Makarevičienė, V.; Sendžikienė, E.; Vainiūnaitė, R. 2006. Biodegalų gamybos atliekų efektyvaus panaudojimo energetinėms reikmėms technologiniuose procesuose galimybių ištyrimas ir įvertinimas ir ekonomiškai pagrįstų rekomendacijų kaip vykdant šį procesą galima mažinti biodegalų gamybos savikainą ir aplinkos taršą parengimas. Studijos ataskaita. Kauno r.: Akademija. 52.
- Janulis, P.; Makarevičienė, V. 2004. Biodegalų ir bioalyvų naudojimas Lietuvoje. LŽŪU leidybos centras. Kaunas: Akademija. 71.
- Jarmokas, R. 1999. Naudokime vietinius išteklius. Mokslas ir technika, 9: 38–40.
- Jaskelevičius, B.; Liuga, P. 1997. Organinio kuro degimo produktų emisijos faktoriai. Rekomenduojamos reikšmės įvairioms rūšims priklausomai nuo kuro vartojimo objekto tipo. Vilnius.
- Jaskelevičius, B. 2009. Terminis atliekų apdorojimas. Vilnius: Technika. 148.
- Juknevičius, S.; Matyžiūtė–Jodkonienė, D.; Sabienė, N. 2007. Contamination of Soil and Grass by Heavy Metals Along the Main Roads in Lithuania, *Ekologija*, 53(3): 70–74.
- Jurgaitis, A. 2007. Degiųjų naudingųjų iškasenų telkinių geologija. Vilnius. 43.
- Kadūnas, V. 1998. Žemės gelmių turtai: istorija ir perspektyva. [interaktyvus] Mokslas ir gyvenimas Nr. 9. [Žiūrėta 2008 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://ausis.gf.vu.lt/mg/index.html>
- Kadūnas, V.; Budavičius, R. 2000. Mikroelementai Lietuvos ežerų skirtingo gylio dugno nuosėdose. *Geologija*, 30: 3–14.
- Kadūnas, V.; Budavičius, R. 2001. Lietuvos technogeniškai teršiamų ežerų dugno nuosėdų mikroelementinės sudėties ypatumai. *Geologija*, 34: 3–10.
- Kadūnas, V.; Radzevičius, A. 2001. Sunkiųjų metalų migracinės formos Panevėžio miesto įmonių technogeniškai užterštame grunte. *Geologija*, 35: 23–28.
- Kadūnas, V.; Radzevičius, A. 2003. Lietuvos paviršiaus nuogulų mikroelementų foninio kiekio ir jų asociacijų kaitos lyginamoji charakteristika. *Litosfera*, 7: 80–87.
- Kadūnas, V.; Radzevičius, A.; Bareikienė, O. 2003. Genesis of Ti, Zr, Nb and research elements anomalies in Lithuanian soils. *Geologija*, 41: 20–27.
- Kas yra energetinė biomasė [interaktyvus]. 2005. [Žiūrėta 2009 m. spalio 20 d.] Prieiga per internetą: http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:J.04~2006~ISSN_1392-1134.V_38.N_3.PG_5-21/DS.002.0.01.ARTIC
- Kasza, L. 1994. Dokumentacja litologicznego i strukturalnego wykształcenia odsłanianej obecnie dolnej serii zastoiskowej wraz z oceną jej wpływu na stateczność skarp zbrocza północnego odkrywki Bełchatów. Zakład Geologii Stosowanej Uniwersytetu Wrocławskiego. Wrocław. 54.

Katkevičius, L. 1997. Sunkieji metalai ir biologiškai aktyvios medžiagos ežerų sapropelyje. Vandens ūkio inžinerija: Lietuvos žemės ūkio universiteto ir Lietuvos vandens ūkio instituto mokslo darbai, 2(24): 170–177.

Katkevičius, L.; Ciūnys, A.; Bakšienė, E. 1998. Ežerų sapropelis žemės ūkiui. Dotnuva.: LŽI. 94.

Kavaliauskas, A.; Katinas, V.; Jensen, A.; Jensen, P. 2004. Kietojo kuro degimo sluoksnyje eksperimentinis tyrimas. Energetika, 3: 12–20.

Keraševičius, T.; Kropas, A.; Janušas, A. 2008. Inžinerinių geologinių tyrimų ataskaita: Talkšos ežero irklavimo trasa. Kaunas. 112.

Kilkus, K. 1998. Lietuvos vandenų geografija. Vilnius.: Apyaušris. 250.

Kilkus, K. 2005. Ežerotyra. Vilnius.: VU. 272.

Kireicheva, L. V.; Khokhlova, O. B. 2000. Elemental composition of different fractions of the sapropel organic matter. Eurasian Soil Science (Pochvovedenie), 33(9): 947–949.

Knicker, H.; Hatcher, P. G. 2001. Sequestration of organic nitrogen in the sapropel from Mangrove lake, Bermuda. Organic Geochemistry, 32: 733–744.

Kongiel, R.; Rakowski, E. 1929. Pomiary jezior Trockich. Prace towarzystwa przyjaciół nauk w Wilnie. Vilnius. 68–81.

Kostecki, M.; Kowalski, E. 2007. Spatial arrangement of Heavy Metals in the Dam-Reservoirs Sediments In the Conditions of Anthropomixion. Archives of Environmental Protection, 3: 67–81.

Kryževičienė, A.; Žaltauskas, A.; Jasinskas, A. 2005. Daugiametis žolių auginimas ir panaudojimas biokurui. Žemės ūkio mokslai, 1: 40–49.

Kroon, D.; DeWitt Norris, R.; Klaus, A. 2001. Western North Atlantic Palaeogene and Cretaceous palaeoceanography. Geological Society Special Publication No.183. Geological Society of London. Oxford.: The Alden Press. 319.

Kvasauskas, M.; Baltrėnas, P. 2009. Research on anaerobically treated organic waste suitability for soil fertilisation. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 17(4): 205–211.

LAND 20–2005. 2005. Nuotekų dumblo naudojimo tręšimui bei rekultivavimui reikalavimai. Vilnius. LR AM.8p.

LAND 28–98/M-08. 1998. Stacionarus atmosferos teršalų šaltiniai. Dujų srauto ir tūrio debito ortakyje matavimas. Vilnius: LR AM. 38.

Landberg, T.; Greger, M. 1996. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in Salix from unpolluted and polluted areas. Applied Geochemistry, 11(1/2): 175–180

Lietuvos geologijos tarnyba [interaktyvus]. 2009. [Žiūrėta 2010 m. sausio 20 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.lgt.lt/index.php?page=68>>

Liubarskis, V. 2006. Biokuras kūrykloms. LŽŪU ir ŽŪI Instituto mokslo darbai. Raudondvaris.: Milga. 44.

Liužinas, R.; Jankevičius, K.; Negėlytė, J. 2008 04 25. Būdas gėlavandenių telkinių sapropelio kokybei gerinti. Lietuvos patentas Nr. LT 5495 B. 14p.

- Liuzinas, R.; Jankevičius, K.; Šalkauskas, M.; Mikalajūnas, M. 2005. Improvement of Lake sapropel quality: a new method. *Geografijos metraštis*, 38(2): 44–51.
- LST EN ISO 5667-12:1995 (E). Water quality – Sampling – Part 12. Guidance on sampling of bottom sediments. International Organization for Standardization.
- LST ISO 10390:2005 (E). Dirvožemio kokybė. pH nustatymas (tapatus ISO 10390:2005). Lietuvos standartizacijos departamentas.
- LST TK 71 Kietas biokuras ir kietas atgautasis kuras veiklos planas [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2009 spalio 20 d.] Prieiga per internetą: <http://www.lsd.lt/>
- Maher, B. A.; Thompson, R. 1999. Quaternary climates, environments and magnetism. Cambridge: Cambridge University Press. 390.
- Malanotte-Rizzoli, P.; Robinson, A.R. 1994. Ocean processes in climate dynamics: global and mediterranean examples. Dordrecht. 437.
- Martinėnas, B. 2002. Eksperimento duomenų statistinė analizė. Vilnius: Technika. 116
- Martyshev, F. G. 1983. Pond fisheries. Rotterdam. 454.
- Maščio ežero praeities taršos padarinių pašalinimas [interaktyvus]. 2007. [Žiūrėta 2008 lapkričio 12 d.] Prieiga per internetą: <http://www.telsiai.lt/>
- Mažvila, J. 2001. Sunkieji metalai Lietuvos dirvožemiuose ir augaluose. Monografija. Kaunas: LŽI Agrocheminių tyrimų centras. 343.
- Medienos briketų ir granulių kokybės standartai [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2009 m. balandžio 15 d.] Prieiga per internetą: <http://www.sildymas.lt/index.php?id=393>
- Medienos kuro naudojimo aspektai [interaktyvus]. 2001. [Žiūrėta 2008 m. spalio 20 d.] Prieiga per internetą: http://neris.mii.lt/mt/straipsniai/200301/medienos_kuro.doc
- Medžio atliekų kuro rinka Lietuvoje [interaktyvus]. 2005. [Žiūrėta 2009 m. spalio 20 d.] Prieiga per internetą: <http://www.leka.lt/>
- Menzell, K.; Mirzaev, S. Z.; Kaatzell, U. 2003. Crossover behavior in micellar solutions with lower critical demixing point: Broadband ultrasonic spectrometry of the isobutoxy-ethanol-water system. *Physical Review E*, 68:73–84.
- Middleton, G. V. 2003. Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks. Bodmin UK.: MPG Books. 821.
- Mierauskas, P. 2009. Gamtotvarka. Vilnius. 260.
- Mikulionienė, S.; Baležientienė, L. 2009. Sapropelio biocheminė sudėtis ir efektyvumas penimų kiaulių priesvoriui didinti. *Veterinarija ir zootechnika*, 48(70): 37–44
- Miltner, M.; Miltner, A.; Harasek, M.; Friedl, A. 2006. Process simulation and CFD calculations for the development of an innovative baled biomass-fired combustion chamber. *Applied Thermal Engineering*, 27(7): 1138–1143.
- Miś, J. 2005. Nawożenie stawów karpowych. *Archiwum Gazety Częstochowskiej*, 5(211): 8–9.
- Miszczyk, A.; Darowicki, K. 2002. Reliability of Flue Gas Desulphurisation Installations – the Essential Condition of Efficient Air Pollution Control. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11(3): 205–209.

Misz-Kennan, M.; Fabiańska, M. 2010. Thermal transformation of organic matter in coal waste from Rymer Cones (Upper Silesian Coal Basin, Poland). *International Journal of Coal Geology*, 81: 343–358.

Modrzejewski, Sz. 2005. Wpływy środowiskowe robót strzałowych. *Górnictwo odkrywkowe*, 47(3): 3–12.

Moratti, G.; Chalouan, A. 2006. Tectonics of the Western Mediterranean and North Africa. Geological Society Special Publication No.262. Geological Society of London. Bodmin UK.: MPG Books. 384.

Myślińska, E. 2006. Laboratoryjne badania gruntów. Warszawa.: Wydawnictwo naukowe PWN. 278.

Nakagawa, H.; Sakai, M.; Harada, T.; Ichinose, T.; Takeno, K.; Matsumoto, S.; Kobayashi, M.; Matsumoto, K.; Yakushido, K. 2011. Biomethanol Production from Forage Grasses, Trees, and Crop Residues. *Biofuel's Engineering Process Technology*. 742.

Navas, A.; Lindhotfer, H. 2005. Chemical Partitioning of Fe, Mn, Zn and Cr in Mountain Soils of the Iberia and Pyrenean Ranges (NE Spain). *Soil and Sediment Contamination*, 14(3): 249–260.

New possibilities for cleaning and deepening of lakes, ponds, canals, rivers and other water ways [interaktyvus]. 2006 [Žiūrėta 2009 m. sausio 03 d.] Prieiga per internetą: <http://www.zemkase.lt/en.html>

Nieć, M. 2006. Geologia kopalniana – przeszłość, teražniejszość i przyszłość. *Górnictwo odkrywkowe*, 48(1–2): 8–11.

Niedziółka, I.; Zuchniarz, A. 2006. Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego. *MOTROL*, 8A: 232–237.

Niegodzisz, J. 1990. Surowce ilaste w ochronie środowiska. Warszawa.: Wydawnictwo naukowe PWN. 112.

Nikolaeva, L. A.; Latyshev, V. G.; Burenina, O. N. 2009. Fuel Briquettes from Brown Coals of Yakutia. *Solid Fuel Chemistry*, 43(2): 109–112.

O'Neil, P. 1998. Chemia środowiska. Warszawa.: Wydawnictwo naukowe PWN. 62.

Osipov, V. I.; Sokolov, V. N.; Ereemeev, V. V. 2004. Clay seals of oil and gas deposits. Rotterdam. 288.

Parent, L. E.; Ilnicki, P. 2003. Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. USA, Florida, CRC Press LLC.205.

Pečius, J. 1998. Nauji energetinio kuro gamybos būdai. *Mokslas ir gyvenimas* Nr.1. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2009 m. sausio 09 d.]. Prieiga per internetą: <http://ausis.gf.vu.lt/>

Pedišius, N. 2001. Medienos kuras Lietuvos energetikos ūkyje. *Mokslas ir gyvenimas* Nr.12. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2009 m. sausio 09 d.]. Prieiga per internetą: <http://ausis.gf.vu.lt/>

Pekarskas, J. 2008. Tręšimas ekologinės gamybos ūkiuose. Kaunas. LŽŪU.191.

Post, W. M.; Izaurralde, R. C.; Mann, L. K.; Bliss, N. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climate Change*, 51: 73–99.

Povilaitis, V.; Kryževičienė, A.; Lazauskas, S. 2006. Augalų biomasė – žaliava biokurui. *Mano ūkis*, 11: 44–46.

Production of briquette [interaktyvus]. 2007. [Žiūrėta 2011 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://agroenergetyka.pl/?a=article&id=179>

Radzevičius, A.; Kadūnas, V. 2006. Influence of atmospheric transportation of heavy metals on their values in depositional environments of West Lithuania. *Geologija*, 54: 1–7.

Raw materials of plant origin treated briquetted [interaktyvus]. 2007. [Žiūrėta 2011 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://agroenergetyka.pl/?a=article&id=190>

Restauruotinių Lietuvos ežerų nustatymas ir preliminarus restauravimo priemonių parinkimas šiems ežerams, siekiant pagerinti jų būklę. Tarpinė ataskaita (2008 06 10–2008 12 12). [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2011 m. liepos 18 d.]. Prieiga per internetą: http://193.219.133.6/aaa/pranesimai/restauruotinu_ezeru_2_studija_1_tarpine_ataskaita.pdf.

Revdas, V.; Denaras, G. 2002. Degimo procesų ekologiško ir emisijų apskaičiavimų metodikos patikimumo tyrimai augaline biomasė kūrenamuose katiluose ir krosnyse. *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba*, 1(19): 43–51.

Robert, Ch. M. 2008. *Global sedimentology of the ocean. An interplay between geodynamics and paleoenvironment*. Hungary. 487.

Rohling, E. J.; Sprovieri, M.; Cane, T. R.; Casford, J. S. L.; Cooke, S.; Bouloubassi, I.; Emeis, K. C.; Schiebel, R.; Rogerson, M.; Hayes, A.; Jorissen, F. J.; Kroon, D. 2004. Reconstructing past planktic foraminiferal habitats using stable isotope data: a case history for Mediterranean sapropel S5. *Marine Micropaleontology*, 50: 89–123.

Rothwell, R.G. 2006. *New techniques in sediment core analysis*. Geological Society Special Publication No. 267. Geological Society of London. Bodmin.: MPG Books Ltd. 266.

Sachs, J.; Repeta, D. 1999. Oligotrophy and Nitrogen Fixation During Eastern Mediterranean Sapropel Events. *Science Magazine*, 286(5449): 2485–2488.

Sakalauskienė, G. 2001. Dissolved Oxygen Balance Model for Neris. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 6(1): 105–131.

Sapropel [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2008 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sapropel>

Schulz, H. D.; Zabel, M. 2006. *Marine geochemistry*. Würzburg.: Stürtz AG. 574.

Seregin, I. V.; Ivanov, V. B. 2001. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants, *Russian Journal of Plant Physiology*, 48: 523–544.

Siani, G.; Paterne, M.; Michael, E.; Sulpizio, R.; Sbrana, A.; Arnold, M.; Haddad, G. 2001. Mediterranean Sea Surface Radiocarbon Reservoir Age Changes Since the Last Glacial Maximum. *Science Magazine*, 294(5548): 1917–1920.

Synteza Fischera-Tropscha [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2009 m. vasario 20 d.]. Prieiga per internetą: http://pl.wikipedia.org/wiki/Synteza_Fischera-Tropscha

Slavinskas, S. 2007. Sintetiniai dyzeliniai degalai. *Mano ūkis Nr.1* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2009 m. vasario 02 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.manoukis.lt/>

Somsiri, T.; Oanh, D. T. H.; Chinabut, S.; Phuong, N. T.; Shariff, M.; Yusoff, F.; Bartie, K.; Giacomini, M.; Robba, M.; Bertone, S.; Huys, G.; Teale, A. 2006. A simple device for sampling pond sediment. *Aquaculture*, 258: 650–654.

Šateikis, I. 2006. Augalinės biomasės auginimo ir naudojimo kietam kurui energetinis potencialas ir mokslinės problemos. *LŽŪU ŽŪI Instituto ir LŽŪ Universiteto mokslo darbai*, 38(3): 5–21.

Šiltnamio dujų apskaitos metodologijos tobulinimas. 2008. Pereinamojo laikotarpio institucijų plėtros priemonės projektas Nr. 2005/017-494-05-01-05. Pajėgumų stiprinimas įgyvendinant Kioto protokolo reikalavimus Lietuvoje. Vilnius. 104.

Šlančiauskas, A. 2006. Ekologiškas kuro deginimas, naujos technologijos. *Energetika*, 3: 61–66.

Šlančiauskas, A.; Kalpokaitė, R. 2006. Behaviour of a Heavy Fuel Oil Droplet on a Hot Surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(5–6): 1050–1057.

Švenčianas, P. 2003. Kuro degimo teorijos pagrindai. Kaunas: Technologija. 102.

Tan, K. H. 2000. *Environmental soil science*. New York. 452.

Taraškevičius, R.; Gregorauskas, M. 1993. Šiaulių miesto technogeninių pedogeocheminių anomalijų būdingieji bruožai. *Geologija*, 15: 51–58.

Tarling, D. H.; Turner, P. 1999. Palaeomagnetism and diagenesis in sediments. *Geological Society Special Publication No.151*. Geological Society of London. Bridgend.: WBC. 214.

The production technology of fuel briquettes [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2011 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: http://torf.brest.gas.by/tehnology_pl.html

Trojanowski, J. 1973. Przemiany substancji organicznych w glebie. *PWRiL*. Warszawa. 260.

Vaitkutė, D.; Baltrėnas, P. 2011. Pietryčių Lietuvos miško dirvožemio savybių tyrimai ir vertinimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – Future of Lithuania*, 3(5): 70–76.

Valiuškevičius, G. 1997. Mažųjų ežerų ištekliai ir problemos. Vandens telkinių būklė ir gerinimo būdai. Straipsnių rinkinys. Kaunas. Akademija. 16–19.

Valiuškevičius, G. 2005. Mažųjų Lietuvos ežerų hidrografinis aktyvumas ir jo teritorinės ypatybės. *Geografijos metraštis*, 38(1): 38–47.

Valiuškevičius, G. 2007. Mažieji Lietuvos ežerai. Vilnius.: VU leidykla. 276.

Vallius, H.; Leivouri, M. 1999. The distribution of heavy metals and arsenic in recent sediments in the Gulf of Finland. *Boreal Environment Research*, 4: 19–29.

Vanek, T.; Valenova, S.; Mala, J.; Soudek, P. 2006. Study translocation of toxic metals in woody plants, in 1st scientific meeting of WG1. Root to shoot translocation of pollutants and nutrients. Abstract book. Santiago de Compostela, Spain, 37.

Vares, V.; Kask, Ü.; Muiste, P.; Pihu, T.; Soosaar, S. 2007. Biokuro naudotojo žinynas. Vilnius.: Žara. 165.

Wagner, M.; Słomka, T.; Doktor, M. 2000. Skład petrograficzny i warunki sedymentacji wapieni jeziornych ze złoża węgla brunatnego Bełchatów. Charakter petrograficzny i warunki sedymentacji wybranych kompleksów litologicznych z profilu miocenu w złożu

węgla brunatnego Bełchatów. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Kraków. 230.

Watermaster Classic - Smart solution for hard work [interaktyvus]. 2007 [Žiūrėta 2008 gruodžio 09 d.] Prieiga per internetą: www.watermaster.fi/spain/index.html

Wielowicz, W. 1934. Pomiary głębokości mniejszych jezior obszaru Trockiego. Prace towarzystwa przyjaciół nauk w Wilnie. Vilnius. 92–118.

Wilk, M.; Magdziarz, A. 2010. Ozone Effects on the Emissions of Pollutants Coming from Natural Gas Combustion. Polish Journal of Environmental Studies, 19(6): 1331–1336.

Woodward, J. 2009. The Physical Geography of the Mediterranean. NY.: Oxford University Press inc. 592.

Xue-dong, W.; Tao, L.; Lin, C.; Kun, X. 2007. Research of Boiler Combustion Regulation for Reducing NO_x Emission and its Effect on Boiler Efficiency. Journal of Thermal Science, 16(3): 270–276.

Żak, S.; Ossowski, J. 2003. Badania współczynnika filtracji w oparciu o model konsolidacji gruntów. Problemy Hydrogeologiczne Południowo - Zachodniej Polski. Wrocław. 420.

Zhou, H.; Jensen, A. D.; Glarborg, P.; Jensen, P.A.; Kavaliauskas A. 2005. Numerical modelling of straw combustion in a fixed bed. Fuel, 84: 389–403.

Zhou, S.; Zhang, X. 2007. Prospect of briquetting biomass fuel by forest residues in Tibet. Korean Journal of Chemical Engineering, 24(1): 170–174.

Zielińska, M.; Wojnowska-Baryła, I. 2004. Removal of Organic Compounds from Municipal Wastewater by Immobilized Biomass. Polish Journal of Environmental Studies, 13(5): 573–577.

Žvironaitė, J.; Ciūnys, A.; Gerdžiūnas, P. 2002. Ežerų valymo produkto – sapropelio panaudojimo galimybių tyrimai. Environmental Engineering, 10(4): 168–175.

Безруких, П. П.; Арбузов, Ю. Д.; Борисов, Г. А.; Виссарионов, В.И. 2002. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. Санкт – Петербург: Наука. 314.

Бракш, Н. А. 1971. Сапропелевые отложения и пути их использования. Рига: Зинатне. 283.

Гамаюнов, Н. И.; Косов, В. И.; Иванов, Г. Н. 2002. Геофизические методы изучения торфа, сапропеля и их месторождений. Монография. Тверь.: ИТГТУ. 156.

Демек, Я. 1977. Теория систем и изучение ландшафта. Москва. 356.

Дноуглубительные работы, дноуглубление, очистка водоемов. Гидромеханизация. Земснаряд Watermaster. [interaktyvus]. 2008 [Žiūrėta 2008 m. gruodžio 09 d.] Prieiga per internetą: http://www.yarpodvodnik.ru/pages/works/pond_clear.html

Добрецов, В. Б. 2005. Сапропели России. Освоение, использование, экология. Москва.: ГИОРД. 200.

Косов, В. И. 2007а. Сапропель. Ресурсы, технологии, геоэкология. Санкт – Петербург: Наука. 225.

Косов, В. И. 2007b. Торф. Ресурсы, технологии, геоэкология. Санкт – Петербург: Наука. 452.

Косов, В. И.; Беляков, А. С. 2004 02 16. Способ получения кускового коммунально-бытового биотоплива. Российская Федерация. Пат. RU2255955. С10F7/06. С10L5/14.

Кадунас, В.; Катинас, В.; Грегораускене, В. 2001. Геохимическое районирование почв Литвы. Прикладная геохимия, 2: 178–189.

Канопкайте, С. И.; Пакарските, К. Ю.; Гедиминас, А. А. 1962. Об устойчивости витамина В₁₂ в сапропеле. Труды Свердловского сельскохозяйственного института, 10: 201–208.

Карабанов, А. В.; Мазур, Н.В.; Йода, В.М. 2003. Сапропель озера Дикое. Состав, свойства, использование. Республика Беларусь. Могилев. 48.

Кирейчева, Л. В.; Хохлова, О. Б. 1998. Сапропели: состав, свойства, применение. Москва. 124.

Лопотко, М. З.; Евдокимова, Г. А.; Кузмицкий, П. Л. 1992. Сапропели в сельском хозяйстве. Минск. 215.

Лопотко, М. З. 1974. Сапропели БССР, их добыча и использование. Монография. Минск.: Наука и техника. 207.

Лопотко, М. З.; Евдокимова, Г. А. 1986. Сапропели и продукты на их основе. Минск. 192.

Малашкайте, Б. С. 1962. Эффективность скормливания сапропеля и микроэлементов при откорме свиней. Труды Свердловского сельскохозяйственного института, 10: 319–328.

Мисников, О. С.; Беляков, В. А.; Шамбер, О. В. 2008. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля. ТГТУ. 160.

Мярикянов, М. И.; Степанов, Г. Н.; Егорова, М. С. 1991. Сапропели озер Большая Чабыда, Краденое и пути их использования в сельском хозяйстве. Якутск. 88.

Николаева, Л. А. 2011. Брикетирование бурого угля с использованием модифицированного гудрона. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иркутск. 19.

Петрова, Л. А.; Латышев, В. Г.; Буренина, О. Н. [interaktyvus]. 2007. Получение бытовых топливных брикетов с использованием нефтяных связующих. Нефтегазовое дело УДК 662.8:678.8. [Žiūrėta 2009 m. gruodžio 02 d.]. Prieiga per internetą: http://www.ogbus.ru/authors/PetrovaLA/PetrovaLA_1.pdf

Плаксин, Г. В.; Кривонос, О. И. 2007. Термохимическая переработка озерных сапропелей: состав и свойства продуктов. Российский химический журнал, 51(4): 140–147.

Происхождение болот и торфа [interaktyvus]. 2012 [Žiūrėta 2012 m. kovo 10 d.] Prieiga per internetą: <http://www.rgo.ru/torf/bolota-i-torf-%E2%80%9393-proisxozhdenie/>

- Торф и сапропель Украины [interaktyvus]. 2004 [Žiūrėta 2009 m. vasario 20 d.] Prieiga per internetą: <http://www.photoukraine.com/russian/articles?id=137>
- Штин, С. М. 2005. Озерные сапропели и их комплексное освоение. Москва. 374.
- Экологически чистое органическое удобрение [interaktyvus]. 2007. Рига: [Žiūrėta 2008 m. lapkričio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sapropel.lv/rus/index.html>
- Юдина, Н. В.; Писарева, С. И.; Пынченков, В. И.; Лоскутова, Ю.В. 1998. Параметры оценки биологической активности органического вещества сапропелей. Химия растительного сырья, 4: 33–38.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamose mokslo žurnaluose

Kozlovskia, J.; Valančius, K.; Petraitis, E. 2012a. Sapropel use as a biofuel feasibility studies. Bangalore: Indian academy of sciences. Research Journal of Chemical Sciences. ISSN 2250-9261(print), ISSN 2231-606X (online). 2(5): 29–34. (EBSCO Database).

Kozlovskia, J.; Petraitis, E.; Šerevičienė, V. 2012b. Research of heavy metals distribution in bottom sediment of Lake Talkša (Lithuania). „Society of Ecological Chemistry and Engineering“ Proceedings of ECOpole. ISSN 1898-617X. 6(1): 99–103 (Web of Science).

Dumčius, A.; Paliulis, D.; Kozlovskia-Kėdziora, J. 2011. Selection of investigation methods for heavy metal pollution on soil and on sediments of water basins and rivers bottoms: a review. Ecology. ISSN 0235-7224 (print), ISSN: 2029-0586 (online). 57(1): 30–38 (Thomson ISI Master Journal List).

Kozlovskia-Kėdziora, J.; Petraitis, E. 2011. The Possibilities of Using Sapropel for Briquette Production. Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: aplinkos apsaugos inžinerija. ISSN 2029-2341(print), ISSN 2029-2252 (online). 3(5): 24–30 (Index Copernicus).

Straipsniai kituose leidiniuose

Kozlovskia-Kėdziora, J.; Petraitis, E. 2009. Sapropelio panaudojimo energetikoje galimybių Lietuvoje analizė bei įvertinimas. Aplinkos apsaugos inžinerija. 12-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika. (Elektroninėje laikmenoje).

Kozlovskā-Kędziora, J.; Petraitis, E. 2010a. Sapropelio panaudojimo energetinėm reikmėm galimybė bei kietojo kuro gamybos pavyzdžiai. Šilumos energetika ir technologijos. Kaunas: Technologija. 125–128.

Kozlovskā-Kędziora, J.; Petraitis, E. 2010b. Sapropelio savybių, įtakojančių jo panaudojimo energetikoje, tyrimai ir analizė. Aplinkos apsaugos inžinerija. 13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika. 109–114.

Kozlovskā-Kędziora, J.; Petraitis, E.; Valancius, K.; Grabas, K. 2011. The Distribution of Heavy Metals in Sediments in the Lake Talksa of Lithuania [Sunkiųjų metalų pasiskirstymas Talkšos ežero (Lietuvoje)nuosėdose]. The 8th International conference „Environmental Engineering“: selected papers, May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania. Vol.1. Vilnius: Technika: 169–173 (ISI Proceedings).

Justyna KOZLOVSKA

SAPROPELIO PANAUDOJIMO ŠILUMOS GAMYBAI TYRIMAI IR
APLINKOSAUGINIS VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija (04T)

RESEARCH OF SAPROPEL USE FOR HEAT PRODUCTION AND
ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (04T)

20121221. 17,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius