



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Lina Pušinskė

POPIERIAUS ELASTINIŲ IR DINAMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

INVESTIGATION OF ELASTIC AND DYNAMIC PAPER PROPERTIES

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX055

Pramonės technologijos specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Lina Pušinskė

POPIERIAUS ELASTINIŲ IR DINAMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI
INVESTIGATION OF ELASTIC AND DYNAMIC PAPER PROPERTIES

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX055

Pramonės technologijos specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. A. T. Vasilikevičius
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

Dr. Rolandas Šturmėnas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2019

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Lina Pušinskė, 20132316

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Pramonės inžinerija, PTfm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

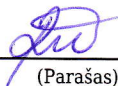
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. gegužės 22 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Popieriaus elastinių ir dinaminių savybių tyrimai“ patvirtintas 2019 m. balandžio 10 d. dekanų potvarkiu Nr. 107me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Robertas Stunžinas. Mano darbo vadovas docentas daktaras Artūras Kilikevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Lina Pušinskė

(Vardas ir pavardė)

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Mechanical and Material Engineering

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Industrial Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

Title **Investigation of elastic and dynamic paper properties**

Author **Lina Pušinskė**

Academic supervisor **Artūras Kilikevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final master thesis, theoretical and experimental research of elastic and dynamic properties of paper was performed. In the theoretical research, different structures of own frequencies has been identified of ink-free coated paper and ink-coated paper. In the experimental research, the dynamic and elastic properties of the same sheets of paper were analyzed. Comparison of the obtained results has been made. Thesis consists of 57 pages without appendixes, 41 pictures and 24 tables

Keywords: paper, eigenfrequency, composite material, orthotropic material, elastic properties

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Pramonės inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas

Popieriaus elastinių ir dinaminių savybių tyrimai

Autorius

Lina Pušinskė

Vadovas

Artūras Kilikevičius

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliktas popieriaus elastinių bei dinaminių savybių teorinis bei eksperimentinis tyrimas. Teorinio tyrimo metu buvo nustatyti skirtingos struktūros popieriaus be rašalo dangos bei popieriaus, padengto dažų sluoksniu, savieji dažniai. Eksperimento metu buvo nagrinėjamos tų pačių popieriaus lapų elastinės savybės. Atliktas gautų rezultatų palyginimas. Darbo apimtis - 57 lapai be priedų, 41 iliustracijos ir 24 lentelės

Prasminiai žodžiai: popierius, savieji dažniai, kompozicinė medžiaga, ortotropinė medžiaga, elastinės savybės

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Gamybos inžinerijos studijų kryptis
Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX055
Pamonės technologijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2019 04 24 Nr. 01
Vilnius

Studentui Linai Pušinskei
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Popieriaus elastinių ir dinaminių savybių tyrimai

patvirtinta 2019 m. balandžio 10 d. dekanų potvarkiu Nr. 107me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės 18 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Įvadas. Literatūros apžvalga.

Analitiniai popieriaus elastinių ir dinaminių savybių nustatymo tyrimai.

Eksperimentiniai popieriaus elastinių ir dinaminių savybių nustatymo tyrimai.

Analitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas ir analizė.

Baigiamosios išvados.

Literatūros sąrašas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: .

.....Lekt. dr. Robertas Stunžinas.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

doc. dr. Artūras Kilikevičius
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

..... Lina Pušinskė
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS	11
1. PROBLEMATIKOS APŽVALGA	12
2. TEORINĖ DALIS	14
2.1. Popierius ir jo savybės	14
2.1.1. Popieriaus struktūra	14
2.1.2. Popieriaus paviršiaus porumas ir glotnumas	17
2.1.3. Popieriaus irimas	17
2.1.4. Popierius ir kompozicinė medžiaga	18
2.1.5. Popieriaus ir dažų sąveika	19
2.2. Mokslinės literatūros apžvalga	21
2.2.1. Popieriaus elastinių parametrų nustatymas	21
2.2.2. Eksperimentinis popieriaus bangavimo tyrimas	22
2.2.3. Elektriškai aktyvaus popieriaus mechaninės savybės	25
3. POPIERIAUS LAPO MODELIAVIMAS	30
3.1. Popieriaus lapo modeliavimas „Comsol Multiphysics“ paketu	30
3.1.1. „Galerie art silk“ popieriaus lapo savųjų dažnio nustatymas	33
3.1.2. „Maxi offset“ popieriaus lapo savųjų dažnio nustatymas	37
3.1.3. „4CC“ popieriaus lapo savųjų dažnio nustatymas	38
4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	40
4.1. Eksperimentinio tyrimo blokinė schema bei naudota įranga	40
42	
4.2. Bandinys ir jo tvirtinimas eksperimento metu	43
4.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai	44
5. EKSPERIMENTO IR TEORINIO TYRIMO APIBENDRINIMAS	49
IŠVADOS	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS	55

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Įvairaus tipo popierinės pakuotės	12
2.1 pav. Medienos plaušo struktūra (a) ir cheminė sudėtis (b)	15
2.2 pav. Skaidulų, mikroskaidulų ir celiuliozės molekulių išsidėstymas augalinių plaušų sienelėse	15
2.3 pav. Celiuliozei būdingos vandenilinės jungtys	16
2.4 pav. Mikroskopinis popieriaus pjūvis	16
2.5 pav. Popieriaus skersinis pjūvis: a) – be užpildo; b) – su užpildu.....	17
2.6 pav. Celiuliozės rūgštinės hidrolizės schema	18
2.7 pav. Ypač lengva metalinė mikrogardelė	18
2.8 pav. Dažų plėvelės susidarymo ant popieriaus būdai: a) tirpiklių įsigėrimu (absorbicija), b) tirpiklių išgarinimu, c) oksidacine polimerizacija, d) ėsdinimu, e) šaldymu, f) radiacine polimerizacija, g) sulydimu	19
2.9 pav. Fleksografinės spaudos principas.	20
2.10 pav. Popieriaus bangavimas spausdinimo mašinose	23
2.11 pav. Tyrimo schema	23
2.12 pav. Lakštinio popieriaus ir ritinio popieriaus standumo ir ploto tankio santykis.	24
2.13 pav. Popieriaus bangavimo amplitudė ir dažnis: (a) amplitudė ir vėjo greitis, (b) dažnis ir vėjo greitis	24
2.14 pav. „Intron 5542“ bandymui naudojamas įrenginys	26
2.15 pav. DMA, „TA Instrument“	26
2.16 pav. Celiuliozės popieriaus įtempimo ir deformacijos kreivė	27
2.17 pav. Įtempimai C2 bandiniam, nukreiptiems 0°	28
2.18 pav. C2 bandinio ciklinė funkcija orientuota į 0°, 45° ir 90°	28
2.19 pav. Dinaminė mechaninė C2 analizė, esant 0° kryptčiai, 40% didžiausio įtempimo kambario temperatūroje (30°C).....	29
3.1 pav. Popieriaus lapo be dažų sluoksnio geometrija	31
3.2 pav. Popieriaus lapo, kuris iš dalies padengtas rašalu, geometrija	31
3.3 pav. Sugeneruotas tinklelis	32
3.4 pav. Rašalo parametrai	32
3.5 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 1 – pirma moda; 2 – antra moda	34
3.6 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 3 – trečia moda; 4 – ketvirta moda.....	34
3.7 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 5 – penkta moda; 6 – šešta moda	34
3.8 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 5 – penkta moda; 6 – šešta moda	34
4.1 pav. „Lion Precision U3B“	40

4.2 pav. Valdymo blokas	41
4.3 pav. Kaupimo, apdorojimo ir valdymo įranga.....	41
4.4 pav. Blokinė schema: 1 – maitinimo šaltinis ir stiprintuvas poslinkio jutikliui „Lion Precision U3B“; 2 – poslinkio jutiklis „Lion Precision U3B“; 3 – kaupimo, apdorojimo įranga 3660D su generatoriumi; 4 – tiriamasis objektas; 5 – PC „Deel“ su valdymo ir apdorojimo programine įranga „Pulse“; 6 – „National instrument“ valdymo blokas, kuris skirtas pjezoelektriniam žadinimo įrenginiui; 7 – pjezoelektrinis žadinimo įrenginys;	42
4.5 pav. Bandinio schema su žadinimo ir įtempimo pavaizdavimu: 1 –Bandinys, 2 – pjezoelektrinis žadinimo prietaisas, 3 – įtempimo jėga, 4 – matavimo vieta	43
4.6 pav. Bandinys padengtas 100 proc. rašalo sluoksniu	43
4.7 pav. Bandinys padengtas 14 proc. rašalo sluoksniu	44
4.8 pav. Eksperimento metu gautos modos: a) – 1 moda; b) – 2 moda.....	45
4.9 pav. Eksperimento metu gautos modos: c) – 3 moda; d) – 4 moda.....	45
4.10 pav. Eksperimento metu gautos modos: e) – 5 moda; f) – 6 moda	45
4.11 pav. Eksperimento metu gautos modos: g) – 7 moda; h) – 8 moda	45
12 pav. Eksperimento stendo blokinė schema.....	60
13 pav. Sugeneruotas tinklėlis.....	61

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Mėginių sąrašas ir jų savybės	21
2.2 lentelė. Nustatyti elastingumo parametrai	22
2.3 lentelė. Celiuliozės popieriaus mechaninės savybės	27
3.1 lentelė. Popieriaus ir dažų geometriniai parametrai	30
3.2 lentelė. Popieriaus „Galerie art silk“ charakteristikos	33
3.3 lentelė. „Galerie art silk“ popieriaus parametrai	33
3.4 lentelė. Modeliavimo metu gauti rezultatai	35
3.5 lentelė. Popieriaus „Maxi offset“ charakteristikos	37
3.6 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus lapo parametrai.....	37
3.7 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus savieji dažniai.....	37
3.8 lentelė. „4CC“ popieriaus charakteristikos	38
3.9 lentelė. „4CC“ popieriaus parametrai.....	38
3.10 lentelė. „4CC“ popieriaus savieji dažniai.....	39
4.1 lentelė. Popieriaus lapų tempimo jėgos	44
4.2 lentelė. Eksperimento metu gauti rezultatai	46
4.3 lentelė. „Maxi ofsset“ popieriaus lapo tyrimo rezultatai	47
4.4 lentelė. „Galerie art silk“ popieriaus lapo tyrimo rezultatai	48
4.5 lentelė. „4CC“ popieriaus lapo tyrimo rezultatai.....	48
5.1 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus savieji dažniai.....	49
5.2 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus su rašalo sluoksniu savieji dažniai	50
5.3 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus dengto rašalo sluoksniu savieji dažniai	52

IVADAS

Jau nuo senų laikų žmonės gamino popierių, jį tobulino, gražino, darė iš įvairaus tipo medžiagų. Nuolat vis tobulindavo gamybos metodus ar net keisdavo žaliavas, visa tai darė kol popierius savo plonumu, baltumu ir kitomis savybėmis priartėjo prie dabartinio popieriaus. Pirmasis rašymo pagrindas pradėtas gaminti Senovės Egipte, kur jį gamino iš papiruso. Tuo metu Rytų europiečiai kaip rašymo pagrindą naudojo beržo tošį. Rankų darbo popieriaus gaminimo pradininkė laikoma Kinija. Senais laikais žmonės popierių gamindavo, kad perduotų informaciją, paliktą mažą savo palikimo dalelę ateities kartoms.

Popierius – tai daugiakomponentė sistema, kuri yra sudaryta iš specialiai apdirbtų augalinių plaušelių, kurie yra glaudžiai tarpusavyje persipynę ir surišti įvairiomis cheminėmis medžiagomis.

Šiomis dienomis itin sparčiai didėjanti spausdintų gaminių paklausa plečia bei tobulina spaudos pramonę. Tačiau periodinių leidinių spausdinimo apimtys sparčiai mažėja, bet vietoje jų atsiranda naujų produktų ir rinkų. Naujausių skaitmeninių spaudos technologijų taikymas, atsiradusios naujos veiklos sritys bei pripažinimas užsienyje bei platesnės eksporto galimybės sukelia konkurenciją tarp Lietuvos spaustuvių. Kiekvienais metais spaustuvių eksportas Lietuvoje sparčiai auga, taip pat Lietuvoje padidėjusi spausdintinės produkcijos paklausa.

Su kiekviena diena laikraščiams žurnalams lieka vis mažiau vietos, didžiąją spaustuvės spausdinamos produkcijos dalį sudaro įvairiausios pakuotės, kita likusi dalis lieka periodiškai spausdinamoms knygoms.

Tad pagrindinis šio darbo tikslas ir yra ištirti popieriaus lapų elastines bei dinamines savybes naudojant baigtinių elementų metodą.

1. PROBLEMATIKOS APŽVALGA

Šiuolaikinėje spaudos pramonėje kai kurių spaudinių gamyba mažėja, tačiau juos pakeičia kiti spaudiniai, taip pat atsiranda ir naujų gaminių. Vis dažniau spaudos rinkoje populiarėja reklaminė produkcija bei įvairiausios pakuotės, kurių gali būti labai įvairių. Reklaminiams gaminiams gali būti keliami labai įvairūs reikalavimai: mechaninis tvirtumas, ilgaamžiškumas, atsparumas įvairiems poveikiams, prekinė išvaizda ir t. t. Naudojant naujas spausdinimo technologijas įmanoma įvykdyti dauguma medžiagoms keliamų reikalavimų.

Per pastaruosius metus spaudos pramonėje vis didesnę dalį užima įvairūs pakuočių gaminiai. Pakuotės išorinė išvaizda nėra vienintelis kriterijus, itin svarbus yra patikimumas bei atsparumas aplinkos bei kitų veiksnių poveikiui. Spauda, rašalo sluoksnis ant popieriaus gali lemti elastingumo savybes bei dinamines savybes. Produkto elastingumo parametrus nustato elastingumo modulis ir Puasono santykis. Popieriaus elastinės savybės yra labai dažnai tiriamos atliekant įvairius eksperimentinius tyrimus bei teoriškai. Tačiau atspausdinto lapo t. y. lapo, padengto tam tikru rašalo kiekiu, elastinės savybės beveik neištirtos.



1.1 pav. Įvairaus tipo popierinės pakuotės

Kai pagaminta produkcija yra vertinama, dažniausiai atsižvelgiama tik į spaudos proceso metu naudojamų medžiagų charakteristikas ir nėra įvertinama, kaip gali pasikeisti gaminio atsparumo bei kitos savybės padengus jį dažais tam tikru būdu. Netinkamai pasirinktas popierius bei spaudos būdas gali stipriai padidinti broko kiekį, net apsunkinti visą spausdinimą.

Spausdinimo proceso metu gaunamas gaminys, kurio paviršius yra padengiamas dažų sluoksniu. Gautas antspaudas ant popieriaus ar kito paviršiaus pakeičia prieš tai buvusias popieriaus

ar kito paviršiaus mechanines, atsparumo bei kitas savybes. Informacijos apie tai, kokios savybės ir kaip jos pasikeičia, yra labai nedaug arba išvis nėra. Galutinės prekės vartojimą ir lemia anksčiau išvardintos savybės, tad reikia ištirti visas šias savybes ir nustatyti, kaip jos keičiasi padengus pagrindą dažais.

2. TEORINĖ DALIS

Spaudinys – tai popierius, ant kurio yra vienas ar net keli dažų sluoksniai, kurie kartais būna dengiami polimerine plėvele arba lako sluoksniu. Popierius lemia galutines spaudinio savybes, todėl šiame skyriuje apžvelgiama popieriaus struktūra ir jo savybės.

2.1. Popierius ir jo savybės

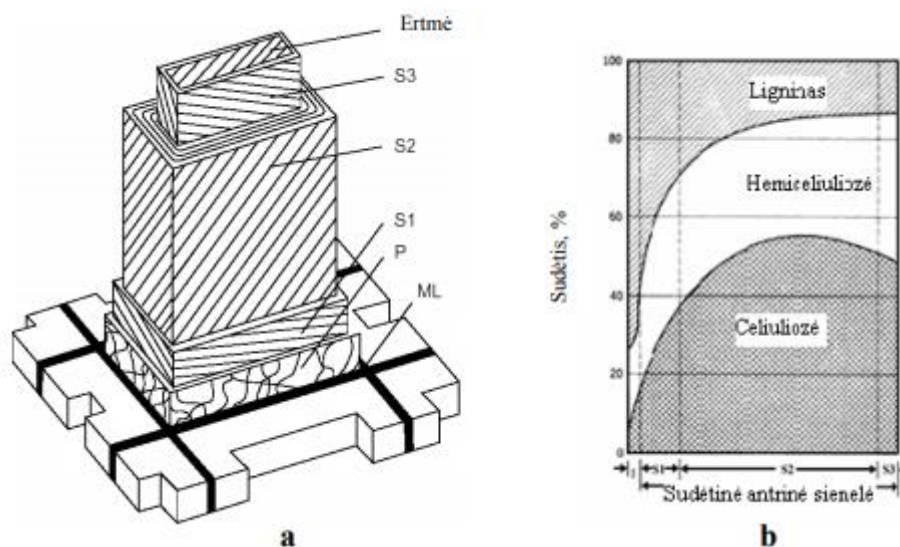
2.1.1. Popieriaus struktūra

Popieriaus struktūra turi labai didelę įtaką ne tik spalvinėms, bet ir mechaninėms popieriaus savybėms. Kartonui ir popieriui, kurie yra naudojami spausdinimui, yra keliama daug įvairių reikalavimų jų mechaninėms savybėms. Reikalavimai priklauso nuo to, koks galutinis spaudos produktas reikalingas bei koks bus naudojamas apdorojimo procesas. Spausdinimo metu popierius yra spaudžiamas ir tempiamas, todėl turi atlaikyti šias apkrovas. Popieriaus deformacija spausdinimo metu lemia galutinio spausdinamo produkto kokybę. Kuomet yra gaminama dėžutės ar puodeliai, tada spaudinio pamatiniam komponentui tenka atlaikyti įvairias apkrovas įvairiomis kryptimis. Šiuo atveju kartais plastinė deformacija yra reikalinga, bet dažniausiai atsiradę gaminio pažeidimai yra nereikalingi. Siekiant išvengti šių nereikalingų padarinių, privaloma žinoti naudojamo spausdinimui kartono ar popieriaus struktūros savybes, kurios ir lemia galutinio gaminio mechanines bei spalvines savybes (Grigaliūnienė 2015).

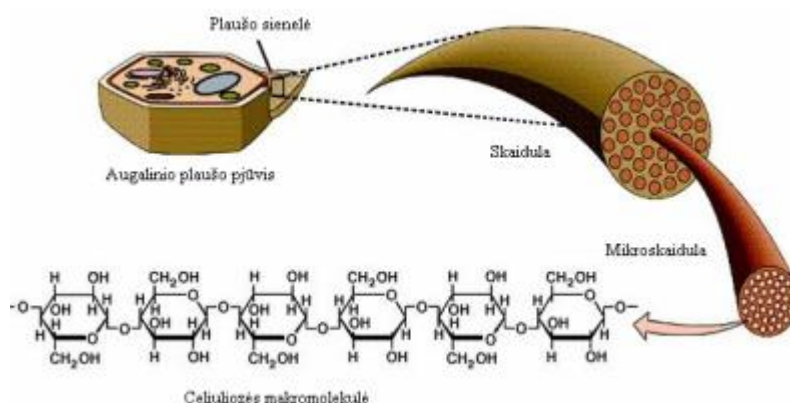
Popierius yra gaminamas iš grynos celiuliozės arba medienos plaušienos (2.2 pav.), kurie yra stipriai tarpusavyje sujungti vandenilinėmis jungtimis. Medienos plaušiena susideda iš celiuliozės, ekstrakcinės masės, lignino bei hemiceliuliozės. Popierius, pagamintas iš grynos celiuliozės, sudėtyje neturi lignino bei turi mažesnę kiekį hemiceliuliozės. Paprastai popieriuje yra klijinių medžiagų, dažnu atveju tai yra krakmolai, kurios gali būti popieriaus visame tūryje arba dengia tik jo paviršių. Klijinės medžiagos popieriaus sudėtyje pagerina popieriaus atsparumą drėgmės poveikiui. Celiuliozės plaušelių, esančių popieriaus struktūroje, pagrindiniai privalumai: plastiškumas, mechaninis atsparumas, atsparumas vandeniui, hidrofiliškumas ir kt. (Berezinas 1990).

Kiekvieno plaušo sienelės yra sudarytos iš keleto sluoksnių. Plaušams būdinga viena nuo kitos besiskirianti išorinė ir vidinė struktūra (2.1 pav.). Vidiniai 9 sluoksniai S1, S2 ir S3 yra sudaryti iš siūlų pavidalo skaidulų, kurios išsidėsčiusios tam tikru kiekvienam augalui būdingu kampu plaušo išilginės ašies atžvilgiu. S2 sluoksnis yra storiasias ir jame kaupiasi apie 80 % visos plaušo celiuliozės. Šis sluoksnis yra veikiamas ruošiant plaušieną ir malant plaušus popieriaus gaminimui. Malimo metu pirminis sluoksnis P pašalinamas, o plaušo paviršiuje atsidūręs vidinis sluoksnis yra fibriliuojamas. Vidinio sluoksnio skaidulos savo ruožtu yra sudarytos iš

mikroskaidulų, o pastarosios – iš celiuliozės makromolekulių (2.2 pav.). Iš augalų plaušienos pagaminto popieriaus cheminė sudėtis priklauso nuo to, iš kokių augalų pluošto jis pagamintas ir kaip plaušiena buvo gryninama (Sivakova 2010).

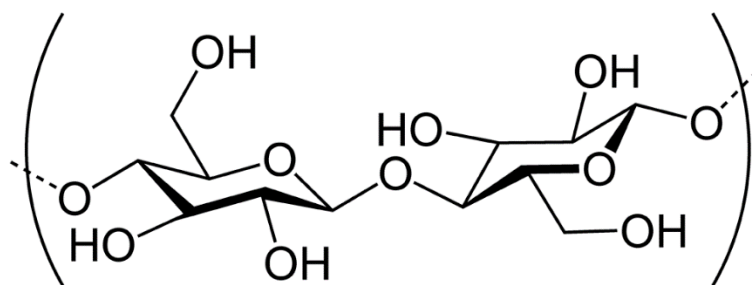


2.1 pav. Medienos plaušo struktūra (a) ir cheminė sudėtis (b) (Retulainen et al., 1998)



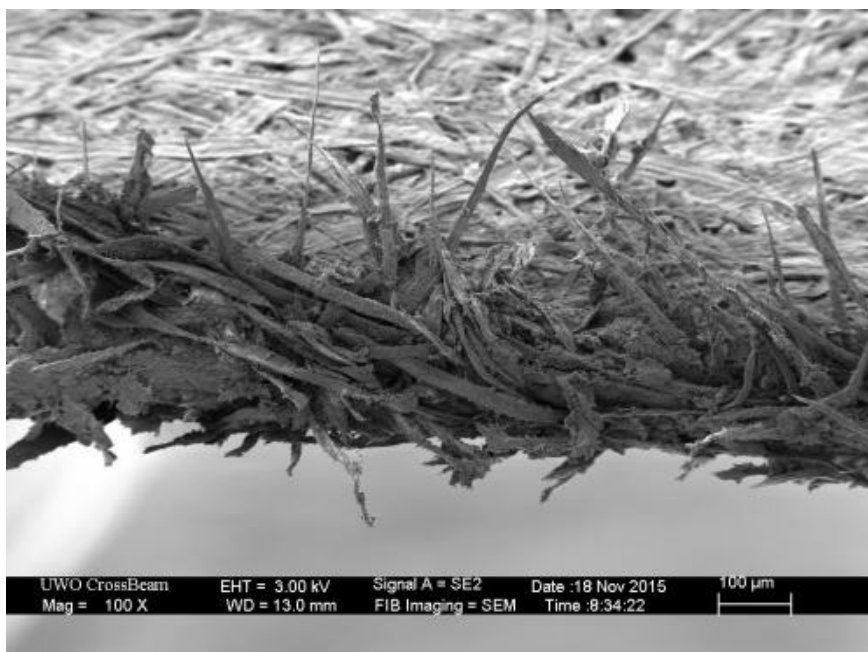
2.2 pav. Skaidulų, mikroskaidulų ir celiuliozės molekulių išsidėstymas augalinių plaušų sienelėse (Retulainen et al., 1998)

Naudojamos medienos rūšis lemia celiuliozės plaušelių savybes. Kietos medienos celiuliozės plaušeliai yra trumpesni, jų plaušelių ilgių pasiskirstymas yra siauresnis, dėl to jie pasižymi dideliu paviršiaus lygumu. Minkštos medienos, atvirkščiai nei kietos medienos, plaušeliai yra ilgesni, jų pagrindiniai privalumai: didelis sulipimas ir didelis stiprumas. Medienos plaušelių dalelės tarpusavyje yra sujungtos vandenilinėmis jungtimis (2.3 pav.). Šios jungtys popieriuje sudaro tinklėlį, kurį veikia apkrovos iš išorės. Tinklelis šias apkrovas perduoda atskiriems plaušeliams per ryšius tarp jų (Berezinas, 1990).



2.3 pav. Celiuliozei būdingos vandenilinės jungtys

Popieriaus fizikines savybes lemia popieriaus sudėtinės dalys bei kaip jos išsidėsčiusios popieriaus struktūroje. Plaušelių išsidėstymas ir sukibimas tarpusavyje lemia popieriaus tvirtumą, paviršiaus poringumas ir plaušelių kiekis struktūroje lemia popieriaus paviršiaus šiurkštumą. Taip pat nuo popieriaus plaušelių struktūrą lemia popieriaus morfologiją (2.4 pav.). Erdvinis plaušelių išsidėstymas struktūroje dažnai yra nepastovus, o kitos popieriaus struktūros dalelės prisitvirtinusios prie plaušelių atsitiktiniu būdu (Isaksson, 2006).



2.4 pav. Mikroskopinis popieriaus pjūvis

Popieriaus struktūra yra ne vienalytė, skiriasi jo vidiniai bei išoriniai sluoksniai. Išoriniai sluoksniai gali būti puresni, jei silpnai kalandruotas popierius, tačiau jei popierius kalandruotas stipriai, tuomet paviršius bus tankesnis. Taip pat labai didelę įtaką turi popieriaus padengimas kreidiniu sluoksniu, nes pagrindinės popieriaus sluoksnių savybės iš esmės skiriasi nuo kreidinio sluoksnio savybių.

Kai popierius yra padengtas kreidiniu sluoksniu, tuomet jis turėtų būti nagrinėjamas kaip kompozitinė medžiaga (Ragauskas et al., 2009). Popieriaus kreidavimas pagerina jo spausdinamąsias savybes, sumažina dažų absorbciją į pagrindą, paviršiaus lygumą bei padidina popieriaus baltumą. Taip pat ne vienalyte medžiaga galime laikyti ir kartoną, kurio savybės nagrinėjamos kaip kompozitinės medžiagos (Grigaliūnienė 2015).

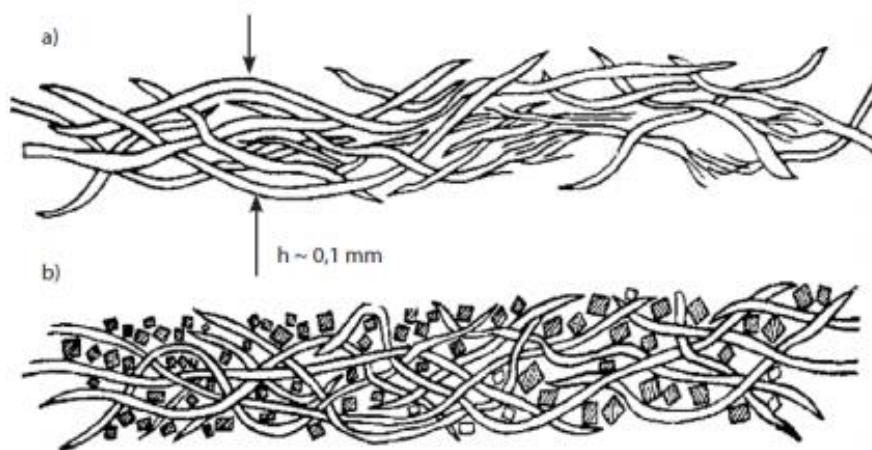
2.1.2. Popieriaus paviršiaus purumas ir glotnumas

Popieriaus purumas (savitasis tūris) apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$v_s = \frac{\delta_s}{g}, \quad (2.1)$$

čia δ_s – popieriaus lapo storis mikrometrai; g – popieriaus gramatūra.

Popierius yra plona medžiaga, sudaryta iš susipynusių celiuliozės plaušelių bei būna užpildyta smulkiagrūdžiu užpildu (2.5 pav.)

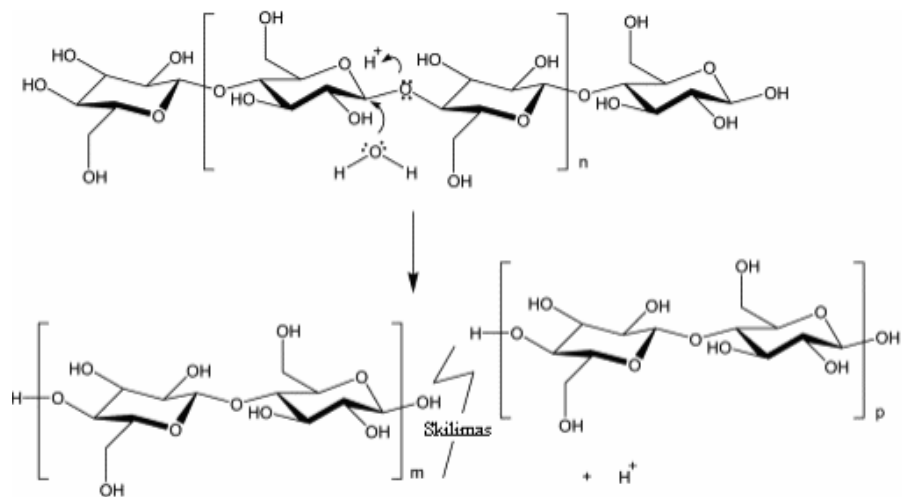


2.5 pav. Popieriaus skersinis pjūvis: a) – be užpildo; b) – su užpildu (Bruno et al., 2008)

Dažniausiai popieriaus paviršius apibūdinamas paviršiaus glotnumu ir šiurkštumu, nors šie du rodikliai yra atvirkštiniai dydžiai vienas kitam, tačiau taip yra todėl, kad yra keletas jų matavimo būdų ir priemonių (Kulachenko at al., 2007).

2.1.3. Popieriaus irimas

Popieriaus irimas – tai celiuliozės cheminiai pokyčiai, vykstant hidrolizės, oksidacijos reakcijoms bei atsirandant skersiniams ryšiams, jungiantiems celiuliozės molekulių grandines. Hidrolizės reakcijos metu nutrūksta celiuliozės makromolekulių glikozidiniai ryšiai, todėl trumpėja celiuliozės makromolekulės, silpnėja popieriaus mechaninis atsparumas. Dėl skersinių ryšių susidarymo mažėja jo elastingumas. Hidrolizės reakcijas katalizuoja popieriuje esančios rūgštys (2.6 pav.), todėl popieriaus rūgštingumas yra ypač svarbus popieriaus stabilumo rodiklis.



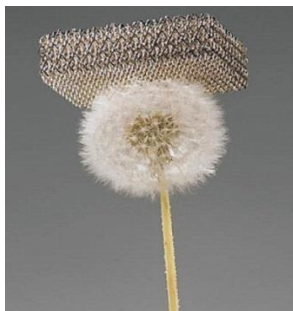
2.6 pav. Celiuliozės rūgštinės hidrolizės schema (Nevell, 1985)

Irimo procesui didelę įtaką daro aplinkos temperatūra ir drėgmė bei saugyklų ore esantys teršalai. Tam tikromis sąlygomis didesnės ar mažesnės reikšmės gali turėti fotocheminės reakcijos ir terminis celiuliozės irimas, kai cheminiai ryšiai nutrūksta dėl nuo temperatūros priklausančio celiuliozės molekulių bei jas sudarančių atomų judėjimo (Malešič, 2002).

2.1.4. Popierius ir kompozicinė medžiaga

Medžiagos, kurios yra sudarytos iš dviejų ar daugiau komponentų, kurie skiriasi pagal struktūrą arba cheminę sudėtį bei kuriose visi komponentai yra sujungti į monolitinę struktūrą, turinčią tarpstruktūrinių komponentų sandūros ribas, vadinamos kompozicinėmis medžiagomis (Markulytė *et al.* 2012).

Popierius – tai augaliniai plaušeliai, persipynę mechanškai ir susikabinę vandenilinėmis jungtimis. Popierius, kurį sudaro augaliniai plaušeliai, klijinės medžiagos, užpildai tūryje ar klijų sluoksnis ant paviršiaus, ar kreidinis sluoksnis, atitinka kompozicinės medžiagos sąvoką. Kompozicinės medžiagos gali būti ne tik popierinės, bet ir metalinės, keraminės, nemetalinės ir t. t. Tyrėjams pavyko sukonstruoti darinį, kurio net 99,99 procento sudaro oras (Darren, 2011). Kitus 0,01 procento sudaro nanometrinių, mikrometrinių ir milimetrinių mastelio kietasis kūnas (2.1 pav.).



2.7 pav. Ypač lengva metalinė mikrogardelė (Darren, 2011)

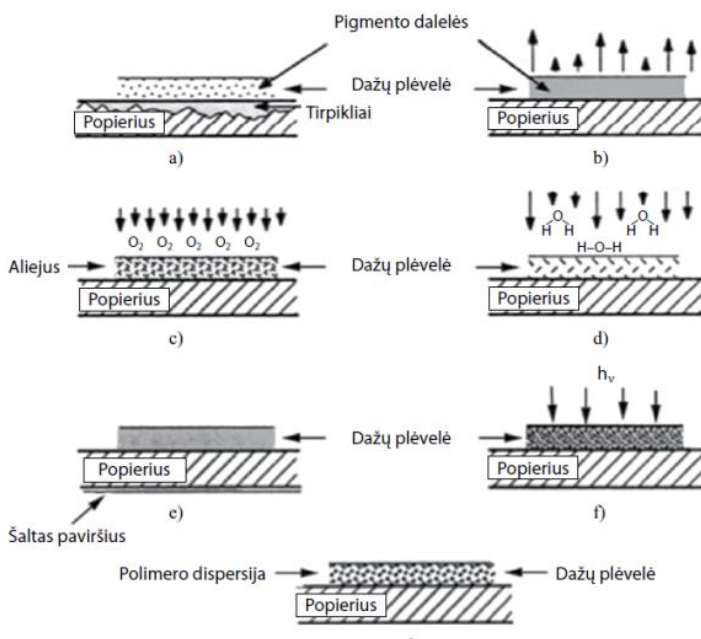
Grafenas – tai medžiaga, kuri turi panašią struktūrą į grafito, tik ji yra vieno atomo storio. Ši medžiaga turi itin geras mechanines (tvirtumas, lankstumas bei kietumas), optines bei elektrines savybes. Grafenas atvėrė naujas naudojimo perspektyvas – elektronikos prietaisų gamybą, naudojant spausdinimo technologijas (Markulytė *et al.*, 2012).

Vis dėlto popierius išliko pagrindinė spausdinimo medžiaga, jis taip pat nuolat yra tobulinamas, kuriamos naujos kartonų bei popierių rūšys, kurios yra tinkamesnės spaudai bei pritaikytos naujoms spausdinimo technologijoms.

2.1.5. Popieriaus ir dažų sąveika

Padengus dalį arba kartais net visą popieriaus paviršių dažų sluoksniu yra gaunamas atspaudas – kompozicinė medžiaga. Kai popierius padengiamas dažų sluoksniu, įvyksta tarp jų sąveika, dažai įsiskverbia į popieriaus tūrį ir prilimpa prie popieriaus paviršiaus. Dažai popieriaus paviršiuje įtvirtinami įvairiais būdais (2.4 pav.), tai priklauso nuo spaudinių paskirties ar spausdinimo technologijos (Sidaravičius, 2012).

Dažų plėvelė, nepriklausomai ar tai ištisinė ar dalinė, pakeičia popieriaus mechanines, dinamines, elastines ir kt. savybes. Tinkamai parinkus popieriaus ir dažų rūšį galima gauti spaudinius reikiamos struktūros bei pageidautinų savybių. Žinoma, kad galutinio produkto savybes lemia ir spaudos būdas, pasirinkimas didelis, tačiau galime išskirti dažniausiai naudojamus spaudos būdus, kuriais yra spausdinama didžioji spaudos produkcijos dalis (Sivakova *et al.* 2010).



2.8 pav. Dažų plėvelės susidarymo ant popieriaus būdai: a) tirpiklių įsigerimu (absorbcija), b) tirpiklių išgarinimu, c) oksidacine polimerizacija, d) ėsdinimu, e) šaldymu, f) radiacine polimerizacija, g) sulydimu (Markulyte et al., 2012)

- **Plokščioji ofsetinė spauda**

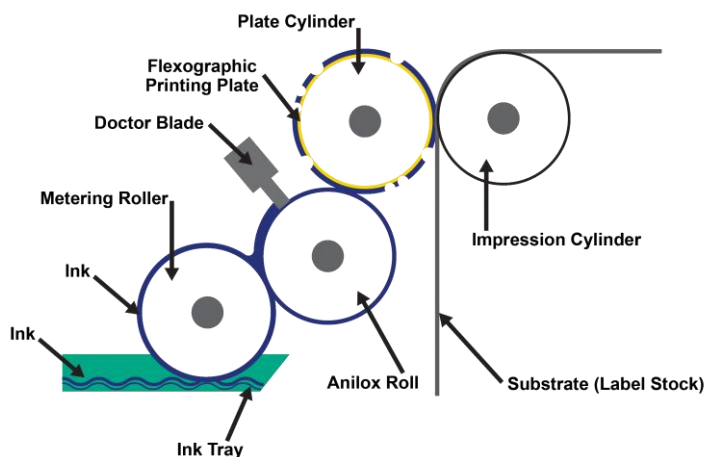
Ši spausdinimo technologija yra viena labiausiai paplitusių spaudoje. Ją naudojant, galima spausdinti beveik visą spaudos produkciją, net labai tinka spausdinti aukštos kokybės spaudinius. Šioje technologijoje naudojami tiršti dažai, kuris neardo popieriaus struktūros, nors ir įsiskverbia į popieriaus tūrį.

- **Lazerinė (elektrografinė) spauda**

Šioje spausdinimo technologijoje naudojamas popierius su specialiomis savybėmis, popierius turi būti šiek tiek laidus elektrai. Lazerinėje spaudoje naudojami sausi dažai, kurie užfiksuojami juos išlydant ant popieriaus. Atspauode dažų sluoksnis yra storesnis palyginus su ofsetinėje spaudoje gautu atspaudu.

- **Fleksografinė spauda**

Fleksografinė spauda dažniausiai naudojama pakuočių gamyboje, tačiau taip pat galim spausdinti ant metalizuotų paviršių, kreidinio bei nekreidinio popieriaus. Šios spaudos būdas yra labai efektyvus, atitinka itin aukštos kokybės reikalavimus. Fleksografinės spaudos spausdinimo principas (2.6 pav.) yra paprastas.



2.9 pav. Fleksografinės spaudos principas

- **Rašalinė spauda**

Ši spausdinimo technologija yra sudėtinga bei reikalauja subtilaus cheminių ir fizikinių rašalo savybių parinkimo. Rašalo parinkimas tiesiogiai susiję su spausdinimo kokybe, spalvų valdymu, vilgymu ir sukibimu su spausdinamąja medžiaga. Šios spaudos principas remiasi atskiru rašalo lašeliu formavimu ir jo nusodinimu reikiamoje spaudinio vietoje.

2.2. Mokslinės literatūros apžvalga

2.2.1. Popieriaus elastinių parametrų nustatymas

Darbe (Grigaliūnienė *et al.*, 2014) buvo išnagrinėta spaudinių elastingumo parametrai. Bandymai buvo atliekami, pritvirtinus du priešingus spausdinto lapo kraštus. Mėginių matmenys buvo 0,20 x 0,20 m, popieriaus lapo storis svyravo nuo 150 iki 300 μm . Bandymo sąlygos: temperatūra 24°C, santykinė drėgmė 38%. Mėginys yra sužadinamas su pjezoelektriniu keitikliu, turi būti kontaktas su mėginio paviršiumi bei užtikrinant diapazoną nuo 10 Hz iki 1000 Hz. Matavimas buvo atliekamas bekontakčiu metodu 15 taškuose, simetriškai išdėstytų mėginio paviršiuje. Tikrieji dažniai ir režimo formos buvo gauti naudojant modalinės analizės programinę įrangą. Bandymo metu apkrova buvo didinama nuo 40 N iki 480 N.

Nustačius kiekvienos imties preliminarą ribą, buvo atliktas identifikavimo procesas. Technika, kuri buvo naudojama elastingumo parametrams identifikuoti, skirta įvesti vibracijos duomenis naudojant išorinius failus bei atlikti modeliavimą, naudojant galutinį elementų paketą „ANSYS“.

Bandymo metu tiriamų bandinių sąrašas ir nustatytos įtempimo jėgos pateiktos lentelėje 2.1. Geometrinės charakteristikos ir popieriaus elastingumo parametrai, kurie buvo gauti eksperimento metu, yra pateikti lentelėje 2.2. Šešių skirtingų popieriaus rūšių (padengti tuo pačiu rašalu ir vienodo storio sluoksniu) bandymai parodė, kad norint gauti tikslūs modalinės analizės rezultatus, t. y. stabiliai įrašyti pirmąsias aštuonias modas, mėginys turi būti esant tam tikram įtempimui, kuris skiriasi dėl popieriaus lapo storio ir rašalo kiekio. Kadangi bandymuose buvo naudojama tas pats dažų sluoksnis (0,005 mm), skirtumus sukelia tik popieriaus storis

2.1 lentelė. Mėginių sąrašas ir jų savybės (Grigaliūnienė *et al.*, 2014)

Nr.	Pavadinimas	Popieriaus tipas	Gramatūra, g/m^2	Tempimo diapazonas, N/mm^2
0	Bandinys 0	Kartonas „Arktika“	280	4.1 – 4.5
1	Bandinys 1	Padengtas popierius „Galerie art silk“	150	3.3 – 6.6
2	Bandinys 2	Nedengtas popierius „4cc“	200	6.4 – 10.9
3	Bandinys 3	Kartonas „Arktika“	230	5.3 – 7.1
4	Bandinys 4	Nedengtas popierius „4cc“	280	6.7 – 8.0
5	Bandinys 5	Dengtas popierius „Galerie art silk“	300	3.3 – 6.6

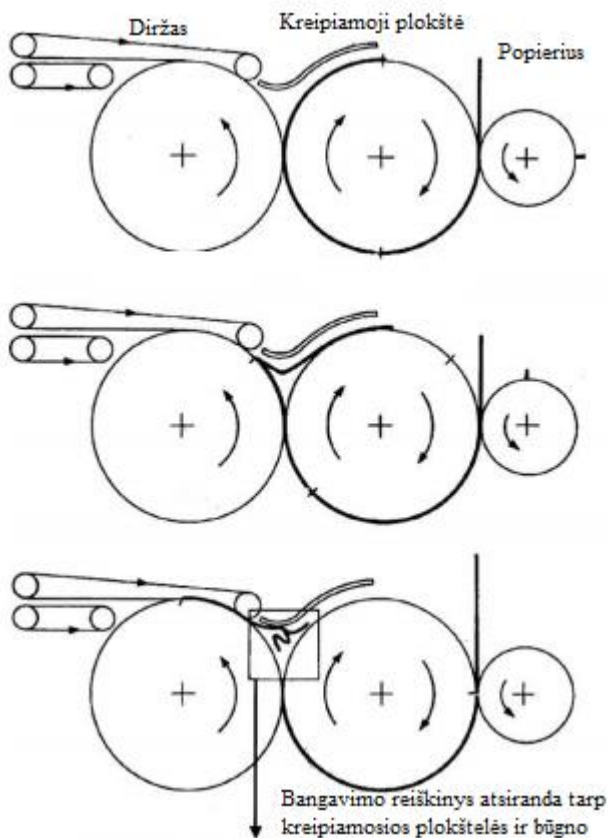
2.2 lentelė. Nustatyti elastingumo parametrai (Grigaliūnienė et al., 2014)

Elastiniai parametrai	Paprastas popierius	Bandinys 0	Bandinys 1	Bandinys 2	Bandinys 3	Bandinys 4	Bandinys 5
E_1 , GPa	1.1	1.94	1.36	2.35	2.28	2.08	8.15
E_2 , GPa	0.39	0.870	0.570	0.360	0.275	0.687	0.320
ν_{12}	0.40	0.062188	0.16775	0.036698	0.385496	0.0072405	0.237385
ν_{23}	0.14	-	-	-	-	-	-
Objektyvi funkcija	-	0.0587161	0.0357455	0.111038	0.040874	0.140869	0.0971981
Tempimas, N/mm ²	-	4.5	5.0	8.2	5.9	7.3	4.0

Šiame darbe buvo šeši skirtingo storio bandiniai ir nustatyti elastingumo parametrai. Bandiniai buvo padengti visiškai vienodo storio rašalu. Tyrimas parodė, kad spaudiniai keičia savo elastingumo savybes, lyginant su popieriumi, kuris nėra dengtas dažų sluoksniu. Pagrindinis skirtumas pastebimas tamprumo modulio pasikeitimas išilgine kryptimi. Pagal tyrimo rezultatus matome, kad popierius padengtas rašalu, jis buvo standus ir jo išilginis tamprumo modulis padidėjo iki 10 kartų. Tamprumo modulio padidėjimas yra susijęs ne tik su rašalo sluoksniu, bet ir su mėginio tvirtinimu, nes medžiagos standumas priklauso nuo tempimo jėgos (Grigaliūnienė et al. 2014).

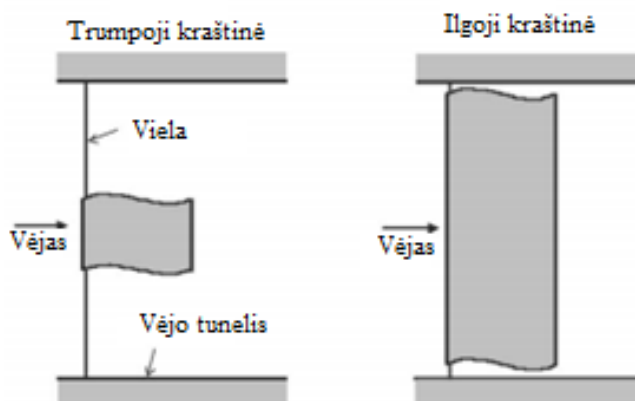
2.2.2. Eksperimentinis popieriaus bangavimo tyrimas

Kitame nagrinėtame darbe (Watanabe et al., 2002) eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas, kad išsiaiškinti popieriaus bangavimo reiškinį. Bangavimo greitis buvo matuojamas vėjo tunelyje, popierius buvo skirtingų dydžių bei skirtingų rūšių. Šio tyrimo dėmesys atkreipiamas į plokščiojo judesio metu vykstantį drebinimą – „vėliavos plazdenimą“. Žinoma, kad „vėliavos plazdenimas“ atsiranda spausdinimo mašinose, spausdinimo metu (2.10 pav.)



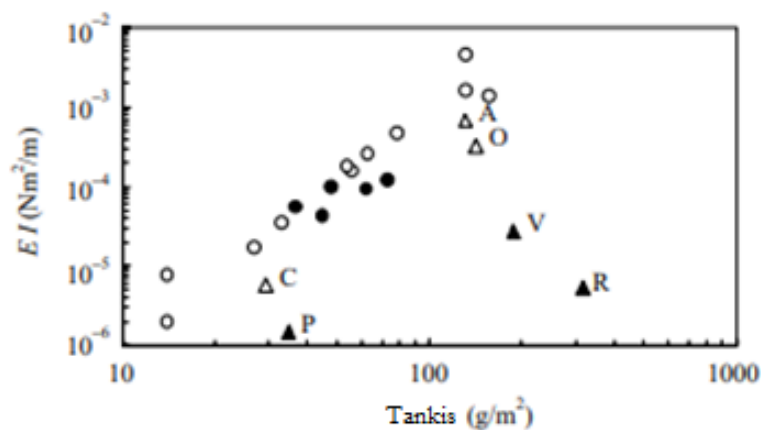
2.10 pav. Popieriaus bangavimas spausdinimo mašinose (Watanabe at al., 2002)

Vieno kvadratinio metro testas. Lakštas buvo sumontuotas vertikaliai ant vielos vėjo tunelyje, bandymui atlikti buvo naudojami dviejų tipų lakštai (2.10 pav.). Buvo atlikti bandymai su 50 popieriaus lakštų, pagamintų iš 11 rūšių popieriaus lapų ir 3 rūšių elastinių medžiagų (aliuminio, celiuliozės ir poliesterio).



2.11 pav. Tyrimo schema (Watanabe at al., 2002)

Tvirtumo ryšys tarp ploto tankio ir popieriaus lakšto ir ritinio medžiagų pavaizduotas 2.11 paveiksle. Įdomu tai, kad popieriaus standumas yra didesnis nei metalo ir plastiko tame pačiame ploto tankyje (Watanabe *et al.* 2002).



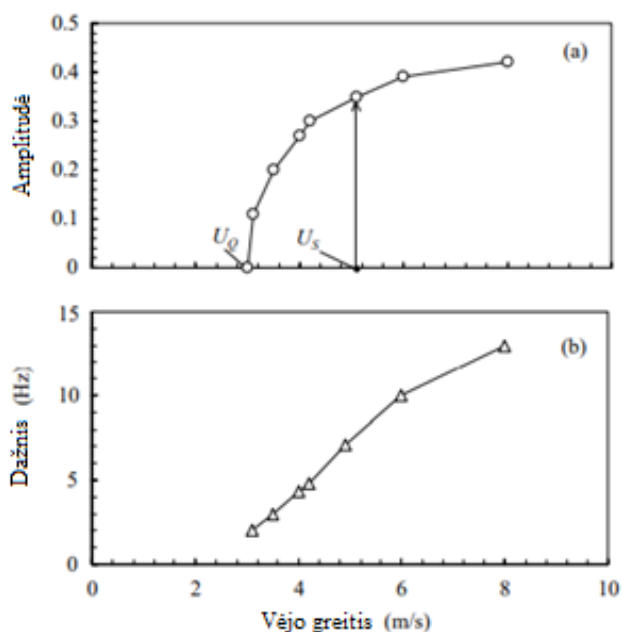
2.12 pav. Lakštinio popieriaus ir ritinio popieriaus standumo ir ploto tankio santykis.

Lapas: ○ – popierius; ΔA – aliuminis; ΔO – OHP popierius; ΔC – celofanas.

Ritiny: ● – popierius; ▲V – vinilas; ▲R – guma; ▲P – polietilenas (Watanabe at al., 2002)

2.12 paveiksle pavaizduota popieriaus bangavimo amplitudė ir dažnis priklausomai nuo vėjo greičio. Bangavimas tyrimo metu pasireiškė, vėjui pasiekus tam tikrą greitį (U_s), tuomet vėjo greitis pamažu buvo didinamas. Vėjo greitis buvo didinamas iki tol, kol tiriamasis lakštas lūžo. Bangavimas taip pat pasireiškė ties mažesniu vėjo greičiu U_q . Šis isteriškas elgesys matoma grafike (2.12 pav.). Toliau pateikiamas šių vėjo greičių santykis, kuris buvo gautas iš maždaug 30 bandymų duomenų:

$$U_q = 0,75 \cdot U_s - 0,2 \quad (2.2)$$



2.13 pav. Popieriaus bangavimo amplitudė ir dažnis: (a) amplitudė ir vėjo greitis, (b) dažnis ir vėjo greitis (Watanabe at al., 2002)

Taigi, bandymo rezultatai parodo, kad lapų bangavimo amplitudė pasižymi tam tikru laipsniu histerezės atžvilgiu didėja ir mažėja vėjo greitis. Ritininis popierius nerodo tokio isterinio elgesio. Amplitudė padidėja palaipsniui ir monotoniškai didėja vėjo greičiui.

Nustatyta, kad dažnis padidėjo, abiem atvejais tiek lakštinio popieriaus tiek ritininio, kai bangavimas sutapo su judėjimo bangomis. Nustatyta, kad pagrindiniai veiksniai, kurie lemia lapų bangavimą, yra $EI/\rho c^3$ ir masės santykis ($m/\rho c$).

2.2.3. Elektriškai aktyvaus popieriaus mechaninės savybės

Trečiame darbe (Kim *et al.*, 2008) buvo nagrinėjamo celiuliozės elektriškai aktyvaus popieriaus (EAPap) mechaninės savybės. EAPap celiuliozė susideda iš neskaidytų polimerų, kurie gauti iš gliukozės likučių junginių, išdėstytų linijinėse grandinėse, kuriose kiekvienas celiuliozės likutis pasisuka 180° .

Natūralios celiuliozės pavertimas EAPap, pusiau kristalinė celiuliozė dalinėje kristalinėje struktūroje ištirpinama iki skysto pavidalo, naudojant tirpiklius, tokius kaip natrio hidroksidas arba N – dimetilacetamidas (DMAc). Kai tirpalas nugarinamas, reaguodamas su vandeniu, gaunamas regeneruotos celiuliozės lapas.

Šiame darbo eksperimentiniame tyrime naudojami trijų celiuliozės popieriaus rūšys, kurie identifikuojami kaip C1, C2 ir C3. Bandyme naudojamų popieriaus bandinių išmatavimai yra 216×300 mm, storis siekia nuo 14 iki 17 μm . Bandiniai turi lengvai atpažįstamą ekstruzijos kryptį, kuri rezultatuose visada pažymima 0° ženklu. Trys bandomosios kryptys yra apibrėžtos 0° kryptimi, kaip 0° , 45° ir 90° kiekvienam bandiniui (Kim *et al.*, 2008).

Pastovios tempimo jėgos ir pastovus įtempis, padeda atitinkamai nustatyti deformacijos ir tamprumo modulius. Iš šių atliekamų bandymų galima nustatyti, ar ši medžiaga yra linijinė arba nelinijine viskozė, taip pat ar ji tam tikru momentu atsipalaiduoja. Šiems bandymams naudojama „Instron 5542“ (3.7 pav.) bandymo mašina.



2.14 pav. „Instron 5542“ bandymui naudojamas įrenginys (Kim et al., 2008)

Be nuolatinių jėgų ir deformacijų bandymų, dinaminė mechaninė analizė atliekama siekiant ištirti ciklinį apkrovos poveikį. Eksperimentų serija, jungianti tiesiškai besikeičiančią pjūklų dantuko įtempimo lauką, yra įvairiose C1, C2 ir C3 bandiniuose, kiekvienos iš trijų EAPap medžiagų 0° , 45° ir 90° kryptyse iki 20 apkrovos ciklų. Maksimalus ir minimalus jėgos lygis pjūklų dantuko įtempio profilyje yra nustatytas 95 ir 10 procentų galutinio EAPap mėginio stiprumo. Dinaminis mechaninis analizatorius (2.14 pav.) naudojamas, kad pateiktų mėginių dinaminę įtampų istoriją priklausomai nuo apkrovos, laiko ir temperatūros (Kim et al., 2008).

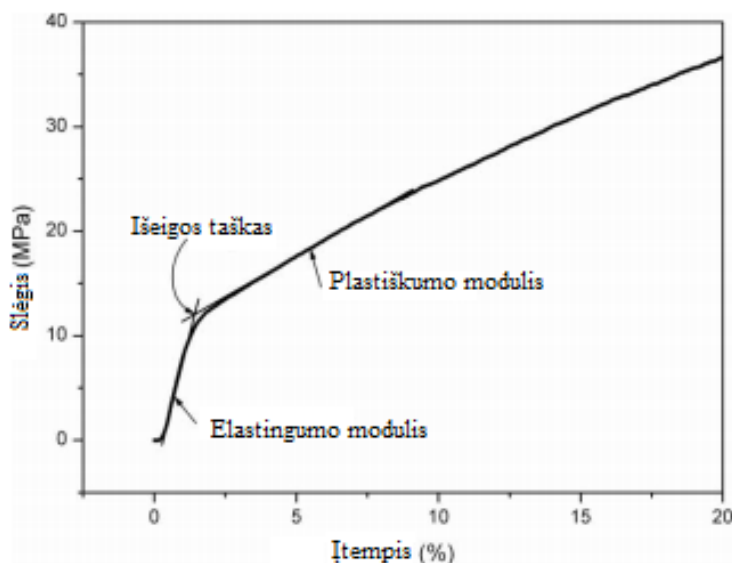


2.15 pav. DMA, „TA Instrument“ (Kim et al., 2008)

Visi bandymai buvo atliekami su trimis bandiniais kiekvienoje iš trijų temperatūrų, kambario temperatūroje (vidutiniškai apie 30°C), 50°C ir 100°C . Bandinio ilgis yra 12 mm.

Grafike (2.15 pav) matoma tipinė EAPap celiuliozės popieriaus įtempimo ir deformacijos kreivė. Įtempimas tiesiogiai padidėjo, kai deformacija padidėjo. Po ryškiai apibrėžtos išėigos taško įtempimo deformacijos, kreivės nuolydis smarkiai sumažėjo. Pirmasis nuolydis yra

susijęs su celiuliozės mikrofibrilų stiprumu, o amorfinės celiuliozės dalies mechaninis stipris yra antrasis nuolydis.



2.16 pav. Celiuliozės popieriaus įtempimo ir deformacijos kreivė

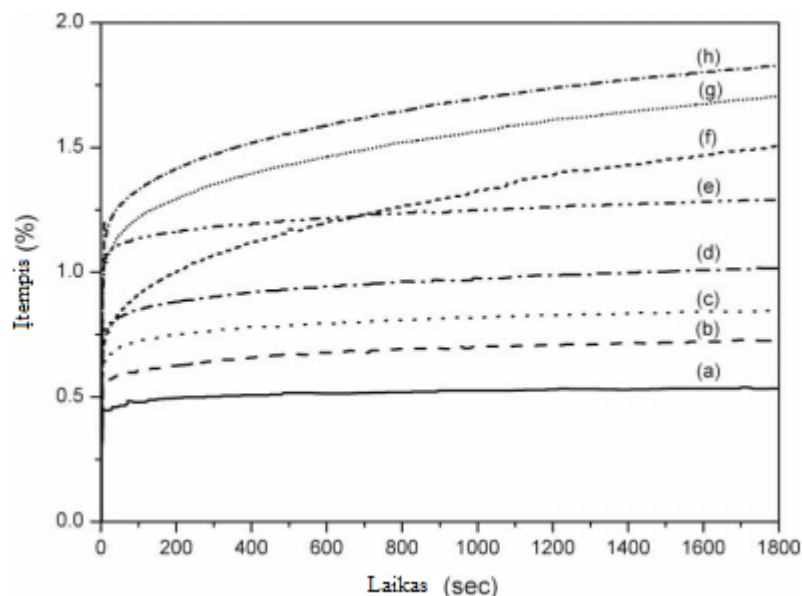
Lentelėje 2.3 pateikti Jungo moduliai ir trijų tipų celiuliozės popieriaus C1, C2 ir C3 santykis 0° , 45° ir 90° išeiga ir didžiausią stiprį.

2.3 lentelė. Celiuliozės popieriaus mechaninės savybės (Kim et al., 2008).

Popierius	Kampas	E_1 , GPa	E_2 , GPa	Išeiga, σ_b	Didžiausias stipris, σ_u
C1	0°	7119	569	112	173
	45°	5492	191	92	141
	90°	4413	155	86	113
C2	0°	9213	444	132	199
	45°	5971	110	106	136
	90°	5682	35	86	96
C3	0°	7066	570	111	182
	45°	5012	148	86	130
	90°	4264	45	69	85

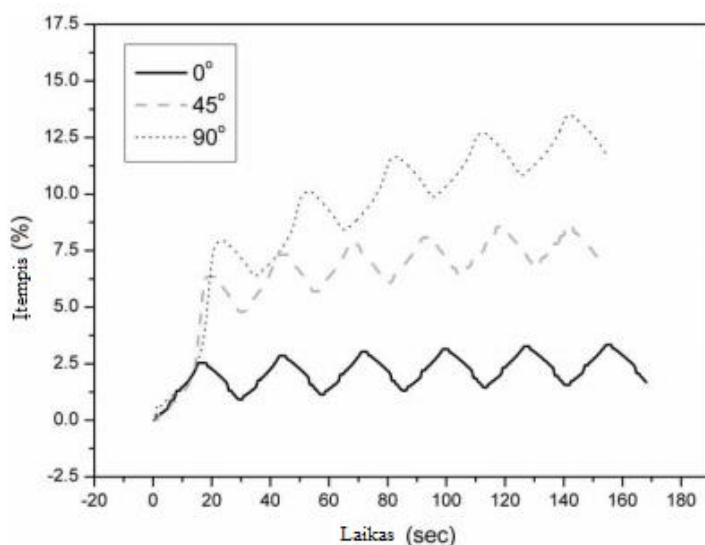
Grafike (2.16 pav.) pavaizduota C2 bandinių, nukreiptų į 0° įtempimai. Jos svyravo nuo 30 iki 75 proc. kiekvieno celiuliozės popieriaus elastingumo ribos, kurios nustatytos ankstesniais

bandymais. Kaip pažymėta grafike, kai įtempiai vertės siekė 50 proc. didžiausio elastingo įtempimo, viskoelastinis atsakas pasikeitė iš vienos, turinčio mažą viskoelastinį atsaką, į vieną, turinčio aukštą viskoelastinį atsaką. Abu atsakymai yra atitinkantys medžiagas, kurios yra linijinės viskoelastinės.



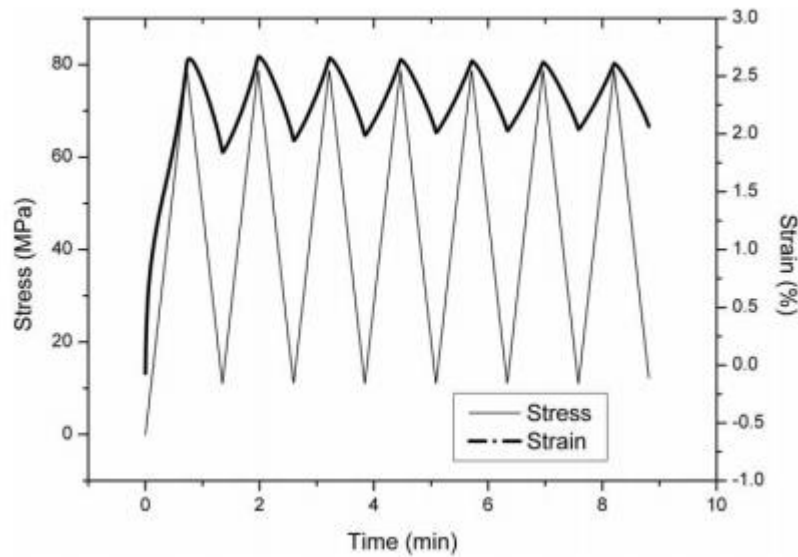
2.17 pav. Įtempimai C2 bandiniam, nukreiptiems 0° (Kim et al., 2008).

Grafike (2.17 pav.) parodyta deformacinė kreivė kaip laiko funkcija, kai taikomas mažo ciklo dantinio pjūklo staklių įtempimas. Tai reiškia ciklišką įtempimą, taikomą C2 kartu pagal tris skirtingas kryptis. Yra šeši ciklai, pirmieji pradedant nuo 0 N, o likę segmentai persikelia nuo 65,1 MPa (95% galutinio stiprumo) iki 10,3 MPa (10% galutinio stiprumo). Laikotarpis yra apie 30 sekundžių. Kai padidėjo laikas, faktinės didžiausios įtempimo vertės palaipsniui didėjo, nes mažėjo bandymo sekcijos plotas.



2.18 pav. C2 bandinio ciklinė funkcija orientuota į 0° , 45° ir 90° (Kim et al., 2008).

Grafike (2.18 pav.) pateikti duomenys apie C2 bandinį pagal 0° kryptį. Dvi amplitudės pavaizduoja slėgio (MPa) ir įtempimo (procentais) priklausomybę nuo laiko.



2.19 pav. Dinaminė mechaninė C2 analizė, esant 0° kryptiai, 40% didžiausio įtempimo kambario temperatūroje (30°C) (Kim et al., 2008)

Šiame darbe buvo nagrinėjamos svarbios celiuliozės pagrindo EAPap mechaninės savybės, kelioms celiuliozės popieriaus rūšims. Tai apima Jungo modulį, takumo stiprumą, didžiausią stiprį ir dinامينius įtempimus. Iš gautų rezultatų matyti du Jungo modulius, kurie gali būti susiję su mikrofibrilėmis ir amorfiniais celiuliozės zonomis. Tipiški Jungo modulio dydžiai EAPap svyruoja nuo 4 iki 9 GPa, kuris yra gana aukštas, palyginti su kitomis EAP medžiagomis. Po dantinio pjūklo bandymo, slėgis laipsniškai didėja kartu su laiku. Kai temperatūra padidėja nuo 30 iki 100°C , linijinis nuolydis padidėjo. Kai 45° kryptis, celiuliozės EAPap pasižymėjo aukštesniu antriniu moduliui nei kitos kryptys. Šis rezultatas gali būti siejamas su tuo, kad 45° kryptis užtikrina geriausią deformacijos veikimą (Kim et al., 2008).

3. POPIERIAUS LAPO MODELIAVIMAS

Inžinerijoje sprendžiant uždavinius, visų pirma reikia atlikti reikalingo objekto teorinį tyrimą. Pradžioje reikia sudaryti matematinį modelį, tuomet nustatomos reikiamos charakteristikos panaudojus matematinius sprendimo metodus arba programinius paketus. Vėliau tas pats objektas (arba jo modelis) tiriamas eksperimento būdu. Atlikus teorinį ir eksperimentinį tyrimą, abiejų tyrimų gauti rezultatai yra lyginami tarpusavyje ir tada yra sprendžiama apie sukurtos teorijos teisingumą (Greco et al., 2007).

3.1. Popieriaus lapo modeliavimas „Comsol Multiphysics“ paketu

„Comsol Multiphysics“ – kompleksinė baigtinių elementų analizės, tirpiklių ir daugiafunkcinių modelių programinė įranga. Naudojant šią programą buvo pasirinktas „Structural Mechanics“ modulis. Šis modulis skirtas mechaninių konstrukcijų, kurioms taikomos statinės ar dinaminės apkrovos, analizei. Jis gali būti naudojamas įvairiems analizės tipams (Andreson, n.d.)

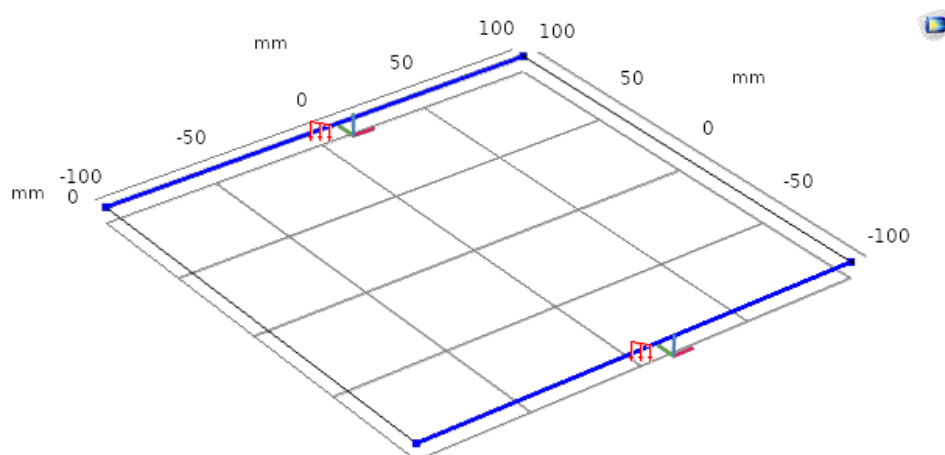
Buvo modeliuoti 3-jų rūšių popieriaus lapai saviesiems dažniams nustatyti. Visų rūšių popieriaus lapai buvo sumodeliuoti iš dalies padengti dažų sluoksniu bei visiškai padengti dažų sluoksniu. Popieriaus lapai buvo vienodų matmenų 0,2x0,2 m, skyrėsi skirtingų popierių charakteristikos.

Pagal pasirinktus parametrus (3.1 lentelė) sugeneruojama geometrija (3.1 pav.). Pirmiausia buvo nustatyti popieriaus lapo be rašalo sluoksnio savieji dažniai, vėliau iš dalies padengtų lapų, kai rašalas dengia 14 proc. viso lapo ploto (3.2 pav.). Likusieji lapai yra dengti 100 proc. rašalu.

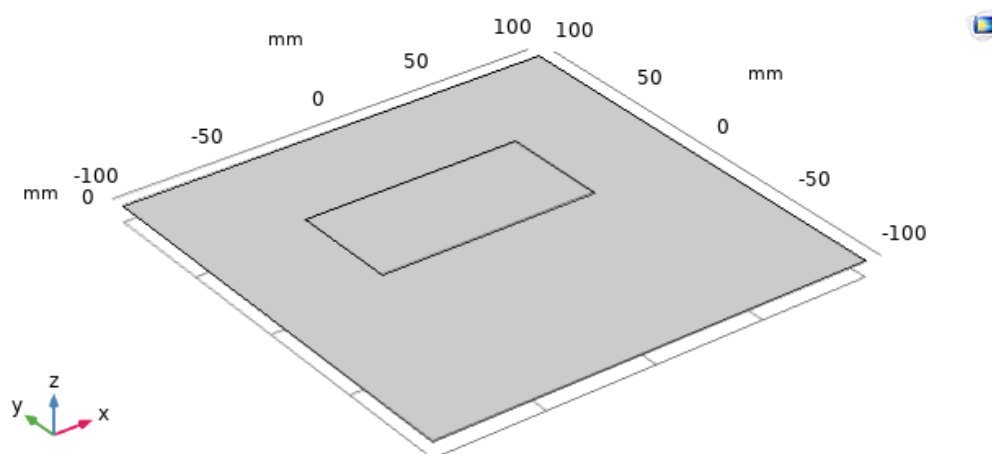
3.1 lentelė. Popieriaus ir dažų geometriniai parametrai

Žymėjimas	Matmuo	Vertė	Aprašymas
L	200[mm]	0,2 m	Popieriaus lapo ilgis
pp	200[mm]	0,2 m	Popieriaus lapo plotis
sl	0,008[mm]	8E–6 m	Dažų sluoksnio storis
l1	150[mm]	0,15 m	Dažų sluoksnio ilgis iš dalies dengtam popieriaus lapui
p1	100[mm]	0,1 m	Dažų sluoksnio ilgis iš dalies dengtam popieriaus lapui

Žymėjimas	Matmuo	Vertė	Aprašymas
l2	200[mm]	0,2 m	Dažų sluoksnio plotis visiškai dengtam popieriaus lapui
p2	200[mm]	0,2 m	Dažų sluoksnio ilgis visiškai dengtam popieriaus lapui

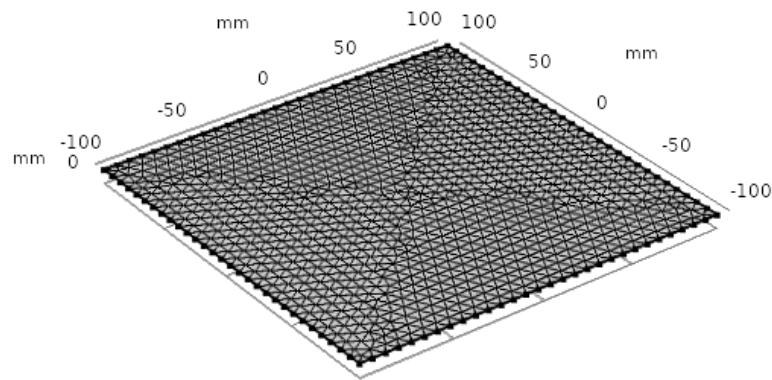


3.1 pav. Popieriaus lapo be dažų sluoksnio geometrija



3.2 pav. Popieriaus lapo, kuris iš dalies padengtas rašalu, geometrija

Taip pat buvo sugeneruotas tinklelis geometrijai. Pasirenkama generuoti automatiškai „Physics-controlled mesh“ su „Extra fine“ dydžio elementais. Sugeneruotas tinklelis pateikiamas 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Sugeneruotas tinklelis

Rašalas, kuriuo buvo padengti popieriaus lapai, buvo vienos rūšies. Rašalo charakteristika pateikta 3.4 paveiksle.

Specify:

Young's modulus and Poisson's ratio

Young's modulus:

E User defined

2e9[Pa] Pa

Poisson's ratio:

ν User defined

0.4 1

Density:

ρ User defined

1100 kg/m³

3.4 pav. Rašalo parametrai

Popierius yra ortotropinė medžiaga, kuri gali apibūdinama šešiais nepriklausomais tamprumo rodikliais:

$$E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12} = G_{13},$$

$$G_{23} = E_2/2(1 + \nu_{23}),$$

čia 1, 2 ir 3 nusako popieriaus išilginę kryptį, skersinę kryptį ir atitinkamai z kryptį.

Siekdami supaprastinti identifikavimo užduotį, vietoje trimačio uždavinio nagrinėti dvimatį, įvedama prielaida, kad visomis kryptimis Puasono koeficientai yra lygūs (Ragauskas 2010):

$$E_1, E_2 = E_3, v_{12} = v_{13} = v_{23},$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = \frac{E_2}{2 \cdot (1 + v_{12})}.$$

3.1.1. „Galerie art silk“ popieriaus lapo savųjų dažnio nustatymas

Pirmiausiai modeliuojamas buvo „Galerie art silk“ popieriaus lapas. Tai tris kartus kreiduotas popierius, itin lygiu paviršiumi. Šis popieriaus lapas pagamintas iš grynos balintos celiuliozės. Lentelėje 3.5 pateiktos šio popieriaus charakteristikos.

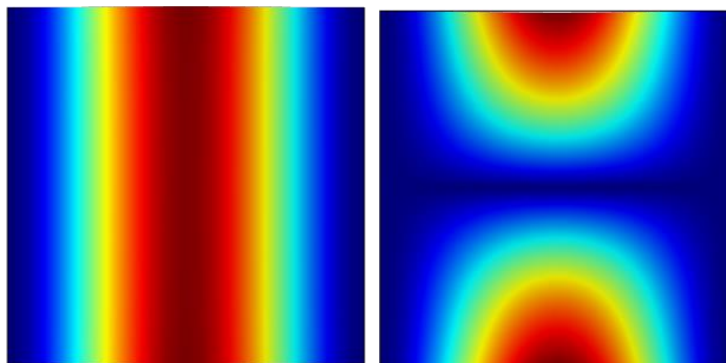
3.2 lentelė. Popieriaus „Galerie art silk“ charakteristikos

Charakteristika	Vertė	Standartas
Gramatūra, g/m ²	300	ISO 536
Storis, μm	288	ISO 534
Savitasis tūris, cm ³ /g	0,96	ISO 534
PPS šiurkštumas, μm	1,8	ISO 8791-4
Ryškumas, %	100	ISO 2470-1
Baltumas CIE, %	127	ISO 11475
Neperšviečiamumas, %	99	ISO 2471

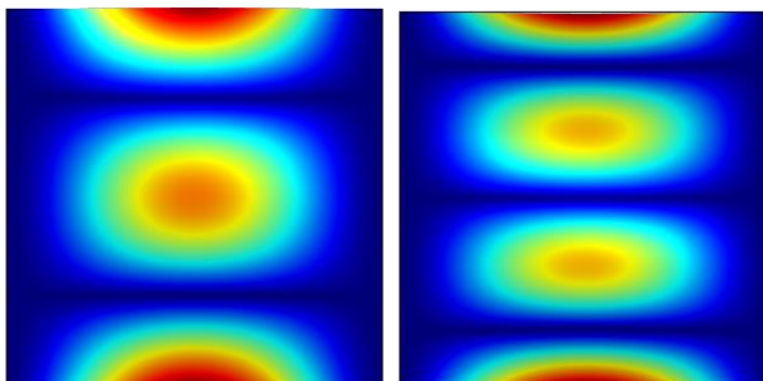
Lentelėje 3.6 pateikti tiriamo popieriaus lapo parametrai, kurie yra reikalingi programoje, norint apskaičiuoti savuosius dažnius.

3.3 lentelė. „Galerie art silk“ popieriaus parametrai

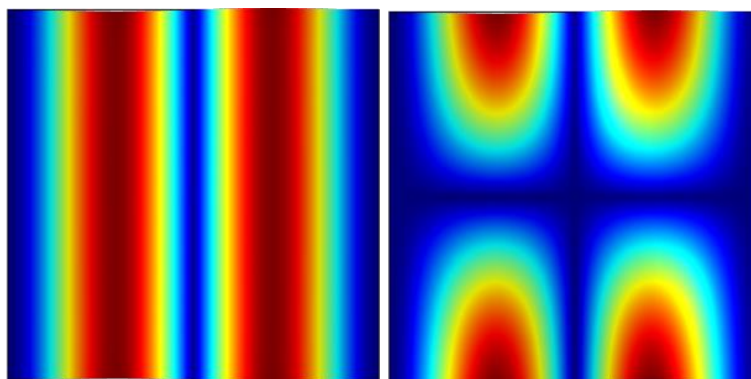
Pavadinimas	Vertė
Medžiaga	Ortotropinė
Jungo modulis E ₁ , GPa (išilginė kryptis)	1,3
Jungo modulis E ₂ , GPa (skersinė kryptis)	0,60
Puasono koef. ν ₁₂ (išilginė kryptis)	0,20



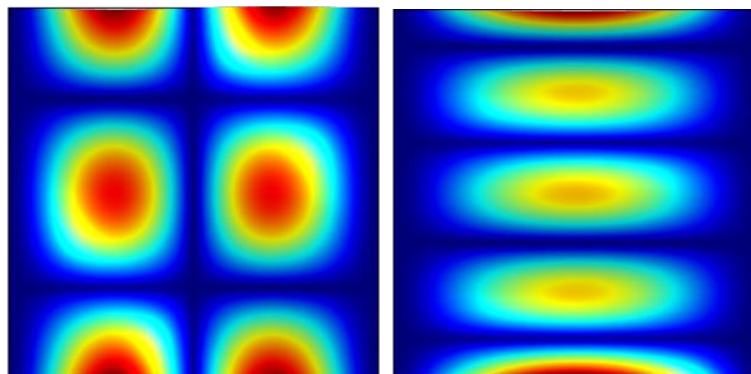
3.5 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 1 – pirma moda; 2 – antra moda



3.6 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 3 – trečia moda; 4 – ketvirta moda



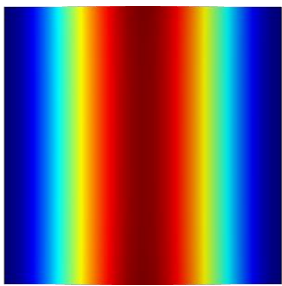
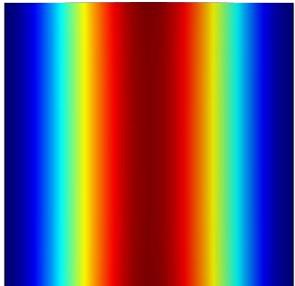
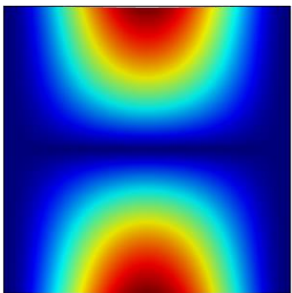
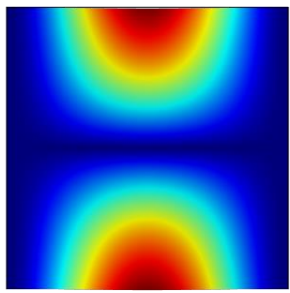
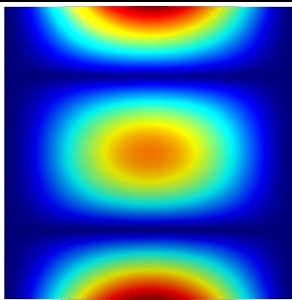
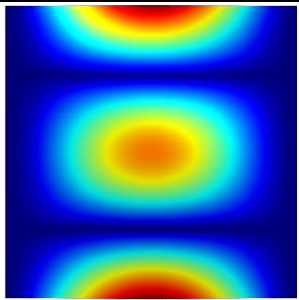
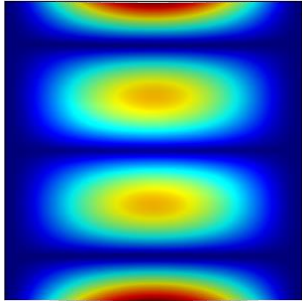
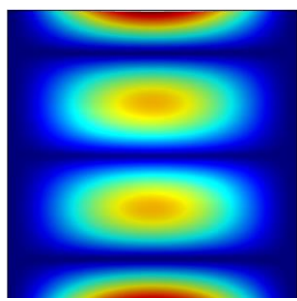
3.7 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 5 – penkta moda; 6 – šešta moda

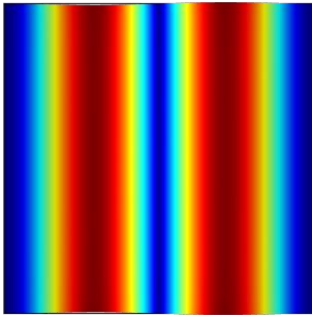
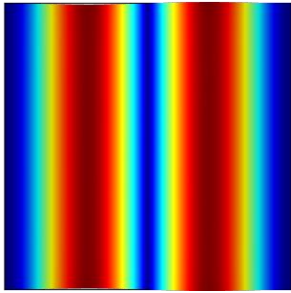
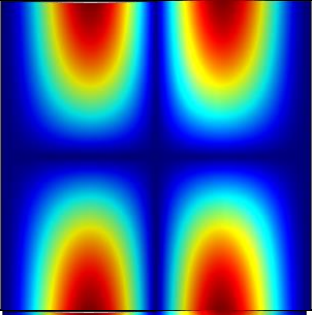
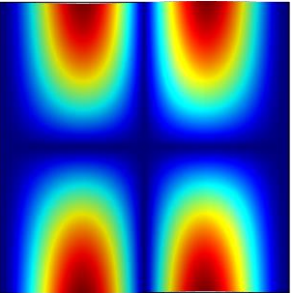
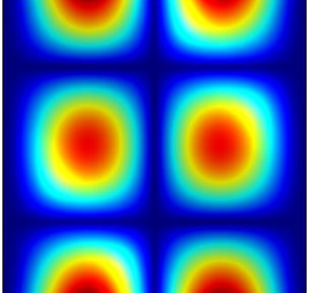
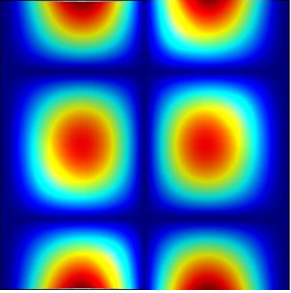
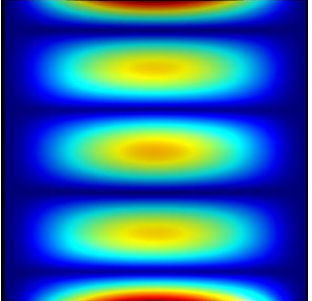
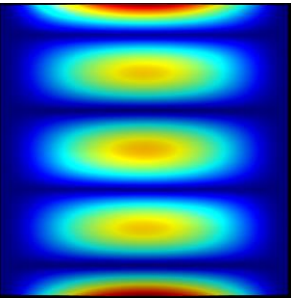


3.8 pav. Modeliavimo metu gautos modos: 5 – penkta moda; 6 – šešta moda

Popieriaus „Galerie art silk“ lapo matematinio modelio metu nustatyti savieji dažniai bei jų modos pateikiamos lentelėje 3.4. Pasirinktas modų skaičius nėra atsitiktinis – pirmos aštuonios modos identifikavimui suteikia daugiausiai informacijos.

3.4 lentelė. Modeliavimo metu gauti rezultatai

Moda	Popierius be rašalo sluoksnio	Iš dalies rašalu dengtas popierius (14 proc.)		Popierius visiškai padengtas rašalo sluoksniu	
	f , Hz	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda
1	11,8	6,8		7,9	
2	14,1	9,6		11,2	
3	16,7	20,1		12,9	
4	25,9	22,7		18,1	

5	32,6	25,1		26,3	
6	46,3	34,2		30,5	
7	55,2	38,4		41,9	
8	59,1	41,1		44,1	

Iš gautų rezultatų galima sakyti, kad gautos modos visiškai rašalu dengto popieriaus, iš dalies rašalu dengto popieriaus bei nedengto rašalu popieriaus beveik nesiskiria viena nuo kitos. 3.4 lentelėje yra pateikti gauti savieji popieriaus lapo dažniai. 1-ą modų savieji dažniai gauti: popieriaus be rašalo – 11,8 Hz, popieriaus iš dalies dengto – 6,8 Hz, popieriaus visiškai padengto rašalo sluoksniu – 7,9 Hz. Tarp popieriaus iš dalies dengto rašalo sluoksniu bei visiškai dengto popieriaus gautų savųjų dažnių didelio skirtumo nėra, tačiau popieriaus be rašalo sluoksnio savieji dažniai nuo iš dalies dengto popieriaus savųjų dažnių skiriasi beveik 74 proc., o nuo visiškai dengto popieriaus savųjų dažnių 49 proc. Iš 3.4 lentelės galime matyti, kad popieriaus iš dalies padengto rašalo sluoksniu ir popieriaus visiškai dengto rašalo sluoksniu savieji dažniai tarpusavyje nesiskiria taip stipriai, kaip popieriaus be rašalo.

3.1.2. „Maxi offset“ popieriaus lapo savųjų dažnio nustatymas

Antras matuojamas buvo „Maxi offset“ nekreidinis be medienos masės popierius, skirtas ofsetinei spaudai, taip pat tinkantis fleksografinėi ir skaitmeninei spaudai, kuris pasižymi dideliu baltumu. Lentelėje 3.5 pateiktos šio popieriaus charakteristikos.

3.5 lentelė. Popieriaus „Maxi offset“ charakteristikos

Charakteristika	Vertė	Standartas
Gramatūra, g/m ²	100	ISO 536
Storis, μm	123	ISO 534
Savitasis tūris, cm ³ /g	1,23	ISO 534
Šiurkštumas pagal Bendstena, ml/min	250	ISO 8791-2
Baltumas, D65/10°%	103	ISO 11476
Baltumas CIE, %	150	ISO 11475
Neperšviečiamumas, %	95,5	ISO 2471

Lentelėje 3.6 pateikti tiriamo popieriaus lapo parametrai, kurie yra reikalingi programoje, norint apskaičiuoti savuosius dažnius.

3.6 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus lapo parametrai

Pavadinimas	Vertė
Medžiaga	Ortotropinė
Jungo modulis E ₁ , GPa (išilginė kryptis)	1,1
Jungo modulis E ₂ , GPa (skersinė kryptis)	0,39
Puasono koef. ν ₁₂ (išilginė kryptis)	0,40

Modeliuojant „Galerie art silk“ popieriaus lapą, gautos modos parodo, kad modos išlieka tokios pačios ar mažai pakitusios. Sumodeliavus „Maxi offset“ popieriaus lapą taip pat buvo pastebėta, jog modos atitinka prieš tai ištirto popieriaus lapo modas. Lentelėje 3.7 pateikti „Maxi offset“ modeliavimo metu gauti savieji dažniai.

3.7 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus savieji dažniai

Savieji dažniai, Hz		
Popierius be rašalo sluoksnio	Popierius iš dalies dengtas rašalo sluoksniu	Popierius visiškai dengtas rašalo sluoksniu
9,1	7,2	7,34
13,2	8,9	8,06
18,6	19,8	18,2

Savieji dažniai, Hz		
Popierius be rašalo sluoksnio	Popierius iš dalies dengtas rašalo sluoksniu	Popierius visiškai dengtas rašalo sluoksniu
34,5	26,3	23,6
42,7	35,5	35,7
52,3	39,6	39,4
58,2	41,6	42,1

Pagal gautus rezultatus matome, kad popierių padengus rašalo sluoksniu, pasikeičia jo savieji dažniai. Iš dalies padengto popieriaus lapo savieji dažniai sumažėjo daugiau, nei visiškai padengto popieriaus dažniai.

3.1.3. „4CC“ popieriaus lapo savųjų dažnio nustatymas

Paskutinis modeliuotas buvo „4CC“ popieriaus lapas. „4CC“ yra aukštos kokybės nekreidinis popierius, skirtas skaitmeninei lazerinei ir rašalinei spaudai. Popierius pasižymi dideliu baltumu, jo paviršius yra lygus ir neporėtas, todėl užtikrinama gera adhezija su rašalu. Popieriaus charakteristikos pateikiamos 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. „4CC“ popieriaus charakteristikos

Charakteristika	Vertė	Standartas
Gramatūra, g/m ²	200	ISO 536
Storis, μm	196	ISO 534
Šiurkštumas pagal Bendsteną, ml/min	45	ISO 8791-2
Baltumas CIE, %	167	ISO 11475
Neperšviečiamumas, %	98	ISO 2471

Lentelėje 3.9 pateikti tiriamo popieriaus lapo parametrai, kurie yra reikalingi programoje, norint apskaičiuoti savuosius dažnius.

3.9 lentelė. „4CC“ popieriaus parametrai

Pavadinimas	Vertė
Medžiaga	Ortotropinė
Jungo modulis E ₁ , GPa (išilginė kryptis)	2,4
Jungo modulis E ₂ , GPa (skersinė kryptis)	0,38
Puasono koef. ν ₁₂ (išilginė kryptis)	0,25

Jau prieš tai buvo minėta, kad „Maxi offset“ popieriaus modos išlieka tokios pačios arba mažai pakitusios, taip pat nutiko ir su popieriumi „4CC“. Ištyrus šio popieriaus lapo bandinius, gautos modos mažai skiriasi nuo „Galerie art silk“ popieriaus modų. Lentelėje 3.10 pateikti popieriaus „4CC“ gauti savieji dažniai.

3.10 lentelė. „4CC“ popieriaus savieji dažniai

Savieji dažniai, Hz		
Popierius be rašalo sluoksnio	Popierius iš dalies dengtas rašalo sluoksniu	Popierius visiškai dengtas rašalo sluoksniu
11,2	7,2	8,3
13,9	12,5	10,7
18,1	17,9	12,9
26,3	25,7	17,2
32,6	33,1	26,1
45,9	42,3	29,9
54,8	55,3	39,8
59,3	58,5	42,6

Išanalizavus rezultatus matyti, kad popieriaus visiškai dengto rašalo sluoksniu, popieriaus iš dalies dengto rašalo sluoksniu bei popieriaus nedengto rašalo sluoksniu gautos modos beveik nesiskiria viena nuo kitos. 3.10 lentelėje yra pateikti gauti savieji popieriaus lapo dažniai. 1-ą modų savieji dažniai gauti: popieriaus be rašalo sluoksnio – 11,2 Hz, popieriaus iš dalies dengto rašalo sluoksniu – 7,2 Hz, popieriaus visiškai padengto rašalo sluoksniu – 8,3 Hz. Tarp popieriaus iš dalies dengto rašalo sluoksniu bei popieriaus visiškai dengto rašalo sluoksniu gautų savųjų dažnių didelio skirtumo nėra, tačiau popieriaus be rašalo sluoksnio savieji dažniai nuo iš dalies dengto popieriaus savųjų dažnių skiriasi beveik 74 proc., o nuo visiškai dengto popieriaus savųjų dažnių 49 proc. Iš 3.10 lentelės galime matyti, kad popieriaus iš dalies padengto rašalo sluoksniu ir popieriaus visiškai dengto rašalo sluoksniu savieji dažniai tarpusavyje nesiskiria taip stipriai, kaip popieriaus be rašalo.

4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Spausdinimo proceso metu popieriaus lapas padengiamas rašalo sluoksniu, kuris pakeičia fizikines popieriaus savybes, kadangi rašalas įsigeria į popierių bei sukuria dar vieną sluoksnį jo paviršiuje. Kadangi sausas dažų sluoksnis yra laikomas izotropine medžiaga, kuri dengiama ant popieriaus lapo, kuris yra laikomas ortotropine medžiaga, tai gali lemti spaudinio fizikinius parametrus, todėl yra tikslinga ištirti šią įtaką. Po kiekvienos spausdinimo stadijos, popieriaus paviršiuje susidaro vis nauji sluoksniai, kurie gali iš esmės pakeisti spaudinio tamprumo rodiklius. Eksperimentinio tyrimo metu buvo siekiama ištirti, kokią įtaką turi rašalo sluoksnis popieriaus paviršiuje elastinėms popieriaus savybėms. Tyrimo metu buvo naudojami skirtingų rūšių ir gramatūros kreidiniai, nekreidiniai popieriai bei kartonai, kurie yra dažniausiai naudojami spausdinimo pramonėje.

4.1. Eksperimentinio tyrimo blokinė schema bei naudota įranga

Eksperimentiniam tyrimui reikalinga įranga: maitinimo šaltinis, pjezoelektrinis žadinimo įrenginys bei poslinkio jutiklis, valdymo blokas, kaupimo bei apdorojimo įranga. Tyrimo blokinė schema parinkta, prieš tai išanalizavus mokslines publikacijas.

Numatoma tyrimo įranga:

1. Pjezoelektrinis žadinimo įrenginys ir poslinkio jutiklis „Lion Precision U3B“



4.1 pav. „Lion Precision U3B“

2. „National instrument“ valdymo blokas, kuris skirtas pjezoelektriniam žadinimo įrenginiui ir maitinimo šaltinis ir stiprintuvas poslinkio jutikliui „Lion Precision U3B“

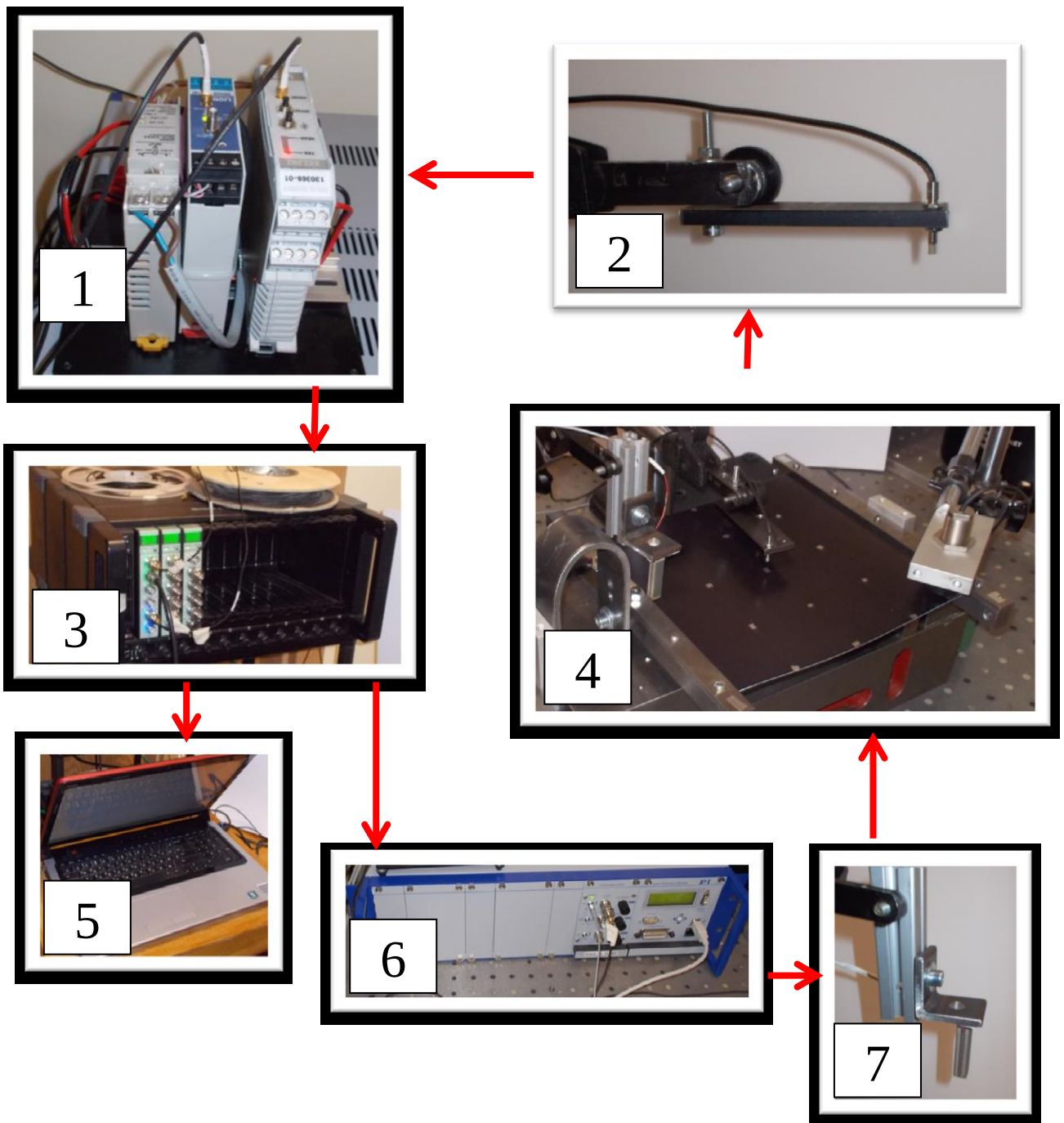


4.2 pav. Valdymo blokas

3. Kaupimo, apdorojimo įranga 3660D su generatoriumi ir PC „Deel“ su valdymo ir apdorojimo programine įranga „Pulse“



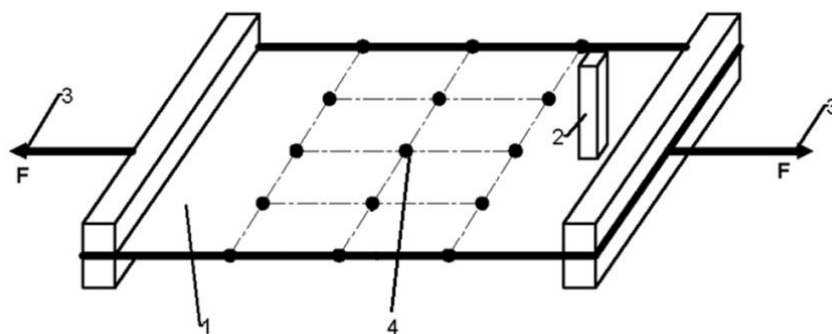
4.3 pav. Kaupimo, apdorojimo ir valdymo įranga



4.4 pav. Blokinė schema: 1 – maitinimo šaltinis ir stiprintuvas poslinkio jutikliui „Lion Precision U3B“; 2 – poslinkio jutiklis „Lion Precision U3B“; 3 – kaupimo, apdorojimo įranga 3660D su generatoriumi; 4 – tiriamasis objektas; 5 – PC „Deel“ su valdymo ir apdorojimo programine įranga „Pulse“; 6 – „National instrument“ valdymo blokas, kuris skirtas pjezoelektriniam žadinimo įrenginiui; 7 – pjezoelektrinis žadinimo įrenginys;

4.2. Bandinys ir jo tvirtinimas eksperimento metu

Bandiniai įtvirtinami specialiuose kreipiniuose, kad būtų išlaikyta bandinių plokščia forma (4.5 pav.). Kreipiniai buvo tvirtinami spaustuvuose, kad būtų sukurta įtempimo jėga F . Šis įtempimas reikalingas tam, kad būtų padidintas bandinių stangrumas, išryškėtų savųjų dažnių modos ir būtų užtikrintos eksperimento kraštinės sąlygos. Pjezoelektrinio keitiklio vieta buvo pasirinkta eksperimentuojant, norint sukelti didesnes bandinio virpesių amplitudes. Matavimai buvo atlikti bekontakčiu 15-ikos taškų metodu. Taškai simetriškai išdėstyti bandinio paviršiuje (4.6 pav).



4.5 pav. Bandinio schema su žadinimo ir įtempimo pavaizdavimu: 1 – Bandinys, 2 – pjezoelektrinis žadinimo prietaisas, 3 – įtempimo jėga, 4 – matavimo vieta



4.6 pav. Bandinys padengtas 100 proc. rašalo sluoksniu



4.7 pav. Bandinys padengtas 14 proc. rašalo sluoksniu

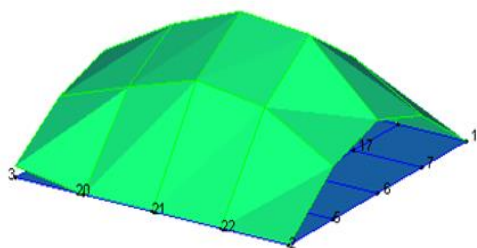
Atliekant eksperimentinį bandymą buvo pastebėta, kad popieriaus savuosius dažnius eksperimentiškai nustatyti įmanoma tik jį įtempus tam tikra jėga. Skirtingų bandinių pirmosios aštuonios modos stabilizavosi skirtingose įtempimų ribose. Pirmojo bandinio, popieriaus „Maxi offset“ 100 g/m², tyrimo metu buvo nustatyta, jog modos stabilizavosi pasiekus 100 N įtempimą. Tokiu būdu galima teigti, jog spaudiniai ant šios rūšies popieriaus turėtų būti įtempiami ne mažesne nei 100 N jėga. Kitų popieriaus lapų tempimo jėgos pateiktos lentelėje 4.1.

4.1 lentelė. Popieriaus lapų tempimo jėgos

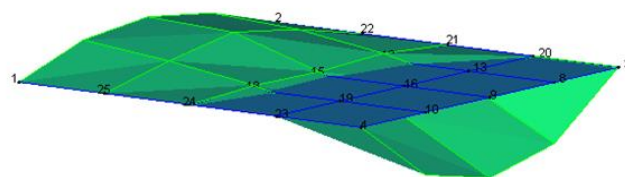
Popieriaus pavadinimas	Tempimo jėga, N
„Maxi offset“	100
„Galerie art silk“	120
„4CC“	360

4.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Modeliavimo skiltyje buvo pavaizduotos 8-ios „Galerie art silk“ modos, šiame skyriuje bus pateiktos „Maxi offset“ popieriaus eksperimento metu gautos modos.

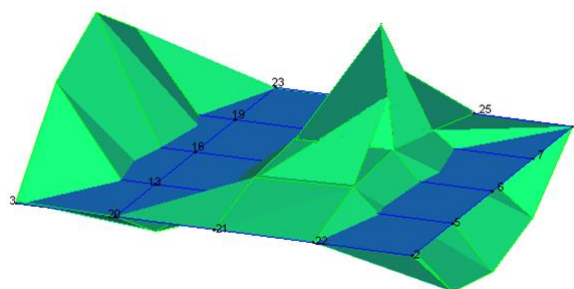
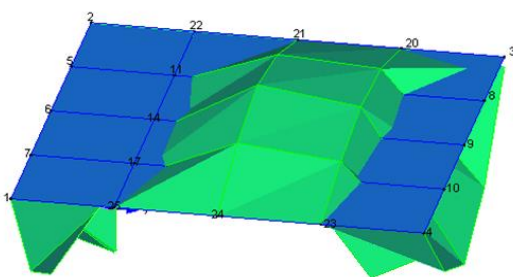


a)

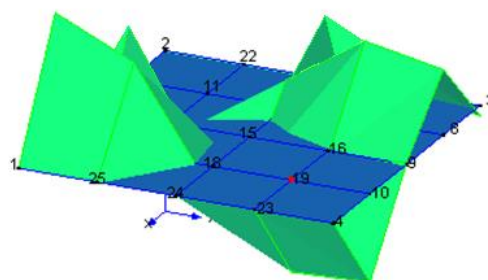
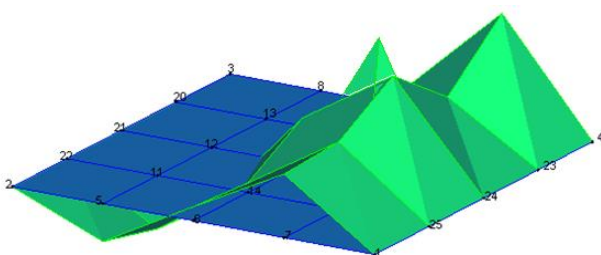


b)

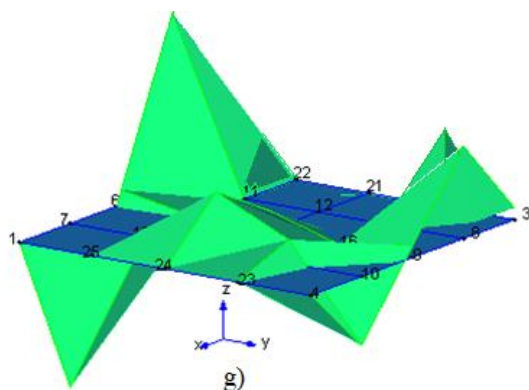
4.8 pav. Eksperimento metu gautos modos: a) – 1 moda; b) – 2 moda



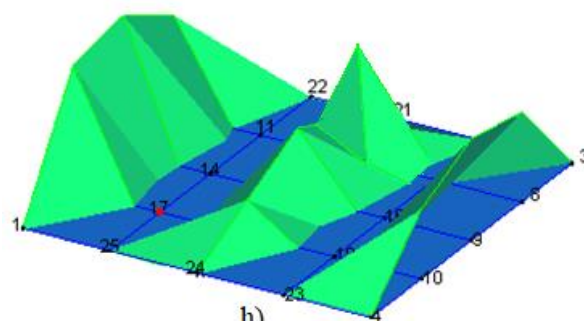
4.9 pav. Eksperimento metu gautos modos: c) – 3 moda; d) – 4 moda



4.10 pav. Eksperimento metu gautos modos: e) – 5 moda; f) – 6 moda



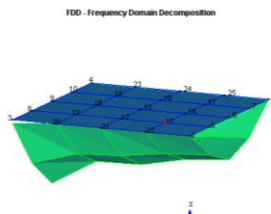
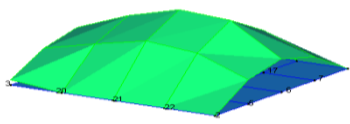
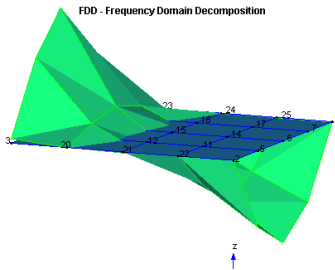
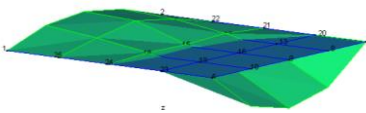
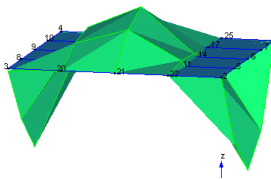
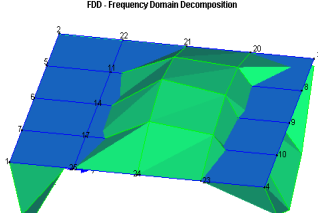
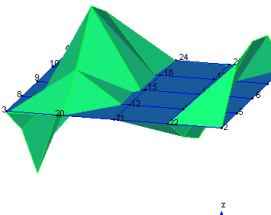
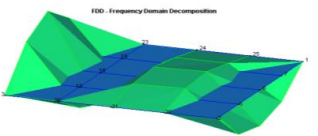
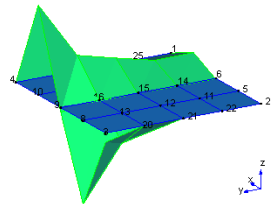
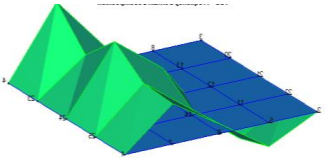
g)

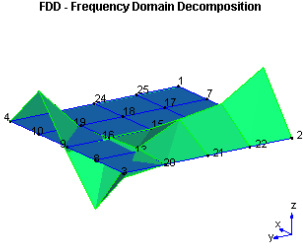
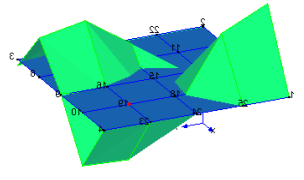
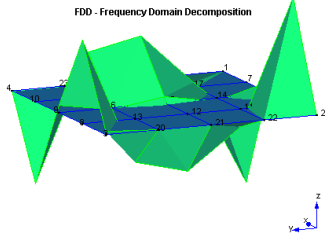
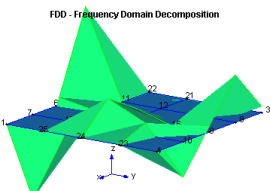
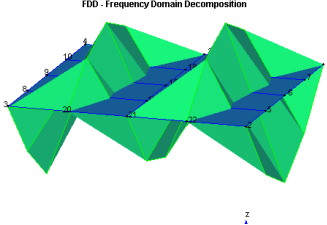
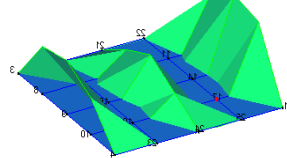


h)

4.11 pav. Eksperimento metu gautos modos: g) – 7 moda; h) – 8 moda

4.2 lentelė. Eksperimento metu gauti rezultatai

Moda	Popierius be rašalo sluoksnio	Popierius visiškai padengtas rašalo sluoksniu (100 proc.)		Iš dalies rašalu dengtas popierius (14 proc.)	
	f , Hz	f , Hz	Eksperimento metu gauta moda	f , Hz	Eksperimento metu gauta moda
1	12	7		8	
2	14	10		11	
3	18	20		13	
4	26	22		18	
5	34	25		26	

Moda	Popierius be rašalo sluoksnio				
	f , Hz	f , Hz	Eksperimento metu gauta moda	f , Hz	Eksperimento metu gauta moda
6	45	36		31	
7	55	39		42	
8	59	42		44	

Eksperimento rezultatai parodo, kad popieriaus be rašalo sluoksnio ir popieriaus su rašalo sluoksniu yra panašios arba vienodos. Nustatyti popieriaus savieji dažniai tarpusavyje skiriasi, popieriaus su rašalo sluoksniu savieji dažniai sumažėjo.

Gauti matavimo duomenys yra pateikti lentelėje 4.2, lentelėje 4.3 bei lentelėje 4.4.

4.3 lentelė. „Maxi ofset“ popieriaus lapo tyrimo rezultatai

Elastingumo parametrai	Be rašalo sluoksnio	Iš dalies padengtas rašalu	Visiškai padengtas rašalu
E_1 , GPa	1,22	5,87	1,43
E_2 , GPa	0,334	48,7	1,48
ν_{12}	0,307	0,0632	0,066

4.4 lentelė. „Galerie art silk“ popieriaus lapo tyrimo rezultatai

Elastingumo parametrai	Be rašalo sluoksnio	Iš dalies padengtas rašalu	Visiškai padengtas rašalu
E_1, GPa	1,36	3,42	1,82
E_2, GPa	0,570	6,78	0,96
ν_{12}	0,168	0,074	0,082

4.5 lentelė. „4CC“ popieriaus lapo tyrimo rezultatai

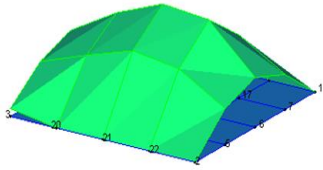
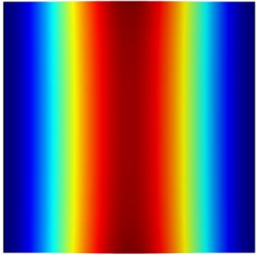
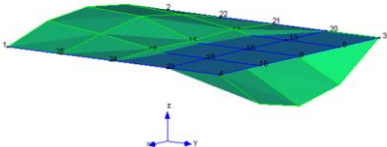
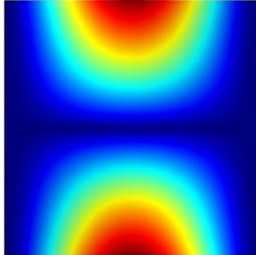
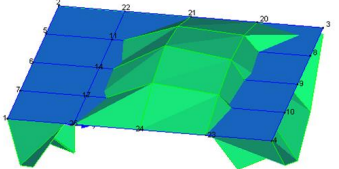
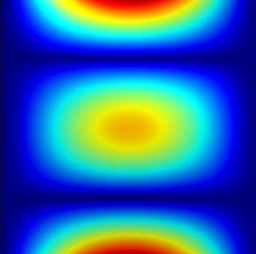
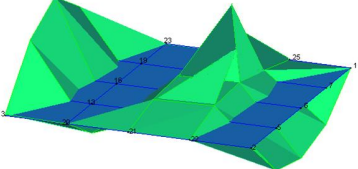
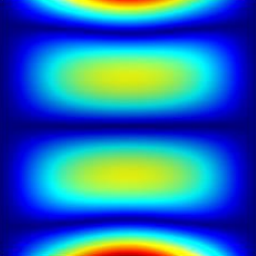
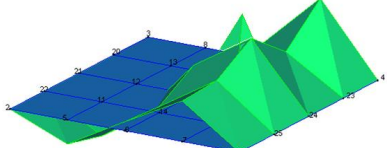
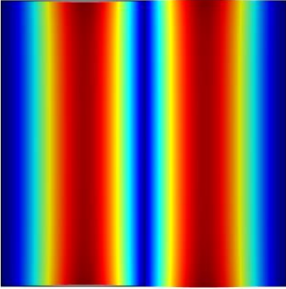
Elastingumo parametrai	Be rašalo sluoksnio	Iš dalies padengtas rašalu	Visiškai padengtas rašalu
E_1, GPa	2,35	4,69	3,02
E_2, GPa	0,360	7,23	0,54
ν_{12}	0,037	0,021	0,016

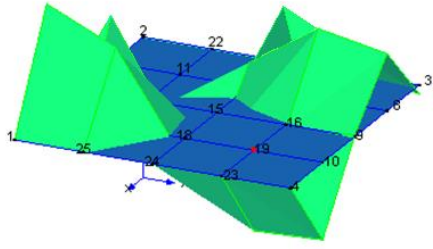
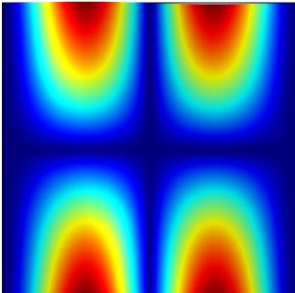
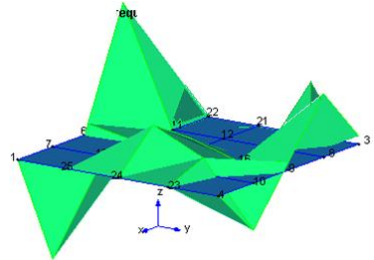
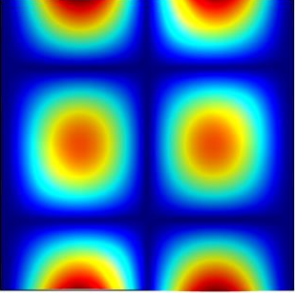
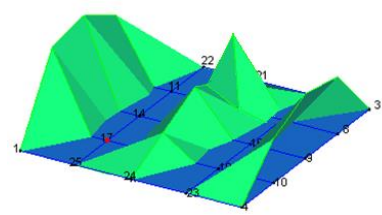
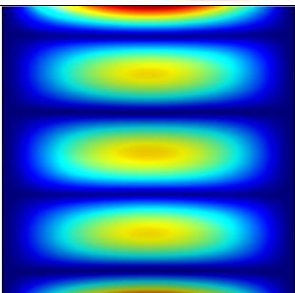
Iš eksperimento rezultatų matyti, kad iš dalies rašalo sluoksniu padengto popieriaus Jungo modulis beveik padvigubėjo išilgine kryptimi (E_1), o visiškai padengto popieriaus rašalo sluoksniu Jungo modulis nepadvigubėjo, tačiau taip pat padidėjo. Popieriaus „Maxi offset“ Jungo modulis išilgine kryptimi padidėjo netgi 8-is kartus. Jungo modulis skersine (E_2) kryptimi taip pat labai stipriai padidėjo iš dalies padengto popieriaus lapo, o visiškai dengto popieriaus lapo padidėjo, tačiau ne taip stipriai. Puasono koeficientas išilgine kryptimi (ν_{12}) visais atvejais sumažėjo. Galime teigti, kad popierių padengus rašalo sluoksniu pasikeičia jo elastingumo savybės lyginant su popieriumi, kuris nėra dengtas rašalo sluoksniu.

5. EKSPERIMENTO IR TEORINIO TYRIMO APIBENDRINIMAS

Popieriaus „Maxi offset“ 100 g/m² lapo eksperimento rezultatai ir jų palyginimas su matematinio modelio savaisiais dažniais pateikiami lentelėje 5.1. Tyrimo metu buvo ištirta daugiau nei vienas popieriaus lapas, tačiau apibendrinti bus vienos rūšies popieriaus lapo teorinio bei eksperimentinio tyrimo rezultatai.

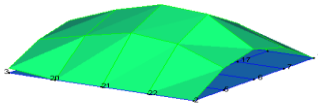
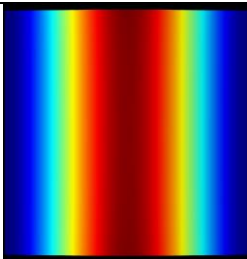
5.1 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus savieji dažniai

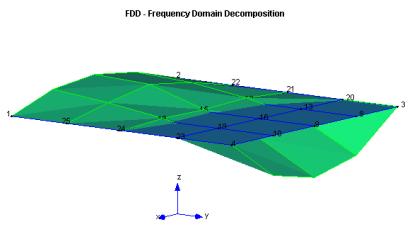
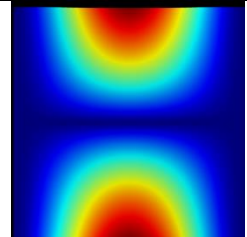
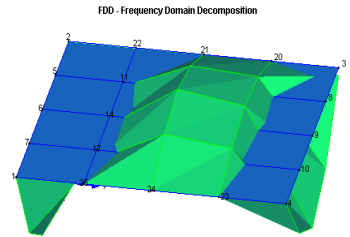
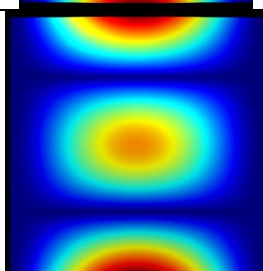
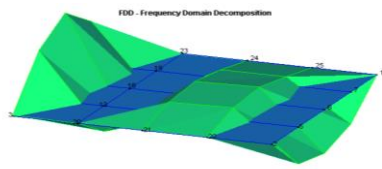
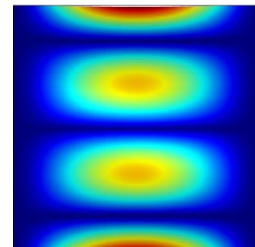
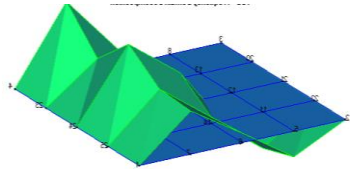
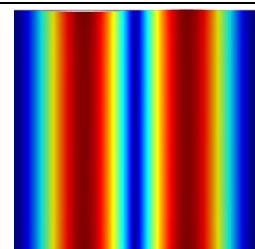
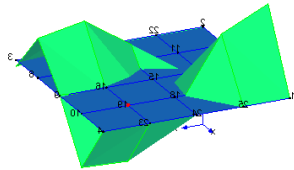
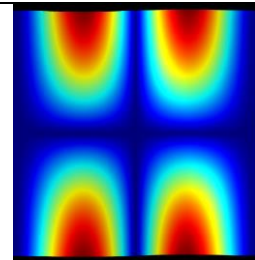
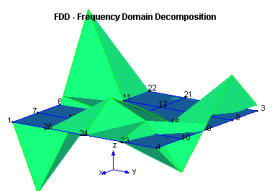
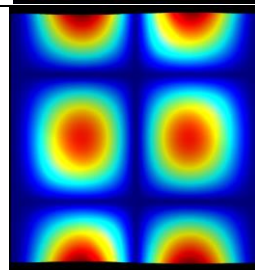
Moda	„Maxi offset“ popieriaus lapas be rašalo sluoksnio				
	f , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
1	12		9,1		+31,9
2	14		13,2		+6,1
3	18		18,6		-3,23
4	26		27,2		-4,41
5	34		34,5		-1,45

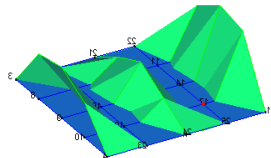
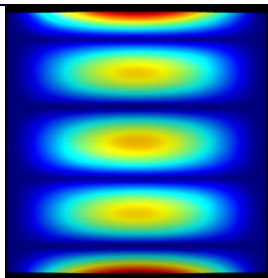
Moda	„Maxi offset“ popieriaus lapas be rašalo sluoksnio				
	f , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
6	45		42,7		+5,39
7	55		52,3		+5,16
8	59		58,2		+1,37

„Maxi offset“ popieriaus savieji dažniai nustatyti eksperimentinio tyrimo metu ir modeliuojant šiek tiek skiriasi. Pirmos modos savasis dažnis modeliavimo metu gautas mažesnis 31,9 proc., antros modos savasis dažnis sumažėjo 6,1 proc., trečios modos – padidėjo 3,23 proc., ketvirtos – padidėjo 4,41 proc., penktos modos – padidėjo 1,45 proc., šeštos modos – sumažėjo 5,39 proc., septintos modos – sumažėjo 5,16 proc. ir aštuntos modos – sumažėjo 1,37 proc.

5.2 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus su rašalo sluoksniu savieji dažniai

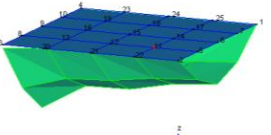
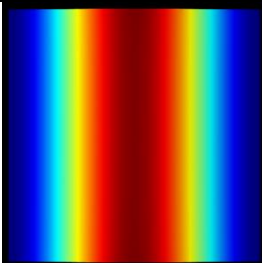
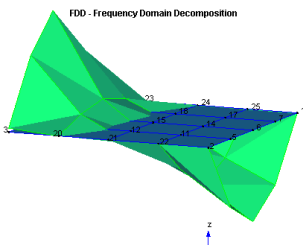
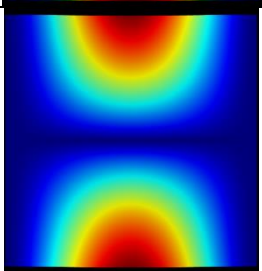
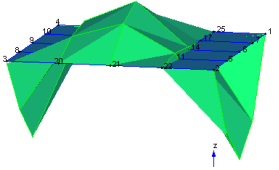
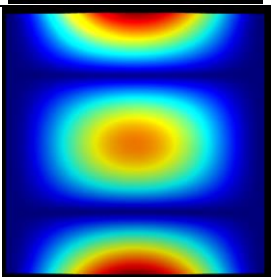
Moda	„Maxi offset“ popieriaus lapas iš dalies padengtas rašalu (14 proc.)				
	f , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
1	7		7,2		-2,78

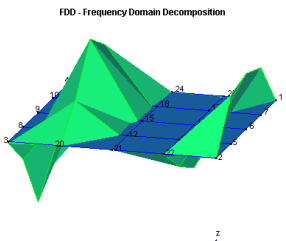
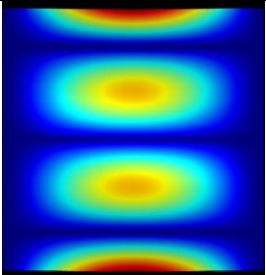
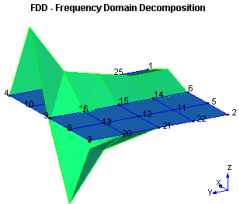
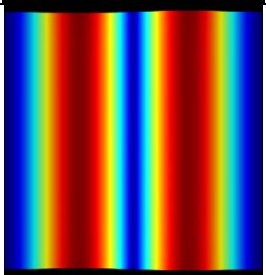
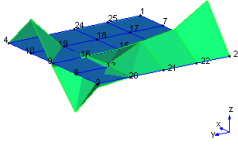
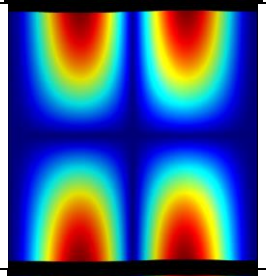
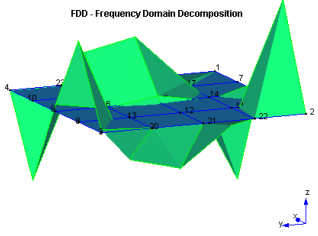
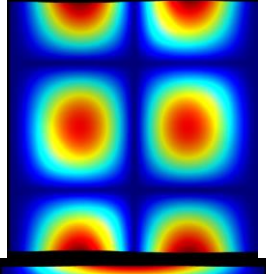
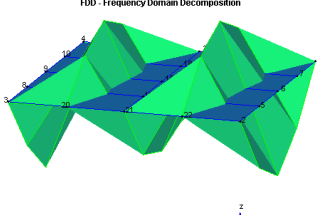
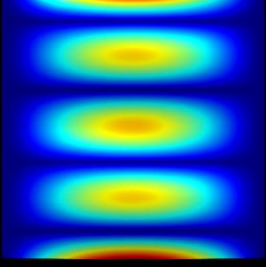
Moda	„Maxi offset“ popieriaus lapas iš dalies padengtas rašalu (14 proc.)				
	f , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
2	10		8,9		+12,36
3	20		19,8		+1,01
4	22		22,2		-0,9
5	25		26,3		-4,94
6	36		35,5		+1,41
7	39		39,6		-1,52

Moda	„Maxi offset“ popieriaus lapas iš dalies padengtas rašalu (14 proc.)				
	f , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
8	42		41,6		+0,96

„Maxi offset“ popieriaus iš dalies padengto rašalo sluoksniu savieji dažniai nustatyti eksperimentinio tyrimo ir modeliavimo metu nėra vienodi, tačiau skiriasi nedaug. Pirmos modos savasis dažnis modeliavimo metu gautas didesnis 2,78 proc., antros modos savasis dažnis sumažėjo 12,36 proc., trečios modos – sumažėjo 1,01 proc., ketvirtos – padidėjo 0,9 proc., penktos modos – padidėjo 4,94 proc., šeštos modos – sumažėjo 1,41 proc., septintos modos – padidėjo 1,52 proc. ir aštuntos modos – sumažėjo 0,96 proc.

5.3 lentelė. „Maxi offset“ popieriaus dengto rašalo sluoksniu savieji dažniai

Moda	„Maxi offset“ popieriaus dengto rašalo sluoksniu savieji dažniai				
	f , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
1	8		7,34		+8,99
2	11		8,06		+36,5
3	13		18,2		-28,6

Moda	„Maxi offset“ popieriaus dengto rašalo sluoksniu saviėji dažniai				
	f , Hz	Ekspėrimėto metu nustatyta moda	f , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
4	18		23,1		-22,1
5	26		23,6		+10,2
6	31		35,7		-13,2
7	42		39,4		+6,6
8	44		42,1		+4,51

„Maxi offset“ popieriaus visiškai padengto rašalo sluoksniu modeliavimo metu gautos pirmos modos savasis dažnis yra mažesnis 8,99 proc. už eksperimento metu nustatytą dažnį, antros modos didesnis 36,5 proc., trečios modos didesnis 28,6 proc., ketvirtos didesnis 22,1 proc., penktos modos mažesnis 10,2 proc., šeštos modos didesnis 13,2 proc., septintos modos mažesnis 6,6 proc. ir aštuntos modos mažesnis 4,51 proc.

Galime matyti, jog teorinio ir eksperimentinio tyrimų rezultatai pakankamai sutampa.

IŠVADOS

Baigiamajame darbe buvo aprašytas popierius, kokios yra jo savybės. Taip pat buvo išanalizuoti trys moksliniai straipsniai, kuriuose buvo aprašomi jau atlikti tyrimai su įvairiomis iškilusiomis problemomis spaudos pramonėje.

Naudojant „Comsol Multiphysics“ paketą buvo sumodeliuoti trijų skirtingų charakteristikų popieriaus lapai, kiekvienos rūšies buvo po 3-is bandinius: popierius be rašalo sluoksnio, popierius iš dalies padengtas rašalo sluoksniu bei popierius visiškai padengtas rašalo sluoksniu. Modeliavimo tikslas buvo gauti tiriamų popieriaus lapų savuosius dažnius bei pirmas aštuonias modas. Iš gautų rezultatų buvo nustatyta, kad popieriaus, kuris yra iš dalies dengtas rašalo sluoksniu, savieji dažniai sumažėja beveik 74 proc., o popieriaus visiškai dengto rašalo sluoksniu savieji dažniai sumažėjo 49 proc. Modeliavimo metu tiriamo popieriaus padengto rašalo sluoksniu gautos modos nesiskyrė arba nežymiai skyrėsi nuo popieriaus be rašalo sluoksnio.

Atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio tikslas buvo ištirti, kaip pasikeičia Jungo modulis skersine ir išilgine kryptimi bei Puasono koeficientas išilgine kryptimi, popieriaus iš dalies padengto rašalo sluoksniu ir popieriaus visiškai padengto rašalo sluoksniu. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad didžiausias pokytis visais atvejais yra Jungo modulio padidėjimas išilgine kryptimi. Taip pat eksperimento metu buvo nustatyta, kad popieriaus savuosius dažnius eksperimentiškai nustatyti įmanoma tik jį įtempus tam tikra jėga. „Maxi offset“ popierius turi būti įtemptas 100 N jėga, „Galerie art silk“ – 120 N jėga, o „4CC“ popierius – 360 N jėga.

Sumodeliavus bei atlikus eksperimentinį popieriaus savybių tyrimą ir juos palyginus tarpusavyje matome, kad popierių padengus dažais jo savybės keičiasi. Apžvelgus matematinio modelio ir eksperimentinio tyrimo gautus savuosius dažnius galime sakyti, kad jos skiriasi nedaug. Tad matematinį modelį derinant su eksperimentiniais tyrimais, suteikia galimybę nustatyti popieriaus ir spaudinių tamprumo modulius bei savuosius dažnius.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Anderson, J. *Comsol Multiphysics*. Prieiga per internetą: <https://www.sp.se/en/index/services/calculations/comsolmultiphysics/Sidor/default.aspx>
2. Alfano, M. and Pagnotta, L. (2007). A non-destructive technique for the elastic characterization of thin isotropic plates. *NDT & E International*, 40(2), 112-120. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096386950600106X>
3. Berezinas, B. (1990). *Poligrafijos medžiagotyra*. (p. 29–123). Vilnius: Mokslas.
4. Bruno, L., Felice, G., Pagnotta, L., Poggialini, A. and Stigliano, G. (2008). Elastic characterization of orthotropic plates of any shape via static testing. *International Journal of Solids and Structures*, 45(3-4), 908–920. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768307003721>
5. Darren, Q. (2011). World's 'lightest material' unveiled by US engineers. Prieida per internetą: <https://newatlas.com/ultralight-micro-lattice-material/20537/>
6. Fadiji, T., Berry, T., Coetzee, C. and Opara, U. L. (2014). Investigating the Mechanical Properties of Paperboard Packaging Material for Handling Fresh Produce Under Different Environmental Conditions: Experimental Analysis and Finite Element Modelling. *The Journal of Applied Packaging Research*, 9(2), 20–34. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/316062678> Investigating the mechanical properties of paperboard packaging material for handling fresh produce under different environmental conditions Experimental analysis and finite element modelling
7. Greco, D., Blanc, P., Aubry, E. and Vaclavik, I. (2007). Active vibration control of flexible materials found within printing machines. *Journal of Sound and Vibration*, 300 (3-5), 831–846. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/223019312> Active vibration control of flexible materials found within printing machines
8. Grigaliūnienė, S., Turla, V., Ragauskas, P., Kilikevičius, A., Sidaravičius, J. ir Jurkonis, E. (2014). Identification of prints elastic parameters. *Mechanika*, 20(5), 476–479. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/268193767> Identification of prints elastic parameters
9. Grigaliūnienė, S. (2015). *Spaudinių ant popieriaus kaip kompozicinių medžiagų savybių tyrimas*. Prieiga per internetą: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:14370063/>
10. Harne, R. L. (2013). On the linear elastic, isotropic modeling of poroelastic distributed vibration absorbers at low frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 332(15), 3646–3654. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X13000941>

11. Isaksson, P., Gradin, P. A. and Kulachenko, A. (2006). The onset and progression of damage in isotropic paper sheets. *International Journal of Solids and Structures*, 43(3-4), 713–726. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768305002192>
12. Kim, J., Jung, W., Jo, C.H., Shelton, J. and Craft, W. (2015). Mechanical properties of cellulose-based electro-active paper. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 222(4), 577–583. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/245387997_Mechanical_properties_of_cellulose-based_electro-active_paper
13. Kulachenko, A., Gradin, P. and Koivurova, H. (2007). Modelling the dynamical behaviour of a paper web. Part I. *Journal Computers and Structures*, 85(3-4), 131–147. Prieiga per internetą: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1224307>
14. Kulachenko, A., Gradin, P. and Koivurova, H. (2007). Modelling the dynamical behaviour of a paper web. Part II. *Journal Computers and Structures*, 85(3-4), 148–157. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794906003300>
15. Malešič, J., Kolar, J. and Strlič, M. (2002) Effect of pH and carbonyls on the degradation of alkaline paper: factors affecting ageing of alkaline paper. *Restaurator*, 23(3), 145–153. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/274304935_Effect_of_pH_and_Carbonyls_on_the_Degradation_of_Alkaline_Paper_Factors_Affecting_Ageing_of_Alkaline_Paper
16. Markulytė, S., Sidaravičius, J. ir Turla, V. (2012). Popierius ir atspaudai – kompozicinės medžiagos. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4(6), 528–532. Prieiga per internetą: <https://journals.vgtu.lt/index.php/MLA/article/view/4611/3939>
17. Misseroni, D., Bigoni, D. ir Corso, F.; (2014). A model for teaching elastic frames. *European Journal of Physics*, 33(5), 1179–1186. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/241779461_A_teaching_model_for_truss_structures
18. Nevell, T. P. ir Zeronian, S. H. (1985). *Cellulose Chemistry and its Applications*. Ellis Horwood, Chichester.
19. Ofsetinė spauda. Prieiga per internetą: <http://www.spaudosdepartamentas.lt/paslaugos-ir-gaminiai/paslaugos/spaudos-paslaugos/ofsetine-spauda/>
20. Ohtsuki, A. (2011). An Innovative Method for Measuring Young's Modulus of Multi-Layered Materials Using Postbuckling Behavior. *Procedia Engineering*, 10, 1041–1046. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811003602>
21. Pagnotta, L. and Stigliano, G. (2009). *Identifying Elastic Properties of Isotropic Materials by Finite Element Analyses and Vibration Data*. *Key Engineering Materials*, 1327–1330. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/240831002_Identifying

22. Popieriaus „Galerie art silk“ charakteristikos. Prieiga per internetą: https://www.antalis.lt/mediashare/g4media/pdf/TS_EN_GALERIE_ART_SILK_00_ISS_02082012.pdf
23. Popieriaus „Maxi offset“ charakteristikos. Prieiga per internetą: https://www.antalis.co.uk/mediashare/g4media/pdf/TS_EN_MAXI_NEW_TECH_00_10032017.pdf
24. Popieriaus „4CC“ charakteristikos. Prieiga per internetą: <https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-specifications/Paper/4CC.ashx>
25. Properties of paper 2012. Prieiga per internetą: <https://paperonweb.com/paperpro.htm>
26. Ragauskas, P. ir Belevičius, R. (2009). Identification of material properties of composite materials. *Aviation*, 13(4), 109–115. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/232930353_Identification_of_material_properties_of_composite_materials
27. Ragauskas, P. (2010). *Identification of elastic properties of layered composite materials*. Prieiga per internetą: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:2028187/>
28. Retulainen, E., Niskanen K. and Nilsen N. (1998). Fiber and bonds. *Papermaking Science and Technology*, 54-87.
29. Sidaravičius, D. J. (2012). *Spausdinimo medžiagos: laboratorinių darbų metodikos nurodymai*. (p. 59). Vilnius: Technika.
30. Sivakova, B. (2010). *Popieriaus su rašalu irimo proceso tyrimas ir naujų konservavimo metodų įvertinimas*. Prieiga per internetą: <https://epublications.vu.lt/object/elaba:1849075/index.html>
31. The Science of a Paper Cut. Prieiga per internetą: <https://sites.psu.edu/siowfa16/2016/09/14/the-science-of-a-paper-cut/>
32. Watanabe, Y., Suzuki, S., Sugihara, M. and Sueoka, Y. (2002). An experimental study of paper flutter. *Journal of Fluids and Structures*, 16(4), 529–542. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974601904359>

PRIEDAI

POPIERIAUS ELASTINIŲ IR DINAMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Lina Pušinskė, Artūras Kilikevičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Santrauka. Straipsnyje pateikti popieriaus elastinių bei dinaminių savybių teorinė bei eksperimentinė analizė. Eksperimento metu buvo nagrinėjamos skirtingos struktūros popieriaus be rašalo padengimo bei popieriaus padengto dažų sluoksniu kaip kompozicinių medžiagų dinaminės bei elastinės savybės.

Reikšminiai žodžiai: popierius, savičji dažniai, kompozicinė medžiaga, ortotropinė medžiaga.

Įvadas

Šiomis dienomis itin sparčiai didėjanti spausdintų gaminių paklausa, plečia bei tobulina spaudos pramonę. Tačiau periodinių leidinių spausdinimo apimtys sparčiai mažėja, bet į jų vietą atsiranda naujų produktų ir rinkų. Taikydami naujausias skaitmeninės spaudos technologijas, atsiradusios naujos veiklos sritys bei pripažinimas užsienyje bei atsiradusios platesnės eksporto galimybės sukelia konkurenciją tarp Lietuvos spaustuvių. Kiekvienais metais spaustuvių eksportas Lietuvoje sparčiai auga, taip pat ir Lietuvoje spausdintinės produkcijos paklausa gerokai padidėjusi. Su kiekviena diena laikraščiams, žurnalams lieka vis mažiau vietos, didžiąją dalį spaustuose spausdinamos produkcijos sudaro įvairiausios pakuotės, kita likusi dalis lieka periodiškai spausdinamoms knygoms. Kai pagaminta produkcija yra vertinama, dažniausiai atsižvelgiama tik į spaudos proceso metu naudojamų medžiagų charakteristikas ir nėra įvertinama kaip gali pasikeisti gaminio atsparumo bei kitos savybės, padengus jį dažais tam tikru būdu. Netinkamai pasirinktas popierius bei spaudos būdas, gali stipriai padidinti broko kiekį, net apsunkinti visą spausdinimą.

Dauguma tyrimų yra atlikti siekiant išsiaiškinti popieriaus įvairias savybes, tačiau nėra tiriama spaudinių savybės. Spausdinant gaminius yra nustatomi režimai, remiantis popieriaus savybėmis, bet nėra įvertinama, jog popieriaus savybės gali pasikeisti, kai jis yra padengtas dažų sluoksniu. Dėl to, gali suprastėti galutinio gaminio kokybė (Grigaliūnienė, 2015).

Tyrimas buvo atliktas įtvirtinus du priešingus popieriaus lapo kraštus. Bandiniai buvo naudojami vienodų išmatavimų 0,20x0,20 (m). Naudojamo popieriaus lapo storis yra 100 μm, tačiau padengus dažų sluoksniu, popieriaus lapo storis padidėja 8 μm.

Dažniausiai mechanikoje sprendami uždaviniai, pirmiausia atliekame teorinį objekto sprendimą. Sudaromas jo matematinis modelis, kurį naudodami įvairius matematinius sprendimo metodus ar programinius paketus, nustatomos reikalingos charakteristikos. Po to objekto modelis tiriamas eksperimentiniu būdu, gavus praktinius rezultatus, tuomet yra lyginami su atitinkamais teoriniais ir sprendžiama apie sukurto teorijos teisingumą. Šiuo atveju, kai tiriamasis objektas yra spaudinys, susidedantis iš kelių sluoksnių (popierius, dažai), kuris kiekvienas turi skirtingus tamprumo rodiklius, sudaryti jo matematinį modelį bendrą tamprumo rodiklį nustatyti yra sudėtinga užduotis. Todėl pasitelkiama atvirkščia metodika – pirmiausia su natūraliu tiriamu objektu nustatyti savuosius dažnius ir modas natūrinio eksperimento būdu, vėliau, sudarius matematinį modelį, nustatyti tuos pačius dydžius matematiškai. Papildomai spaudiniai buvo lakuoti, ir tokiu būdu susidarė trisluoksnė kompozicinė medžiaga.

Naudojant programą COMSOL buvo sumodeliuotas tiriamas popieriaus lapas ir atlikta modalinė analizė. Šio modeliavimo tikslas yra nustatyti popieriaus be dažų sluoksnio bei popieriaus padengto dažų sluoksniu savuosius dažnius. Kadangi popierius yra modeliuojama kaip ortotropinė medžiaga, tai gali būti apibūdinama šiais parametrais (Sivakova, 2010)

$$E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23},$$

$$G_{12} = G_{13}, G_{23} = \frac{E_2}{2(1-\nu_{23})}. \quad (1)$$

Skirtumai tarp matematinio modelio rezultatų ir gautų duomenų po savųjų dažnių nustatymo, tai yra optimizavimo uždavinys, kuriuo nustatome tamprumo rodiklius. Problemos formulavimas pateikiamas taip:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^{BEM} - f_i^{NE}}{f_i^{NE}} \right)^2 \quad (2)$$

čia F yra ieškoma kintamųjų tikslo funkcija, o $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]$. Kintamasis m yra projektavimo kintamųjų vertė x_i . Tikriniai dažniai iš eksperimento pateikiami kaip NE – natūralus eksperimentas, duomenys iš matematinio modelio pateikiami kaip BEM – baigtiniu elementu metodas. Savųjų dažnių eilės numeriai funkcijoje žymimi n (Grigaliūnienė et al., 2014).

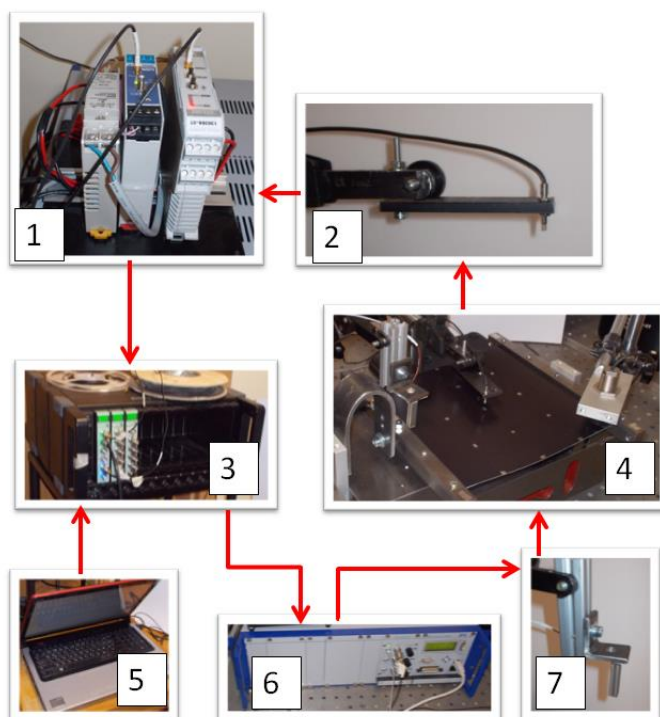
Eksperimentas

Bandymui atlikti buvo pasirinktas popierius „Maxi offset“ 100 g/m², kurio charakteristikos pateiktos 1-oje lentelėje. Tai yra nekreidinis, be medžio pluošto popierius, kuris skirtas ofsetinei spaudai, tačiau tinkamas ir fleksografinėi, ir skaitmeninei spaudai (Grigaliūnienė, 2015).

1 lentelė. Popieriaus „Maxi offset“ charakteristikos.

Charakteristika	Matavimo vienetai	Vertė	Standartas
Gramatūra	g/m ²	100	ISO 536
Storis	μm	123	ISO 534
Savitasis tūris	cm ³ /g	1,23	ISO 534
Šiurkštumas pagal Bendsteną	ml/min	250	ISO 8791-2
Baltumas	D65/10°%	103	ISO 11476
Baltumas CIE	%	150	ISO 11475
Neperšviečiamumas	%	95,5	ISO 2471

Eksperimentui atlikti buvo naudota prietaisais, pateiktus 1 pav.: 1 – maitinimo šaltinis ir stiprintuvas poslinkio jutikliui „Lion Precision U3B“; 2 – poslinkio jutiklis „Lion Precision U3B“; 3 – kaupimo, apdorojimo įranga 3660D su generatoriumi; 4 – tiriamasis objektas; 5 – PC „Dell“ su valdymo ir apdorojimo programine įranga „Pulse“; 6 – „National Instrument“ valdymo blokas, skirtas pjezoelektriniam žadinimo įrenginiui; 7 – pjezoelektrinis žadinimo įrenginys.



1 pav. Eksperimento stendo blokinė schema

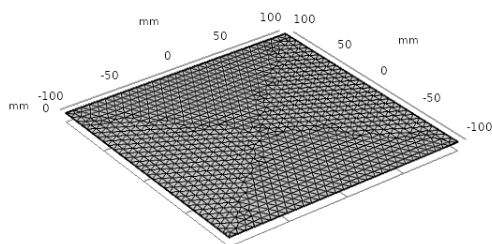
Bandymuose naudoti 3 skirtingi bandiniai, visi jie pagal popieriaus lapo storį ir savybes vienodi, skyrėsi jų padengimais. 1-as bandinys buvo niekuo nedengtas popieriaus lapas (švarus); 2-as bandinys – popieriaus lapas, kurio 100% paviršiaus padengtas laku; 3-as – popieriaus lapas, kurio 25% paviršiaus padengtas juodos spalvos dažais.

Šio tyrimo metu buvo atlikti bandymai, kurie parodė minimalias pradines mėginio įtempimo vertes vibracijos bandymuose. Identifikuotos tamprumo vertės pateiktos 2 lentelėje. Mėginių bandymai parodė, kad norint gauti patikimus modalinės analizės rezultatus, t.y. stabiliai įrašyti pirmuosius aštuonis režimus, mėginys turi būti tam tikru įtempimu, kuris skiriasi dėl spausdinimo popieriaus rašalo kiekio. Visi mėginiai yra kvadrato formos, vienas nedengtas rašalu, kitas dalinai padengtas rašalo sluoksniu, o dar kitas visiškai padengti rašalu.

2 lentelė. Geometriniai ir elastiniai popieriaus parametrai

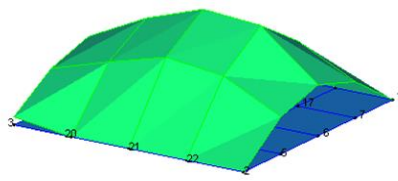
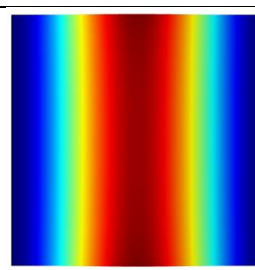
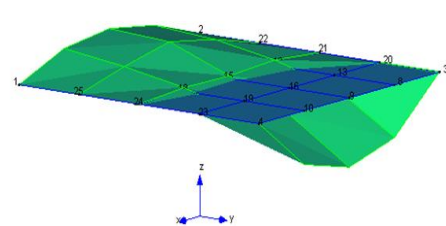
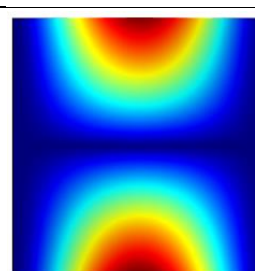
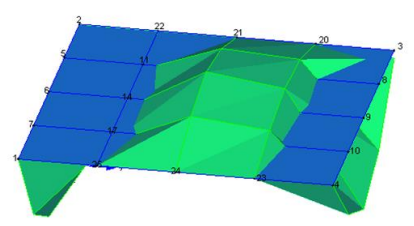
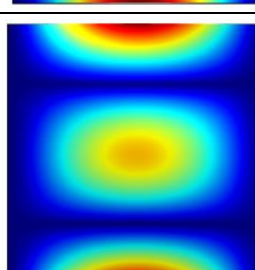
Parametrai	Popierius be rašalo	Popierius dalinai padengtas rašalo sluoksniu	Popierius pilnai padengtas rašalo sluoksniu
Ilgis (a), mm	200	200	200
Plotis (b), mm	200	200	200
Storis, μm	123	131	131
E_1 , GPa	1,22	5,87	1,43
E_2 , GPa	0,334	48,7	1,48
ν_{12}	0,307	0,0632	0,066
Tankis, kg/m^3	800	800	800

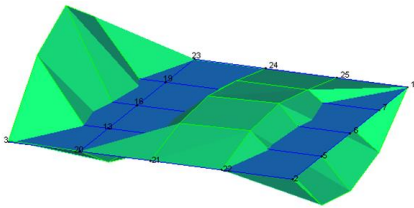
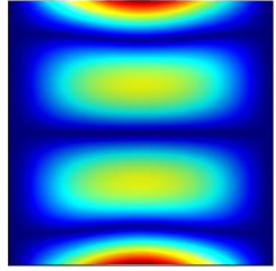
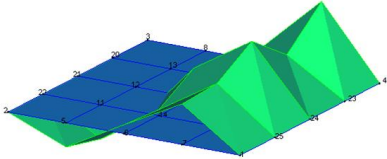
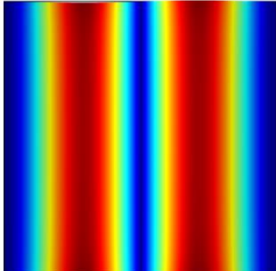
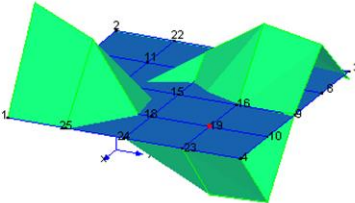
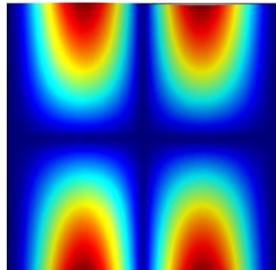
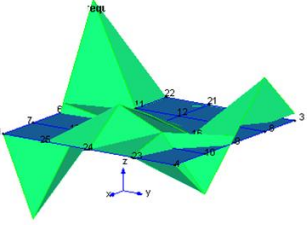
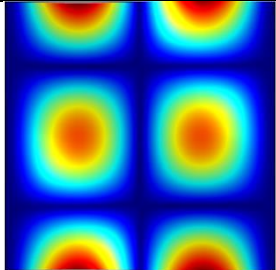
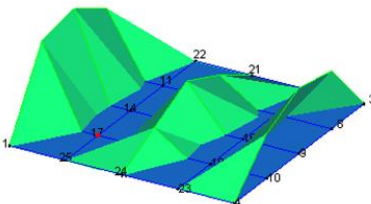
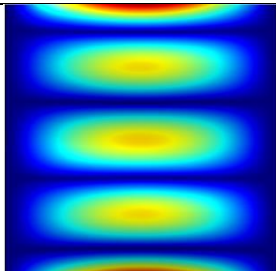
Vėliau naudojantis programa COMSOL nubraižytas popieriaus lapo geometrija, sugeneruotas tinklėlis (žr. 2 pav.) ir buvo gauti savieji dažniai ir jų modos (3 lentelė).



2 pav. Sugeneruotas tinklėlis

3lentelė. Popierius be dažų sluoksnio dažniai bei modos

Moda	f^{NE} , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f^{BEM} , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
1	12		9.07		-2.93
2	14		13.18		-0.82
3	18		18.65		0.56

Moda	f^{NE} , Hz	Eksperimento metu nustatyta moda	f^{BEM} , Hz	Modeliavimo metu gauta moda	Δ , %
4	26		27.22		1,22
5	34		34.54		0.54
6	45		42.71		-2.29
7	55		52.35		-2.65
8	59		58.16		-0.84

Šie rezultatai rodo, kad įmanoma nustatyti popieriaus ir spaudinių tamprumo modulius naudojant siūlomą BE metodą bei jį derinant su eksperimentiniais metodais, suteikia galimybę nustatyti popieriaus ir spaudinių tamprumo modulius.

Išvados

Šiame darbe buvo tiriamas popierius be dažų sluoksnio, iš dalies padengtas rašalu popierius bei visiškai dengtas popierius rašalu. Eksperimento ir modeliavimo rezultatai parodė, kad popierių padengus dažų sluoksniu keičia elastingumo savybes lyginant su popieriumi, kuris nedengtas rašalo sluoksniu. Pagrindinis skirtumas pastebimas išilginio Jungo modulio skirtume.

Literatūra

1. **Grigaliuniene S.** (2015) *Spaudinių ant popieriaus kaip kompozicinių medžiagų savybių tyrimas*. Vilnius Gediminas Technical University, Lietuva.
2. **Grigaliuniene S.; Turla V.; Ragauskas P.; Kilikevičius A.; Sidaravičius J.; Jurkonis E.** (2014) *Identification of prints elastic parameters*. Vilnius Gediminas Technical University, Lietuva.
3. **Ragauskas P.** (2010) Identification of elastic properties of layered composite materials, Doctoral dissertation, Vilnius, Technika.
4. **Sivakova B.** (2010) *Popieriaus su rašalu irimo proceso tyrimas ir naujų konservavimo metodų įvertinimas*. Vilniaus universitetas, Lietuva.

Summary

Elasticity of prints are different compared to the pure paper due to the coated paint layer. The methodology used to determine these indicators is based on experimental own frequency determination tests and calculations. By using special equipment in an experimental way it was determined which frequencies corresponds to samples first eight own vibration modes and frequencies. By using approaching method it was determined at what elasticity indicators readings you receive the same frequencies and frequency modes. In this way, the elasticity indicators of the prints are identified by coating the paper with different layers of ink.