



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Laurynas Adomaitis

Kanapių pluošto bio-kompozitų mechaninių savybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vaida Jonaitienė

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Kanapių pluošto bio–kompozitų mechaninių savybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (621H70004)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Vaida Jonaitienė
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Saulius Baskutis
(data)

Projektą atliko

(parašas) Laurynas Adomaitis
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Laurynas Adomaitis

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija (621H70004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Kanapių pluošto bio–kompozitų mechaninių savybių tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. Gruodžio 21 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Lauryno Adomaičio**, baigiamasis projektas tema „Kanapių pluošto bio–kompozitų mechaninių savybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

	Tvirtinu: _____
Gamybos inžinerijos katedros vedėjas	<i>(parašas, data)</i>
	<i>Kazimieras Juzėnas</i> _____ <i>(vardas, pavardė)</i>

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS
Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis projektas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas, kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, yra įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju projektu bei jo gynimu studentas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Projekto tema Kanapių pluošto bio–kompozitų mechaninių savybių tyrimas

Patvirtinta 2017 m. gruodžio 11 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-12

2. Projekto tikslas suprojektuoti ir pagaminti skirtingos sudėties kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalių) bio–kompozitus ir ištirti skirtingos kanapės sudėties ir struktūros įtaką mechaninėms bio–kompozito savybėms.

3. Projekto struktūra Įvadas, Literatūros apžvalga, Ekonominė dalis, Metodinė dalis, Tyrimų rezultatai, Išvados ir Literatūros sąrašas.

4. Reikalavimai ir sąlygos _____ - _____

5. Projekto pateikimo terminas 2017 m. gruodžio mėn. 21 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis

Studentas _____
(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____
(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

ĮVADAS.....	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	13
1.1 Sėjamosios kanapės apžvalga.....	13
1.2 Kanapių pluošto paruošimas ir apdorojimas.....	17
1.3. Kanapių pluošto gamybos metodai.....	19
1.4. Kanapių pluošto bio-kompozito mechaninės ir fizikinės savybės.....	23
1.5. Kanapių pluošto panaudojimas.....	27
2. EKONOMINIS PAGRINDIMAS.....	32
3. TYRIMŲ METODIKA.....	35
3.1 Bio-kompozitų tyrimų metodika.....	35
3.2 Statistiniai duomenys.....	38
3.3 Bio-kompozitų gamybai naudojamos medžiagos.....	39
3.4 Bio-kompozitų paruošimas ir gamyba.....	41
3.5 Bio-kompozitų bandinių paruošimas.....	43
4. TYRIMŲ REZULTATAI.....	44
4.1 Bio-kompozitų tempimo rezultatai.....	45
4.2 Bio-kompozitų lenkimo rezultatai.....	51
4.3 Kanapių kompozito skerspjuvio stebėjimas.....	55
IŠVADOS.....	58
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	60

Santrumpų sąrašas

PLA – poliesteris arba polipieno rūgštis;

SEM – skenuojanti elektroninė mikroskopija;

THC – tetrahidranabinolis;

CBD – kanabidiolis;

NaOH – natrio šarmas;

pl – PLA plėvelė;

sp – kanapių spalvai;

nkp – nešukuotas kanapių pluoštas;

škp – šukuotas kanapių pluoštas;

Paveikslėlių sąrašas

1.1 pav. Sėjamoji kanapė [4]	13
1.2 pav. Sėjamoji kanapė: vyriškoji ir moteriškoji [9]	14
1.3 pav. Kanapės stiebo sandara	15
1.4 pav. a – pluošto ilgis (10 000 kart. didinimas); b – kanapių pluošto skerspjūvis (200 kart. didin.) [14]	16
1.5 pav. Sėjamosios kanapės skirstymas pagal chemotipą.[17]	17
1.6 pav. Rankiniu būdu atskirtas kanapių pluoštas po mirkymo proceso [20]	18
1.7 pav. Kanapių pluošto kompozito gavimo schema, kai rišančioji medžiaga derva [26]	21
1.8 pav. Kanapių pluošto komp. gavim. naudojant PLA schema, kai pluoštas yra veikiamas šarmais [27]	23
1.9 pav. Automobilių dalys iš kanap. Pl. K.: a - b) Elektromobilio „BMW i3“ durelių elementai [35;36]	29
1.10 pav. Įmonės „Lotus“ automobilis: a) Automobilio vizualizacija; b) Automobilio realus vaizdas [36]	30
1.11 pav. Šiuolaikinių ekologiškų baldų pavyzdžiai [40][41]	30
1.12 pav. Statybiniai blokėliai [43]	31
1.13 pav. Pramonėje ir ne tik naudojamos medžiagos: a – Geotektilė [45]; b – kanap. šiltinimo vata [46]	31
2.1 pav. Pluoštinių kanapių perdirbimo vertės grandinė [48]	32
3.1 pav. a) Mašina „Thinius Olsen–H25KT“; b) Tempimo metu naudojami sprautuvai;	35
3.2 pav. Bandinio tempimo principinė schema (l_0 – darbinės dalies ilgis; F – deformacijos jėgos kryptis)	36
3.3 pav. Bandinio princ. lenkimo schema (L_2 – atstumas tarp atramų; F – deformuojančios jėgos kryptis)	37
3.4 pav. Armuojančios medžiagos: a - kanapių sp.; b - nešukuotas kanapių pluoštas; c – šukuotas pluoštas;	40
3.5 pav. PLA plėvelė	41
3.6 pav. Laminavimo mašina <i>NOVA 45 (Reliant Machinery, Jungtinė Karalystė)</i>	41
3.7 pav. Bio-kompozito gamybos schema	42
3.8 pav. Bandinių tipai: dvigubo varpo ir juostelė	43
3.9 pav. Kanapių kompozito bandinio gabaritiniai matmenys	43
3.10 pav. Giljotininis peilis	43
4.1 pav. Bio-kompozitų trūkimo jėgos palyginimas	47
4.2 pav. Bio-kompozitų deformacija tempimo metu	48
4.3 pav. Kanapių spalių tempimo grafikas	49
4.4 pav. Nešukuoto kanapių pluošto tempimo grafikas	49
4.5 pav. Šukuoto kanapių pluošto tempimo grafikas	50
4.6 pav. Tempimo grafikas, kai PLA plėvelių skaičius 2	51
4.7 pav. Tempimo grafikas, kai PLA plėvelių skaičius 3	51
4.8 pav. Bio-kompozitų palyginimas pagal jėgą lenkiant	52
4.9 pav. Bio-kompozitų deformacija lenkimo metu	53

4.10 pav. Kanapių spalų lenkimo grafikas	53
4.11 pav. Nešukuoto kanapių pluošto lenkimo grafikas	54
4.12 pav. Šukuoto kanapių pluošto lenkimo grafikas	55
4.13 pav. Mikroskopas	55

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Kanapių pluošto cheminė sudėtis [14]	16
1.2 lentelė. Hidraulinio preso kaitinimo grafikas	21
1.3 lentelė. Kompozitų (stiklo, sizalio, kanapių) mechaninių verčių palyginimas [30]	26
2.1 lentelė. Kanapių pluošto perdirbimo sąnaudos[52]	34
2.2 lentelė. Vidutinės pajamos, gaunamos perdirbant kanapių stiebus [48]	34
3.1 lentelė. Poli(pieno rūgšties) granulių 6201D pagrindinės fizinės charakteristikos	41
4.1 lentelė. Gamybos metu gauti bio-kompozitai	45
4.2 lentelė. Bio-kompozitų trūkimo jėgos nustatymo vidutinės reikšmės	47
4.3 lentelė. Bio-kompozitų stipris tempiant, jėga takumo riboje ir modulis	48
4.4 lentelė. Bio-kompozitų stipris lenkiant, ištįsa lenkimo metu ir modulis	53
4.5 lentelė. Bio-kompozitų skerspjūvio stebėjimas naudojant mikroskopą	57

Laurynas Adomaitis. Baigiamojo projekto pavadinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Vaida Jonaitienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: gamybos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *Kanapės, Kanapių pluošto bio-kompozitas, mechaninės savybės*

Kaunas, 2018. XX p.

SANTRAUKA

Natūralus pluoštas yra sutvirtinamas termoplastinėmis ir termoreaktyviosiomis matricomis, taip siekiant pakeisti įprastus polimerų kompozitus, apdorotus pramoniniais pluoštais. Natūralūs pluoštai vis dažiau laikomi aplinkai nekenksmingu sintetiniu pluoštų pakaitalu, siekiant sustiprinti polimerinius kompozitus.

Kanapių pluoštai yra augaliniai pluoštai, perdirbimo metu deginant į atmosferą išskirtas anglies dioksidas yra mažesnis nei augalo augimo metu. Nors natūralių pluoštų stipris yra gerokai mažesnis, nei stiklo pluoštų, tačiau kai atsižvelgiama į natūralių pluoštų specialųjį modulį (modulis pagal savitąją svorį) natūralaus pluošto vertės yra panašios arba net geresnės už stiklo pluoštus. Natūralūs pluoštai yra labai palanki kompozitų sutvirtinimo medžiaga, nes jos yra lengvai prieinamos, atsinaujinančios, ekonomiškos. Jau artimiausioje ateityje Europos pramonė numachiui didinti vietinių žaliavų vartojimo tempus biologiškai skaidžių lino ir kanapių pluoštų. Taip pat remti ekonomiškai silpnas šalis, kuriose auginamos žemės ūkio kultūros gali būti naudojamos bio-kompozitų gamyboje. Europos Sąjungos darnaus vystymosi strategija, tekstilės kompozitų iš bio-skaidžių medžiagų gamyba yra vienas iš prioritetų ateities gamyboje.

Baigiamojo projekto metu buvo suprojektuoti ir pagaminti skirtingos sudėties kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto, spalijų) ir PLA polimero bio-kompozitai. Buvo nustatyta skirtingos kanapės sudėties ir struktūros įtaka mechaninėms bio-kompozito savybėms, stiprumui ir lenkimui.

Tyrimai parodė, kad kanapių pluošto bio-kompozitai, kurių sudėtyje yra šukuotas kanapių pluoštas pasižymi geru atsparumu, lenkimui ir stiprumu. Kompozituose, kurių sudėtyje naudojami spalijai ar nešukuotas pluoštas, nepasižymėjo tokiomis geromis mechaninėmis savybėmis.

Laurynas Adomaitis. Kanapių pluošto bio-kompozitų mechaninių savybių tyrimas: Master's Final Project / supervisor assoc. prof. Vaida Jonaitienė. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Production Engineering, Technological sciences.

Key words: Cannabis, Hemp fiber biocomposite, mechanical properties

Kaunas, 2018. XX p.

SUMMARY

The natural fiber is reinforced with thermoplastic and thermosetting matrices to replace conventional polymer composite treated with industrial fibers. Natural fibers are increasingly considered environmentally friendly synthetic fiber replacements to enhance polymer composites.

Hemp fibers are vegetable fibers, the carbon dioxide released into the atmosphere when burned during processing is lower than during plant growth. Although the strength of natural fibers is considerably less than that of glass fibers, however, when the natural fibers specific module (specific weight module) is taken into account, the natural fiber values are similar or even better than glass fibers. Natural fibers are a very beneficial composite reinforcement because they are readily available, renewable, and economical. Already in the near future, European industry has planned to increase the consumption of local raw materials for biodegradable flax and hemp fibers. It also supports economically weak countries where crops grown can be used in the production of bio-composites. The European Union's Sustainable Development Strategy, the production of textile composites from bio-degradable materials is one of the priorities for future production.

In the final project, different types of hemp (uncoated fibers, combed fibers, shawls) and PLA polymer bio-composites were designed and manufactured. The influence of composition and structure of different cannabis on the mechanical properties, strength and bending of bio-composites was determined.

Studies have shown that hemp fiber biocomposites that contain combed cannabis fibers have good resistance, bending strength and strength. Composites containing chocolate or non-woven fibers did not show such good mechanical properties.

ĮVADAS

Nuo XXI a. pradžios mokslininkai ir tyrinėtojai susidomėjo nauja biologinio užpildo era, tokia kaip natūralus pluoštas. Natūralus pluoštas yra sutvirtinamas termoplastinėmis ir termoreaktyviosiomis matricomis, taip siekiant pakeisti įprastus polimerų kompozitus, apdorotus pramoniniais pluoštais (anglies ir stiklo).

Natūralūs pluoštai, sizalį, kenafą, džiotą, linus ir kanapes yra sutvirtinamos skirtingomis dervomis taip gaunant naujas medžiagas pasižyminčiomis puikiomis savybėmis. Pluoštai pasižymi šiomis pagrindinėmis savybėmis ekonomišku, mažu energijos poreikiu perdirbant, ekologiškumu, stiprumu, elastingumu, dideliu svorio ir stiprumo santykiu. Pagrindinė natūralaus pluošto kompozitų problema – dervos suderinamumas, dėl pluošte pasižyminčios savybės hidrofobiškumo.

Natūralūs pluoštai vis dažiau laikomi aplinkai nekenksmingu sintetiniu pluoštų pakaitalu, siekiant sustiprinti polimerinius kompozitus. Iš tikrųjų šie pluoštai jau naudojami vietoj stiklo ir anglies, kai kuriuose techninėse srityse, pavyzdžiui, automobilių pramonėje, kur mechaninės savybės turi būti derinamos su mažu svoriu. Toks bio-kompozitų taikymas vis auga siekiant užtikrinti švarią gamybą ir ekologiją.

Atsižvelgiant į taikymo plėtros kryptį vis daugiau dėmesio sulaukia bio-kompozitai, arba kitaip – sintetiniai arba bioskaidūs plastikai armuoti bioskaidžiais pluoštais. Tokį susidomėjimą paskatino net kelių problemų sprendimo galybės: pirmiausia, sumažinti armuojančių pluoštų kainą, bei užtikrinti bioskaidumą ir atsinaujinančių žaliavų naudojimą. Natūralaus pluoštai yra labai palanki kompozitų sutvirtinimo medžiaga, nes jos yra lengvai prieinamos, atsinaujinančios, ekonomiškos ir turi tam tikrų savybių.

Jau artimiausioje ateityje Europos pramonė numachiusi didinti vietinių žaliavų vartojimo tempus biologiškai skaidžių lino ir kanapių pluoštų. Taip pat remti ekonomiškai silpnas šalis, kuriose auginamos žemės ūkio kultūros gali būti naudojamos bio-kompozitų gamyboje. Europos Sąjungos darnaus vystymosi strategija, tekstilės kompozitų iš bio-skaidžių medžiagų gamyba yra vienas iš prioritetų ateities gamyboje.

Tyrimo tikslas – suprojektuoti ir pagaminti skirtingos sudėties kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalų) bio-kompozitus ir ištirti skirtingos kanapės sudėties ir struktūros įtaką mechaninėms bio-kompozito savybėms.

Uždaviniai:

1. Suprojektuoti ir pagaminti skirtingos sudėties kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalių) bio-kompozitus.
2. Ištirti kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalių) bio-kompozitų stiprumo savybes.
- 3 Ištirti kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalių) bio-kompozitų atsparumą lenkimui.
4. Ištirti skirtingos kanapės (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalių) sudėties ir struktūros įtaką mechaninėms bio-kompozito savybėms

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Sėjamosios kanapės apžvalga

Kanapė (lot. *Cannabis*) priklauso kanapinių (lot. *Cannabaceae*) šeimos augalų genčiai. Išskiriama viena pagrindinių rūšių – sėjamoji kanapė (lot. *Cannabis sativa*) (esti 2-3 porūšiai). Manoma, kad visame pasaulyje paplitęs augalas yra kilęs iš Centrinės ir Pietų Azijos. *Canabis sativa* yra viena iš seniausių žinomų kultivuojamų augalų. Sėjamoji kanapė pavaizduota 1.1 paveiksle [1,2,3].



1.1 pav. Sėjamoji kanapė [4]

Sėjamoji kanapė yra vienmetis žolinis augalas, pasižymintis specifiniu kvapu, gali išaugti iki 4–6 metrų. Apatinėje augalo dalyje yra iš dalies sumedėjęs stiebas, kuris toliau šakojasi į smulkesnes šakeles. Lapai priešiniai, kotuoti, pirštiškai suskaldyti į 3–5 (iki 9) lancetiškas skiltis. Prielapiai poriniai, lancetiški, linijiški arba siūliški. Visas augalas apaugęs šiurkščiais paprastaisiais ir liaukiniais plaukeliais [5]. Augalas yra dvinamis: moteriškieji kanapių augalai vadinami grūdėmis, vyriškieji – pleiskanėmis (1.2 pav.). Vyriškieji augalai mažesni už moteriškuosius, greičiau auga ir anksčiau žydi. Vyriškųjų augalų kuokeliniai žiedai koncentruoti į ilgus viršūninius šluotelės pavidalo žiedynus, o moteriškųjų augalų – į tankius varpos pavidalo žiedynus viršutinių lapų pažastyse. Vaisius dažniausiai būna pilkas, gali pasitaikyti rusvai pilkas, riešuto formos, 3–6 mm ilgio ir ~2 mm pločio. Riešuto viduje yra sėklos, kuriose yra 30–35 % aliejaus. Vyriškieji

augalai žemesni ir mažiau šakoti už moteriškuosius, nužydėję ima džiūti. Iš sausos jų masės gaunama 20-25 % pluošto, o iš moteriškųjų augalų – tik 12-20 %. Iš kanapės gaunama derva (sudžiovinta vadinama hašišu) ir moteriškųjų augalų žiedynai (sudžiovinti vadinami marihuana) laikomi narkotikais. [5,6,7].

Kanapės 2737 m. pr. Kr. minimos kinų tradicinės medicinos veikaluose. Europoje augalą pirmas aprašė 70 m. po Kristaus – Dioskoridas. Europoje kaip kultūrinis augalas plačiai paplito 16 amžiuje. Pasaulyje 2002 kanapių pasėliai užėmė 64 000 ha (Azijoje 31 000 ha, Europoje 29 000 ha), gauta 77 000 t kanapių pluošto ir 23 000 t sėklų. Kanapės daugiausiai buvo auginamos Indijoje, Kinijoje, Rusijoje, taip pat Čilėje, Ispanijoje, Italijoje, Lenkijoje, Prancūzijoje, Rumunijoje, Ukrainoje ir Vengrijoje. [7,8].

Lietuvoje kanapės buvo vieni pirmųjų kultūrinių augalų. Jų sėklų ir kanapinių virvelių liekanų rasta vidurio neolito Narvos kultūros laikotarpiu, Šventosios gyvenvietėse (III tūkstantmečio pr. m. e.). Daugiausia kanapių auginama 15-18 amžiuje pluoštui ir maistui (pluoštas buvo eksportuojamas). Vėliau auginamų kanapių poreikis sumažėjo, todėl ūkininkai kanapes auginoti tenkinti savo reikmėms, o 20 a. pabaigoje kanapių auginimas imtas drausti įstatymais. [8].

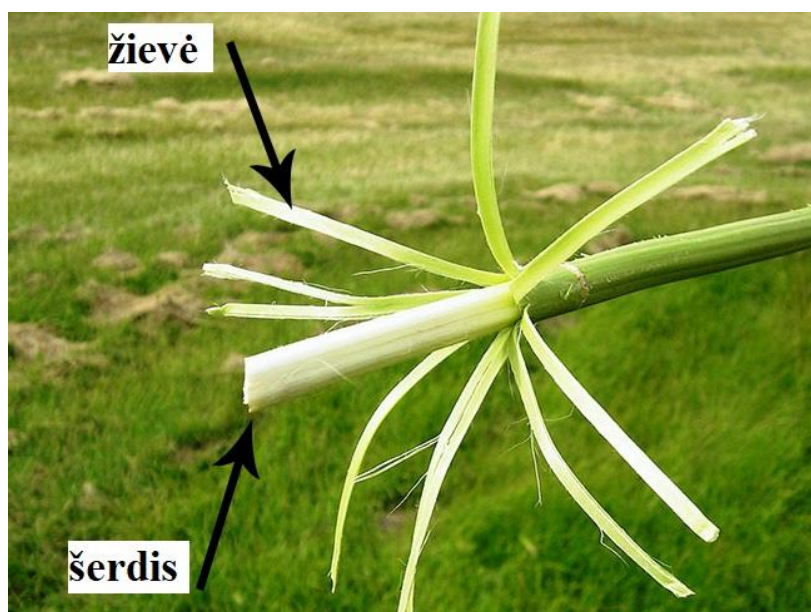


1.2 pav. Sėjamoji kanapė: vyriškoji ir moteriškoji [9]

Kanapių augimo ciklas prasideda gegužės pradžioje, kai dirvožemis 5-8 °C temperatūros, derlius nuimamas rugpjūčio pradžioje. Kanapės geriausiai auga priemolio dirvožemyje, kurio

vandenilio potencialas (pH) didesnis kaip 6.0. Kuo mažesnis molio kiekis dirvožemyje, tuo didesnis grūdų ir pluošto derlius. Molio dirvožemis turi būti lengvai suspaustas, nes kanapių sėklos jautrios dirvožemio tankinimui. Šie augalai geriausiai auga, kai dirvožemis yra gerai nusausintas, turtingas azoto junginiais ir labiau rūgštinės terpės, kuomet vyrauja švelnus klimatas, drėgna atmosfera, o lietaus kiekis apytiksliai yra 64-76 cm per metus. Derlius nuimamas rugsėjo pradžioje.[10,11].

Iš kanapės stiebo išgaunamos dviejų tipų skirtingos medžiagos: spalčiai ir pluoštas (1.3 pav.). Žievė – išorinė dalis, kuri sudaro apytiksliai 20-40 % (pagal masę) kanapės stiebo. Iš žievės galima išgauti iki 50 mm ilgio siūlus, dar vadinamus kanapės pluoštu. Jam būdingas didelis celiuliozės kiekis – 50-70 % ir mažas lignino kiekis – 7 %. Ši stiebo dalis – žievė – yra vertingiausia išgaunant pluoštą. Kita stiebo dalis yra šerdis, kurią sudaro 60-80 % (pagal masę) medienos, dar vadinamų spalčiais. Stiebo šerdyje yra 70-80 % celiuliozės ir ženkliai didesnis lignino (20-30 %) kiekis lyginat su žieve. Ligninas – tai itin didelės molekulinės masės, nereguliarios struktūros amorfinis polimeras, pasižymintis prastomis hidrofobinėms (molekulės savybė atsiskirti nuo vandens molekulių vandeniniame tirpale) bei blogomis mechaninėmis savybėmis. Augalas ligniną naudoja medėjimui, tvirtėjimui, todėl žievėje daugiausia šios medžiagos. Tuo tarpu šerdis laikoma antriniu produktu, nes sunku išgauti vientisus ilgus siūlus (pluoštą). Minėto lignino ir celiuliozės kiekiai yra esminiai kanapių kompozito gamybos procese, nes tai lemia kompozito mechanines savybes. Kanapių pluošto kompozite didelis lignino kiekis mažina sukibimą pluošto su matrica [5].

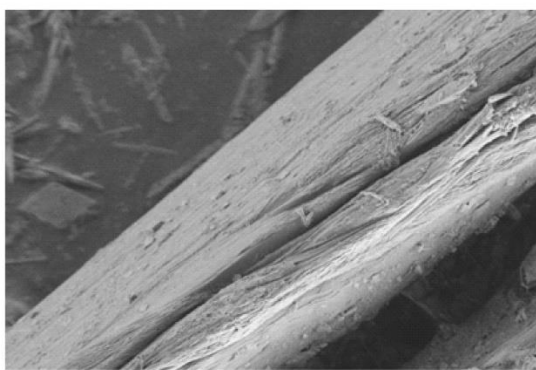


1.3 pav. Kanapės stiebo sandara

Kanapių pluošto siūlas išilgine kryptimi yra maždaug cilindro formos su nelygumais, atsiradusiais gamybos metu (1.4 pav. a). Pastarieji mažina kanapės pluošto stiprumą, nes ties kiekvienu nelygumu siūlas gali nutrūkti. 1.4 b paveiksle pavaizduotas kanapės pluošto siūlo skerspjūvis. Vaizde matyti, kad forma yra plokščias daugiakampis su apvalintais kampais. Svarbiausi pluošto komponentai yra celiuliozė, pektinas ir ligninas (kanapių cheminė sudėtis pateikta 1.1 lentelėje). Pastarieji aptinkami augalų ląstelių sienelėse ir tarpuląščiuose. Pektinas sujungia ląsteles tarpusavyje ir suteikia audiniams standumo. Ligninas ir celiuliozė suteikia kietumo ir stiprumo [12,13,14].

1.1 lentelė. Kanapių pluošto cheminė sudėtis [14]

Savybės	Vertės
Celiuliozė (%)	57–77
Hemiceliuliozė (%)	14–22.4
Pektinas (%)	0.9–1.5
Ligninas (%)	3. –5.7
Dulkės (%)	0.8



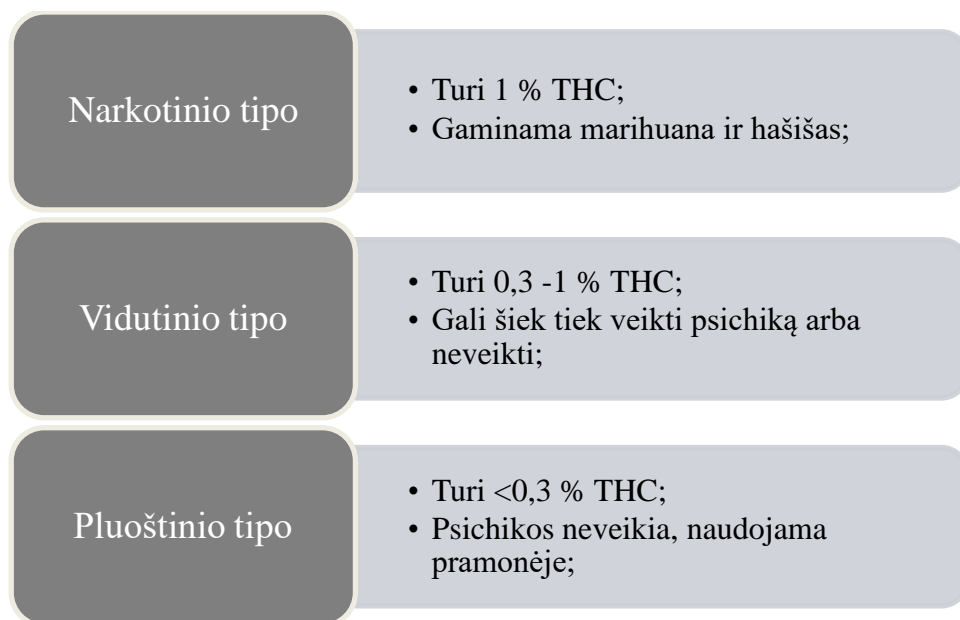
a)

b)

1.4 pav. a – pluošto ilgis (10 000 kartų didinimas); b – kanapių pluošto skerspjūvis (200 kart. didinimas) [14]

Kanapių augalas daugumos suprantamas bei laikomas psichotropinių medžiagų šaltiniu. Tačiau šis augalas gali būti naudojamas skirtingiems tikslams, priklausomai nuo rūšies. Kanabidiolis (toliau – CBD) ir delta-9-tetrahydrocannabinol (toliau – THC) yra cheminiai junginiai randami kanapės augale. Pastarieji yra priskiriami kanabinoidams. Tai THC (tetrahidrokanabinolis), veikiantis žmogaus psichiką, ir CBD (kanabidiolis) – šį poveikį mažinantis. Viena geriausiai žinomų kanapių rūšių, turinti santykinai daug THC kanabinoidų ir mažai CBD kanabinoidų, yra žinoma kaip marihuana. Pramoninės pluoštinio tipo kanapės pasižymi mažu THC, bet dideliu CBD

kiekiu. Pagal chemotipą (priklausomai nuo THC kiekio) kanapės skirstomos į 3 tipus: narkotinio, vidutinio ir pluoštinio (1.5pav.). Lietuvoje pluoštui ir sėkloms galima auginti tas kanapių veisles, kuriose būna ne daugiau nei 0,2 % THC ir kurios yra patvirtintos ir įrašytos į leistinų Europos Sąjungoje auginti pluoštinių kanapių sąrašą. [15,16,17]



1.5 pav. Sėjamosios kanapės skirstymas pagal chemotipą.[17]

1.2 Kanapių pluošto paruošimas ir apdorojimas

Subrendus kanapių augalams, derlius nuimamas specialiai technika – kombainais, priklausomai nuo norimos išgauti produkcijos. Pluoštui gauti kombainai nupjauna pažeme kanapės stiebą, panaikina šakeles, o likusį stiebą susmulkina 60 cm ilgio atkarpomis.

Kanapių pluošto paruošimas taikant mirkymą tai procesas, leidžiantis žievę atskirti nuo šerdies, veikiant drėgmei ir mikroorganizmams (skilimo bakterijoms) (1.6 pav.). Jis gali trukti 1–2 savaitių, jei oras yra šiltas ir drėgnas. Jei oro temperatūra žema ir drėgnumas mažas, procesas gali trukti 4–6 savaites [18;19]

Jei mirkymas netaikomas, susiduriama su problema, kai žievė sukietėja ir ją sunkiau atskirti nuo šerdies, dėl to pablogėja pluošto kokybė. Mirkymo procesą [20,21] galima pasiekti taikant tris metodus:

- *Mirkymas naudojant vandenį.* Šio metodo metu stiebai panardinami į baseinuose esantį vandenį. Vanduo prasiskverbia į centrinę stiebo dalį (šerdį), išpučia vidines ląsteles, kurios galiausiai sprogs. Taip šerdyje padidinamas vandens ir skilimo bakterijų kiekis. Taikant šį metodą, žievė, o vėliau ir gaunamas pluoštas, pasižymi gera kokybe, tvirtumu. Mirkymas naudojant vandenį yra brangus ir neekonomiškas. Šio proceso taikymas reikalauja didelių vandens išteklių ir specialiai įrengtų baseinų.
- *Mirkymas lauko sąlygomis.* Šio metodo metu po pjovimo stiebai yra surenkami į nedideles krūvas. Lietus ir rasa suteikia pakankamą drėgnumą žievės atsiskyrimui. Šis procesas yra plačiai naudojamas dėl pigumo (lengvai prieinamas kiekvienam vartotojui), nes proceso metu nenaudojami papildomi vandens ištekliai. Tačiau pluoštas tampa tamsesnės spalvos (dėl dirvoje esančių mikroorganizmų) bei pasižymi prastesne kokybe, nei taikant mirkymą su vandeniu.
- *Mirkymas naudojant chemines medžiagas.* Šio metodo metu ant nupjautų stiebų yra užpurškiamos cheminės medžiagos (dažniausiai herbicidais). Tuomet šerdyje esančios ląstelės greičiau susitraukia nei esančios žievėje. Mirkymas naudojant chemines medžiagas yra brangus, reikalauja tinkamų oro sąlygų. Cheminės medžiagos dažnai būna kenksmingos žmogaus sveikatai ir aplinkai.



1.6 pav. Rankiniu būdu atskirtas kanapių pluoštas po mirkymo proceso [20]

Žievės atskyrimas yra dar vienas žingsnis apdorojant kanapių stiebus. Po mirkymo stiebai yra džiovinami lauko sąlygomis arba naudojant mechanines priemones. Stiebai nėra visiškai išdžiovinami – paliekama 15 % drėgmės – taip palengvinat žievės atskyrimą. Galutinis žievės atskyrimas vyksta laužant stiebą rankomis arba naudojant tam skirtus mechanizmus. Dažniausiai įrengimai sudaryti iš dviejų volų (ritinių), kurie sukdamiesi vienas šalia kito į skirtingas puses sutrupina stiebą į smulkius vienetus, kitaip vadinamus kanapių spaliais. Procesas kartojamas kol žievė atsiskiria nuo šerdies. Tuomet vyksta žievės valymas, ją šukuojant, rankiniu būdu ar naudojamų įrengimų. Taip pašalinamos likusios prikibusios stiebo dalys. Vėliau išvalyta žievė (pluoštas) sudedama į rezervuaruose esantį šarmo tirpalą. Neutralizavus pluoštą, į rezervuarą įpurškiamas aukšto slėgio garas (iki 12 barų), kuris prasiskverbia tarp pluošto skaidulų ir per 30 min dėl ankščiau minėtų sukibimo sąlygų ištirpina ligniną, pektiną ir t. t. Staigiai išleistas slėgis, suardo pluošte esančius tarpmolekulinius ryšius, nesukeliant atskirų ląstelių susiskaidymo. Gautas pluoštas plaunamas vandenyje ir džiovinamas auštos temperatūros srove. Išdžiovintas pluoštas šukuojamas skirtingo tankio (pagal dantukų kiekį) šukomis. Procesas vyksta tol, kol gaunami ploni siūlai, kurie susukami į atskirus ryšulius. Priklausomai nuo pluošto naudojimo, gali būti atliekami papildomi apdorojimai: veikimas cheminėmis medžiagomis ir dažymas ir kt. [21].

Apibendrinant sėjamosios kanapės auginimas ir apdorojimas daro įtaką galutinio produkto, šiuo atžvilgio kompozito kokybei (adhezijai, mechaninėms savybėms), atsižvelgiant į naudojimo paskirtį: buitinėms (baldams) ar pramoninėms reikmėms (automobilių detalių gamybos). Norint užtikrinti gero pluošto kokybę apdorojimo procese rekomenduojama atkreipti dėmesį į mirkimo procesą. Geriausios kokybės rezultatas gaunamas taikant mirkymą naudojant vandenį.

1.3. Kanapių pluošto gamybos metodai

Pagal lietuvių kalbos žodyną – kompozitas kelių skirtingos prigimties, tarpusavyje netirpių medžiagų mišinio perdirbimo kietasis produktas [23]. Kompozitinė medžiaga susideda iš:

1. Armuojančios medžiagos (stiklo, anglies, kanapių ar kitokio pluošto audinio);
2. Rišančiosios medžiagos (epoksidinės, poliesterinės, vinilesterinės dervos ir t.t.).

Kompozite pagrindinę apkrovą priima armuojanti medžiaga, o rišančioji medžiaga suriša armuojančią medžiagą, suteikia detalei stabilią formą. Tačiau rišančiosios medžiagos svarba yra didelė ir daro įtaką galutinės kompozito charakteristikai. [24]

Bio-kompozitas, kai naudojama armuojanti medžiaga, yra biologinis kilmės. Tokie kompozitai pasižymi ekologiškumu, lengvu perdirbimu ir pigumu. Vienas iš bio-kompozitų privalumų – šaltinių (šiuo atžvilgiu kanapės) atsinaujinimas.

Kompozito gavimas yra svarbus procesas, nes jo metu gaunamas galutinis produktas. Nuo proceso priklauso kompozito kokybė, mechaninės ir eksploatacinės savybės [25]. Literatūros šaltiniuose pateikti įvairūs kanapių kompozito paruošimo ir gamybos metodai. Pastarųjų pasirinkimas priklauso nuo rišančiosios medžiagos. Galima išskirti du pagrindinius (galimi ir daugiau) kanapių pluošto gamybos metodus, kai naudojama rišančioji medžiaga yra skystos arba kietos agregatinės būsenos. Šiame poskyryje pateiktos gamybos metodai ir tam metodui priskirti paruošimo būdai naudojant rišančiąsias medžiagas: dervą ir polilaktidą (PLA).

Moksliniame straipsnyje aprašoma kanapių kompozito gamyba naudojant rišamąją medžiagą polibenzoksaziną (kitaip dervą). Autoriai Abdul QadeerDayo, Bao-changGao, JunWang, Wen-binLiu, MehdiDerradji, Ahmer Hussain Shah, Aijaz AhmedB straipsnyje – Kanapės pluošto kompozitas, kai armuojanti medžiaga – polibenzoksazinas (angl. *Natural hemp fiber reinforced polybenzoxazine composites*) – aprašo kanapių pluošto paruošimą ir gamybą. Toliau remiantis straipsniu smulkiai nupasakojama proceso eiga. [26]

Siekiant pagerinti adheziją (sukibimą) tarp armatūros ir matricos dervos, plaušai prieš pradėdant naudoti turi būti chemiškai apdoroti. Pluošte esantis lignininas iš esmės nėra suderinama su hidrofobinėmis nepoliarinių polimerų matricomis. Ligninas dėl šakotos struktūros bei aromatinių ir alifatinių komponentų nesiskaido daugumoje tirpiklių ir monomerus, o tai sunkina augalinio pluošto sukibimą su rišančiąją medžiaga. Natūralių pluoštų cheminis paviršiaus apdorojimo poveikis priklauso nuo naudojamo apdorojimo tirpalo tipo ir koncentracijos.

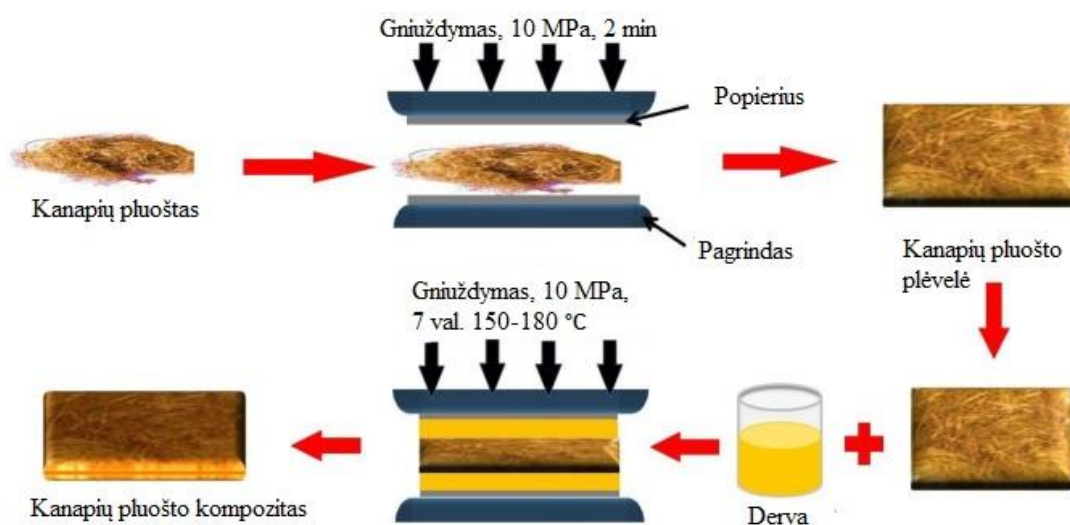
Kanapių pluošto paruošimas ir apdorojimas. Natūralus kanapių pluoštas plaunamas distiliuotame vandenyje tol kol pašalinami visi nešvarumai. Po to susmulkinamas iki 5 ± 1 mm ilgio atkarpos. Susmulkintas kanapių pluoštas šešias valandas tirpinamas su etanolio ir cikloheksano tirpalu 1/1 santykiu. Po to pluoštas šešias valandas, 25 °C temperatūroje, maišomas distiliuotame vandenyje. Taip siekiant po tirpinimo pašalinti ant kanapių pluošto susidariusį vašką ir riebalus. Vėliau šešias valandas, kambario temperatūroje pluoštas laikomas natrio hidroksido tirpale, pašalinant ligniną, pektiną ir hemiceluliozę. Naudojant NaOH tirpalą plaušo paviršius įgauna grublėtą struktūrą. Kai pašalinami riebalai toliau pluoštas plaunamas distiliuotame vandenyje, kelis kartus kol visiškai pašalinamas natrio hidroksido tirpalas. Jei tirpalas bus nepašalinamas vėlesnio proceso metu, pluoštas nebus linkęs sulipti su derva. Svarbu, kad pluoštas būtų neutralizuotas,

siekiant pagerinti adheziją su derva. Neutralizavimui naudojamas 1 % acto rūgšties tirpalas. Galiausiai 15–20 min natūralus kanapių pluoštas plaunamas distiliuotame vandenyje.[26]

Kanapių pluošto kompozito gavimas. Kompozito gavimui naudojama plieninė forma padengiama popieriumi siekiant išvengti ant plieninės formos galimų likučių, pelėsių ar dulkių, nuo prieš tai vykusių bandymų, kurie gali įtakoti kompozito mechanines savybes. Atsitiktine tvarka ant popieriaus uždedamas kanapių pluoštas, po to spaudžiamas hidrauliniu presu 10 MPa, 2 min., iš kurio gaunamas plono sluoksnio bandinys, kurio matmenys 150 × 150 mm. Pastarasis dedamas į 140 °C temperatūros krosnį ir kaitinamas 10 minučių – taip siekiama pašalinti likutinę drėgmę, kuri gali daryti įtaką pelėsio atsiradimui. Užtikrinant, kad galutinis gautas produktas būtų be oro tarpų, benzoksazino derva yra laikoma šešias valandas 90 °C temperatūros krosnyje. Pusė paruoštos dervos perkeliama į pašildytą formą. Kita pusė supilama į nerūdijančio plieno formą, po to atsargiai uždedamas paruoštas kanapių pluoštas ir ant viršaus užpilama prieš tai atskirtos kita pusė dervos. Po to forma dedama į krosnį ir slegiama prie tam tikros temperatūros – taip vyksta kietėjimo procesas (kietėjimo grafikas pateiktas 1.2 lentelėje). Kompozito formavimo procedūra pateikta 1.7 paveiksle. [26]

1.2 lentelė. Hidraulinio presu kaitinimo grafikas

Temperatūra (°C)	Laikas (h)	Slėgis (MPa)
150	2	–
165	2	10
180	3	10

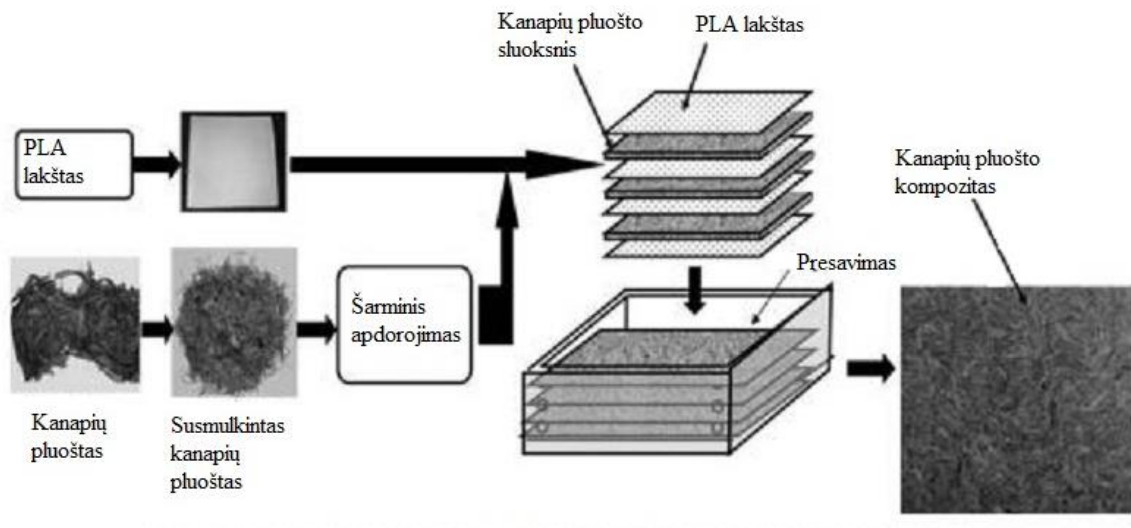


1.7 pav. Kanapių pluošto kompozito gavimo schema, kai rišančioji medžiaga derva [26]

Kitame moksliniame straipsnyje. aprašomas kanapių kompozito gamyba naudojant rišamąją medžiagą PLA. Autoriai Ruihua Hu ir Jae-Kyoo Lim straipsnyje – Kanapių bio-kompozitų gamyba, mechaninių savybių tyrimas (angl. *Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber*) – aprašoma ne vien gamyba, tačiau taip pat tiriamos gautų kompozitų mechaninės savybės (gauti rezultatai aprašyti 1.3 skyriuje).[27]

Kanapių pluošto paruošimas ir apdorojimas. Bandiniams paruošti naudojami kanapių pluoštai paveikti šarmo tirpalo ir kanapių pluoštai be šarminio apdorojimo. Pluošto siūlai susmulkinami 5-15 mm atkarpos ir įmirkyti 6 % natrio hidroksido tirpalu esant 40 °C temperatūrai, 24 valandas, išlaikant tirpalo santykį 1:20. Po mirkymo pluoštas penkis kartus plaunamas distiliuotame vandenyje kol pašalinama likutinis NaOH. Po to 12 valandų džiovinamas 105 °C temperatūros orkaitėje. Siekiant įvardyti skirtumus, buvo lyginami dviejų tipų pluoštai: natūralus ir šarmo tirpalu apdorotas. Pluošto siūlai taip pat susmulkinami trumpomis atkarpomis ir 24 valandas panardinti vandenyje, kad būtų pašalinamos dulkės ir kiti nešvarumai, galimai esantys ant pluošto paviršiaus. Pastarasis veiksmas vykdomas siekiant gauti gryną produktą, nes esantys nešvarumai ar kitos medžiagos gali įtakoti mechanines vertes. Po to 105 °C temperatūroje 12 val. džiovinama krosnyje. [27]

Kanapių pluošto kompozito gavimas. Pirmiausia sukarpoma PLA plėvelė į 180x150 mm lakštus. Plėvelės lakštas dedamas į formą ant kurio beriamas kanapių pluoštas (apdorotas šarmais arba neapdorotas), vienodai kontroliuojant kiekvieno klajinio pluošto svorį. Tokiu būdu vieną ant kitos 3 kartus sluoksniuojama (paskutinis sluoksnius PLA plėvele). Prieš įdedant formą į karšto preso automatizuotą mašiną, įrenginys įkaitinamas iki 200 °C taip pašalinant iš įrenginio galimai susidariusius pelėsius ar kitas medžiagas. Karšto preso automatizuota mašina įkaitinama iki 170 °C (polimero lydymosi temperatūra) įdedama forma, kuri slegiama 1,3 MPA. Išsilydžius PLA įrenginys automatiškai išsijungia, kompozitai išimami tada, kai temperatūra tampa vienoda su kambario temperatūra. Kanapių pluošto kompozito gavimas naudojant PLA schema pateikta 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Kanapių pluošto kompozito gavimas naudojant PLA schema, kai pluoštas yra veikiamas šarmais [27]

Šiame skyriuje aprašyti du būdai kanapių kompozito gamybos. Tačiau galimi ir kitokie gaminimo būdai: purškimas, laminavimas, liejimas ir t.t.. Galutinio produkto gavimo procesą labiausiai įtakoja rišančiosios medžiagos savybės (kietėjimas, temperatūra, slėgis, laikas) ir naudojamos įrangos galimybės. Kanapių pluošto apdorojimas pagerina sukibimą su matrica, tačiau pluošto paveikimas daro didelę įtaką fizikinėms ir mechaninėms savybėms (plačiau apie tai 1.3 skyriuje).

1.4. Kanapių pluošto bio-kompozito mechaninės ir fizikinės savybės

Bio-kompozitams būdingi tie patys mechaniniai ar fizikiniai, (stiprumas, standumas, lankstumas ir atsparumas vandeniui pan.) parametrai, kaip ir visiems kitiems kompozitams. Tačiau bio-kompozitui didelę įtaką daro rišančiosios medžiagos savybės: cheminė sudėtis, kristališkumas ir armuojančios medžiagos savybės: skersmuo, skerspjūvio forma, ilgis, tvirtumas ir standumas, kuris priklauso nuo pluošto skaidulų. Be to, pluošto savybės priklauso nuo klimato, kokiame augalas augo, derliaus nuėmimo sąlygų ir apdorojimo.

Siekiant gauti geriausias kanapių kompozito savybes prieš tai išanalizuojami, kituose tyrimuose gauti duomenys. Tyrimų rezultatai padeda geriau suprasti kanapių pluošto savybes ir elgseną tolimesnėje šio darbo eigoje.

Tyrimė, kurį atliko Taneli Väisänen, Paolo Batello, Reijo Lappalainen, Laura Tomppo – „Kanapių pluošto (*Cannabis Sativa* L.) modifikavimas kompozitams gerinti (angl. *Modification of hemp fibers (Cannabis Sativa.) for composite applications*)“ skirtas skirtingų modifikavimo metodų, t. y. šarminių, fermentinių, garų, efektyvumui įvertinti, siekiant pagerinti kanapių pluoštų savybėms kompozite.

Pluoštų šarmų apdorojimo procedūra: pluoštai dedami į 5 l talpos indus pripildytus NaOH tirpalo (10 % koncentracijos). Po to indai perkeliama į 95 °C temperatūros konvekcine krosnį ir laikomi 1 valandą. Tada pluoštai nuplaunami distiliuotu vandeniu, kol gaunamas nuo plaušelio nuvarvėjusio vandens pH yra maždaug 7. Po plovimo, pluoštai ne trumpiau kaip 24 valandas džiovinami prispaudžiamoje konvekciniėje krosnyje 95 °C temperatūroje.

Fermentinio gydymo proceso pradžioje išmatuodavo fermento (autoriai neįvardija fermento rūšies) preparato (įskaitant pektinazę) aktyvumą, kuris prireikus įvedamas į sistemą. Apytiksliai 30 kg kanapių pluošto apdorojama 39–42 °C temperatūroje, 24–30 valandų. Tirpalo pH per visą procesą buvo 4,1–4,5. Apdoroti pluoštai nuplaunami vandeniu, kol gaunamas nuo plaušelio nuvarvėjusio vandens pH yra maždaug 6.

Garų apdorojimo procedūra yra efektyvus natūralių pluoštų paviršių modifikavimo metodas. Kanapių pluošto paviršius buvo veikiamas 100 °C vandens garais 60 min. garų kiekis 400 ml/min. Po apdorojimo pluoštai džiovinami 50 °C temperatūroje.

Galutinio kompozitų gamybai naudojama epoksidinė derva – Aerofix2 "Aerovac Systems Ltd"). Šio tyrimo rezultatai rodo, kad kanapių pluoštas, pakeistas arba nemodifikuotas, įtrauktas į epoksidinę dervą gali veiksmingai sustiprinti medžiagą. Rezultatai rodo, kad kanapių pluoštai, kuriuose naudojami garai, absorbavo mažiausiai vandens per 28 dienas, esant 65 % santykinei drėgmei ir 20 °C temperatūrai, o fermentinis apdorojimas užtikrina mažiausias vandens absorbcijos vertes esant 85 % santykinei drėgmei ir 20 °C. Kanapių pluošto modifikavimas su šarmais, fermentais ar garais pablogina pluošto tempimo savybes, o tai sumažina geresnes kompozitų savybes. Nepaisant to, šis tyrimas rodo, kad kanapių pluoštai, modifikuoti arba nemodifikuojami, gali veikti kaip veiksmingas epoksidinės dervos sustiprinimas. [28]

Kanapių kompozitas, kai armuojanti medžiaga – PLA. Vienas iš tyrimo rezultatų kuriuos atliko Moyeenuddin A. Sawpan, Kim L. Pickering ir aprašė moksliniame straipsnyje „Kanapių pluošto ir PLA kompozitas (angl. *Hemp Fibre Reinforced Poly(lactic acid) Composite*)“ aiškinamos kanapių kompozito mechaninės savybės. Pastarosios parodė, kad naudojant PLA yra pagerinamas

kompozitų stiprumas ir Jungo (tampros) modulis. Didelė Jungo modulio vertė rodo gerą kanapių pluošto suderinamumą su armuojančia medžiaga, kas yra aktualu renkantis tinkamą medžiagą kompozitų gamybai. Tyrimų rezultatai parodė, kad kompozito stiprumas tiesiogiai priklauso nuo kanapių pluošto kiekio. Taip pat, kompozitas tampa trapesniu esant didesniai kanapių pluošto kiekiui, nes rišančioji medžiaga neužpildo visų tarpų pluošte, todėl atsiranda oro intarpai (kišenės).[29]

Kitame moksliniame straipsnyje, kurį parašė Ruihua Hu ir Jae-Kyoo Lim (aprašyta 1.2 skyriuje), padaryti biologiškai skaidūs kompozitai sustiprinti PLA polimeru. Gaunami dviejų tipų kompozitai: vienas su apdorotu šarmais kanapių pluoštu, antras su neapdorotu. Kanapių pluošto apdorojimas šarmais sumažina 25,9 % bendrą kompozito svorį ir pagerina sukibimą su PLA polimeru, kuris pagerina mechanines savybes lyginant su šarmais neapdorotu pluoštu. Mechaninės savybių rezultatai parodė, kad stipris lenkiant geriausias tada, kai pluoštas yra šarminis ir kai bendrą kompozito masę sudaro apie 40 % kanapių pluošto.

Moksliniame darbe – „Gamtinių pluoštų sustiprintų armuojančia medžiaga mechaninis apibūdinimas (angl. Mechanical Characterisation of Natural Fibre Reinforced Plastics)“, kurį atliko – P. Vieira, C. Romão, A.T. Marques ir J.L. Esteves lyginama sizalio, kanapių pluošto ir stiklo kompozitai. Tyrimo metu nustatyta, kad norint gauti geriausiomis savybėmis pasižymintį kompozitą (naudojant natūralų pluoštą) neužtenka sumaišyti dvi skirtingas medžiagas būtina atsižvelgti į pluošto kokybę ir naudojamą dervos savybes. Tik esant geram pluošto paviršiaus apdorojimui galima gauti gerą sukibimą su matrica. Mokslinio straipsnio pagrindinę išvadą iliustruoja 1.3 lentelės rezultatai. Buvo sukurti 4 skirtingi bandiniai, rišančioji medžiaga (derva – Reapox 520/D526) su: stiklo, sizalio, kanapių pluoštais ir bandinys be armuojančios medžiagos. Rezultatai rodo, kad kanapių pluoštas apie 2,7 kartus yra silpnesnis už stiklo pluošto kompozitą ir 0,5 karto už dervos be armuojančios medžiagos, bandinius. Tačiau kanapių pluošto pailgėjimo rezultatai yra patys mažiausi ir net 5 kartus mažesni už dervos be armuojančios medžiagos gautus rezultatus. [30]

1.3 lentelė. Kompozitų (stiklo, sizalio, kanapių) mechaninių verčių palyginimas [30]

Kompozitas	Stiprumas (MPa)	Modulis tempiant (GPa)	Pailgėjimas (%)
Reapox 520/D526 + 30 % stiklo pluošto	192.4 ± 20.5	10.0 ± 0.9	2.5 ± 0.3
Reapox 520/D526 + 30 % sizalio pluošto	50.9 ± 5.5	5.5 ± 0.5	1.3 ± 0.3
Reapox 520/D526 + 30 % kanapių pluošto	51.1 ± 6.8	7.8 ± 0.5	0.8 ± 0.1
Reapox 520/D526	70	3.5	4

Tyrime, kurį atliko Tina Haghghatniaa, Ali Abbasianb, Jalil Morshedianc – „Kanapių pluoštu sustiprintas termoplastinio poliuretano mišinio: mechaninių savybių tyrimas (angl. *Hemp fiber reinforced thermoplastic polyurethane composite: An investigation in mechanical properties*)“. aiškinamasi geriausias kanapių pluošto ilgis kompozite. Ištirtame pluošto ilgio poveikis tempimo ir lenkimo savybėms, nustatyta, kad optimalus pluošto ilgis yra 15 mm, kurio metu pasiekiamos geriausios mechaninės savybės. Kompozitų su šarmais apdorotu kanapių pluoštu mechaninės savybės yra geresnės už neapdorotus, kurie yra akivaizdesni lenkimo savybių atžvilgiu. Rezultatai rodo, kad didinant kanapių pluošto kiekį kompozite, stiprio lenkiant rezultatai didėja. Tačiau kuomet kompozitą sudaro 40 % kanapių pluošto kiekis, tempimo savybės yra geresnės nei tempiant gryną kanapių pluoštą. Autoriai apibendrinant teigia, kad kanapių pluošto įterpimas į termoplastinį poliuretaną suteikia naujos kartos standų, plastinėmis savybėmis pasižyminčią su geresnėmis lenkimo ir tempimo savybėmis naują medžiagą. [31]

Moksliniame darbe, kurį atliko R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, F. Caputo – „Cheminio apdorojimo poveikis kanapių pluoštu kompozitamas lyginant mechaninėmis savybėmis (angl. *Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites*)“. Tyrime vakuuminis infuzijos procesas naudojamas gaminant kanapių pluoštą sustiprintu epoksidine derva. Vakuuminė infuzija, tai toks metodas naudojant dervą ir vakuuminį slėgį gauti galutinį produktą. Taikant šį metodą reikia turėti specialią įrangą, tačiau yra pasiekiamas geresnis sukibimas, sutaupoma dervos kiekio ir procesas švaresnis. Mechaninių bandymų rezultatai ir SEM (skenuojanti elektroninė mikroskopija) tyrimai rodo, kad kanapių pluoštų apdorojimas trimetoksisilano (3-glicidiloksiopropil) gerina stiprumo ir lankstumo savybes. Šarminis valymas

pašalina ligniną ir hemiceliuliozę iš natūralių pluoštų paviršiaus, tačiau šarmų apdorojimas sukelia pluošto skaidulų yrimą, dėl ko sumažėja kompozitų mechaninės savybės. Silane apdoroti pluošto kompozitai turėjo didesnę tempimo modulį negu neapdorotų ar apdoroti šarmų. Akivaizdu, kad cheminis kanapių pluoštų apdorojimas labai paveikė visas įvertintas mechanines savybes ir pluošto paviršių. [32]

Apibendrinant kompozitų mechaninės ir fizikinės rodikliai priklauso nuo pluošto kokybės, apdorojimo ir nuo rišančiosios medžiagos savybių. Šiame skyriuje išsiaiškinta, kad tinkamiausias pluošto ilgis naudojamas kompozite turėtų būtų apie 15 mm ilgio. Geriausiomis mechaninėmis savybėmis pasižymėjo tie bandiniai, kuriuose buvo 40 % kanapių pluošto. Pluošto šarminis apdorojimas pagerina sukibimą su rišančiąja medžiaga, sumažina kompozito svorį ir pagerina kompozito mechanines savybes (kai rišančioji medžiaga PLA). PLA puikiai dera su kanapių pluoštu, nes yra pakankamai didelis Jungo modulis. Fermentinis apdorojimas užtikrina mažiausias vandens absorbcijos vertes esant 85% santykinei drėgmei ir 20 °C.

1.5. Kanapių pluošto panaudojimas

Šiuo metu pasaulyje padidėjo kanapių sunaudojimas, nes vis daugiau įmonių rūpinasi aplinka ir vartotojais: pluoštinės kanapės naudojimas tekstilei (pavyzdžiui, Suit Supply bei H&M gaminių linijos); autopramonėje (automobilis – BMW i3). Pluoštinė kanapė nėra tik istorinė žemės ūkio kultūra, tai itin moderni, patikima ir ekologiška žaliava pramonei, tekstilei, sveikatai ir mitybai. Kanapių panaudojimas gana platus, nes šios grupės skirtingos augalo dalys pasižymi skirtingomis savybėmis, todėl pritaikymo galimybės yra plačios. Kanapę pagal panaudojimą galima suskirstyti į 3 pagrindines dalis: stiebą, lapus ir sėklas. Nuo senų laikų žinoma, kad kanapių pluoštas yra plačiai naudojamas virvių, tinklų bei burių gamyboje. Tobulėjant technologijoms, mokslininkai išranda naujo tipo medžiagų, kurios yra daugiau atsparesnės ir draugiškesnės aplinkai. Daroma prielaida, kad šios naujos kartos medžiagos, kuriose naudojama kanapės žaliava pakeis gaminiuose įprastas medžiagas (plastiką, metalą). [33,34]

Natūralių pluoštų privalumai:

- natūralaus pluošto gamybos metu mažesnė tarša aplinkai;
- natūralaus pluošto gamybos metu sunaudojamos energijos sąnaudos yra mažesnės nei stiklo pluošto gamyboje;

- CO₂ neutralus, nes išskiriamas CO₂ kiekis gamybos metu yra sunaudojamas augalo augimo procese;
- mažesnė kaina;
- natūralūs pluoštai yra atsinaujinantys ištekliai;
- lengvai biologiškai skaidžios medžiagos, tačiau tai gali būti trūkumas panaudojant produktą;
- naudojant biologines rišamąsias medžiagas galima gauti visiškai perdirbamą medžiagą;
- mažesnio tankio;
- sveikiau naudoti dėl gamtinės kilmės.

Natūralių pluoštų trūkumai:

- didelė parametrų sklaida;
- savybės priklauso nuo auginimo ir perdirbimo sąlygų;
- pluošto skaidulos trumpos, tai reiškia mažesnis pluošto efektyvumą;
- struktūra labai nevienalytė;
- deformacijos netiesinės.

Kanapių pluošto panaudojimo, viena iš sparčiai populiarėjančių šakų – automobilių pramonė. Naudojant rišamąją medžiagą ir kanapių pluoštą išgaunamas kanapių kompozitas, kuris yra lengvas, tvirtas, stiprus (dėl pluošte esančios celiuliozės) ir nerūdija, kaip metalas. Taip pat, vienas iš svarbių aspektų, kanapių kompozito nebūtina perdirbti pvz. automobilių detales iš kanapių kompozito galima užkasti žemėje, o bakterijos ir kiti mikroorganizmai perdirbtų į komposto medžiagą. Šios pagrindinės savybės būtent reikalingos automobilio detalių gamyboje [35,36]. Iš kanapių kompozito gaminamos automobilių kėbulo dalys, salono apdaila bei struktūriniai elementai (1.9 pav.).



a)

b)

1.9 pav. Automobilių dalys iš kanapių pluošto kompozito: a - b) Elektromobilio „BMW i3“ durelių elementai [35;36]

Užsienio universitetuose atliktuose moksliniuose tyrimuose, kurie parodė, kad kanapių kompozitas yra gera alternatyva plačiai naudojamam stiklo pluoštui [29]. Kitų augalų pluoštas tokių gerų rezultatų (stiprumo, lankstumo ir atsparumo smūgiams) neparodė. Tyrimai atskleidė, kad pvz. kanapių kompozito plokštės yra itin tvirtos ir gali atlaikyti stiprius smūgius, todėl galima naudoti automobilių apdailai, bei smulkiems struktūriniais elementams gaminti. Manoma, kad iš kanapių kompozito pagamintos dalys būtų net 30 % lengvesnės, o tai padėtų sumažinti bendrą automobilio svorį. Tai įrodo Australijos ir Anglijos mokslininkų tyrimas, kurio pagrindinė gauta išvada, kad automobilyje esančios metalinės dalys gali pakeisti kanapių kompozitas, kuris kaip žinoma yra lengvesnis. [33]]

Kanapių pluošto kompozitą, automobilių pramonėje yra pritaikę keletas įmonių, tokių kaip: *Fort*, *Lotus*, *Mercedes-Benz*, *BMW*. Pirmąjį automobilį, kuris buvo su augalinės kilmės pluoštu pagamino „Ford“ įmonė, o įmonė „Lotus“ sukūrė automobilį, kuris pasižymėjo kanapių pluošto kėbulu ir spoileriu (1.10 pav.) [36].



a)



b)

1.10 pav. Įmonės „Lotus“ automobilis: a) Automobilio vizualizacija; b) Automobilio realus vaizdas [36]

Baldai iš tokio tipo medžiagų gaminami naudojant presus, pagal galimybes ir poreikius į kanapių pluošto baldus gali būti maišomos ir medienos atraižos, šakelės. Tokių baldų stiprumas ir pritaikomumas priklausys nuo to, kokios papildomos medžiagos būna pasirenkamos. Baldai išlaiko savo estetinę išvaizdą ir nė kiek neatsilieka nuo šiuolaikinių tendencijų (1.11 pav.). Kalbant apie kanapių panaudojimą baldų pramonėje galime teigti, kad tokia medžiaga galėtų sumažinti medžių kirtimą, taip išsaugant gamtą Lietuvos kraštovaizdžius ir sumažinant ekologines bei ekonomines problemas. [39, 40, 41]



1.11 pav. Šiuolaikinių ekologiškų baldų pavyzdžiai [40][41]

Viena iš kanapių liekanų – spaljai, jie panaudojami gaminant baldus, plautuves, lagaminus, statybines medžiagas ir kt. Užsienyje, pavyzdžiui, Prancūzijoje, namai iš kanapių masiškai statomi, o blokeliai gaminami fabrikuose (1.12 pav.). Statybos pagrindinės medžiagos yra spaljai, sumaišyti

su rišamąja medžiaga, dažniausiai tam naudojamos kalkės arba molis. Taip pat galima betoną pilti tiesiai į formas, panašiai kaip pamatus. [42]

Kanapės savyje turi daug celiuliozės, todėl jos nesunkiai sukimba su rišamąja medžiaga. Kalkių kiekis mišinyje priklauso nuo paskirties, kurs bus naudojamas mišinys. Jei apdailai, dekoratyviniam tinkui kalkių dedama daugiau, jei norima geresnės šiluminės varžos kalkių kiekį mažiname. Iš vieno hektaro pluoštinių kanapių galima pastatyti 160 kvadratiųjų metrų pastatą [43].



1.12 pav. Statybiniai blokėliai [43]

Kanapių pluoštas plačiai naudojamas ne tik automobilių pramonėje, bet ir žemės ūkyje. Kanapių pluoštas plačiai naudojamas agrotekstilėje bei geotekstilėje (1.13 pav. a), šios medžiagos, žemės ūkyje, naudojamos naikinant piktžolės, o geotekstilėje kanapių pluoštas naudojamas upių bei autostradų šlaitams sutvirtinti. Taip pat, iš kanapių pluošto veliami ploni kilimėliai, į kuriuos sėjamos pipirinės sėklos. Jos auginamos be jokios žemės, tik laistomos vandeniu. Šie kilimėliai naudojami auginant ir pramoniniu būdu, tinka ir želdiniams sodinti. Kilimėlio privalumas apsaugoti augalą nuo žolių, erozijos, taip pat, jis išsaugo drėgmę. Kanapių spalvių granulės labai tinka kaip biokuras, yra tokios pat kaitrios, kaip ąžuolas. [44]



a)

b)

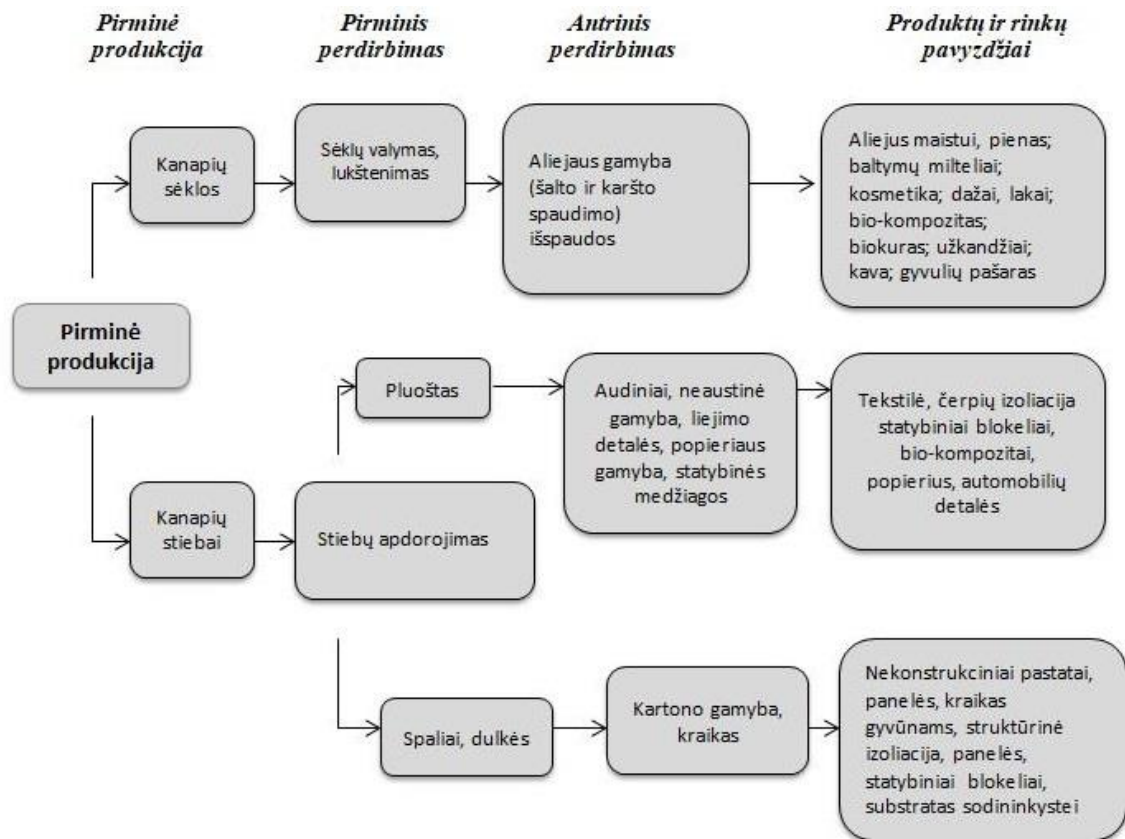
1.13 pav. Statybų pramonėje ir ne tik naudojamos medžiagos: a – Geotekstilė [45]; b – kanapių šiltinimo vata [46]

2. EKONOMINIS PAGRINDIMAS

Šiuolaikinėje gamyboje didelis dėmesys skiriamas produktų perdirbimui, atsinaujinimui, ekologiškai ir švariai gamybai. Kanapės priskiriamos atsinaujinantiems šaltiniams. Remiantis literatūros analize, kanapės auginimo metu pesticidai nenaudojami arba ne didesnis jų kiekis nei džiuto ar kenafo, o gamybos metu naudojami procesai nėra žalingi gamtai. Palyginimui, naftos pagrindu pagamintos plastikinės medžiagos taip pat gali būti perdirbamos, tačiau procesui yra reikalingi papildomų cheminių medžiagų bei įrenginių išteklių. Kanapių kompozitai gali būti perdirbami kelis kartus iš eilės visai kaip popierius. Taip pat, kompozito nusidėvėjimo atveju, pastaruosius paprasčiausiai galima utilizuoti užkasant į žemę, nes jie yra biologiškai skaidūs ir švarūs. Kompozitai per laiką suyra to pasekoje gaunamas humusas. [47]

Kanapių perdirbimas yra dvejopas – pirminis ir antrinis (2.1 pav.) [48]. Pirminis perdirbimas apima:

- Sėklų perdirbimą į aliejų ir kitus produktus.
- Pirminį stiebų perdirbimą į pluoštą ir spalvius.



2.1 pav. Pluoštinių kanapių perdirbimo vertės grandinė [48]

Kanapių sėklų perdirbimas lyginant su stiebais apima mažiau vertės grandžių Aliejaus gamybos metu sėklos išvalomos ir spaudžiamos naudojant tam skirtus mechanizmus. Gamybos metu gaunamos šalutinė produkcija – išspaudos, kurios gali būti naudojamos gyvūnų pašarams. Aliejaus panaudojimas: maistui, kosmetikai, dažams, pašarams ir pan.

Kanapių stiebų perdirbimo grandinė sudėtingesnė, nes apima plačias panaudojimo galimybes. Iš kanapių stiebų, kaip jau žinoma iš literatūros analizės, gaunamos dviejų tipų produkcija – pluoštas ir kaip šalutinė spalvai. Atsižvelgiant į stiebo sudėtį 15-20 % sausos žaliavos sudaro pluoštas, kuris naudojamas tekstilės, izoliacinių medžiagų, popieriui, bio-kompozitų ir kitokių produktų gamyboje. Stiebo šalutinė produkcija – spalvai sudaro 60-70 % žaliavos masės tūrio. Spalvai naudojami statybose, izoliacinių medžiagų, kraiko gyvūnams ir kitų produktų gamybai [48,49]

Pluoštinių augalų perdirbimo gamyklų rinka dar neišplėtotą, todėl vykdomi įvairūs moksliniai tyrimai, skirti praplėsti kanapių panaudojimo galimybes. Kanapės ar kitų pluoštinių augalų (linų, kenofo ir pan.) naudojamos tos pačios perdirbimo technologijos, skiriasi tik kai kurių procesų parametrai. Perdirbimo gamyklos paprastai yra įdiegiamos per pakankamai trumpą laiką ir tam nereikia brangios technikos. Pastarosios perdirbimo gamyklos yra mobilios ir sunaudoja mažai elektros energijos. Didžiausias trūkumas kanapių pluošto gamintojams yra modernių derliaus nuėmimo ir ekonomiškų perdirbimo technologijų trūkumas. Žinant, kad šiuo metu yra mažai gamintojų, tačiau esti vis didėjantis atsinaujinančių žaliavų poreikis, mokslininkai ir ekonomikos tyrėjai pateikia skaičiavimus skirtus perdirbimui. Mokslininkai susiduria su problema, kai veikiančios įmonės duomenys laiko konfidencialiais, todėl sudaryti perdirbimo išlaidų modelį gana sudėtinga [48, 51, 52].

Leibniz'o žemės ūkio inžinerijos institutas (*Leibniz Institute for Agricultural Engineering*) išsamiai ištyrė visus pluoštinių kanapių perdirbimo etapus. Didelį dėmesį skyrė optimalios perdirbimo linijos sukūrimui. Leibniz'o žemės ūkio inžinerijos institutas sukūrė perdirbimo liniją, kuri buvo įdiegta ir naudota tris metus, pramoniniu mastu. [51,52]

Paskaičiuota, kad didžiausias pelnas gaunamas, kai perdirbama ne mažiau kaip 2,5 t/h kanapių pluošto, o investicinis kapitalas sudaro apie 2,8 mln. eurų. Remiantis Leibniz'o žemės ūkio inžinerijos instituto duomenis nustatyta, kad moderni gamyklą 5 t/h pluoštinių kanapių stiebų galėtų gauti apie 40 Eur/t gryno pelno perkant kanapių stiebus po 155 Eur/t ir patiriant nuo 7 iki 13 Eur/t transportavimo sąnaudų. Didesnė perdirbimo gamykla, turinti 8 t/h pluoštinių kanapių stiebų perdirbimo pajėgumus gautų apie 55 Eur/t pelno, nors investicijų poreikis išaugtų iki 4,5 milijonų

eurų. Pastarajai perdirbimo įmonei naudotų beveik dvigubai daugiau žaliavos, todėl patirtų didesnius transportavimo išlaidas. Todėl mažinant išlaidas svarbu, kad žaliavos tiekėjai būtų kuo mažiau nutolę nuo perdirbimo gamyklos. Optimali perdirbimo apimtis turėtų būti bent 4 t/h, jei pluoštinių kanapių stiebai kainuotų ne mažiau kaip 150 Eur/t [52]. Kanapių pluošto perdirbimo sąnaudos pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Kanapių pluošto perdirbimo sąnaudos[52]

Išlaidos	Pajėgumai	
	5 t/h	8 t/h
Investicijų poreikis	2,8 mln. Eur	4,5 mln. Eur
Kanapių stiebai	155 Eur/t	155 Eur/t (sunaudojama dvigubai daugiau žaliavos)
Transportavimas	7-13 Eur/t	7-13 Eur/t (patiriami didesni transportavimo kaštai)
Pajamos	40 Eur/t	55 Eur/t

Kuriant kanapių stiebų perdirbimo į pluoštą gamyklą, suskaičiuota, kad vidutiniškai gamykla perdirbanti apie 4200 t kanapių pluošto per metus, t. y. turėdama pajėgumus 3 t stiebų/h, dirbdama 8 h per dieną ir 175 dienas per metus (dirbant 5 darbo dienas per savaitę vidutiniškai 9 mėnesius), generuotų 289 EUR/t produkcijos pajamų (2.2 lentelė) arba 1,2 mln. EUR [48]

2.2 lentelė. Vidutinės pajamos, gaunamos perdirbant kanapių stiebus [48]

Pluošto dalis	Dalis, proc.	Numatoma vertė Eur/kg
Pluoštas	15-20	0,12
Išvalyti spalvai	40-45	0,09
Pluošto ir spalių mišinys	20-25	0,07
Dulkės ir dalelės	15-20	-
Iš viso pajamų	100	0,28

Dabartinėje Lietuvos situacijoje yra labai mažai įmonių auginančių pluoštinių kanapių. Šioje rinkoje daugiausiai užima kanapių aliejaus spaudimas nedideliais kiekiais. Nors stiebų panaudojimo galimybės yra plačios, tačiau ši rinkos dalis Lietuvoje neišplėtotą. Siekiant sukurti didesnę pridėtinę vertę, ateityje reikalinga kooperacija perdirbimui vykdyti. Tokiu būdu kanapės būtų auginamos ne tik sėkloms ir aliejui išgauti, tačiau iš stiebų išgauti pluoštą. Toks rinkos

praplėtimas kanapės stiebų perdirbimo srityje sukurtų didesnės pridėtinės vertės produktus, bei sukurtu papildomas darbo vietas.

3. TYRIMŲ METODIKA

3.1 Bio–kompozitų tyrimų metodika

Siekiant išsiaiškinti bio-kompozito stiprumą, standumą, stabilumą tyrime atliekamos mechaninės savybės: trūkimo savybės tempiant ir savybės lenkiant. Vienas iš svarbiausių kanapių bio-kompozitų mechaninių bandymų yra tempimas. Inžineriniu požiūriu gaunami rodikliai stiprumas, tamprumas ir plastiškumas atspindi svarbiausias medžiagos mechanines savybes.

Tempimo ir lenkimo bandymai atlikti KTU gamybos inžinerijos laboratorijoje naudojant „Thinius Olsen–H25KT“ (f. Tinius Olsen, Redhill, Jungtinė Karalystė) mašiną (3.1 pav.) bei jos kompiuterinę programinę įrangą.

Mašina „Thinius Olsen–H25KT“ turi elektronines jėgos bei deformacijos matavimo ir kompiuterizuotą duomenų užrašymo sistemas, o duomenis galima skaičiuoti naudojant specializuotą kompiuterinę programą. Šiomis mašinomis bandiniai tiriami plačiame jėgų verčių intervale, nes galima keisti elektroninius jėgų matavimo įtaisus.

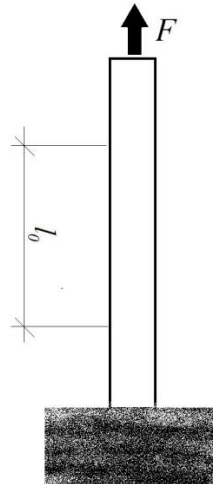


a)

b)

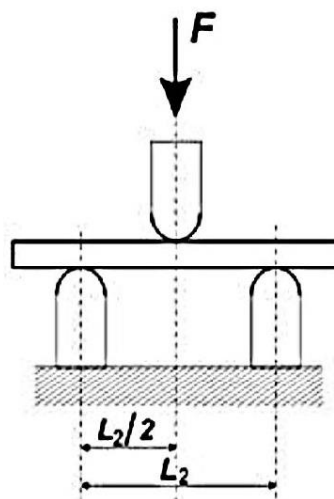
3.1 pav. a) Mašina „Thinius Olsen–H25KT“; b) Tempimo metu naudojami spraustuvai;

Bio-kompozitų trūkimo savybės tempiant, nustatytos pagal standarto LST EN ISO 13934-1 [54] reikalavimus, esant 100 mm/min viršutinio veržtuvo judėjimo greičiu ir naudojant bandinius, kurių darbinės dalies ilgis – 60 mm. Bandinio tempimo principinė schema pateikta 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Bandinio tempimo principinė schema (l_0 – darbinės dalies ilgis; F – deformacijos jėgos kryptis)

Bio-kompozitų savybės lenkiant nustatytos pagal LST EN ISO 178 [55] metodo reikalavimus, esant 10 mm/min viršutinio spraustuvo judėjimo greičiui. Atraminės sijos spindulys pagal atliktus skaičiavimus parinktas 2 mm, apkraunančios sijos spindulys – 5 mm, įlinkio aukštis – 10.8 mm, o atstumas tarp atramos taškų – 35 mm. Bandinių apkrovos greitis 6 mm/min. . Bandinio lenkimo principinė schema pateikta 3.1.3 paveiksle.



3.3 pav. Bandinio principinė lenkimo schema (L_2 – atstumas tarp atramų; F – deformuojančios jėgos kryptis)

Analizuojant tempimo ir lenkimo kreives bio-kompozito stiprumo ir deformacinės savybės stipris tempiant ir lenkiant, stipris takumo riboje, modulis tempiant ir lenkiant ir ištįsa trūkio metu. Medžiagos stipris – gebėjimas nesuyrant išlaikyti sudarytus įtempius [56].

$$\sigma = \frac{F_{tr}}{b \cdot d}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\gamma} = \frac{F_{\gamma}}{b \cdot d}; \quad (2)$$

čia: σ – stipris tempiant, MPa; σ_{γ} – stipris takumo riboje, MPa; F_{tr} – trūkimo jėga, N; F_{γ} – jėga takumo riboje, N; b – bandinio plotis, mm; d – bandinio storis, mm;

$$\sigma_l = \frac{3F_{0l} L_0}{2b \cdot d^2} \quad (3)$$

čia: σ_l – stipris lenkiant, MPa; F_{0l} – pradinė lenkimo jėga, N; L_0 – atstumas tarp atramų, mm.

$$E_{jt} = \frac{\sigma_j}{\varepsilon_j}; \quad (4)$$

$$E_l = \frac{L_0^3 C_l}{48 I}; \quad (5)$$

čia: E_{jt} – modulis tempiant, MPa; σ_j – stipris tempiant Huko zonoje, MPa; ε_j – santykinė deformacija Huko zonoje, %; E_l – modulis lenkiant, MPa;

C_l – standumo koeficientas Huko dėsnio veikimo zonoje, I – lenkiamo bandinio skerspjūvio inercijos momentas:

$$I = \frac{bd^3}{12}. \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (7)$$

čia: ε – ištįsa trūkio metu, %; l_0 – pradinis darbinės zonos ilgis mm, l – bandinio darbinės zonos ilgis trūkio metu, mm.

3.2 Statistiniai duomenys

Siekiant atlikti eksperimentų duomenų analizę, skaičiuojami šie statistiniai rodikliai [57]:

- Aritmetinis vidurkis \bar{x} ;
- Vidutinė kvadratinė nuokrypa S ;
- Variacijos koeficientas V ;
- Absoliutinė atsitiktinė paklaida Δ_a ;
- Santykinė absoliutinė paklaida δ_a ;

Gautų rezultatų vidutinės (aritmetinės) reikšmės \bar{x} apskaičiuojamos. Vidurkis (aritmetinis) išreiškiamas visų stebėjimo duomenų suma padalijama iš jų skaičiaus.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i \quad (8)$$

čia \bar{x} – aritmetinis vidurkis; x_i – bandymų rodiklių vertės; n – elementariųjų bandymų eksperimento taške skaičius;

Bandymų rezultatų sklaida apibūdinama vidutine kvadratine nuokrypa, parodydama elementariųjų bandymų verčių nutolimą nuo aritmetinio vidurkio. Apskaičiuojama pagal formulę:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (9)$$

čia S – vidutinė kvadratinė nuokrypa; x_i – bandymų rodiklių vertės; \bar{x} – aritmetinis vidurkis; $n - 1$ – laisvės laipsnių skaičius;

Variacijos koeficientas įvertina rezultatų sklaidą atsižvelgiant į elementariųjų bandymų skaičių ir į vidutinę bandymų vertę. Apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (10)$$

čia V – variacijos koeficientas; S – vidutinė kvadratinė nuokrypa; \bar{x} – aritmetinis vidurkis;

Santykinė absoliutinė paklaida apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta_a = \frac{t_a \cdot S}{\sqrt{n}} \cdot 100\% \quad (11)$$

čia Δ_a – santykinė absoliutinė paklaida; t_a – Stjudento kriterijus; S – vidutinė kvadratinė nuokrypa; n – elementariųjų bandymų eksperimento taške skaičius;

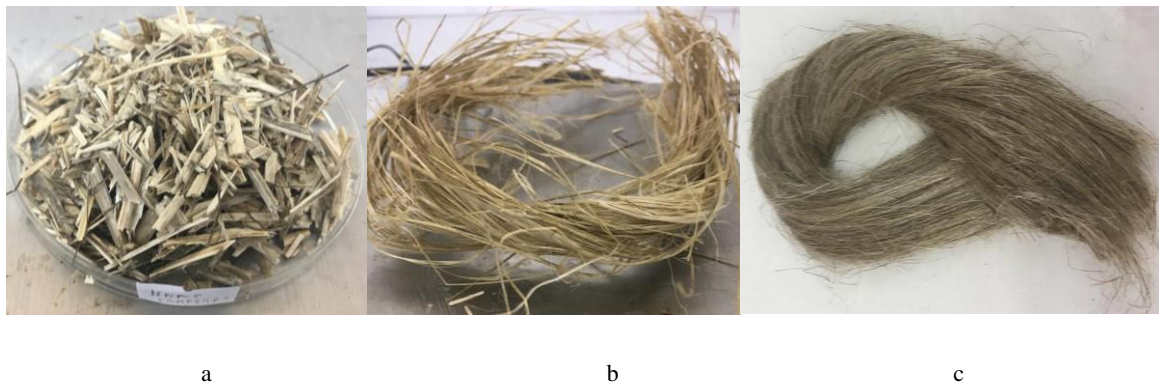
Santykinė absoliutinė paklaida parodo rezultatų sklaidą atsižvelgiant į elementariųjų bandymų skaičių ir vidutinę bandymų vertę, išreiškiamą procentais. Apskaičiuojama pagal formulę:

$$\delta_a = \frac{\Delta_a}{\bar{x}} \quad (12)$$

čia Δ_a – absoliutinė atsitiktinė paklaida, %; \bar{x} – aritmetinis vidurkis;

3.3 Bio–kompozitų gamybai naudojamos medžiagos

Kiekvienas kompozitas susideda iš dviejų medžiagų: armuojančios ir rišančiosios. Tyrimo metu pasirinktos trijų tipų armuojančios medžiagos: kanapių spaliai (3.3.1 pav. a), nešukuotas pluoštas (3.3.1 pav. b), šukuotas pluoštas (3.3.1 pav. c). Kanapių spaliai ir pluoštas gauti iškart išdžiovinti ir paruošti naudojimui. Rišančioji medžiaga – poli(pieno rūgšties) 6201D (PLA) granulės.



3.4 pav. Armuojančios medžiagos: a - kanapių spaliai; b - nešukuotas kanapių pluoštas; c – šukuotas kanapių pluoštas;

Poli(pieno rūgštis) arba polilaktidas (PLA), biologiškai skaidomas poliesteris, pagamintas iš įvairios augalinės kilmės produktų (kukurūzų, bulvių, cukrinių runkelių ir t.t.). Naudojamas biomedicinje, pakavime, tekstilės pluoštų ir techninių daiktų gamyboje. [58]. Pagrindinės medžiagos savybės: biologinis suderinamumas, stiprumas, standumas ir lankstumas, tačiau mažas atsparumas smūgio jėgai (pagrindinės fizikinės savybės pateiktos 3.1 lentelėje). [59,60]

3.1 lentelė. Poli(pieno rūgšties) granulių 6201D pagrindinės fizinės charakteristikos

Fizikinė savybė	Vertė*
Santykinė klampa	3,1
Tankis, g/cm ³	1,24
Takumo indeksas, g/10 min (210°C)	15–30
Lydymosi temperatūra, °C	16–170

*vertės pateiktos gamintojo

3.4 Bio-kompozitų paruošimas ir gamyba

Bio-kompozitų gamyba atlikti 2018 metais, Lietuvos tekstilės instituto, medžiagų paruošimo ir gamybos laboratorijoje. Bandiniai atlikti kondicinėse sąlygose, t.y. 65 % (± 4 %) drėgmė ir 20 °C (± 2 °C) temperatūra.

Kompozitų bandinių gamybai naudojamas 0,8 \pm 0,1 mm storio plėvelės (3.5 pav.), gautos išlydant poli(pieno rūgšties) 6201D granules laminavimo mašinoje *NOVA 45* (*Reliant MACHinery*, Jungtinė Karalystė 3.6 pav.). Laminavimo mašina pagrindiniai komponentai yra du į skirtingas puses besisukantys volai, kurie įkaitinami 180–190 °C temperatūros. Ant popieriaus užberama 10 g granulių, uždengiama kitu popieriaus lapu ir paleidžiama per laminavimo mašiną. Popierius naudojamas siekiant išvengti galimų dulkių ar nešvarumų esančių aplinkoje ar įrenginio viduje. Granulės veikiant temperatūrai ir 250 s 48.3 kPa slėgiui lydosi iki vientisos masės. Ciklas kartojamas kol gaunama norimo storio plėvelė. Gauta plėvelė yra orientuota išilgine kryptimi dėl į skirtingas puses besisukančių volų.



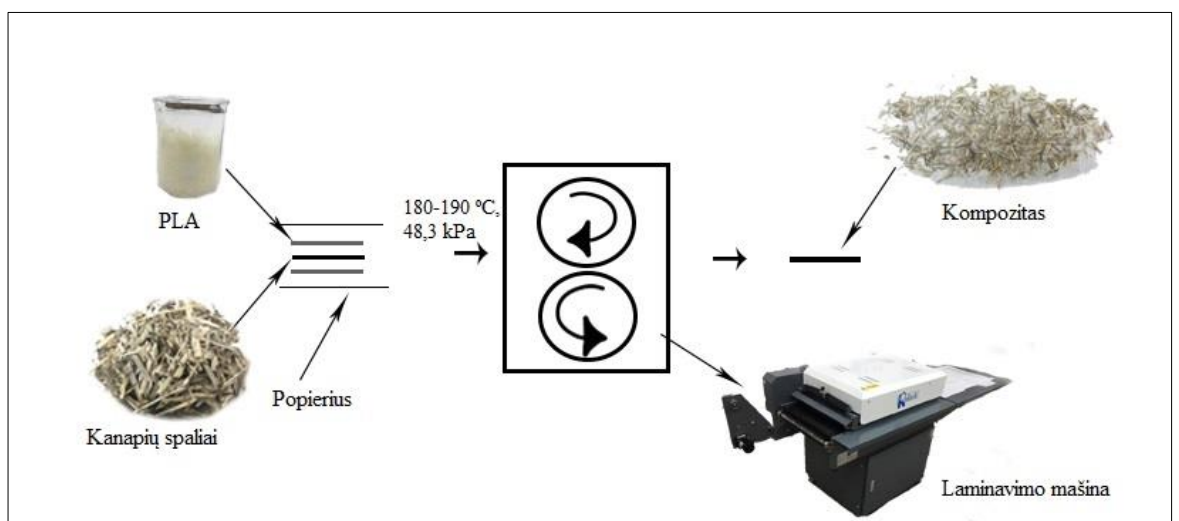
3.5 pav. PLA plėvelė



3.6 pav. Laminavimo mašina *NOVA 45* (*Reliant MACHinery*, Jungtinė Karalystė)

Tolimesniame procese kanapių pluoštas arba spaliai klojami tarp dviejų (ar daugiau) PLA plėvelių ir laminuojamos tuo pačiu įrenginiu, parenkant tas pačias sąlygas. Ieškant geriausių kompozito mechaninių savybių sukurtos skirtingos struktūros kompozitai. Kanapių bio-kompozito schema pateikta 3.7 paveiksle. Gauti kompozitai:

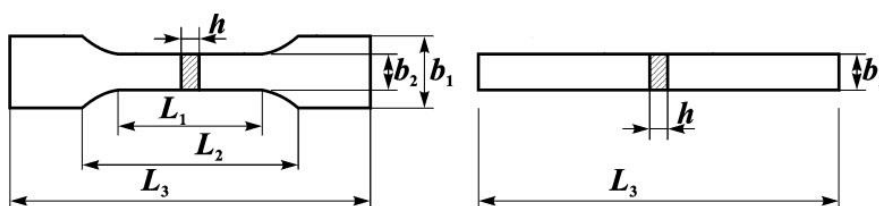
1. PLA plėvelė + kanapių spalai + PLA plėvelė.
2. PLA plėvelė + kanapių spaliai + PLA plėvelė + kanapių spaliai + PLA plėvelė.
3. PLA plėvelė + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi + PLA plėvelė.
4. PLA plėvelė + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine ir skersine kryptimi (10 g)+ PLA plėvelė.
5. PLA plėvelė + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi + PLA plėvelė + nešukuotas kanapių pluoštas skersine kryptimi + PLA plėvelė.
6. PLA plėvelė + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine ir skersine kryptimi (10 g) + PLA plėvelė + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine ir skersine kryptimi (10 g)+ PLA plėvelė.
7. PLA plėvelė + šukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi + PLA plėvelė + laminavimas +šukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi + PLA plėvelė.
8. PLA plėvelė + šukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi + PLA plėvelė.



3.7 pav. Bio-kompozito gamybos schema

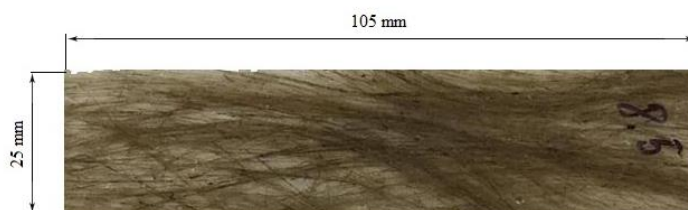
3.5 Bio-kompozitų bandinių paruošimas

Įprastai tempimo bandymams naudojami dviejų (gali būti ir trijų) formų bandiniai: kastuvėlio ir juostelės formos (3.8 pav.). Bandinio forma parenkama pagal standartus. Dvigubo varpo formos bandiniai naudojami tempiant plastikus, kurių santykinė ištįsą yra didelė (pavyzdžiui, polietileną (PE), plastifikuotą polivinilchloridą (PVC), gumas kompozitų, ir pan.). Stiklaplasčių, kurie armuoti pluoštiniais užpildais, bei įvairių tekstilinių medžiagų (audinių, mezginių) bandymams naudojami – juostelės formos bandiniai.



3.8 pav. Bandinių tipai: dvigubo varpo ir juostelė

Kanapių bio-kompozitams bandymams atlikti pasirinktas juostelės tipo formos bandiniai. Tokį pasirinkimą lėmė kompozito stikliškumo, tai lėmė PLA . . Bandinio ilgis 105 mm, plotis 25 mm (3.9 pav.). Juostelės formos bandiniai iškertami naudojant giljotinos įrankį (3.10 pav.). Kiekvienas bandinys iš kanapių kompozito lakšto iškertamas kiekvieną kartą atskirai taip užtikrinant tikslius gabaritinius matmenis.



3.9 pav. Kanapių kompozito bandinio gabaritiniai matmenys







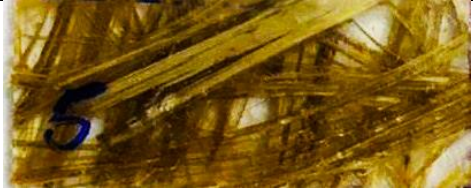



3.10 pav. Giljotininis peilis

4. TYRIMŲ REZULTATAI

Remiantis gamybos metodu gauti aštuonių grupių bandiniai. Kiekvienam tempimo ir lenkimo eksperimentui atlikti naudota po 6 tos grupės paruoštų bandinių. Gamybos metu gauti bio-kompozitai pateikti 4.1 lentelėje. Visi bandymo metu gauti duomenys aprašomi naudojant pagal lentelėje nurodyto „bandinio grupės numerį“.

4.1 lentelė. Gamybos metu gauti bio-kompozitai

Bandinio gr. nr.	Sudėtis	Storis mm	Nuotrauka
1	PLA plėvelė (10 g) + kanapių spalai (5 g) + PLA plėvelė (10 g) <i>Trumpinys:</i> pl/sp/pl=40/20/20 %	1,6	
2	PLA plėvelė (10 g) + kanapių spalai (5 g) + PLA plėvelė (10 g) + kanapių spalai (5 g) + PLA plėvelė (10 g) <i>Trumpinys:</i> pl/sp/pl/sp/pl=20/20/20/20/20 %	2,9	
3	PLA plėvelė (10 g) + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi (5 g) + PLA plėvelė (10 g) <i>Trumpinys:</i> pl/nkp/pl=40/20/40 %	1,2	
4	PLA plėvelė (10 g) + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine ir skersine kryptimi (10 g)+ PLA plėvelė (10 g) <i>Trumpinys:</i> pl/nkp/pl=25/50/25 %	1,2	

5	<p>PLA plėvelė (10 g) + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi (5 g) + PLA plėvelė (10 g) + nešukuotas kanapių pluoštas skersine kryptimi (5 g)+ PLA plėvelė (10 g)</p> <p><i>Trumpinys:</i> pl/nkp/pl/nkp/pl=25/12,5/25/12,5/25%</p>	1,6	
6	<p>PLA plėvelė (10 g) + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine ir skersine kryptimi (10 g) + PLA plėvelė (10 g) + nešukuotas kanapių pluoštas išilgine ir skersine kryptimi (10 g)+ PLA plėvelė (10 g)</p> <p><i>Trumpinys:</i> pl/nkp/pl/nkp/pl=20/20/20/20/20 %</p>	2,9	
7	<p>PLA plėvelė (10 g) + šukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi (5g)+ PLA plėvelė (10 g) + laminavimas +šukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi (5g) + PLA plėvelė (10 g)</p> <p><i>Trumpinys:</i> pl/škp/pl/škp/pl=25/12,5/25/12,5/25 %</p>	1,6	
8	<p>PLA plėvelė (10 g) + šukuotas kanapių pluoštas išilgine kryptimi (5 g) + PLA plėvelė (10 g)</p> <p><i>Trumpinys:</i> pl/škp/pl=40/20/40 %</p>	1,2	

4.1 Bio-kompozitų tempimo rezultatai

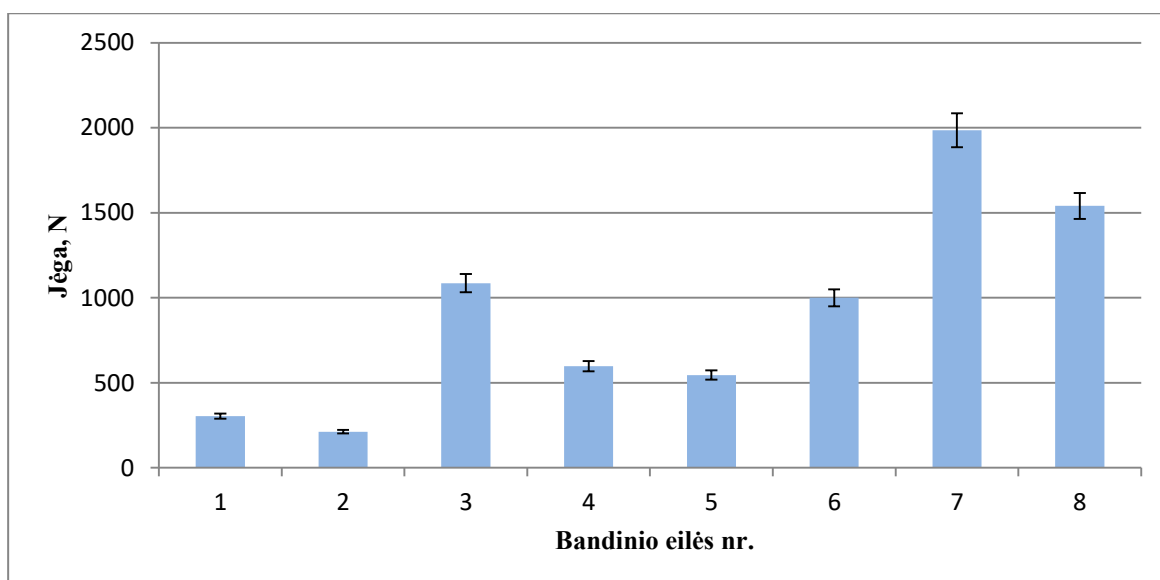
Atlikus bio-kompozito tempimo tyrimą, gautų rezultatų vidutinės trūkimo reikšmės pateiktos histogramoje (4.1 pav.). Statistiniai duomenys (vidutinė kvadratinė nuokrypa, absoliutinė atsitiktinė paklaida, variacijos koeficientas, santykinė atsitiktinė paklaida) pateikta 4.2 lentelėje.

Pirmoje histogramoje (4.1pav.) pateikti atskirų kompozito grupių gautos trūkimo vertės. Rezultatuose pateikti kiekvienos grupės gauti vidurkiai, trūkimo metu. Histogramoje pastebima, kad

7 grupės kompozito bandiniai yra stipriausi. Jų trukimo jėgos vidurkis yra 1985 N. Silpniausi bandiniai yra 2 grupės, trūkimo jėgos vidurkis 212 N, tai daugiau, kaip 9 kartus silpnesni už 7 grupės. Kompozitai su nešukuotu kanapių pluošto užpildu stipriausi bandiniai 3 grupės, tačiau tai beveik 2 kartus mažesnė vertė nei 7 grupės.

4.2 lentelė. Bio-kompozitų trūkimo jėgos nustatymo vidutinės reikšmės

Ban dinio gr. nr	Sudėtis	Vidutinė trūkimo jėga, N	Vidutinė kvadratinė nuokrypa, N	Absoliutinė pasitiktinė paklaida, N	Variacijos koeficienta s, %	Santykinė atsitiktinė paklaida, %
1	pl/sp/pl=40/20/20 %	304	3,1	±1,2	1	±0,39
2	pl/sp/pl/sp /pl=20/20/ 20/20/20 %	212	8,9	±3,4	4	±1,6
3	pl/nkp/pl= 40/20/40 %	1086	21	±8,1	1,9	±0,7
4	pl/nkp/pl= 25/50/25 %	620	9,8	±3,8	1,6	±0,6
5	pl/nkp/pl/n kp/pl=25/1 2,5/25/12, 5/25%	545	3,5	±1,4	0,6	±0,3
6	pl/nkp/pl/n kp/pl=20/2 0/20/20/20 %	1000	14,7	±5,7	1,5	±0,6
7	pl/škp/pl/š kp/pl=25/1 2,5/25/12, 5/25 %	1985	4,9	±1,9	0,3	±0,09
8	pl/škp/pl= 40/20/40 %	1460	14,3	±5,5	0,9	±0,4



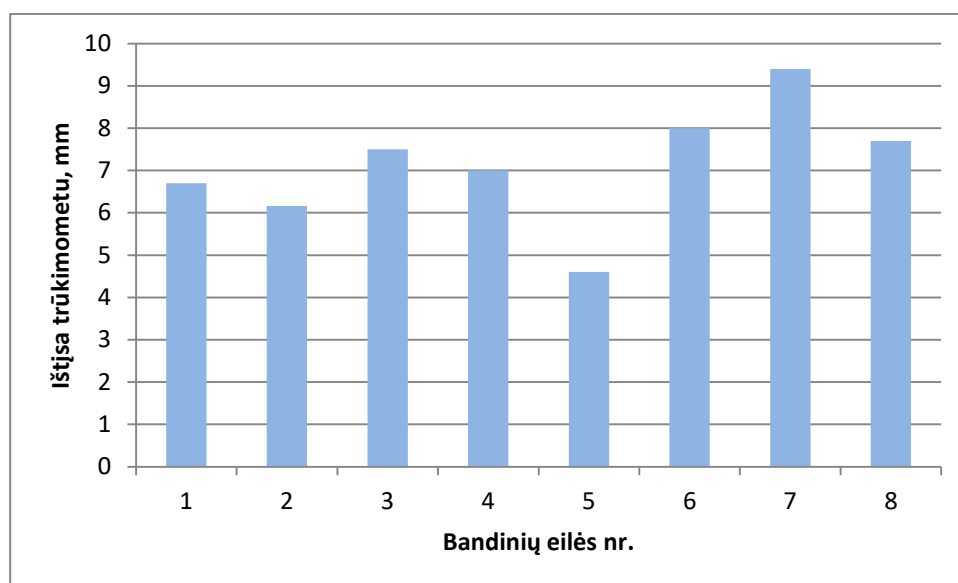
4.1 pav. Bio-kompozitų trūkimo jėgos palyginimas

Analizuojant gautus tempimo duomenis (4.3 lentelė), apskaičiuota, kad stipriausi 8 grupės bandiniai. Mažiausia reikšmė yra 2 grupės bandiniams, tai apytiksliai 17 kartų mažesnė skaitinė vertė nei 8 grupės bandinių. Stipriausi kompozitai, tada kai naudojamas šukuotas kanapių pluoštas, silpniausi, kai armuojanti medžiaga – spaliai. Tokį rezultatą galėjo lemti blogas sukibimas tarp armuojančiosios ir rišančiosios medžiagos. Didžiausia skaitinė vertė modulis tempiant pastebima 8 grupės bandiniuose. Pastarosios bandinio grupėje gaunamas geriausias ryšys tarp šukuoto kanapių pluošto ir PLA plėvelės.

4.3 lentelė. Bio-kompozitų stipris tempiant, jėga takumo riboje ir modulis

Bandinio gr. nr.	Sudėtis	Stipris tempiant, MPa	Ištįsą trūkimo metu %	Modulis tempiant, MPa
1	pl/sp/pl=40/20/20 %	7,4	6,7	110
2	pl/sp/pl/sp/pl=20/20/20/20/20 %	3,2	6,16	52
3	pl/nkp/pl=40/20/40 %	38	7,5	507
4	pl/nkp/pl=25/50/25 %	21	7	300
5	pl/nkp/pl/nkp/pl=25/12,5/25/12,5/25%	14	4,6	304
6	pl/nkp/pl/nkp/pl=20/20/20/20/20 %	13,2	8	165
7	pl/škp/pl/škp/pl=25/12,5/25/12,5/25%	49,9	9,4	531
8	pl/škp/pl=40/20/40 %	52,4	7,7	680

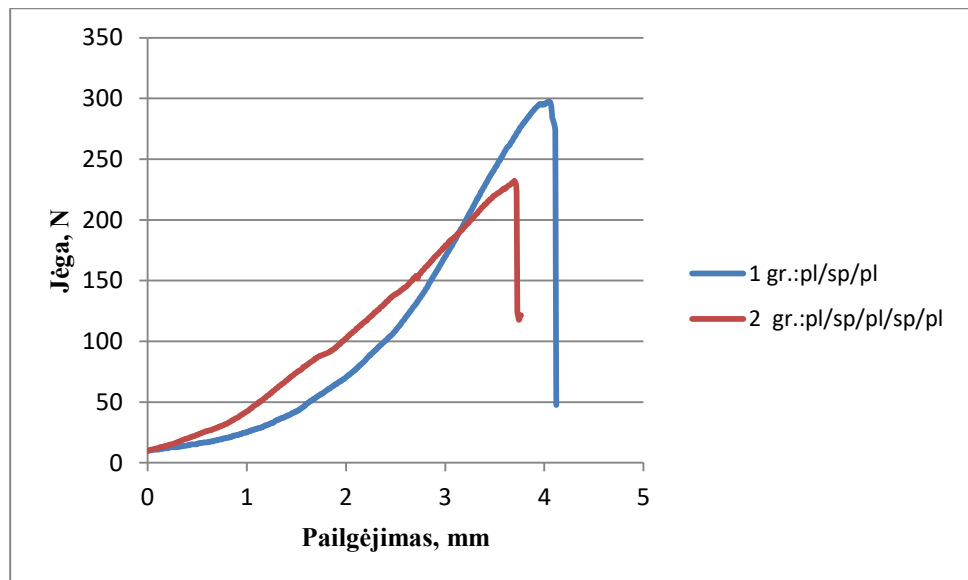
Paveiksle 4.2 esančioje histogramoje pateikiamas kiekvienos grupės deformacijos vertės. Remiantis duomenimis didžiausią ištįsą pasiekė 6 ir 7 grupės bandiniai, o mažiausią 5 grupės bandiniai. Lyginant trūkimo jėgos ir pailgėjimo histogramas, galima daryti išvadą, kad jėgos ir deformacijos vertės vienos nuo kitos priklauso. Kuo didesnė jėgos trūkimo vertė tuo didesnė deformacijos reikšmė.



4.2 pav. Bio-kompozitų deformacija tempimo metu

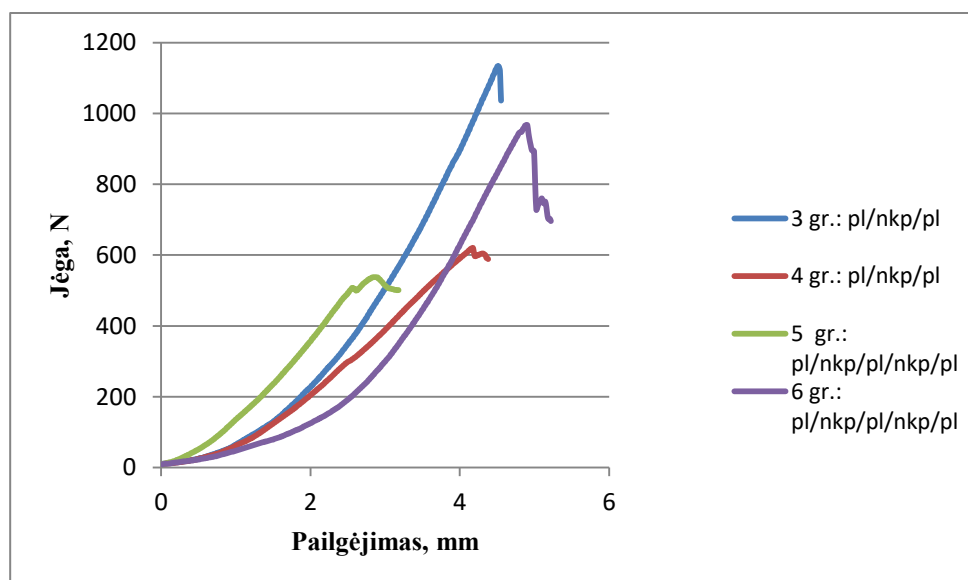
Toliau tempimo duomenys lyginami pagal armuojančios medžiagos tipą. Tikrinama galimą įtaką, nuo naudojamos medžiagos, kiekio ar rašto. Rezultatuose pateikti vertės artimiausios, to bandinių grupės aritmetiniam vidurkiui.

Paveiksle 4.3 pateikti tempimo duomenys, kai armuojanti medžiaga – kanapių spaljai. Lyginant gautus rezultatus 2 grupės bandinys silpnesnis, nei 1 grupės. Remiantis literatūros analize, bandiniai, kuriose buvo 40 % armuojančios medžiagos kompozitai buvo stipriausi. Šiuo atveju, šis teiginys netinka, nes 2 grupės bandinius sudarė 40 % spalių kompozito, o 1 grupės bandiniai gavo stipresni, kai kanapių spaljai sudarė 20%. Tokį rezultatą galėjo įtakoti netolygus kanapių spalių pasiskirstymas, nevienodas spalių storis bei ilgis. Antros grupės bandiniai silpnesni taip pat, dėl didelio kanapių spalių kiekio, nes PLA derva neužpildo visų ertmių ir lieka oro tarpai. Galima daryti prielaidą, kad gerinant sukibimą tarp kanapių spalių ir PLA reiktų prieš tai chemiškai apdoroti arba naudoti kitas rišamąsias medžiagas.



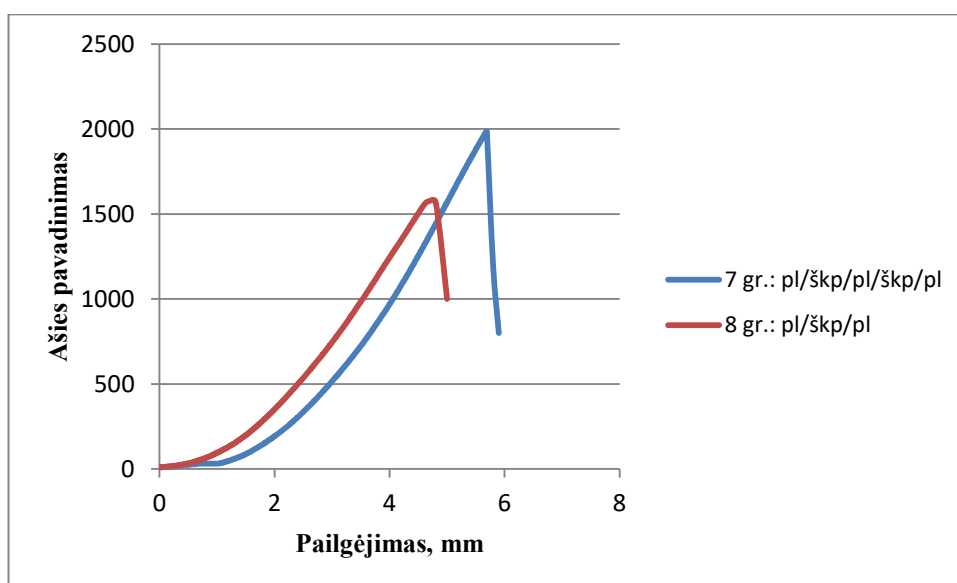
4.3 pav. Kanapių spalių tempimo grafikas

Tempimo rezultatai (4.4 pav.), kai armuojanti medžiaga – nešukuotas kanapių pluoštas. Lyginant gautus duomenis tarp spalių ir nešukuoto pluošto, pastarųjų 6 kartus didesnė jėga trūkimo metu. Rezultatą lėmė, geresnis sukibimas tarp rišančiosios ir armuojančios medžiagos. Tačiau paveiksle pastebima, ne tolygų kreivių pasiskirstymą. 3 ir 6 grupės stiprumas panašus, kaip ir likusių dviejų grupių. Tokį duomenų išskirimą įtakojo nevienodas storis ir raštas. Vis dėlto geriausi rezultatai gaunami, kai nešukuotas kanapių pluoštas yra išilgine kryptimi ir kaip kompozito storis 1,2 mm.



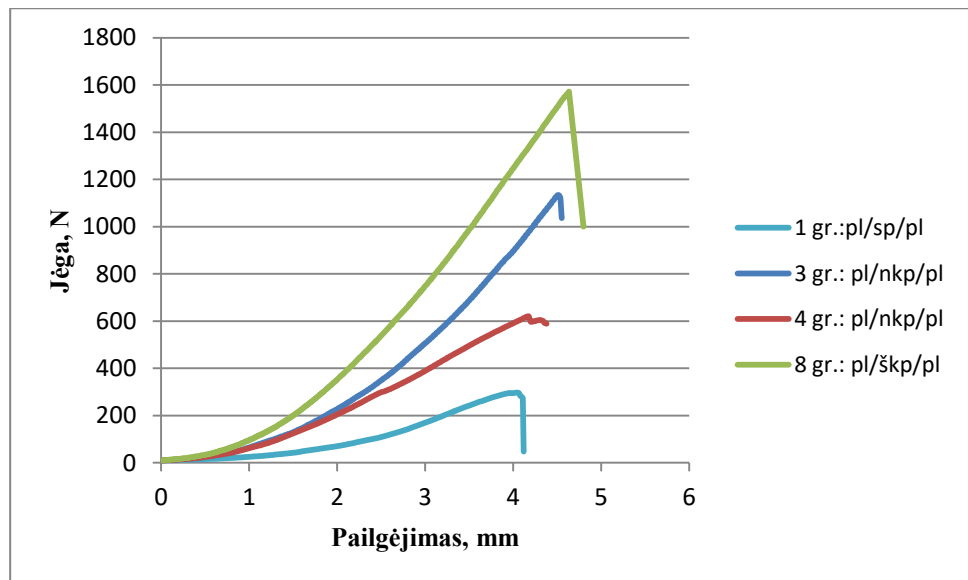
4.4 pav. Nešukuoto kanapių pluošto tempimo grafikas

Paveiksle 4.5 pateikti tempimo grafikas, kai armuojanti medžiaga yra šukuotas kanapės pluoštas ir šukuotas kanapės pluoštas. Gauti rezultatai yra geriausi lyginant su nešukuotu kanapės pluoštu ir spaliais. Tokį rezultatą lėmė geras PLA sukibimas su smulkiais plaušais. 7 bandinio trūkimo jėga yra didžiausia, tokį rezultatą lėmė geras pluošto pasiskirstymas ir dvigubas laminavimas. PLA užpildė visas esančias ertmes, o gaminimo būdas išskirtinumas nesudarė sąlygų oro tarpams susidaryti. Rezultatams taip pat turėjo pluošto kryptingumas, išilgine kryptimi pluoštas yra stipriausias.

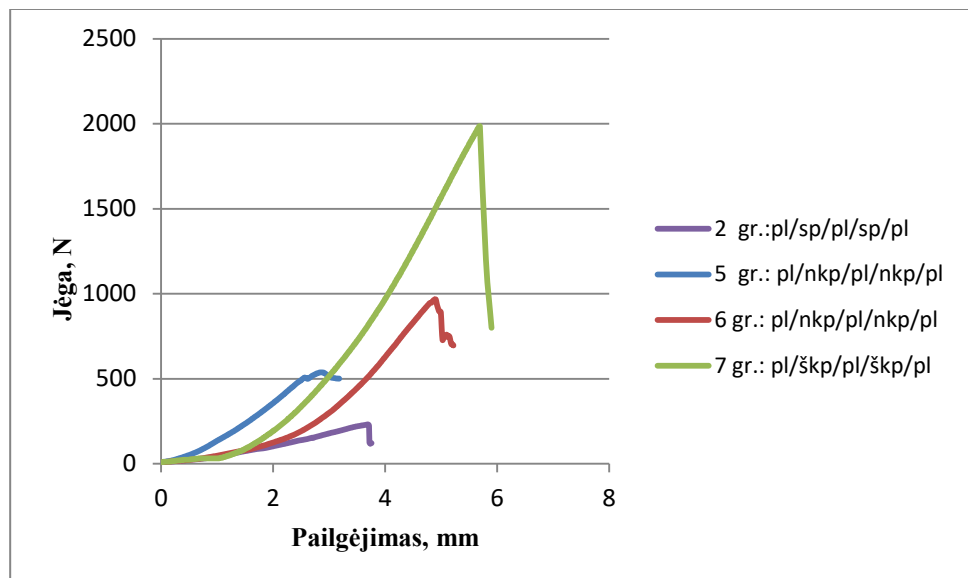


4.5 pav. Šukuoto kanapių pluošto tempimo grafikas

Paveiksluose 4.6 ir 4.7 suskirstyti duomenys pagal naudojamos plėvelės kiekį. Analizuojama ar plėvelės kiekis įtakoja, kompozito tempimo savybes. 1 paveiksle pateikti rezultatai, kai naudojamų plėvelių kiekis yra dvi, o 2 paveiksle, kai plėvelių skaičius trys. Dėl nevienodo duomenų pasiskirstymo galima daryti prielaidą, kad tempimo rezultatai nepriklauso, nuo plėvelių skaičiaus. Tai įrodo, kad kompozito tempimo savybės priklauso nuo armuojančios medžiagos pasirinkimo ir orientavimo.



4.6 pav. Tempimo grafikas, kai PLA plėvelių skaičius 2

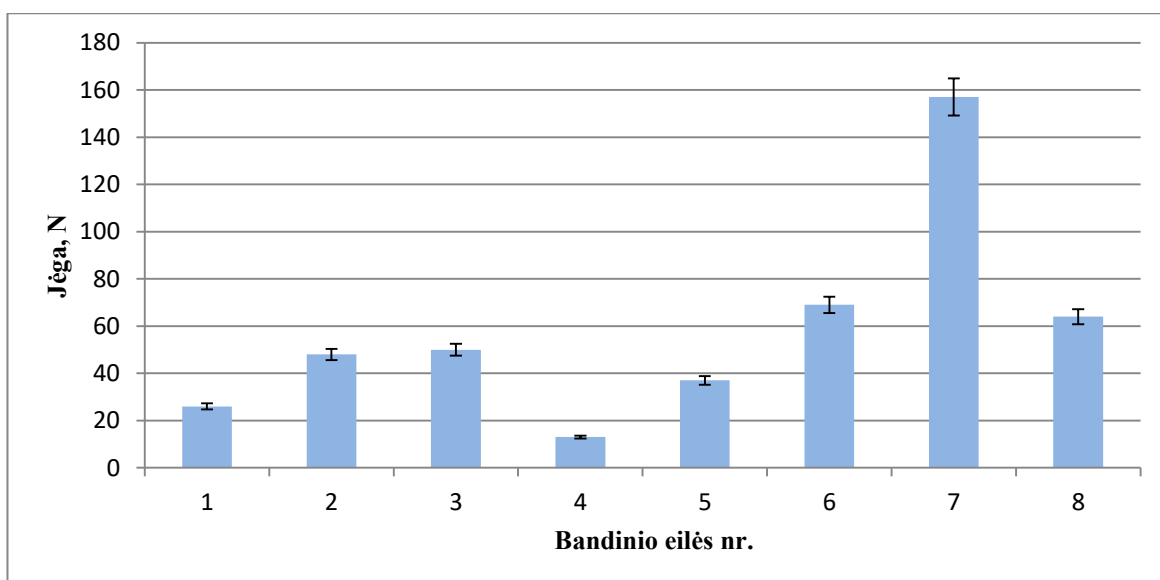


4.7 pav. Tempimo grafikas, kai PLA plėvelių skaičius 3

4.2 Bio-kompozitų lenkimo rezultatai

Atlikus bio-kompozito lenkimo tyrimą, gautų rezultatų stipris lenkiant, ištįsa lenkimo metu ir modulis pateikti 4.4 lentelėje.

Bio-kompozito bandinių palyginimas pagal jėgą lenkiant pateikta 4.2.1 paveiksle. Remiantis rezultatų duomenis didžiausios jėgos reikia norint sulenkti reikia 7 grupės bandiniams. Tai 12 kartų didesnė skaitinė vertė, nei 4 grupės bandinių.

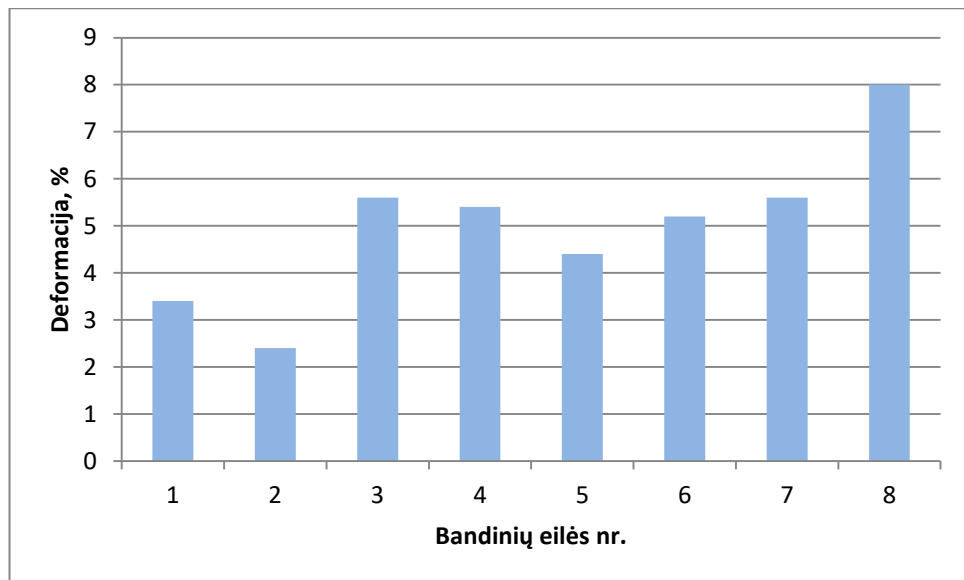


4.8 pav. Bio-kompozitų palyginimas pagal jėgą lenkiant

Stipriausias bandinys lenkiant yra 7 grupės. Tokį rezultatą lėmė geras PLA sukibimas su šukuoto pluošto gijomis. Daromo prielaida, kad rezultatą galėjo lemti gaminimo būdo pasirinkimas, nes šio grupės bandiniai buvo pasirinktas dvigubas laminavimas. Modulis lenkiant didžiausios vertės gautos 3 bandinio. Tokiam rezultatą galėjo lemti, tai kad kanapių pluoštas buvo nešukuotas ir lenkimo metu storos gijos trukdė bandiniui išlįsti.

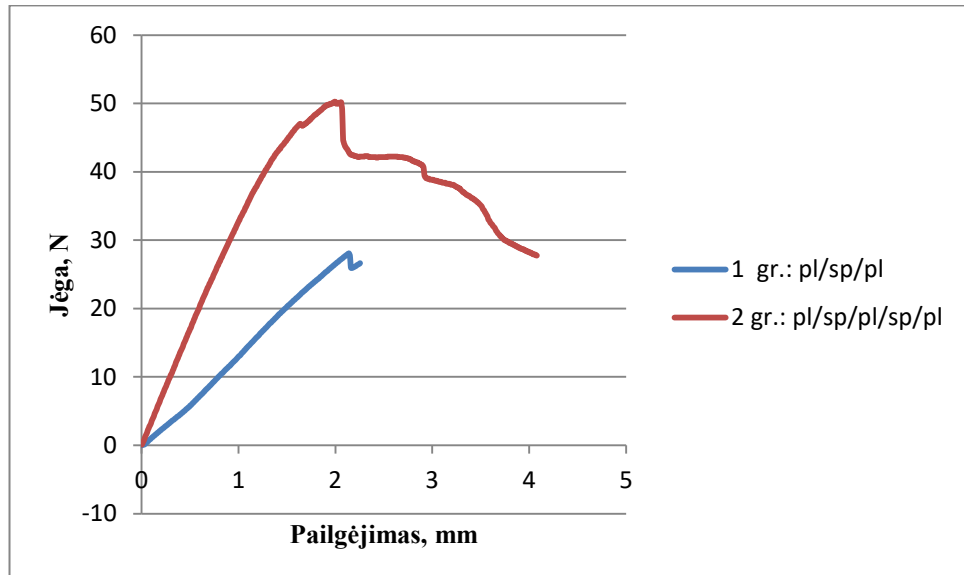
4.4 lentelė. Bio-kompozitų stipris lenkiant, išlįša lenkimo metu ir modulis

Bandinio gr.nr.	Sudėtis	Stipris lenkiant, MPa	Išlįša lenkimo metu, %	Modulis lenkiant, MPa
1	pl/sp/pl=40/20/20 %	23	1,6	1263
2	pl/sp/pl/sp/pl=20/20/20/20/20 %	12,5	2,8	767
3	pl/nkp/pl=40/20/40 %	68,5	3,2	3755
4	pl/nkp/pl=25/50/25 %	16,9	3,2	610
5	pl/nkp/pl/nkp/pl=25/12,5/25/12,5/25%	30,6	3,4	1246
6	pl/nkp/pl/nkp/pl=20/20/20/20/20 %	18,2	5,5	309
7	pl/škp/pl/škp/pl=25/12,5/25/12,5/25%	116,4	4,5	2522
8	pl/škp/pl=40/20/40 %	93,9	4,8	2679



4.9 pav. Bio-kompozitų deformacija lenkimo metu

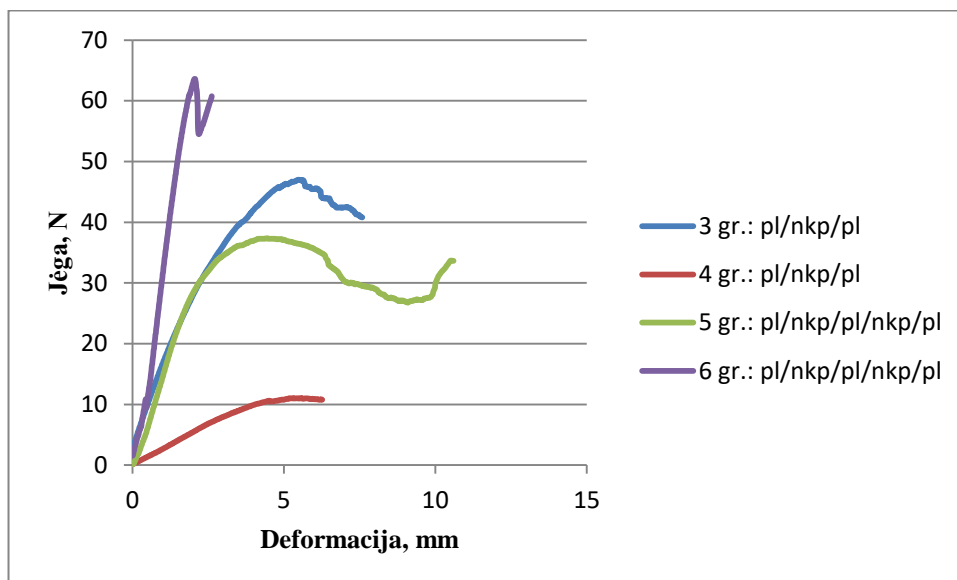
Paveiksle 4.10 pateikti kanapių spalių bandinių lenkimo grafikas. Pastebima, kad didesnę tiesinį kryptingumą turėjo 2 grupės bandiniai. Šios grupės kompozitų bandinių sandoroje, dvigubas spalių sluoksnis, kuris neleido bandiniui sulinkti. Pirmos grupės bandiniai su vienu spalių sluoksniu stipriai lenkiant 2 kartus mažesnis, nei kai kompozitas sudarytas iš dviejų spalių sluoksnių. Tokį rezultatą galėjo lemti kanapių spalių nevienodas dydis ir prastas adhezinis ryšys su PLA.



4.10 pav. Kanapių spalių lenkimo grafikas

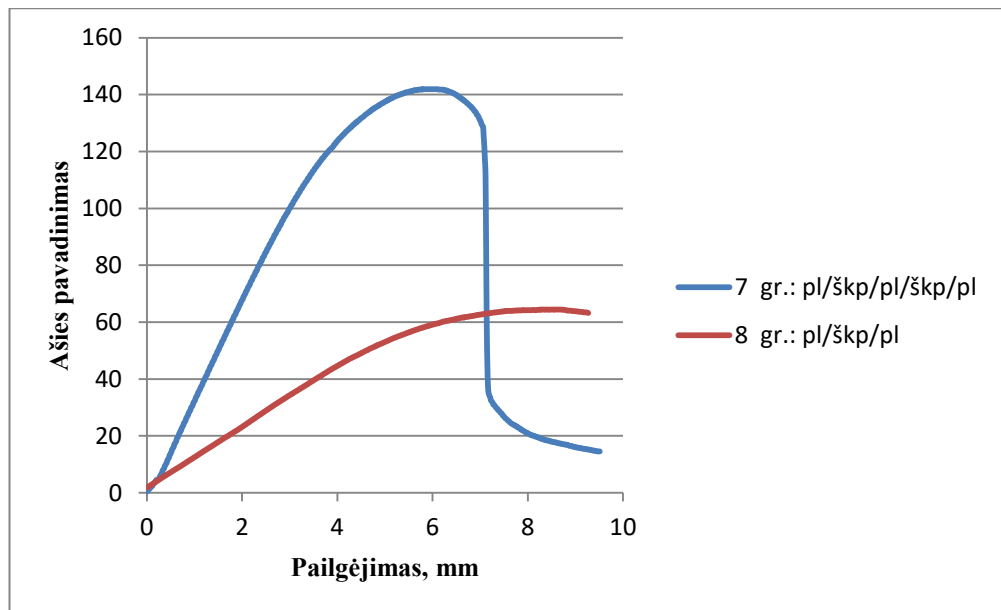
Nešukuoto kanapių pluošto kompozitų bandinių rezultatai pateikti 4.11 paveiksle. Pastebima, didelė rezultatų sklaidą. Didžiausią tiesinį ryšį ir mažiausią deformaciją turėjo 3 grupės bandiniai. Mažiausios vertės gautos 4 grupės bandinių. Trečios grupės bandiniuose nešukuotas kanapių pluoštas buvo orientuotas tik išilgine kryptimi lyginant su 4 grupės bandiniais, kurie buvo

orientuota 2 kart išilgine ir skersine kryptimi. Galima daryti prielaidą, kad kompozitų geresnės vertės yra tada kai nešukuotas pluoštas orientuotas išilgine kryptimi. Gerinant gautus rezultatus, remiantis literatūros analize pluoštus reiktų papildomai apdoroti šarmais ar panašiai.



4.11 pav. Nešukuoto kanapių pluošto lenkimo grafikas

Paveiksle 4.12 pateikti šukuoto kanapių pluošto kompozito bandinių lenkimo grafikas. Lyginant su prieš tai buvusiais kompozitais gauti rezultatai yra geriausi. 7 grupės bandinių rezultatai geriausi, nes stipris lenkiant yra didžiausias 116,4 MPa, kai 8 grupės bandinių stipris yra 0,2 kartų mažesnis. Abiejų grupių ištįsa sąlyginai vienoda. Galima daryti išvada, kad 7 bandinio didesnis stipris, todėl, kad gamybos metu buvo laminuojama du kartus. PLA geriau absorbavo kanapių pluoštą nei 8 bandinio, kai laminuojama vieną kartą. Geresni rezultatai lyginant su kitais kompozitų dėl tikslingo orientavimo išilgine kryptimi.



4.12 pav. Šukuoto kanapių pluošto lenkimo grafikas

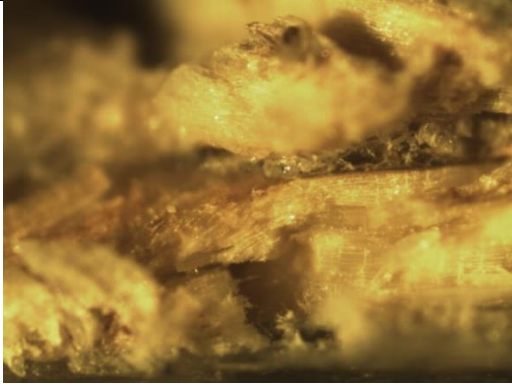
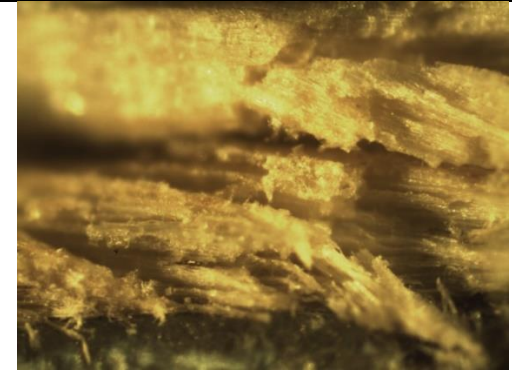

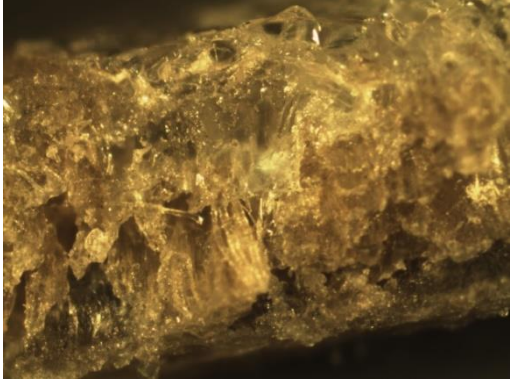
4.3 Kanapių kompozito skerspjūvio stebėjimas

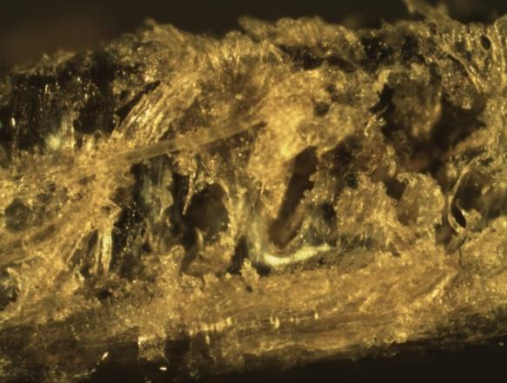
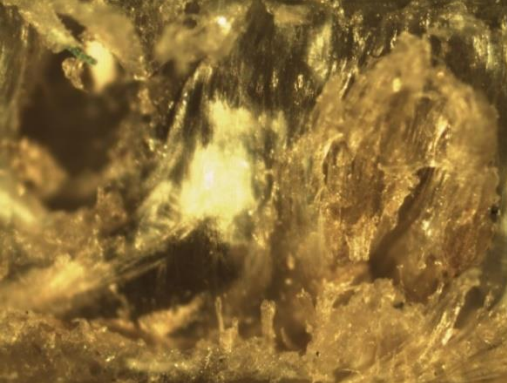

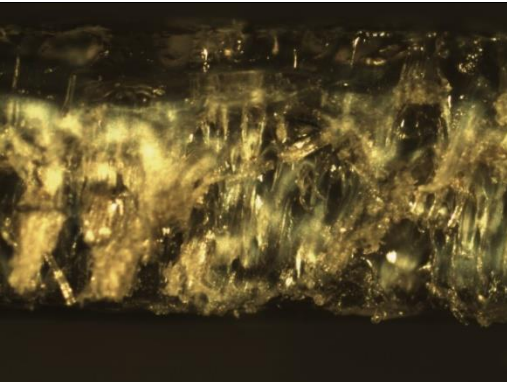
Bio-kompozito kokybė tai vienas iš faktorių užtikrinančių pritaikomumą. Stiprumas ir lenkimas, tai gauti techniniai duomenys nusakantys kompozitu mechanines savybes. Mikroskopo (4.13 pav.) pagalba, kai didinimas 4x0.1 buvo stebimi bandinių skerspjūviai. Tikrinama, kas galėjo įtakoti gautus rezultatus. Taip pat žiūrima, sukibimas tarp armuojančios ir rišančiosios medžiagos. Gauti rezultatai (4.5 lentelė) yra galimos hipotezės, tiksliom išvadoms gauti reiktų atlikti platesnius tyrimus.



4.13 pav. Mikroskopas

4.5 lentelė. Bio-kompozitų skerspjūvio stebėjimas naudojant mikroskopą

Bandinio gr. nr.	Nuotrauka	Aprašas
1		<p>PLA neužpildo kompozite esančių kanapių spalių, todėl PLA polimeras yra išsidėstęs ant kanapių spalių sienelių. Vidinės kanapių spalių sienelės yra neužpildytos polimeru.</p>
2		<p>PLA neužpildo kompozite esančių kanapių spalių, todėl PLA polimeras yra išsidėstęs ant kanapių spalių sienelių. Vidinės kanapių spalių sienelės yra neužpildytos polimeru. Mikroskopo pagalba pastebimi oro tarpai, tai vienas iš faktorių dėl ko gauti tyrimo rezultatai nebuvo tokie geri, kaip kitų kompozitų.</p>
3		<p>Kompozito oro tarpai mažesni nei 1 ir 2 grupės bandinių. PLA beveik užpildo visas nešukuoto kanpių pluošto ertmes. Tačiau ten kur kanapių pluošto siūlas yra storesnis, PLA polimeras neužpildo vidininių sienelių.</p>
4		<p>Dėl pakankamai didelio nešukuoto kanapių pluošto kiekio (50 % pagal kompozito tūrį), PLA polimeras neužpildo visų ertmių. Kompozitas netolygus, daug oro tarpų. Taip pat tarpų atsiradimui galėjo įtakoti kanapių pluošto orientavimas.</p>

5		<p>PLA polimeras neužpildo visų ermių esančių kompozite, dėl galimo per didelio kanapių pluošto kiekio. Taip pat įtakai galėjo turėti 3 PLA plėvelių pasirinkimas.</p>
6		<p>PLA polimeras neužpildo visų ermių esančių kompozite, dėl galimo per didelio kanapių pluošto kiekio. Taip pat įtakai galėjo turėti 3 PLA plėvelių pasirinkimas.</p>
7		<p>Kompozitas vientisas be oro tarpų ar kiaurymių. PLA polimeras užpildo visas šukuoto kanapių pluošto ertmes. Pastebimas vientisa struktūra, tai galėjo įtakoti dvigubas laminavimas.</p>
8		<p>Kompozitas vientisas be oro tarpų ar kiaurymių. PLA polimeras užpildo visas šukuoto kanapių pluošto ertmes.</p>

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad kanapių bio-kompozito kokybė priklauso, nuo kanapės auginimo sąlygų ir apdorojimo. Mirkymas tai vienas iš svarbiausių kanapės pluošto gavimo procesų užtikrinant gerą kokybę Kanapių bio-kompozitų savybės labiausiai įtaka daro pasirenkamos rišančiosios medžiagos savybės. Kompozito kokybę įtakoja kanapių pluošto sukibimas su rišančiąja medžiaga. Nustatyta, kad PLA puikiai dera su kanapių pluoštu, dėl pakankamai didelio Jungo modulio.
2. Sprojektuoti ir pagaminti skirtingos sudėties kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalų) ir PLA polimero bio-kompozitai.
3. Nustatyta, kad bio-kompozitai, sudaryti iš trijų PLA plėvelių ir tarpuose esančio šukuoto kanapių pluošto, kai gaminimo metu laminuojam du kartus pasižymi didžiausia trūkimo jėga. Tokį rezultatą lėmė geras pluošto sukibimas su PLA polimeru, pluošto orientavimas išilgine kryptimi ir dvigubas pluošto sluoksnis.
4. Ištyrus bio-kompozitų iš kanapių ir PLA stiprumines savybes, nustatyta, kad didžiausiu stiprumu pasižymi kompozitai sudaryti iš dviejų PLA plėvelių ir tarpuose esančio šukuoto kanapių pluošto kai laminuojama vieną kartą. Tai 16 kartų gersnis rezultatas lyginant su kompozitų, kuris sudarytas iš trijų PLA plėvelių ir tarpuose esančio kanapių spalų, kai laminuojama vieną kartą.
5. PLA ir nešukuoto pluošto kompozitų trūkimo jėga didesnė 30 kartų, nei PLA ir spalų kompozitų. O PLA ir šukuoto pluošto kompozitų trūkimo jėga didesnė 0,4 kartų, nei PLA ir nešukuoto pluošto kompozitų
6. Ištyrus kanapių (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalų) bio-kompozitų atsparumą lenkimui, gauti duomenis parodė, kad bio-kompozitai, sudaryti iš trijų PLA plėvelių ir tarpuose esančio šukuoto kanapių pluošto, kai gaminimo metu laminuojam du kartus, pasižymi geriausiomis lenkimo savybėmis. Stiprio lenkiant 5 kartus geresni rezultatai už bio-kompozitus su spalais ir 2 kartus už bio-kompozitus su nešukuotu kanapių pluoštu.

7. Ištirtus skirtingos kanapės (nešukuoto pluošto, šukuoto pluošto ir spalių) sudėties ir struktūros įtaką mechaninėms bio–kompozito savybėms, nustatyta, kad geriausi rezultatai pasiekiami, kai pluoštas orientuotas išilgine kryptimi.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. P. C. Struika, S. Amaducci, M. J. Bullard, N. C. Stutterheim, G. Venturi, H. T. H. Cromack: *Agronomy of fibre hemp (Cannabis sativa L.) in Europe* [interaktyvus]. 2000. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669099000485>
2. Suman Chandra, Hemant Lata, Ikhlas A. Khan, Mahmoud A. ElSohly: *Cannabis sativa L.: Botany and Horticulture* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-54564-6_3
3. Visuotinė lietuvių kalbos enciklopedija: *kanapė* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-16]. Prieiga per internetą:
<https://www.vle.lt/PaieskosRezultatai/ctl/Straipsnis/mid/469/tid/37090>
4. Education: *What is Cannabis Sativa ?* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-11-12]. Prieiga per internetą:
<http://cannabis-education.org/info/what-is-cannabis-sativa/>
5. Mediavilla V., Jonquera M., Schmid-Slembrouck I., Soldati A.: *Decimal code for growth stages of hemp (Cannabis sativa L.)*. Swiss Federal Research Station for Agroecology and Agriculture (FAL), Reckenholzstrasse 191, CH-8046 ZURICH, source journal of the international hemp association 5(2):68-74, 1998
6. GROW: *Indica vs. Sativa: What's the Difference?* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2017-11-22]. Prieiga per internetą:
<https://hightimes.com/grow/understanding-the-effects-of-indica-vs-sativa/>
7. How products are made: *Industrial Hemp* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2017-11-22]. Prieiga per internetą:
<http://www.madehow.com/Volume-6/Industrial-Hemp.html>
8. Jankauskienė Z., Gruzdevienė E. Evaluation: Cannabis sativa cultivars in Lithuania. *Žemdirbystė=Agriculture*, 97(3), p. 87 – 96, 2010.
9. Dobelis, Inge N. : *Magic and Medicine of Plants*, Pleasantville, NY, Reader's Digest Books, 7(5): 7-10, 1995
10. E. Craker, Ph.D. Zoë Gardner: *The Botany of Cannabis* [interaktyvus]. 2010. [žiūrėta 2017-11-02]. Prieiga per internetą:

- <https://www.motherearthliving.com/Natural-Health/botany-of-cannabis-ze0z1011zdeb>
11. Psychonauwiki: *Cannabis (botany)* [interaktyvus]. 2009. [žiūrėta 2017-11-02]. Prieiga per internetą:
[https://psychonautwiki.org/wiki/Cannabis_\(botany\)](https://psychonautwiki.org/wiki/Cannabis_(botany))
<https://www.hempbasics.com/hhusb/hh3fiber.htm>
 12. Hemp basics: *General Hemp Information, Uses, Facts* [interaktyvus]. 2000. [žiūrėta 2017-12-11]. Prieiga per internetą:
<https://www.hempbasics.com/shop/hemp-information>
 13. Small, E. ir D. Marcus: *Hemp: A New Crop with New Uses for North America* [interaktyvus]. 2002. [žiūrėta 2017-11-01]. Prieiga per internetą:
<https://www.hort.purdue.edu/newcrop/ncnu02/v5-284.html>
 14. M. Sfiligoj Smole, S. Hribernik, K. Stana Kleinschek, T. Kreže1: *Plant Fibres for Textile and Technical Applications* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2017-11-02]. Prieiga per internetą:
<https://www.intechopen.com/books/advances-in-agrophysical-research/plant-fibres-for-textile-and-technical-applications>
 15. S. Amaducci, D. Scordia, F. H. Liu, Q. Zhang, H. Guo, G. Testa, S. L. Cosentino: *Key cultivation techniques for hemp in Europe and China* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-11-01]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669014003987>
 16. Mohamed M. Radwan, Amira S. Wanas, Suman Chandra, Mahmoud A. ElSohly: *Natural Cannabinoids of Cannabis and Methods of Analysis* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-12-09]. Prieiga per internetą:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-54564-6_7
 17. Brian F. Thomas, Mahmoud A. ElSohly: Chapter 1 – *The Botany of Cannabis sativa L.* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-11-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128046463000011>
 18. Canadian hemp trade alliance, alliance commerciale canadienne du chanvre: *Fibre production* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-11-28]. Prieiga per internetą:
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.hemptrade.ca/eguide/fibre-production/types-of-hemp-fibre>
 19. W.J. Baxter, Gordon Scheifele: *Growing Industrial Hemp in Ontario* [interaktyvus]. 2009. [žiūrėta 2017-11-28]. Prieiga per internetą:

- <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-067.htm>
20. W.H. Fuller, A. G. Norman. The retting of hemp. Ames, Iowa 2000: pp.895-925
21. HEMP TECHNOLOGIES COLLECTIVE [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2017-10-15].
Prieiga per internetą:
<https://hemtecusa.com/page83/page83.html>
22. Robert A. Nelson: *Hemp Husbandry* [interaktyvus]. 2000. [žiūrėta 2017-12-11]. Prieiga per internetą:
23. Terminų žodynas: *kompozitas* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.lietuviuzodynas.lt/terminai/Kompozitas>
24. Compositus: *Kompozitai ir jų gamyba* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.compositus.lt/category/kompozitai-ir-ju-gamyba-keletas-svarbiu-pastabu>
25. Alyssa Barron, Joana Coutinho, Ali English, Silvia Gergely, ERwan Lidouren. *Itegrating hemp in organic farming systems*. The Royal Agricultural and Veterinary University. Kobenhavn. 2003: pp. 7-9, 35-38, 57-60
26. Abdul QadeerDayo, Bao–changGao, JunWang, Wen–binLiu, MehdiDerradji, Ahmer Hussain Shah, Aijaz AhmedB straipsnyje: *Natural hemp fiber reinforced polybenzoxazine composites*) [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-01]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353816319947>
27. Ruihua Hu ir Jae–Kyo Lim: *Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber* [interaktyvus]. 2007. [žiūrėta 2017-10-05]. Prieiga per internetą:
<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0021998306069878>
28. Taneli Väisänen, Paolo Batello, Reijo Lappalainen, Laura Tomppo: *Modification of hemp fibers (Cannabis Sativa.) for composite applications* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-05]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669017307343>
29. Moyeenuddin A. Sawpan, Kim L. Pickering: *Hemp Fibre Reinforced Poly(lactic acid) Composite* [interaktyvus]. 2007. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
<https://www.scientific.net/AMR.29-30.337>
30. P. Vieira, C. Romão, A.T. Marques ir J.L. Esteves: *Mechanical Characterisation of Natural Fibre Reinforced Plastics* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-10-02]. Prieiga per internetą:
https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjzlav4IJnYAhUiJ8AKHWi_D_wQFggsMAA&url=https%3A%2F%2F

- sigarra.up.pt%2Ffeup%2Fpt%2Fpub_geral.show_file%3Fpi_gdoc_id%3D374107&usg=AOvVaw1JCWYi2OI7cgRTZG2Z0rcJ
31. Tina Haghghatniaa, Ali Abbasianb, Jalil Morshedianc: Hemp fiber reinforced thermoplastic polyurethane composite: *An investigation in mechanical properties* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669017304818>
 32. R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, F. Caputo: *Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-11-22]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817327919>
 33. Renewable fibre technology: *Hemp fiber composites* [interaktyvus]. 2007. [žiūrėta 2017-11-22]. Prieiga per internetą:
<http://www.hempline.com/applications/composites/>
 34. Dr. Elvyra Gruzdevienė, Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro Žemdirbystės instituto Upytės bandymų stoties mokslo darbuotoj: *Pluoštinės kanapės nauda* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-10-15]. Prieiga per internetą:
<http://lt.lt.allconstructions.com/portal/categories/309/1/0/1/article/18105/pluostines-kanapes-nauda>
 35. EV WORLD: *BMW i3 Saves Weight Using Hemp Fibers* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-12-14]. Prieiga per internetą:
<http://evworld.com/news.cfm?newsid=30943>
 36. Michael Graham Richard: *Cannabis in your car doors, but not to smuggle it* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2017-12-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.treehugger.com/sustainable-agriculture/cannabis-your-car-doors-not-smuggle-it.html>
 37. Technologijos.lt: *Laikas pradėti auginti kanapes - jų pluoštui priklausoma automobilių ateitis* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:
http://www.technologijos.lt/n/technologijos/automobiliai_ir_motociklai/S-58174/straipsnis/Laikas-pradeti-auginti-kanapes---ju-pluostui-priklausoma-automobiliu-ateitis-Video
 38. Alkas.lt: *Laikas pradėti auginti kanapes – jų pluoštui priklausoma automobilių ateitis* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:
<http://alkas.lt/2016/11/20/laikas-pradeti-auginti-kanapes-ju-pluostui-priklausoma-automobiliu-ateitis-video/>

39. J. Page, M. Sonebi, S. Amziane: *Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816319432>
40. Inga Valentinienė: *Unikalių ekologiškų baldų, iš augalinės kilmės konstrukcinių medžiagų, dizainas* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:
http://www.zak.lt/mokslo_darbai/2014_220_225.pdf
41. Lut Pil, Farida Bensadoun, Julie Pariset, Ignaas Verpoest: *Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X15004017>
42. Harriette L. *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*. Technische universiteit Eindhoven. 2004. p. 192
43. UK hempcrete: *Healthy buildings* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-10-12]. Prieiga per internetą:
<https://www.ukhempcrete.com/services/healthy-buildings/>
44. Ekodiena: *Pluoštinės kanapės: ne svaigintis, bet gaminti* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-10-12]. Prieiga per internetą:
<http://www.ekodiena.lt/pluostines-kanapes-ne-svaigintis-bet-gaminti/>
45. Hemp technologies collective: *Hemp Brick* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-09-28]. Prieiga per internetą:
<https://hemtecusa.com/page15/styled-19/page89.html>
46. Vytautas Natys: *Taupiams ir šiltiems namams – termoizoliacinės medžiagos* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2017-09-28]. Prieiga per internetą:
<http://www.protingosmedziagos.lt/straipsniai/taupiams-ir-siltiems-namams-termoizoliacines-medziagos/>
47. Hemphealer: *Hemp – One Of The Most Healthy Recyclable Substances Around* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2017-10-22]. Prieiga per internetą:
<https://hemphealer.wordpress.com/tag/hemp-recycle/>
48. Alberta Hemp Cost of Production and Market Assesment: *Serecon Management Consulting Inc, Edmonton, Alberta* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2017-10-22]. Prieiga per internetą:
http://www.votehemp.com/PDF/hemp_production_marketassessment_report.pdf

49. Carus, M. at all. 2013. The European Hemp Industry: *Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2017-10-22]. Prieiga per internetą:
<http://www.eiha.org/attach/8/13-03%20European%20Hemp%20Industry.pdf>
50. European Industrial Hemp Association : *Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2017-11-01]. Prieiga per internetą:
http://eiha.org/attach/639/11-07-07_META-LCA_Hemp_Fibre_Products.pdf
51. Lietuvos statistikos departamentas: *Gaminių gamyba 2000-2013. Pramonės rodikliai* [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2017-11-17]. Prieiga per internetą:
<http://osp.stat.gov.lt/temines-lenteles49>
52. G. Wurl, T. Graf, A. Vetter, A.: *Biertümpfel Production, Processing and Use of Natural Fibres* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-11-17]. Prieiga per internetą:
https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/files/4096/BAB_30.pdf
53. Ralf Pecenka, Carsten Lühr, Hans-Jörg Gusovius: *Design of Competitive Processing Plants for Hemp Fibre Production* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2017-11-17]. Prieiga per internetą:
<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/647867/>
54. LST EN ISO 13934-1 standartas. Tekstilė. Tempiamosios medžiagų savybės. 1 dalis. Didžiausios jėgos ir pailgėjimo esant šiai jėgai nustatymas juostelės metodu (ISO 13934-1:2013)
55. LST EN ISO 178 standartas. Plastikai. Lankstomųjų savybių nustatymas (ISO 178:2010)
56. Jonas Bareišis, Andrius Stasiškis: *Inžinerinė medžiagų mechanika*. Kaunas: Technologija 2011:pp.38-48
57. Milašius, R. : *Eksperto teorija ir praktika*. Kaunas. Technologija 2001: pp. 47
58. Marius Murariu Philippe Dubois: *PLA composites: From production to properties* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2017-12-05]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169409X16301028>
59. Moataz A., Elsayy, Ki-HyunKim, Jae-Woo Park, Akash Deep: *Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-12-05]. Prieiga per internetą:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307876>
60. Shady Farah, Daniel G. Andersona, Robert Langer: *Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2017-12-05]. Prieiga per internetą:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169409X16302058>