

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ANNE ŠIRVAITIENĖ

IŠANKSTINIO TEMPIMO ĮTAKOS
AUGALINIU PLUOŠTU ARMUOTŲ
BIOKOMPOZITŲ MECHANINEI ELGSENAI
TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T)

Kaunas, 2016

UDK 677.017 (043.3)

Disertacija rengta 2010–2014 metais Kauno technologijos universitete, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete, Medžiagų inžinerijos katedroje bei stažuojantis Talino technologijos universitete (2012 m.). Disertacija remta Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo ir Lietuvos mokslo tarybos.

Mokslinė vadovė:

Prof., dr. Virginija JANKAUSKAITĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Virginija STANKEVIČIENĖ

TURINYS

Simbolių ir santrumpų sąrašas	4
ĮVADAS	5
1. LITERATŪROS APŽVALGA	8
1.1 Ištininiu būdu armuoti kompozitai ir jų plėtros kryptys	8
1.2 Kompozitų komponentai	10
1.2.1 Augalinio pluošto armuojančios medžiagos sandaros ir savybių įtaka biokompozitų mechaninėms savybėms	10
1.2.2 Dervos iš sintetinių ir biologiškai skaidžių polimerų	17
1.3 Natūraliais pluoštais armuotų kompozitų istorinė plėtra ir perspektyvos	19
1.4 Ištininiu būdu armuotų erdvinės formos kompozitų gamybos metodai	22
1.5 Armuojančios medžiagos išankstinio tempimo metodo taikymas formuojant kompozitus	25
2. TYRIMO METODOLOGIJA	31
2.1 Naudotos medžiagos	31
2.2 Pluoštų apdorojimo metodai	32
2.3 Dervų ir tekstilės medžiagomis armuotų kompozitų bandinių gavimo metodai	35
2.4 Augalinio pluošto morfologijos tyrimo metodai	36
2.5 Kompozitų komponentų adhezinės sąveikos vertinimo metodika	36
2.6 Mechaninių savybių nustatymo metodai	37
2.7 Kompozitų deformacijų lauko tyrimo metodika	38
3. TYRIMŲ REZULTATAI	40
3.1 Lino ir medvilnės siūlais armuotų išanksto įtemptų biokompozitų tyrimas	40
3.1.1 Kompozitų komponentų savybių tyrimas	40
3.1.2 Cheminių apdorojimo metodų įtaką kompozitų mechaninėms savybėms	41
3.1.3 Apdorojimo plazma įtaka biokompozitų mechaninėms savybėms	44
3.1.4 Siūlų sukrumo įtaka kompozito savybėms	52
3.1.5 Išankstinio tempimo sąlygų įtaka biokompozito mechaninėms savybėms	52
3.1.6 Mechaninių ir cheminių apdorojimų derinio įtaka kompozitų mechaninėms savybėms	57
3.2 Iš anksto įtempto augalinio pluošto audiniu armuoto kompozito elgsena formavimo metu	60
3.2.1 Audinių savybių lyginamoji analizė	60
3.2.2 Audinio struktūros ir išankstinio tempimo sąlygų įtaka biokompozito mechaninėms savybėms	61
3.2.3 Išankstinio tempimo deformacijų įtaka erdvinės formos detalių gamybai	71
IŠVADOS	75
LITERATŪROS SĄRAŠAS	77
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS	85
MOKSLINIŲ KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS	86

Simbolių ir santrumpų sąrašas

UP	– nesotusis poliesteris
PLA	– polipieno rūgštis
SEM	– skenuojanti elektroninė mikroskopija
LFD	– pluoštams skirtas jutiklis
FTIR	– Furjė infraraudonųjų spindulių spektroskopija
DSK	– diferencinė skenuojamoji kalorimetrija
γ	– kampas siūlo ir lašo sąlyčio riboje, °
Θ	– vilgumo kampas, °

IVADAS

Tiriamoji problema

Pluoštais armuoti polimerinės matricos kompozitai sudaro didžiausią dalį pramonėje gaminamų ir vartojamų kompozitinių medžiagų. Jų paklausą lemia išskirtinis savybių derinys – didelis stiprumas ir standumas, esant mažai gaminių masei. Priklausomai nuo armuojančios medžiagos matmenų, kompozito armavimo būdas gali būti dvejopas – dispersinis arba ištisinis. Nors dauguma šiuo metu pramonėje pagaminamų kompozitų yra armuoti dispersiniu būdu, tačiau dėl daug geresnių ištisiniu būdu armuotų kompozitų mechaninių savybių, nuo XX a. paskutinio dešimtmečio, sparčiausiai plečiamos būtent šiuo būdu armuotų kompozitų gamybos technologijos. Pagrindiniai armuotų kompozitų trūkumai siejami su didele pluoštinių medžiagų, o kartu ir gaminių kaina, mažais gamybos tempais bei opiomis aplinkosaugos problemomis.

Norint užtikrinti „švaresnę“ pluoštais armuotų plastiko kompozitų gamybą, taip pat sumažinti pluoštų kainą, intensyviai tiriamos galimybės sintetinius armuojančius puoštus pakeisti bioskaidžiais ir atsinaujinančiais augaliniais pluoštais. Tačiau dėl nepakankamos pluošto ir matricos adhezinės sąveikos ir prastesnių augalinių pluoštų mechaninių savybių, susijusių su sudėtinga ir daugiapakope pluošto sandara, šių kompozitų mechaninės savybės yra prastesnės. Norint užtikrinti geresnes savybes, taikomi įvairūs tradiciniai cheminiai pluoštų paviršiaus apdorojimo metodai vandens terpėje – merseizavimas, balinimas, acetilinimas ir kt., kurių metu nutekamasis vanduo užteršiamas taršiomis cheminėmis medžiagomis. Todėl svarbu užtikrinti ne tik aplinkos neteršiančių pluoštų naudojimą, bet ir nekenksmingus jų apdorojimo bei kompozitų gamybos metodus. Vienas perspektyviausių pluoštų apdorojimo metodų šiuo atžvilgiu, tai apdorojimas žemo slėgio plazma. Tačiau, priklausomai nuo pasirinktų apdorojimo parametrų, plazmos poveikis gali būti daugialypis ir kurio įtaka augaliniais pluoštais armuotų kompozitų gamyboje nepakankamai ištirta.

Augaliniams pluoštams būdinga mažesnė pluošto orientacija pagrindinės ašies kryptimi, kuri lemia sudėtingą kompozito atsaką į veikiančias jėgas. Norint išlaikyti geresnę pluoštų orientaciją, dažnai atsakoma net tokių, gijų stiprumą užtikrinančių operacijų, kaip verpimas, sukimas ir naudojami mažo sukrumo siūlai. Tačiau daugelyje šių darbų atsižvelgiama tik į armuojančios medžiagos orientaciją techniniame pluošte. Šio principo taikymas aukštesniuose armuojančios medžiagos struktūros lygiuose nėra tirtas. Vienas paprasčiausių būdų – armuojančios medžiagos orientavimas tempiant. Panašus išankstinio tempimo metodas, kurio metu įtempta armuojanti medžiaga deformuotame būvyje fiksuojama matricoje, naudojamas statybų pramonėje norint suteikti kompozitui didesnę standumą ir stiprumą lenkiant. Tačiau jo įtaka kompozito savybėms tempiant, mažai tirta, o augalinių pluoštų atveju visai nėra tirta.

Santykinai dideles pluoštais armuotų kompozitų kainas lemia ir maži erdvinės formos gaminių, kurie apima nemažą ištisiniu būdu armuotų gaminių dalį, gamybos tempai. Iki šiol mechanizuotu būdu kompozitai gaminami tempiamosios ekstruzijos

ir gijų suvijimo metodais, kuriais galima formuoti profilines ir tūrines nesudėtingos formos detales. Be to, jų armavimui naudojamos gijos, kurios ne visada gali užtikrinti tinkamą atsaką į dažniausiai praktikoje pasitaikančias kompleksines apkrovas. Todėl tokios paskirties gaminių gamyboje dažniausiai naudojami audiniai. Tačiau iki šiol audiniu armuoti gaminiai formuojami rankiniu būdu. Ši problema susijusi su naudojamų sintetinių pluoštų (stiklo, anglies bei aramido) savybėmis. Formuojant kelis erdvinės formos gaminius viename ruošinyje, dėl didelių trinties jėgų, veikiančių tarp sintetinio pluošto ir formos, apribojamas medžiagos slydimas, o dėl mažo tūsumo (iki 2 %) formuojama medžiaga suyra arba neišgaunamas reikiamas detalės reljefas. Augaliniai pluoštai pasižymi didesniu tūsumu, todėl reikiamas detalių reljefas gali būti išgaunamas audinį tempiant. Tačiau natūralaus pluošto audinio tempimo metu tarpusavyje perpintos metmenų ir ataudų siūlų sistemos sąveikauja ir priklausomai nuo audinio struktūros, lemia netiesinį medžiagos atsaką į veikiančias apkrovas. Todėl būtina nustatyti audinio struktūros parametrų įtaką erdvinės formos iš anksto įtemptų kompozitų mechaninėms savybėms.

Darbo aktualumas

Augalinių pluoštų taikymas ištisiniu būdu armuotų kompozitų gamyboje yra svarbus tiek aplinkosaugos, tiek ir ekonominiu požiūriu. Plėtojant sparčiasias erdvinės formos ištisiniu būdu armuotų kompozitų gamybos technologijas susiduriama su trimis pagrindinėmis problemomis – mažais gamybos tempais, aukštomis kainomis ir ekologinėmis problemomis. Todėl ieškoma būdų, kaip neskaidžius sintetinius pluoštus keisti biologiškai skaidžiais, didinti natūralių pluoštų stiprumą ir tarpfazinę adheziją bei kurti mechanizuotas kompozitų formavimo technologijas. Šioms problemoms spręsti reikėtų ištirti pluošto orientavimo parametrų įtaką kompozitų savybėms, atsižvelgiant į augalinių pluoštų paviršiaus morfologijos ir struktūros ypatumus.

Natūralių pluoštų išankstinio tempimo metodo naudojimas galėtų prisidėti kompleksiskai sprendžiant sintetinių pluoštų pakeitimo pigesniais ir netaršiais augaliniiais pluoštais problemas, taip pat sudarytų prielaidas erdvinės formos gaminių formavimo proceso mechanizacijai. Biologiškai skaidžių pluoštų ir netaršių apdorojimo metodų panaudojimas prisidėtų sprendžiant aplinkosaugos problemas.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio **darbo tikslas** – nustatyti išankstinio tempimo įtaką augalinio pluošto medžiagomis armuotų biokompozitų mechaninei elgsenai, keičiant komponentų tarpusavio adhezinę sąveiką ir audinio struktūrą.

Siekiant darbo tikslo iškelti **uždaviniai**:

1. Nustatyti išankstinio armuojančių medžiagų apkrovimo sąlygų įtaką augalinio pluošto medžiagomis armuotų biokompozitų mechaninėms savybėms.
2. Nustatyti augalinio pluošto ir polimerinės matricos adhezinės sąveikos įtaką iš anksto įtemptų biokompozitų mechaninėms savybėms.

3. Nustatyti armuojančio audinio sandaros įtaką iš anksto įtemptų biokompozitų mechaninėms savybėms.

Darbo naujumas ir jo praktinė reikšmė

Dėl aplinkosaugos priežasčių kompozituose, sintetinius armuojančius pluoštus pageidautina pakeisti bioskaidžiais augaliniais pluoštais. Itin aktualu ištirti galimybes padidinti šių pluoštų, o kartu ir jais armuotų kompozitų stiprumą ir standumą, pirmenybę teikiant taršą mažinančioms technologijoms. Todėl darbe augalinių pluoštų mechaninėms savybėms gerinti, pasiūlytas šio tipo pluoštui dar nenaudotas išankstinio tempimo metodas ir įvertinta jo įtaką biokompozitų mechaninei elgsenai. Pradinis įtempis buvo suteiktas skirtingos formos ir sandaros armuojančiai medžiagai – siūlams ir iš jų austiems audiniams. Įtemptojo biokompozito savybėms pagerinti, panaudoti įvairūs cheminiai ir fizikiniai apdorojimo metodai. Išskirtinis dėmesys skirtas aplinkos neteršiančių apdorojimo metodų – žemo slėgio plazmos ir sukrumo keitimo – taikymui. Išankstinio tempimo metu vyksta armuojančios medžiagos struktūros elementų orientavimas tempimo ašies kryptimi, o matricoje sukeliama gniuždymo jėgos, kurios stiprina ir standina kompozitą.

Per pastarąjį dvidešimtmetį sparčiai plečiasi erdvinės formos, ištisiniu būdu armuotų, tekstilės kompozitų gamyba. Tačiau, dėl jų armavimui naudojamų audinių iš sintetinių pluoštų deformacinių savybių, šių kompozitų gamybos procesai yra nemechanizuoti. Augalinis pluoštas, kurio tūsumas yra žymiai didesnis nei sintetinių pluoštų, gali užtikrinti geresnes kompozitų savybes ir sudaryti prielaidas didinti augalinių pluoštų tekstilės medžiagų taikymą kompozitų gamyboje, pakeičiant jais sintetinius pluoštus, taip pat išplėsti jų pritaikymo sritis.

Ginamieji teiginiai:

1. Išankstinis augalinio pluošto medžiagų tempimas padidina biokompozitų stiprumą ir standumą tempiant, ir lenkiant bei gaunamos mažos grįžtamųjų deformacijų vertės.
2. Iš anksto įtemptų augaliniu pluoštu armuotų biokompozitų mechaninės savybės priklauso nuo adhezinės sąveikos komponentų tarpfazinėje riboje bei armuojančios medžiagos (siūlų ir audinio) sandaros parametru.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

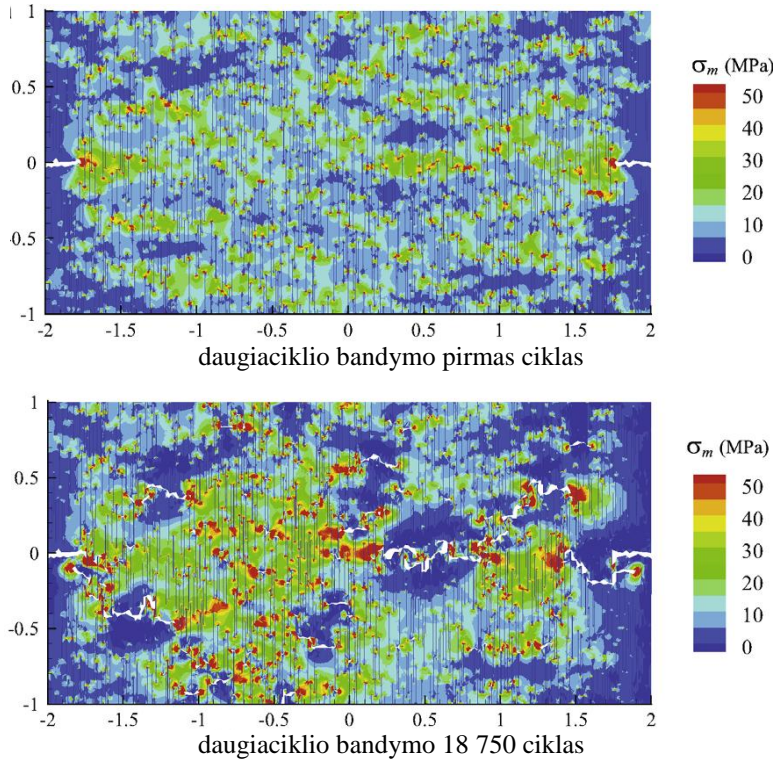
1.1 Išsisiniu būdu armuoti kompozitai ir jų plėtros kryptys

Šiuolaikinės kompozitinės medžiagos apima itin plačią medžiagų grupę. Tačiau labiausiai paplitę ir perspektyviausi yra pluoštais armuoti polimeriniai kompozitai, dėl išskirtinio jų savybių derinio – didelio stiprumo ir mažo svorio (Mortensen, 2007). Pluoštu armuoti polimeriniai kompozitai dažniausia yra heterogeninė dviejų ar daugiau vienfazių homogeninių komponentų sistema, kurioje pluoštinė medžiaga naudojama, norint sustiprinti polimerinę matricą. Polimerinių matricų stiprumas ir standumas yra santykinai mažas, todėl tekstilės pluoštų savybės daro lemiamą įtaką kompozitinės medžiagos mechaninėms savybėms (Mortensen, 2007).

Atsižvelgiant į armuojančios medžiagos formą, kompozitų armavimo būdas gali būti dvejopas – dispersinis arba išsisinis. Nors, pasirinkus dispersinį armavimo būdą (dalelėmis ar pluoštais), armuojanti medžiaga gali žymiai pagerinti polimerinės matricos savybes, tačiau jo armavimo efektyvumas yra mažesnis nei nepertraukiamu, išsisiniu būdu armuoto plastiko (Mortensen, 2007; Zweben, 1991). Svarbu, jog armuojančio pluošto skersmuo būtų kuo mažesnis, o ilgis kuo didesnis. Pavyzdžiui, Islam (2008), tyręs kanapių pluošto ilgio įtaką epoksido ir poliipieno rūgšties kompozitų savybėms, nustatė, kad naudojant ilgą pluoštą (iki 100 mm), gaunamas, atitinkamai, 50 % (34 MPa) ir 35 % (58 MPa) didesnis kompozito stipris tempiant nei naudojant trumpą – 8 mm pluoštą (15 MPa). Bos (2004), lygindama 12 mm pluoštu ir vienkrypte lino medžiaga armuotų poliesterio kompozitų savybes, nustatė net 4 kartus didesnę pastarojo stiprį tempiant (atitinkamai, 60 ir 249 MPa). Goutianos su bendraautoriais (2006), lygindami lino pluoštu, audiniu ir vienkrypte medžiaga armuotų vinilo esterio kompozitų stiprį tempiant, nustatė daug geresnes, išsisiniu būdu armuotų kompozitų savybes (atitinkamai, 49, 130 ir 143 MPa). Panašius tyrimus atlikus su stiklo pluoštu armuotos poliesterinės dervos kompozitais, nustatytas 95 MPa stipris tempiant dispersinio ir net 750 MPa – vienkrypčio kompozito atveju (Zweben, 1991). Šie skirtumai susiję su prastesnėmis dispersinės armuojančios medžiagos mechaninėmis savybėmis. Išsisiniu būdu armuotuose kompozituose tarp pluoštų veikiančios adhezinės jėgos lemia vientisą atsaką į išorines jėgas, kuris yra artimas atskirų pluoštų stiprumų sumai. Tačiau dispersiniuose kompozituose pavienių pluoštų atsakas yra labiau individualus. Šiuose kompozituose ties pluoštų galais susidaro įtempių koncentracija, kuri lemia medžiagos irimą pluošto ir matricos fazių sandūroje (žr. 1.1 pav.).

Nors dispersiniu būdu armuoti termoplastikai ir reaktoplastikai užima didžiąją plastiko kompozitų rinkos dalį (vertinant tiek sunaudojamų medžiagų, tiek ir gaminių kiekius), tačiau nuo XX a. paskutinio dešimtmečio, sparčiausiai plėtojasi būtent išsisiniu būdu armuotų kompozitų technologijos (Mortensen, 2007). Šių, didelio stiprumo kompozitų gamybai naudojamos įvairios struktūros pluoštinės medžiagos, kurių paprasčiausi yra gijiniai (sintetiniai arba dirbtiniai) arba verpti (dažniausiai natūralių pluoštų) siūlai bei iš jų pagamintos medžiagos, pvz. vienkryptės (kuriose visi siūlai yra orientuoti viena kryptimi), austos, megztos,

pintos ir pan. Tačiau vienkrypčių armuojančių medžiagų stiprumas didelis tik pluoštų orientacijos kryptimi, o skersine – mažas, todėl jos klojamos, atskirus sluoksnius orientuojant įvairiomis kryptimis. Dėl šios priežasties konstrukcijose, turinčiose išlaikyti kompleksines apkrovas, dažniausiai pasirenkami audiniai (Houshyar, 2005).



1.1 pav. Dispersiniu būdu pluoštais armuoto kompozito irimo dinamika daugiacyklio bandymo metu; matyti įtampių koncentracijos reiškiniai ties pluoštų galiukais (Nishikawa, 2010)

Tačiau nepaisant to, kad pluoštais armuotų kompozitų taikymo sritys ir vartojimo tempai nuolat auga, žvelgiant į tolimesnes šių gaminių plėtros perspektyvas, pagrindiniai iššūkiai siejami su didele pluoštinių medžiagų, o kartu ir gaminių kaina, mažais gamybos tempais, taip pat opiomis aplinkosaugos problemomis (Mortensen, 2007; Stickler, 2002). Atsižvelgiant į šias plėtros kryptis, daugiausiai dėmesio sulaukė biokompozitai, arba kitaip – sintetiniai arba bioskaidūs plastikai armuoti bioskaidžiais pluoštais (Mohanty, 2002; Bledzki, 1999). Tokį didelį susidomėjimą paskatino net kelių problemų sprendimo galimybės: pirmiausia – sumažinti armuojančių pluoštų kainą bei užtikrinti bioskaidumą ir atsinaujinančių žaliavų naudojimą, (todėl kituose apžvalgos skyriuose šią temą tikslinga aptarti plačiau), taip pat galimybė kompleksiskai spręsti gamybos automatizacijos problemas.

1.2 Kompozitų komponentai

Projektuojant kompozitus, tiek tiriant jų savybes, svarbiausia žinoti, kaip kompozitų savybės priklauso nuo jo komponentų individualių savybių bei jų tarpusavio adhezinės sąveikos (Mortensen, 2007).

1.2.1 Augalinio pluošto armuojančios medžiagos sandaros ir savybių įtaka biokompozitų mechaninėms savybėms

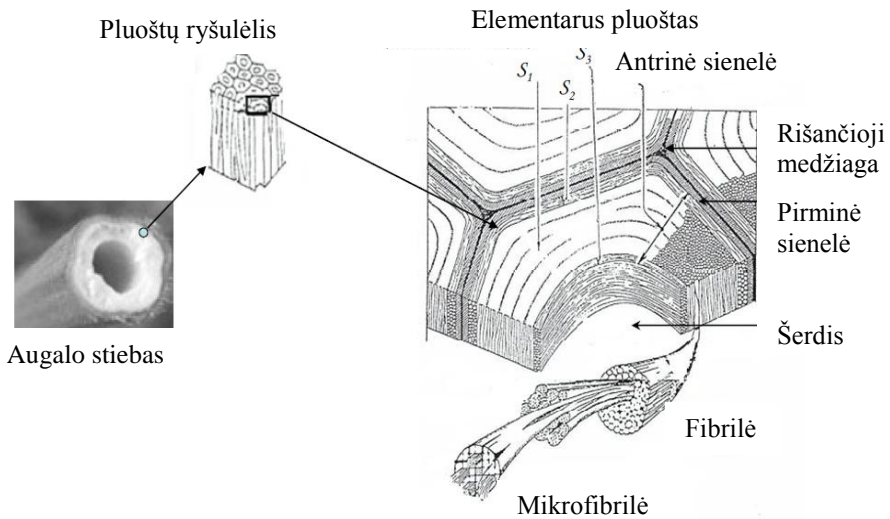
Pagrindinės problemos, ribojančios augalinių pluoštų taikymą kompozitų gamyboje, susijusios su nepakankamu jų stiprumu ir standumu, lyginant su specialių eksploatacinių savybių (angl. *high performance*) pluoštais. Augalinio pluošto savybių ypatumą lemia jo heterogeninė cheminė prigimtis bei daugiapakopė sandara nuo molekulinio iki aukščiausio pluošto struktūros lygmens, taip pat tekstilės gaminio struktūra (Goutianos, 2006; Houshyar, 2005; Peled, 2003; Bledzki, 1999; Degennes, 1992). Gerai žinoma, kad mikrofibrilės lygmenyje augalinio pluošto mechaninių savybių vertės (Jungo modulis – 135 GPa) yra didesnės nei aramido pluošto (124 GPa) (Bourmaud, 2013; Berglund, 2010; Wan, 2009). Tačiau, kuo aukštesnis pluošto struktūros lygmuo – tuo mažesnis jo stiprumas ir standumas (Berglund, 2010; Kers, 2010; Wan, 2009) (žr.1.1 lentelė). Todėl galima teigti, jog viena iš priežasčių, lemiančių nepakankamas augalinio pluošto mechanines savybes, susijusi su augalinio pluošto struktūros ypatumais.

1.1 lentelė. Bambuko pluošto mechaninės savybės skirtinguose struktūros lygmenyse (Wan, 2009)

Struktūros lygmuo	Skersmuo	Ilgis	Stipris tempiant, MPa	Standumas tempiant, GPa	Pailgėjimas trūkio metu, %
Techninis pluoštas	50-200 μm	4-5 cm	387	2,7	16,7
Elementarus pluoštas	3-27 μm	5 mm	916	13,6	71,2
Mikrofibrilė	11-25 nm	230 nm	-	40	-

Augaliniai pluoštai, kitaip nei sintetiniai, yra ne ištisinės, o riboto ilgio (10-400 mm) daugiapakopės struktūros medžiagos (žr. 1.2 pav.) (Faruk, 2012; Mortensen, 2007). Gamyboje naudojamas pluoštas išgaunamas iš augalo, technologinių operacijų metu išskiriant techninį pluoštą (Bos, 2004; Bledzki, 1999). Techninį pluoštą sudaro elementariųjų pluoštų grupė – pluoštų ryšulys, kurio skersmuo apytikriai yra 50-150 μm . O elementarusis pluoštas yra ne kas kita kaip augalo ląstelė, maždaug 10-20 μm skersmens. Kiekvieną ląstelę gaubia sienelė, sudaryta iš kelių sluoksnių, kurios pagrindinės sudedamosios dalys yra celiuliozė, hemiceliuliozė, ligninas, taip pat pektinai ir vašakai. Ląstelės sienelę galima įsivaizduoti kaip lygiagrečiai išdėstytomis celiuliozės mikrofibrilėmis (skersmuo 1–4 nm) armuotą lignino kompozitą. Celiuliozės mikrofibrilės pluošte yra orientuotos tam tikru kampu išilginės ašies atžvilgiu (žr.1.3 pav., a). Įvairių augalinių pluoštų celiuliozės mikrofibrilių orientacijos kampas yra skirtingas (žr. 1.2 lentelė). Kuo šis kampas yra mažesnis, tuo didesnis Jungo modulis ir mažesnis tąsumas (žr. 1.3 pav.,

b) (Wan, 2009). Šios savybės būdingos lino, kanapių ir džiuoto pluoštams, kurie yra dažniausiai naudojami kaip armuojantys pluoštai (Berglund, 2010; Wan, 2009). Taip pat tiriamos galimybės keisti augalinio pluošto struktūrą ir taip padidinti jo stiprį. Pavyzdžiui, geresnę pluoštų orientaciją ašies kryptimi galima užtikrinti daugiacyklio tempimo metu (Placet, 2014). Placet su bendraautoriais (2014) nustatė, kad vos po 8 tempimo ciklų, elementaraus kanapių pluošto standumas padidėja nuo 20 iki 42 GPa. Toliau didinant tempimo ciklų skaičių, mažėja grįžtamosios deformacijos vertės, todėl net ir pašalinus apkrovą, pluošto standumas išlieka didesnis. Autoriai taip pat tyrė pluoštų sukrumo įtaką jo mechaninėms savybėms ir gavo netgi didesnę daugiacyklio tempimo įtaką sukresnių pluoštų atveju (žr. 1.4 pav.).

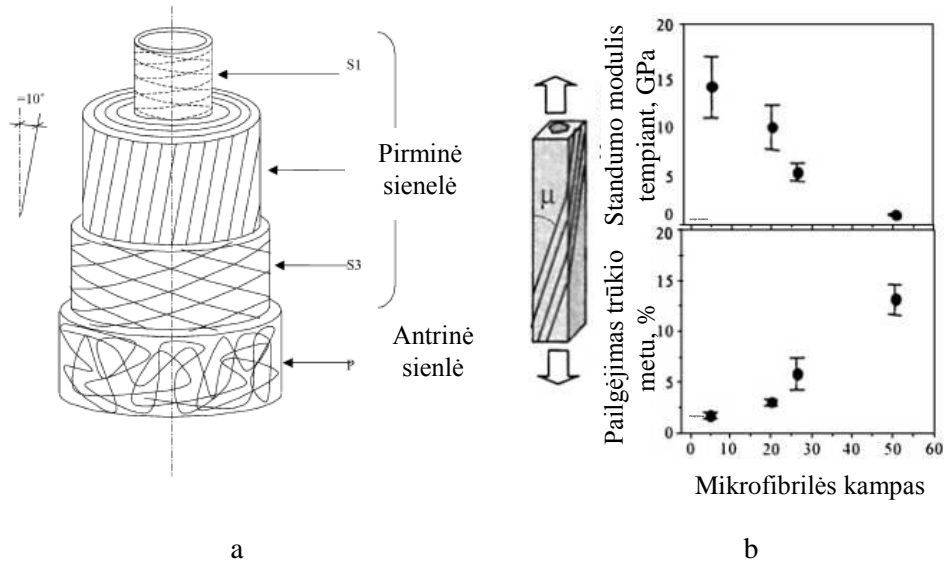


1.2 pav. Daugiapakopės augalinio pluošto (kanapės) sandaros schema (Placet, 2011)

Tačiau pluošto mechaninės savybės priklauso ne tik nuo jų orientacijos, bet ir nuo pluošto sudedamųjų dalių santykio ir savybių. Kiekvienoje celiuliozės elementarioje grandyje yra trys hidroksilo grupės, kurių gebėjimas sudaryti vandenilines jungtis tarp makromolekulių lemia tvirtą, taisyklingos mikrokristalinės struktūros sričių susidarymą, kurios išsidėsčiusios tarp netvarkingų ir mažiau taisyklingų amorfinių sričių. Įvairių pluoštų kristalinių ir amorfinių sričių santykis yra skirtingas ir priklauso ne tik nuo pluoštinės prigimties, bet ir daugelio kitų veiksnių: aplinkos sąlygų, augalo brandos ir pan. Todėl celiuliozės savybės yra apibūdinamos jos kristališkumo laipsniu. Nors celiuliozės kristalinė struktūra tiriama nuo XIX amžiaus, tačiau dėl didelio kompleksiško vis dar nėra iki galo suprasta (Park, 2010).

Celiuliozės molekulės vandenilio jungtimis yra surištos su hemiceliulioze, sudarančia mikrofibrilės rišančią matricą. Hemiceliuliozė yra polisacharidas, kurio makromolekulė, lyginant su celiulioze, yra šakotos struktūros, žymiai mažesnės molekulinės masės bei amorfinė, todėl pasižymi prastesnėmis mechaninėmis

savybėmis (Jungo modulis tik 2 GPa) (Bourmaud, 2013). Taip pat yra itin hidrofiliška ir tirpi šarmuose bei rūgštyse, todėl nesunkiai pašalinama cheminių apdorojimų metu (Abdul Khalil, 2012; John, 2008; Bledzki, 1999).

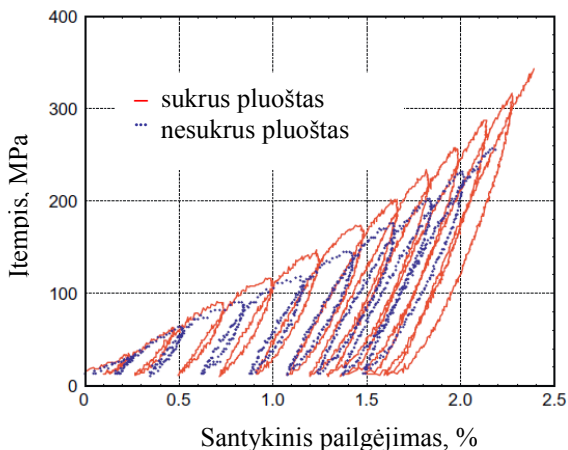


1.3 pav. Celiuliozės mikrofibrilių orientacija ląstelės sienelėje (a) ir jos įtaka mechaninėms savybėms (b) (Lichtenegger, 2000)

1.2 lentelė. Įvairių augalinių pluoštų sandara ir jų bei polipropileno kompozitų mechaninės savybės (Wambua, 2003)

Pluoštas	Celiuliozės kiekis, %	Mikrofibrilių orientacijos kampas, °	Pluošto stipris tempiant, MPa	Pluošto pailgėjimas trūkio metu, %	Kompozito stipris tempiant, MPa	Kompozito stipris lenkiant, MPa
Džiutas	61	8	400–800	2	26	34
Linai	71	5–10	800–1500	7	-	-
Kanapės	78	6	550–900	8	52	54
Ramė	83	8	500	12–17	-	-
Sizalis	67	10–22	600–700	11	34	25
Kokosas	43	39–49	220	10	11	26
Medvilnė	95	20–30	400	8–25	-	-

Celiuliozės mikrofibrilės ir hemiceliuliozė gaubia ligninas, kuris augalui suteikia standumo. Ligninas – tai itin didelės molekulinės masės, nereguliaros struktūros amorfinis polimeras, pasižymintis ne tik prastomis mechaninėmis, bet ir hidrofobinėmis savybėmis. Šis polimeras tirpus karštame šarme, lengvai oksiduojasi (Abdul Khalil, 2012; John, 2008; Bledzki, 1999). Dėl šakotos struktūros bei aromatinių ir alifatinių komponentų, jis netirpsta daugumoje tirpiklių ir nesiskaido į monomerus, o tai sunkina augalinio pluošto cheminį apdorojimą.



1.4 pav. Kanapės pluošto daugiacyklis tempimas naudojant tolygiai didėjančią jėgą (Placet, 2014)

Kaip minėta (Bourmaud, 2013; Abdul Khalil, 2012; John, 2008; Bledzki, 1999), hemiceliuliozė ir ligninas pasižymi prastesnėmis adhezinėmis ir mechaninėmis savybėmis, todėl kuo pluošte didesnis celiuliozės kiekis, tuo geresnės ne tik pluošto, bet ir juo armuoto kompozito mechaninės savybės (žr. 1.2 lentelė). Todėl įprastai šiuos augalinio pluošto komponentus stengiamasi pašalinti, dažniausiai atliekant cheminį pluošto apdorojimą. Daugiausia taikomi pigūs ir efektyvūs metodai, pvz., merserizavimas (ASTM D 1776-74: skalaujant stipriu šarmu apdorotą augalinį pluoštą vandenyje ir neutralizuojant silpname rūgšties tirpale, keičiasi jo struktūra, matmenys, morfologija ir mechaninės savybės), kurio metu nuo augalinio pluošto pašalinamos amorfinės medžiagos (hemiceliuliozė, pektinas, vašakai) ir vyksta celiuliozės rekristalizacija, kurios metu pluoštas stiprinamas, nes susidaro mažesnių matmenų patvaresni kristalai (Abdul Khalil, 2012; Ku, 2011; Bledzki, 1999). Todėl gerėja pluošto morfologija, užtikrinama geresnė adhezija ir didesnis pluošto stipris tempiant (Ku, 2011; Bledzki, 1999). Pavyzdžiui, Hu ir kt. (2007) kanapių pluoštą apdoroję 6 % natrio šarmo tirpalu gavo 18 % didesnę kompozito stiprį tempiant ir 24 % – stiprį lenkiant. Nors tekstilės pramonėje šis apdorojimo metodas taikomas nuo XIX amžiaus vidurio, gaminant kompozitus, pasitaiko ir nesėkmingų augalinio pluošto merserizavimo parametrų parinkimo atvejų, pvz., lino pluošto merserizacija silpname natrio šarmo tirpale lėmė net 56 % prastesnes kompozito mechanines savybes (Baley, 2006). Dažniausiai tokie rezultatai gaunami netinkamai parinkus tirpalo koncentraciją, taip pat nesilaikant technologinės operacijų sekos: po merserizacijos būtina atlikti pluošto skalavimą ir neutralizaciją, kurių metu vyksta celiuliozės rekristalizacija, taip pat tempimą ir kaitinimą – pluoštą iš naujo orientuojant ir stabilizuojant.

Adheziją galima padidinti mažinant pluošto hidrofiliškumą acetilinant. Acetilavimo metu celiuliozės vandenilio atomas keičiamas acetilo grupe, kuri su matricos polimeru sudaro skersinius kovalentinius ryšius ir taip užtikrina geresnes kompozito mechanines savybes. Įsidėmėtina, kad tinkamai parinkus technologinius

parametrus, reakcijoje dalyvauja tik pluošto amorfinės dalies hemiceliuliozės ir lignino hidroksilo grupės, tuo metu kristalinės celiuliozės hidroksilo grupės išlieka nepaveiktos (John, 2008). Todėl acetilinimo parametrus būtina optimizuoti, priešingu atveju, suirus celiuliozei, kompozito stipris gali būti mažesnis net už matricos polimero stiprį (Abdul Khalil, 2012; Bledzki, 2008; Baley, 2006). Panašus veikimo mechanizmas būdingas ir priskiepijant maleino anhidridu, tik šiuo atveju geresnes kompozito savybes lemia ne armuojančio pluošto, o matricos polimero skiepijimas (John, 2008; Van de Velde, 2003). Aukštą maleino anhidrido kainą kompensuoja mažesnės nuotekų valymo išlaidos, kadangi į nuotekas nepatenka chemikalų likučiai, kas, kitų cheminių apdorojimo atveju, lemia dideles nuotekų valymo išlaidas.

Jau daugiau kaip 50 metų atliekama pluošto modifikacija silano junginiais. Šie junginiai turi dvi funkcines grupes, kurių viena reaguoja su celiuliozės hidroksi grupe, o kita su dervos polimeru, susidarant skersiniams ryšiams tarp pluošto ir matricos (John, 2008). Kadangi augalinio pluošto kristalinės celiuliozės hidroksi grupės dėl gaubiančio hemiceliuliozės sluoksnio chemikalai sunkiai pasiekia, būtina atlikti silanų hidrolizę. Atlikus sizalio audinio modifikaciją silano junginiais, buvo nustatytas 14 % didesnis vinilo esterio kompozito tampros modulis, 3 % didesnis stipris tempiant ir 15 % stipris lenkiant (Xie, 2010). Apdorojimo efektyvumas priklauso nuo parinktų technologinių parametrų: hidrolizės trukmės, funkcinių grupių savybių, temperatūros, pH ir kt., kuriuos būtina optimizuoti. Pavyzdžiui, Van de Weyenberg (2003) ir kt., tyrę šio metodo įtaką lino ir ramės pluoštais armuotų epoksido kompozitų savybėms, nustatė labai mažą teigiamą ar net neigiamą įtaką kompozito stiprumui. Tačiau ir tokio apdorojimo atveju, į vandenį patekę chemikalai teršia nuotekas (John, 2008).

Norint užtikrinti geresnį pluošto ir matricos polimerų suderinamumą, galima taikyti ir pirminį pluošto impregnavimą tirpikliu, armuojančią medžiagą iš pradžių impregnuojant polimeru, kurio prigimtis artima matricos polimero prigimčiai. Bet šis metodas taip pat teršia aplinką, o platesnes jo taikymo galimybes sunkina ribota tinkamų tirpiklių pasiūla. Van de Weyenberg ir kt. (2003), derindami tarpusavyje pluošto šarminį apdorojimą ir pirminį impregnavimą tirpikliu (acetonu), gavo didesnę vienkrypte lino medžiaga armuoto epoksido kompozito stiprį lenkiant (išilgine kryptimi 40 % ir 200 % – skersine) bei lenkimo modulį (išilgine kryptimi 40 % ir 500 % – skersine), o tempimo modulis ir stipris tempiant išilgine kryptimi padidėjo 40 %, skersine – 250 %.

Apibendrinant galima teigti, kad atliekant cheminį apdorojimą vandens terpėje arba lakiaisiais organiniais tirpikliais, naudojami taršūs chemikalai, todėl būtinas šių medžiagų atliekų tvarkymas (papildomos sąnaudos nuotekoms ir orui valyti). Pasaulio banko (angl. *The World Bank*) duomenimis net 20 % vandens taršos, susijusios su pramone, lemia cheminiai tekstilės apdorojimo procesai. Todėl tekstilės pramonė yra viena iš labiausiai aplinką teršiančių pramonės šakų (Miraftab, 2007). O apdorojimas žemo slėgio plazma (kitaip dar vadinama žemos temperatūros plazma) yra vienas iš netauršų paviršiaus apdorojimo ir aktyvacijos metodų, pastaruoju metu sulaukęs daugiausiai dėmesio (Desmet, 2009; Denes, 2003). Šio

apdoravimo metu taupomi energijos ir vandens išteklių, taip pat sunaudojami mažesni chemikalų kiekiai. Techninę plazmą sudaro nuolatiniame elektriniame arba magnetiniame lauke esančios jonizuotos elementariosios dalelės (iki 10 % atomų ir molekulių), t. y. neutralios molekulės ir atomai, teigiami ir neigiami jonai bei laisvieji elektronai, kurių teigiamųjų ir neigiamųjų krūvių tankis yra beveik vienodas. Plazmoje sugeneruotomis aktyviomis dalelėmis stipriai veikiamas pluošto paviršius. Šis poveikis yra daugialypis, vyksta net keli skirtingi procesai – paviršiaus valymas, išdėtinimas, naujų cheminių ryšių susidarymas bei funkcinių grupių prisijungimas (Liston, 1993). Kuris iš poveikių dominuos, priklauso nuo kietosios fazės kilmės, dujų aplinkos ir technologinių parametrų (Desmet, 2009). Tinkamai parinkti apdoravimo režimai užtikrina tik kietosios fazės paviršiaus sluoksnių pakitimus, o jo vidiniai sluoksniai lieka nepakitę (Virk, 2004). Pagrindiniai technologiniai parametrai, kuriuos keičiant galima išgauti skirtingus poveikius, yra išlydžio galia ir apdoravimo trukmė (Duigou, 2012). Taikant ilgesnę apdoravimo trukmę arba didesnę išlydžio galią, gaunami didesni paviršiaus nelygumai (Duigou, 2012). Vieni autoriai šį pokytį laiko plazma apdoroto pluošto adhezinės savybės lemiančiu veiksniu (Bozaci, 2013; Sever, 2011; Lu, 2007; Wong, 2000). Tačiau taikant šiuos intensyvaus apdoravimo režimus, didėja celiuliozės terminio pažeidimo ir destrukcijos rizika, kurios stengiamasi išvengti mažinant išlydžio galios vertes (Kalia, 2013; Ibrahim, 2010). Tačiau kiti autoriai mano, kad svarbesnis veiksnys, lemiantis cheminio ryšio susiformavimą, yra reakcingų funkcinių grupių prisijungimas. Šis poveikis gaunamas net esant trumpai apdoravimo trukmei (Junkar, 2011). Priklausomai nuo dujų prigimties, pluoštų paviršiuje prijungiamos skirtingos funkcinės grupės. Augaliniai pluoštai dažniausia apdorojami oksidacinių azoto (N_2), deguonies (O_2) ar argono (Ar) dujų plazmomis (Bozaci, 2013; Sever, 2011; Ibrahim, 2010; Inbakumar, 2010; Wong, 2000). Jeigu N_2 dujų plazmos atveju vyksta cheminės struktūros pokyčiai, dalyvaujant N atomams ($N-CH_3$, $C-H$, $N-H$, $C\equiv N$ cheminiai ryšiai ir $-NH_2$ funkcinės grupės), tai O_2 dujų plazmos atveju – O atomams ($C-O$, $C=O$, $O-H$ cheminiai ryšiai ir $-COOH$, $-CH_3$, $-CH_2$ funkcinės grupės). Palyginus su deguonies dujomis, azoto dujų plazma neturi stipraus oksidacinio poveikio, t. y. mažesnė celiuliozės cheminės destrukcijos galimybė. Nors pluoštai su naujomis funkcinėmis grupėmis pasižymi geresniu vilgumu, tačiau adhezinio ryšio patvarumas priklauso nuo jo tipo, t. y. ryšio energijos. Yra darbų, kuriuose teigiama, kad svarbesnis vaidmuo formuojant ryšius tarp pluošto ir polimerinės matricos tenka ligninui, kuris dėl hidrofobinės prigimties apriboja tvirto ryšio susidarymą, ir be to, yra sunkiai pašalinamas net taikant intensyvų apdoravimą (Yang, 2013; Achyuthan, 2010; Rowell, 1998). Taigi skirtingų tyrėjų rezultatai skiriasi. Tačiau apdoravimo parametrų pasirinkimas, pirmiausia turėtų būti atliekamas atsižvelgiant į pritaikymo sritį. Nepaisant to, kad daug autorių tiria apdoravimo plazma įtaką augalinio pluošto savybėms, tačiau rasta mažai darbų, kurie nagrinėtų šio apdoravimo įtaką augaliniu pluoštu armuoto kompozito savybėms.

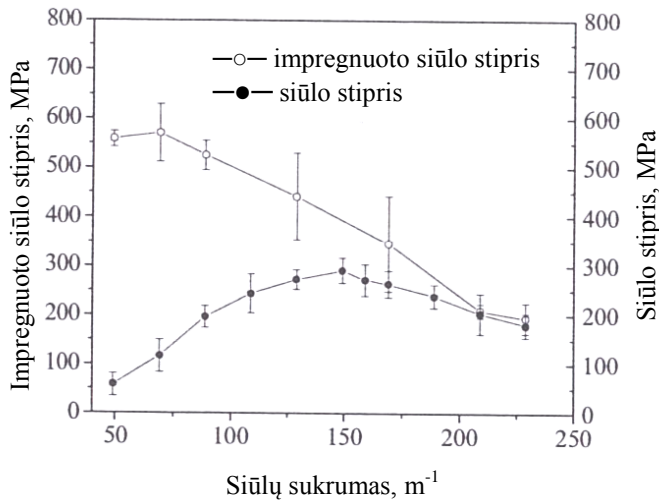
Dar vienas, gamtą tausojantis augalinio pluošto ir polimerinių matricių suderinamumo reguliavimo metodas – terminis apdoravimas, sunaudojantis mažiau energijos ir visiškai nenaudojantis chemikalų. Jo metu kinta augalinio pluošto

fizinės ir cheminės savybės; kinta pluošte esančio lignino ir hemiceliuliozės cheminė sudėtis, kas lemia dalies vandenilinių ryšių pakeitimą tvaresniais kovalentiniais ryšiais, mažėja pluošto hidrofiliskumas (Kaewkuk, 2013; Wikberg, 2004; Robin, 2001). Šie struktūros pokyčiai didina pluošto ir polimero tarpusavio adheziją (Wikberg, 2004). Tačiau, jeigu augalinio pluošto kaitinimas 100 °C temperatūroje padidina pluošto stiprumą, aukštesnėje nei 150 °C temperatūroje gali vykti celiuliozės irimas (Miraftab, 2007).

Tačiau ištisiniu būdu armuoto kompozito savybės priklauso ne tik nuo pluošto žaliavos, bet ir armuojančios medžiagos struktūros. Išgautas techninis pluoštas toliau yra formuojamas į paprasčiausią ištisinę armuojančią medžiagą – sruogą, šukuotą sluoksną (purų verpalų pusgaminį iš tolygių plaušelių) ar siūlą. Pastarasis pasižymi daug geresnėmis mechaninėmis savybėmis nei kitos dvi. Siūlą gali sudaryti tiek pavienės gijos, tiek ir kelių gijų sistema, kuri dažniausiai sutvirtinama siūlus susukant. Šios operacijos metu didėja siūlo gijų posvyrio kampas siūlo ašies atžvilgiu. Didinant siūlų sukumą, sraigtinėmis vijomis išsidėsčiusiuose plaukeliuose pradeda veikti didelės tangentinės (trinties) jėgos, kurios, dėl didesnės plaukelių sąveikos, neleidžia plaukeliams slinkti vienas kito atžvilgiu, užtikrinant siūlo vientisumą ir geresnes mechanines savybes. Tačiau, kartu dėl besikeičiančios apvijų orientacijos, keičiasi ir jėgos perdavimo kryptis. Todėl, taikant per didelį sukumą, ne tik pradeda dominuoti trinties jėgos, bet ir dėl pasikeitusios jėgos krypties, siūlo stiprumas pradeda mažėti (Porwal, 2007). Nors, taikant optimalias sukumo vertes, gaunamos daug geresnės siūlų mechaninės savybės, tačiau dažniausiai tokiais siūlais armuotų kompozitų savybės būna prastesnės nei armuotų nesuktais siūlais (žr.1.5 pav.) (Goutianos, 2006). Todėl pastaraisiais metais didelio dėmesio susilaukė nesuktų pluoštų sruogomis armuoti kompozitai (Weager, 2010; Goutianos, 2006).

Nepaisant to, yra tyrėjų, kurie bendradarbiaudami su įmone *Samson Rope Technologies Inc* nustatė, kad kompozituose suktų siūlų gijos, dėl glaudesnio kontakto ir didesnių trinties jėgų, geriau paskirsto apkrovas (Porwal, 2007). Taip pat svarbu atkreipti dėmesį, kad naudojant didelio ilginio tankio (400–600 tex) siūlus, dėl glaudesnės pluoštų sąveikos, gaunamas prastesnis vilgumas, todėl apsunkinamas tolygus dervos pasiskirstymas. Susiklosčius dviems skirtingiems požiūriams į sukumo įtaką kompozitų mechaninėms savybėms, praktikoje kompozitų armavimui naudojami tiek sukti, tiek ir nesukti siūlai (Weager, 2010; Pothan, 2008; Peled, 2007). Tačiau būtų tikslinga ištirti siūlo sukumo įtaką kompozito stiprumui, papildomai orientuojant ištisinę armuojančią medžiagą ašies kryptimi. Augalinio pluošto tempimo metu vyksta pluošto orientavimas tempimo kryptimi, todėl padidėja jo stiprumas. Vienas, geriausiai žinomų pavyzdžių – metmenų siūlų įtempimas audimo metu, gaunant šia kryptimi didesnę audinio stiprumą (Malik, 2010).

Ištisinės medžiagos vėliau gali būti naudojamos formuojant tekstilės gaminius audimo, mezgimo ar kt. būdais. Audiniais armuoti kompozitai yra stiprūs ir standūs, pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis, lyginant su kitomis struktūromis armuotais kompozitais, taip pat daug lengviau formuojami (Houshyar, 2005).



1.5 pav. Lino pluošto siūlo ir impregnuoto siūlo stiprio priklausomybė nuo siūlų sukrumo (Goutianos, 2006)

Didžiausią įtaką audinių mechaninėms savybėms turi jų sandaros parametrai – pynimas, siūlų ilginis tankis, audinio tankumas ir siūlų rangytumas (Poathan, 2008; Houshyar, 2005; Medeiros, 2005; Lee, 2003; Okutan, 2001). Įprastai armavimui naudojami drobinio, ruoželinio ar satininio pynimo audiniai (Houshyar, 2005). Dviejų pastarųjų pynimo tipų audinių stipris yra didesnis (tiesus siūlas yra stipresnis nei rangytas), todėl šių pynimų audiniai dažnai naudojami armuojant kompozitus. Tačiau didesniu struktūros stabilumu pasižymi drobinio pynimo audiniai, kuriuos naudojant pavyksta išvengti siūlų orientacijos ir slydimo bei kitų defektų (Houshyar, 2005; Okutan, 2001).

1.2.2 Dervos iš sintetinių ir biologiškai skaidžių polimerų

Armujančių pluoštų impregnavimui naudojamos dviejų tipų polimerinės dervos – reaktoplastikai ir termoplastikai. Iš termoplastikų, augaliniams pluoštams impregnuoti, dažniausiai naudojami keturi polimerai – polipropilenas, polietilenas, polistirenas ir polivinilchloridas. Tačiau vis dažniau pasirenkami ir biopolimerai (dažniausiai polipieno rūgštis – PLA), nors pastarųjų kainos taip pat dar viršija įprastų termoplastikų kainas. Vis dėlto, per pastaruosius dešimt metų, jų kainos sumažėjo tiek, kad susilygino su specialiųjų polimerų, pvz., polikarbonatų, kainomis (Suddell, 2009). Termoplastiniai polimerai yra linijinės struktūros, jų makromolekules jungia silpna sąveika, pagrįsta Van der Valso jėgomis ir vandenilniais ryšiais, todėl augalinio pluošto ir termoplastinių dervų sukibimas labai priklauso nuo šių veiksnių sukeltos fizikinės sąveikos tarpfazinėje riboje (Le Duigou, 2010; Parlevliet, 2006). Šiuo metu plačiausiai naudojami sintetiniai reaktoplastikai – poliesterio, vinilesterio bei epoksidinės dervos, nes bioplastikų kainos verslui dar nepalankios. Reaktoplastinės dervos – tai klampūs pirminiai

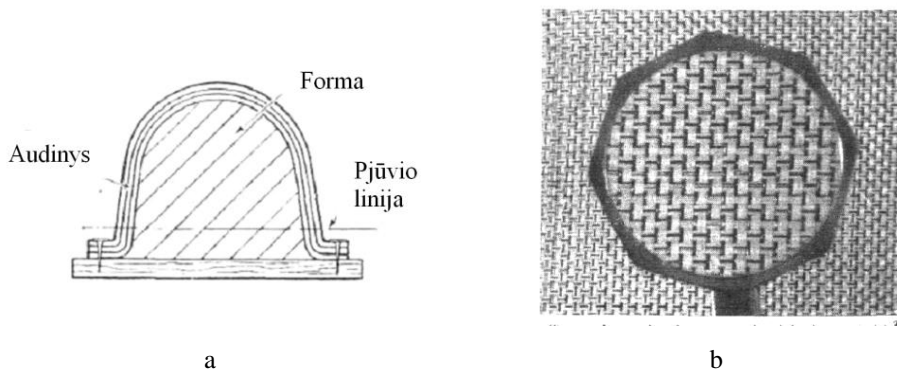
polimerai, kietinimo metu virstantys netirpiomis medžiagomis, kurios tarpfazėje su augaliniais pluoštais sudaro trimatę tinklinę struktūrą (Xie, 2010; Edlund, 2003).

Reaktoplastiniai poliesteriai gaunami, dalį sočiosios rūgšties pakeičiant nesočiaja (pvz., maleino rūgšties anhidridu). Tokių poliesterių pagrindinėje makromolekulės grandinėje yra dvigubų (nesočiųjų) ryšių, kuriuos atveriant, vyksta tolesnė polimerizacija, kurios metu susidaro didesnės molekulinės masės tinklinės struktūros polimeras. Poliesterių fizikinėms savybėms daugiausiai įtakos turi dvigubųjų ryšių kiekis makromolekulėje: kuo daugiau šių ryšių, tuo tankesnis makromolekulių tinklas. Todėl nesočiosios rūgšties kiekis lemia poliesterio dervos standumą bei trapumą (Buika, 2008). Dėl abiejų komponentų tinklinės struktūros, augalinis pluoštas ir reaktoplastinė derva dažniausiai jungiasi cheminiais ryšiais (Le Duigou, 2010; Edlund, 2003). Gerą kompozito komponentų adheziją lemia ir tai, kad abu komponentai yra poliniai (Xie, 2010). Esterių dervos yra pigios, santykinai atsparios temperatūrai, jų kompozitai standūs, tačiau trapūs, taip pat jautrūs UV spindulių poveikiui. Saugant nuo šio poveikio, gaminių paviršių tenka dengti apsauginėmis medžiagomis.

Dėl gerų tinklinės struktūros reaktoplastikų savybių – didelio standumo ir termostabilumo – ieškoma būdų sukurti reaktoplastikus iš atsinaujinančių žaliavų. Biopolimerai gaminami iš skirtingų žaliavų, todėl skirstomi į (1) pagamintus iš sintetinių naftos produktų (alifatiniai poliesteriai, alifatiniai aromatiniai poliesteriai, poliesterių amidai (angl. *poly(ester–amid)s*), polivinilo alkoholiai ir kt.), (2) atsinaujinančių žaliavų (grūdinių kultūrų, celiuliozės, sojų pupelių, krakmolo, polihidroksi alkanoatų (angl. *polyhydroxyalkanoates*) (bakteriniu būdu susintetintų polimerų) bei (3) biopolimerų mišinių (Mohanty, 2002). Pavyzdžiui, sintetinant iš anakardžių riešutų kevalų išgaunamą kardanolį (gamtinį fenolinį junginį) su formaldehidu, buvo sukurta kardanolio-formaldehido derva. Ši derva lengvai perdirbama, atspari rūgštims ir šarmui, termostabili, pasižymi antibakterinėmis savybėmis, bet jos savybės tempiant yra santykinai prastos. Dar vienas pavyzdys – augalinių aliejų epoksidinimas. Bet mažas epoksidinių grupių reaktyvumas neužtikrina reikiamos tinklinės struktūros susidarymo, todėl plastikas turi prastesnes mechanines savybes. Kiti tyrėjai, naudodami glicerolį ir citrinų rūgštį, sukūrė bioskaidžią poliesterio dervą (Raquezza, 2010). O Rothenberg ir Alberts ieškodami naujų biokuro gamybos būdų, sukūrė pirmąjį netoksišką, visiškai bioskaidų ir perdirbamą reaktoplastinį bioplastiką *Glycix*. Abu pagrindiniai šio polimero komponentai, glicerolis ir citrinų rūgštis, gaminami iš biomasės bei yra santykinai nebrangūs. Manoma, kad *Glycix*, statybos ir pakavimo medžiagų pramonėje galėtų pakeisti poliuretaną ir polistireną, taip pat epoksidines dervas (Plasteurope.com, Research, 2014). O plačiausiai naudojamas polipieno rūgšties ((C₃H₄O₂)_n) bioplastikas gaunamas iš biomasės pieno rūgšties (HOCH₃CHCOOH) fermentacijos būdu. Polimeras gaminamas iš pieno rūgšties L-izomero, kuris suteikia polimerui didesnę stiprį ir poliškumą. Šio polimero kristališkumas yra apie 37 % (Gupta, 2007). Polipieno rūgštis, kaip alifatinis poliesteris, turi trumpą metileno segmentą ir vandens terpėje yra biologiškai skaidus (Edlund, 2003).

1.3 Natūraliais pluoštais armuotų kompozitų istorinė plėtra ir perspektyvos

XX amžiaus pradžioje daugelis techninių gaminių iš tekstilės, taip pat ir ištisiniu būdu armuoti kompozitai, buvo gaminami naudojant augalinius pluoštus (žr. 1.6 pav.) bei vietines žaliavas (Laminated plastics. Flight, 1944). Pavyzdžiui, 1896 metais lėktuvų sėdynės ir degalų rezervuarai buvo gaminami iš natūralaus pluošto ir mažo kiekio polimerinės matricos. Tačiau plėtojantis sintetinių ir dirbtinių pluoštų pramonei, tolimesnė kompozicinių medžiagų plėtra vyko naudojant tokius, specialių eksploatacinių savybių pluoštus, kaip stiklo, anglies ir aramido, kurie užtikrina daug geresnes mechanines savybes (žr.1.3 lentelė). Tačiau šie pluoštai pasižymi neigiamu poveikiu aplinkai, kadangi yra biologiškai neskaidūs. Todėl netrukus buvo susirūpinta ir šia problema. Europos automobilių pramonės „žaliuoju pionieriumi“ tapo nuo 1950 m. Rytų Vokietijoje pagamintas automobilio *Trabant* kėbulas iš medvilnės pluoštu armuotos poliesterio dervos, kurio gamyba buvo nutraukta tik 1990 metais (Suddell, 2009). Yra ir kitokių pavyzdžių; kitaip nei kitos šalys, Indija neatsisakė augalinio pluošto kaip kompozitų armuojančios medžiagos. Vamzdžiai, statybinės konstrukcijos ir plokštės buvo gaminami iš polimerinių matricų, armuotų natūraliu pluoštu. Indijos vyriausybė rėmė didelius statybinius projektus, kurie numatė naudoti pastatų statybai, daugiausiai džiuto pluoštu armuotą, poliesterio dervą (pvz. 1978 m. pastatytas *Madras-House*, grūdų keltuvai ir kt.). Tačiau pastaruosius 20 metų, natūralių armuojančių pluoštų renesansas stebimas visame pasaulyje.



1.6 pav. 1944 metais aviacijos žurnale publikuotos mokslo naujovės: (a) medvilnės audiniu armuoto plastiko kompozito gamyba naudojant mažus slėgius bei (b) kompozito gamybai skirtas medvilnės audinys su įaustomis metalinėmis gijomis, užtikrinančiomis didesnę kompozito stiprumą (Laminated plastics, 1944)

Jau artimiausioje ateityje Europos pramonė numačiusi 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 biokompozitų gamyboje (Cristaldi, 2010). Vadovaujantis Europos Sąjungos darnaus vystymosi strategija, tekstilės kompozitų iš bioskaidžių medžiagų gamyba yra viena iš prioritetinių tekstilės sektoriaus plėtros krypčių. Panašius

tikslus yra numaćiusi ir JAV vyriausybė. Pavyzdžiui, planuojama, kad iki 2020 m. bent 10 % statybinių konstrukcijų bus pagaminta iš biologiškai skaidžių augalinės kilmės medžiagų, o iki 2050 m. šios apimtys padidės iki 50 % (Mohanty, 2002).

1.3 lentelė. Skirtingų pluoštų mechaninių savybių palyginimas (Wambua, 2003)

Pluoštas	Tankis, g/cm ³	Santykinis pailgėjimas, %	Stipris tempiant, MPa	Jungo modulis, GPa
Medvilnė	1,5–1,6	7,0–8,0	287–597	5,5–12,6
Džiutas	1,3	1,5–1,8	393–773	26,5
Linai	1,5	2,7–3,2	345–1035	27,6
Kanapės	-	1,6	690	-
Ramė	-	3,6–3,8	400–938	61,4–128,0
Sizalis	1,5	2,0–2,5	511–635	9,4–22,0
Koiras	1,2	30,0	175	4,0–6,0
Viskozė	-	11,4	593	11,0
E-stiklas	2,5	2,5	2000–3500	70,0
S-stiklas	2,5	2,8	4570	86,0
Aramidai	1,4	3,3–3,7	3000–3150	63,0–67,0
Anglis	1,4	1,4–1,8	4000	230,0–240,0

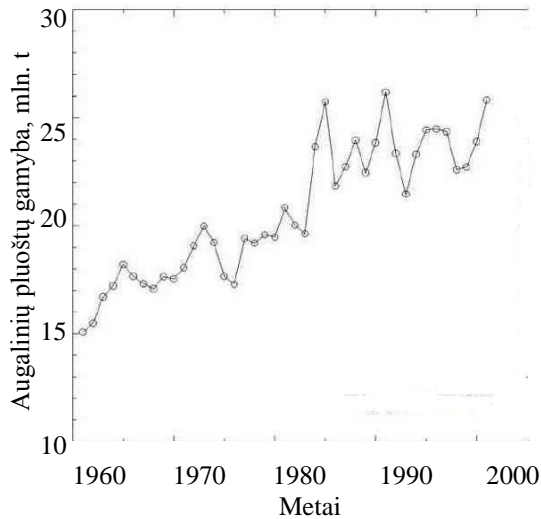
Kaip rodo pastarųjų keturiasdešimties metų statistika, pagrindinių augalinių pluoštų gamybos apimtys, nors ir svyruoja, tačiau auga (žr. 1.7 pav.). 1.4 lentelėje taip pat matyti augalinių pluoštų gamybos apimtys, atsižvelgiant į jų pluoštinę sudėtį. Dėl gero mechaninių savybių ir kainos santykio, išsisiniu būdu armuotų kompozitų gamybai daugiausia naudojami kanapių, lino, džiuto ir sizalio pluoštai, iš kurių Europoje, paplitę tik lino ir kanapių pluoštai. Nors šios medžiagos gali būti naudojamos įvairios paskirties plataus vartojimo prekių gamyboje, pvz., sporto inventoriaus, lagaminų ir kt., tačiau didžiausią pramonės dalį užima automobilių ir statybos srityje naudojami gaminiai (žr. 1.8 pav.).

1.4 lentelė. Skirtingų augalinių pluoštų gamybos mastai 2004 m. (Suddell, 2009)

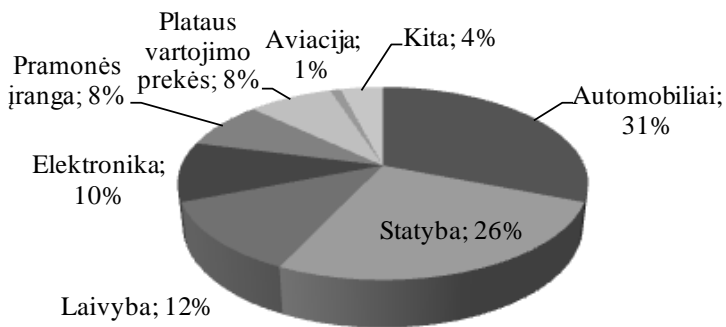
Pluoštinio augalo pavadinimas	Pagrindinės šalys	Gamybos apimtys, t
Bambukas	Kinija	10 000 000
Džiutas	Indija, Bangladešas	2 861 000
Kenafas	Indija, Kinija	970 000
Koiras	Indija, Vietnamas, Šri Lanka	931 000
Linai	Kinija, Europa	830 000
Sizalis	Brazilija, Tanzanija, Kenija	378 000
Ramė	Kinija	249 000
Kanapė	Kinija, Europa	214 000
Pluoštinis bananas	Filipinai, Ekvadoras	98 000
Agava	Kolumbija, Kuba, Meksika	56 000

Pavyzdžiui, dabartinės automobilių gamybos apimtys Vakarų Europoje siekia 16 milijonų transporto priemonių per metus. Įvertinus statistines natūralaus pluošto

sąnaudas vienam automobiliui, metinis šios žaliavos poreikis turėtų būti nuo 80 000 iki 160 000 tonų. Šiuo metu plėtojant naujų medžiagų iš augalinio pluošto įdiegimo programas ir į jas įtraukiant ekonomiškai silpnas šalis, lyderio pozicijas užima Vokietijos automobilių gamintojai, pvz., *Daimler AG*. Dėl įvairių darnios plėtos programų didėjantis techninio augalinio pluošto suvartojimas lėmė ir mažesnę šių žaliavų kainą: 2002 metais – 0,5–0,6 Eur/kg, kai įprastas stiklo pluoštas kainuoja 1,5 Eur/kg. Svarbiu įvykiu automobilių pramonėje buvo 2008 metais įvykęs *Lotus Eco Elise* pristatymas (Suddell, 2009). Šio modelio gamyboje buvo panaudoti tokie ekologiški pluoštai kaip kanapės, vilna ir sizalis. Dėl ekonominių priežasčių naudota nesočiojo poliesterio derva, bet ateityje ją planuojama pakeisti bioplastiku.



1.7 pav. Pastarųjų dešimtmečių augalinių pluoštų gamybos mastų kitimo tendencijos (Biagiotti, 2004)



1.8 pav. Pramonės šakos vartojančios pluoštais armuotus plastiko kompozitus (John, 2010)

Tarp žinomų automobilių gamintojų jau dabar yra naudojančių ne tik bioskaidžias armuojančias, bet ir matricos medžiagas, pvz., sojų proteino, polipieno rūgštis ir kt. (Suddell, 2009; Aková, 2008). Tačiau dauguma šių, iš atsinaujinančių

šaltinių išgaunamų matricos polimerų, kainos atžvilgiu negali prilygti šiuo metu dominuojantiems sintetiniams plastikams. Todėl dažniau naudojamas bioskaidžių pluoštų ir sintetinio plastiko derinys, bet numatoma, kad artimiausiu metu, dėl didesnio bioskaidžių plastikų vartojimo, sumažės ir bioplastikų kainos (Mohanty, 2002).

Nepaisant palankių prognozių, yra ir nemažai problemų, ribojančių platesni biokompozitų vartojimą, kurios susijusios su netolygia ir daugiapakope armuojančių pluoštų sandara bei prastesnėmis šių medžiagų mechaninėmis savybėmis, nepakankama adhezione sąveika tarp pluošto ir dervos. Todėl ieškoma vis naujų būdų spręsti šias problemas. Siekiant darnios plėtros tikslų, svarbu šiais principais vadovautis ne tik renkantis žaliavas, bet ir perdirbimo bei gamybos būdus.

1.4 Ištinis būdu armuotų erdvinės formos kompozitų gamybos metodai

Nors anksčiau aptartos bioskaidžių žaliavų ir netaršių technologijų naudojimo kompozitinių gaminių gamyboje problemos yra labai svarbios, tačiau, siekiant darnios kompozitinių medžiagų plėtros tikslų, ne mažiau svarbios yra ir esamų ar naujų gamybos būdų pritaikymo, tobulinimo ir plėtojimo problemos, kur svarbiausi klausimai siejami su didele gaminių kaina ir mažais gamybos tempais. Svarbu pabrėžti, kad šios problemos kyla ne visų, o tik sudėtingos erdvinės formos gaminių atveju, kurie apima pagrindinę ištinis būdu armuotų gaminių dalį.

Kompozitų gamyba gali būti suskirstyta į penkis pagrindinius etapus, kurie, priklausomai nuo pasirinktos gamybos technologijos, gali tarpusavyje skirtis. Tai – armuojančios medžiagos formavimas, impregnavimas, formos užpildymas, tankinimas ir kietinimas (Buika, 2008; Mortensen, 2007). Kompozitų gamybos technologija visų pirma pasirenkama priklausomai nuo naudojamos dervos tipo. Ištinis būdu armuoti reaktoplastinių polimerų kompozitai formuojami naudojant rankinio formavimo, vakuuminio formavimo, tiesioginio presavimo, laipsniško formos užpildymo derva, gijų suvijimo ir tempiamosios ekstruzijos metodais. O termoplastinių dervų gamybai yra pritaikyti tik keli iš šių metodų – tiesioginio presavimo, gijų suvijimo ir tempiamosios ekstruzijos.

Rankinio formavimo metodas, vienas iš pirmųjų aviacijos pramonėje taikytų gamybos metodų, iki šiol labiausiai paplitęs kompozitų gamyboje (Mortensen, 2007). Jo privalumai: universalumas (galima gaminti įvairių dydžių, sudėtingos formos gaminius), neaukšta darbinė temperatūra ir slėgis bei pigi įranga. Tačiau yra ir nemažai trūkumų – nemechanizuota gamyba (operacijos atliekamos rankiniu būdu), mažas darbo našumas ir didelė aplinkos terša, kompozitų kokybę lemia darbuotojų patirtis, ilga dervos stingimo trukmė, taip pat gausios atliekos bei su tuo susijusios perdirbimo problemos. Šis metodas įprastai naudojamas ir kompozitų bandinių gamybai; jo universalumas ir paprastumas lemia mažas sąnaudas ir mažesnę technologinių parametru įtaką kompozito kokybei (Liang, 2013; Pang, 2008; Pothen, 2008). Naudojant šį metodą, kietinimo operacija gali būti atliekama vakuume. Tokiu atveju gaunamos mažesnės dervos sąnaudos ir didesnė pluošto dalis kompozite (iki 60 %), taip užtikrinant didesnę kompozito armavimo efektyvumą ir stiprumą (Van de Weyenberg, 2003).

Vakuuminio formavimo metu termoplastiko ruošinys yra aktyvuojamas kaitinant, klojamas į formą, užpurškiamas smulkinto pluošto ir dervos mišiniu bei tankinamas naudojant volelį. Reaktoplastinių dervų atveju, ruošiniai iš pradžių atšaldomi ir vėliau iš lėto vėl atšildomi iki kambario temperatūros, supjaustomi ir klojiniais kraunami į formą. Forma apgaubiama elastinga diafragma, kuri vakuumavimo metu priglunda prie formos ir gaminyje įgauna jos matmenis. Naudojant šią technologiją, dervos sąnaudos yra mažesnės, o armuojančios medžiagos dalis kompozite gali sudaryti iki 60 %. Norint užtikrinti tikslią gaminių formą ir dar labiau sumažinti dervos sąnaudas, vakuumavimas gali būti derinamas su laipsniško formos užpildymo derva technologija (Buika, 2008; Santulli, 2000).

Taikant **tiesioginio presavimo** technologiją, kompozitas yra formuojamas slepiant jį tarp dviejų karštų paviršių. Naudojamos tiek reaktoplastinės (poliesterio, vinilesterio ir epoksidinės), tiek ir termoplastinės dervos. Šis metodas labai našus ir mechanizuotas, bet dėl didelės įrangos kainos netinka mažų kiekių gamybai, taip pat dėl pluošto irimo gaunami nemaži nuostoliai. Tiesiogiai presuojant gali būti gaminami vidutinio dydžio plokšti, o tam tikrais atvejais ir vidutinio sudėtingumo erdviniai gaminiai. Šiuo paprastu metodu, taip pat dažnai gaminami bandiniai tyrimams (Van de Velde, 2003; Wambua, 2003). Gaminiai formuojami tam tikroje temperatūroje ruošinį slepiant. Formavimo metu, papildomai panaudojant vakuumą, galima sumažinti dervos sąnaudas ir užtikrinti geresnes gaminių mechanines savybes. Reaktoplastinių polimerinių dervų kompozitų gamyba gali būti atliekama šaltojo presavimo būdu (angl. *cold press moulding*), kuomet ruošinys impregnuotas greitai kietėjančia derva sandariai uždaromas formoje. Kadangi derva negali išsiliesti iš formos, ji užpildo visas ertmes. Tačiau formos kraštuose susidaro žymiai didesnis slėgis nei kitose formos dalyse, todėl gali susidaryti defektai (Onal, 2005; Van de Velde, 2003).

Naudojant **laipsniško formos užpildymo derva** metodą, rankiniu būdu suformuotas armuojančios medžiagos ruošinys yra klojamas ant formos apatinės dalies, forma uždaroma ir ertmė tarp formos apatinės ir viršutinės dalių vakuumu užpildoma derva (Pothan, 2008). Šiuo būdu gauti gaminiai yra stiprūs, sudėtingos geometrijos, tikslių matmenų, jų paviršius yra lygus iš abiejų pusių. Nors dėl aukštos kokybės atitinka net aviacijos pramonės medžiagoms keliamus reikalavimus (Mortensen, 2007), tačiau gali būti naudojami įvairiais tikslais, pvz. laboratorinių bandinių gamybai (Baeten, 1999) ar atliekant vamzdinių remontą (Yu, 2008).

Gijų suvijimo metu derva suvilgytas pluoštas yra susukamas ant formos (šerdis) įvairiomis kryptimis. Procesas valdomas reguliuojant tiekimo mechanizmo padėtį ir formos sukimo greitį. Šiuo metodu gaminami slėginiai indai, vamzdžiai ir kitos talpos. Tai visiškai automatizuotas ir ekonomišką gamybos būdas. Deja, šiuo metodu gali būti formuojamos detalės, turinčios nesudėtingą skerspjūvį bei kontūrą išilgine kryptimi (be staigių aukščio pokyčių) (Buika, 2008). Dėl gamybos metu vykstančio gijų orientavimo įvairiomis kryptimis, šie gaminiai pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis nei armuoti įprastomis vienkryptėmis medžiagomis, tačiau jų savybės yra prastesnės nei kompozitų, armuotų audiniais, kurie užtikrina geriausiai

atsaką į dažniausiai praktikoje pasitaikančias kompleksines jėgas (Vargas Rojas, 2014; Houshyar, 2005).

Tempiamoji ekstruzija – tai dar vienas našus ir ekonomiškąs kompozitinių gaminių iš reaktoplastikų ir termoplastikų gamybos metodas. Formuojant kompozitus, išsistinę armuojanti medžiaga (sruogos, siūlai, gijos, austos juostos) impregnuojama vonelėje ir patenka į sukietinimo kamerą. Termoplastinių dervų atveju, papildomai kompozitas vėsinaamas aušinimo zonoje ir vėliau tiekiamas į gaminių pjaustymo įrenginį, kuriame supjaustomas į reikiamo ilgio gaminius. Vonelėje derva suvilgytas pluoštas pereina formavimo galvutę, kurioje reguliuojamas dervos kiekis, vyksta gaminio formavimas bei tankinamas. Termoplastinių kompozitų gamybai gali būti naudojami ir iš anksto impregnuoto pluošto ruošiniai. Tempiamąją ekstruziją pagamintų gaminių didesnę stiprią tempiamąją kryptimi užtikrina traukimo mechanizmas, kuris orientuoja armuojanti pluoštą. Šio metodo trūkumai: ribota gaminių skerspjūvių forma ir brangi kaitinimo įranga – tempiamąją ekstruziją pagamintų termoplastinių kompozitų tankinimui reikalinga aukšta temperatūra ir slėgis; o dėl didelės termoplastikų klampos, gaminių paviršius būna nekokybiškąs (Van de Velde, 2001). Todėl itin svarbu optimizuoti gamybos parametrus (Memon, 2013; Van de Velde, 2001).

Kaip matyti, skirtingi gamybos metodai pasižymi skirtingu mechanizacijos lygiu (turi skirtingas mechanizuotas operacijas). 1.5 lentelėje pateikiama jų suvestinė. Anksčiau pateiktame metodų aprašyme, daugiausiai buvo aptariamąs, su formavimo ir impregnavimo operacijomis susijusios formavimo galimybės, tačiau ne mažiau svarbios yra ir laiko sąnaudos, kurios daugiausiai priklauso nuo kietinimo operacijos. Reaktoplastikų atveju, kietinimas užtrunka gerokai ilgiau, todėl šių dervų pakeitimas termoplastikais leistų pagreitinti gamybą ir sudarytų prielaidas sparčiai kompozitų gamybos technologijų plėtrai (Arzondo, 2005; Van de Velde, 2001).

Tačiau svarbu spartinti ne tik pavienių gaminių gamybą, bet ir formuoti gaminių sekas. Šios problemos pirmiausia susijusios su būdingomis specialių eksploatacinių savybių pluoštų savybėmis. Kaip matyti, naudojant šiuo metu prieinamus automatizuotus gijų suvijimo, tempiamosios ekstruzijos ir tiesioginio presavimo metodus, gali būti gaminami tik riboto sudėtingumo erdvinės formos gaminiai. Naudojant tiesioginio presavimo ir vakuuminio formavimo metodą, nors medžiagos formavimas atliekamas mechanizuotu būdu, tačiau į formą ruošinys įvirtinamas ir išspaudžiamas rankomis (Abdul Khalil, 2012), o formavimo metu didelės trinties jėgos ir mažas tūsumas neleidžia suformuoti reikiamos formos detalės (Sabeel, 2007). Todėl, pavyzdžiui, naudojant tiesioginio presavimo metodą, keli gaminiai gali būti formuojami naudojant ne vientisą medžiagą, o suskaidytą į atskirus ruošinius. Nepaisant to, tokiu būdu gali būti suformuotos tik riboto sudėtingumo detalės, kadangi slydimo metu nekontroliuojant audinio deformacijų, gaminyje susidaro daug raukšlių (Bekampienė, 2009). Dėl mažo specialių eksploatacinių savybių pluoštų (stiklo, anglies, aramido) tūsumo, nepavyksta išgauti reikiamo gylio detalės ir tempiamas pluoštas nutrūksta. Todėl iki šiol erdvinės formos gaminių formavimas atliekamas rankiniu būdu, deformuojant medžiagą šlytimi. Armuojanti medžiaga formuojama neįtvirtinta, nors tai lemia tokių defektų

kaip raukšlės susidarymą. Šias problemas bandoma spręsti armuojančią medžiagą ne įtvirtinant nejudamai, o tik prilaikant (angl. *hold-down*).

1.5 lentelė. Kompozitų gamybos operacijų mechanizacijos lygis

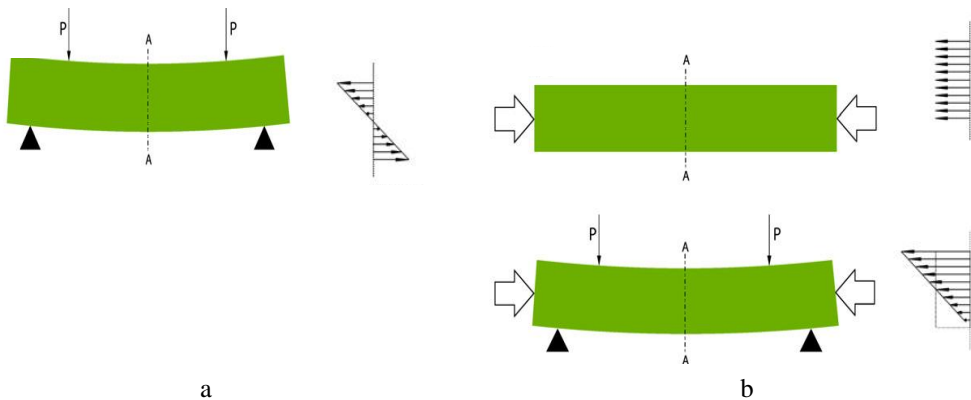
Kompozito gamybos metodas	Armujančios medžiagos formavimas	Impregnavimas	Formos užpildymas	Tankinimas	Kietinimas
Rankinis formavimas	rankinis	rankinis	rankinis	rankinis	ore
Vakuuminis formavimas	mechanizuotas (vakuumuojant)	rankinis – reaktoplast., mechanizuotas – termoplast.	rankinis	mechanizuotas (vakuumuojant)	formoje
Tiesioginis presavimas	mechanizuotas (kaitinant ir slegiant)	mechanizuotas	rankinis	mechanizuotas	prese
Laipsniškas formos užpildymas derva	rankinis	mechanizuotas (vakuume)	mechanizuotas	mechanizuotas	formoje
Gijų suvijimas	mechanizuotas	mechanizuotas	mechanizuotas	mechanizuotas	ore
Tempiamoji ekstruzija	mechanizuotas	mechanizuotas	mechanizuotas	mechanizuotas	mechanizuotas

Tačiau augaliniai pluoštai pasižymi prigimtinio tūsumu, todėl reikiamą detalių gylį galima išgauti audinį tempiant. Tempiant augalinio pluošto audinį, tarpusavyje perpintos metmenų ir ataudų siūlų sistemos sąveikauja ir, priklausomai nuo audinio struktūros, lemia netiesinį medžiagos atsaką į veikiančias jėgas. Todėl būtina nustatyti audinio struktūros parametų įtaką erdvinės formos iš anksto įtemptų kompozitų mechaninėms savybėms. Šie skirtumai gaunami, nes metmenų ir ataudų siūlų sistemas veikiantys įtempiai yra skirtingi. Todėl gaunamos ne tik skirtingos deformacijos metmenų ir ataudų kryptimis, bet ir netolygus jų pasiskirstymas bandinyje (Ouagne, 2012; Wang, 2012; Chen, 2011; Potluri, 2009; Willems, 2008; Cavallaro, 2007). Svarbu atkreipti dėmesį, kad netolygus įtempių ir deformacijų pasiskirstymas (tiek tarp metmenų ir ataudų siūlų sistemų, tiek ir visame bandinyje) lemia koncentracijos reiškinius. Gerai žinoma, kad įtempių ir deformacijų koncentracijos zonose prasideda pirmalaikis medžiagos irimas (Potluri, 2009). Todėl tiriant medžiagų savybes, būtina nustatyti minimalias ir maksimalias deformacijų vietas. O rankinio formavimo, vakuuminio formavimo bei laipsniško formos užpildymo derva metodai, nors ir tinkami šiems gaminiams gaminti, tačiau formavimo operacija reikalauja daug rankinio darbo, todėl gaminiai yra labai brangūs.

1.5 Armuojančios medžiagos išankstinio tempimo metodo taikymas formuojant kompozitus

Armujančios tekstilės įtempimas – tai palyginti naujas kompozito modifikacijos metodas, kuris taikomas pastaruosius trisdešimt metų, siekiant

padidinti kompozito stiprumą ir standumą lenkiant (Schlichting, 2010; Foster, 2007; Reinhardt, 2003). Įtempimas armuojančiam pluoštui, gali būti suteikiamas prieš jo impregnavimą matricos polimeru (angl. *pre-tension*) arba po impregnavimo (angl. *post-tension*). Pirmasis išankstinio tempimo metodas taikomas stacionarios gamybos sąlygomis, kur armuojančios medžiagos įtempimo, impregnavimo ir kietinimo operacijos atliekamos specialiai tam paruoštoje darbo vietoje. Šis metodas naudojamas kompozito gaminius gaminat didesniais kiekiais gamyклоje. Antrasis metodas taikomas tais atvejais, kai kompozitą būtina gauti jo eksploatacijos vietoje (Foster, 2007). Suteikiant išankstinį įtempimą, armuojanti medžiaga yra deformuojama ir šiame būvyje užfiksuojama derivoje. Dervai sukietėjus, apkrova nuimama, o medžiaga, siekdama įgauti artimą nedeformuotam būvį, deravą gniuždo ir lemia didesnę kompozito stiprį lenkiant (Schlichting, 2010; Foster, 2007). Iš 1.9 paveiksle pateikto įtempimų pasiskirstymo skerspjūvyje diagramos matyti, kad lenkimo metu strypo viršutinę dalį veikia gniuždymo įtempiai, o apatinę dalį – pavojingi tempimo įtempiai. Jeigu strypo armuojančiai medžiagai suteikti išankstinį įtempį, matricoje sukelti gniuždymo įtempiai priešinasi tempimo deformacijoms ir taip padidina kompozito stiprumą tempiant (Schlichting, 2010).

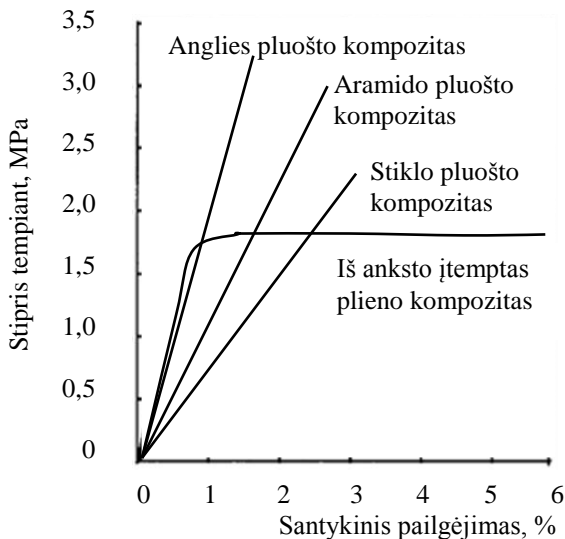


1.9 pav. Įtempimų pasiskirstymas neįtempto kompozito skerspjūvyje lenkimo metu (a) bei įtempto kompozito gamybos metu ir lenkiant (b) (Schlichting, 2010).

Akstinu sukurti šį metodą tapo poreikis spręsti betono savybių neproporcingumo problemą: betonas yra apytikriai 10 kartų atsparesnis gniuždymui nei tempimui. Plačiausiai šis metodas naudojamas statybinių konstrukcijų gamyboje, įtemptu plieno pluoštu armuojant betoną. Tačiau pastaruoju metu daugėja darbų, kuriuose šis metodas pritaikomas naujoms paskirtims, pavyzdžiui, gaminant medicininės paskirties medžiagas ar interjero puošybos detales. Kartu plečiasi ir naudojamų medžiagų grupė – tradicinis plieno pluoštas keičiamas stiklo, aramido ar kitais pluoštais (Peled, 2007; Reinhardt, 2003). Šiam tikslui naudojamos polimerinės reaktoplastinės (Pang, 2008; Cao, 2006; Hadi, 1997), o rečiau ir termoplastinės dervos (Zhao, 1998). Tradicinio plieno pluošto keitimas kitais pluoštais turi ir privalumų, ir trūkumų. Specialių eksploatacinių savybių, didelio stiprumo tekstilinių pluoštų pagrindiniai privalumai yra didelis stiprumas, standumas, atsparumas

valkšnumui, antikoroziinės savybės bei maža kaina (Burgoyne, 2001) (žr. 1.10 pav.). Tačiau didelio stiprumo tekstilės pluoštais armuotuose kompozituose gaunamas kitoks įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje nei plieno kompozituose. Lyginant tarpusavyje įtempių pasiskirstymą neįtemptuose kompozituose (žr. 1.11 pav., a), matyti, kad plieniu armuotuose kompozituose gniuždymo ir tempimo įtempių vertės yra apytikriai lygios (neutrali ašis yra skerspjūvio centrinėje dalyje). O didelio stiprumo tekstilės pluoštais armuotų kompozitų gniuždymo įtempiai yra net keliolika kartų mažesni nei pavojingi tempimo įtempiai (žr. 1.11 pav., b). Tačiau matyti, kad šias įtempių pasiskirstymo proporcingumo problemas pavyksta išspręsti kompozitams suteikus išankstinį įtempimą. Įtempių pasiskirstymas abiejų tipų kompozituose tampa panašus (žr. 1.11 pav., b).

Didelio stiprumo pluoštus verta pasirinkti ir gaminant nedidelio storio gaminius, nes esant nedideliui betono sluoksnio storiui, plieno pluoštą itin sunku apsaugoti nuo korozijos (Reinhardt, 2003). Įprastai, pluoštu armuotame betono kompozite, pluošto dalis yra maža. Kompozite pluoštams užimant vos 5–6 % tūrio dalį, gaunamas net 34 % didesnis iš anksto įtempto kompozito stipris lenkiant (žr. 1.12 pav.).



1.10 pav. Anglies, aramido, stiklo bei iš anksto įtempto plieno pluoštu armuotų plastiko kompozitų tempiamųjų savybių palyginimas (Burgoyne, 2001)

Ne mažiau svarbu ir tinkamai parinkti išankstinio įtempimo dydį. Nors skirtingi tyrėjai naudoja skirtingas išankstinio tempimo vertes, tačiau dažniausiai siūloma taikyti apkrovą, atitinkančią apytikriai 50–70 % pluošto stiprio (Reinhardt, 2003). Šiuo atveju, lyginant su neįtemptu kompozitu, stipris lenkiant padidėja 70–79 % (Pang, 2009; Zhao, 1998), stipris tempiant – 220 % (Pang, 2008), o atsparumas smūgiui iki 55 % (Fancey, 2010).

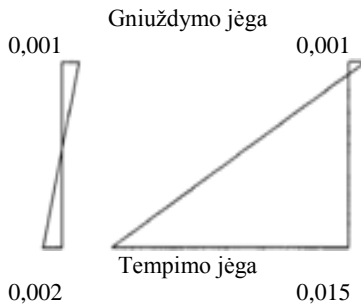
Išankstinio įtempio suteikimui naudojama įvairi įranga. Viena iš pirmųjų tapo 1958 m. įregistruota P.W. Elmer sukurta rotorinė audinio įtempimo įranga, kuri

buvo skirta spręsti su ratų gamyba susijusias problemas. Besisukantis diskas judėdamas žemyn, deformuoja audinį ir suteikia jam išankstinį įtempį (žr. 1.13 pav., a) (Warnken Elmer, 1958). Išankstinis armuojančios medžiagos įtempimas gali būti gaunamas naudojant įvairios struktūros medžiagas – tiek atskiras gijas, tiek audinius. Pastariesiems gali būti taikomas dvikryptis išankstinis tempimas.

Siją armuojanti medžiaga:

Plienas

Stiklo pluoštas

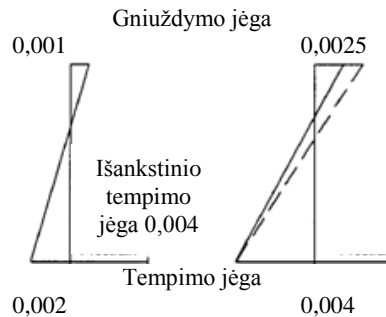


a

Siją armuojanti medžiaga:

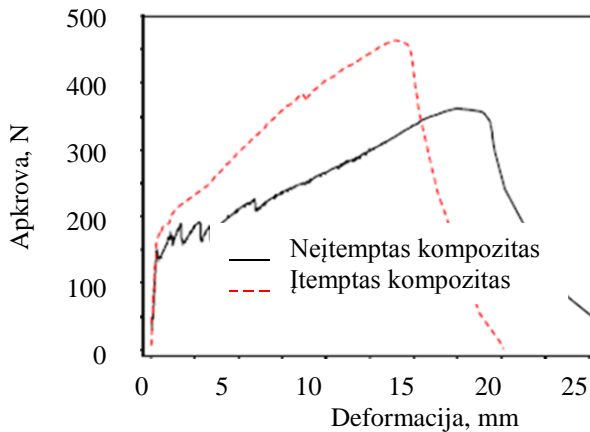
Plienas

Aramidas



b

1.11 pav. Įtempių pasiskirstymas (a) plieno ir stiklo pluoštais armuotų kompozitų skerspjuvyje be išankstinio įtempimo bei (b) plieno ir aramido pluoštais armuotų kompozitų skerspjuvyje suteikus išankstinį įtempimą (Burgoyne, 2001)

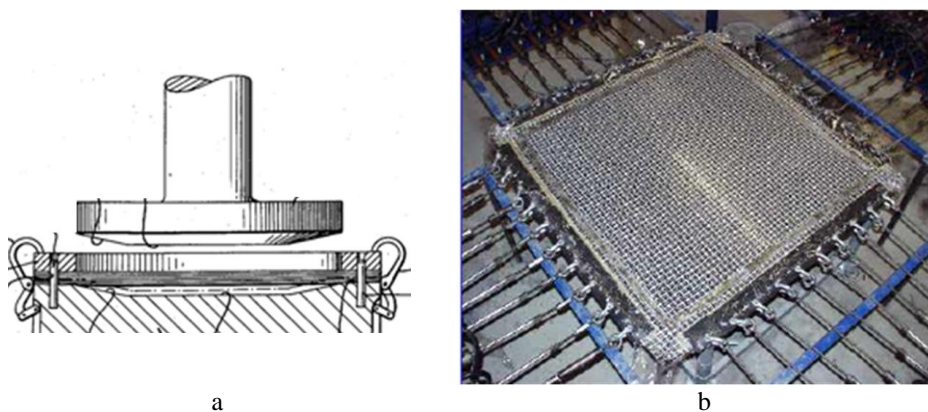


1.12 pav. Įtemptu ir neįtemptu šarmui atspariu stiklo audiniu armuoto 10 mm storio betono kompozito stipris lenkiant (Reinhardt, 2003)

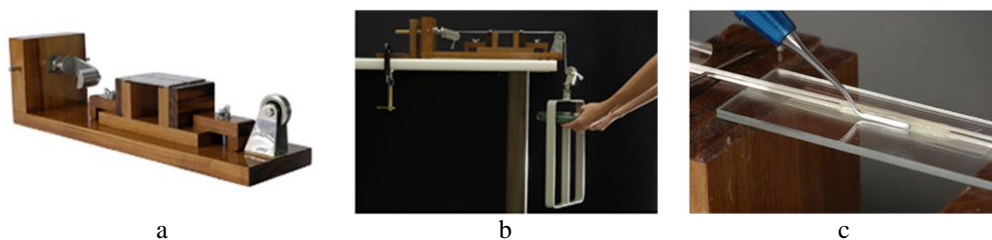
Pavyzdžiui, L.D.A. Jorge savo darbe naudojo gijų įtempimui skirtą metodą: vienas gijos galas buvo fiksuojamas, o kitam suteikiama statinė apkrova (žr. 1.14 pav.) (Jorge, 1990; Schlichting, 2010).

Tačiau dažniausiai, armuojančios medžiagos išankstiniam įtempimui naudojami įvairių konstrukcijų dviašio tempimo rėmai, pavyzdžiui, H.W. Reinhardto ir kt. darbe pateikiamas hidraulinio veikimo įrenginys (1.13 pav., b)

(Reinhardt, 2003). Krishnamurthy, iš anksto įtemptų kompozitų gamybai sukūrė vakuuminio formavimo autoklave metodiką ir įrangą, skirtą vienkrypčiu pluoštu armuotų kompozitų gamybai bei užtikrinančią išankstinės apkrovos skaitmeninį reguliavimą (Krishnamurthy, 2006).



1.13 pav. Įrangos, skirtos išankstiniam įtempimui, pavyzdžiai: (a) P. W. Elmer sukurta erdvinės formos audinio įtempimo įranga (Warnken Elmer, 1958) ir dviašio įtempimo rėmas (b) (Reinhardt, 2003)



1.14 pav. Išankstinio gijų įtempimo įranga (a), gijų įtempimas (b) ir kompozitinio bandinio gamyba (c) (Schlichting, 2010)

Nustatyta, kad dėl išankstinės apkrovos kompozite, iki minimumo sumažėja liekamieji įtempiai. Tačiau gali būti, kad daugelio veiksnių įtaka neleido tinkamai parinkti įtempimo parametrų verčių, todėl gautas ne pagerėjimas, o tik nežymus mechaninių savybių pablogėjimas (Krishnamurthy, 2006).

Apibendrinimas

Pastaruoju metu didelį susidomėjimą augaliniu pluoštu armuotais biokompozitais paskatino net kelių problemų sprendimo galimybės: pirmiausia sumažinti armuojančių pluoštų kainą bei užtikrinti bioskaidumą ir atsinaujinančių žaliavų naudojimą, taip pat kompleksiskai spręsti tam tikros gamybos automatizacijos problemas. Nepaisant palankių prognozių, yra ir nemažai problemų, ribojančių platesnį biokompozitų vartojimą, kurios susijusios su prastėmis šių medžiagų mechaninėmis savybėmis bei nepakankama adhezine sąveika tarp pluošto ir dervos. Todėl ieškoma vis naujų būdų kaip spręsti šias problemas. Siekiant darnios plėtos tikslų, svarbu šiais principais vadovautis ne tik renkantis žaliavas, bet ir perdirbimo bei gamybos būdus. Renkant augalinio pluošto apdorojimo technologiją, reikia atsižvelgti į jo heterogeninę cheminę prigimtį bei daugiapakopę sandarą. Geresnes biokompozitų savybes galėtų suteikti ir pluošto orientavimas ištisinės ašies kryptimi bei šio būdo kombinavimas kitais netaršiais metodais (apdorojimu plazma, verpalų sukrumo keitimu). Armuojančios tekstilės įtempimas – tai sąlyginai naujas kompozito modifikacijos metodas, kuris taikomas pastaruosius trisdešimt metų siekiant padidinti kompozito standumą lenkiant. Tačiau nerasta darbų, kurie nagrinėtų pluošto įtempimo sąlygų įtaką kompozitų mechaninei elgsenai.

Kita problema, kurią būtų galima spręsti sintetinius pluoštus pakeitus augaliniais, susijusi su mažu specialių eksploatacinių savybių pluoštų (stiklo, anglies, aramido) tūsumu, dėl ko nepavyksta išgauti reikiamo reljefo detalės, o tempiamas pluoštas nutrūksta. Todėl iki šiol, erdvinės formos gaminių formavimas atliekamas rankiniu būdu, deformuojant medžiagą šlytimi. Armuojanti medžiaga formuojama neįtvirtinta, nors tai lemia tokių defektų, kaip raukšlės, susidarymą. O augaliniai pluoštai pasižymi prigimtinio tūsumu, todėl suprojektuotą gaminio reljefą galima išgauti audinį tempiant. Tačiau tempiant augalinio pluošto audinį, tarpusavyje perpintos metmenų ir ataudų siūlų sistemos sąveikauja ir, priklausomai nuo audinio struktūros, lemia netiesinį medžiagos atsaką į veikiančias jėgas. Todėl būtina nustatyti audinio struktūros parametrų įtaką erdvinės formos iš anksto įtemptų kompozitų mechaninėms savybėms.

2. TYRIMO METODOLOGIJA

2.1 Naudotos medžiagos

Siekiant, kad tyrimo duomenys galėtų būti panaudoti kuo platesnei biokompozitų gaminių grupei ir įvairioms tiek mechanizuotoms (gijų apvijimas, pultruzija), tiek ir nemechanizuotoms kompozitų gamybos technologijoms (vakuuminis formavimas, laipsniškas formos užpildymas derva ir tiesioginis presavimas), darbe tirta ne tik siūlais, bet ir audiniais armuoti polimeriniai kompozitai.

Darbe naudoti iš AB *Siūlas* gauti skirtingos pluoštinės prigimties – medvilnės ir lino siūlai, kurių sandaros charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje. Lino pluoštui būdingas mažas fibrilių orientacijos kampas (5–10°) (Wan, 2009) bei didesnis nei kitų augalinių pluoštų stiprumas ir standumas. Naudoti dviejų skirtingų ilginių tankių (storijų) lino siūlai (68 ir 105 tex). Taip pat tyrimams naudoti ir 70 tex medvilnės pluošto siūlai, kuriems būdingas didelis fibrilių orientacijos kampas (20–30°) ir tšumas bei didelis celiuliozės kiekis (apie 95 %) (Wan, 2009). Nepaisant to, medvilnės stiprumas ir standumas yra apytikriai du kartus mažesnis nei lino. Tirtų augalinio pluošto siūlų savybės buvo lyginamos su artimo ilginio tankio (70 tex) E-stiklo pluošto siūlais (*R & G Faserverbund-Werkstoffe GmbH*, Vokietija).

2.1 lentelė. Siūlų charakteristikos

Siūlų pavadinimas	Pluoštinė sudėtis*, 100 %	Pluošto tankis, g/m ³	Ilginis tankis, tex*
Linai 68 tex	Linai	1,5	68
Linai 105 tex	Linai	1,5	105
Medvilnė 70 tex	Medvilnė	1,5	70
Stiklo pluoštas 70 tex	Stiklo pluoštas	2,5	70

* vertės pateiktos gamintojo

Šie ir kiti siūlai toliau buvo naudojami gryno lino ir mišripluoščiuose lino ir medvilnės audiniuose. Tyrimams pasirinkti septyni augalinio pluošto audiniai, besiskiriantys siūlų tankumu, ilginiu tankiu (storiu) ir apdorojimo būdu, taip pat standartinis E-stiklo pluošto audinys, skirtas transporto priemonių dalims gaminti. Audinių sandaros charakteristikos pateiktos 2.2 lentelėje.

Pluoštams impregnuoti buvo naudojama sintetinė reaktoplastinė nesočiojo poliesterio (UP) (*Reichhold AS*, Norvegija) derva ir bioskaidi termoplastinė polipieno rūgšties (PLA) (*Nature Works LLC*, JAV) derva. Šių dervų pagrindinės charakteristikos pateiktos 2.3 ir 2.4 lentelėse. UP derva yra viena iš dažniausiai naudojamų ir pigiausių dervų, kuri gerai tinka stiklo pluošto rankiniam ir vakuuminiam impregnavimui, taip pat sėkmingai naudojama ir augaliniu pluoštu armuotų kompozitų gamybai, tačiau sunkiai perdirbama. Ši derva kietėja įmaišius 2 % metilo etilo ketono (katalizatoriaus) su peroksidu (greitikliu) ir spalvos indikatoriumi (*Norpol MEK I*). Derva maišoma kol pasikeičia jos spalva.

2.2 lentelė. Kompozitų armavimui naudotų audinių pagrindinės charakteristikos

Audinio kodas	Pluoštinė sudėtis:		Siūlų ilginis tankis*, tex:		Siūlų tankumas*, cm ⁻¹		Pynimas
	metmenys	ataudai	metmenys	ataudai	metmenys	ataudai	
R115	Linai	Linai	56	56	10	12	Drobinis
R10	Linai	Linai	56	56	16	17	Drobinis
R71	Linai	Linai	86	56	14	17	Drobinis
R71B	Linai	Balinti linai	86	56	14	17	Drobinis
R75	Linai	Medvilnė	56	50	17	18	Drobinis
R81	Linai	Linai	105	105	10	10	Drobinis
R82	Linai	Medvilnė	86	50	14	17	Drobinis
Interglas 92110	E-stiklo pluoštas	E-stiklo pluoštas	70	70	11	12	Drobinis

* vertės pateiktos gamintojo

2.3 lentelė. Nesocijo poliesterio dervos *Polylite 440-M850* pagrindinės charakteristikos

Fizikinė savybė	Vertė*
Dinaminė klampa, mPa·s	1100-1300
Stireno kiekis, %	43±2
Tankis, g/cm ³	1,1

* vertės pateiktos gamintojo

2.4 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
Lydimosi temperatūra, °C	160-170

* vertės pateiktos gamintojo

Taip pat buvo naudota iš atsinaujinančių žemės ūkio kultūrų pagaminta PLA derva, pasižyminti geromis mechaninėmis savybėmis, tačiau palyginti brangi.

2.2 Pluoštų apdorojimo metodai

Darbe buvo taikomi įvairūs cheminiai ir mechaniniai pluoštų apdorojimo metodai. Tradiciniai cheminiai pluoštų apdorojimo metodai – merserizacija ir balinimas, taip pat šių metodų derinys atlikti laikantis gamyboje taikomų technologinių režimų.

Merserizacijos metu siūlai 24 h mirkomi 5 % natrio šarmo (NaOH) tirpale, vėliau – 1 min 30 % NaOH tirpale, skalaujami demineralizuotame vandenyje ir neutralizuojami 1 % druskos rūgšties (HCl) tirpale, ir apkrauti nedidele apkrova (~6 MPa) 2 h džiovinami 100 °C temperatūroje.

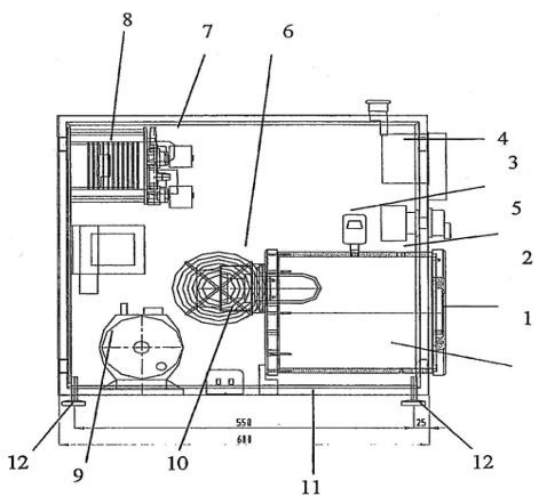
Balinant pluoštai 2 h mirkomi 20 % vandenilio peroksido (H₂O₂) ir 3,5 g/l NaOH (pH = 11) tirpale, esant 82,5±2,5 °C temperatūrai. Po to jie skalaujami demineralizuotame vandenyje bei apkrauti nedidele apkrova (~6 MPa), 2 h džiovinami 120 °C temperatūroje.

Pluoštų apdorojimas taip pat atliktas derinant tarpusavyje abu cheminio apdorojimo metodus – **merserizavimą ir balinimą**. Apdorojimas atliktas laikantis anksčiau nurodytų metodų sąlygų, pradžioje pluoštus apdorojant natrio šarmu, o vėliau vandenilio peroksidu.

Aplinkai nekenksmingas pluoštų apdorojimas **žemo slėgio plazma**, buvo vykdomas 13,56 MHz dažnio radijo bangų plazmos generavimo įrenginiu (žr. 2.1 pav) *Junior Plasma System SN 004/123* (Europlasma, Belgija) azoto dujų (N₂) aplinkoje ir 0,4 mbar vakuume, naudojant įvairią išlydzio galią (50 – 200 W) ir apdorojimo trukmę (15 – 180 s).



a

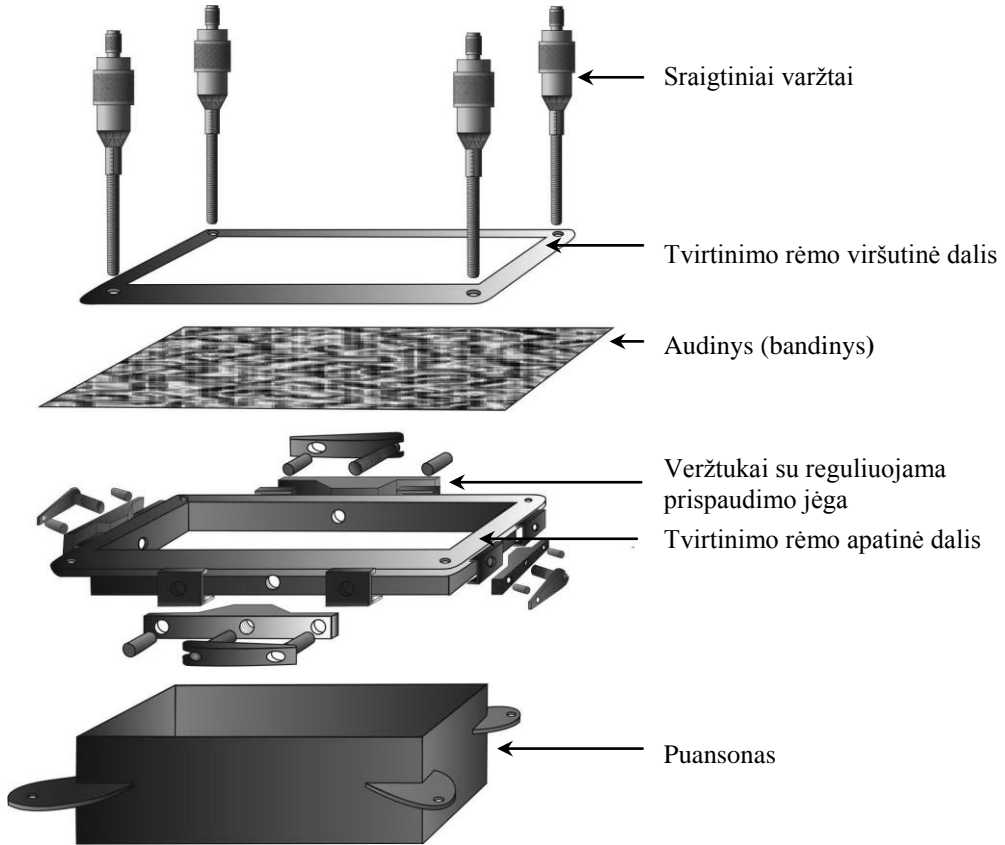


b

2.1 pav. Plazmos generavimo įrenginio *Junior Plasma System 004/123* vaizdas (a) ir schema (b): 1 – proceso kamera, 2 – durys, 3 – vakuumo manometras, 4 – proceso valdymo blokas, 5 – dujų įvadas, 6 – magnetronas, 7 – dujų paskirstymo panelė, 8 – elektrinė panelė, 9 – siurblys, 10 – vakuumo vožtuvas, 11 – įdėklas, 12 – reguliuojamas stovas

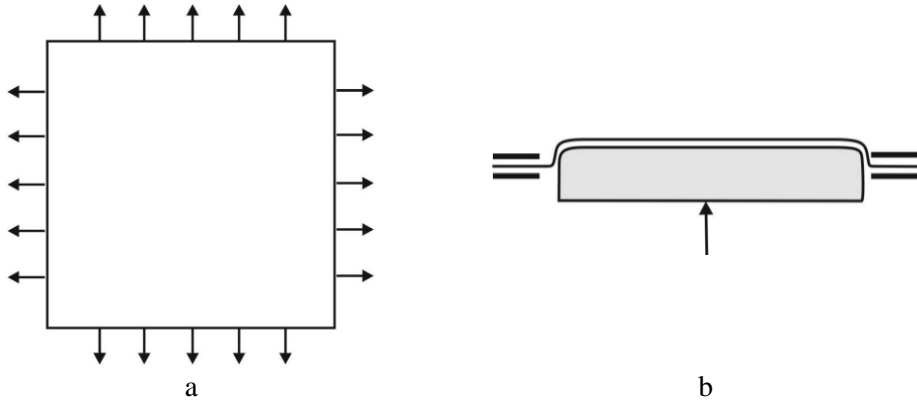
Vienas iš darbe taikytų siūlų mechaninių apdorojimo metodų – **gijų sukimas**. Skirtingo sukumo siūlai buvo pagaminti *PL 31* sukimo mašina (*Maed*). Lino siūlų (105 tex) sukumas buvo keičiamas nuo 140 iki 260 m⁻¹ sūkių, o medvilnės – nuo 360 iki 500 m⁻¹ sūkių. Sukumas buvo nustatytas remiantis standarto LST EN ISO 2061 reikalavimais.

Kitas darbe naudotas mechaninis poveikis – *išankstinės apkrovos metodas*. Šis būdas buvo taikomas arba reguliuojant suteikiamos apkrovos arba deformacijos dydį. Siūlų atveju, išankstinė apkrova buvo suteikiama vieną jų siūlo galą įtvirtinus nejudamai, o kitą apkrovus 1,0–15,0 N dydžio statine apkrova. O audiniams išankstinė deformacija buvo suteikta specialiai sukurta dviašio tempimo įranga (žr. 2.2 pav.), kuri imituoja erdvinės detalės gamybos procesą. Bandiniai buvo iš anksto deformuojami 9–12 % dydžiu. Mažesnės išankstinės deformacijos vertės nebuvo naudojamos norint išvengti audinių mažo standumo zonos, kurioje vyksta audinio struktūros persitvarkymas ir tiesinimasis (Willems, 2008).



2.2 pav. Erdvinės formos kompozito ruošinio formavimo įrangos surinkimo schema

Audinys buvo dedamas tarp viršutinio ir apatinio tvirtinimo rėmo (darbinės zonos dydis $165 \times 165 \text{ mm}^2$) ir, reguliuojant veržtukų prispaudimo jėgą, nejudamai įtvirtinamas (žr. 2.3 pav.). Tvirtinimo rėmą laikant virš puansono (matmenys $140 \times 140 \text{ mm}^2$) ir sukant sraigtinčius varžtus, buvo keičiamas audinio įspaudimo aukštis, kol pasiekiami norima audinio deformacija. Audiniams suteikta išankstinė dviašė deformacija apytikriai sudarė 40–50 % jų stiprio tempiant verčių. Kaip didėjant audinio deformacijai didėja audinių įtempiai, galima matyti iš vienašio tempimo metu nustatytos priklausomybės (žr. 2.5 lentelė).



2.3 pav. Erdvinės formos kompozito ruošinio formavimo įrangos veikimo principinė schema: (a) vaizdas iš viršaus, (b) šoninis vaizdas

2.5 lentelė. Audinio įtempių priklausomybė nuo vienašio tempimo deformacijos

Armuojančio audinio kodas	Bandinio kryptis	Įtempiai (MPa), esant tempimo deformacijai:		
		9 %	11 %	12 %
R115	metmenys	67	81	-
	ataudai	56	69	-
R10	metmenys	60	65	74
	ataudai	45	50	58
R71	metmenys	84	91	102
	ataudai	74	80	90
R71B	metmenys	55	59	66
	ataudai	44	48	54
R81	metmenys	66	71	81
	ataudai	60	66	74
R75	metmenys	76	83	94
	ataudai	23	25	28
R82	metmenys	60	66	75
	ataudai	41	46	52

Pluoštų apdorojimas taip pat atliktas derinant tarpusavyje išankstinio tempimo metodą ir kitus cheminio ir mechaninio apdorojimo metodus, t. y. *merserizuotą, balintą, plazma apdorotą ir susuktą siūlą iš anksto įtemptiant*.

2.3 Dervų ir tekstilės medžiagomis armuotų kompozitų bandinių gavimo metodai

UP dervos ir jos kompozito bandinių gamybai buvo naudojamas silikono lakštų klojinys su dvigubo kastuvėlio formos išėmomis, kurių matmenys – $55 \times 3 \text{ mm}^2$. Siūlas buvo klojamas išilgai bandinio centrinės ašies, išėmą užpildant UP derva. Po to bandiniai 24 h buvo kietinami aplinkos temperatūroje, išimami iš formos ir papildomai dar išlaikomi 24 h.

PLA dervos ir jos kompozito bandinių gamybai, buvo naudojamos $0,8\pm 0,1$ mm storio plėvelės, gautos išlydant polimero granules laminavimo mašinoje *NOVA 45 (Reliant Machinery, Jungtinė Karalystė)* $190\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje ir 250 s veikiant $48,3\text{ kPa}$ slėgiu. Siūlas buvo klojamas tarp dviejų PLA plėvelių ir laminuojamas tuo pačiu, anksčiau minėtu įrenginiu ir sąlygomis.

Gaminant audiniu armuotus polimerinės matricos kompozitus, neįtemptas arba išankstinio tempimo įrenginyje įtemptas audinys, rankiniu voleliu buvo suvilgomas UP derva ir 24 h kietinamas aplinkos temperatūroje. Išėmus kompozicinį ruošinį iš įrangos, jis 96 h buvo išlaikomas aplinkos temperatūroje iki galutinės struktūros susiformavimo. Iš gauto $140\times 140\text{ mm}^2$ dydžio ir $0,6\pm 0,1$ mm storio erdvinės formos kompozitų ruošinio plokščios dalies, išilgine ir skersine kryptimis, atitinkančiomis armuojančio audinio metmenų ir ataudų kryptis, buvo iškirsti bandiniai, kurių darbinės zonos matmenys – $100\times 25\text{ mm}^2$.

2.4 Augalinio pluošto morfologijos tyrimo metodai

Pluoštų paviršiaus tyrimams buvo naudojamas *skenuojantis elektroninis mikroskopas* (SEM) *FEI Quanta 200 FEG (FEI, Olandija)*. Tyrimai atlikti 20 keV žemo vakuumo režime, laikantis šių darbo parametrų: elektronus greitinanti įtampa – $20,00\text{ kV}$, spindulio skersmuo – $5,0$, didinimas – $200\times$, $2000\times$ ir $5000\times$, darbinis atstumas – $6,0\text{ mm}$, slėgis – 80 Pa , naudojant pluoštų tyrimui skirtą jutiklį (LFD). Iš anksto įtemptų bandinių tyrimams buvo naudojamas specialus mikroskopui pritaikytas stalelis. Vienas siūlo galas buvo nejudamai įtvirtintas varžtu, o kitas, sukant varžtą deformuotas iki reikiamos deformacijos bei užfiksuojamas.

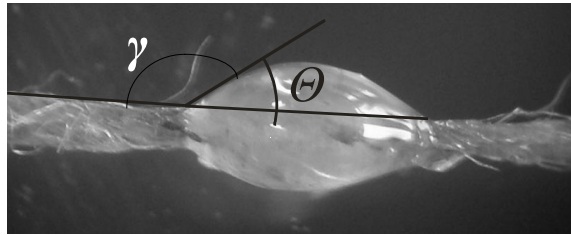
Pluoštų cheminės sandaros kokybinė analizė buvo atliekama naudojantis *Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektrofotometru Nicolet 5700 (Nicolet Instrument Inc., JAV)*, veikiančiu atspindžio režime. Atspindžio smailės, atitinkančios pagrindinius tonus, IR spektre buvo registruojamos $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ spektro intervale 4 cm^{-1} skiriamąja geba. Naujai atsiradusių funkcinių grupių ir cheminių ryšių nustatymui naudota *OMNIC* programinė įranga.

Pluoštų terminės savybės buvo vertintos *diferencine skenuojamąja kalorimetrija* (DSK), naudojant šilumos analizatorių *Q100 TA DSC (TA Instruments, JAV)*. Tiriamųjų bandinių masė buvo $3,5\text{--}4,5\text{ mg}$, kaitinimo greitis siekė $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, matavimai atlikti $10\text{--}375\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrų intervale. Buvo nustatytos šios bandinių terminės charakteristikos: fazinio virsmo entalpija (šilumos talpa) ir fazės kitimo temperatūra.

2.5 Kompozitų komponentų adhezinės sąveikos vertinimo metodika

Kompozitų komponentų sąveikos vertinimas buvo atliekamas tiriant dervos lašo elgseną ant siūlo (angl. *Drop-on-fiber method*). Šis metodas skirtas analizuoti pluoštų paviršiaus sąveiką su kita medžiaga, kuri apibrėžiama jo paviršiaus energijos verte. Šios sąveikos charakteristika yra vilgymo kampas (Pociūtė, 2005). Nesutinklintos UP dervos ir $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje išlydyto PLA polimero lašai buvo suformuojami ant siūlo ir kietinami 24 h aplinkos temperatūroje (žr. 2.4 pav.).

Norint išvengti lašo geometrinės formos įtakos vilgumo kampo vertėms, buvo tirti tik simetrinės formos lašai (Weiqun, 1997).



2.4 pav. Vilgumo kampo matavimo schema

Vilgumo kampas buvo matuojamas skaitmeninių vaizdų analizės būdu, stebint bandinius per optinį mikroskopą *MBS-9* (rus. *MBC-9*) (*LOMO*, Rusija) (didinimas $6\times$) ir fiksuojant skaitmenine kamera. Iš vaizdo, naudojantis vaizdų apdorojimo programa *Image J*, išmatuojamas kampas γ tarp substrato (siūlo) ir lašo liestinių, išvestų nuo fazių sąlyčio taško. Naudojantis išraiška $\theta = 180^\circ - \gamma$, apskaičiuojamas vilgumo kampas θ . Kiekvienam atvejui buvo paruošta po 4 elementariusius bandinius ir kiekvienas bandinys buvo matuojamas ne mažiau nei keturis kartus, apskaičiuojant jų aritmetinį vidurkį. Matavimų santykinės atsitiktinės paklaidos ne didesnės nei 5 %.

2.6 Mechaninių savybių nustatymo metodai

Siūlų savybės tempiant, buvo nustatytos universalioji bandymo mašina *Zwick Z005* (*Zwick/Roell Group*, Vokietija) pagal standarto LST EN ISO 2062 reikalavimus, naudojant 50 N jutiklį ir 250 mm/min viršutinio veržtuvo judėjimo greitį. Naudotų bandinių darbinės dalies ilgis buvo 500 mm.

Visų kitų medžiagų (audinių, dervų ir tekstilės medžiagomis armuotų kompozitų) bandymai buvo vykdomi aplinkos temperatūroje, universalioji tempimo mašina *Tinius Olsen H25K-T UTM* (*Tinius Olsen Group*, Didžioji Britanija) naudojant 1, 2 ir 5 kN jutiklius.

Audinių trūkimo savybės tempiant, nustatytos pagal standarto LST EN ISO 13934–1 reikalavimus, esant 100 mm/min viršutinio veržtuvo judėjimo greičiui ir naudojant bandinius, kurių darbinės dalies ilgis buvo 200 mm.

Dervų ir siūlų armuotų dervų savybių tempiant, nustatymui, buvo paruošti kastuvėlio formos bandiniai. UP dervos ir siūlų armuotų UP kompozitų atveju, bandinių darbinės dalies matmenys buvo $55 \times 3 \times (2 \pm 0,1) \text{ mm}^3$. PLA dervos ir siūlais armuoto PLA kompozito atveju, buvo naudojami juostelės formos bandiniai, kurių darbinės dalies matmenys buvo $55 \times 10 \times (0,8 \pm 0,1) \text{ mm}^3$. Savybės tempiant, buvo nustatytos pagal standarto LST EN ISO 527-4 reikalavimus, esant 5 mm/min viršutinio spraustuvo judėjimo greičiui.

Audinių armuotų kompozitų mechaninės savybės tempiant, buvo nustatomos pagal standarto LST EN ISO 527-4 reikalavimus, esant 5 mm/min viršutinio spraustuvo greičiui. Bandinio darbinės dalies dydis – 100 mm.

Siūlu ir audinių armuotų kompozitų savybės lenkiant, buvo nustatytos pagal standarto EN ISO 14125 A metodo reikalavimus, esant 10 mm/min viršutinio spraustuvo judėjimo greičiui. Atraminės sijos spindulys pasirinktas 2 mm, apkraunančios sijos spindulys – 5 mm, įlinkio aukštis – 8 mm, o atstumas tarp atramos taškų – 40 mm. Bandymams buvo naudojami išilgine ir skersine kryptimis išpjauti $100 \times 15 \times (0,8 \pm 0,1)$ mm³ dydžio juostelės formos bandiniai.

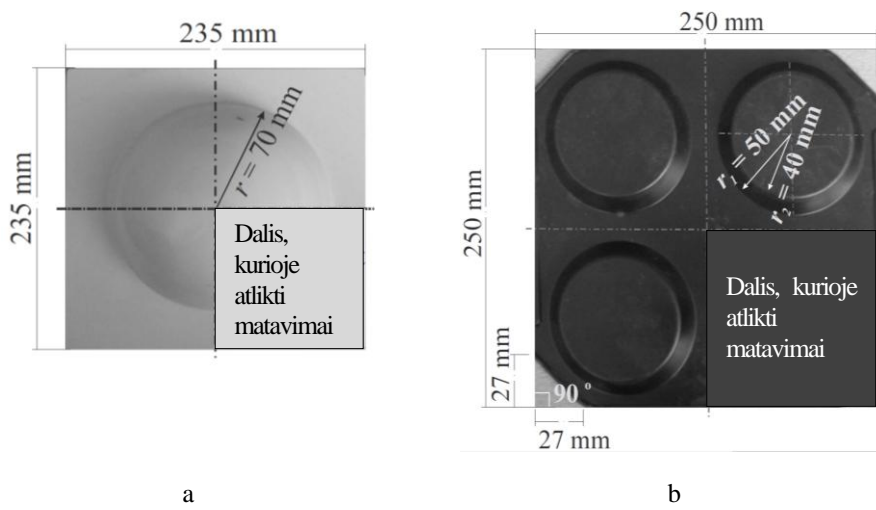
Visais atvejais buvo paruošta po 6 bandinius ir apskaičiuotas aritmetinis vidurkis. Matavimų santykinės atsitiktinės paklaidos ne didesnės nei 10 %.

2.7 Kompozitų deformacijų lauko tyrimo metodika

Tiriant iš anksto įtemptų kompozitų deformacinę elgseną, buvo atliekami erdvinės formos įtemptųjų bandinių, taip pat erdvinės formos gaminio maketų deformacijų lauko matavimai. Erdvinės formos bandinių deformacijos buvo tiriamos tiek įtempimo, tiek ir relaksacinio proceso metu, o erdvinės formos gaminio maketų deformacijų lauko matavimai buvo atliekami tik prieš ir po formavimo. Tiriamųjų bandinių paviršius buvo padengtas reguliarios struktūros taškelių tinkleliu, esant 10 mm atstumui tarp taškelių. Nesukietėjusių kompozitų atveju, bandinių vaizdai buvo fiksuojami skaitmeniniu fotoaparatu (skiriamoji geba 4032×3024 pikseliai), o sukietėjusių kompozitų atveju, skenuojami (skiriamoji geba 1200 pikselių). Naudojantis *Image J* programa, papildyta specializuota paprograme *KTU Image JD*, nustatytos kiekvieno taško koordinatės bei įvertinti poslinkiai tarp dviejų gretimų taškų, apskaičiuojant deformacijų vertes, taip pat vidutinę bandinio deformaciją atskirai x ir y ašims, kurios atitinka bandinio metmenų ir ataudų kryptis.

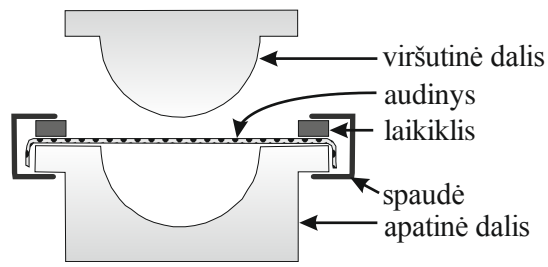
Tiriant iš anksto įtemptų bandinių deformacijas, matavimai buvo atliekami tik centrinėje plokščioje bandinio dalyje (140×140 mm²), kurioje įtvirtinimo įtaka yra minimali (Willems, 2008). Deformacijos buvo matuojamos deformuojant bandinį iki 12 %. Suteikus reikiamą išankstinę deformaciją, bandinys buvo impregnuojamas polimerine derva ir paliekamas 24 h džiūti kambario temperatūroje. Bandinių poslinkiai relaksacijos metu buvo nustatomi išėmus bandinį iš tvirtinimo įtaiso, jį skenuojant tam tikrais laiko momentais, t. y. praėjus 1, 30, 60, 360, 1440 min (1 para), 10080 min (7 paros) ir 43200 min (30 parų), darant prielaidą, kad įtemptų bandinių relaksacija dėl įtvirtinimo yra suvaržyta. Tuo metu neįtemptų bandinių relaksacinė elgsena buvo stebima ir dervai kietėjant. Kadangi šiuo atveju bandinį skenuoti yra sudėtinga, todėl poslinkiai buvo registruojami skaitmenine kamera.

Erdvinės formos gaminio maketų deformacijų lauko tyrimui buvo pasirinkti du audiniai – didžiausiu tūsumu pasižymintis medvilninis audinys ir mažai tūsumo stiklo pluošto audinys. Bandymo metu buvo atliekamas dviejų, skirtingos geometrijos detalių (žr. 2.5 pav.) formavimas tiesioginio presavimo metodu (žr. 2.6 pav.). Forma buvo sudaryta iš viršutinės ir apatinės dalių bei tvirtinimo įtaiso (laikiklio ir spaudės). Apatinė formos dalis buvo šiek tiek didesnė nei viršutinė, tam, kad galima būtų uždėti laikiklį. Naudotas tvirtinimo būdas leidžia reguliuoti audinio prispaudimo jėgą, o kartu ir išankstinės deformacijos dydį bei išvengti audinio trūkimo.



2.5 pav. Vienos viršūnės I formos (a) ir keturių viršūnių II formos geometrija

UP derva impregnuotas audinys buvo uždedamas virš apatinės formos. Atsižvelgiant į tai ar formavimo metu detalei bus suteikiama išankstinė deformacija, audinys prie apatinės formos dalies neįtvirtinamas arba įtvirtinamas laikikliu ir spaudėmis. Tada viršutinė formos dalis įspaudžiama į apatinę ir laikoma kambario temperatūroje deformuotame būvyje iki derva sukietės.



2.6 pav. Erdvinių audinių armuotų polimerinės matricos kompozitų gavimo tiesioginio presavimo būdu schema

Detalę išėmus iš formos, jos simetrinėje dalyje (žr.2.5 pav.) buvo atliekami deformacijų lauko matavimai.

3. TYRIMŲ REZULTATAI

3.1 Lino ir medvilnės siūlais armuotų iš anksto įtemptų biokompozitų tyrimas

3.1.1 Kompozitų komponentų savybių nustatymas

Pradžioje buvo vienašio tempimo būdu nustatytos kompozitams gauti naudotų komponentų mechaninės savybės. Naudotų polimerinių polipieno rūgšties ir nesočiojo poliesterio derių gautos savybės pateiktos 3.1 lentelėje. Termoplastinės PLA stipris tempiant yra maždaug 30 % didesnis nei termoreaktyvaus UP. Tačiau, PLA santykinis pailgėjimas trūkstant, yra daugiau nei 2 kartus mažesnis, nei UP.

Armuojančių siūlų savybės tempiant pateiktos 3.2 lentelėje. Tai stiprioji kompozito fazė, kuri turi atlaikyti matricos perduotą apkrovą – kuo armuojanti medžiaga yra stipresnė, tuo didesnes apkrovas gali atlaikyti kompozitas. Iš rezultatų matyti, kad siūlo stiprumas labai priklauso nuo augalinio pluošto prigimties – tokio pat ilginio tankio lino pluošto siūlo trūkimo jėga ir stipris tempiant, yra beveik 2 kartus didesnis nei medvilnės. Tačiau medvilnės pluošto siūlo sąlyginis pailgėjimas trūkimo metu, palyginus su lino pluoštu, yra daugiau nei 5 kartus didesnis. Taip pat buvo tirta ir ilginio tankio įtaka lino siūlų savybėms tempiant (žr. 3.2 lentelė). Nustatyta, kad lino siūlo ilginiam tankiui padidėjus nuo 68 tex iki 105 tex, gaunamas apytikriai 20 % didesnis stipris tempiant ir pailgėjimas trūkstant.

Lyginant augalinių pluoštų siūlus su specialių eksploatacinių savybių stiklo pluošto siūlais matyti, kad pastarasis yra stipresnis net už žymiai didesnio ilginio tankio (105 tex) lino pluošto siūlus. Tačiau, kaip ir tikėtasi, šio pluošto sąsumas yra žymiai mažesnis – santykinis pailgėjimas trūkstant siekia tik 0,9 %.

3.1 lentelė. Matricos polimerų savybės tempiant

Charaktersitika	Polimeras	
	UP	PLA
Stipris tempiant, MPa	18,8±2,6	24,1±3,4
Pailgėjimas trūkstant, %	6,8±1,0	3,1±0,4

3.2 lentelė. Siūlų savybės tempiant

Charaktersitika	Pluoštas			
	Lino pluoštas		Medvilnės pluoštas, 70 tex	Stiklo pluoštas, 70 tex
	68 tex	105 tex		
Trūkimo jėga, cN/tex	18,5±1,9	22,7±2,3	10,3±0,4	21,0±1,7
Stipris tempiant, MPa	175,0±10,5	216,0±11,6	87,6±3,5	245,0±9,6
Pailgėjimas trūkstant, %	2,0±0,3	2,4±0,3	10,6±1,5	0,9±0,1

Jungiant pluoštą su matricos polimeru, geras pluošto vilgumas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, užtikrinačių gerą adheziją tarp pluošto ir dervos. PLA ir UP dervos gebėjimas vilgyti suktus augalinio pluošto siūlus, pateikiamas 3.3 lentelėje. Visais atvejais, termoplastinė PLA turi geresnes vilgumo savybės – vilgumo kampas

yra 30–45 % mažesnis nei termoreaktyviosios UP dervos. Pluoštų vilgumo kampas su PLA derva kinta 16–22° ribose, o su UP derva – 23–30°. Matyti, kad medvilnės pluošto vilgumo kampo vertės yra gerokai mažesnės nei lino pluošto. Šių rezultatų priežastis – medvilnės pluošto paviršiaus cheminė sudėtis. Palyginus su didesnio kristališkumo medvilnės pluoštu, lino pluošte yra daugiau neceliuliozinių medžiagų, kurios lemia prastesnę pluošto adhezinę sąveiką (Le Duigou, 2010; Bledzki, 1999). Kitaip nei augaliniai pluoštai, stiklo pluoštas, dėl hidrofobinės prigimties, įprastai yra apdorojamas specialia, geresnį vilgumą suteikiančia apdaila. Todėl šio pluošto siūlai pasižymėjo geresniu vilgumu nei lino pluoštas, tačiau prastesniu nei medvilnės.

3.3 lentelė. Tirtų pluoštų vilgumas UP ir PLA dervomis

Derva	Siūlas	Vilgumo kampas, °	
		Neapdorota	Merserizuota
UP	Lino pluoštas	30±1	20±1
	Medvilnės pluoštas	23±1	16±2
	Stiklo pluoštas	26±2	–
PLA	Lino pluoštas	22±2	18±2
	Medvilnės pluoštas	16±2	14±2
	Stiklo pluoštas	20±1	–

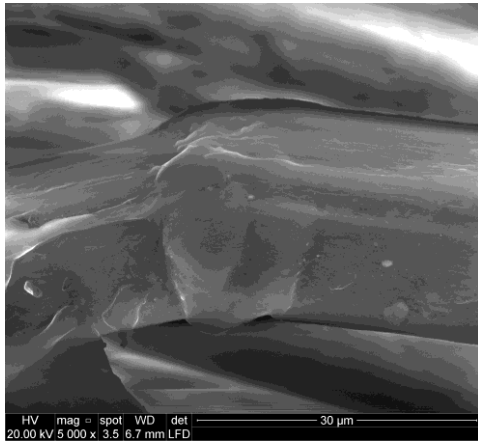
Pluošto ir matricos sukibimo mechanizmą lemia ne tik tarpatominė ir tarpmolekulinė cheminė sąveika fazių sandūroje, bet ir mechaninis sukibimas. Įrodyta (Le Duigou, 2010; Parlevliet, 2006), kad reaktoplastinių dervų atveju, fazių sandūroje vyrauja cheminiai ryšiai, o pluošto ir termoplastinių polimerų sukibimui, nors ir būdingi silpni ryšiai, Van der Valso jėgos, tačiau kitaip nei neorganiniam stiklo pluoštui, augaliniam pluoštui būdinga akyta struktūra lemia skysto polimero prasiskverbimą į pluoštą ir geresnį mechaninį sukibimą (Baley, 2006). Norint padidinti vilgumą ir užtikrinti geresnę pluošto ir dervos sąveiką tarpfazinėje riboje, taikomos įvairios pluoštų modifikavimo technologijos.

3.1.2 Cheminių apdorojimo metodų įtaką kompozitų mechaninėms savybėms

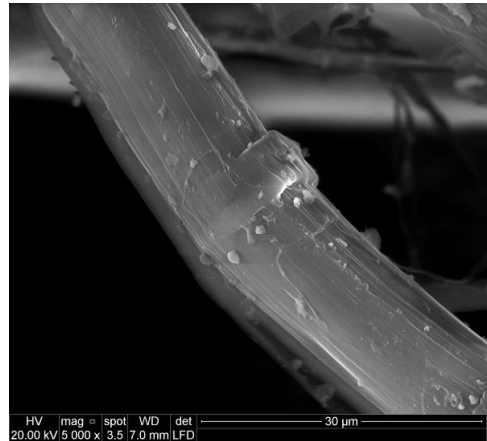
Darbe pluoštams buvo taikomi tradiciniai apdorojimo metodai – balinimas, merserizacija ir šių apdorojimų derinys. Vienas, dažniausiai naudojamų metodų, yra pluošto merserizacija. Kaip matyti iš 3.3 lentelėje pateiktų rezultatų, pluošto merserizavimas 10–20 % sumažina augalinio pluošto vilgumo kampą PLA derva ir net 30–35 % UP derva. Toks vilgumo pagerėjimas gali būti susijęs su lino ir medvilnės pluoštų paviršių morfologijos kitimu. Iš 3.1 ir 3.2 paveiksluose pateiktų SEM vaizdų matyti, kad po merserizacijos pašalinus glitą ir išorinius susioksidavusius sluoksnius, pluoštas išsitiesia, o jo paviršius tampa švaresnis.

Skirtingais metodais apdorotais siūlais armuotų UP ir PLA kompozitų savybės tempiant, pateiktos 3.3 ir 3.4 paveiksluose. Lyginant skirtingų polimerų kompozitų savybes nustatyta, kad didesnis kompozitų stipris tempiant, gaunamas naudojant PLA matricą. Teigiama, kad galimas kompozito didžiausias stipris sudaro apytikriai

50 % teorinio armuojančio pluošto stiprio (Packham, 2005). Nepriklausomai nuo armuojančio siūlo ilginio tankio, lino pluoštu armuoto UP kompozitų stipris tempiant, siekia 12 % pluošto stiprio, o medvilnės pluoštu armuota UP sistema – 30 %. Lino ir medvilnės pluoštu armuotų PLA kompozitų atveju, stiprio tempiant vertės yra atitinkamai – 18 % ir 31 %. Du kartus mažesnio stiprumo medvilnės pluošto didesnę armavimo efektyvumą lemia jo geresnis vilgumas ir didesnis pluošto kristališkumas.

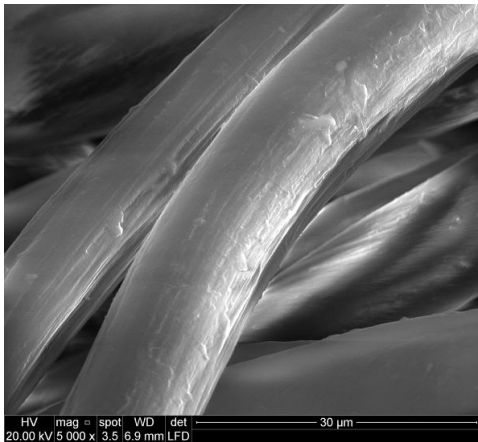


a

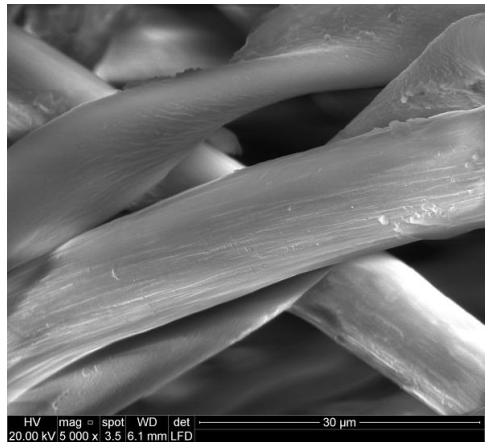


b

3.1 pav. Lino pluošto SEM vaizdai (a) prieš ir (b) pritaikius merserizaciją



a

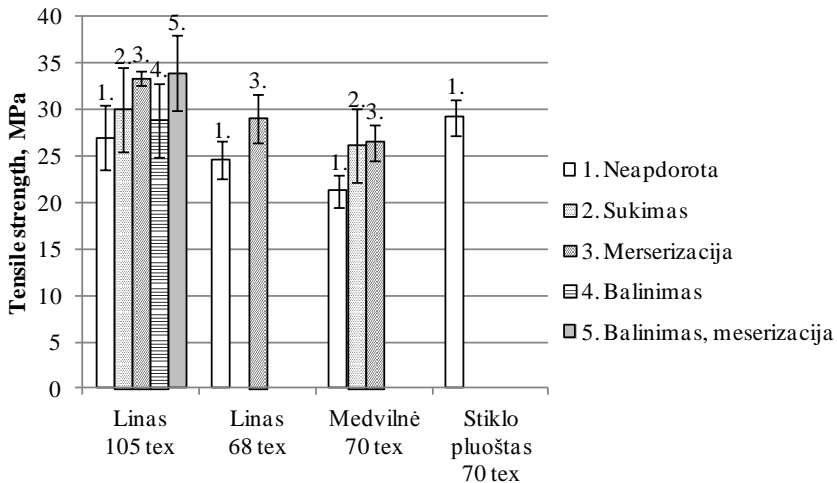


b

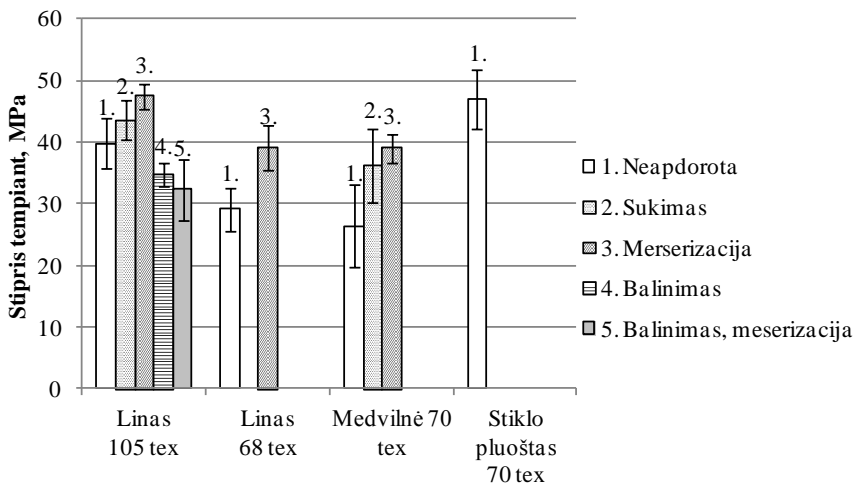
3.2 pav. Medvilnės pluošto SEM vaizdai (a) prieš ir (b) pritaikius merserizaciją

UP ir PLA polimerų stipris tempiant po armavimo medvilnės pluoštu padidėjo tik 10-13 %, o armuojant dervas panašaus ilginio tankio lino pluoštu – 21–31 %. Didesnis polimerinių matricių armavimo efektyvumas pasiekiamas didesnio ilginio tankio verpalų atveju (105 tex) – jų stipris tempiant didėja 45–66 %. Tuo metu UP ir PLA polimerus armuojant stiklo pluoštu, stipris tempiant didėja maždaug 1,5–2,0

kartus (55–95 %). Matyti, kad nors medvilnės pluošto armavimo efektyvumas didesnis, tačiau kompozito mechaninės savybės daugiau priklauso nuo pluošto stiprumo – kuo stipresnis pluoštas, tuo geresnės kompozitų mechaninės savybės.



3.3 pav. Pluoštų apdorojimo metodo įtaka UP biokompozito stipriui tempiant



3.4 pav. Pluoštų apdorojimo metodo įtaka PLA biokompozito stipriui tempiant

Įvairūs pluošto apdorojimo metodai daro skirtingą įtaką vienu augalinio pluošto siūlu armuotų UP ir PLA kompozitų savybėms (žr. 3.3 ir 3.4 pav.). Matyti, kad lino pluošto balinimas daro nežymią įtaką UP ir PLA kompozitų savybėms: balinto lino/UP kompozito stipris tempiant yra tik 7 % didesnis nei naudojant neapdoroto lino verpalus, o balinto lino/ PLA kompozito stipris tempiant, netgi sumažėjo (nuo 39,9 MPa iki 34,7 MPa). Tuo metu dėl lino ir medvilnės pluošto merserizavimo, kompozitų savybės tempiant, pastebimai didėja. Itin didelis

padidėjimas stebimas PLA matricos atveju – maždaug 35–50 %. Taikant šių cheminių apdorojimų derinį – balinto lino pluošto (105 tex) merserizavimas – kompozito stipris taip pat sumažėja ir siekia balinto lino/ PLA kompozito stiprį. Tokia pluošto balinimo įtaka kompozito stipriui gali būti susijusi su pluošto pažeidžiamumu cheminio apdorojimo metu (Hann, 2005). To priežastimi taip pat gali būti aukšta PLA kompozitų laminavimo temperatūra (190–200 °C), kadangi celiuliozės pluoštas nepakankamai atsparus aukštai temperatūrai. Tai patvirtina ir aplinkybė, kad aplinkos temperatūroje impregnuoto balinto ir merserizuoto lino/ UP kompozito stiprio tempiant vertės yra artimos merserizuoto lino/UP kompozito stiprio vertėms.

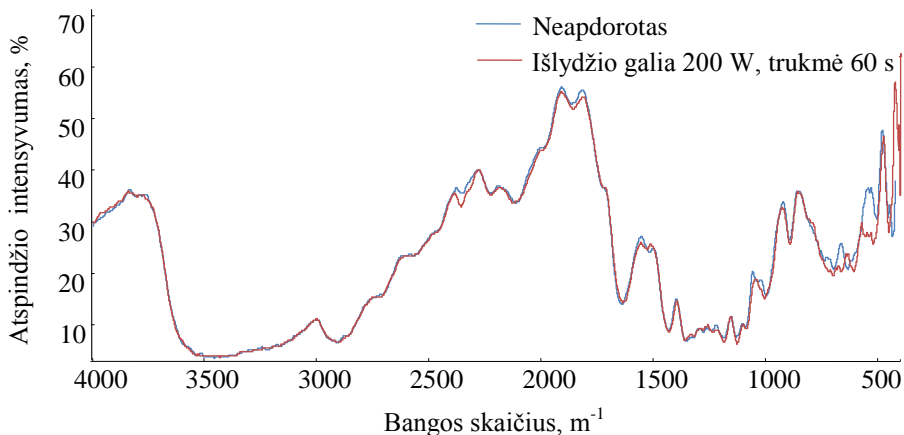
3.1.3 Apdorojimo plazma įtaka biokompozitų mechaninėms savybėms

Lino ir medvilnės pluoštų siūlų savybės taip pat buvo keičiamos, taikant netaršų apdorojimą žemo slėgio azoto dujų plazma. Šiam apdorojimui būdingas daugialypis poveikis, kai vienu metu vyksta keli procesai – išorinio paviršiaus sluoksnio pašalinimas, dėl ko keičiasi pluošto cheminė sudėtis ir paviršiaus šiurkštumas, taip pat naujų ryšių susidarymas bei funkcinų grupių prisijungimas, nes apdorojimas buvo vykdomas azoto dujų aplinkoje.

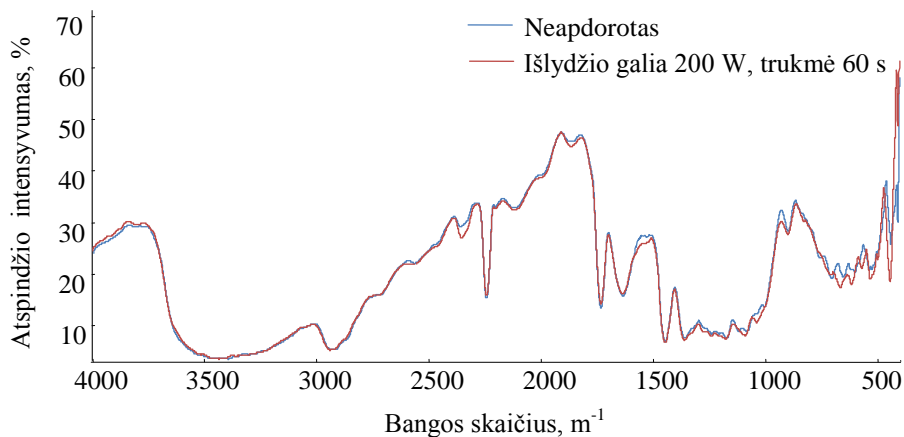
Augalinio pluošto siūlų paviršiaus sluoksnio sudėtis užregistruota FTIR spektre (žr. 3.5 pav.), kuriame matomi abiejų augalinių pluoštų panašumai. Plačios intensyvios smailės 4000–3500 cm^{-1} ir 2900–2350 cm^{-1} ir vidutiniškai intensyvios – 3350–2900 cm^{-1} spektro dalyse, susijusios su vandenilio atomus turinčių C–H ir O–H ryšių deformaciniais virpesiais angliavandenilio ir alkoholio junginiuose, kurių yra visų augalinio pluošto komponentų sudėtyje, t. y. celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino (Bozaci, 2013; Yang, 2013; Slopek, 2012). Intensyvios smailės 2350–1750 cm^{-1} , 1750–1650 cm^{-1} ir vidutinio intensyvumo smailė 1650–1450 cm^{-1} spektro dalyse susijusios su C=O, C=C ryšių deformaciniais virpesiais aromatinuose angliavandeniliuose, taip pat ketono ir aldehido junginiuose. Nepaisant to, kad aldehido junginiai gali būti priskirti celiuliozei, tačiau didesni atspindžio intensyvumai šiose spektro dalyse būdingi hemiceliuliozės ketono junginiams ir lignino aromatiniais junginiams. Taip pat matyti didesnis lino pluošto smailių intensyvumas 2300–1650 cm^{-1} ir 1750–1650 cm^{-1} spektro dalyse, lyginant su medvilnės pluošto spektru. Tai gali būti aiškinama mažesniu hemiceliuliozės ir lignino kiekiu medvilnės pluošte, kuris susijęs su didesniu pluošto kristališkumu. O smailių seka, kuri registruojama spektro „pirštų atspaudų“ srityje, 2300–1650 cm^{-1} ir 1750–1650 cm^{-1} spektro dalyse, gali būti priskirta C–C ir C–O ryšiams, priklausantiems fenolio ir kitiems aromatiniais junginiams. Didelio intensyvumo smailė spektro dalyje nuo 1400 iki 1200 cm^{-1} priklauso lignino komponentei, o 1200– cm^{-1} spektro dalyje – celiuliozei ir hemiceliuliozei (Yang, 2013; Kabir, 2013).

Pokyčiai FTIR spektre po apdorojimo plazma (žr. 3.5 pav.) atskleidė panašius cheminės struktūros pokyčius medvilnės ir lino pluoštuose. Dėl plazmos parametrų verčių didinimo gautas intensyvumo sumažėjimas 2300–2200 cm^{-1} ir 1900–1800 cm^{-1} spektro dalyse, taip pat smailės ties 1550 cm^{-1} formos ir intensyvumo pokytis

gali būti priskirti aromatinių ir ketono junginių sumažėjimui, kuris yra susijęs su hemiceliuliozės ir lignino komponentių pašalinimu nuo pluošto (Bozaci, 2013).



a



b

3.5 pav. Lino (a) ir medvilnės (b) pluoštų FTIR atspindžio spektras prieš ir po apdorojimo žemo slėgio azoto dujų plazma

Tačiau, jeigu lino pluošto atveju žymesni pokyčiai pastebimi taikant intensyvius apdorojimo režimus (išlydžio galia ≥ 50 W ir apdorojimo trukmė > 60 s), tai medvilnės pluošte pokyčiai vyksta laipsniškai, t. y. kuo didesnės apdorojimo parametrų vertės, tuo vyksta didesni pokyčiai. Šie skirtumai sietini su didesniu medvilnės pluošto kristališkumu. Į hemiceliuliozės ir lignino sudėtį įeinančių junginių pašalinimas nuo lino pluošto išorinio sluoksnio, prasideda tik parinkus ilgesnę apdorojimo trukmę, o nuo medvilnės pluošto – iš karto, kai tik pašalinami oksidavęsi sluoksniai. Hemiceliuliozės komponentės pašalinimą patvirtina ir būdingos smailės ties 1050 cm^{-1} intensyvumo sumažėjimas. Skirtumai, gauti „pirštų atspaudų“ srityje taip pat rodo pluoštinės sudėties pokyčius. Tačiau nustatyta, kad

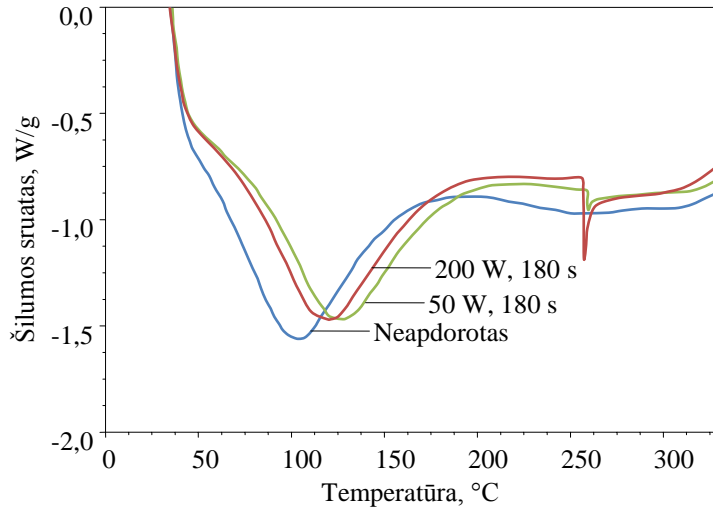
naujai susidariusių ryšių ir prisijungusių funkcinių grupių elementinė sudėtis priklauso nuo apdorojimo metu naudojamų dujų prigimties, taip pat siūle likusių oro likučių. Tačiau naujų N–H ir O–H ryšių bei –OH funkcinių grupių prisijungimas tiek prie medvilnės, tiek ir lino pluošto paviršiaus gali būti įrodytas tik 3200–3400 cm^{-1} spektro dalyje vykstančiais pokyčiais, taikant neintensyvius apdorojimo režimus. Intensyvinant apdorojimą, šios smailės išnyksta. Tai susiję su hidrofiliinių grupių, kurios yra linkusios prisijungti funkcines grupes, mažėjimu, didinat apdorojimo parametrų vertes.

Prieš tai aptartus rezultatus patvirtina ir DSK analizės rezultatai. Su tirtų siūlų pluoštine sudėtimi susijęs fazinės būsenos kitimas pateiktas DSK termogramose (žr. 3.6 pav.). Neapdorotų pluoštų atveju, matyti skirtingas medvilnės ir lino pluoštų atsakas į šilumos energiją. Endoterminiai pokyčiai užregistruoti žemesnėje nei 200 °C temperatūroje, susiję su drėgmės pasišalinimu iš pluoštų. Tačiau aukštesnėje temperatūroje pokyčius lemia didesnis medvilnės pluošto kristališkumas. Endoterminės reakcijos smailė užfiksuota 264 °C temperatūroje, kurios entalpija 4,30 J/g. Lino pluošto atveju, šiame temperatūros intervale smailės neužregistruotos dėl didesnio amorfinės hemiceliuliozės ir lignino kiekio. Kadangi celiuliozės komponentei būdinga endoterminė elgsena, o ligninui atvirkščiai – egzoterminė, bendras šių pluoštų komponentių atsakas į poveikį temperatūra persidengia ir, nepašalinus lignino sluoksnio, termogramoje smailės neišryškėja. Šiuos rezultatus patvirtina ir kitų autorių darbai (Yang, 2013; Kabir, 2013).

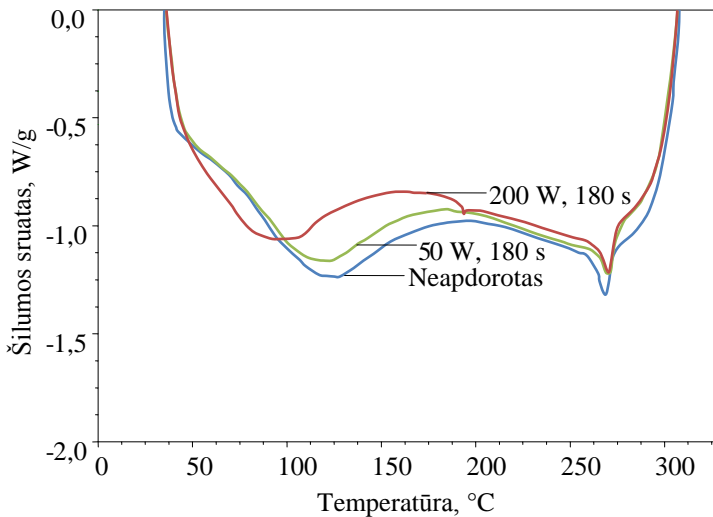
Po apdorojimo žemo slėgio azoto dujų plazma, pastebėti lino pluošto fazinės būsenos pokyčiai, susiję su pasikeitusia sudėtimi. Taikant ilgą apdorojimo trukmę (180 s), padidėja santykinis kristalinės celiuliozės kiekis amorfinių komponentių atžvilgiu. Dėl amorfinių sričių pašalinimo, matyti endoterminės smailės atsiradimas. Kuo didesnė išlydžio galia, tuo didesnis endoterminės smailės plotas. Išlydžio galią padidinus nuo 50 iki 200 W, endoterminės smailės pasislenka iš 252 °C į aukštesnių temperatūrų pusę – 258 °C, o entalpija padidėja nuo 1,53 J/g iki 2,82 J/g. Tačiau medvilnės pluošte, net esant ilgai apdorojimo trukmei ir aukštoms išlydžio galios vertėms, pokyčiai buvo neįžymūs – smailė pasislinko aukštesnės temperatūros link (270 °C), o entalpija padidėjo iki 4,42 J/g. Nors ir nedaug, tačiau kristalinių sričių kiekis padidėjo. Šie rezultatai taip pat atskleidžia, kad tiek prieš, tiek ir po apdorojimo plazma, medvilnės pluošte yra daugiau kristalinių sričių nei lino pluošte. Tai rodo didesnę medvilnės pluošto kristališkumą. Šie duomenys atitinka rezultatus, gautus kitų mokslininkų – Kalia, Thakur, Celli ir Kiechel (2013) bei Sfiligoj Smole, Hribernik, Stana Kleinschek ir Kreže (2013).

Pluoštų paviršiaus vaizdai, užfiksuoti SEM, atskleidė neapdorotų medvilnės ir lino pluoštų paviršiaus šiurkštumo skirtumus (žr. 3.7 pav. ir 3.8 pav.). Lino pluošto paviršius padengtas glitu, o medvilnės pluošto paviršius yra švarus. Skirtumai dar labiau išryškėja po apdorojimo plazma. Glitas nuo lino pluošto pašalinimas esant 60 s apdorojimo trukmei, nepriklausomai nuo pasirinktos išlydžio galios verčių. Kartu didėja ir paviršiaus nelygumas. Toliau ilginant apdorojimo trukmę, išorinis sluoksnis laipsniškai pašalinamas nuo pluošto paviršiaus. Kuo didesnė išlydžio galia, tuo trumpesnė apdorojimo trukmė norint pašalinti išorinį paviršiaus sluoksnį,

t.y. didinant išlydžio galią nuo 50 iki 200 W, trumpėja apdorojimo trukmė atitinkamai – nuo 180 iki 60 s.



a

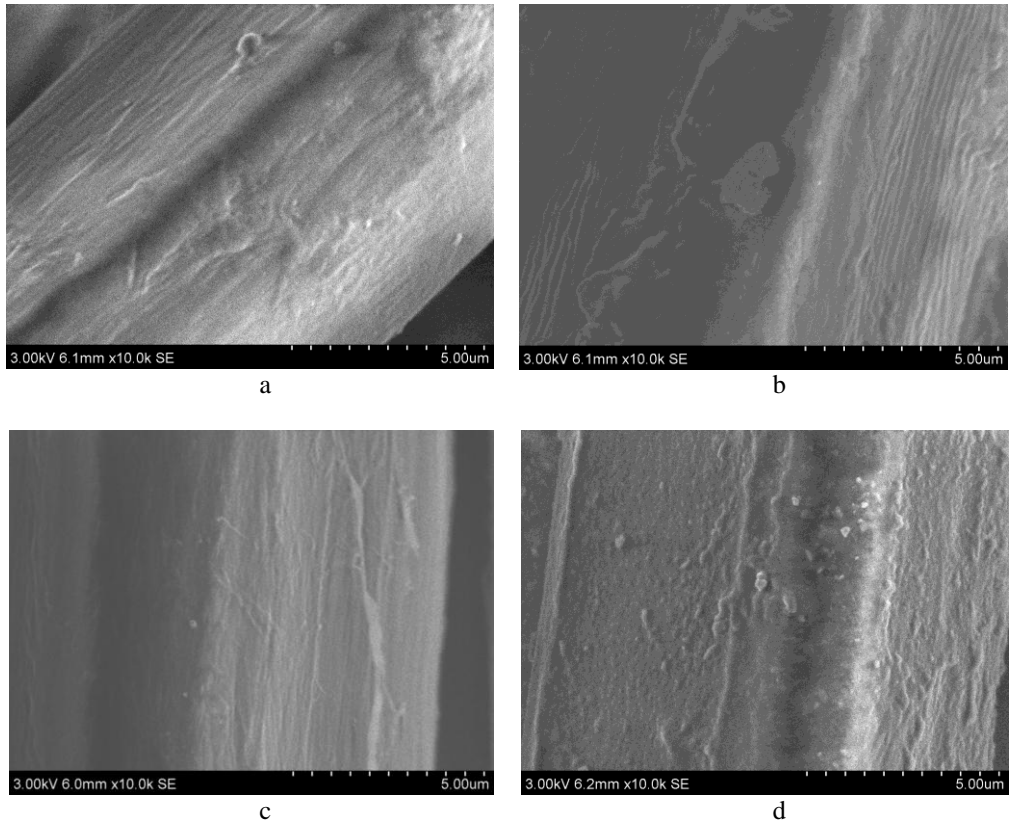


b

3.6 pav. Lino (a) ir medvilnės (b) pluoštų DSC termogramos prieš ir po apdorojimo žemo slėgio azoto dujų plazma

Tačiau išorinis paviršius sluoksnis visiškai pašalinamas tik pritaikius itin intensyvius apdorojimo režimus – 200 W išlydžio galią ir 180 s apdorojimo trukmę. Tačiau tokio režimo atveju jau prasideda pluošto paviršiaus terminis irimas.

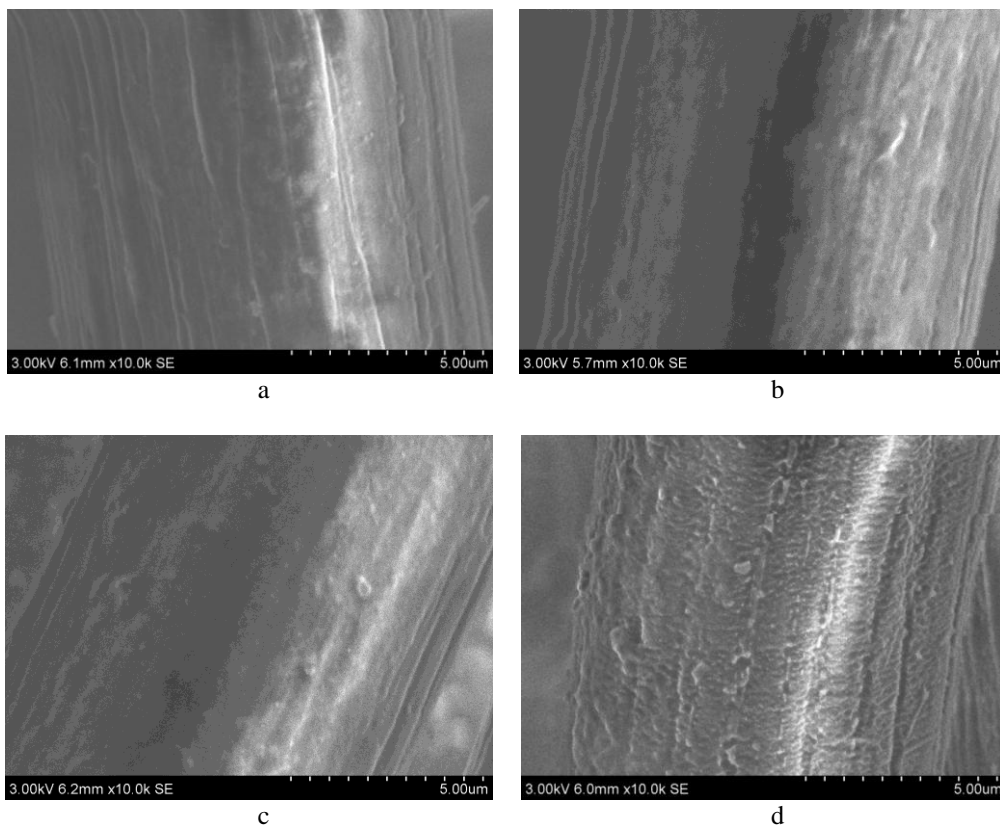
Tačiau medvilnės pluoštą veikiant žemo slėgio dujų plazma ir didinant apdorojimo parametrų vertes, paviršiaus šiurkštumas mažėja. Išorinis paviršiaus sluoksnis pašalinamas taikant skirtingus parametrų derinius. Didinant išlydžio galią nuo 50 iki 200 W, gali būti trumpinama apdorojimo trukmė, atitinkamai nuo 180 iki 60 s. Toliau didinant apdorojimo intensyvumą, kaip ir lino pluošto atveju, prasideda pluošto terminis irimas, kuris lemia ne tik lignino, bet ir celiuliozės kiekio mažėjimą.



3.7 pav. Lino pluošto SEM vaizdai: (a) neapdorotas, (b) ir (c) apdorojimo trukmė 60 s ir 180 s taikant 50 W išlydžio galią ir (d) 180 s apdorojimo trukmė ir 200 W išlydžio galia

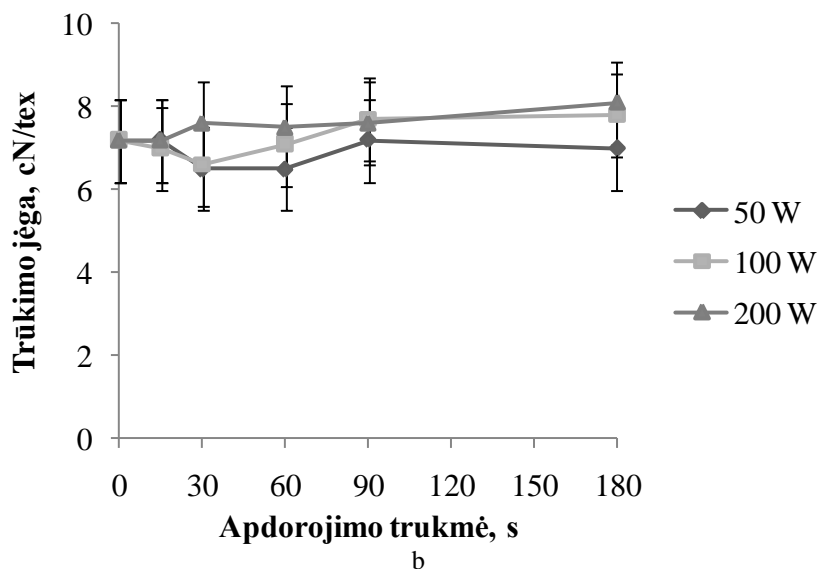
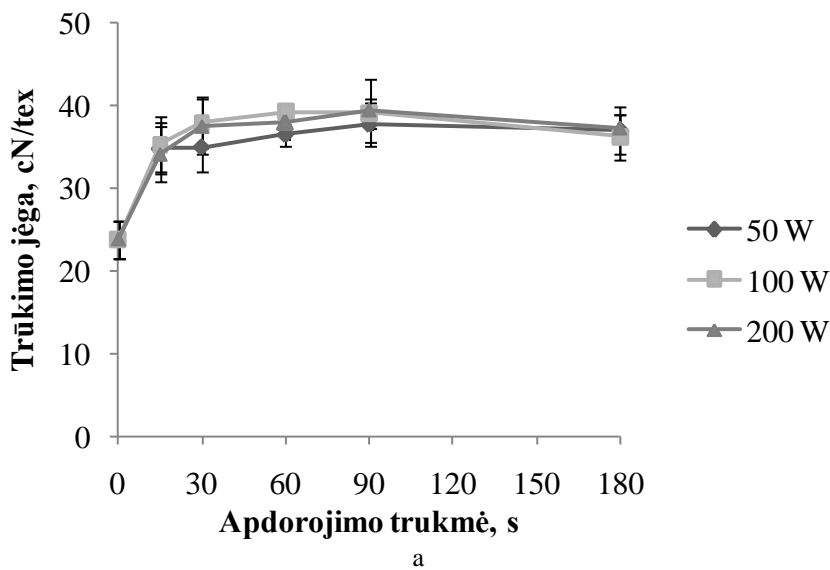
Siūlų stiprumo analizė parodo, kad neapdorotas lino pluošto siūlas yra daugiau nei du kartus stipresnis už medvilnės (žr. 3.9 pav.) siūlo. Nustatyta, kad tiek siūlų tūsumas (santykinis pailgėjimas trūkstant), tiek ir stiprumas po apdorojimo žemo slėgio dujų plazma, nesumažėja. Matyti, kad lino siūlų trūkimo jėga padidėja apie 40 %, tuo metu medvilnės – nežymiai – tik apie 10 %. Lino pluošto trūkimo jėga nepriklauso nuo pasirinktų išlydžio galios verčių, tačiau didėja ilginant apdorojimo trukmę. Esant apdorojimo trukmei ilgesnei nei 60 s, lino pluošto stiprumas didėja nežymiai, o esant 180 s – nežymiai sumažėja. Šie rezultatai sutampa su kitų mokslininkų darbais, kurie teigia, kad apdorojimas plazma neturi tiesioginės įtakos

pluoštų mechaninėms savybėms, nes plazma veikia tik išorinius paviršiaus sluoksnius, nekeisdama vidinių sluoksnių savybių (Bozaci, 2013). Todėl gauti pokyčiai sietini su netiesioginiu plazmos poveikiu pluoštų mechaninėms savybėms, kurios susijusios su pluoštą dengiančių amorfinių medžiagų pašalinimu, dėl ko kinta pluošto kristališkumas ir užtikrinama geresnė mechaninė sąveika tarp pluoštų ir bendras pluoštų pasipriešinimas į tempimo apkrovą.



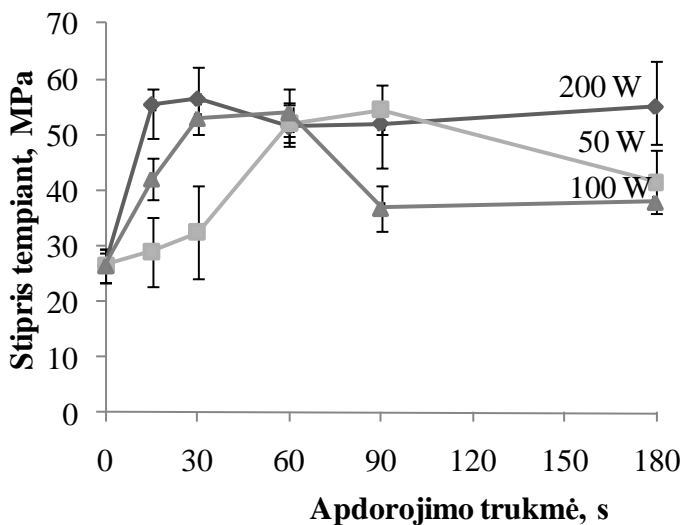
3.8 pav. Medvilnės pluošto SEM vaizdai: (a) neapdorotas, (b) ir (c) apdorojimo trukmė 60 s ir 180 s taikant 50 W išlydžio galią ir (d) 180 s apdorojimo trukmė ir 200 W išlydžio galia

Plazma apdorotų, augaliniams pluoštais armuotų kompozitų savybės tempiant, pateiktos 3.10 paveiksle. Matyti, kad skirtingų pluoštų siūlais armuotų kompozitų stiprumas skiriasi ne taip žymiai kaip siūlų: jeigu siūlų savybių vertės skyrėsi 2 kartus, tai biokompozitų savybių vertės skiriasi 1,5 karto. Po apdorojimo žemo slėgio azoto dujų plazma, kompozitų stipris tempiant didėja, kol pasiekia didžiausias vertes, kurios priklauso nuo pasirinktų apdorojimo sąlygų – kuo didesnė išlydžio galia, tuo trumpesnė gali būti apdorojimo trukmė. Dėl apdorojimo plazma, medvilnės/ PLA kompozito stipris tempiant padidėja apie 96 %, o lino/PLA – 61 %.

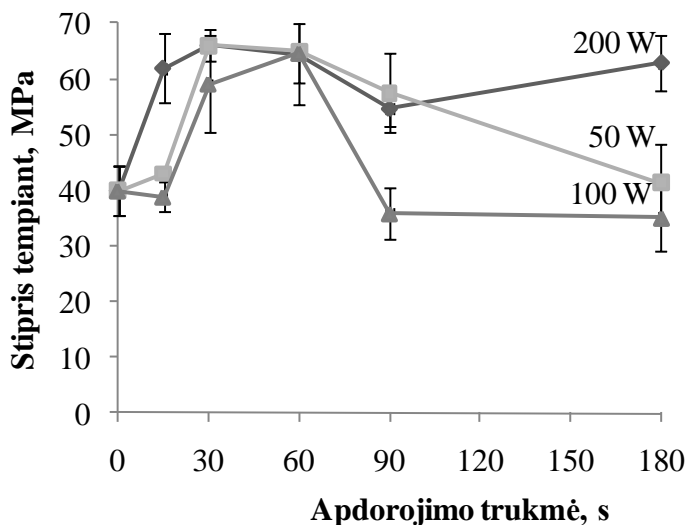


3.9 pav. Lino (a) ir medvilnės (b) pluošto siūlų trūkimo jėgos priklausomybė nuo apdorojimo plazma parametų

Iš 3.10 pav. taip pat matyti, kad medvilnės siūlai tiek prieš, tiek ir po apdorojimo, pasižymi geresne pluoštų adhezine sąveika su derva. Tai galima paaikškinti didesniu medvilnės pluošto kristališkumu, nustatytu atlikus DSK. Didžiausios lino/ PLA biokompozito stiprio tempiant vertės gaunamos apdorojant 30–60 s ir nepriklauso nuo išlydžio galios dydžio. Medvilnės verpalais armuotų kompozitų didžiausios vertės pasiskirstė platesniame apdorojimo parametų intervale: priklausomai nuo taikytos išlydžio galios – nuo 15 iki 60 s.



a



b

3.10 pav. Lino (a) ir medvilnės (b) pluoštų siūlais armuotų kompozitų stiprio tempiant priklausomybė nuo apdorojimo plazma parametų

Kompozito stipris tempiant priklauso nuo apdorojimo metu gautų pluošto paviršiaus sluoksnio pokyčių. Lino pluoštu armuoto kompozito stipris tempiant didėja, didėjant paviršiaus šiurkštumui, tačiau, dėl pašalintų išorinių paviršiaus sluoksnių, šiurkštumui pradėjus mažėti, blogėja ir kompozito savybės. Vis dėlto, taikant itin intensyvų apdorojimą – 200 W išlydzio galią ir 90–180 s apdorojimo trukmę, gaunama antra stiprio tempiant smailė. Toks kitimas susijęs su lignino komponentės pašalinimu nuo pluošto paviršiaus. Dėl šakotos ir amorfinės lignino

struktūros, ši komponentė pašalinama tik taikant intensyvius apdorojimo režimus (Achyuthan, 2010; Yang, 2013). Todėl galima teigti, kad su neceliuliozinių medžiagų pašalinimu susiję paviršiaus nelygumo pokyčiai (lino pluošto nelygumo mažėjimas ir dėl temperatūros poveikio gaunamas paviršiaus sluoksnio irimas), nėra svarbiausias kompozito savybes lemiantis veiksnys, o didesni jo savybių pokyčiai susiję su pluoštų paviršiaus sluoksnių cheminės sudėties kitimu. Pašalinus chemiceliuliozę ir dalį lignino – padidėja pluošto kristališkumas.

3.1.4 Siūlų sukrumo įtaka kompozito savybėms

Norint padidinti augalinių pluoštų stiprumą iš trumpų, elementarių pluoštų kuokštų sudaryti verpalai yra sukami. Didinant sukrumą, tarp pluoštų veikiančios trinties jėgos didėja ir užtikrina geresnę tarpusavio sąveiką. Keičiant siūlų sukrumą, kinta ir jo mechaninės savybės. Sukrumo įtaką lino ir medvilnės pluošto siūlų stipriui tempiant, pateikta 3.11 paveiksle. Matyti, kad iš pradžių sukrumui didėjant, didėja ir augalinio pluošto siūlų stiprumas. Tačiau sukrumą didinant toliau, per didelės trinties jėgos lemia pluoštų irimą ir mažina siūlų stiprumą. 105 tex ilginio tankio lino pluošto siūlo didžiausias stipris tempiant (255 MPa) pasiektas esant 200 m⁻¹ sukrumui, o 70 tex ilginio tankio medvilnės pluošto siūlo didžiausias stipris (91 MPa) užfiksuotas esant žymiai didesniai sukrumui – 460 m⁻¹. Didesnis sukrumas nežymiai keičia siūlų stiprumą: lino pluošto siūlo stipris tempiant padidėja 15 %, o medvilnės pluošto – tik 5 %.

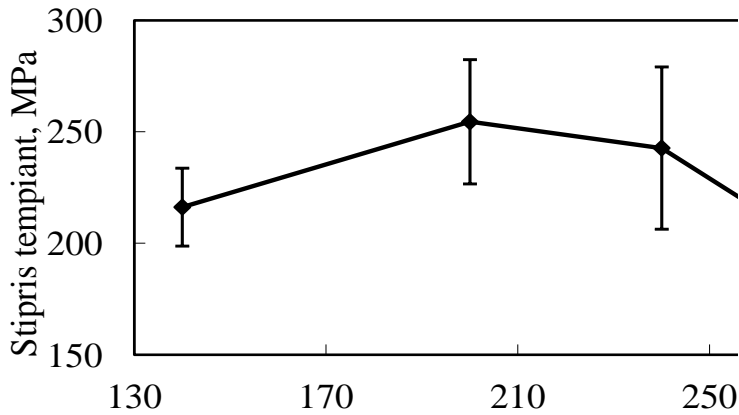
Mechaninis sukrumo keitimo metodo taikymas 105 tex storio lino ir 70 tex medvilnės siūlu armuotiems kompozitams parodė, kad jis didesnę įtaką turi tik medvilne armuotų kompozitų stipriui: UP ir PLA kompozitų stipris tempiant didėja, atitinkamai, 23 % ir 37 %. Lino pluoštu armuotų kompozitų stipris didėja tik apie 10 %. Šiam tyrimui buvo pasirinkti siūlai, kurių sukrumas užtikrino didžiausią stiprį tempiant (200 m⁻¹ – linui, ir 460 m⁻¹ – medvilnei). Šio metodo didesnę įtaką, medvilne armuotų kompozitų stiprumui, galima paaiškinti lino ir medvilnės pluošto skirtinga skerspjūvio forma ir geometrija: medvilnės pluošto siūlo ploto vienetu yra daugiau individualių pluoštelių nei daugiakampės formos skerspjūvio lino pluošte. Pluoštelių skaičius siūlo skerspjūvio ploto vienetu turi lemiamą įtaką siūlo kokybei ir apkrovos perdavimui (Cierpuha, 2006).

3.1.5 Išankstinio tempimo sąlygų įtaka biokompozito mechaninėms savybėms

Išankstinio tempimo metodą taikant lino ir medvilnės pluoštų siūlams, apkrova veikia visus pluošto hierarchinius lygmenis nuo makromolekulių iki gijų: pluoštas išsitiesia, jo struktūros elementų mechaninė sąveika gerėja, didėja tarp pluoštų veikiančios trinties jėgos. Toks pluoštas yra stipresnis ir apkrova jame pasiskirsto tolygiau. Norint nustatyti tinkamas pluošto apkrovimo sąlygas biokompozitų savybėms tempiant ir lenkiant, darbe buvo laipsniškai keičiamos armuojančio siūlo apkrovos sąlygos.

Vertinant neįtemptų biokompozitų savybes nustatyta, kad lino ir medvilnės siūlais armuotų kompozitų stipris yra apytikriai 40 % mažesnis nei stiklo pluošto

siūlu armuotų kompozitų stipris (žr. 3.12 pav.). Tačiau taikant jau minimalią išankstinę 1,0 N dydžio apkrovą, gaunamos žymiai didesnės stiprio tempiant vertės.



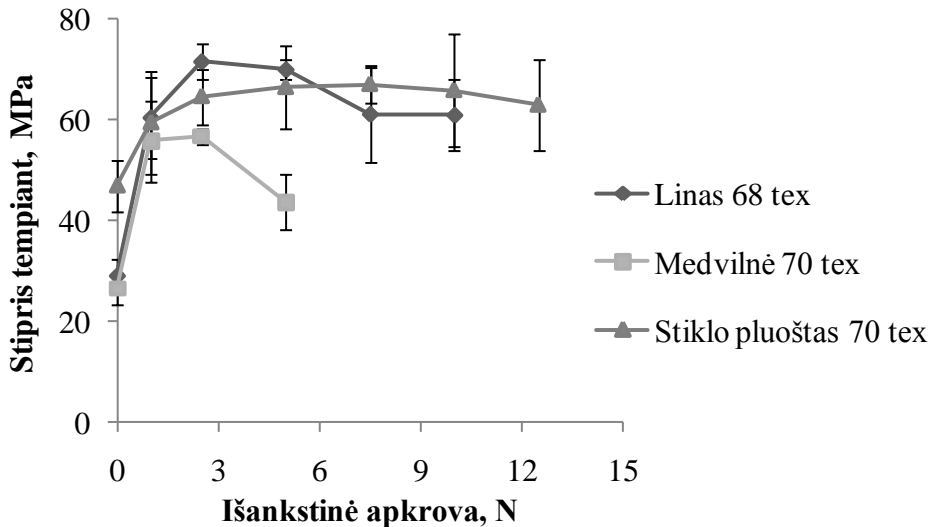
a

b

3.11 pav. Lino (a) ir medvilnės (b) pluošto siūlų stiprumo priklausomybė nuo sukrumo

Kaip ir buvo tikėtasi, didesnis išankstinės apkrovos poveikis buvo nustatytas augaliniais pluoštais armuotų kompozitų atveju. Pluošto išankstinės apkrovos įtaką lino ir medvilnės pluošto makro- ir mikrostruktūrai galima matyti 3.13 paveiksle. Įtempti lino ir medvilnės siūlai, palyginus su neįtemptais, yra daug geriau orientuoti siūlo ašies kryptimi, o pluoštai išsidėstę glaudžiau vienas kito. Dėl siūlo išankstinio tempimo, didėja sąveika tarp siūlo pluoštų, o įtempti siūlai yra standesni ir stipresni. Tokį pat poveikio mechanizmą taip pat nustatė Porwal ir kt. (2007): pluošto orientavimo procese tarpai tarp pluoštų mažėja, o dėl padidėjusių trinties jėgų, pluošto atsakas į veikiančias jėgas yra bendras, apkrova pasiskirstoma tolygiau.

Įtemptais medvilnės ir lino siūlais armuotų kompozitų stipris tempiant padidėjo 2 kartus ir pasiekė stiklo pluoštu armuotų kompozitų stiprio vertes, nors ir šio pluoštu armuoto kompozito stipris padidėjo 30 %.

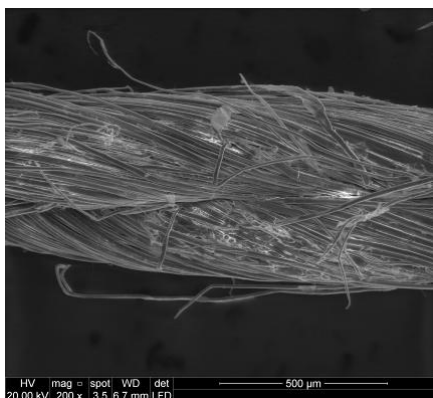


3.12 pav. Išankstinės apkrovos įtaka kompozitų stipriui tempiant

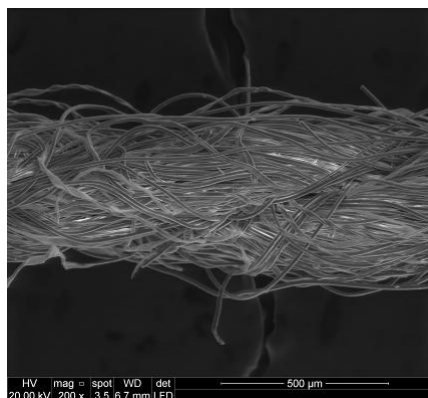
Toliau didinant išankstinę apkrovą, gerėja pluošto orientacija, todėl stiprio tempiant vertės laipsniškai didėja, kol pasiekiami didžiausia stiprio tempiant vertė. Lino/ PLA kompozito stiprio tempiant didžiausia vertė buvo užfiksuota siūlą apkrovus 5,0 N išankstine apkrova, kuri sudaro apytikriai 40 % lino siūlo stiprio tempiant. Dėl išankstinio tempimo, lino siūlu armuoto kompozito stipris tempiant padidėja apie 114 %. Šio kompozito didžiausia stiprio tempiant vertė yra 4,5 % didesnė už stiklo siūlu armuoto kompozito stiprį, kurio didžiausia vertė buvo fiksuota taikant 10,0 N apkrovą ir sudarė apie 50 % stiklo siūlo stiprio tempiant vertės. Medvilnės/ PLA kompozito didžiausia stiprio tempiant vertė buvo pasiekta apkraunant siūlą 2,5 N apkrova, kuri atitinka apytikriai 45 % medvilnės siūlo stiprio tempiant vertės ir yra tik 25 % mažesnė nei lino/ PLA kompozito bei 20 % mažesnė už stiklo pluošto/ PLA didžiausią vertę. Atsižvelgiant į tai, kad medvilnės siūlai, lyginant su lino, yra apytikriai 2 kartus silpnesni, galima teigti, kad geras mechanines savybes užtikrina gera pluošto ir dervos adhezinė sąveika.

Pasiekus stiprio tempiant didžiausią vertę, tolesnis apkrovos didinimas lemia silpniausių pluoštų irimą ir kompozito stipris tempiant pradeda mažėti. 3.13 paveiksle galima matyti kai kurių pluoštelių įtrūkimus, esant didžiausioms stiprio vertėms. Lino pluošto kompozito stipris pradeda mažėti dėl armuojančio pluošto irimo, 12,5 N išankstinės apkrovos atveju, o medvilnės pluošto atveju – 7,5 N ir stiklo pluošto – 15,0 N.

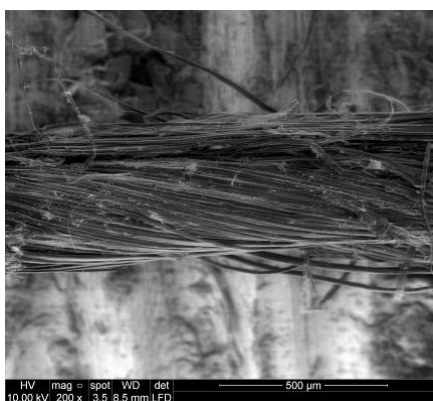
Todėl galima teigti, kad didžiausias kompozitų stiprio vertes lemia armuojančios pluoštinės medžiagos stipris – kuo didesnis armuojančios medžiagos stipris tempiant, tuo didesnę apkrovą ji gali atlaikyti iki suirimo.



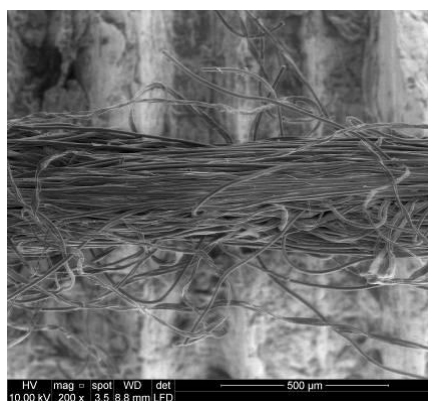
a



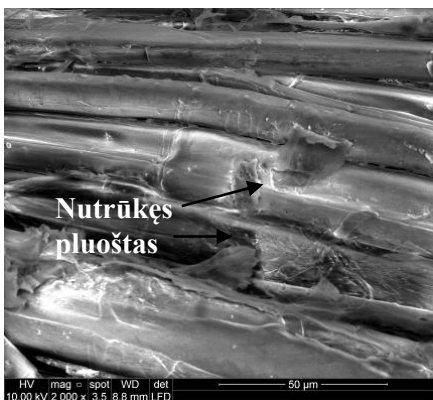
b



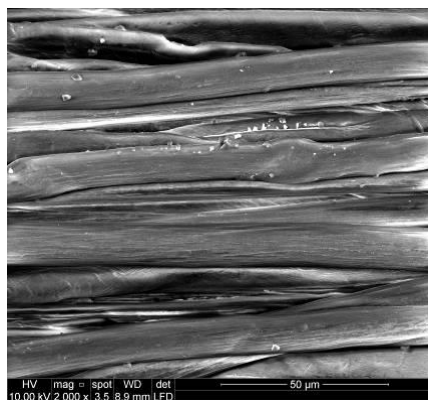
c



d



e

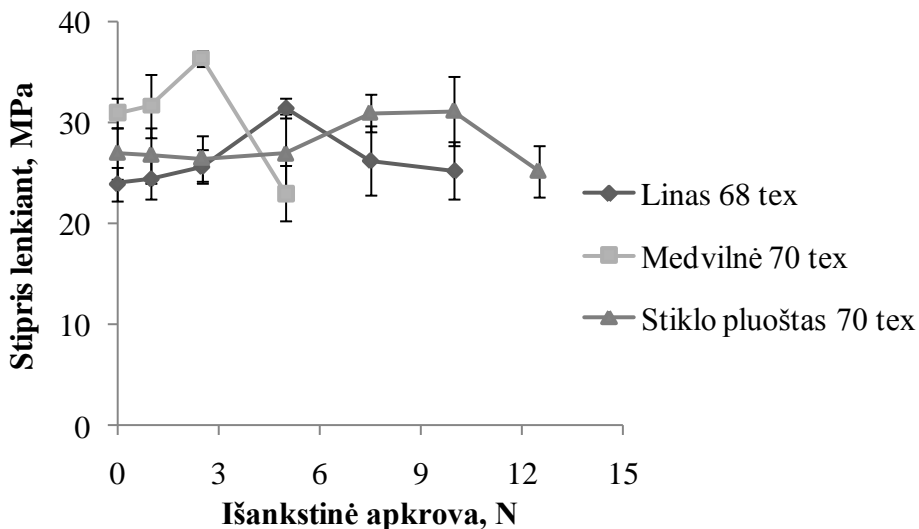


f

3.13 pav. Lino (a, c, e) ir medvilnēs (b, d, f) pluošņu SEM vaizdi: a, b – neītempti pluošņi; c, d – 5,0 ir 2,5 N apkrova ītempti pluošņi (didināms 200×); e, f – 5,0 ir 2,5 N apkrova ītempti pluošņi (didināms 2000×)

Verta paminėti, kad eksperimento metu buvo užfiksuoti atvejai, kai taikant dideles išankstines apkrovas, pluoštas, nors ir nenutrūkdavo, tačiau siūlo impregnavimo metu, veikiant aukšta temperatūra ir slėgiu, jis staiga nutrūkdavo. Todėl šią metodiką taikant praktikoje, būtina įvertinti pluošto elgseną veikiant šioms apkrovoms.

Tiriant kompozitų savybes lenkiant, iš 3.14 pav. matyti, kad iš anksto neįtemptų kompozitų atveju, didžiausiu stipriu lenkiant pasižymėjo medvilnės siūlu armuotas kompozitas, o stiklo ir lino kompozitų stipris lenkiant buvo atitinkamai 7 ir 23 % mažesnis. Šiuos rezultatus lėmė iš prigimties didelis stiklo pluošto trapumas bei lino pluoštui būdingos augimo metu susidariusios sąaugos – rumbai, kurie deformacijos metu gali tapti įtempių koncentratoriais ir sąlygoti pirmalaikį irimą. Taikant veiksmingą išankstinę apkrovą, lino/ PLA kompozito stipris lenkiant padidėja 39 %, medvilnės/ PLA – 19 %, o stiklo pluošto/ PLA – 15 %.



3.14 pav. Išankstinės apkrovos įtaka kompozitų stipriui lenkiant

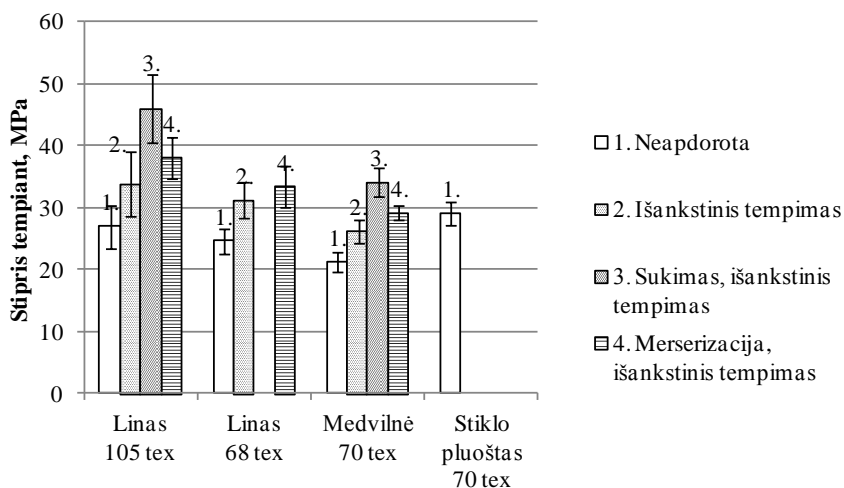
Tačiau ir šiai savybei yra būdinga gerėti iki tam tikros vertės. Tolesnis išankstinio tempimo apkrovos didinimas lemia pluošto irimą ir kompozito mechaninių savybių mažėjimą. Geriausios lenkimo charakteristikos pasiekiamos taikant 2,5 N išankstinę apkrovą medvilnės/ PLA, 5,0 N – lino/ PLA ir 7,5 N – stiklo pluošto/ PLA kompozitų atveju. Tai rodo, kad kitaip nei tirtų kompozitų savybių tempiant atveju, kai stiprio vertės pradeda žymiai didėti jau taikant nedidelę išankstinę apkrovą, didžiausios stiprio lenkiant vertės pasiekiamos didesnių išankstinio tempimo apkrovų atveju. Tai rodo, kad stipris lenkiant didėja ne dėl padidėjusios pluoštų orientacijos ir glaudesnės pluoštų sąveikos, bet dėl matricą veikiančių gniuždymo jėgų, kurios gaunamos tik esant didesnėms išankstinio tempimo vertėms. Taip pat matyti, kad lino/ PLA kompozito stiprio lenkiant vertė yra artima stiklo pluoštu armuoto kompozito vertei, o medvilne armuotas

kompozitas, palyginus su kitais pluoštais armuotais kompozitais, buvo net 13 % stipresnis.

Šio tyrimo rezultatai parodė, kad išankstinio tempimo apkrova gerina kompozitų savybes tempiant ir lenkiant. Kuo mažesnė yra pluošto orientacija ir glaudesnė pluoštų sąveika, tuo didesnė išankstinio tempimo apkrovos įtaka kompozito mechaninėms savybėms. Lyginant išankstinio tempimo įtaką kompozitų savybėms tempiant ir lenkiant, nustatytas skirtingas šių savybių kitimo mechanizmas. Kompozito stipris lenkiant didėja, naudojant dideles išankstinės apkrovas (kurios sudaro 50–70 % armuojančios medžiagos stiprio) dėl padidėjusių matricos polimerą veikiančių gniuždymo jėgų, o kompozitų atsparumas tempimui daugiausiai padidėja, taikant mažas išankstinės apkrovas, dėl geresnės pluoštų orientacijos ir glaudesnės pluoštų sąveikos.

3.1.6 Mechaninių ir cheminių apdorojimų derinio įtaka kompozitų mechaninėms savybėms

Darbe buvo atlikti tyrimai nustatant kompleksinį lino ir medvinės pluoštų cheminio bei mechaninio apdorojimo ir išankstinio tempimo poveikį kompozito gebėjimui pasipriešinti mechaninėms apkrovoms. Tyrimo rezultatai pateikti 3.15 ir 3.16 paveiksluose.

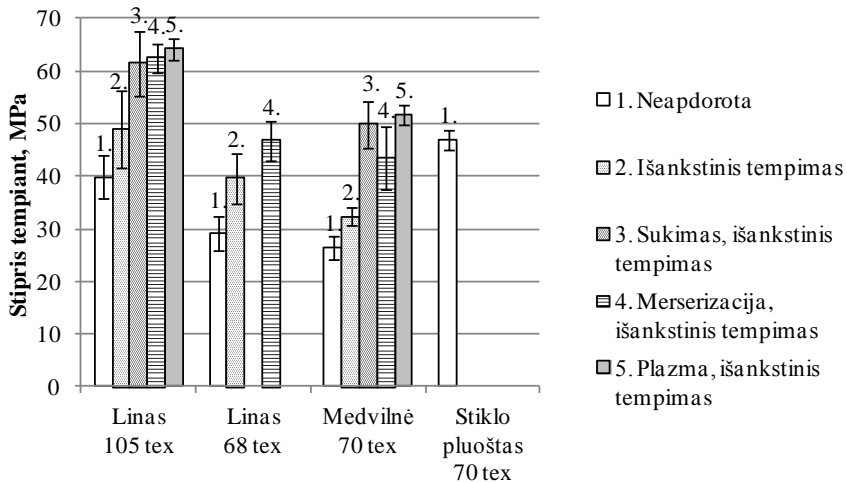


3.15 pav. Pluoštų apdorojimo metodo įtaka UP biokompozito stipriui tempiant

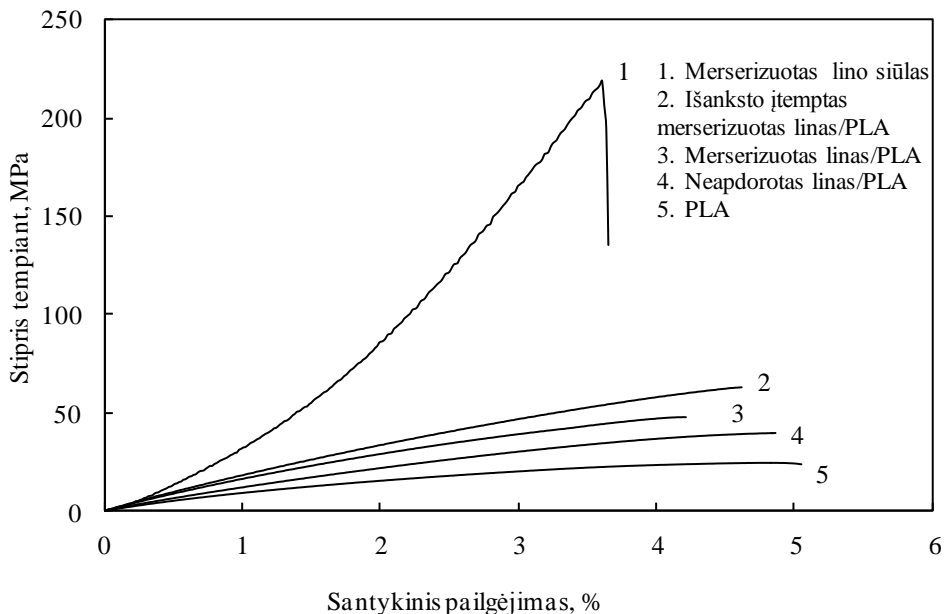
Taip pat nustatyta, kad taikant kombinuotą pluoštų modifikaciją – apdorojimą plazma, kartu suteikiant išankstinę apkrovą – užtikrinama geriausia sąveika tarp pluoštų ir dervos. Tokio lino/ PLA kompozito stipris tempiant padidėja apie 61 % bei medvilnės/ PLA – apie 96 % ir prilygsta stiklo pluoštu armuoto kompozito stipriui tempiant.

Didesnė įtaka kompozito stipriui pasiekama naudojant sukrius lino ir medvilnės siūlus ir suteikus jiems išankstinį tempimą. Ši mechaninių metodų

kombinacija, lyginant su neapdorotais siūlais armuotais UP ir PLA kompozitais, leidžia gauti 1,5–2,0 kartus stipresnius kompozitus. Taigi, augalinio pluošto siūlų sukrumo keitimas ir išankstinio tempimo suteikimas, gali priartinti UP ir PLA biokompozitų mechanines savybes prie stiklo pluoštu armuotų kompozitų savybių.



3.16 pav. Pluoštų apdorojimo metodo įtaka PLA biokompozito stipriui tempiant



3.17 pav. Lino pluošto, PLA polimerinės matricos ir lino pluošto/PLA kompozito tempimo kreivės

Panašią įtaką kompozito savybėms tempiant, turi kompozitų armavimas iš anksto įtemptais mersezizuotais lino ir medvilnės siūlais. Tyrimų rezultatai parodė pagerėjusį pluošto apkrovos perdavimo efektyvumą (žr. 3.17 pav.). Kaip įprasta,

didžiausią stiprį tempiant rodo 105 tex ilginio tankio lino verpalu armuotas kompozitas (47,5 MPa).

Apibendrinant galima teigti, kad vienu siūlu armuotų kompozitų mechaninės savybės priklauso ir nuo polimerinės matricos savybių: dėl didesnio PLA matricos stiprio (24,1 MPa), gautos geresnės ir šia matrica impregnuotų kompozitų savybės. Kaip matyti iš rezultatų, lino pluoštas didina PLA matricos stiprį, o jo vertes lemia pluošto apdorojimo įtaka. Pavyzdžiui, neapdorotas linas padidina matricos stiprį – 66 %, pluoštą apdorojus azoto plazma – matricos stipris didėja 2 kartus ir merserizavimo arba apdorojimo plazma kombinavimas su pradiniu įtempium didina stiprį trigubai.

Tyrimai parodė, kad kombinuojant augalinio pluošto mechaninius, fizinius ir cheminius apdorojimo metodus, galima gauti pluoštu armuotus kompozitus, kurių mechaninės savybės yra panašios ar netgi geresnės už sintetinius pluoštais armuotų kompozitų savybes.

Apibendrinimas

Pluošto išankstinis tempimas didina kompozito stiprį lenkiant, tik taikant didelę išankstinę apkrovą (sudaranti apytikriai 50–70 % armuojančio pluošto stiprio) dėl padidėjusių, matricą veikiančių gniuždymo jėgų. Tuo metu, dėl geresnės pluošto orientacijos ir glaudesnės pluoštų sąveikos, kompozito stipris tempiant žymiai didėja jau taikant mažą pradinę apkrovą. Toliau didinant pradinę apkrovą, kompozito stipris tempiant didėja nedaug.

Dėl mažos augalinio pluošto orientacijos ir prastos pluoštų sąveikos, išankstinio tempimo metodas yra labiau efektyvus augaliniu pluoštu armuotų kompozitų atveju – suteikęs pluoštui išankstinį tempimą, kompozito mechaninės savybės prilygsta stiklo pluoštu armuoto kompozito savybėms.

Augalinio pluošto cheminis ir/arba mechaninis apdorojimas turi didelį įtaką nesočiojo poliesterio bei polipieno rūgšties biokompozitų tarpfazinei sąveikai. Nepaisant mažesnio medvilnės pluošto stiprio tempiant, nustatytas didesnis šio pluošto kompozito armavimo efektyvumas dėl geresnių vilgumo savybių. Efektyviausiai polimerinę matricą armuoja azoto plazma apdorotas pluoštas. Lino ir medvilnės pluošto merserizavimas didina kompozito stiprumą, tačiau balinimas turi tik nedidelę teigiamą arba net neigiamą įtaką. Derinant pluošto sukrumo keitimo ir išankstinio tempimo metodus, gaunamas žymus kompozito stiprio tempiant padidėjimas. Tokio kompozito mechaninės savybės pasiekia stiklo pluoštu armuoto kompozito stiprio vertes.

Išankstinio tempimo metodas galėtų būti taikomas ištisiniu būdu armuotų gaminių gamybai gijų suvijimo ir tempiamosios ekstruzijos metodu.

3.2 Iš anksto įtempto augalinio pluošto audiniu armuoto kompozito elgsena formavimo metu

3.2.1 Audinių savybių lyginamoji analizė

Tyrimė naudotų lino, lino ir medvilnės bei stiklo pluošto audinių mechaninės savybės pateiktos 3.4 lentelėje. Norint nustatyti sandaros charakteristikų įtaką audinio mechaninėms savybėms, iš pradžių analizuojami tos pačios pluoštinės sudėties audiniai, kurių didžiąją dalį sudaro gryno lino audiniai – R115, R10, R71, R71B ir R81. Šie rezultatai lyginami su mišriapluoščiais lino ir medvilnės, taip pat stiklo pluošto audiniais.

Iš 3.4 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad didėjant vienos audinio sistemos ilginiam tankiui (žr. 2.2 lentelė), proporcingai didėja jos stiprumas (koreliacijos koeficientai atitinkamai metmenų ir ataudų kryptimis – 0,82 ir 0,84). Tuo metu siūlų tankumas audinio stiprumui žymios įtakos neturi. Taip pat nustatyta, kad audinio stiprumas ataudų kryptimi priklauso nuo metmenų siūlų sistemos stiprumo, tai rodo šios savybės koreliacija (koreliacijos koeficientas – 0,84), t. y. didinant metmenų siūlų ilginį tankį, didėja ataudų siūlų trūkimo jėga, kaip manoma, dėl geresnės metmenų ir ataudų siūlų sąveikos, didėjant siūlų kontakto plotui. Tai patvirtina ir kitų mokslininkų darbai, kurie nustatė, kad audinius tempiant, tarpusavyje perpintos siūlų sistemos turi įtaką viena kitos savybėms (Wang, 2012; Gu, 2008; Medeiros, 2005; Peled, 2003).

3.4 lentelė. Audinių savybės tempiant

Audinio kodas	Audinio kryptis	Pluoštinė sudėtis	Trūkimo jėga N	Specifinė trūkimo jėga, MPa	Santykinis pailgėjimas trūkstant, %
R115	metmenys	linas	460±15	153,0±6,5	7±0,3
	ataudai	linas	419±12	120,5±4,7	6±0,3
R10	metmenys	linas	648±25	140,0±5,0	24±1,5
	ataudai	linas	547±22	106,7±4,1	17±1,0
R71	metmenys	linas	896±30	194,1±7,4	14±0,9
	ataudai	linas	600±24	172,5±6,2	20±1,3
R71B	metmenys	linas	815±27	128,6±5,0	12±0,8
	ataudai	linas	533±20	103,9±3,9	18±0,9
R75	metmenys	linas	903±24	180,2±6,9	6±0,2
	ataudai	medvilnė	299±12	53,2±3,0	24±1,4
R81	metmenys	linas	825±24	153,9±5,4	9±0,4
	ataudai	linas	757±23	142,7±4,6	13±0,9
R82	metmenys	linas	830±24	140,0±4,4	8±0,3
	ataudai	medvilnė	531±20	122,3±4,5	22±1,4
Interglas 92110	metmenys	stiklas	855±24	518,8±9,5	3±0,1
	ataudai	stiklas	719±21	414,3±9,7	1,5±0,1

Tačiau audinio tūsumas priklauso nuo siūlų tankumo: kuo didesnis siūlų tankumas, tuo didesnis santykinis pailgėjimas trūkstant (koreliacijos koeficientai metmenų ir ataudų kryptimis, atitinkamai, 0,89 ir 0,77). Pavyzdžiui, matyti, kad

didelis metmenų siūlų tankumas (16 cm^{-1}) užtikrina didelį audinio R10 tūsumą metmenų kryptimi (santykinis pailgėjimas trūkstant – 24 %), netgi didesnę už ataudų siūlų sistemos (17 %), nors įprastai metmenų siūlų sistema yra ne tokia tūsi dėl audimo proceso metu jai taikomos apkrovos (Wang, 2012). Tačiau mažas audinio R10 siūlų ilginis tankis (56 tex) lemia mažą šio audinio trūkimo jėgą (metmenų kryptimi – 658 N, ataudų kryptimi – 547 N). Ir atvirkščiai, audinys R81 pasižymi dideliu stiprumu (metmenų kryptimi – 825 N, ataudų kryptimi – 757 N), kadangi yra išaustas, naudojant didelio ilginio tankio siūlus (105 tex), bet mažu tūsumu (metmenų kryptimi – 9 %, ataudų kryptimi – 13 %). O audiniams R71 ir R71B būdinga savybių anizotropija; dėl didesnio metmenų siūlų ilginio tankio, šia kryptimi audiniai yra stipresni, o dėl didesnio ataudų siūlų tankumo, tūsesni ataudų kryptimi. Lyginant šiuos du audinius tarpusavyje, taip pat matyti, kad balinimas turėjo neigiamą įtaką audinio mechaninėms savybėms: gautos apytikriai 10 % mažesnės trūkimo jėgos ir santykinio trūkimo pailgėjimo vertės.

Analizuojant siūlų pluoštinės sudėties įtaką audinio savybėms pastebėta, kad audinių, kuriuose ataudų kryptimi lino pluoštas buvo pakeistas medvilnės pluoštu, santykinis pailgėjimas trūkstant, šia kryptimi nors ir padidėjo (41 % audinio R75 atveju ir 22 % audinio R82 atveju), tačiau labai sumažėjo metmenų kryptimi (audinio R75 – apytikriai 4 kartus ir audinio R82 – 2,5 karto). Kadangi medvilnės pluoštas yra liaunesnis ir tūsesnis nei lino, audiniuose šie siūlai išsirango tarp lino siūlų, dėl ko gaunamas mažesnis lino siūlų rangytumas ir tūsumas. Dėl šios priežasties, taip pat pasikeičia audinių stiprumas. Nors lyginant artimos struktūros gryno lino audinį R71 su mišriapluoščiu lino ir medvilnės audiniu R82, didelių skirtumų nepastebėta, tačiau lyginant gryno lino audinį R10 su mišriapluoščiu R75, medvilniniu ataudų atveju nustatytas daug mažesnis stiprumas ir didesnis audinio stiprumas metmenų kryptimi. Kaip ir tikėtasi, stiklo pluošto audinio stiprumas, nors ir buvo didesnis nei natūralaus pluošto audinių, tačiau tūsumas yra mažesnis. Matyti, kad stiklo pluošto audinio savybės buvo artimos lino pluošto audiniui R81, kurio tankumas, nors ir buvo panašus, tačiau ilginis tankis buvo apytikriai 1,5 karto didesnis.

3.2.2 Audinio struktūros ir išankstinio tempimo sąlygų įtaka biokompozito mechaninėms savybėms

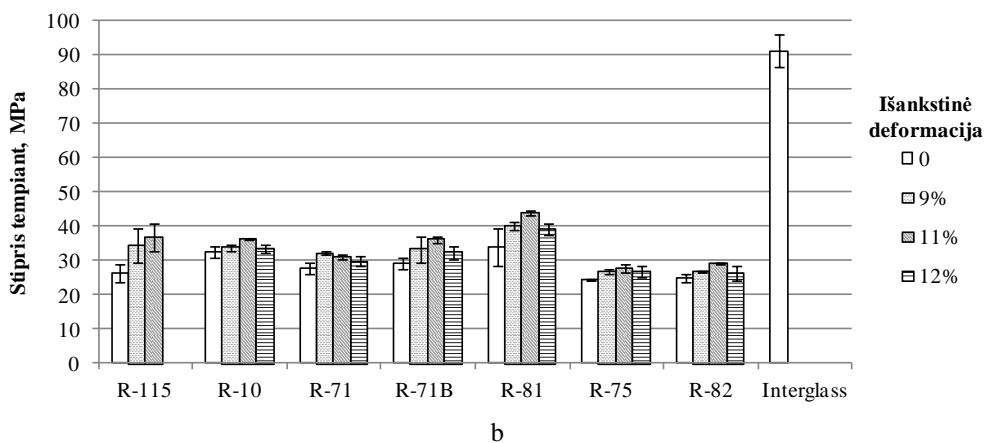
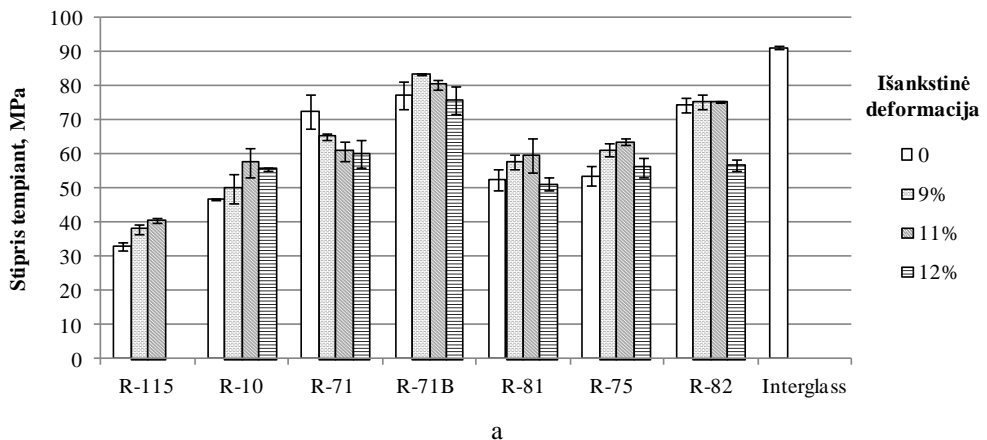
Analizuojant audinio savybių įtaką neįtemptų kompozitų mechaninėms savybėms tempiant ir lenkiant, nustatyta, kad kuo didesnės audinio mechaninių savybių vertės, tuo didesnės gaunamos ir kompozito savybių vertės. Koreliacijos koeficientas tarp audinio trūkimo jėgos ir kompozito stiprio tempiant, buvo 0,90 metmenų kryptimi ir 0,84 – ataudų, o tarp audinio trūkimo jėgos ir kompozito stiprio lenkiant, 0,84 metmenų kryptimi ir 0,79 – ataudų.

Tačiau tiriant audinio savybių įtaką įtemptų kompozitų mechaninėms savybėms pastebėta, kad ne visos audinio sandaros charakteristikos turėjo vienodą įtaką jų mechaninėms savybėms. Kaip ir 3.2.1 poskiryje, iš pradžių tarpusavyje buvo lyginami tik gryno lino audiniais armuoti kompozitai. 3.15 paveiksle parodyta, kaip

taikant išankstinę deformaciją, kinta biokompozitų stipris tempiant. Nustatyta, kad kuo tąsesnė yra siūlų sistema, tuo didesnė gaunama išankstinio tempimo įtaka. Pavyzdžiui, biokompozito, armuoto audiniu R10, kuris metmenų kryptimi turi didesnę siūlų tankumą nei kiti tirti audiniai, stipris šia kryptimi padidėja 23 %, o mažiau tąsia ataudų kryptimi – 12 %. Matyti, kad daugumai lino pluošto audinių didesnė išankstinio tempimo įtaka gauta ataudų siūlų sistemos kryptimi. Jeigu kompozitų, armuotų lino audiniais R115, R71, R71B ir R81, ataudų kryptimi stipris tempiant padidėja, atitinkamai 41, 16, 24 ir 29 %, tai metmenų kryptimi pokyčiai buvo mažesni arba net neigiami, atitinkamai – 23, -17, 8 ir 13 %.

Iš 3.15 paveiksle pateiktų rezultatų taip pat matyti, kaip didžiausia išankstinio tempimo deformacija, kuriai esant gaunamos didžiausios biokompozito stiprio tempiant vertės, priklauso nuo audinio sandaros charakteristikų (siūlų ilginio tankio ir tankumo), taip pat mechaninių savybių (stiprumo ir tąsumo) skirtumo metmenų ir ataudų kryptimis; kuo didesni šie skirtumai, tuo mažesnė išankstinė deformacija gali būti suteikta audiniui. Tai susiję su apkrovos pasiskirstymu audinyje dviašio tempimo metu; audinį tempiant, mažiau tąsiai siūlų sistemai tenka didesnė apkrova nei sistemai, pasižyminčiai didesniu tąsumu (Wang, 2012). Tad kuo anizotropiškesnis yra audinys, tuo didesnes apkrovas teks atlaikyti mažiau tąsiai siūlų sistemai ir tuo greičiau ji nutrūks pasiekus stiprumo ribą. Kartu yra mažesnė maksimali išankstinė deformacija ir mažesnė išankstinio tempimo įtaka biokompozito stiprumui. Ir atvirkščiai, kuo artimesnis yra audinio tąsumas abiem kryptimis, tuo tolygiau audinyje pasiskirsto apkrova ir gaunama didesnė maksimali išankstinė deformacija bei išankstinio tempimo įtaka biokompozito stiprumui. Tačiau praktikoje audinių, kurių savybės abiem kryptimis būtų vienodos, būna retai. Netgi, kai audinių sandaros charakteristikos abiem kryptimis nesiskiria, audinių savybės gali šiek tiek skirtis (Wang, 2012).

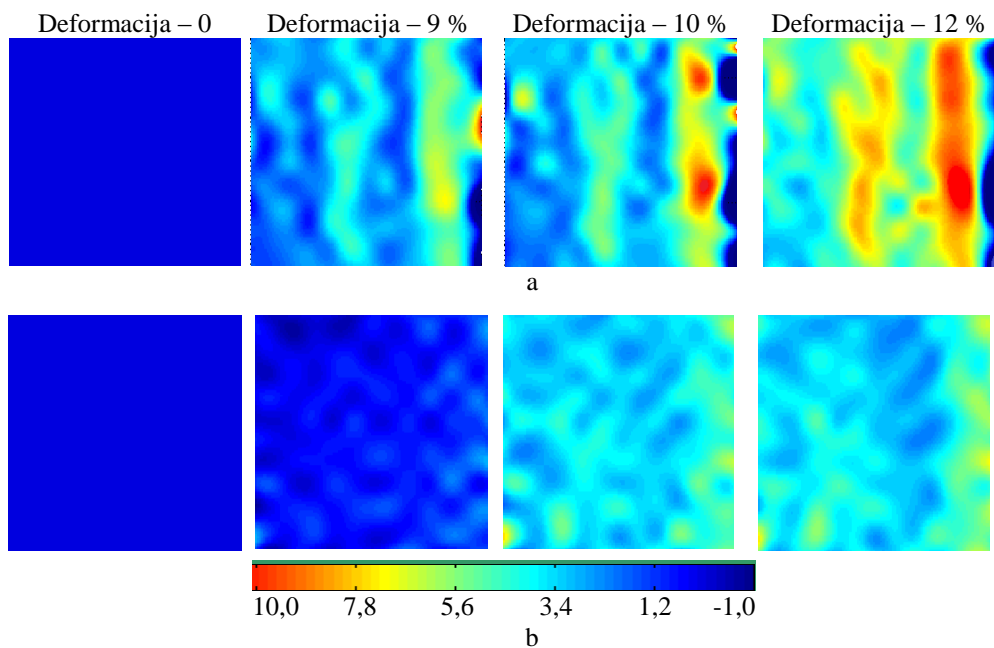
Šie rezultatai atskleidžia, kad išankstinio tempimo įtaka biokompozitų stipriui tempiant, labiau priklauso nuo audinio anizotropiškumo nei nuo atskirų siūlų sistemų stiprumo. Matyti, kad kompozito bandinių, armuotų audiniais, kurių ilginis tankis abiem kryptimis turi artimas vertes, t. y. lino audiniai R115, R10 ir R81, didžiausias stiprio vertes abiem kryptimis pasiekia esant tai pačiai išankstinei deformacijai (11 %). Išankstinę deformaciją padidinus iki 12 %, biokompozitų stipris pradeda mažėti dėl pasiektos audinių stiprumo ribos ir prasidėjusio irimo. Kompozito bandiniams armuotiems audiniais, kurie pasižymi žymiais ilginio tankio, o kartu ir stiprumo skirtumais abiejų siūlų sistemų kryptimis (R71 ir R71B), išankstinis tempimas turėjo tik nedidelę įtaką. Kadangi didžiausios jėgos tokiu atveju tenka stipresnei siūlų sistemai, kompozitas armuotas balintu lino audiniu R71B metmenų kryptimi savo stiprumo ribą pasiekia esant tik 9 % išankstinei deformacijai, o audiniu R71 armuotas kompozitas, didinat išankstinės deformacijos vertes, kaskart pasiekia vis mažesnes stiprio vertes. Šiuos skirtumus tarp audiniais R71 ir R71B armuotų kompozitų lėmė audinio apdorojimo būdas. Nors balintas audinys R71B pasižymėjo apytikriai 10 % mažesniu tąsumu ir stiprumu (žr. 3.4 lentelė), tačiau dėl geresnės pluošto ir matricos tarpfazinės adhezijos, gautas 6 % didesnis biokompozito stipris tempiant.



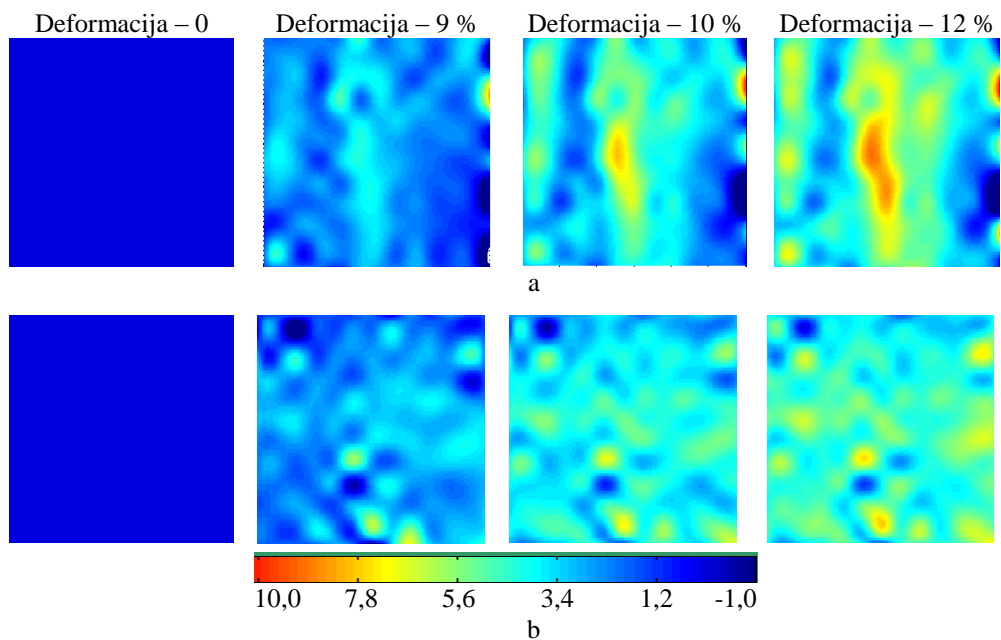
3.15 pav. Audinio struktūros rodiklių įtaka biokompozito stipriui tempiant (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis

Rezultatus taip pat patvirtina kartu su tyrimo bendraautorėmis J. Dargiene ir J. Domskiene atlikti darbai, kai buvo stebimas deformacijų lauko kitimas lino audiniuose R71 (siūlų ilginis tankis metmenų kryptimi – 86 tex ir 56 tex ataudų kryptimi) ir R81 (siūlų ilginis tankis tiek metmenų, tiek ataudų kryptimis – 105 tex) išankstinio tempimo metu (žr 3.16 ir 3.17 pav.). Nustatyta, kad bandinius tempiant, metmenų kryptimi ties centrine bandinio dalimi gaunama ryški deformacijų koncentracija. Šioje bandinio dalyje matomos daug didesnės deformacijų vertės nei likusiose bandinio dalyse. Tuo metu ataudų kryptimi deformacijos pasiskirsto daug tolygiau.

Deformacijų koncentracijos zonoje esantys pluoštai patiria didesnius įtempius nei likusiose bandinio dalyse, o pasiekus pluoštų stiprumo ribą, gaunamas pirmalaikis irimas. Tai patvirtina ir kitų mokslininkų darbai (Potluri, 2009). Todėl gali būti, kad dėl didesnės deformacijų koncentracijos metmenų kryptimi, gaunama mažesnė maksimali išankstinė deformacija bei išankstinio tempimo įtaka kompozito stipriui tempiant.



3.16 pav. Deformacijų pasiskirstymas audinyje R71 (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis išankstinio tempimo metu

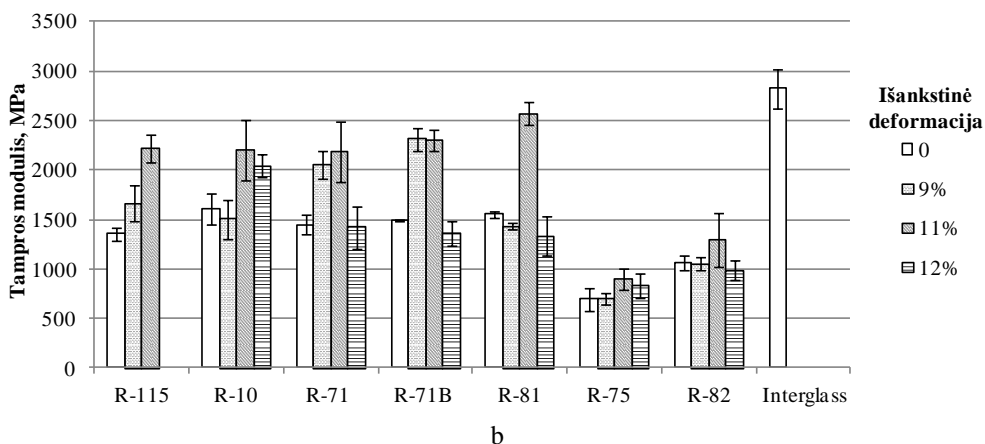
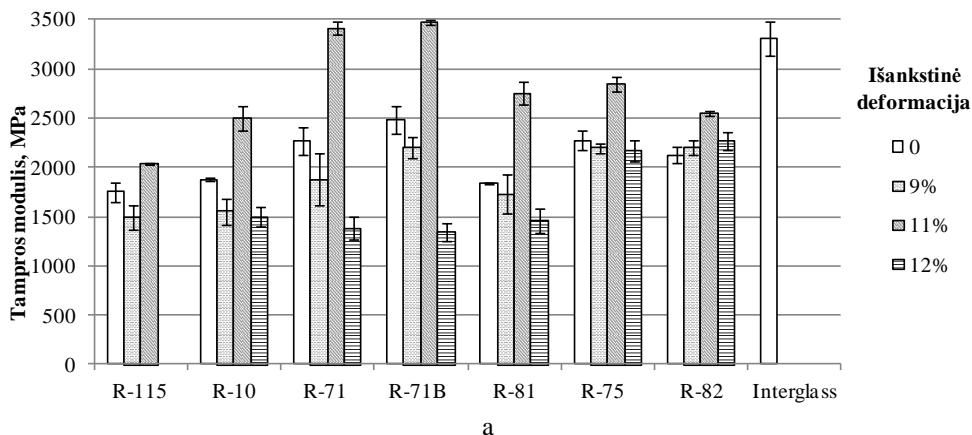


3.17 pav. Deformacijų pasiskirstymas audinyje R81 (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis išankstinio tempimo metu

Tyrimo rezultatai taip pat atskleidžia skirtumus audinių R71 ir R81 deformacinėje elgsenoje. Matyti, kad deformacijų skirtumai metmenų ir ataudų kryptimis audinyje R71 didesni nei audinyje R81. Dėl didesnės audinio R71 anizotropijos, įtemptuose kompozitose gaunama didesnė įtempių ir deformacijų koncentracija metmenų kryptimi nei audinyje R81. Šie rezultatai paaiškina, kodėl audiniu R71 armuotam kompozitui išankstinis tempimas metmenų kryptimi turėjo neigiamą įtaką, o audiniu R81 armuotas kompozitas didžiausias stiprio vertes abiem kryptimis pasiekė esant didelėms išankstinės deformacijos vertėms (11 %).

Analizuojant audinio pluoštinės sudėties įtaką iš anksto įtempto kompozito mechaninėms savybėms, pastebėta, kad lino pluošto ataudų siūlus pakeitus medvilniniais, išankstinio tempimo įtaka išlieka nepakitusi. Mišriapluoščiu audiniu R75 armuoto kompozito stipris tempiant metmenų ir ataudų kryptimis padidėja, atitinkamai 19 ir 13 %, kai panašios struktūros gyno lino audiniu R10 armuoto kompozito stipris tempiant metmenų ir ataudų kryptimis padidėja, atitinkamai 23 ir 12 %. O biokompozito, armuoto mišriapluoščiu audiniu R82 stipris tempiant metmenų kryptimi sumažėja -23 %, o ataudų padidėja 18 %, kai lino audiniu R71 armuoto kompozito stipris tempiant metmenų kryptimi sumažėja -17 %, o ataudų kryptimi padidėja 16 %. Todėl galima teigti, kad audinio pluoštinė sudėtis įtempto kompozito savybėms įtakos neturi, tačiau dėl mažo medvilnės pluošto stiprumo, tokio biokompozito stiprumas yra mažesnis. Kaip ir armuotu lino audiniais, mišriapluoščiais R75 ir R82 audiniais armuotiems kompozitams, išankstinės deformacijos įtaka priklauso nuo audinio sandaros charakteristikų. Tačiau natūraliais pluoštais armuotų kompozitų stipris tempiant yra daug mažesnis nei stiklo pluoštu armuotų kompozitų stipris (metmenų kryptimi – 91,4 MPa, ataudų kryptimi – 91,3 MPa). Panašios sandaros lino audiniui R115, net ir pritaikius išankstinį tempimą, biokompozito stiprumas buvo apytikriai 2 kartus mažesnis nei armuoto stiklo pluošto audiniu. O 2 kartus didesnio ilginio tankio audiniu R81 armuotas kompozitas, panašias savybių vertes pasiekė tik metmenų kryptimi. Todėl apibendrinant galima teigti, kad audiniu armuotiems kompozitams išankstinio tempimo metodas nors ir turėjo teigiamą įtaką, tačiau jų stiprumas neprilygo armuotiems stiklo pluoštu. Tai gali būti siejama su neigiama audinio rangytumo įtaka biokompozito savybėms, dėl ko nepavyksta pasiekti tokių gerų rezultatų kaip vienakrypčių siūlais armuotų kompozitų atveju (3.1 skyrius).

Didesnė išankstinio tempimo įtaka užfiksuota biokompozitų tampros moduliui (žr. 3.18 pav.). Gautas apie 51 % didesnis kompozitų tampros modulis metmenų kryptimi ir apie 66 % – ataudų kryptimi. Ši charakteristika parodo panašias kitimo tendencijas kaip ir kompozitų stiprio tempiant atveju, tačiau nėra išankstinio tempimo įtakos mažėjimo R71 ir R71B audiniais, kurie pasižymi didesniais ilginio tankio, o kartu ir stiprumo skirtumais abiejų siūlų sistemų kryptimis, armuotų kompozitų atveju. Manoma, kad tai susiję su tuo, kad tampros modulis matuojamas pradinėje deformacinio ciklo dalyje, kurioje medžiagų savybės nesusijusios su įtempių koncentracijos sąlygotais irimo procesais. Todėl visi audiniai didžiausias tampros modulio vertes abiem kryptimis pasiekia 11 % išankstinės deformacijos atveju.



3.18 pav. Audinio struktūros rodiklių įtaka biokompozito tampros moduliui (a) metmenų ir (b) ataudų krytimis

Taip pat matyti, kad nedidelė 9 % išankstinė deformacija sumažina tampros modulį dėl audinių struktūros persitvarkymo. Audinį įtempiant, kol deformacijos yra mažos, vyksta audinio struktūros orientacija tempimo kryptimi, taip pat siūlų rangytumo kitimas, kuris vienoje sistemoje mažėja, o kitoje – didėja (Wang, 2012; Potluri, 2009).

Analizuojant audinio pluoštinės sudėties įtaką iš anksto įtempto kompozito mechaninėms savybėms nustatyta, kad lino pluošto ataudų siūlus pakeitus medvilniniais (R75 ir R82), gaunama apytikriai 2 kartus mažesnė išankstinio tempimo įtaka – tik apie 25 % didesnis kompozitų tampros modulis metmenų kryptimi ir apie 30 % ataudų kryptimi. Natūraliais pluoštais armuotų kompozitų tampros modulis prilygsta armuotų stiklo pluoštu (metmenų kryptimi – 3.3 GPa, ataudų kryptimi – 2.8 GPa).

Taip pat, kaip ir tikėtasi, didinant išankstinės deformacijos vertes, dėl geresnės audinio orientacijos ir mažesnio tūsumo, mažėja kompozito didžiausias pailgėjimas

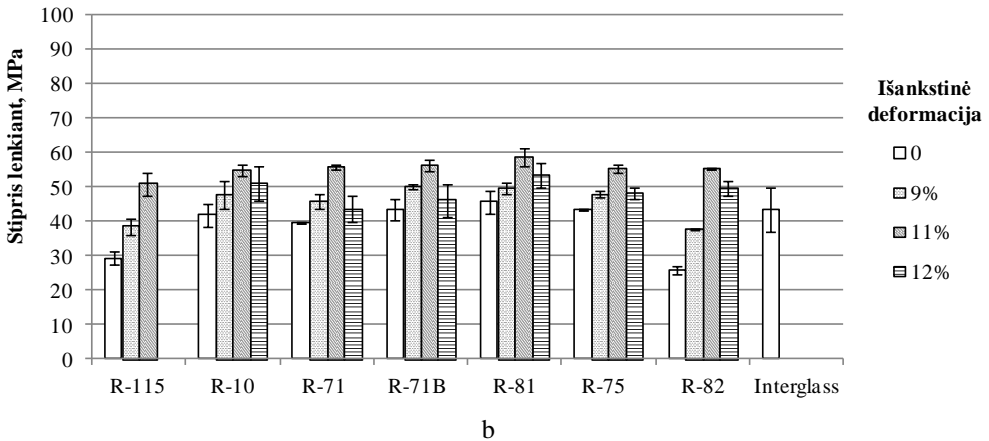
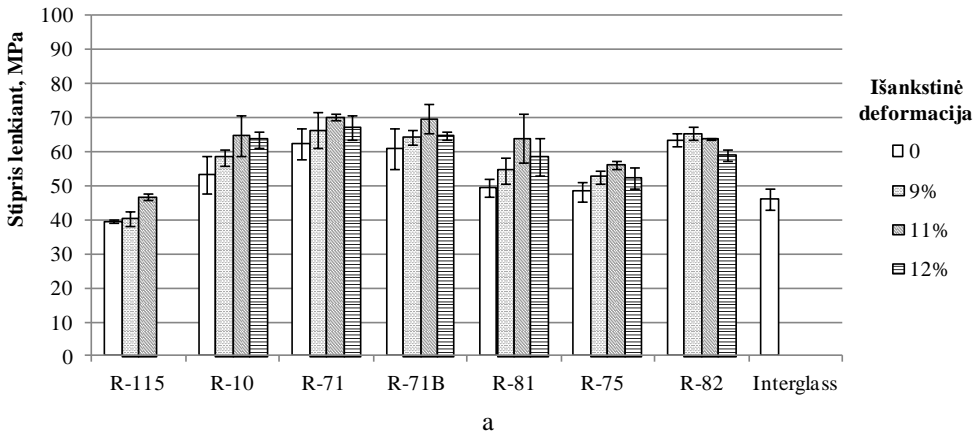
tempiant (žr. 3.5 lentelė). Visų kompozitų tąsumas didesnis tąsesnės audinio siūlų sistemos kryptimi. Taip pat didesnę tąsumą turi kompozitai su didesnio tąsumo medvilnės pluošto ataudais.

3.5 lentelė. Išankstinės deformacijos įtaka kompozitų didžiausiam pailgėjimui tempiant, mm

Armujančio audinio kodas	Bandinio kryptis	Išankstinė deformacija, %			
		0	9	11	12
R115	metmenys	3,9	3,7	3,4	-
	ataudai	4,0	4,2	3,3	-
R10	metmenys	5,6	5,1	4,8	5,0
	ataudai	6,5	5,8	5,7	5,9
R71	metmenys	5,6	5,4	5,0	4,7
	ataudai	6,2	5,5	5,3	5,0
R71B	metmenys	4,4	4,6	4,4	4,5
	ataudai	5,8	5,5	5,4	5,5
R81	metmenys	6,4	5,4	5,6	4,9
	ataudai	7,0	6,6	6,5	6,3
R75	metmenys	6,9	5,3	5,5	5,0
	ataudai	10,3	9,4	7,7	7,6
R82	metmenys	6,7	5,6	5,5	5,2
	ataudai	7,0	5,6	5,7	5,8
Interglass	metmenys	3,5	-	-	-
	ataudai	3,7	-	-	-

Analizuojant išankstinio tempimo įtaką biokompozito stipriui lenkiant (žr. 3.19 pav.), nustatyta, kad didesnis ataudų tąsumas lemia didesnę išankstinio tempimo įtaką ataudų kryptimi. Kompozito stipris lenkiant metmenų kryptimi susijęs su siūlų ilginiu tankiu, taip pat ir stiprumu: kuo stipresnis audinys, tuo didesnė išankstinio tempimo įtaka. Išimtis yra natūraliu R71 ir balintu R71B lino audiniais armuoti kompozitai, kuriems išankstinė deformacija turi ne tokią didelę įtaką kaip kitiems kompozitams. Tai susiję su didesniu šių audinių savybių skirtumu metmenų ir ataudų kryptimis. Biokompozitų, armuotų audiniais, kurių sandaros charakteristikos abiem kryptimis yra artimų verčių – R115, R10 ir R81 – stipris lenkiant padidėja, atitinkamai 18, 21 ir 30 %, o anizotropiškais audiniais R71 ir R71B – atitinkamai tik 12 ir 15 %. Nepaisant to, visi biokompozitai metmenų kryptimi didžiausias stiprio lenkiant vertes pasiekia esant 11 % išankstinei deformacijai. Kitaip nei kompozito stipris tempiant, stipris lenkiant daugiau priklauso nuo matricos savybių, todėl audiniuose tempimo metu gaunami įtempimų koncentracijos reiškiniai neturi tokios didelės įtakos. Mažesnė išankstinio tempimo įtaka biokompozitų stipriui lenkiant, taip pat gauta kompozitų, armuotų mišriapluoščiais audiniais R75 ir R82 atveju, kurių atauduose buvo naudojami medvilniniai siūlai. Šių bandinių stipris lenkiant metmenų kryptimi – padidėjo, atitinkamai tik 16 ir 3 %. O stiklo pluoštu armuoto kompozito stipris lenkiant metmenų ir ataudų kryptimis buvo, atitinkamai – 49,1 ir 47,6 MPa. Šie rezultatai atskleidžia, kad stiklo pluošto audiniui artimos sandaros audiniu R115 armuotas

biokompozitas, pritaikius išankstinį įtempimą, prilygsta kompozitui, armuotam stiklo pluoštu.

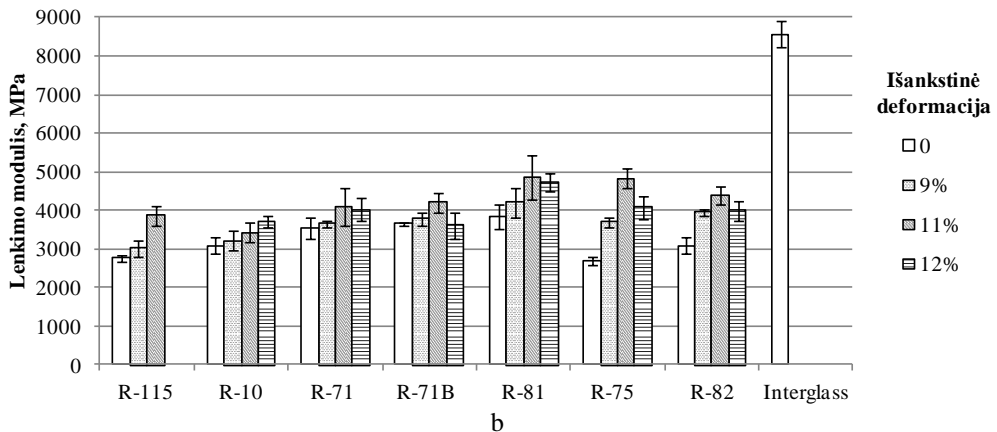
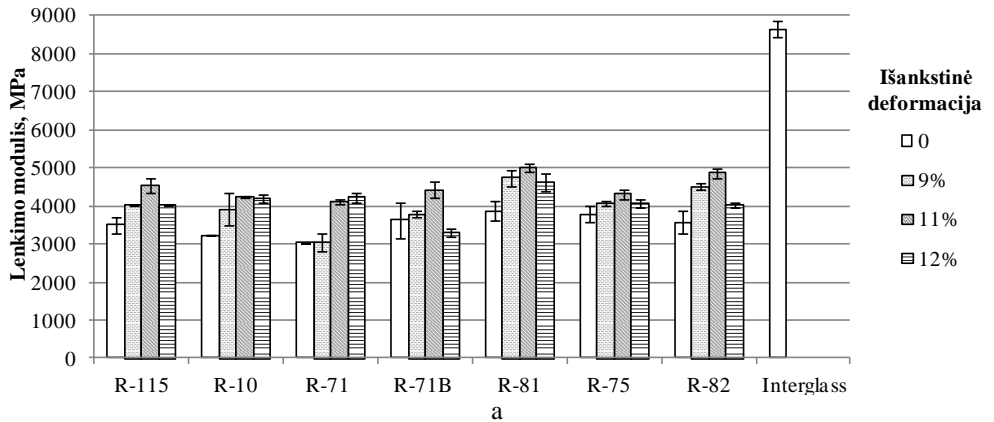


3.19 pav. Audinio struktūros rodiklių įtaka biokompozito stipriui lenkiant (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis

Nustatyta, kad kompozito savybės ataudų kryptimi nesusijusios su audinio sandaros charakteristikomis ar pluoštine sudėtimi, o priklauso nuo dervos savybių. Nors neįtemptų biokompozitų stipris lenkiant priklauso nuo audinio stiprumo, tačiau taikant 11 % išankstinę deformaciją, visų biokompozitų savybės įgauna artimas vertes (apytikriai 56 MPa). Tam gali turėti įtakos kompozite susidarę gniuždymo įtempiai, kurie padidina polimerinės matricos stiprumą lenkiant. Tačiau dėl audinio irimo procesų, toliau didinant išankstinio tempimo deformaciją, stipris lenkiant sumažėja.

Didžiausia išankstinio tempimo įtaka lenkimo moduliui užfiksuota esant 11 % išankstinei deformacijai, kai matricą veikia pakankamai didelės gniuždymo jėgos (žr. 3.20 pav.). Visų biokompozitų atveju, modulis padidėja apytikriai 30 %. Tik R71 ir R71B audiniai, kurie pasižymėjo dideliais ilginio tankio skirtumais abiejų

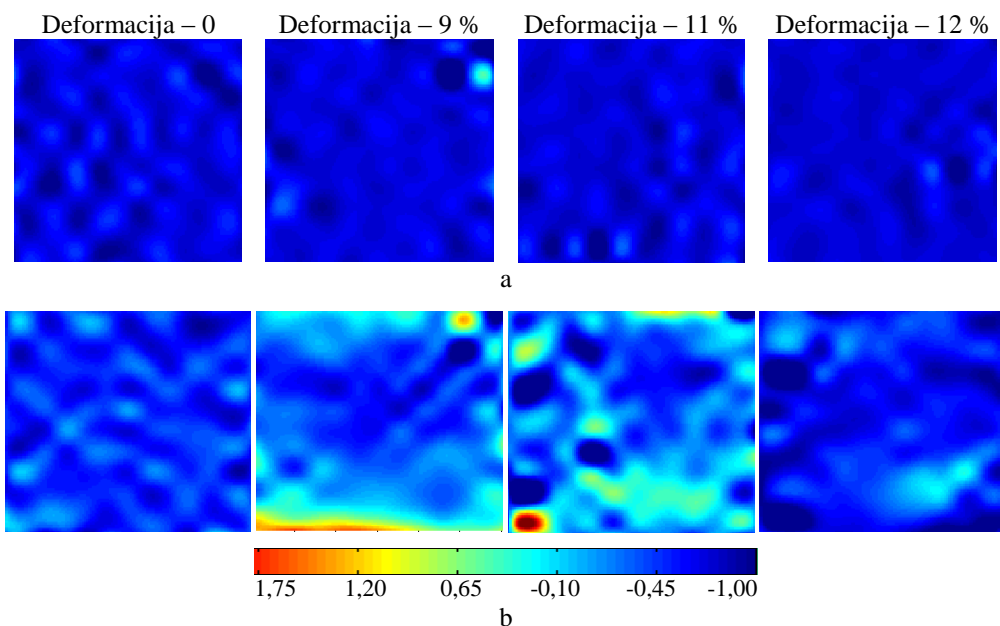
siūlų sistemų kryptimis, armuotų kompozitų lenkimo modulis ataudų kryptimi padidėja mažiau – apie 15 %. Natūraliais pluoštais armuotų kompozitų lenkimo modulis yra apie 2 kartus mažesnis nei armuotų stiklo pluoštu.



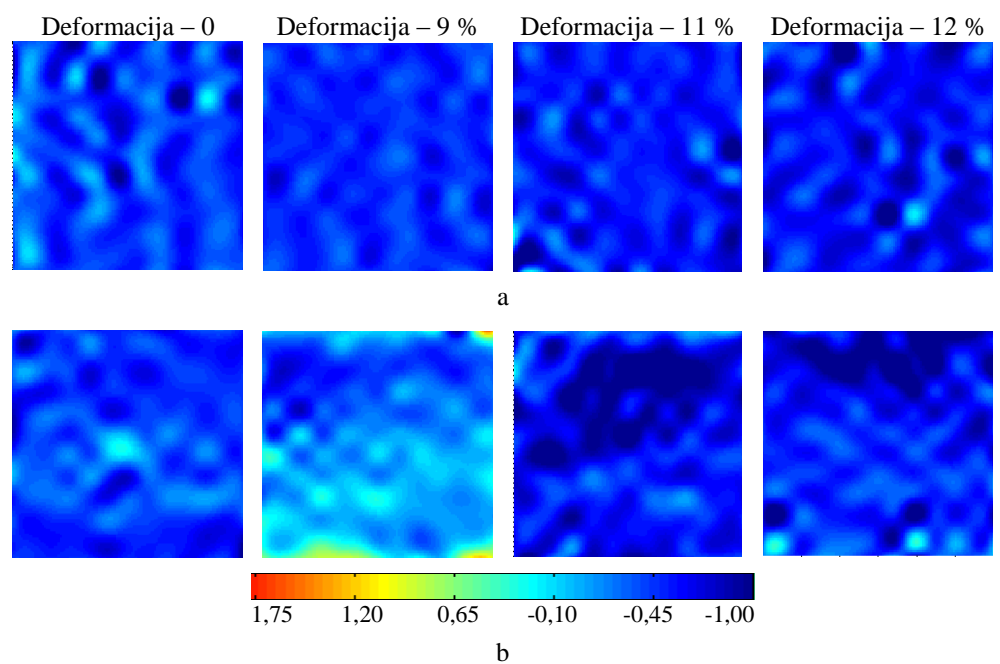
3.20 pav. Audinio struktūros rodiklių įtaka biokompozito lenkimo moduliui (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis

Kadangi iš anksto įtempti audiniai matricoje užfiksuojami deformuotame būvyje, o gautą biokompozitą veikia gniuždymo įtempiai, todėl buvo tiriamos grįžtamosios deformacijos (žr. 3.21 ir 3.22 pav.).

Kartu su tyrimo bendraautoremis J. Dargiene ir J. Domskiene tiriant audiniais R71 (atitinkamai 86 ir 56 tex) ir R81 (atitinkamai 105 ir 105 tex) armuotų kompozitų deformacijų relaksaciją, nustatyta, kad kuo mažesnė yra išankstinė deformacija, tuo mažesnės grįžtamosios deformacijos. Tačiau būtina atkreipti dėmesį, kad dėl audiniams būdingo siūlų rangytumo tiesinimosi ir jėgų persiskirstymo, 9 % išankstinė deformacija lemia bandinių susitraukimą ataudų kryptimi, ilgėjimą metmenų kryptimi. Šie rezultatai sutampa ir su kitų autorių darbais, tyrusiais audinių elgseną erdviųjų struktūrų formavimo metu, kurie taip pat nustatė audinyje vykstantį jėgų persiskirstymą (Wang, 2012).



3.21 pav. Deformacijų pasiskirstymas audiniu R71 armuotame kompozite (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis relaksacinio proceso metu



3.22 pav. Deformacijų pasiskirstymas audiniu R81 armuotame kompozite (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis relaksacinio proceso metu

Didžiausias, iš anksto įtemptų bandinių deformacijų kitimas buvo fiksuotas praėjus 30 dienų po bandinio išėmimo iš dviašio įtempimo įrenginio. Nustatyta, kad deformacijos kito (-0,29)–0,67 % ribose, t. y. iki 10 % išankstinio tempimo deformacijos. Todėl galima teigti, kad grįžtamosios deformacijos, lyginant su išankstinės deformacijos vertėmis, yra mažos.

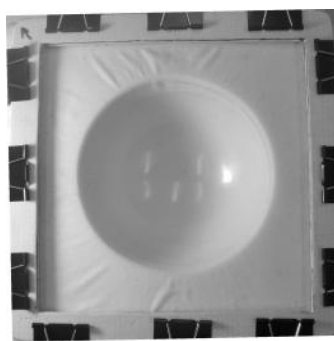
Tačiau būtina atkreipti dėmesį, kad didžiausių deformacijų zonose gautos didesnės ir grįžtamosios deformacijos, kurios sudarė iki 20 % išankstinio tempimo deformacijos. Matyti, kad audiniu R81 armuoto kompozito grįžtamosios deformacijos abiem kryptimis yra artimų verčių, o audiniu R71 armuotas kompozitas, ataudų kryptimi pasiekė didesnes grįžtamosios deformacijos vertes nei metmenų. Todėl galima daryti išvadą, kad įtemptų kompozitų atveju, nors didesni įtempiai ir deformacijos gaunami metmenų kryptimi, tačiau didesnės grįžtamosios deformacijos gaunamos ataudų kryptimi. Šie rezultatai gali būti siejami su didesniu audinio tūsumu ataudų kryptimi.

3.2.3 Išankstinio tempimo deformacijų įtaka erdvinės formos detalių gamybai

Kompozito deformacijų lauko tyrimas kartu su tyrimo bendraautorėmis P. Bekampiene ir J. Domskiene erdvinės formos detalių gamybos metu (žr. 3.23 ir 3.24 pav.) parodo, kad neįtempto kompozito atveju, visoje detalėje gaunamos dėl gniuždymo susidariusios raukšlės. Didesnės raukšlės stebimos medvilnės kompozito detalėje dėl stiklo audinio gebos patirti dideles šlyties deformacijas, veikiant net labai mažoms sunkio jėgoms. Tačiau audinius įtvirtinus laikiklyje ir suteikus išankstinę deformaciją, kaip ir tikėtasi, dėl didesnio medvilnės audinio tūsumo, suformuojama sklاندus kontūro kompozito detalė. O stiklo pluošto kompozite atvirkščiai – gausu gniuždymo deformacijų (raukšlių) ir sričių, kuriose medžiaga yra nutrūkusi. Šiuos rezultatus galima paaiškinti analizuojant deformacijų laukus.



a

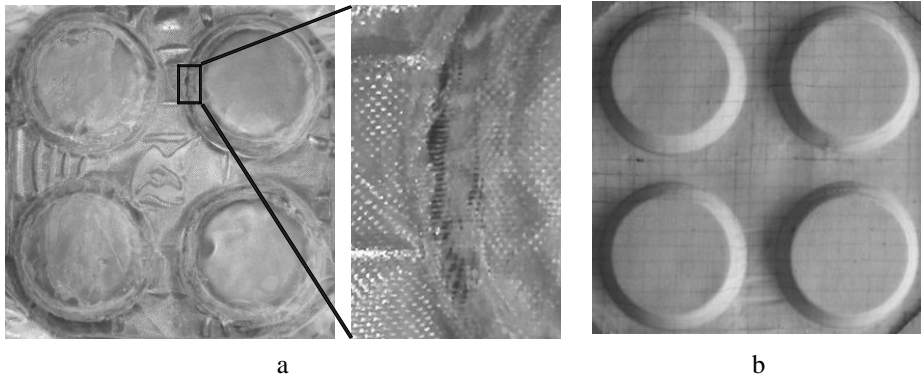


b

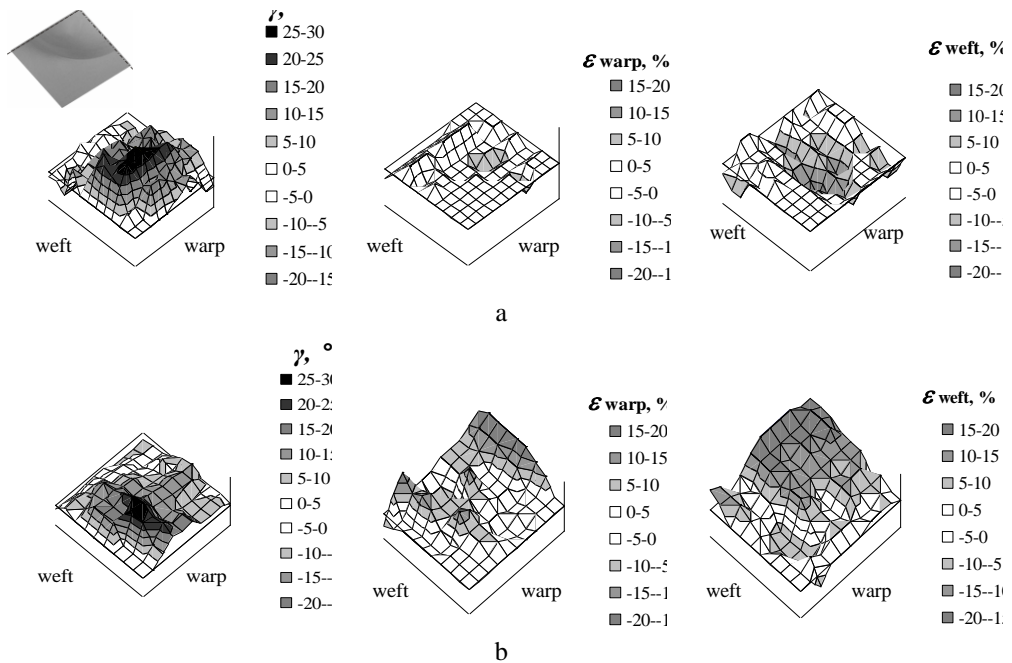
3.23 pav. Bangos susidariusios medvilniniame audinyje I formos detalės formavimo metu (a) nenaudojant ir (a) naudojant tvirtinimo įtaisą

I-os formos detalėje išmatuoti deformacijų laukai pateikti 3.25 paveiksle. Matyti, kad dėl mažo šio pluošto tūsumo, stiklo pluošto audinyje pagrindinės deformacijos yra šlyties ir gniuždymo (3.25 pav., a). Didžiausios gniuždymo ir šlyties deformacijų vertės atitinkamai buvo – (-15)–(-20) % ir 25–30°. Labiausiai šis

audinys deformavosi detalės plokščios srities centrinėje dalyje, kur detalė iš plokščios pereina į erdvinę sritį.

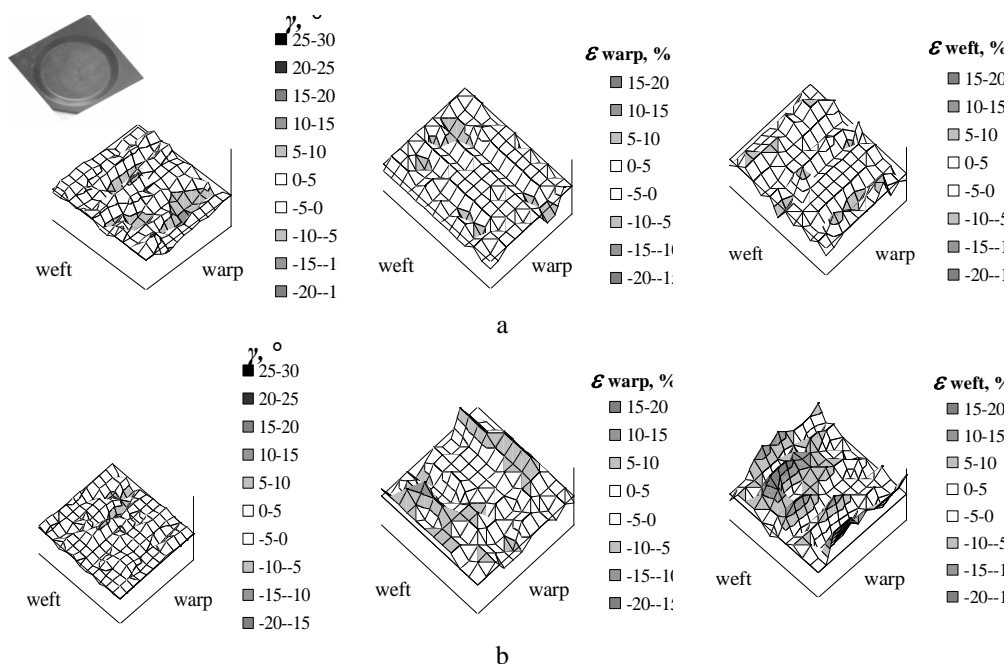


3.24 pav. II formos detalės pagamintos iš (a) stiklo pluošto ir (b) medvilninio audinių



3.25 pav. Deformacijų laukai susidarę formuojant I formos detalę stiklo pluošto (a) ir medvilnės (b) kompozituose

Medvilnės kompozito atveju buvo pasiektos artimos šlyties deformacijų vertės toje pačioje detalės zonoje, tačiau priešingai nei stiklo pluošto kompozite, gautos ženklios 15–20% tempimo deformacijos erdvinėje detalės srityje (žr. 3.25 pav., b). Kaip ir tikėtasi, didesnės šios deformacijos vertės gaunamos tasesnės ataudų sistemos kryptimi. Šie rezultatai rodo elastingos prigimties natūralių pluoštų gebą būti formuojamais ne tik veikiant šlytimi, bet ir pagrindinėmis audinio kryptimis.



3.26 pav. Deformacijų laukai susidarę formuojant II formos detalę stiklo pluošto (a) ir medvilnės (b) kompozituose

II formos detalės formavimo metu buvo stebimos panašios kompozito deformacijų lauko kitimo tendencijos (žr. 3.26 pav.), tačiau dėl mažesnės detalės sudėtingumo/ kompleksiškumo, gautos mažesnės šlyties deformacijos. Dėl periodinės erdvių sričių išdėstymo tvarkos, išryškėjo tokio tipo detalėms būdinga problema. Formavimo metu audinio slydimas tarp elementų buvo apribotas, todėl mažai tąsiame stiklo pluošto audinyje nustatytos tik gniuždymo deformacijos, todėl medžiagą formuojant, ji nutrūksta, o medvilnės kompozite užfiksuotos iki 10–15% tempimo deformacijos.

Medžiagą derivoje užfiksuotame būvyje užtikrinamos ne tik geresnės kompozito mechaninės savybės, bet ir sudaromos prielaidos erdvinės formos detalių mechanizuoto formavimo technologijų plėtrai.

Apibendrinimas

Kuo didesnis yra audinio siūlų ilginis tankis, tuo didesnis gaunamas audinio stipris tempiant. Išankstinio tempimo įtaka didesnė tąsesnei siūlų sistemai, todėl audiniais armuotiems kompozitams, pasižyminčiais didesniu siūlų tankumu ir (arba) tąsesnės siūlų sistemos kryptimi, išankstinis įtempimas daro didesnę įtaką. Iš anksto įtemptų kompozitų stipris tempiant padidėja apie 40 %, o stipris lenkiant – 100 %. Didinant išankstinę deformaciją, biokompozito mechaninės savybės gerėja tik iki tam tikros ribos, kurią viršijus, dėl pasiektos audinio stiprumo ribos, savybės pradeda blogėti. Maksimali išankstinio įtempimo deformacija, kuri gali būti suteikta

audiniui, priklauso nuo audinio sandaros charakteristikų (ilginio tankio ir tankumo), taip pat ir mechaninių savybių (stiprumo ir tūsumo) skirtumo metmenų ir ataudų kryptimis: kuo didesni šie skirtumai, tuo didesni įtempiai ir deformacijos tenka mažiau tūšiai siūlų sistemai ir tuo greičiau pasiekama audinio stiprumo riba, dėl to audiniui galima suteikti mažesnę išankstinę deformaciją. Todėl didžiausią įtaką išankstinė deformacija turi audiniams, kurių sandaros parametrai (o ypač jų siūlų ilginis tankis) metmenų ir ataudų kryptimis yra panašūs.

IŠVADOS

1. Nustatyta medvilnės ir lino pluoštų armuojančių medžiagų išankstinio tempimo sąlygų įtaka biokompozitų mechaninėms savybėms, keičiant pluoštų adhezinę sąveiką su matrica. Augaliniu pluoštu armuoto biokompozito pasipriešinimas mechaninėms apkrovoms priklauso nuo jo komponentų sąveikos tarpfazinėje riboje:
 - lino ir medvilnės pluošto cheminis apdorojimas – natrio šarmu ar balinimas vandenilio peroksidu – pagerina pluošto morfologiją ir padidina jo adheziją su polimerine matrica. Lino pluošto balinimas tik 7 % padidina kompozitų stiprį tempiant, o apdorojimas natrio šarmo tirpalu – apie 50 %;
 - keičiant lino siūlų sukrumą nuo 140 m^{-1} iki 200 m^{-1} , dėl geresnės pluoštų mechaninės sąveikos didėja jų stiprumas, todėl biokompozitų stipris tempiant, padidėja apie 10 %. Didinant medvilnės siūlų sukrumą nuo 360 m^{-1} iki 460 m^{-1} , šiais siūlais armuotų biokompozitų stipris tempiant padidėja 23–37 %;
 - taikant augalinių pluoštų modifikavimą žemo slėgio azoto dujų plazma, pašalinamas jų išorinis paviršiaus sluoksnis, kinta jo cheminė sudėtis ir paviršiaus nelygumas, todėl medvilnės pluoštu armuoto kompozito stipris tempiant padidėja apie 75 %, o lino pluoštu – 39 %.
2. Išankstinis augalinio pluošto tempimas, dėl geresnės pluoštų orientacijos ir glaudesnės jų sąveikos padidina siūlu armuoto kompozito atsparumą mechaninėms apkrovoms. Lino pluoštu armuoto kompozito stipris tempiant padidėja nuo 29 MPa iki 72 MPa ir prilygsta stiklo pluoštu armuoto kompozito stipriui (67 MPa).
3. Geriausių mechaninių savybių biokompozitai gaunami naudojant iš anksto įtemptus cheminiu ar mechaniniu būdu apdorotus lino ir medvilnės siūlus. Apdorojimas plazma kartu suteikiant išankstinę apkrovą užtikrina geriausių sąveiką tarp pluoštų ir dervos, todėl lino/ PLA kompozito stipris tempiant padidėja apie 61 %, o medvilnės/ PLA – apie 96 %.
4. Analizuojant išankstinio tempimo įtaką biokompozito stipriui tempiant, nustatyta, kad išankstinio tempimo įtaka priklauso nuo armuojančios medžiagos sandaros charakteristikų – siūlų tankumo ir ilginio tankio, ir savybių tempiant:
 - didžiausią įtaką išankstinė deformacija turi audiniams, kurių sandaros parametrai, o ypač ilginis tankis, metmenų ir ataudų kryptimis yra panašūs. Esant 11 % išankstinei deformacijai, izotropišku lino audiniu armuoto biokompozito stipris tempiant metmenų kryptimi padidėja apie 23 % (41 MPa), o ataudų siūlų sistemos kryptimi – 41 % (37 MPa), tačiau nesiekia stiklo pluoštu armuoto kompozito stiprio tempiant verčių (apie 90 MPa);

- kuo didesni audinio sandaros charakteristikų skirtumai metmenų ir ataudų kryptimis, tuo didesni įtempiai ir deformacijos tenka mažiau tūšiai siūlų sistemai ir tuo greičiau pasiekama audinio stiprumo riba, todėl audiniui gali būti suteikta mažesnė išankstinė deformacija. Anizotropišku lino audiniu armuoto kompozito didžiausia stiprio tempiant vertė metmenų kryptimi pasiekama esant tik 9 % išankstinei deformacijai, o ataudų kryptimi – 11 %. Biokompozito stipris tempiant metmenų kryptimi padidėja 8 %, o ataudų siūlų sistemos kryptimi – 24 %.
5. Išankstinio tempimo įtaka biokompozito stipriui lenkiant daugiau priklauso nuo matricos savybių ir kompozite susidariusių gniuždymo įtempių nei nuo armuojančios medžiagos sandaros:
- lino ir medvilnės pluoštu armuoto kompozito stipris lenkiant padidėja tik esant didelėms išankstinio tempimo deformacijų vertėms, dėl matricoje sukeltų gniuždymo jėgų. Siūlais armuoto iš anksto įtempto lino/ PLA kompozito stipris lenkiant padidėja 39 %, medvilnės/ PLA – 19 %, o lino audiniu armuoto UP kompozito – apie 100 % ir prilygsta stiklo pluoštu armuotų kompozitų stipriui lenkiant;
 - visi audiniais armuoti biokompozitai metmenų kryptimi didžiausias stiprio lenkiant vertes (apie 70 MPa) pasiekia esant 11 % išankstinei deformacijai. Ataudų kryptimi, taikant 11 % išankstinę deformaciją, visų biokompozitų stipris lenkiant įgauna artimas vertes (apytikriai 56 MPa).

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Monografijos, vadovėliai, knygos:

1. BOS, H. L. *The Potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials*. Ph.D. Thesis, TU Eindhoven, 2004.
2. BUIKA, G. *Polimeriniai kompozitai: mokomoji knyga*. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, ISBN 978-9955-20-309-4 Vilnius 2008.
3. FOSTER, J.S., HARINGTON, R., GREENO, R. *Structure and Fabric. Part 2*. Pearson Education Limited, Harlow, UK, 2007.
4. ISLAM, M. S. *The Influence of Fibre Processing and Treatments on Hemp Fibre/ Epoxy and Hemp Fibre/ PLA Composites*. Ph.D. Thesis, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2008.
5. KRISHNAMURTHY, S. *Pre-Stressed Advanced Fibre Reinforced Composites Fabrication and Mechanical Performance*. Ph.D. Thesis, Cranfield University, Defence College of Management and Technology, Engineering Systems Department, 2006.
6. MIRAFTAB, M., HORROCKS, A. R. *Ecotextiles. The Way Forward for Sustainable Development in Textiles*. Woodhead Publishing Limited, 2007.
7. MORTENSEN, A. *Concise Encyclopedia of Composite Materials*. 2nd edition Ecole Polytechnique Féde'rale de Lausanne, Lausanne, Switzerland. Elsevier ISBN-13: 978-0-08-045126-8, ISBN-10: 0-08-045126-8, 2007.
8. PACKHAM, D. E. *Handbook of adhesion*. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
9. WEIQUN, G. *Interfacial Adhesion Evaluation of Uniaxial Fiber-Reinforced-Polymer Composites by Vibration Damping of Cantilever Beam*. Ph.D. Thesis, Blacksburg, Virginia, February, 1997.
10. ZWEBEN, C., HAMN, M.T., CHOU, T.W. *Delaware Composites Design Encyclopedia, Vol. 1. Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials*. Technomic Publishing AG. ISBN 87762-705-3, 1991.

Straipsniai iš žurnalų:

1. ABDUL KHALIL, H.P.S., BHAT, A.H., IREANA YUSRA, A.F. Green Composites from Sustainable Cellulose Nanofibrils: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 2012, Vol. 87. 963–979. ISSN 0144-8617.
2. ACHYUTHAN, K.E., ACHYUTHAN, A.M., ADAMS, P.D., DIRK, S.M., HARPER, J.C., SIMMONS, B.A., SINGH, A.K. Supramolecular Self-Assembled Chaos: Polyphenolic Lignin's Barrier to Cost-Effective Lignocellulosic Biofuels. *Molecules* 2010, (15). 8641–8688. ISSN 1420-3049.
3. AKOVÁ, E. Development of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites. *Transfer inovácií* 2013, (25). 3-5. ISSN 1337-7094.
4. ARZONDO, L.M., PEREZ, C.J. Use of Preimpregnated Sisal Yarn in Woven Reinforced Polypropylene Sheets: Thermoformability and Mechanical Properties. *Polymer Engineering and Science* 2005, 45(7). 976–983. ISSN 1548-2634.
5. BAETEN, S., VERPOEST, I. Optimization of a GMT-based Cold Pressing Technique for Low Cost Textile Reinforced Thermoplastic Composites. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* 1999; 30(5):667-682. ISSN 1359-835X.
6. BALEY, CH., BUSNEL, F., GROHENS, Y., SIRE, O. Influence of Chemical Treatments on Surface Properties and Adhesion of Flax Fibre/Polyester Resin. *Composites: Part A* 2006, 37. 1626-1637. ISSN 1359-835X.

7. BEKAMPIENĖ, P., DOMSKIENĖ, J. Analysis of Fabric Specimen Aspect Ratio and Deformation Mechanism During Bias Tension // Materials science = Medžiagotyra / Kaunas University of Technology, Academy of Sciences of Lithuania. Kaunas : Technologija. ISSN 1392-1320. 2009, Vol. 15, no. 2, p. 167-172.
8. BERGLUND, L.A., PEIJS, T. Cellulose Biocomposites – From Bulk Moldings to Nanostructured Systems. *MRS Bulletin*, 2010, Vol 35 (3): 201-207. ISSN 0883-7694 .
9. BIAGIOTTI, J., PUGLIA, D., KENNY, J. M. A Review on Natural Fiber Based Composites Part I: Structure, Processing and Properties of Vegetable Fibres. *Journal of Natural Fibers*, 2004, 1(2), 37-68. ISSN 1544-046X.
10. BLEDZKI A. K., GASSAN J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. *Progress in Polymer Science* 1999, 24 (2): 221-274. ISSN 0079-6700.
11. BLEDZKI, A. K., MAMUN, A. A., LUCKA-GABOR, M., GUTOWSKI, V. S. The Effects of Acetylation on Properties of Flax Fibre and Its Polypropylene Composites. *Express Polymer Letters* 2008, Vol.2, No.6. 413–422. ISSN 1788-618X.
12. BOURMAUD, A., MORVAN, C., BOUALI, A., PLACET, V., PERRÉ, P., BALEY, C. Relationships Between Micro-Fibrillar Angle, Mechanical Properties and Biochemical Composition of Flax Fibers. *Industrial Crops and Products* 2013, 44: 343– 351. ISSN 0926-6690.
13. BOZACI, E., SEVER, K., SARIKANAT, M., SEKI, Y., DEMIR, A., OZDOGAN, E., TAVMAN, I. Effects of the Atmospheric Plasma Treatments on Surface and Mechanical Properties of Flax Fiber and Adhesion Between Fiber–Matrix for Composite Materials. *Composites Part B* 2013, 45(1). 565–572. ISSN 1359-8368.
14. BURGOYNE, C.J. Rational Use of Advanced Composites in Concrete. *Structures & Buildings* 2001, 146: 253–262. ISSN 1751-7702.
15. CAO, Y. CAMERON, J. Flexural and Shear Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2006, vol. 25 (4): 347-359. ISSN 1530-7964.
16. CAVALLARO, P.V., SADEGH, A.M., QUIGLEY, C.J. Decrimping Behavior of Uncoated Plain-woven Fabrics Subjected to Combined Biaxial Tension and Shear Stresses. *Textile Research Journal* 2007; 77; 403-416. ISSN 1746-7748.
17. CHEN, F., WANG, G., LI, L., CHENG, H. Mechanical Properties of a Woven Ramie Fabric Under Multidimensional Loadings. *Textile Research Journal*, 2011; 81(12): 1226-1233. ISSN 1746-7748.
18. CIERPUHA W., CZAPLIKI Z., MANKOWSKI J., KOŁODZIEJ J., ZARĘBA S., SZPOREK J. Blended Rotor-Spun Yarns with a High Proportion of Flax. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2006, 14 (5). 80-83. ISSN 1230-3666.
19. CRISTALDI, G., LATTERI, A., RECCA, G., CICALA, G. Composites Based on Natural Fibre Fabrics. *InTech Europe* 2010, (17). 317-343. ISSN 1847-9804.
20. DAYNES, S., DIACONU, C.G., POTTER, K.D., WEAVER, P.M. Bistable Prestressed Symmetric Laminates. *Journal of Composite Materials* 2010, Vol. 44, No. 9. 1119-1137. ISSN 1530-793X.
21. DENES, F.S., MANOLACHE, S. Macromolecular Plasma-Chemistry: An Emerging Field of Polymer Science. *Progress in Polymer Science*, 2004 (29). 815–885. ISSN 0079-6700.
22. DESMET, T., MORENT, R., de GEYTER, N., LEYS, CH., SCHACHT, E. Non-Thermal Plasma Technology as a Versatile Strategy for Polymeric Biomaterials Surface Modification: A Review. *Biomacromolecules* 2009, Vol. 10 (9). 2351-237. ISSN 1525-7797.

23. DUIGOU, A., BOURMAUD, A., BALNOIS, E., DAVIES, P., BALEY, C. Improving the Interfacial Properties Between Flax Fibres and PLLA by a Water Fibre Treatment and Drying Cycle. *Industrial Crops and Products* 2012, 39: 31–39. ISSN 0926-6690.
24. EDLUND, U., ALBERTSSON, A.C. Polyesters Based on Diacid Monomers. *Advanced Drug Delivery Reviews* 2003, 55(4), 585–609. ISSN 0169-409X.
25. FANCEY, K.S. Viscoelastically Prestressed Polymeric Matrix Composites – Potential for Useful Life and Impact Protection. *Composites Part B: Engineering* 2010, Vol. 41(6): 454–461. ISSN 1359-8368.
26. FARUK, O., BLEDZKI, A.K., FINK, H.P., SAIN, M. Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science* 2012, 37. 1552-1596. ISSN 0079-6700. ISSN 0079-6700.
27. GOUTIANOS S., PEIJS T., NYSTROM B., SKRIFVAR S. Development of Flax Fibre Based Textile Reinforcements for Composite Applications. *Applied composite materials* 2006, 13. 199-215. ISSN 1573-4897.
28. GU, H., LIYAN, L. Research on Properties of Thermoplastic Composites Reinforced by Flax Fabrics. *Materials and Design*, 2008, 29. 1075-1079. ISSN 0264-1275.
29. GUPTA, B., REVAGADE, N., HILBORN, J. Poly(lactic Acid) Fiber: An Overview. *Progress in Polymer Science* 2007, 32 (4): 455-482. ISSN 0079-6700.
30. HADI, A.S. ASHTON, J.N. On the Influence of Pre-Stress on the Mechanical Properties of a Unidirectional GRE Composite. *Composite Structures* 1997 Vol. 40(3–4): 305–311. ISSN 0263-8223.
31. HANN M.A. Innovation in flax manufacture. *Textile Progress* 2005, 37 (3). 1-42. ISSN 1754-2278.
32. HOUSHYAR, S., SHANKS, R.A., HODZIC, A. Influence of Different Woven Geometry in Poly(propylene) Woven Composites. *Macromolecular Materials and Engineering* 2005, 290: 45-52. ISSN 1439-2054.
33. HU, R., LIM, J.-K. Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber Reinforced Poly(Lactic) Acid Composites. *Journal of Composite Materials* 2007, 41(13). 1655-1669. 1530-793X.
34. IBRAHIM, N.A., EID, B.M., HASHEM, M.M., REFAI, R. Smart Options for Functional Finishing of Linen-Containing Fabrics. *Journal of Industrial Textiles* 2010, vol. 39 (3). 233-265. ISSN 1530-8057.
35. INBAKUMAR, S., MORENT, R., de GEYTER, N., DESMET, T., ANUKALIANI, A., DUBRUEL, P., LEYS, C. Chemical and Physical Analysis of Cotton Fabrics Plasma-Treated with a Low Pressure DC Glow Discharge. *Cellulose*, 2010, Volume 17, Issue 2. 417-426. ISSN 1572-882X.
36. YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D.H., ZHENG, C. Characteristics of Hemicelluloses, Cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel* 2013, (86). 1781-1788. ISSN 0016-2361.
37. YU, H.N., KIM, S.S., HWANG, I.U., LEE, D.G. Application of Natural Fiber Reinforced Composites to Trenchless Rehabilitation of Underground Pipes. *Composite Structures* 2008, 86. 285-290. ISSN 0263-8223.
38. JOHN M.J., ANANDJIWALA R.D. Recent Developments in Chemical Modifications and Characterization of Natural-Fibre Reinforced Composites. *Polymer Composites*, 2008, (29). 187-207. ISSN 1548-0569.
39. JOHN, M.J., THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers* 2008,71. 343-364. ISSN 0144-8617.
40. JORGE, L. D. A., MARQUES, A. T., De CASTRO, P. M. S. T. The Influence of Prestressing on the Mechanical Behaviour of Uni-directional Composites. *Developments*

- in the Science and Technology of Composite Materials* 1990, pp 897-902. ISBN 978-94-009-0787-4.
41. JUNKAR, I., CVELBAR, U., LEHOCKY, M.. Plasma Treatment of Biomedical Materials. *Materials and Technology* 2011, 45: 221–226. ISSN 1753-5557.
 42. KABIR, M.M., WANG, H., LAU, K.T., CARDONA, F. Effects of Chemical Treatments on Hemp Fiber Structure. *Applied Surface Science* 2013 (276): 13-23. ISSN 0169-4332.
 43. KAEWKUK, S., SUTAPUN, W., JARUKUMJORN, K. Effects of Interfacial Modification and Fiber Content on Physical Properties of Sisal Fiber/Polypropylene Composites. *Composites Part B Engineering* 2013, 42. 544-549. ISSN 1359-8368.
 44. KALIA, S., THAKUR, K., CELLI, A., KIECHEL, M.A. Surface Modification of Plant Fibers Using Environment Friendly Methods for Their Application in Polymer Composites. Textile Industry and Antimicrobial Activities: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2013, Vol. 1,(3). 97–112. ISSN 2213-3437.
 45. KERS, J., PEETSALU, P., SAARNA, M., VIKNA, A., KRUMME, A., MENIND, A. Preliminary Investigation into Tensile Characteristics of Long Flax Fibre Reinforced Composite Material. *Agronomy Research*, 2010, 8(S1). 107-114. ISSN 1406-894X.
 46. KU H., WANG H., PATTARACHAIYAKOOP N., TRADA M. A Review on the Tensile Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites: Part B* 2011, (42). 856-873. ISSN 1359-8368.
 47. Le DUGOU, A., DAVIES, P., BALEY, Ch. Interfacial Bonding of Flax Fibre/(L-Lactide) Biocomposites. *Composites Science and technology* 2010, 70. 231-239. ISSN 0266-3538.
 48. LEE, S.K., BYUN, HONG, S.H. Effect of Fiber Geometry on the Elastic Constants of the Plain Woven Fabric Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Material Science and Engineering* 2003, A 347. 346-358. ISSN 0921-5093.
 49. LIANG, Y., WANG, H., GU, X. In-Plane Shear Response of Unidirectional Fiber Reinforced and Fabric Reinforced Carbon/Epoxy Composites. *Polymer Testing* 2013, 32(3). 594–601. ISSN 0142-9418.
 50. LISTON, E.M., MARTINU, L., WERTHEIMER, M.R. Plasma Surface Modification of Polymers for Improved Adhesion: A Critical Review. *Journal of Adhesion Science Technology*, 1993, Vol. 7, No. 10. 1091-1127. ISSN 1568-5616.
 51. LU, CH., CHEN, P., YU, Q., DING, Z., ZAIWEN LIN, Z., LI, W. Interfacial Adhesion of Plasma-Treated Carbon Fiber/Poly(Phthalazinone Ether Sulfone Ketone) Composite. *Journal of Applied Polymer Science* 2007, Vol. 106, Issue 3. 1733–1741. ISSN 1097-4628.
 52. MALIK, Z.A., MALIK, M.H., HUSSAIN, T., TANWARI, A. Predicting Strength Transfer Efficiency of Warp and Weft Yarns in Woven Fabrics Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* 2010 Vol.35(4). 310-316. ISSN 0975-1025.
 53. MEDEIROS, E.S., AGNELLI, J.A.M., JOSEPH, K., CARVALHO, L.H., MATTOSO, L.H.C. Mechanical Properties of Phenolic Composites Reinforced With Jute/Cotton Hybrid Fabrics. *Polymer Composites* 2005, 26. 1-11. ISSN 1548-0569.
 54. MEMON, A., NAKAI, A. The Processing Design of Jute Spun Yarn/PLA Braided Composite by Pultrusion Molding. *Advances in Mechanical Engineering* 2013, Volume, Article ID 816513. 1-8. ISSN 1687-8140.
 55. MOHANTY A. K., MISRA M., DRZAL L. T. Sustainable Biocomposites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World. *Journal of Polymers and the Environment* 2002, 10 (1-2): 19-26. ISSN 1572-8900.

56. NISHIKAWA, M., OKABE T. Microstructure-Dependent Fatigue Damage Process in Short Fiber Reinforced Plastics. *International Journal of Solids and Structures* 2010, 47: 398–406. ISSN 0020-7683.
57. OKUTAN, B., ASLAN, Z., KARAKUZU, R. A Study of the Effects of Various Geometric Parameters on the Failure Strength of Pin-Loaded Woven Glass Fiber Reinforced Epoxy Laminate. *Composites Science and Technology* 2001, 61. 1491-1497. ISSN 0266-3538.
58. ONAL, L., ADANUR, S. Optimization of Compression Molding Process in Laminated Woven Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2005, 24(7). 775-780. ISSN 1530-7964.
59. OUAGNE, P., SOULAT, D., TEPHANY, C., MOOTHOO, J., ALLAOUI, S., HIVET, G., DURIATTI, D. Complex Shape Forming of Flax Based Woven Fabrics. Analysis of the Yarn Tensile Strain During the Process. *Key Engineering Materials*, 2012 Vols.504-506, pp.231-236. ISSN 1662-9795.
60. PANG J.W.C., FANCEY K.S. Analysis of the Tensile Behaviour of Viscoelastically Pre-Stressed Polymeric Matrix Composites. *Composite Science and Technology* 2008; 68: 1903-1910. ISSN 0266-3538.
61. PANG, J.W.C., FANCEY, K.S. The Flexural Stiffness Characteristics of Viscoelastically Prestressed Polymeric Matrix Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Vol. 40 (6–7) 2009: 784–790. ISSN 1359-835X.
62. PANTHAPULAKKAL, S., SAIN, M. Injection-Molded Short Hemp Fiber/Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Hybrid Composites. Mechanical, Water Absorption and Thermal Properties. *Journal of Applied Polymer Science* 2007, Volume 103, Issue 4. 2432–2441. ISSN 1097-4628.
63. PARK, S., BAKER, J. O., HIMMEL M. E., PARILLA P. A., JOHNSON, D. K. Cellulose Crystallinity Index: Measurement Techniques and Their Impact on Interpreting Cellulase Performance. *Biotechnology for Biofuels* 2010, 3(10) 1-10. ISSN 1754-6834.
64. PARLEVLLET, P., BERSEE, H., BEUKERS, H. Residual Stresses in Thermoplastic Composites – a Study of the Literature. Part 1: Formation of Residual Stresses. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing* 2006, 37 (11). 1847-1857. ISSN 1359-835X.
65. POTLURI, P., YOUNG, R.J. K., RASHED, A. MANAN, Y.T. Shyng Meso-scale Strain Mapping in UD woven Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2009, Volume 40, Issue 12. 1838–1845. ISSN 1359-835X.
66. PELED, A. Pre-Tensioning of Fabrics in Cement-Based Composites. *Cement and Concrete Research* 2007, 37. 805-813. ISSN 0008-8846.
67. PELED, A., BENTUR, A. Fabric Structure and Its Reinforcing Efficiency in Textile Reinforced Cement Composites. *Composites, Part A*. 2003, 34: 107-118. ISSN: 1359-835X.
68. PLACET, V., BOUALI, A. PERRÉ, P. The possible Role of Microfibril Angle of Hemp Fibre During Fatigue Tests and Its Determination Using Wide-Angle X-ray Diffraction. *Matériaux & Techniques* 2011, 99: 683–689. ISSN 1778-3771.
69. PLACET, V., CISSE, O., LAMINE BOUBAKAR, M. Nonlinear Tensile Behaviour of Elementary Hemp Fibres. Part I : Investigation of the Possible Origins Using Repeated Progressive Loading with in situ Microscopic Observations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2014, Volume 56: 319–327. ISSN 1359-835X.
70. POCIŪTĖ, M., ADOMAVIČIUS, K., STANYŠ, S. Liquid Film Instability on a Single Fiber. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2005, Vol. 11, No. 1. 84-87. ISSN 2029-7289.

71. PORWAL P.K., BEYERLEIN I.J., PHOENIX S.L. Statistical Strength of Twisted Fiber Bundles with Load Sharing Controlled by Frictional Length Scales. *Journal of Mechanics of materials and Structures* 2007, 4 (2). 773-791. ISSN 1559-3959.
72. POTHAN, L.A., MAI, Y.W., THOMAS, S., LI, R.K.Y. Tensile and Flexure Behavior of Sisal Fabric/Polyester Textile Composites Prepared by Resin Transfer Molding Technique. *Reinforced Plastics and Composites* 2008, 27 (16). 1847-1866. ISSN 1530-7964.
73. POTLURI, P., YOUNG, R.J., RASHED, K., MANAN, A., SHYNG, Y.T. Meso-scale Strain Mapping in UD Woven Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Volume 40, Issue 12, December 2009, Pages 1838–1845. ISSN 1359-835X.
74. RAQUEZA, J. M., DELÉGLISEA, M., LACRAMPEA, M.-F., KRAWCZAKA, P. Thermosetting (bio)materials Derived from Renewable Resources: A Critical Review. *Progress in Polymer Science* 35 (2010)487-509. ISSN 0079-6700.
75. REINHARDT, H.-W., KRÜGER, M., GROSS, C. Concrete Prestressed with Textile Fabric. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2003, 3. 231-239. ISSN 1347-3913.
76. ROBIN, J. J., BRETON, Y. Reinforcement of Recycled Polyethylene with Wood Fibers Heat Treated. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2001, 20(14). 1253-1262. ISSN 1530-7964.
77. SABEEL AHMED, K., VIJAYARANGAN, S., NAIDU, A.C.B. Elastic Properties, Notched Strength and Fracture Criterion in Untreated Woven Jute–Glass Fabric Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Materials and Design* 2007 (28). 2287-2294. ISSN 0261-3069.
78. SANTULLI, C. Mechanical and Impact Properties of Untreated Jute Fabric Reinforced Polyester Laminates Compared with Different E-Glass Fibre Reinforced Laminates. *Science and Engineering of Composite Materials* 2000, 9 (4). 177-188. ISSN 2191-0359.
79. SCHLICHTING, L.H., CALDEIRA DE ANDRADA, M.A., VIEIRA, L.C.C., MARIZ de OLIVEIRA BARRA, G., MAGNE, P. Composite Resin Reinforced With Pre-Tensioned Glass Fibres. Influence of Pre-Stressing on Flexural Properties. *Dental Materials* 2010, 26. 118-125. ISSN 0109-5641.
80. SEVER, K., ERDEN, S., GÜLEC, H.A., SEKI, Y., SARIKANAT, M. Oxygen Plasma Treatments of Jute Fibers in Improving the Mechanical Properties of Jute/HDPE Composites. *Material Chemistry and Physics* 2011, 129. 275-280. ISSN 0254-0584.
81. SLOPEK, R., CONDON, B., SAWHNEY, P. Effect of Cotton Pectin Content and Bioscouring on Alkyl-Dimethyl-Benzyl-Ammonium Chloride Adsorption. *Textile Research Journal* Vol. 82 (17) 2012: 1743-1750. ISSN: 1746-7748.
82. Van de VELDE, K., KIEKENS, P. Effect of Material and Process Parameters on the Mechanical Properties of Unidirectional and Multidirectional Flax/Polypropylene Composites. *Composite Structures* 2003, (62). 443-448. ISSN 0263-8223.
83. Van de VELDE, K., KIEKENS, P. Thermoplastic Pultrusion of Natural Fibre Reinforced Composites. *Composite Structures* 2001, Vol. 54, Issues 2–3. 355–360. ISSN 0263-8223.
84. Van de WEYENBERG, I., IVENS, J., de COSTER, A., KINO, B., BAETENS, E., VERPOEST, I. Influence of Processing and Chemical Treatment of Flax Fibres on Their Composites. *Composites Science and Technology*, 2003, Vol. 63 (9). 1241–1246. ISSN 0266-3538.

85. VARGAS ROJAS, E., CHAPELLE, D., PERREUX, D., DELOBELLE, THIEBAUD, B. F. Unified Approach of Filament Winding Applied to Complex Shape Mandrels. *Composite Structures* 116, 2014: 805–813. ISSN 0263-8223.
86. VIRK, R.K., RAMASWAMY, G.N., BOURHAM, M., BURES. B.L. P. Plasma and Antimicrobial Treatment of Nonwoven Fabrics for Surgical Gowns. *Textile Research Journal* 2004, 74: 1073-1079. ISSN 1746-7748.
87. WAMBUA, P., IVENS, J., VERPOEST, I. Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics? *Composites Science and Technology* 2003, 63 (9): 1259-1264. ISSN 0266-3538.
88. WANG, G., CHEN, F., CHENG, H., LI, L. Interactive Effect Between Warp and Weft of a Woven Ramie Fabric Under Biaxial Loadings. *The Journal of The Textile Institute* 2012, 103(3) 283-291. ISSN 1754-2340.
89. WIKBERG, H., MAUNU, S. L. Characterisation of Thermally Modified Hard- and Softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydrate Polymers* 2004, 58(4). 460-466. ISSN 0144-8617.
90. WILLEMS, A., LOMOV, S.V., VERPOEST, I., VANDEPITTE, D. Optical Strain Fields in Shear and Tensile Testing of Textile Reinforcements. *Composites Science and Technology* 2008, 68: 807–819. ISSN 0266-3538.
91. WONG, K.K., TAO, X.M., YUEN, C.W.M., YEUNG, K.W. Effect of Plasma and Subsequent Enzymatic Treatments o Linen Fabrics. *Coloration Technology*, 2000, Volume 116, Issue 7-8. 208–214. ISSN 1478-4408.
92. XIE, Y., HILL, CALLUM A.S., XIAO, Z., MILITZ, H., MAI, C. Silane Coupling Agents Used for Natural Fiber/Polymer Composites: A Review. *Composites: Part A* 2010, (41). 806-819. ISSN 1359-835X.
90. ZHAO, J., et al. Polypropylene Matrix Composites Reinforced with Pre-Stressed Glass Fibers. *Polymer Composites* 1998, Vol. 19(3): 218–224. ISSN 1548-0569.

Straipsniai iš mokslo darbų rinkinių, konferencijų medžiagos rinkinių:

1. LICHTENEGGER, H., REITERER, A. STANZL-TSCHEGG S. E. MÜLLER, M., PARIS, O., FRANZL, P. Cellulose Orientation in the Wood Cell Wall. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wood Machining*. Christian Doppler laboratory, University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria. 2000. pp. 31.
2. MORLIN, B., CZIGÁNY, T. Investigation of the Surface Adhesion of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites with Acoustic Emission Technique. *Proceeding of the 8th Polymers for Advanced Technologies International Symposium* 2005.
3. ROWELL, R.M., PRASAD, P.N., MARK, J.E., KENDIL, S.H., KAFABI Z.H. Property Enhanced Natural Fiber Composite Material Based on Chemical Modification, in *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*. Plenum Press, New York, 1998. 717-732.
4. STICKLER, P.B. Composite Materials for Commercial Transport - Issues and Future Research Direction. *Proceedings of the American Society for Composites 17th Technical Conference*, West Lafayette, IN, Oct. 21-24, 2002.
5. SUDELL, B.C. Industrial Fibres: Recent and Current Developments. *Proceedings of the Symposium on Natural Fibres* 2009. pp. 71-82.
6. TSAI, S.W. Composite Materials: Testing and Design. *5th Conference on Composite Materials: Testing and Design, New Orleans (COR) STP 674*, Baltimore, Md., 1979, pp. 689.

7. WAN, Y. Q. and KO, F. K. Hierarchical Structure and Mechanical Properties of Bamboo Fibrils. *ICCM 17*, Edinburgh, UK, 2009. pp. 1-9.

Elektroniniai leidiniai:

1. Laminated plastics. Flight 1944: pp. 700-701 [žiūrėta 2010-12-13].
<https://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1944/1944%20-%201344.html>
2. Plasteurope.com, RESEARCH: „Glycix“ Bioplastic Is Claimed To Be First Biodegradable Thermoset / Development Project at University of Amsterdam / Material Dissolves in Water. 29.05.2014 [žiūrėta 2014-10-10].
http://www.plasteurope.com/news/RESEARCH_t228385
3. WEAGER, B. High-performance biocomposites: Novel Aligned Natural Fibre Reinforcements. *JEC Composites Magazine*, 2010, (55) 36-37 [žiūrėta 2011-02-20].
<http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/high-performance-biocomposites-novel-aligned-natural-fibre-reinforcements>.

Elektroniniai straipsniai duomenų bazėse:

1. DEGENNES, P. G. Soft Matter (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition in English*. Volume 31, Issue 7, 1992. pp. 842–845. Prieiga per doi: 10.1002/anie.199208421.
2. SFILIGOJ SMOLE, M., HRIBERNIK, S., STANA KLEINSCHKE, K., KREŽE, T. Plant Fibres for Textile and Technical Applications. *InTech, Advances in Agrophysical Research* 2013, 15. 369-398. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.5772/52372>.

Patentiniai dokumentai:

1. WARNKEN ELMER, P (US). Rotor Blade and Method of Making Same. US2844354 A, 1958 07 22, Cincinnati Testing & Res Lab [žiūrėta 2010-11-15]. Prieiga per internetą:
https://www.google.lt/?gws_rd=cr,ssl&ei=Kj3bVa7NI4P9yQOUtZzYQC#q=WARNKEN+ELMER%2C+P.+Rotor+Blade+and+Method+of+Making+Same.+US2844354+A%2C+1958+07+22.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Thomson Reuters Web of Science pagrindinių žurnalų sąrašo leidiniuose

1. Bekampienė, Paulė; Domskienė, Jurgita; Širvaitienė, Anne. The Effect of Pre-Tension on Deformation Behaviour of Natural Fabric Reinforced Composite // Materials science = Medžiagotyra / Kaunas University of Technology, Academy of Sciences of Lithuania. Kaunas : Technologija. ISSN 1392-1320. 2011, Vol. 17, no. 1, p. 56-61. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; 0,471].
2. Širvaitienė, Anne; Jankauskaitė, Virginija; Bekampienė, Paulė; Kondratas, Alvydas. Influence of Natural Fibre Treatment on Interfacial Adhesion in Biocomposites // Fibres and Textiles in Eastern Europe. Lodz : Institute of Chemical Fibres. ISSN 1230-3666. 2013, Vol. 21, no. 4(100), p. 123-129. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); 0,354].
3. Širvaitienė, Anne; Jankauskaitė, Virginija; Bekampienė, Paulė; Norkaitis, Jonas. Vegetable Fiber Pre-Tensioning Influence on the Composites Reinforcement // Polymer Composites. Hoboken : Wiley-Blackwell. ISSN 0272-8397. 2013, Vol. 34, iss. 9, p. 1533-1537. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); 0,354].

Kituose Thomson Reuters Web of Science duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose [Proceedings ir kt.]

1. Širvaitienė, Anne; Jankauskaitė, Virginija; Bekampienė, Paulė; Sankauskaitė, Viktorija. Efficiency of Chemical Treatment on Vegetable Fibre-Reinforced Biocomposites Properties // Polymer chemistry and technology : proceedings of scientific conference Chemistry and Chemical Technology, Kaunas University of Technology, 25 April 2012 / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija. ISSN 2029-2457. 2012, p. 67–71. [Conference Proceedings Citation Index; 0,250].
2. Širvaitienė, Anne; Jankauskaitė, Virginija; Bekampienė, Paulė; Sankauskaitė, Audronė. The influence of Yarn Treatment on the Tensile Properties of Biocomposites // 6th International Conference on Times of Polymers (TOP) and Composites, 10-14, June, 2012, Ischia, Italy : conference proceedings. Melville, New York : AIP, 2012. (AIP conference proceedings, Vol. 1459, ISSN 0094-243X). ISBN 9780735410626. p. 235–237. [Conference Proceedings Citation Index; 0,250].

Konferencijų pranešimų medžiagoje

1. Dargienė, Jovita; Širvaitienė, Anne; Bekampienė, Paulė; Domskienė, Jurgita; Jankauskaitė, Virginija. Relaxation analysis of pre-tensioned natural fabric reinforced composite // Mechanika 2013 : proceedings of the 18th international

conference, 4, 5 April 2013, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas : Technologija. ISSN 1822-2951. 2013, p. 62-65. [0,200].

MOKSLINIŲ KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

a) tarptautinės:

1. Materials Engineering'2011, 2011 spalio 27–28 d., Kaunas, Lietuva.
2. Times of Polymers and Composites, 2012 birželio 10–14 d., Iskija, Italija.
3. Mechanika '2013, 2013 balandžio 4–5 d., Kaunas, Lietuva.
4. Baltic Polymer Symposium 2013, 2013 rugsėjo 18–21 d., Trakai, Lietuva.
5. 1st International Conference on Mechanics of Composites, 2014 birželio 9–12 d., Stony Brook, JAV.

b) respublikinės

6. Chemija ir cheminė technologija, 2012 balandžio 25 d., Kaunas, Lietuva.
7. Medžiagų inžinerija'2012, 2012 lapkričio 16 d., Kaunas, Lietuva.
8. LMT doktorantų stažuočių užsienio mokslo centruose 2012–2013 m. konferencija, 2013 spalio 11 d., Vilnius, Lietuva.
9. Medžiagų inžinerija 2013, 2013 lapkričio 15 d., Kaunas, Lietuva.

SL344. 2016-01-11, 10,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 10 egz. Užsakymas 3.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas