



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

Modestas Skužinskas

**JUODŲJŲ SUODŽIŲ KIEKIO ĮTAKA SUKAMUOJU
FORMAVIMU GAUTŲ POLIETILENO GAMINIŲ
MECHANINĖMS SAVYBĖMS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. V. Jankauskaitė

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**JUODŲJŲ SUODŽIŲ KIEKIO ĮTAKA SUKAMUOJU
FORMAVIMU GAUTŲ POLIETILENO GAMINIŲ
MECHANINĖMS SAVYBĖMS**

Baigiamasis magistro projektas
Plastikų inžinerija (kodas 621J40001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Virginija Jankauskaitė
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Tadas Klveckas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Modestas Skužinskas
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MECHNIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

MODESTAS SKUŽINSKAS

(Studento vardas, pavardė)

PLASTIKU INŽINERIJA, 621J40001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Juodųjų suodžių kiekio įtaka sukamuoju formavimu gautų polietileno gaminių mechaninėms savybėms“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Modesto Skužinsko**, baigiamasis projektas tema „Juodųjų suodžių kiekio įtaka sukamuoju formavimu gautų polietileno gaminių mechaninėms savybėms“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

ĮVADAS.....	7
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	8
2. TYRIMO METODOLOGIJA.....	20
2.1 Tyrimo medžiagos	20
2.3 Mechaninių savybių nustatymo metodikos.....	22
2.4 Lydalo takumo nustatymo metodika.....	26
2.5 Modeliavimo baigtinių elementų metodu metodika	27
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	30
3.1 Juodųjų suodžių įtaka LLDPE mechaninėms savybėms	30
3.2 Juodųjų suodžių kiekio įtaka LLDPE reologinėms savybėms.....	36
3.3 Užpildo įtaka gaminių įtempių ir deformacijų būviui	37
4 IŠVADOS.....	40
LITERATŪRA	41
PRIEDAI	44
1 PRIEDAS KOMPOZICIJŲ MECHANINIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO REZULTATAI	45
2 PRIEDAS KOMPOZICIJŲ REOLOGINIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO REZULTATAI	51
3 PRIEDAS NAUDOTŲ MEDŽIAGŲ CHARAKTERISTIKOS.....	54

Skužinskas, Modestas. Juodųjų suodžių kiekio įtaka sukamuoju formavimu gautų polietileno gaminių mechaninėms savybėms. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Virginija Jankauskaitė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Medžiagų inžinerijos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, Plastikų inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *Polietilenas, LLDPE, sukamsis formavimas, mechaninės savybės, lydalo takumo indeksas (MFI), Baigtiniai elementai (BEM).*

Kaunas, 2017. 56 p.

SANTRAUKA

Sukamasis formavimas naudojamas tuščiaviduriams plastikiniams gaminiams formuoti. Šiuo metodu galima suformuoti gana didelio tūrio ($>2 \text{ m}^3$) vientisus gaminius (talpas, pontonus, baidares, lauko baldus, ir pan.), pasižyminčius labai mažomis vidinių įtempių vertėmis. Sukamuoju formavimu dažniausiai gaminiai formuojami iš linijinio mažo tankio polietileno (LLDPE). UAB „ENEKA“ sukamuoju formavimo metodu iš LLDPE gamina požemines talpas ir šulinio dangčius.

Rinkoje didžiausią paklausą turi juodos spalvos šios kompanijos gaminiai. Šiai spalvai suteikti kompanija naudoja aktyvų užpildą – juoduosius suodžius, kurie su LLDPE milteliais sumaišomi didelių sąnaudų nereikalaujančiu „sausuoju“ metodu. Kompozicijos sudėtis parenkama pagal egzistuojančių tokio tipo gaminiams standartų reikalavimus, tačiau pakankamai dažnai suformuoti gaminiai turi defektus: įdubas, įtrūkas, pūsles, dėl juodųjų suodžių polinkio agreguotis ir aglomeruotis. Todėl šio *darbo tikslas* – nustatyti efektyvų juodųjų suodžių kiekį LLDPE kompozicijose, kuriam esant sukamuoju formavimu gauti gaminiai neturėtų defektų ir pasižymėtų geromis eksploatacinėmis savybėmis. Tuo tikslu buvo tirta užpildo įtaka gaminių mechaninei elgsenai bei reologinėms savybėms. Gauta, kad geriausiomis mechaninėms savybėmis ir pakankamu atsparumu įvairioms išorinėms apkrovoms pasižymi LLDPE gaminiai, kuriose juodųjų suodžių kiekis neviršija 1 m.d.. Esant šiam užpildo kiekiui mechaninės savybės pagerėja $> 10\%$. Požeminės talpos eksploatacijos sąlygų modeliavimas parodė, kad 1 m.d. juodųjų suodžių padidina LLDPE talpos atsparumą klūpdymui – atsargos koeficientas klūpdymui išauga 1,5 karto.

Darbas buvo atliktas UAB „ENEKA“ užsakymu.

Skužinskas, Modestas. Carbon Black Loading Influence on the Mechanical Properties of Rotational Moulded Polyethylene Products. Master final project/ supervisor prof. dr. Virginija Jankauskaitė; Kaunas University of Technology The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Material Engineering.

Research area and field: Technological Sciences, Plastics Engineering

Key words: *Polyethylene, LLDPE, Rotational moulding, mechanical properties, melt flow index, final element analysis (FEA)*

Kaunas, 2017. 56 p.

SUMMARY

Rotational moulding is used to obtain hollow plastic products. By this method it is possible to obtain relatively large volume ($> 2 \text{ m}^3$) one – piece plastic products (tanks, pontoons, kayaks, outdoor furniture, etc.) with low internal stress values. Linear low density polyethylene (LLDPE) is most popular material to be used in rotational moulding process. This method is widely used in company UAB „ENEKA“ for molding LLDPE underground tanks, manhole covers. Black colored products are the most popular in the market. For this purpose an active filler – black carbon is used. It is mixed with pure LLDPE powder by dry blending method. The LLDPE composition formulations for rotational moulded products is selected according to existing standards. However, very often moulded parts has defects, such as recesses, cracks, blisters, which are caused by black carbon susceptibility to aggregation and agglomeration. The *aim of this work* – to determine effective black carbon amount in LLDPE composition for manufacturing of rotational molded products without defects and high mechanical properties. It was determined that LLDPE behavior under tensile, flexural and compressive loading and rheological properties of depend on the black carbon content. Effective filler content is not higher than 1 ppm. In this case the increase in 10 % of mechanical properties is obtained. Simulation of performance conditions for underground tanks showed that 1 ppm of black carbon increases LLDPE tanks resistance to buckling and safety factor increases in 1.5 times.

The work was carried out by order UAB „ENEKA“.

ĮVADAS

Sukamasis formavimas yra tuščiavidurių plastiko gaminių gamybos metodas. Pastaruoju metu šis formavimo metodas vis plačiau naudojamas gerų mechaninių savybių inžinerinės paskirties plastiko gaminiams (kuro talpoms, kt.) gauti. Sukamuojų formavimu plastiko gaminiai dažniausiai formuojami iš įvairios struktūros polietileno.

Linijinis mažo tankio polietilenas (LLDPE) dažniausiai naudojamas tokiems plastikiniams gaminiams, kaip požeminės ir antžeminės talpos, lauko baldai, dekoracijos, pontonai, baidarės, valtys ir pan., gauti sukamojo formavimo metodu. Gaminių fizikines savybes galima keisti modifikuojant LLDPE įvairiais priedais, pavyzdžiui užpildais. Užpildai gali būti naudojami ne tik medžiagos savybėms reguliuoti, bet ir atlikti pigmento funkciją, suteikiant gaminiui norimą spalvą. Juodieji suodžiai dažnai naudojami kaip aktyvusis užpildas polimerinėse kompozicijose, skirtose gaminiams gaminti sukamuojų formavimu. Šis užpildas gaminiui suteikia juodą spalvą, padidina stiprumą bei atsparumą ultravioletiniams spinduliams, bet mažina jų smūginį tūsumą (plastikas tampa trapesnis). Įmaišius didesnę juodųjų suodžių kiekį LLDPE kompozicijose, jų dalelės pradeda jungtis į agregatus ir aglomeratus, kurie gali būti defektų susidarymo priežastimi. Todėl sukamuojų formavimu gautų gaminių paviršiuje atsiranda įtrūkų, įdubos ar kiti defektai.

Šio darbo tikslas – nustatyti juodųjų suodžių kiekio įtaką linijinio mažo tankio polietileno mechaninei elgsenai ir reologinėms savybėms bei parinkti užpildo efektyvų kiekį polimero kompozicijoje, kuriam esant sukamuojų formavimu gauti gaminiai neturėtų defektų ir pasižymėtų geromis eksploatacinėmis savybėmis.

Darbo tikslui pasiekti, reikia atlikti šiuos **uždavinius**:

- nustatyti juodųjų suodžių kiekio įtaką LLDPE mechaninėms savybėms tempiant, lenkiant ir gniuždant;
- nustatyti juodųjų suodžių kiekio įtaką LLDPE reologinėms savybėms;
- įvertinti sukamuojų formavimu gautų gaminių įtempių ir deformacijų būvį bei atsparumą eksploatacinėms apkrovoms, esant skirtingoms kompozicijoms.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

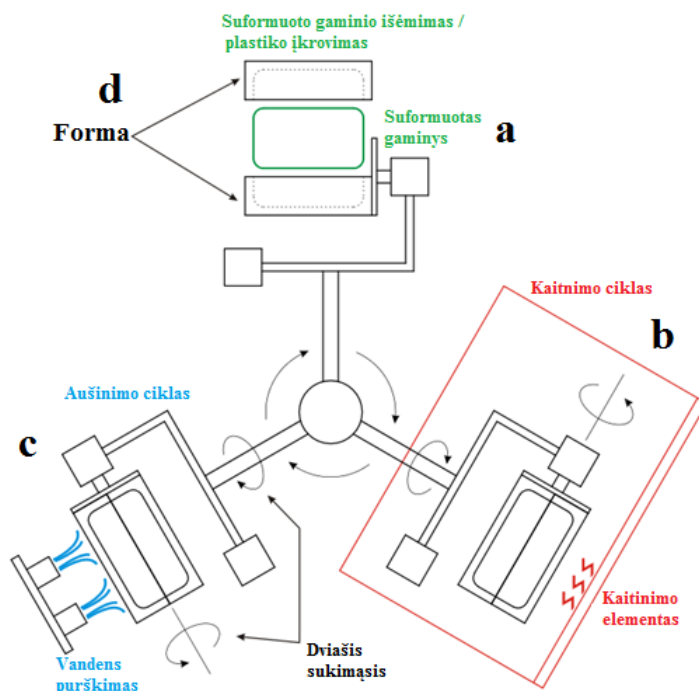
Plastiko sukamasis formavimas (*angl.* rotational molding, rotomolding, rotocasting) yra tuščiavidurės formos gaminių gamybos būdas [1]. Nors tokios formos gaminiams gali būti naudojami kiti formavimo metodai (terminis formavimas, formavimas pūtimu), tačiau sukamasis formavimas turi tam tikrų privalumų. Vienas jų – šiuo metodu pagaminti gaminiai pasižymi labai mažomis vidinių įtampių vertėmis, metodas yra nebrangus, galima pagaminti stambiagabaričius (>2 m³) gaminius [3]. Dažniausiai šiuo metodu yra gaminamos didelės talpyklos, tačiau sukamasis formavimas taip pat gali būti naudojamas gaminant žaislus, medicininės paskirties gaminius, gaminius laisvalaikiui, arba gaminius, kuriems užkeliami dideli estetiniai reikalavimai (1.1 pav.) [1].



1.1 pav. Sukamojo formavimo būdu gautų gaminių pavyzdžiai [13]

Šis plastiko gaminių formavimo metodas tampa vis populiariesnis, pritaikant vis platesnį medžiagų asortimentą [1]. Sukamojo plastikų formavimo metodo principas yra nesudėtingas [3]. Pagrindinės įrangos dalys yra: besisukantis velenas, ant kurio montuojama forma, kaitinimo krosnis ir aušintuvas. Procesas pradedamas, kuomet į formą yra įdedamas reikiamas plastiko kiekis. Tai gali būti plastiko milteliai, granulės ar klampus skystis. Po to forma nedideliu greičiu pradeda sukėti arba vartyti dviem viena kitai statmenomis kryptimis. Tuo pačiu metu ji yra kaitinama tol, kol ant sienelių susiformuoja reikiamo storio tolygus monolitinis polimero sluoksnis, atkartojantis vidinę sienelių formą. Po to forma patenka į vėsinimo zoną. Šioje zonoje forma taip pat sukasi apie dvi ašis, norint, kad plastiko gaminys sukietėtų ir išlaikytų jam suteiktą formą. Plastikui pakankamai

sukietėjus, įrenginys yra sustabdomas ir gaminys išimamas iš formos. Po šios stadijos procesas vėl kartojamas [3]. Principinė sukamojo formavimo proceso schema yra parodyta 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Sukamojo formavimo technologinė schema: *a* – pakrovimas, *b* – kaitinimas, *c* – aušinimas, *d* – gaminio išėmimas

1.1 lentelėje yra pateikiamas sąrašas gaminių, ir jų naudojimo sritys, kurių gamybai yra naudojamas sukamojo formavimo metodas. Lentelėje išvardintų gaminių gamybai naudojami labai įvairūs formos dviašio sukimosi greičiai: nuo centrifugavimo iki mažų greičių, tesiekiančių $4-20 \text{ min}^{-1}$ priklausomai nuo gaminio formos [1, 3].

1.3 lentelėje palyginimui yra pateikiami plastikų gamybos metodai, kurių metu galima pagaminti vientisus tuščiavidurius gaminius [3].

Sukamuojų formavimu dažniausiai naudojami perdirbami termoplastai, pvz.: poliolefinai, o reaktoplastai naudojami retai. Palyginimui 1.3 paveiksle yra pateikiama sukamajam formavimui naudojamų pagrindinių medžiagų tipai [3]. Didžiąsą dalį plastikų sukamajame formavime sudaro įvairios struktūros polietilenas. Plačiausiai iš šio tipo plastikų naudojamas linijinės struktūros didelio tankio polietilenas (LLDPE). Taip pat yra naudojamos ir kitos medžiagos: polivinilchlorido (PVC) plastizolis, polikarbonatas polipropilenas, epoksido dervos, poliamidas, polistirenas, poliuretanas, akriliniai polimerai, silikonas, ABS plastikai ir kiti [3]. Parenkant plastikus sukamajam formavimui pagrindinis jiems keliamas reikalavimas yra jų atsparumas ilgalaikiam temperatūros poveikiui [1].

1.1 lentelė. Sukamojo formavimo būdu gautų gaminių asortimentas ir panaudojimo sritys [3]

<i>Talpos</i>
Sterilios talpos, talpos naftos produktams, kurui, cheminių medžiagų laikymui, vandens talpyklos, talpos laivininkystės pramonei
<i>Automobilių pramonė</i>
Durelių atramos rankoms, automobilių eismo ribotuvai važiuojamojoje kelio dalyje, degalų talpos, dėklai instrumentam, ratlankiai
<i>Konteineriai</i>
Daugkartinio naudojimo konteineriai, statinės, konteineriai lėktuvams, šaldymo dėžutės
<i>Žaislai ir poilsio reikmenys</i>
Žaisliniai namai, kamuoliai, lauko baldai, žaislai (arkliukai), lėlių galvos ir atskiros kūnų dalys
<i>Aptarnavimo sfera</i>
Paletės, nešiojamos dėžės paramedikams, pakuotės, dėžutės žuviai, šiukšlių dėžės
<i>Laivininkystės pramonė</i>
Gelbėjimosi diržai, baidarės, valtys, švartavimosi sijos, baseinų skiriamosios juostos, plūdės
<i>Kita</i>
Stovai valymo reikmenims, kanalizacijos dangčiai, įrankių dėžutės, stomatologų kėdės, žemės ūkio/sodo įranga

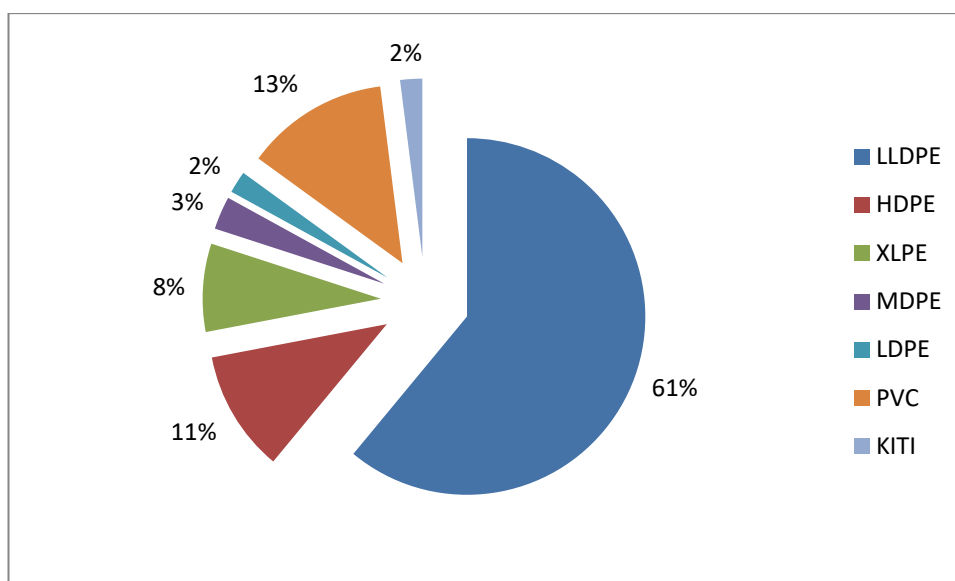
Kaip ir kiekvienas metodas, taip ir sukamasis formavimas turi tam tikrų privalumų ir trūkumų. Jie yra išvardinti 1.2 lentelėje [3].

1.2. lentelė. Sukamojo formavimo privalumai ir trūkumai [3]

Privalumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> • vienu metu gali būti gaminamos didelės detalės be sujungimo linijų ar jų jungimo koku kitu būdu; • gaminyje susidaro tik labai nedideli vidiniai įtempiai; • nebrangus gamybos būdas; • trumpa formos gamybos trukmė; • trumpa įrenginio paleidimo trukmė; • beatliekinė gamybos technologija; • yra galimybė gaminti daugiasluoksnius gaminius; • tuo pačiu metu galima gaminti skirtingus gaminius. 	<ul style="list-style-type: none"> • ilga gamybos trukmė; • ribotas medžiagų asortimentas; • santykinai brangios medžiagos (naudojami specialūs priedai, medžiaga turi būti labai gerai susmulkinta); • sunku pagaminti kai kurių geometrinių parametrų gaminius (pavyzdžiui, įvairias iškyšas)

1.3 lentelė. Formavimo pučiant, terminio formavimo ir sukamojo formavimo metodų palyginimas [3]

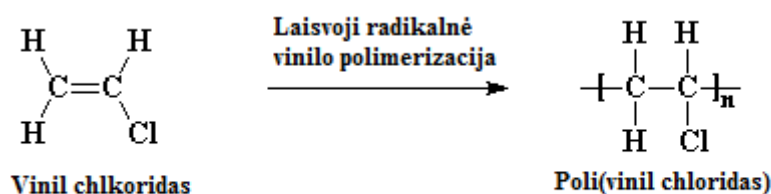
Parametras	Pučiamasis formavimas	Terminis formavimas	Sukamasis formavimas
Galimas maksimalus formuojamas tūris, cm ³	10 ¹ – 10 ⁶	5 – 100	10 ¹ – 10 ⁸
Žaliavos paruošimo kaštai	0	≥100%	≥100%
Plastiko sustiprinimas pluoštu	Taip	Taip	Taip, sunkiai pasiskirsto
Formos medžiaga	Plienas/aliuminis	Aliuminis	Plienas/aliuminis
Slėgis formoje	<1 MN/m ²	<0,3 MN/m ²	<0,1 MN/m ²
Gaminio sienlės storio tolerancija	10 – 20 %	10 – 20 %	10 – 20 %
Įdėtinės detalės	Įmanoma	Ne	Taip
Įtempiai gaminyje	Vidutiniai	Dideli	Maži
Paviršiaus kokybė	Labai gera	Gera, su papildomu slėgiu	Vidutinė
Grafiniai elementai	Taip	Įmanomi	Taip
Ciklo laikas	Greitas	Greitas	Lėtas
Darbo našumas	Mažas	Vidutinis	Didelis



1.3 pav. Sukamajame formavime naudojamos plastikų tipai ir jų kiekiai [3]

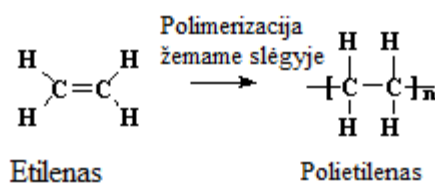
Vieni iš pirmųjų, apie 1950 metus, sukamuoju formavimu pradėti gaminti gaminiai (lėlės galvos ir kiti žaislai) iš skysto polivinilchlorido (PVC) plastizolio [12]. PVC iš prigimties yra standus ir kietas plastikas dėl vyraujančios chloro ir vandenilio atomų tarpusavio sąveikos, todėl norint gauti elastingą ir nedidelio kietumo plastiką yra naudojami plastifikatoriai [13, 15].

Dažniausiai naudojami ftalatai, kaip dimetilftalatas, dibutilftalatas, kt. [14]. Priklausomai nuo plastifikatoriaus tipo, PVC savybes galima keisti nuo lankstaus ir minkšto iki pusiau kieto ir standaus, nuo Šoras 60 A iki Šoras 65 D kietumo [17]. PVC taip pat yra nedegus, atsparus šarmams, rūgštims, druskų tirpalams, gerų dielektrinių savybių, lengvai sterilizuojamas. PVC plastizoliai sukamajame formavime naudojami skystame pavidale, todėl skirtingai nei polietileno milteliai, formos sieneles padengia tuomet, kai pasiekama želatinizacijos temperatūra [16].



1.4 pav. Polivinilchlorido (PVC) polimerizacija [15]

Plačiausiai naudojamas plastikas sukamajame formavime yra polietilenas, kuris yra inertiškas, pasižymintis cheminiu patvarumu, atsparus vandeniui ir vandens garams, turintis dielektrinių savybių. Prie žemesnių temperatūrų atsparus druskos, sieros, fluoro vandenilio rūgščių, šarmų ir daugelio kitų tirpiklių, kuriuose iš dalies tirpsta, esant 70 – 80 C° [18]. Šis plastikas yra tinkamas perdirbimui, nes yra termoplastikas [2]. Polietilenas gaunamas etileno ir olefinų monomerų polimerizacijos žemame slėgyje (1.5 pav.) [19]. Kaip matome iš struktūros etilenas panašus į vinilchloridą, tik vietoj chloro atomo stovi vandenilio atomas.



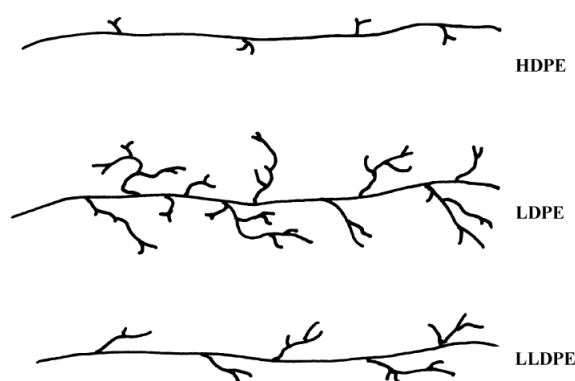
1.5 pav. Polietileno (PE) polimerizacija žemame slėgyje [19]

Polietilenas gali būti skirtingo tankio ir struktūros, t. y. šakotumo (1.4 lentelė ir 1.6 pav.) [1, 5]. Mažo tankio polietileno (LDPE) polimerinės grandinės turi didelį šakotumą. Linijinis mažo tankio polietileno (LLDPE), lyginant su LDPE, polimerinės grandinės yra ilgesnės su mažomis atšakomis. Todėl šios ilgos grandinės gali persislinkti viena kitos atžvilgiu tempiant. LLDPE turi didesnį stiprį tempiant ir plastiškumą. Didelio tankio polietileno (HDPE) grandinių šakotumas mažas, grandinės „susipakavusios“ šalia viena kitos, todėl šiam polimerui būdingas didesnis tankis, stipris, tačiau

mažesnis plastiškumas, lyginant su LLDPE [20]. Tokiu būdu, polietileno struktūra turi įtakos mechaninėms savybėms (stipriui, plastiškumui, Jungo moduliui lenkiant, kt. [4].

1.4 lentelė. Polietileno grupės pagal tankį [1, 22]

Polietileno struktūra	Tankis, kg/m ³
Mažo tankio polietilenas (LDPE)	910 – 925
Linijinis mažo tankio polietilenas (LLDPE)	915 – 940
Vidutinio tankio polietilenas (MDPE)	930 – 940
Didelio tankio polietilenas (HDPE)	941 – 965



1.6 pav. Skirtingų tipų PE struktūra [4]

Norint pagerinti plastikų mechanines savybes yra naudojami įvairūs užpildai. Jie padidina plastiko Jungo modulį, kietumą, stiprį ir k.t. Dažniausia kuo mažesnė užpildo frakcija, tuo didesnė jo įtaka mechaninėms savybėms. Be to, užpildo įtaka taip pat labai priklauso nuo dalelės formos, cheminės prigimties ir jo grynumo. Be visa kita, užpildai gali sumažinti medžiagos kainą [1]. Poliolefinams dažniausiai yra naudojami dviejų tipų užpildai [1]:

❖ **Dispersiniai:**

- kalcio karbonatas
- kaolinas
- talkas
- bario sulfatas
- stiklas

❖ **Pluoštiniai:**

- stiklo pluoštas
- agavos pluoštas
- lignoceliuliozė.

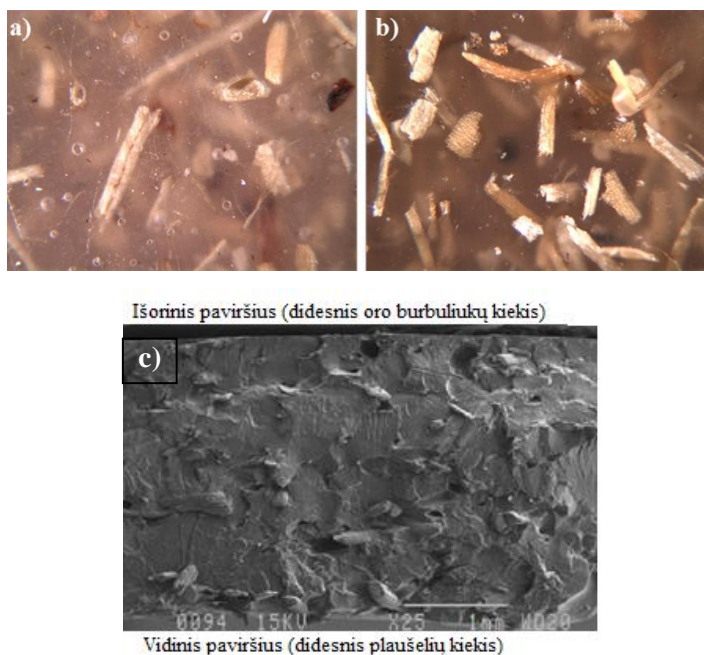
Amorfiniams plastikams, norint padidinti jų kietumą, gali būti naudojami ir gumos užpildai. Pavyzdžiui, butadienakrilnitrilas naudojamas PVC plastiko kompozicijose, etilenpropilenas – polipropileno kompozicijose. Šie užpildai modifikuoja medžiagos plastines savybes [1].

1.5 lentelėje yra pateikti užpildai, naudojami HDPE kompozicijose, skirtose formuoti gaminius sukamuoju formavimu [6]. Iš rezultatų matyti, jog visi naudoti užpildai padidina Jungo modulio ir stiprio vertes, tačiau ženkliai sumažina ištįsą ir smūginį tąsumą (išskyrus stiklo pluoštą), t. y. padidina HDPE kompozito trapumą [6].

1.5 lentelė HDPE mechaninių savybių verčių kitimas, įmaišius įvairius užpildus [6]

Užpildas	Stipris	Jugo modulis	Ištįsa	Smūginis tąsumas
Kalcio karbonatas (CC)	~+25 %	~+10 %	~-73 %	~-73 %
Stiklo pluoštas (FG)	~-5 %	~+ 50 %	~-73 %	~+33 %
Lignoceliuliozė (LC)	~+25 %	~+ 320 %	~-73 %	~-73 %

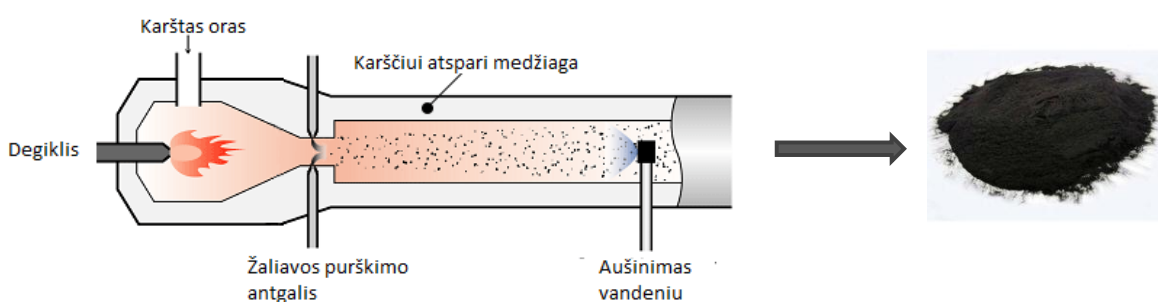
Kitas natūralus užpildas – agavos pluoštas, buvo įmaišytas į linijinio vidutinio tankio polietileno (LMDPE) kompoziciją, formuojamą sukamuoju būdu [8]. Šiuo atveju buvo gauta silpna polimerinės matricos ir pluošto adhezinė sąveika, o susidarę agregatai ir aglomeratai turėjo įtakos kompozito mechaninėms savybėms ir paviršiaus kokybei. 1.7 pav. yra parodyti suformuoto sukamuoju formavimu LMDPE išorinio paviršiaus, kontaktavusio su formos paviršiumi ir vidinio paviršiaus, vaizdai.



1.7 pav. LDMPE ir agavos pluošto kompozito struktūra: a – išorinio paviršiaus; b – vidinio paviršiaus; c – vidinio ir išorinio paviršiaus [8]

Išoriniame plastiko paviršiuje matyti oro burbuliukai, kurių pašalinimui trukdo agavos pluoštas [8]. Vidiniame paviršiuje agavos pluoštas formavimo metu susikoncentravo paviršiuje [8]. LMDPE kompozito su 10 % agavos pluošto Jungo modulis tempiant padidėjo 60 %, o lenkant – 10 %. Toliau didinant agavos pluošto kiekį Jungo modulio vertės mažėja, nes užpildas netolygiai pasiskirsto polimerinėje matricoje [8].

Vienas iš plačiausiai naudojamų užpildų plastikų užpildymui ir juodos spalvos suteikimui yra juodieji suodžiai. Dažniausiai naudojami krosninio tipo juodieji suodžiai, gauti nepilno sudeginimo krosnyje metu, deginant naftos produktus (degutą, anglies dervą, etileno dervą ir augalinės kilmės aliejus) [21]. Juodųjų suodžių dalelės yra polikristalinės struktūros, joms būdingas didelis paviršiaus ploto ir tūrio santykis [21].



1.8 pav. Krosninio tipo juodųjų suodžių gamybos schema [26]

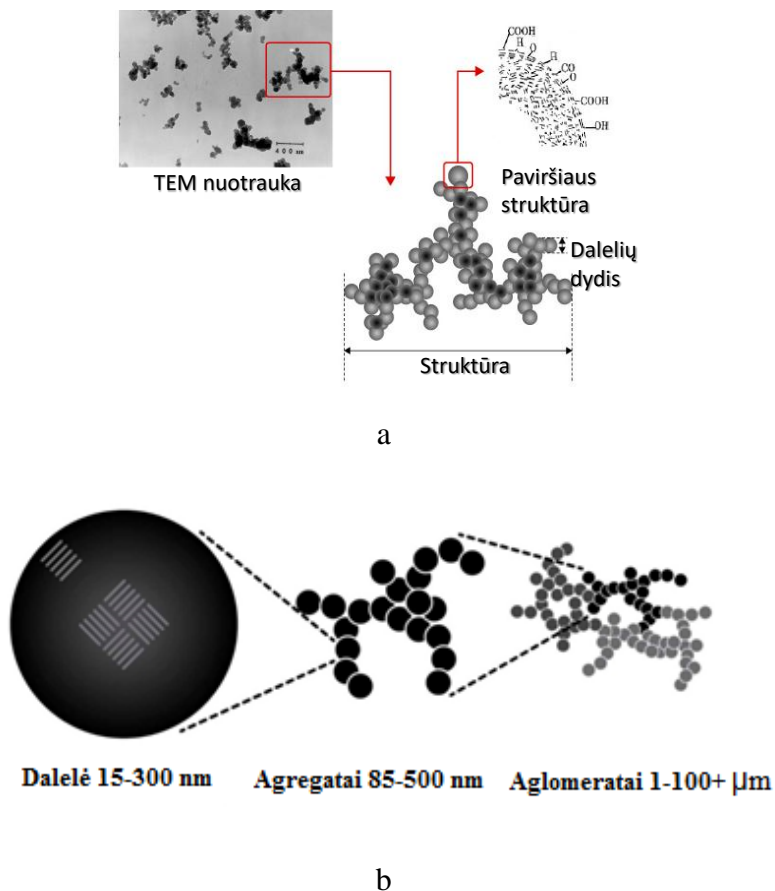
Kuo mažesnės juodųjų suodžių dalelės tuo, didesnis BET paviršiaus plotas, taip pat juodieji suodžiai keičia paviršiaus savybes, nes paviršiuje susidaro įvairios funkcinės grupės (1.9 pav. a), dėl ko kinta pačios kompozicijos savybės [23]. Palyginimui 1.6 lentelėje pateikta, kaip kinta juodųjų suodžių savybės, priklausomai nuo dalelės dydžio.

1.6 lentelė Krosninio tipo juodųjų suodžių savybės [24, 25]

Savybė	Printex 60	Printex 85
Vidutinis dalelių dydis	21 nm	16 nm
BET paviršiaus plotas	115 m ² /g	200 m ² /g
Naftos produktų absorbcija	110 cm ³ /100g	54 cm ³ /100g
Spalvos intensyvumas	115 %	127 %

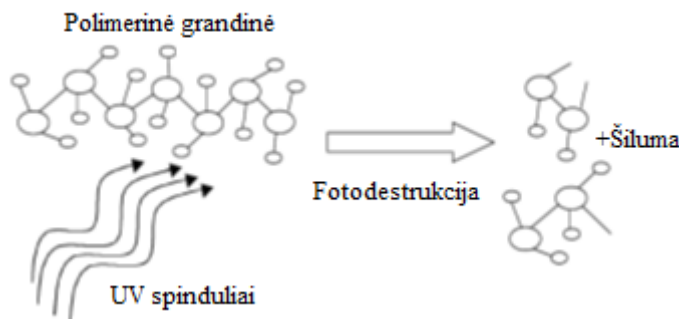
Priklausomai nuo kiekio, šis užpildas plastikui gali suteikti mėlyną ar rudą atspalvius. Be to, juodieji suodžiai padidina plastikų atsparumą UV spinduliuotei [9]. Tačiau juodieji suodžiai kaip aktyvus užpildas yra linkęs sudaryti aglomeratus (1.9 pav.). Susidarę didesni aglomeratai paviršiuje

gali sudaryti įtempių koncentracijas, todėl, norint gauti tolygią struktūrą, reikia itin gerai homogenizuoti kompoziciją [7].



1.9 pav. Juodųjų suodžių dalelių paviršiaus struktūra (a) [23] ir atskirų struktūrų matmenys [7]

Juodųjų suodžių dalelės absorbuoja UV spindulius ir juos paverčia šilumine energija [9], apsaugo plastikus nuo fotodestrukcijos, dėl kurios gali atsirasti įtrūkos, bloginančios plastiko mechanines savybes (1.10 pav.).



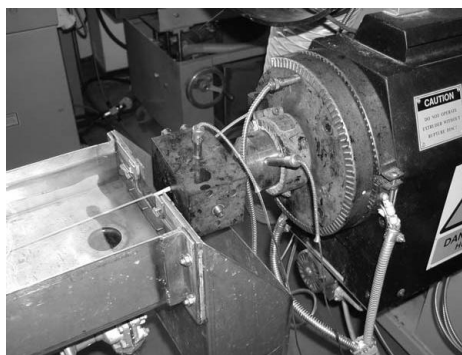
1.10 pav. Polimerinės grandinės fotodestrukcijos schema [10]

Darbe [30] buvo tirta vienodo kiekio (1%) skirtingų užpildų įtaka HDPE stipriui tempiant, išlaikant bandinius 30 mėnesių lauko sąlygomis, veikiant UV spinduliams. Gauti rezultatai rodo,

jog stipris tempiant juodaisiais suodžiais užpildytų bandinių po 30 mėnesių beveik nepakito – sumažėjo tik 10 %. Tuo tarpu bandinių be užpildo stipris po 6 mėnesių sumažėjo net 50 %. Tai leidžia teigti, kad geriausią apsaugą nuo UV spinduliuotės plastikams suteikia juodieji suodžiai [9].

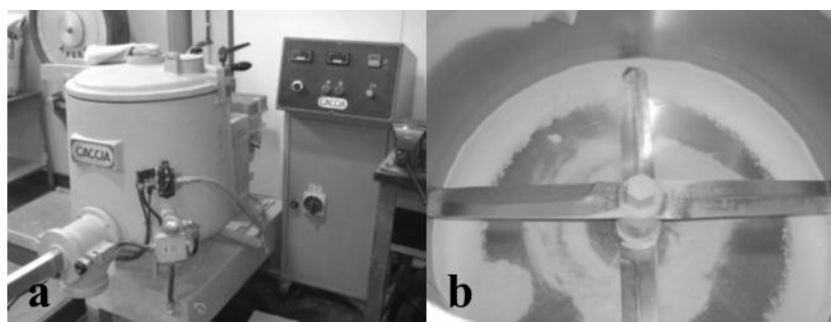
Sukamajame formavime yra svarbu plastikų kompozicijų paruošimo būdas. Galimi trys paruošimo būdai [1, 2]:

1. **Ekstruzinis metodas:** Plastiko milteliai yra sumaišomi su užpildu sraigtiniu ekstruderiu, kuris taip pat naudojamas ir granulėms gauti (1.8 pav.) [1]. Kompozicijos paruošimui tinka tiek dispersiniai, tiek pluoštiniai užpildai. Gautos granulės iš naujo sumalamos malūnais į smulkesnę frakciją, tinkamą sukamajam formavimui. Šio metodo privalumas tame, kad užpildas tolygiai pasiskirstomas matricoje [11].



1.8 pav. Ekstruderis plastiko kompozicijos gavimui [1]

2. **Naudojant greitaeigius maišytuvus** plastikas su užpildu sumaišomas dideliu greičiu besisukančiomis mentimis. Šis metodas labiau tinkamas kompozicijoms su dispersiniais užpildais sumaišyti. Priklausomai nuo menčių sukimosi greičio, dėl trinties kompozicijos temperatūra gali išaugti iki 80 °C [11]. Naudojamos medžiagos granulių paviršius, dėl susidariusios temperatūros, apsilydo ir pasidengia užpildo dalelėmis. Gaunama kompozicija yra netepli, užpildo dalelės nepadengia formos paviršiaus [3].



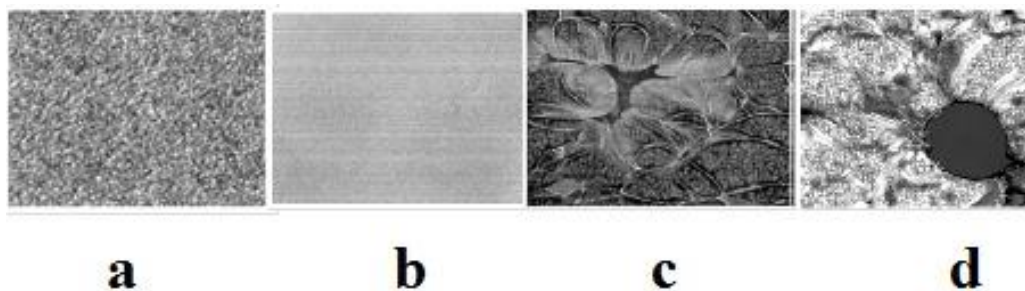
1.9 pav. Greitaeigio maišytuvo bendras vaizdas (a) ir mentys (b) [1]

3. „*Sausasis*“ *metodas* – lėtas metodas, tinkamas sumaišyti plastiko granules ar miltelius tiek su pluoštiniais, tiek su dispersiniais užpildais [8]. Šiuo atveju galima naudoti didelių matmenų maišyklę (1.10 pav.) arba reikiamą užpildo kiekį tiesiog pakrauti į sukamojo formavimo formą kartu su plastiko milteliais. Šiuo atveju besisukančioje gaminio formoje milteliai susimaišo su užpildu jau gaminio formavimo metu [1]. Šio metodo trūkumas tame, jog užpildas matricoje pasiskirsto nevienodai, o esant didesniai užpildo kiekiui, susidaro jo aglomeratai. Be to, užpildo dalelės užteršia formos sienelės [3].



1.10 pav. Mechaninis „sausasis lėtas“ maišymas besisukančioje talpoje [1]

Nustatyta, kad naudojant tiek pluoštinius, tiek dispersinius užpildus, kompozicijos paruošimo metodas turi įtakos polietileno kompozito struktūrai [5]. 1.11 pav. pateiktos polietileno ir jo kompozicijų su dispersiniais užpildais struktūros. Ekstruziniu metodu gauto polietileno struktūra yra homogeniška, o su greitaeigiu maišytuvu ar besisukančios talpos pagalba suformuoto polietileno struktūroje aiškiai matomos dispersinio užpildo dalelės.



1.11 pav. Polietileno struktūros, gautos naudojant skirtingus kompozicijų paruošimo metodus: a – be užpildo; b – ekstruzinis; c – greitaeigiu maišytuvu; d – „sausuoju“ būdu besisukančioje talpoje [5]

Kompanijoje UAB „ENEKA“ didelių gabaritų polietileno gaminių gamybai plačiai naudoja sukamojo formavimo metodą. Šiuo būdu įmonėje yra gaminami įvairūs gaminiai: talpos, pontonai, slėginės talpos vandens paruošimui, korpusai pramoninėms plovimo mašinoms ir pan. Vienas

pagrindinių gaminių yra LLDPE šulinių dangčiai, suformuoti sukamuoju metodu [22]. Didžiausią paklausą rinkoje turi juodos spalvos dangčiai. Gaminant šiuos dangčius plastiko milteliai su juodųjų suodžių dalelėmis sumaišomas „sausuoju“ būdu, t.y. sausos užpildo ir plastiko dalelės sumaišomos maišykle prieš kompozicijos pakrovimą į formą arba reikiamas užpildo kiekis įdedamas tiesiogiai į formą kartu su plastikumu prieš gaminio formavimą. Kompanija UAB „ENEKA“ juodųjų suodžių kiekį gaminių plastiko kompozicijose parenka, remiantis LST EN 124-1 ir ISO 15398 standartais. Tačiau buvo pastebėta, kad dažnai iš tokių LLDPE juodųjų suodžių kompozicijų suformuoti gaminiai turi defektus – įdubimus ar įtrūkimus šulinio dangčio išoriniame paviršiuje arba pūsles vidiniame jų paviršiuje (1.12 pav.). Tikėtina, kad šių defektų susidarymui įtakos turi juodųjų suodžių kiekis ir jų dispergavimo kompozicijoje kokybė.



1.12 pav. Defektai gaminiuose, suformuotuose iš LLDPE kompozicijų su skirtingu juodųjų suodžių kiekiu: a – 2,5 %; b – 3,0 %

Buvo pastebėta, jog kitų kompanijos juodaisiais suodžiais užpildytų gaminių, pavyzdžiui, požeminių talpų, susitraukimo laipsnis po suformavimo yra didesnis, lyginant su LLDPE gaminių be užpildo susitraukimo laipsniu. Kai kuriais atvejais šie gaminiai turėjo ir įtrūkimų. Pradėjus gaminti su didesniu užpildo kiekiu LLDPE šulinio dangčius, prasidėjo problemos su gaminio kokybe. Buvo atlikti tempimo bandymai, norint palyginti LLDPE be užpildo ir su užpildu 0,1 m.d. Nustatyta jog šis užpildo kiekis apie 30 % padidino stiprumą ir Jungo modulį, tačiau beveik 2 kartus sumažėjo gaminio deformacinis pajėgumas. Todėl yra svarbu išsiaiškinti juodųjų suodžių įtaką sukamuoju formavimu gautų gaminių kokybei ir jų elgsenai, veikiant įvairioms išorinėms apkrovoms.

2. TYRIMO METODOLOGIJA

2.1 Tyrimo medžiagos

Tyrimams naudojamas „Dow Plastics“ kompanijos linijinis mažo tankio polietilenas (2.1 pav. a), tinkantis naudoti sukamuoju formavimu formuojamiems gaminiams. Ši PE markė sukurta standiems, gerų mechaninių savybių, UV spinduliams atspariems gaminiams gauti [4]. Naudojamas užpildas yra juodieji suodžiai IOX B03, plačiai naudojamas plastikų, betono, gumos ir kt. gaminiams suteikti juodą spalvą (2.1 pav., b) [27]. Naudotų medžiagų pagrindinės savybės pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Naudotų medžiagų pagrindinės charakteristikos

LLDPE (Dowlex NG2432 UE, Dow Chemical)	
Tankis	939 kg/m ³
Lydymosi temperatūra	128 °C
Lydalo takumo indeksas	3,8 g/10 min ($T=190\text{ °C}$; $m=2,16\text{ kg}$)
Takumo riba	19 MPa
Jungo modulis lenkiant	730 MPa
Stipris tempiant	9,7 MPa
Ištįsa	550 %
Atsparumas smūgiui (krentančio svorio metodu):	
23 °C	45 – 60 J
-20 °C	690 – 92 J
Juodieji suodžiai (IOX B03, LanXess)	
Tankis	0,5 g/cm ³
Vidutinis dalelių dydis	44 μm
Naftos produktų absorbcija	15 – 20 g/100 g
Spalvos intensyvumas	98 – 105 %

2.2 Bandinių paruošimo metodika

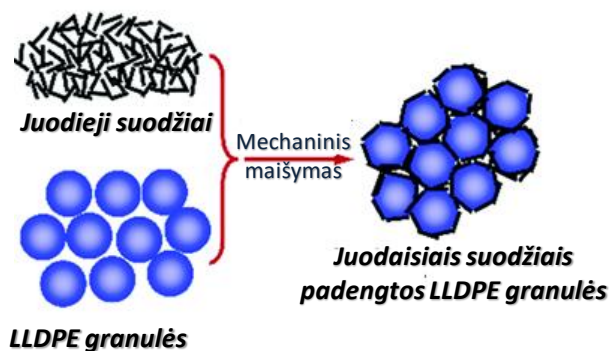
Tyrimams kompozicijos – LLDPE milteliai ir juodieji suodžiai – buvo gaunamos sausuoju metodu. Šiuo atveju abi medžiagos buvo supilamos į formą, kuriai besisukant, jie tarpusavyje maišosi ir juodųjų suodžių dalelės padengia LLDPE miltelių paviršius (2.2 pav.).



a

b

2.1 pav. a – LLDPE milteliai; b – juodieji suodžiai



2.2 pav. Plastiko ir užpildo dalelių sausojo maišymo schema

Bandiniams formuoti buvo naudotas sukamojo formavimo įrenginys Caccia RT 3500, gamintojas „Caccia Engineering Srl“ Italija (2.3 pav.). Šis įrenginys skirtas vidutinio dydžio gaminiams formuoti iki $>5 \text{ m}^3$. Gali būti naudojamos tiek plieninės, tiek aliuminės formos.



2.3 pav. Sukamojo formavimo mašina Caccia RT 3500

Bandinių formavimo sukamuoju metodu parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Bandinių formavimo sukamuoju formavimo metodu parametrai

LLDPE kiekis formoje	3 kg
Juodųjų suodžių kiekis	0 – 90 g
Kaitinimo formoje trukmė	11,5 min
Formos darbinė temperatūra	290 °C – 295 °C
Formos aušinimo trukmė	22 min

Ėminių gavimui naudota forma bei ėminių matmenys pateikti 2.4 pav.



2.4 pav. Bandiniai tyrimams: a – bandinių forma; b – bandiniai su skirtingu juodųjų suodžių kiekiu

2.3 Mechaninių savybių nustatymo metodikos

Savybės tempiant buvo nustatomos pagal LST EN ISO 527-1 [28] ir LST EN ISO 527-2 [29] standartų reikalavimus universalia tempimo mašina H 10KT („Tinius Olsen“, Anglija) 20 mm/min greičiu. Dvigubo kastuvėlio formos 1A matmenų bandiniai (pagal LST EN ISO 527 reikalavimus) buvo išfrezuoti iš suformuotų ėminių programinio valdymo (CNC) frezavimo staklėmis, naudojantis specialiai sukonstruotu įtaisu (2.5 pav.). Spaustuvas (2) įtvirtintas nejudamai, o spaustuvas (3) pastoviu greičiu traukia bandinį vertikalia kryptimi.

Stipris tempiant buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ MPa} \quad (2.1)$$

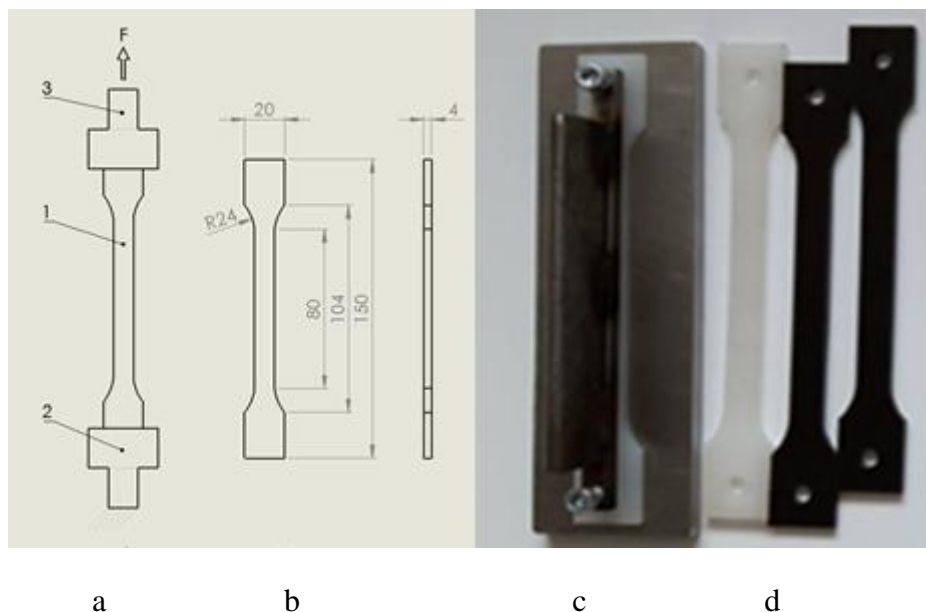
čia F – jėga, N; A – bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 .

Deformacinės savybės buvo įvertintos nustatant ištįsą trūkimo metu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100, \% \quad (2.3)$$

čia L_0 – bandinio deformacinė zona, mm; ΔL_0 – bandinio ilgio pokytis, mm.



2.5 pav. a – bandinio įtvirtinimo tempimo mašinos veržtuvuose schema; b – bandinio matmenys; c – pagalbinis įtaisas reikiamos formos bandiniams gauti CNC frezavimo staklėmis; d – išfrezuoti dvigubo kastuvėlio formos bandiniai

Jungo modulis E_J buvo nustatomas pagal formulę:

$$E_J = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \text{ MPa} \quad (2.4)$$

čia σ_1 – įtempiai, esant ištįsai $\varepsilon_1 = 0,0005$, MPa; σ_2 – įtempiai, esant ištįsai $\varepsilon_2 = 0,0025$, MPa.

Kiekvienam eksperimentiniam taškui gauti buvo atliekami 6 matavimai.

Savybės lenkiant buvo nustatomos pagal LST EN ISO 178 standarto reikalavimus [30] universalioji lenkimo mašina H 10KT („Tinius Olsen“, Anglija), atliekant trijų taškų lenkimo bandymą. Bandymo metu apkrova veikia $100 \times 10 \times 4$ mm stačiakampės formos bandinį trijuose taškuose (2.6 pav.). Bandinys (1), kurio galai remiasi į atramas (2), lenkiamas antgalio (3), judančio pastoviu 20 mm/min greičiu. Jėgos F veikimo vieta yra bandinio viduryje, tarp bandinį palaikančių lygiagrečių atramų. Atstumas tarp atramų yra 64 mm, kuris buvo apskaičiuotas pagal formulę:

$$L = (16 \mp 1)h, \text{ mm} \quad (2.5)$$

Bandymo metu įlinkio kreivėse fiksuojamos jėgos ir poslinkio – įlinkio vertės. Išmatuotas poslinkis atitinka bandinio įlinkį.

Atsparumas lenkiant σ_f buvo nustatytas pagal formulę:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \text{ MPa} \quad (2.6)$$

čia F – veikianti jėga, N; L – atstumas tarp atramų, mm; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio storis, mm.

Lenkimo deformacija (įlinkis) buvo apskaičiuota pagal:

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2} \cdot 100, \% \quad (2.7)$$

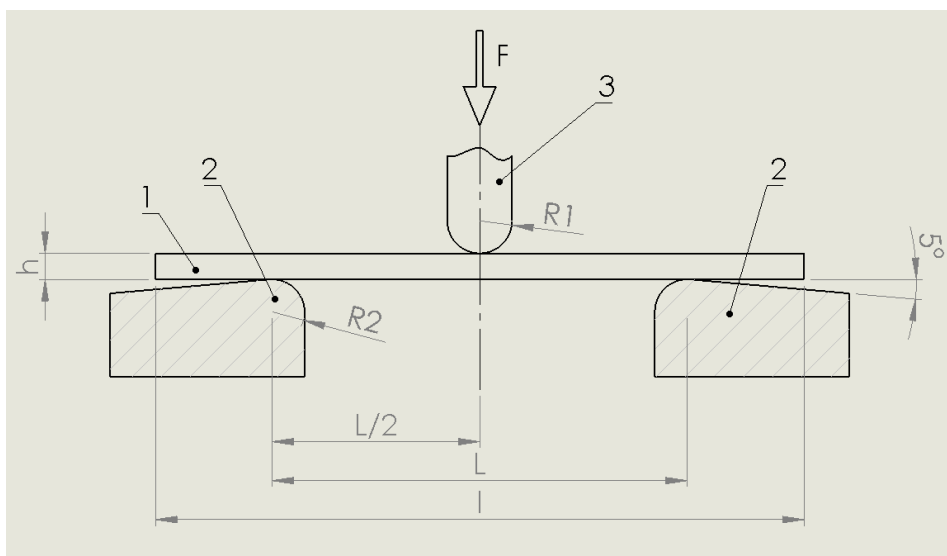
čia s – įlinkis, mm; h – bandinio storis, mm; L – atstumas tarp atramų, mm.

Tamprumo modulis apskaičiuotas pagal:

$$E_f = \frac{\sigma_{f_2} - \sigma_{f_1}}{\varepsilon_{f_2} - \varepsilon_{f_1}}, \text{ MPa} \quad (2.8)$$

čia σ_{f_1} – lenkimo įtempis, MPa, ε_{f_1} ir ε_{f_2} – deformacijos, apskaičiuotos, esant s_1 ir s_2 įlinkiams, mm.

Kiekvienam eksperimentiniam taškui gauti buvo atliekami 6 matavimai.

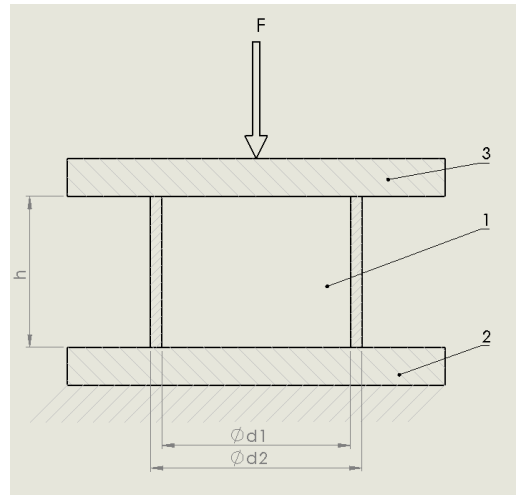


2.6 pav. Principinė lenkimo bandymo schema: $h = 4$ mm; $l = 100$ mm; $L = 64$ mm;
 $R_1 = 5$ mm; $R_2 = 5$ mm

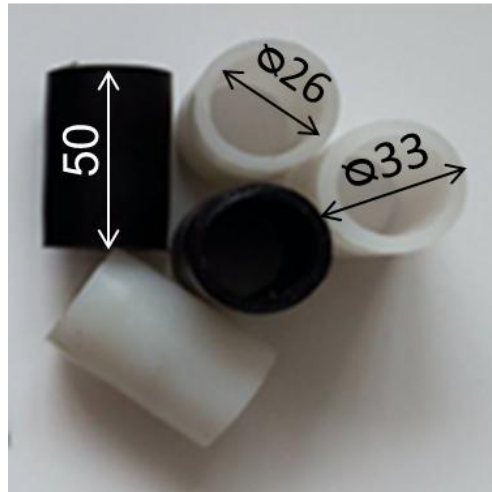
Savybės gniuždant buvo nustatomos pagal LST EN ISO 604 standarto reikalavimus [31] universalia gniuždymo mašina H 10KT („Tinius Olsen“, Anglija). Naudoti sukamuoju formavimu suformuoti ir tekinimo staklėmis ištekinti cilindrinės formos bandiniai (2.7 pav.). Cilindrinės formos bandinys įstatomas tarp dviejų mašinos veržtuvų plokštumų (Plokštuma (2) įtvirtinta nejudamai, o plokštuma (3) bandinį gniuždo pastoviu 1 mm/min greičiu.



a



b



c

2.7 pav. a – gniuždymo bandymo vaizdas; b – principinė gniuždymo bandymo schema (h – cilindrinio bandinio aukštis, mm; $d1$ – bandinio vidinis skersmuo; $d2$ – bandinio išorinis skersmuo);
c – cilindrinės formos bandinių matmenys

Stipris gniuždymui buvo apskaičiuotas pagal formulę:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ MPa} \quad (2.9)$$

čia F – gniuždymo jėga, N; A – bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 ;

o deformacija klupdymo metu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100, \% \quad (2.11)$$

čia L_0 – bandinio aukštis, mm; ΔL_0 – bandinio ilgio pokytis, mm.

Jungo modulis gniuždant apskaičiuotas naudojant šią formulę:

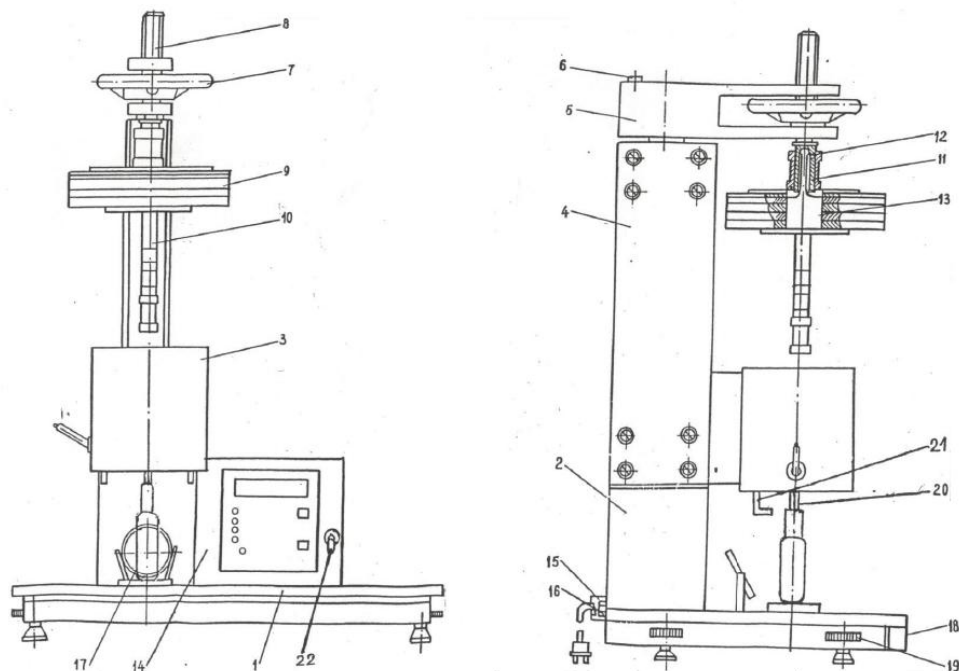
$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \text{ MPa} \quad (2.12)$$

čia σ_1 – įtempiai, esant gniuždymo deformacijai $\varepsilon_1 = 0,0005$, MPa; σ_2 – įtempiai, esant gniuždymo deformacijai $\varepsilon_2 = 0,0025$, MPa.

Kiekvienam eksperimentiniam taškui gauti buvo atlikti 4 matavimai.

2.4 Lydalo takumo nustatymo metodika

Polietileno kompozicijų lydalo takumas, buvo nustatytas ekstruziniu plastometru (2.8 pav.) [32], kurio techniniai duomenys pateikti 2.3 lentelėje. Bandymo metu kas 10 min buvo nustatoma susidariusių atraižų masė laboratorinėmis svarstyklėmis ATZ220 (AXIS, Lenkija), kurių padalos vertė 0,001 g. Buvo imituojami 5 perdirbimo ciklai. Kiekvienam eksperimentiniam taškui gauti buvo atliekami 5 matavimai.



2.8 pav. Ekstruzinio plastometro schema. 1 – pagrindo plokštė; 2 – kronšteinas; 3 – kaitinimo kamera; 4 – stovas; 5 – kronšteinas; 6 – fiksuatorius; 7 – rankenėlė; 8 – kėlimo sraigtas; 9 – svarščiai; 10 – stūmoklis; 11 – įvorė; 12 – rutuliukai; 13 – svorsčių laikiklis; 14 – termoregulatorius; 15 – saugiklio lizdas; 16 – kontaktas „žemė“; 17 – veidrodėlis; 18 – stalčiukas; 19 – rankenėlė; 20 –

kapiliaro kamštis; 21 – rankenėlė sklendės padėčiai nustatyti; 22 – prietaiso įjungimo į elektros tinklą.

Termoplastų lydalo takumas $\alpha(T,P)$, g/10 min buvo apskaičiuotas pagal formulę:

$$\alpha(T,P) = t \cdot \frac{m}{\tau}, g/min \quad (2.13)$$

čia T – temperatūra, °C; P – apkrova, N; t – standartinis laikas, s; m – ekstruduotos medžiagos masė, g; τ – medžiagos atraižos susidarymo trukmė, s.

2.3 lentelė. lydalo takumo indeksą Ekstruzinio plastometro techniniai duomenys

Eil. Nr.	Charakteristika	Mat. vnt.	Vertė
1.	Darbinė temperatūra	°C	190
2.	Užduotos temperatūros nusistovėjimo laikas po įjungimo į elektros tinklą	min	30
3.	Užduotos temperatūros nusistovėjimo laikas po paruošiamųjų darbų (valymo, medžiagos pripylimo ir kt.)	min	5
4.	Kapiliaro vidinis skersmuo: Nr. 2	mm	2,095+/-0,005
5.	Ekstruzinės kameros kanalo vidinis skersmuo	mm	9,556
6.	Stūmoklio skersmuo	mm	9,48-0,006
7.	Svarsčio masė Nr.11	kg	0,96
8.	Stūmoklio (su kotu) masė	kg	0,325
9.	Svarsčių laikiklio masė	kg	0,875
10.	Maitinimas: kintama įtampa (dažnis 50+/- 1Hz)	V	220+/-2
11.	Naudojamas galingumas	W	≤ 380

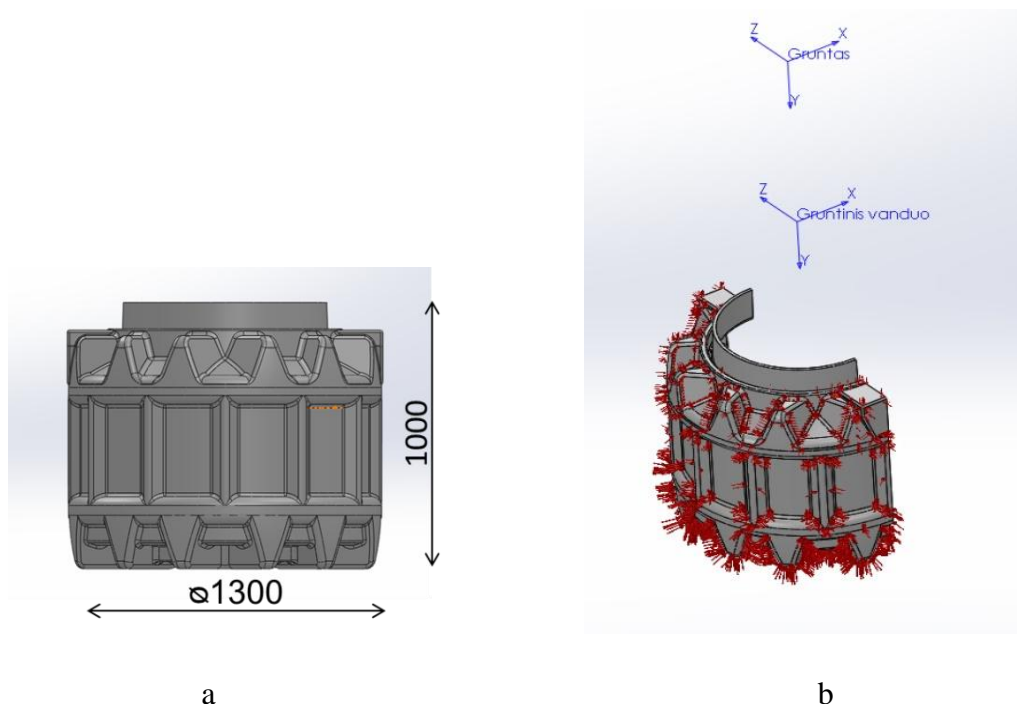
2.5 Modeliavimo baigtinių elementų metodu metodika

Norint įvertinti gaminio stiprumą ir standumą buvo naudojama „SoliWorks Simulation 2016“ skaičiuojamasis paketas, pasirenkant „Static“ (statinis) sprendimo metodą. Baigtinių elementų metodu skaičiuojamuoju objektu pasirinktas sukamuoju formavimu suformuota požeminė talpa (2.9 pav.). Požeminę talpą veikia apkrovos, vertikali 18 kN/m² dydžio ir horizontali 9 kN/m² dydžio grunto apkrova, bei hidrostatinis 10 kN/m² dydžio slėgis [36]. Veikiančių apkrovų schema (2.9 pav. b) vaizduoja, jog nuo talpos viršaus iki grunto paviršiaus yra 2 metrai ir 1 metras nuo grunto paviršiaus yra gruntinis vanduo.

Apskaičiuojami ribiniai įtempiai, įvertinant atsargos koeficientą [34]:

$$\sigma_{adm.} = \frac{\sigma}{S}, \text{ MPa} \quad (2.14)$$

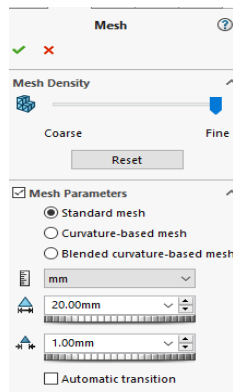
čia S – atsargos koeficientas; σ – takumo riba, MPa.



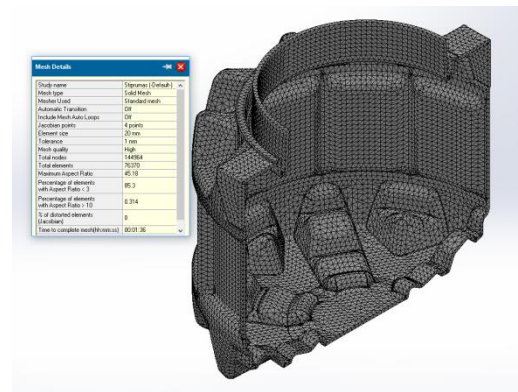
2.9 pav. Požeminės talpos 3D modelis skaičiavimui: a – požeminės talpos forma ir matmenys ; b – veikiančių apkrovų schema.

Vertinant minėto skaičiuojamojo modelio (2.9 pav.) stabilumą, buvo naudojama „SoliWorks Simulation 2016“ skaičiuojamasis paketas, pasirenkant „Buckling“ (klupdymas) sprendimo metodą, esant tai pačiai apkrovų schemai (2.9 pav. b). Programa įvertina ar konstrukcija yra pakankamai stabili, apskaičiuojant atsargos koeficientą. Jei atsargos koeficientas >1 – konstrukcija nesuklups, o $0 < \text{atsargos koeficientas} \leq 1$ atveju, prognozuojama jog konstrukcija gali suklupti [37].

Talpos 3D modelis suskaidomas į baigtinius elementus, naudojant tą patį standartinį tinklą (2.10 pav.) abiem sprendimo atvejais.



a



b

2.10 pav. a – standartinio tinklelio nustatymai; b – BEM tinklelis

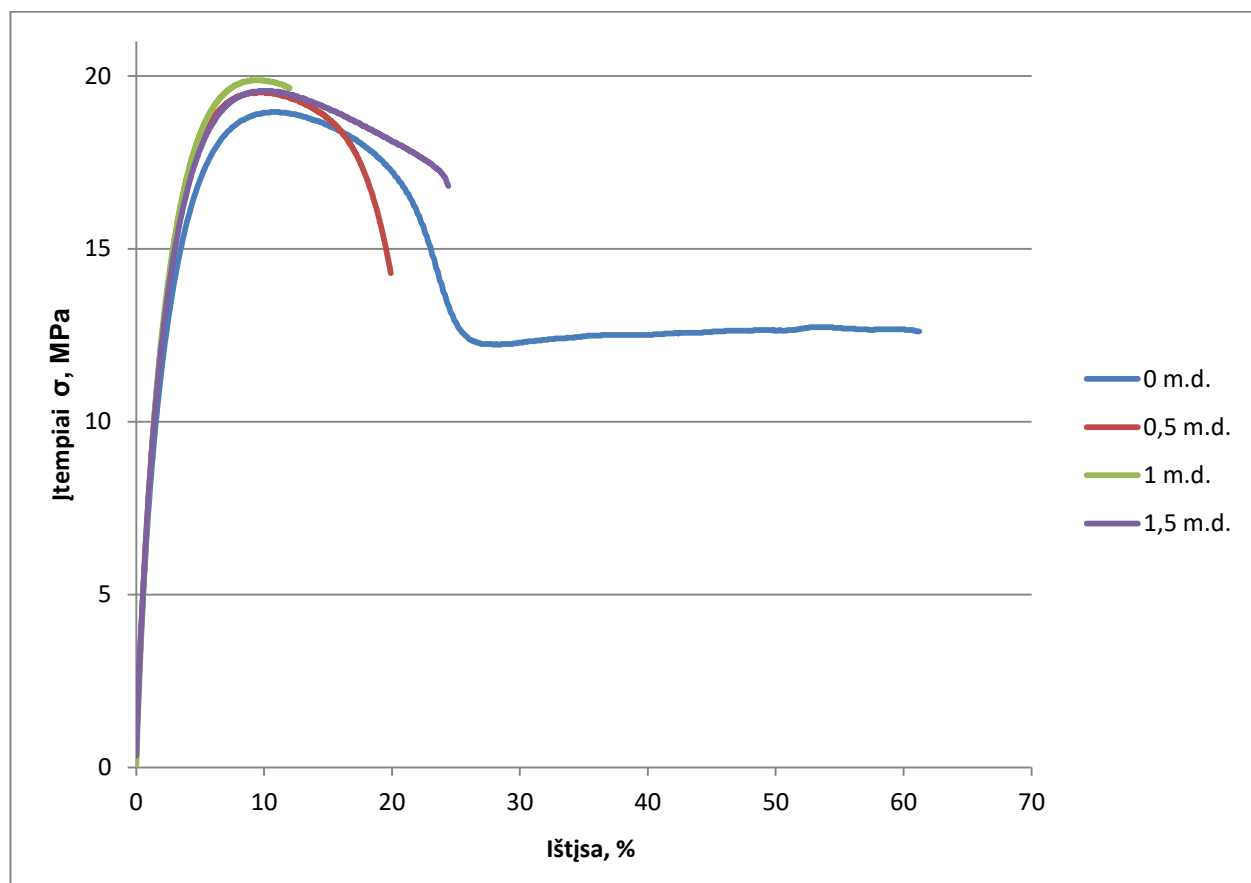
Skaičiuojamasis modelis sudarytas iš 76370 baigtinių elementų. Kadangi skaičiuojamasis modelis yra simetriškas, jis buvo padalintas į dvi dalis ir, norint sutaupyti laiką, skaičiavimai atlikti tik šiai vienai pusei.

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1 Juodųjų suodžių įtaka LLDPE mechaninėms savybėms

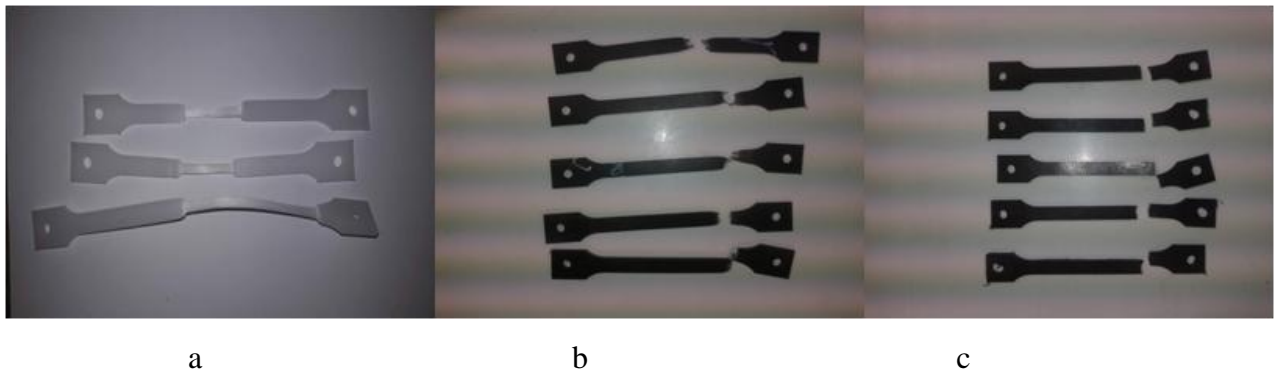
Tyrimo tikslas – nustatyti efektyvų juodųjų suodžių kiekį, norint pagerinti LLDPE kompozicijos mechanines savybes ir sukamuoju formavimu būdu suformuoti defektų neturinčius gaminius.

3.1 pav. pateikta LLDPE įtempių – deformacijos kreivės, esant skirtingam juodųjų suodžių kiekiui. Matyti, kad kintant suodžių kiekiui, kinta plastiko kompozicijos elgsena tempiant.



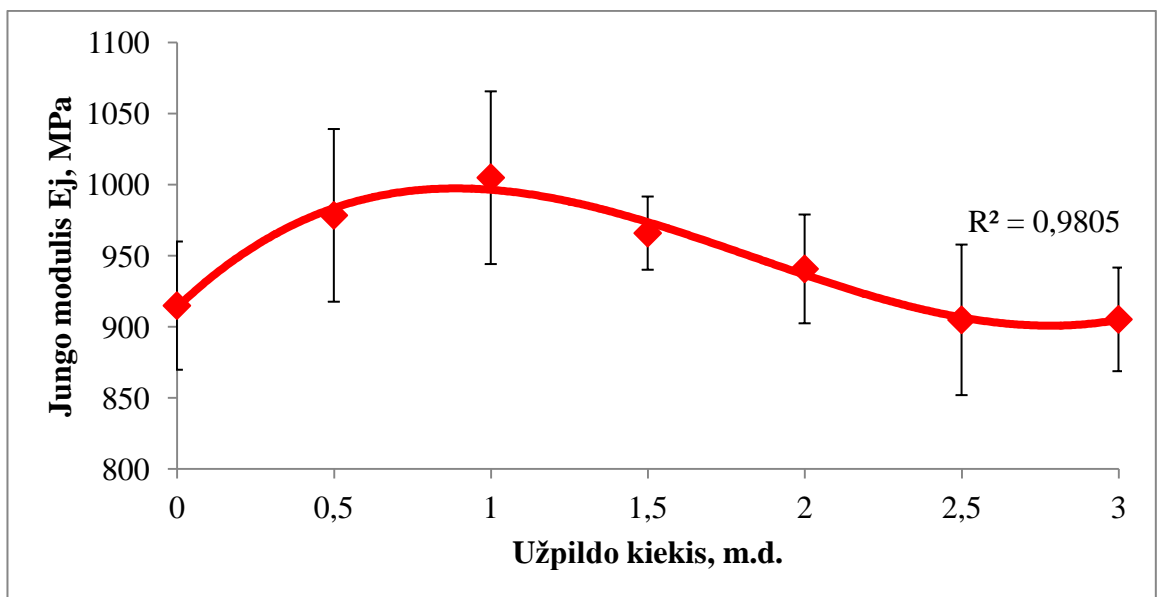
3.1 pav. Įtempių-deformacijos priklausomybės kreivės, esant skirtingam juodųjų suodžių kiekiui

3.2 pav. pateikti LLDPE bandinių nuotraukos po tempimo iki nutrūkimo bandymo. Matyti, kad LLDPE be užpildo atveju bandiniams būdinga didelė vidurinės zonos deformacija, kuri susijusi su kaklelio formavimu ir šiek tiek mažiau išreikšta takumo riba. Tai matyti ir iš 3.1 pav. Tačiau įmaišius juodųjų suodžių, trūkusių bandinių nuotraukos iš esmės skiriasi. Kaklelio formavimosi žymės dar matomos kai kuriuose 0,5 m.d. juodųjų suodžių turinčiuose bandiniuose. Toliau padidinus užpildo kiekį vyksta beveik „trapus“ bandinių suardymas. Tokiu būdu LLDPE kompozicijos bandinių analizė aiškiai parodė, kad įmaišius net nedidelį kiekį juodųjų užpildų (0,5 m.d.), žymiai sumažėja plastiko deformacinis pajėgumas.



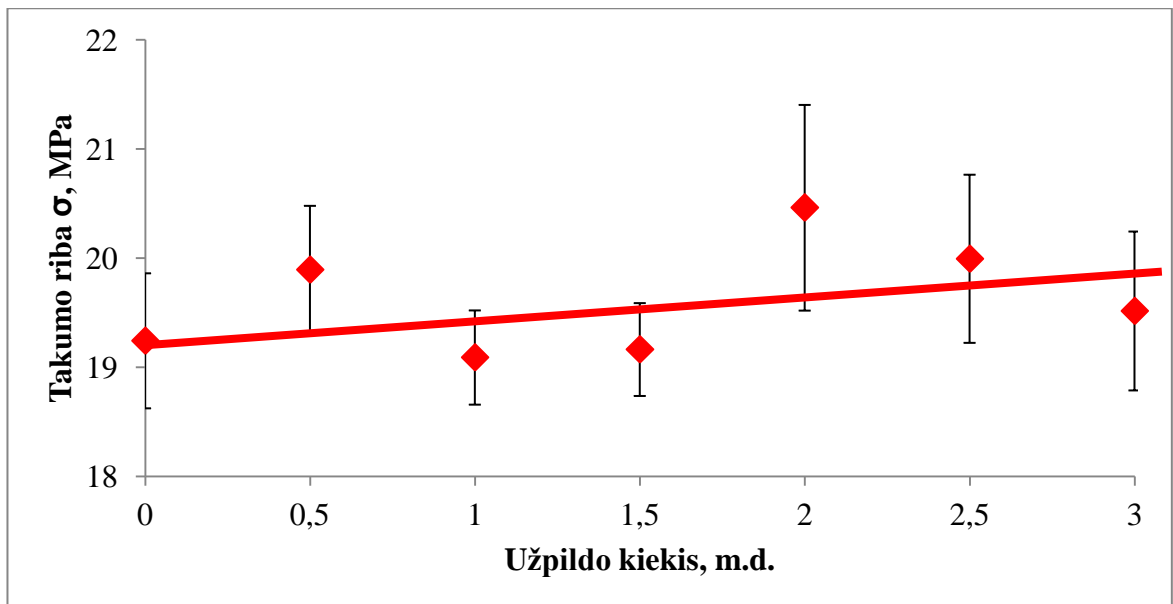
3.2 pav. Dvigubo kastuvėlio formos bandiniai su skirtingu juodųjų suodžių kiekiu, atlikus tempimo bandymus: a – 0 m.d.; b – 0,5 m.d; c – 1 m.d.

Toliau iš gautų gaminių buvo apskaičiuotos kompozicijos savybės tempiant. 3.3 pav. pateikta LLDPE Jungo modulio tempiant kitimas, priklausomai nuo juodųjų suodžių kiekio. Matyti, kad pradžioje didėjant užpildo kiekiui, Jungo modulio vertės taip pat didėja. Įmaišius 1 m.d. modulio vertė išauga ~10 % (iki 1005 MPa). Toliau didinant šio užpildo kiekį, Jungo modulio vertės pradeda mažėti, matyt, dėl užpildo dalelių polinkio jungtis į agregatus, kurie veikia kaip LLDPE kompozicijos defektai.



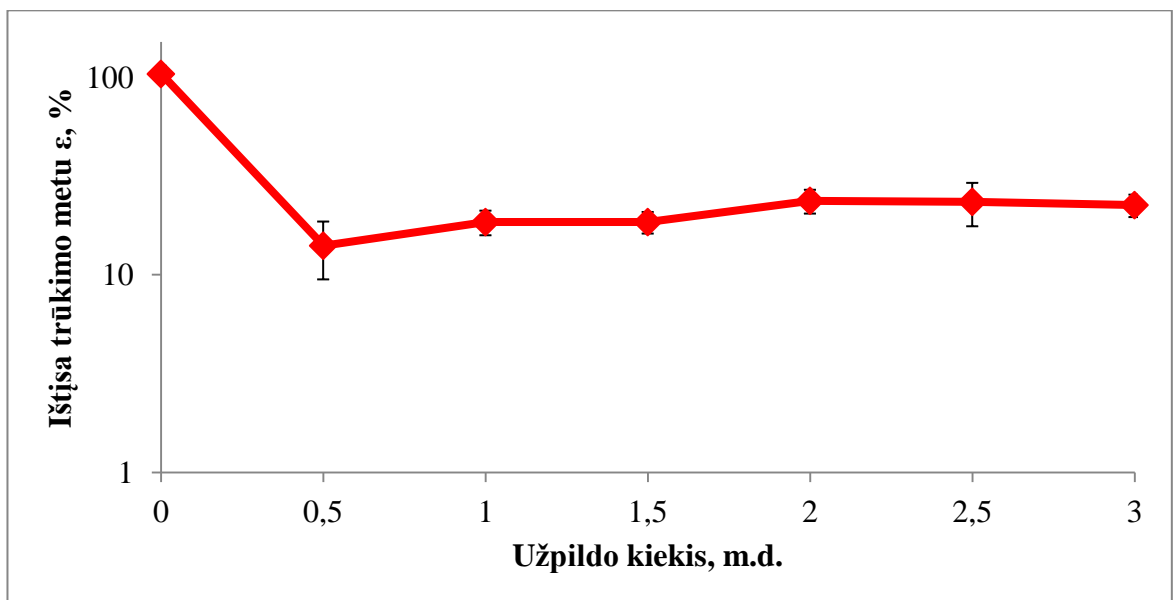
3.3 pav. LLDPE Jungo modulio tempiant priklausomybė nuo juodųjų suodžių kiekio

Takumo riba tempiant (3.4 pav.) beveik nepriklauso nuo juodųjų suodžių kiekio ir svyruoja 19,0–20,5 MPa ribose. Tačiau, kaip matyti iš 3.1 pav., LLDPE kompozicijos elgsena takumo ribos zonoje (kalalelio formavimosi zonoje) žymiai pakinta, kintant kompozicijos sudėčiai, t. y. į kompozicijos sudėtį įmaišius juodųjų suodžių.



3.4 pav. LLDPE takumo ribos tempiant priklausomybė nuo juodųjų suodžių kiekio

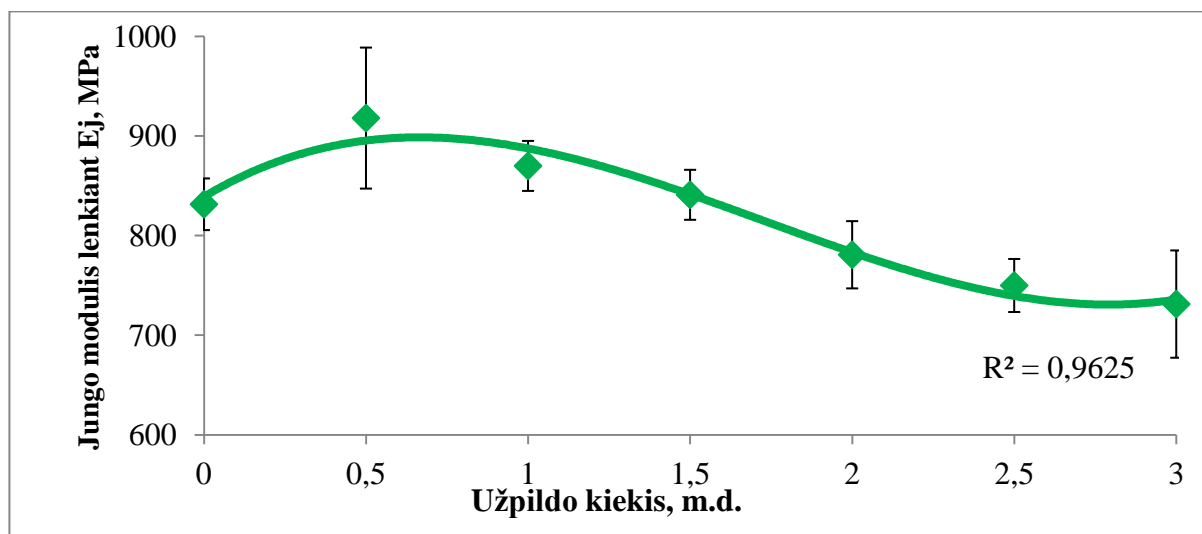
Vertinant polimerinės kompozicijos deformacines savybes gauta (3.5 pav.), jog įmaišius net nedidelį kiekį (0,5 m.d.) juodųjų suodžių LLDPE ištįsa trūkimo metu sumažėja drastiškai – daugiau nei 7 kartus, t. y. nuo 103 % net iki 14 %. Toliau didinant užpildo kiekį, ištįsos vertės beveik nebeprisiklauso nuo kompozicijos sudėties ir svyruoja patikimumo intervalo ribose.



3.5 pav. LLDPE ištįsos trūkimo metu tempiant priklausomybė nuo užpildo kiekio

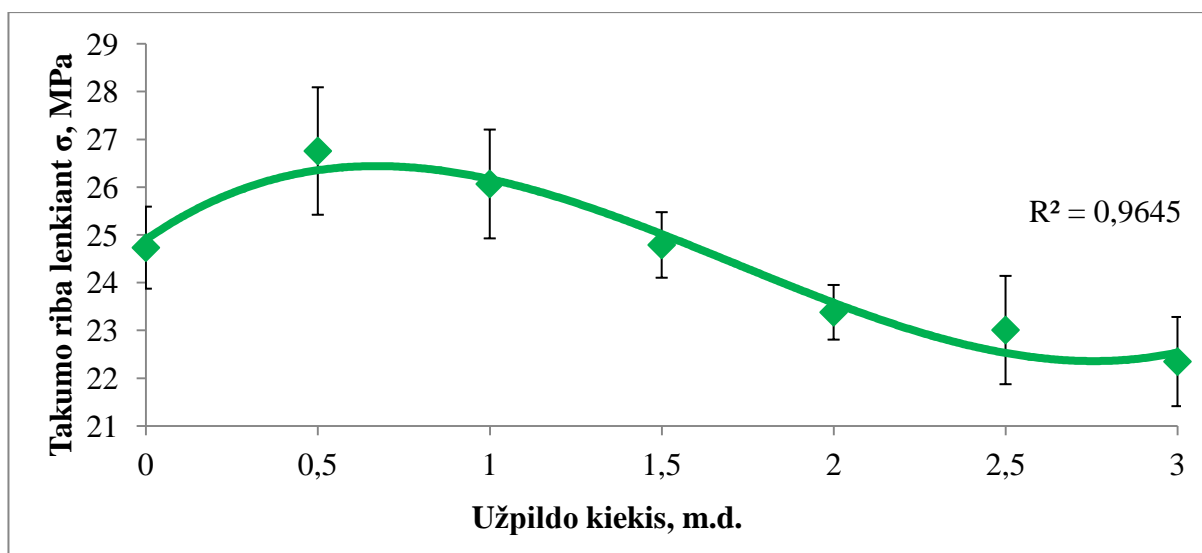
Toliau buvo atlikti LLDPE kompozicijos atsparumo lenkimui tyrimai. 3.6 pav. pateikta LLDPE Jungo modulio lenkiant kitimas nuo juodųjų suodžių kiekio. Analogiškai, kaip ir tempimo atveju, nustatyta, kad didėjant užpildo kiekiui, Jungo modulio vertės taip pat didėja. Įmaišius 0,5

m.d. modulio vertė, kaip ir tempimo atveju, išauga 9 – 10 %. Toliau didinant užpildo kiekį Jungo modulio vertės pradeda mažėti, dėl juodųjų suodžių polinkio į agregaciją bei aglomeraciją.



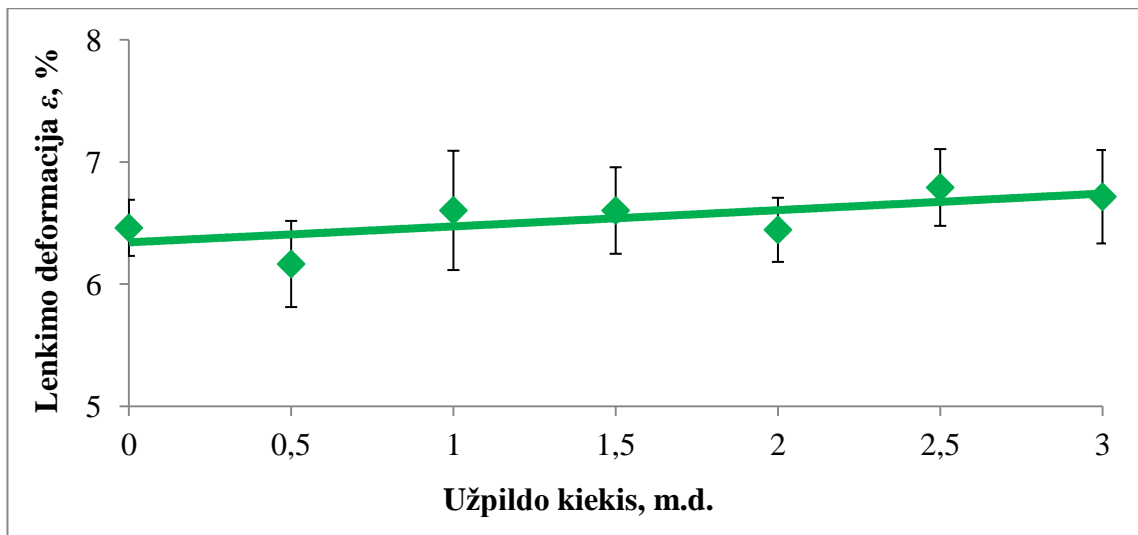
3.6 pav. LLDPE Jungo modulio lenkiant priklausomybė nuo užpildo kiekio

Juodieji suodžiai daro įtaką ir LLDPE takumo ribos lenkiant vertėms (3.7 pav.). Įmaišius 0,5–1 m.d. užpildo takumo riba padidėja, nors ir nežymiai – 6–8 % (nuo 24,7 MPa iki 26,8 MPa). Padidinus užpildo kiekį iki 2,5 – 3 m.d., takumo riba sumažėja iki 23 MPa.



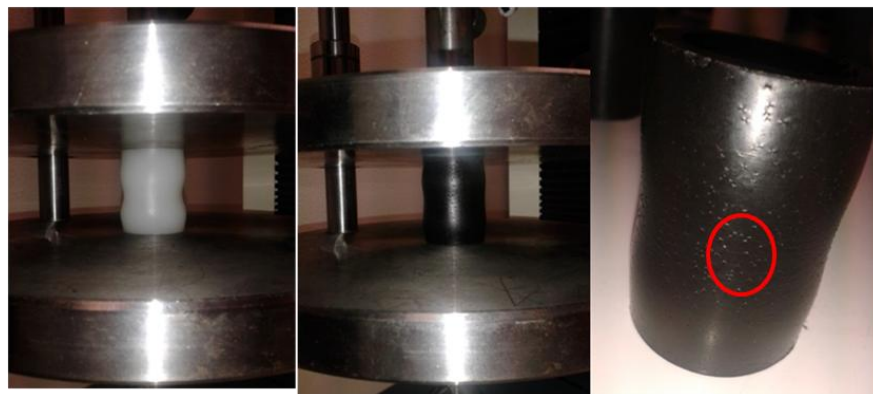
3.7 pav. LLDPE takumo ribos lenkiant priklausomybė nuo juodųjų suodžių kiekio

Iš 3.8 pav. pateiktos priklausomybės matyti, kad LLDPE deformacija suirimo metu lenkiant, kaip ir tempimo atveju, nepriklauso nuo juodųjų suodžių kiekio. Didinant užpildo kiekį nuo 0 iki 3 m.d., lenkimo deformacija svyruoja 6 – 7 % ribose.



3.8 pav. LLDPE deformacijos lenkiant iki suirimo priklausomybė nuo juodųjų suodžių kiekio

Toliau buvo vertinta cilindrinės formos LLDPE bandinių elgsena gniuždymo metu. Iš 3.9 pav. pateiktų vaizdų matyti, kad LLDPE cilindrinio bandinio gniuždymo metu vyksta jo klumpymas. LLDPE be užpildo atveju stebimos didesnės skersinės deformacijos, o esant 1,5 m.d. juodųjų suodžių – mažesnė (3.9 pav., a ir b). Be to, įmaišius ne didesnę nei 1 m.d. užpildo, bandinių paviršius po gniuždymo yra lygus, be jokių matomų defektų. Tačiau esant didesniai užpildo kiekiui – 1,5 m.d. ir daugiau, LLDPE bandinio paviršiuje po gniuždymo matomos įtrūkos (3.9 pav., c). Tai rodo, jog užpildas netolygiai pasiskirsto polimerinėje matricoje, susiformavę juodųjų suodžių aglomeratai sudaro įtempimų koncentracijų zonas. Todėl bandinį paveikus gniuždymo apkrova, tose vietose susiformuoja įtrūkos.



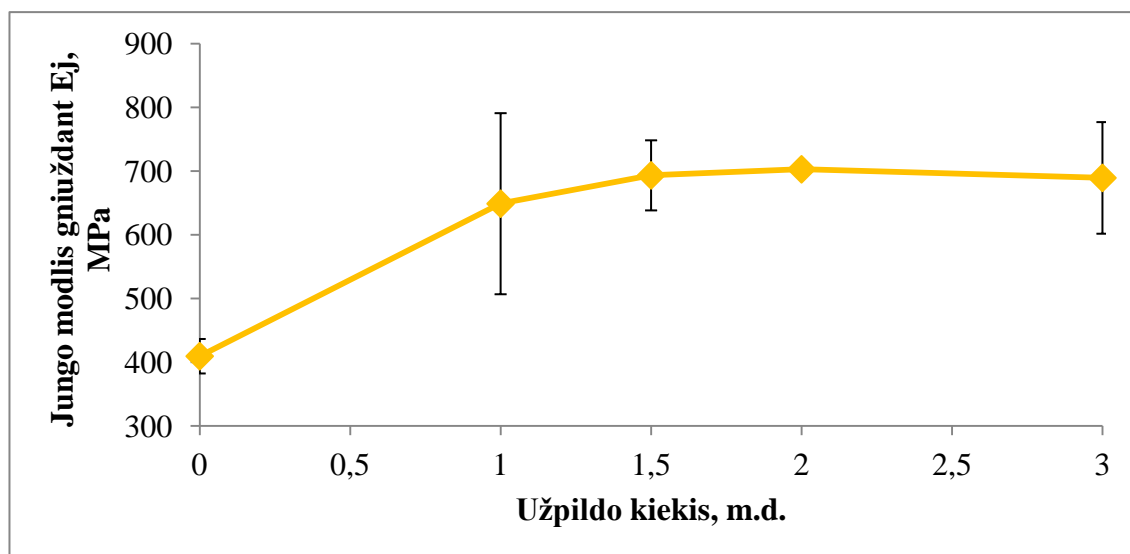
a

b

c

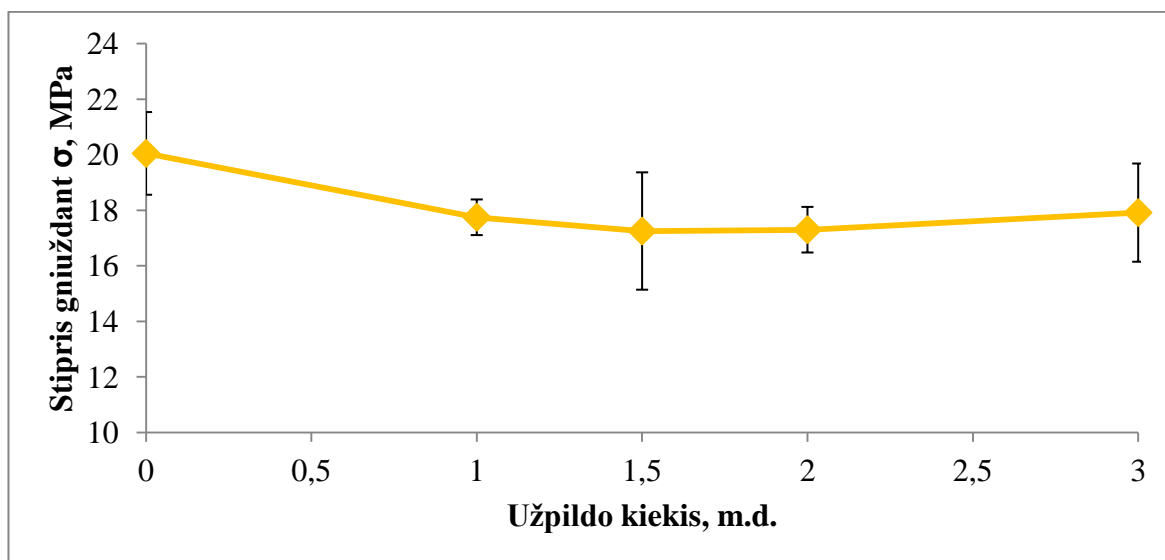
3.9 pav. Cilindrinės formos LLDPE bandinių be užpildo (a) ir su 1,5 m.d. juodųjų suodžių (b) elgsena gniuždant bei LLDPE bandinio su 1,5 m.d. kiekiu įtrūkos susiformavimas po gniuždymo bandymo (c)

Didėjant juodųjų suodžių kiekiui iki 1 m.d., Jungo modulis padidėjo nuo 420 MPa iki 650 MPa, t. y. apie 75 %. Toliau didinant užpildo kiekį iki 3 m.d., modulio vertės beveik nepriklauso nuo užpildo kiekio ir svyruoja patikimumo intervalo ribose (3.10 pav.).



3.10 pav. LLDPE Jungo modulio gniuždant priklausomybė nuo užpildo kiekio

Iš 3.11 pav. matyti, kad stipris didėjant užpildo kiekiui mažėja. Didinant užpildo kiekį iki 1m.d, jis sumažėjo nuo 20 MPa iki 17,7 MPa, t. y. apie 13 %.

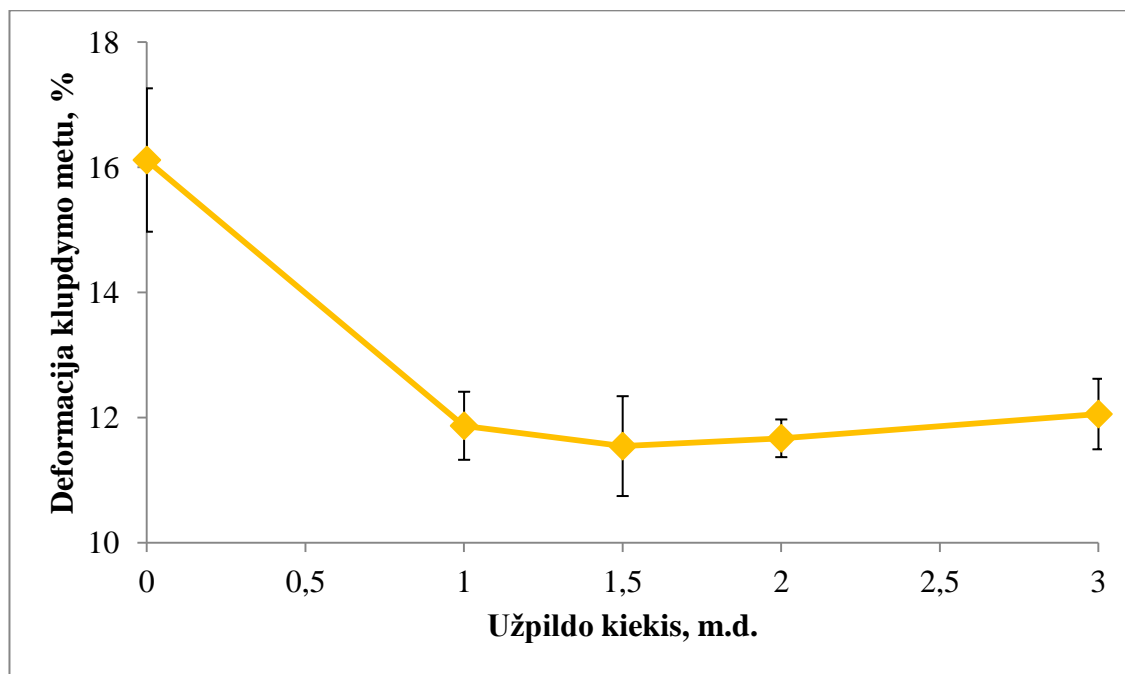


3.11 pav. LLDPE stiprio gniuždant priklausomybė nuo užpildo kiekio

Analogiškai kinta kludymo deformacija (3.12 pav.). Šiuo atveju deformacijos vertės sumžėja nuo 16,1 % iki 11,9 %, t.y. 1,4 karto. Toliau didinant juodųjų suodžių kiekį iki 3 m.d.,

stiprio ir deformacijų vertės klupdymo bandymo metu beveik nepriklauso nuo užpildo kiekio ir svyruoja patikimumo intervalo ribose.

Reikia pastebėti, kad gniuždymo bandymo metu gavosi didelis rezultatų išsibarstymas. Galima spėti, kad tam įtakos turėjo cilindrinės formos bandinių matmenų tikslumas, nes buvo sudėtinga gauti labai tikslių matmenų sukamuoju formavimo metodu suformuotus bandinius.

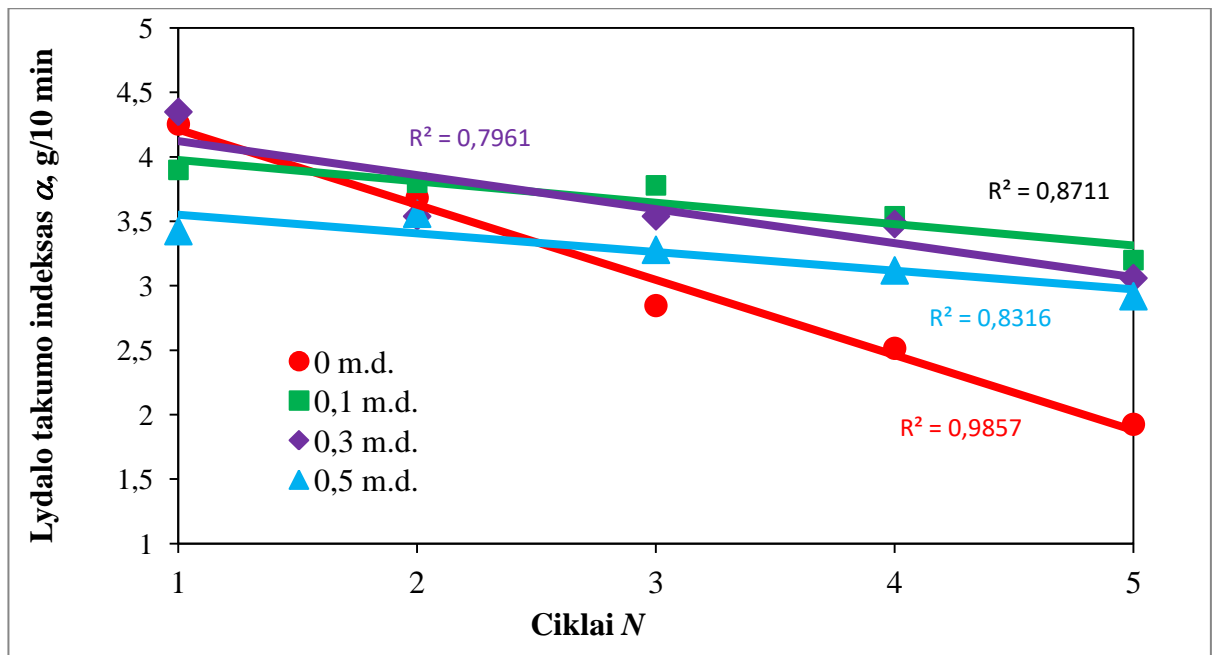


3.12 pav. LLDPE klupdymo deformacijos priklausomybė nuo užpildo kiekio

3.2 Juodųjų suodžių kiekio įtaka LLDPE reologinėms savybėms

Tyrimų tikslas – nustatyti užpildo kiekio įtaką LLDPE lydalo takumo kitimui skirtinguose perdirbimo cikluose, esant 190 °C perdirbimo temperatūrai ir veikiant 2,16 kg dydžio apkrovai.

Didėjant LLDPE kompozicijos perdirbimo ciklų skaičiui N , lydalo takumo indekso vertės mažėja pagal tiesinę priklausomybę (3.13 pav.). Tai susiję su daline polimero destrukcija, ji perdirbant aukštoje temperatūroje. Be to, didėjant užpildo kiekiui, LLDPE klampumas mažėja. Iš 3.13 pav. pateiktų kreivių seka, kad LLDPE kompozicijos be užpildo atveju lydalo takumo indeksas po 5 perdirbimo ciklų sumažėja daugiau kaip 2 kartus (nuo 4,2 g/10 min iki 1,9 g/10 min). Tačiau LLDPE kompozicijos su aktyviais juodaisiais suodžiais atsparumas destrukcijai, kaip ir reikėjo tikėtis, gerokai padidėjo. Įmaišius net nedidelį kiekį juodųjų suodžių (0,1 m.d.), LLDPE lydalo takumo indekso α vertė po $N = 5$ perdirbimo ciklų sumažėjo tik $\sim 1,3$ karto. Toliau didinant juodųjų suodžių kiekį iki 0,5 m.d. atsparumas destrukcijai dar padidėja, bet labai nežymiai ($\sim 11\%$).



3.13 pav. Juodųjų suodžių kiekio įtaka LLDPE lydalo takumui skirtinguose perdirbimo cikluose
($T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$; $m = 2,16\text{ kg}$)

Apibendrinimas. Tyrimai parodė, kad nedidelis juodųjų suodžių kiekis pagerina sukamuoju formavimu gautų LLDPE bandinių atsparumą išorinėms apkrovoms. Įmaišius 0,5 – 1 m.d. padidėja kompozicijos standumas, bet sumažėja jos plastiškumas ir deformacinės savybės. Didesnis užpildo kiekis (>1 m.d.) netolygiai disperguojamas polimerinėje matricioje, sudaro agregatus ir (ar) aglomeratus, kurie veikia kaip įtempių koncentracijų zonos ir defektų formavimosi sritys. Todėl veikiant apkrovai bandiniuose išryškėja defektai. Juodieji suodžiai sumažina LLDPE lydalo klampą, bet gerokai padidina atsparumą terminei destrukcijai. Todėl termoplastinės LLDPE kompozicijos su juodaisiais suodžiais gali būti perdirbamos kelis kartus be didesnio plastiko mechaninių savybių pokyčio.

3.3 Užpildo įtaka gaminių įtempių ir deformacijų būviui

Tyrimų tikslas – nustatyti užpildo įtaką požeminės talpos įtempių ir deformacijų būviui, veikiant eksploatacijos sąlygomis susidarančioms apkrovoms (talpa įmontuota po žeme).

Norint įvertinti gaminio 1 m^3 tūrio požeminės talpos įtempių ir deformacijų būvį bei stabilumą, veikiant gniuždymo apkrovoms, buvo atliktas kompiuterinis modeliavimas baigtinių elementų metodu (BEM).

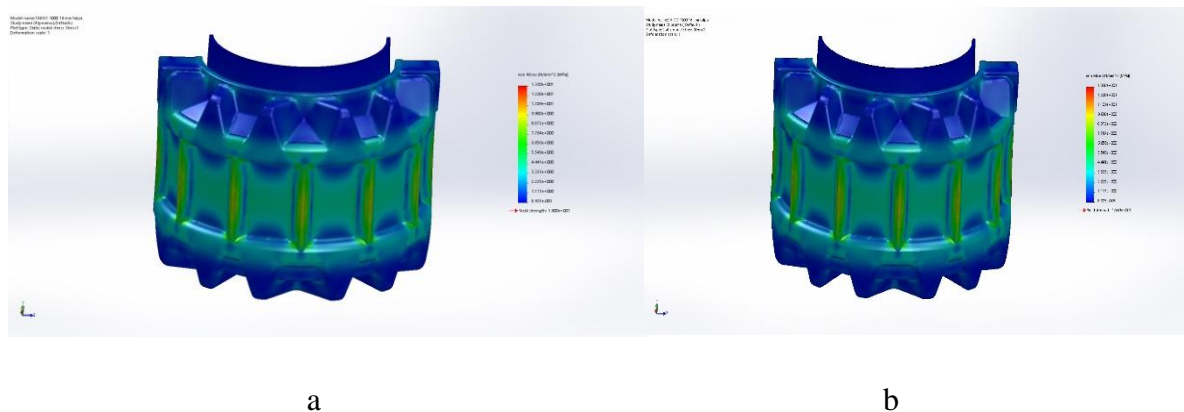
Skaičiuojamajam modeliui panaudoti tempimo ir gniuždymo bandymo metu gauti LLDPE kompozicijos tyrimų rezultatai. Darbe skaičiavimai atlikti LLDPE kompozicijų be užpildo ir su 1 m.d. juodųjų suodžių, t.y. kiekiu, kuriam esant gautos geriausių mechaninių savybių kompozicija.

Modeliuojant buvo pasirinktas izotropinis medžiagos skaičiavimo modelis. Skaičiavimams naudotos medžiagos charakteristikos (Puasono koeficientas [35], kt.) pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Skaičiuotiniame BEM naudotos LLDPE kompozicijų charakteristikos

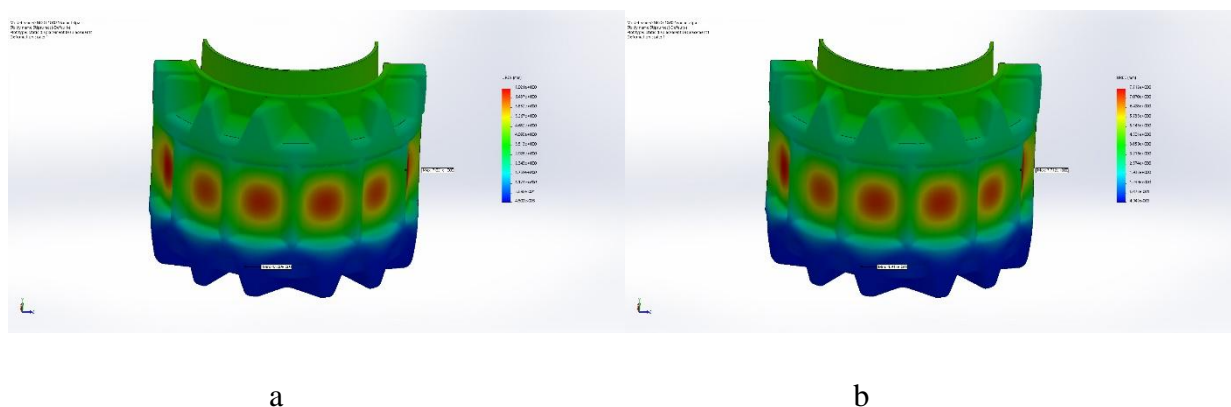
Medžiagos charakteristika	Juodųjų suodžių kiekis LLDPE kompozicijoje:	
	0 m.d.	1 m.d.
Takumo riba, MPa	19,2	19,1
Ribiniai įtempiai σ_{adm} .	14,8	14,7
Jungo modulis tempiant, MPa	915	1005
Jungo modulis gniuždant, MPa	410	649
Puasono koeficientas	0,4	

Skaičiavimams pasirinkta, kad modeliuojamą po žeme įmontuotą požeminę talpą veikia vertikali 18 kN/m^2 dydžio ir horizontali 9 kN/m^2 dydžio grunto apkrovos bei hidrostatinis 10 kN/m^2 dydžio slėgis. „Solidworks Simulation“ programoje pasirinkus „Static“ (Statinis) apkrovos pobūdį ir atlikus skaičiavimus gauta, kad tiek LLDPE kompozicijos be užpildo atveju, tiek su 1 m.d. juodųjų suodžių, įtempiai neviršija $13,3 \text{ MPa}$ (3.14 pav). Taigi, abiem tirtais atvejais tenkinama stiprumo sąlyga $\sigma_{adm} (14,8 \text{ MPa}) > 13,3 \text{ MPa}$ (žr. 3.1 lent.).



3.14 pav. LLDPE skaičiuojamojo modelio įtempių pasiskirstymo laukai, esant skirtingam užpildo kiekiui: a – 0 m.d.; b – 1 m.d.

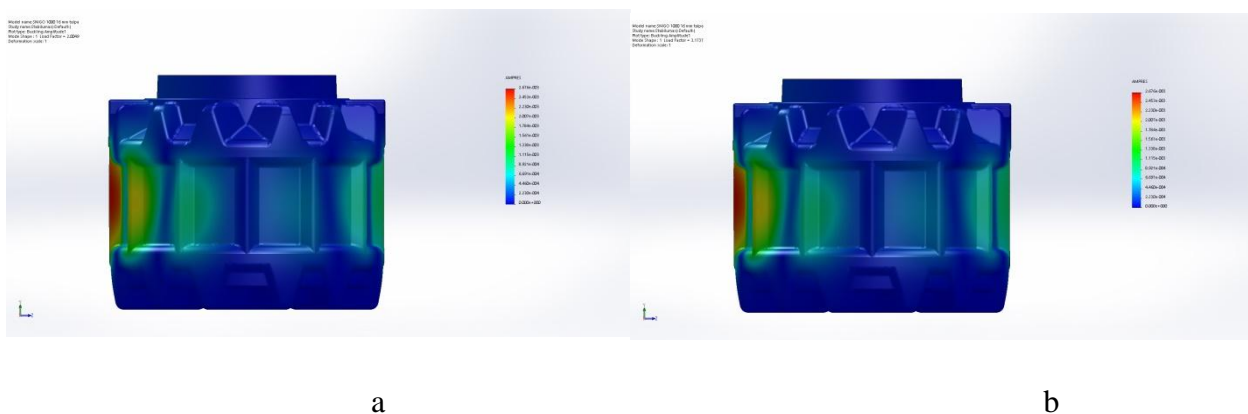
Atlikus poslinkių skaičiavimus gauta, kad neužpildytos LLDPE kompozicijos atveju bendra požeminės talpos deformacija neviršija $7,7 \text{ mm}$, o įmaišius 1 m.d. juodųjų suodžių deformacijos skaičiuojamosios vetės sumažėja iki $7,0 \text{ mm}$ (3.15 pav.).



3.15 pav. LLDPE skaičiuojamojo modelio deformacijų pasiskirstymo laukai, esant skirtingam užpildo kiekiui: a – 0 m.d.; b – 1 m.d.

Požeminės talpos stabilumas buvo vertinamas atsparumu klūpdymui, veikiant pasirinktoms apkrovoms. Skaičiavimams naudotos tos pačios kaip ir vertinant stiprumą veikiančių jėgų vertės ir kraštinės sąlygos. Šiuo atveju „Solidworks Simulation“ programoje buvo pasirinktas „Buckling“ (klūpdymas) apkrovos pobūdis.

Iš 3.16 pav. matyti, jog į LLDPE kompoziciją įmaišius 1 m.d. juodųjų suodžių, požeminės talpos atsparumas klūpdymui padidėja 1,5 karto, lyginant su talpa, pagaminta iš nmodifikuotos kompozicijos, t. y. LLDPE kompozicijos su 1 m.d. juodųjų suodžių atsargos koeficientas padidėja nuo 2 iki 3,17.



3.16 pav. LLDPE skaičiuojamojo modelio skirtingu juodųjų suodžių kiekiu: a – 0 m.d.; b – 1 m.d.

Apibedrinimas. Požeminės talpos eksploatacijos sąlygų modeliavimas parodė, kad 1 m.d. juodųjų suodžių įtakos LLDPE stipriui beveik neturi. Tačiau šis užpildo kiekis padidina talpos standumą (~10%) bei atsparumą klūpdymui – atsargos koeficientas klūpdymui išauga 1,5 karto.

4 IŠVADOS

1. Linijinio mažo tankio polietileno gaminių, suformuotų sukamuoju formavimo metodu, atsparumas išorinėms apkrovoms priklauso nuo sausuoju būdu įmaišytų juodųjų suodžių kiekio.

Nustatyta, kad:

- 0,5 – 1,0 m. d. juodųjų suodžių veikia kaip aktyvus užpildas ir apie 10 % padidina gaminių atsparumą tempimui ir lenkimui;
- 0,5 – 1,0 m. d. juodųjų suodžių atsparumą gniuždymui padidina apie 75 %.

2. Juodųjų suodžių įtaka LLDPE deformacinių savybių kitimo pobūdis priklauso nuo apkrovos pobūdžio. Nustatyta, kad įmaišius 0,5 – 1 m.d. užpildo:

- LLDPE ištįsą trūkimo metu sumažina >7 kartus;
- LLDPE lenkimo deformacija nepriklauso nuo užpildo kiekio;
- LLDPE gniuždymo deformacija sumažėja 1,3 karto.

3. Gauta, kad esant didesniai nei 1 m.d. juodųjų suodžių kiekiui, LLDPE kompozicijoje pradeda formotis užpildo dariniai, kurie sukuria įtempių koncentracijas ir defektų zonas, todėl sausasis užpildo įmaišymas tinkamas ruošti LLDPE kompozicijas, kuriose juodųjų suodžių kiekis neviršija 1 m.d.

4. Juodieji suodžiai sumažina termoplastinės LLDPE kompozicijos klampą ir padidina atsparumą terminei destrukcijai, kas suteikia galimybę tokias kompozicijas perdirbti kelis kartus be didesnio mechaninių savybių pokyčio.

5. Požeminės talpos (1 m³ talpos) elgsenos modeliavimas eksploatacijos sąlygomis parodė, kad efektyvus juodųjų suodžių kiekis (1 m.d.) 1,5 karto padidina gaminio atsparumą klupdymui, 10 % sumažina deformacines savybes, tačiau neturi įtakos jo įtempių būviui.

LITERATŪRA

1. Roy J. Crawford and Mark P. Kearns. Practical guide to rotational moulding. Rapra Technology Limited. 2003. Queen's University, Belfast. 19 p., 93 p., 99 p., 104 p., 103 p., 118 p., 121 p., 122 p.
2. LyondellBasell industries. A guide to rotational molding [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<https://www.lyondellbasell.com/globalassets/documents/polymers-technical-literature/a-guide-to-rotational-molding-5717.pdf?id=13907> >
3. RotoWorld magazine for the rotational molding & plastics design industries [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<https://rotoworldmag.com/about-rotomolding/> >
4. DOWLEX™ NG 2432.10 UE Polyethylene Resin Dow chemical Company [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<https://catalog.ides.com/docselect.aspx?I=70673&E=84152&DOC=DOWTDS&DS=123&DK=STD&DC=en>>
5. Roy J. Crawford, James L. Throne. Rotational molding technology. Plastic Design Library. 2002. Norwich, New York. 23, 106
6. Moayad N. Khalaf. Mechanical properties of filled high density polyethylene. King Saud University. 2011. [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610311002729> >
7. Michael Tolinski. Additives for Polyolefins Getting the Most Out of Polypropylene, Polyethylene and TPO. Second edition, 2015. Plastics Design Library [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
8. Rubén H. López-Bañuelos, Pedro Ortega-Gudiño, Rosa María Jiménez, Rubén González-Núñez, and Jorge R. Robledo-Ortíz. Rotational molding of natural fibers and polyethylene composite materials. 2012. [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.4spepro.org/view.php?source=004326-2012-07-03#B2>>
9. The everyday particle applications [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://monolithmaterials.com/innovative-technology/what-is-carbon-black/>>
10. Team Innovation. Why Some Rotomolded Tanks are Black in Color Carbon Black and Plastics [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<www.polyprocessing.com/pdf/technical/CarbonBlackandPlastics.pdf >
11. R. J. Crawford, A. G. Spence and C. Silva [žiūrēta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwi0->

[7KHy87TAhXFPhQKHdreBK8QFggyMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.centroinc.com%2FHandler.ashx%3FItem_ID%3DD019F21F-0FBF-46BF-AB0F-E92F0635D60F&usg=AFQjCNEtHO8fpVeDGw9hO4eVIhsJTocZ1w](http://www.centroinc.com/2FHandler.ashx%3FItem_ID%3DD019F21F-0FBF-46BF-AB0F-E92F0635D60F&usg=AFQjCNEtHO8fpVeDGw9hO4eVIhsJTocZ1w) >

12. Introduction to History of rotational molding [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.firstratemold.com/about-us/c19-news/introduction-to-history-of-rotational-molding/>>
13. Features of Polyethylene – Major Material of Rotomolding Products [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.toprotomolding.com/features-of-polyethylene-major-material-of-rotomolding-products.html>>
14. Rotational Moulding of PVC Plastisol [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4599/1/ipp_2005_01_1869.pdf >
15. Poly(vinyl chloride) [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://pslc.ws/macrog/pvc.htm>>
16. [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<[http://www.polyone.com/files/resources/Rotational Molding of Vinyl Plastics TAB SC 004.pdf](http://www.polyone.com/files/resources/Rotational_Molding_of_Vinyl_Plastisols_TAB_SC_004.pdf) >
17. Rotational Molding Resins [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<www.polyprocessing.com/pdf/technical/Rotational_molding_resins.pdf>
18. Andžela Šešok. Medžiagos medicinoje. Vilnius. 2012. Technika . 22p.19p.
19. Polyethylene [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://pslc.ws/macrog/pe.htm>>
20. What are the differences between HDPE, LDPE, XLPE, LLDPE, and UHMWPE? [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.usplastic.com/knowledgebase/article.aspx?contentkey=508>>
21. Three Main Properties of Carbon Black [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html>>
22. ENEKA. Rotacinis liejimas [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<https://www.eneka.lt/lt/rotacinis-liejimas/rotacinio-liejimo-technologija-1?catalog=22>>
23. Physicochemical properties [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<http://www.asahicarbon.co.jp/global_site/product/cb/characteristic.html >
24. Printex 60 [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.thecarycompany.com/carbon-black-printex-60-a>>
25. Printex 85 [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<<http://www.thecarycompany.com/carbon-black-printex-85-beads> >

26. Carbon black manufacturing [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą:
<http://www.asahicarbon.co.jp/global_site/product/cb/manufacturing.html >
27. DEOX only pigment [žiūrėta 2017-05-10]. Prieiga per internetą:
<<http://www.demtaskimya.com/urunler-detay.php?grupid=17> >
28. Lietuvos standartas LST EN ISO 527-1 Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 1 dalis. Bendrieji principai.
29. Lietuvos standartas LST EN ISO 527-2 Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 2 dalis. Lietų ir ekstruzinių plastikų bandymų sąlygos.
30. Lietuvos standartas LST EN ISO 178 Plastikai. Lankstomųjų savybių nustatymas.
31. Lietuvos standartas LST EN ISO 604 Plastikai. Gniuždomųjų savybių nustatymas.
32. Takumo nustatymo prietaisas. Prietaiso aprašymas ir eksploatacijos instrukcija. Kaunas. 1994, 11 p.
33. What is Hooke's Law? [žiūrėta 2017-05-10]. Prieiga per internetą:
<<https://www.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/hookes-law/a/what-is-hookes-law> >
34. Lietuvos standartas LST EN 1778:2000. Būdingieji virintinių termoplastikinių konstrukcijų dydžiai. Leidžiamųjų įtempių ir modulių nustatymas projektuojant termoplastikinę įrangą.
35. Polyethylene Properties [žiūrėta 2017-05-10]. Prieiga per internetą:
<<http://www.vinidex.com.au/technical/material-properties/polyethylene-properties/>>
36. Lietuvos standartas LST EN 1825-1:2004 Riebalų skirtuvai. 1 dalis. Konstravimo, veikimo ir bandymo principai, ženklėjimas ir kokybės tikrinimas.
37. Solidworks help buckling [žiūrėta 2017-05-10]. Prieiga per internetą:
<http://help.solidworks.com/2016/english/solidworks/cworks/c_buckling_load_factor.htm >

PRIEDAI

KOMPOZICIJŲ MECHANINIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO REZULTATAI

P1 lentelė. LLDPE kompozicijų bandinių atsparumo tempimui nustatymo duomenys

	Bandinio nr.	Jungo modulis E_t , MPa	Stipris σ , MPa	Ištįsa trūkio metu ϵ , %
Užpildo kiekis 0 m.d.	1	902	19.0	100.8
	2	910	20.2	98.6
	3	927	19.6	90.4
	4	988	19.1	110.8
	5	881	18.9	115.7
	6	882	18.7	104.8
	Vid.	915	19.2	103.5
	S	39.779	0.546	9.019
	v , %	4.347	2.836	8.713
	Δ	45.098	0.619	10.225
	$t\beta$ 0.95	2.777	2.777	2.777
Užpildo kiekis 0,5 m.d.	1	975	20.3	19.9
	2	1048	19.3	19.8
	3	1018	20.0	19.6
	4	1002	20.1	16.7
	5	915		24.8
	6	913		12.7
	Vid.	979	19.9	18.9
	S	55.277	0.403	4.014
	v , %	5.649	2.025	21.206
	Δ	62.667	0.585	4.550
	$t\beta$ 0.95	2.777	3.558	2.777
Užpildo kiekis 1 m.d.	1	1045	19.2	11.4
	2	1054	18.4	16.5
	3	1027	19.3	14.8
	4	1029	19.3	11.3
	5	947	19.4	16.3
	6	928	18.8	14.0
	Vid.	1005	19.1	14.0
	S	53.580	0.381	2.313
	v , %	5.331	1.995	16.493
	Δ	60.744	0.432	2.622
	$t\beta$ 0.95	2.777	2.777	2.777

Užpildo kiekis 1,5 m.d.	1	981	19.8	17.9
	2	975	18.8	18.0
	3	991	19.0	17.4
	4	952	19.1	18.8
	5	969	19.0	16.4
	6	928	19.4	22.3
	Vid.	966	19.2	18.5
	S	22.716	0.375	2.034
	v, %	2.352	1.958	11.016
	Δ	25.753	0.425	2.305
	tβ 0.95	2.777	2.777	2.777
Užpildo kiekis 2 m.d.	1	965	20.3	24.2
	2	992	20.3	22.7
	3	924	-	27.8
	4	924	-	25.8
	5	897	20.1	20.1
	6	943	21.3	21.3
	Vid.	941	20.5	23.6
	S	33.749	0.530	2.867
	v, %	3.587	2.589	12.129
	Δ	38.261	0.942	3.250
	tβ 0.95	2.777	3.558	2.777
Užpildo kiekis 2,5 m.d.	1	938	19.3	22.1
	2	880	19.9	17.9
	3	891	20.5	23.9
	4	975	19.5	26.2
	5	905	21.1	31.5
	6	841	19.8	18.6
	Vid.	905	20.0	23.4
	S	46.703	0.680	5.099
	v, %	5.161	3.399	21.825
	Δ	52.948	0.770	5.781
	tβ 0.95	2.777	2.777	2.777
Užpildo kiekis 3 m.d.	1	-	18.9	19.4
	2	-	18.9	24.8
	3	-	20.0	22.8
	4	898	19.1	21.4
	5	920	20.4	20.5
	6	898	19.8	26.1
	Vid.	905	19.5	22.5
	S	12.702	0.642	2.574
	v, %	1.403	3.290	11.446
	Δ	36.439	0.728	2.918
	tβ 0.95	4.969	2.777	2.777

P2 lentelė. LLDPE kompozicijų bandinių atsparumo lenkimui nustatymo duomenys

	Bandinio nr.	Plotis	Storis	Jungo modulis E_t , MPa	Maks. stipris σ , MPa	Deformacija lenkiant ε , %
		Vid.	Vid.			
Užpildo kiekis 0 m.d.	1	9.1	3.23	822	23.8	6.5
	2	9.1	3.4	846	24.5	6.3
	3	9.1	3.3	875	26.0	6.4
	4	8.8	3.2	811	24.6	6.4
	5	8.9	3.1	820	24.2	6.3
	6	8.3	3.3	814	25.4	6.9
	Vid.			831.3	24.7	6.5
	S			24.704	0.818	0.219
	v, %			2.972	3.308	3.385
	Δ			25.929	0.859	0.230
	t β 0.95			2.571	2.571	2.571
Užpildo kiekis 0,5 m.d.	1	8.1	3.2	871	26.3	6.5
	2	7.5	3.1	967	27.1	5.9
	3	8.5	3.2	995	28.1	6.1
	4	8.5	3.2	924	27.0	5.9
	5	8.5	3.2	940	27.5	6.0
	6	8	3.2	810	24.5	6.7
	Vid.			917.8	26.8	6.2
	S			67.413	1.271	0.336
	v, %			7.345	4.752	5.447
	Δ			70.758	1.334	0.353
	t β 0.95			2.571	2.571	2.571
Užpildo kiekis 1 m.d.	1	9.5	3	791	24.1	6.1
	2	9	3.2	854	25.8	7.5
	3	9	3.3	884	27.2	6.7
	4	10.4	3.4	890	26.4	6.4
	5	10	3.3	897	26.7	6.5
	6	9.8	3.1	903	26.2	6.5
	Vid.			869.8	26.1	6.6
	S			42.216	1.085	0.465
	v, %			4.853	4.164	7.044
	Δ			44.310	1.139	0.488
	t β 0.95			2.571	2.571	2.571

Užpildo kiekis 1,5 m.d.	1	9.9	3	6.1	727	22.0
	2	10	3.5	7.1	717	23.7
	3	9.6	3.1	6.7	764	23.8
	4	9	3.1	6.4	741	24.4
	5	9	3.4	6.8	775	23.9
	6	8.4	3	6.5	721	22.9
	Vid.			6.6	741	23.5
	Variacijos koef. v, %			5.1	3.2	3.6
Užpildo kiekis 2 m.d.	1	9.9	3.3	6.6	783	23.9
	2	10	3.4	6.6	750	23.4
	3	9.3	3.1	6.3	714	22.1
	4	10	3	6.4	598	20.4
	5	8.9	3	6.0	719	22.7
	6	9.8	3	6.7	700	22.9
	Vid.			6.4	711	22.5
	Variacijos koef. v, %			3.9	8.8	5.4
Užpildo kiekis 2,5 m.d.	1	9.2	3.5	7.0	748	24.6
	2	9.8	3.3	6.4	767	24.4
	3	9	3.5	6.6	745	23.4
	4	9.6	3.3	7.2	789	24.6
	5	9.7	3.5	6.9	717	23.3
	6	9	3.5	6.7	733	22.7
	Vid.			6.8	750	23.8
	Variacijos koef. v, %			4.4	3.4	3.4
Užpildo kiekis 3 m.d.	1	9.2	3	6.7	811	24.7
	2	10	3.1	6.7	716	22.7
	3	10	3.3	7.1	710	22.5
	4	10	3	6.3	677	21.5
	5	10	3.4	7.2	776	24.5
	6	10	3	6.4	697	22.3
	Vid.			6.7	731	23.0
	Variacijos koef. v, %			5.4	7.0	5.6

P3 lentelė. LLDPE kompozicijų bandinių atsparumo gniuždymui nustatymo duomenys.

	Bandinio nr.	Jungo modulis E_c , MPa	Stipris s , MPa	Deformacija ϵ , %
Užpildo kiekis 0 m.d.	1	435	20.4	16.8
	2	401	19.8	15.7
	3	401	18.9	15.3
	4	401	21.1	16.6
	Vid.	410	20.0	16.1
	S^2	289.0	0.9	0.5
	S	17.00	0.936	0.720
	v , %	4.151	4.668	4.469
	Δ	27.047	1.489	1.146
	$t\beta$ 0.95	3.182	3.182	3.182
Užpildo kiekis 0,5m.d.	1	721	11.9	18.3
	2	721	11.9	18.0
	3	722	11.8	18.6
	4	714	11.8	18.4
	Vid.	720	11.9	18.3
	S^2	13.7	0.0	0.1
	S	3.70	0.062	0.258
	v , %	0.514	0.520	1.408
	Δ	5.882	0.098	0.410
	$t\beta$ 0.95	3.182	3.182	3.182
Užpildo kiekis 1 m.d.	1	708	18.3	11.6
	2	681	17.4	11.9
	3	516	17.5	11.7
	4	691	17.8	12.4
	Vid.	649	17.7	11.9
	S^2	7986.0	0.2	0.1
	S	89.36	0.403	0.342
	v , %	13.770	2.273	2.881
	Δ	142.179	0.642	0.544
	$t\beta$ 0.95	3.182	3.182	3.182
Užpildo kiekis 1,5 m.d.	1	734	18.5	11.7
	2	670	16.5	11.8
	3	710	18.2	11.9
	4	660	15.8	10.8
	Vid.	694	17.3	11.5
	S^2	1195.7	1.8	0.3
	S	34.58	1.328	0.501
	v , %	4.986	7.698	4.345
	Δ	55.014	2.113	0.798
	$t\beta$ 0.95	3.182	3.182	3.182

Užpildo kiekis 2 m.d.	1	695	17.4	11.6
	2	706	17.6	11.8
	3	703	16.5	11.4
	4	708	17.7	11.8
	Vid.	703	17.3	11.7
	S ²	32.7	0.3	0.0
	S	5.72	0.516	0.189
	v, %	0.813	2.984	1.622
	Δ	9.093	0.821	0.301
	tβ 0.95	3.182	3.182	3.182
Užpildo kiekis 2,5 m.d.	1	470	19.3	15.4
	2	435	17.5	14.7
	3	470	18.9	15.0
	4	435	17.0	15.3
	Vid.	453	18.2	15.1
	S ²	408.3	1.2	0.1
	S	20.21	1.099	0.319
	v, %	4.466	6.050	2.111
	Δ	32.150	1.749	0.507
	tβ 0.95	3.182	3.182	3.182
Užpildo kiekis 3 m.d.	1	703	18.1	12.1
	2	682	17.9	12.2
	3	753	19.2	11.6
	4	620	16.5	12.4
	Vid.	690	17.9	12.1
	S ²	3033.7	1.2	0.1
	S	55.08	1.111	0.354
	v, %	7.988	6.205	2.937
	Δ	87.630	1.768	0.563
	tβ 0.95	3.182	3.182	3.182

KOMPOZICIJŲ REOLOGINIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO REZULTATAI

P4 lentelė. LLDPE kompozicijų lydalo takumo indekso nustatymo duomenys.

Atraižos susidarymo laikas T,s	0 m.d.	Ekstrūduotos medžiagos masė, g	Termoplastų lydalo takumas, g/min	Vidurkis
60	1 ciklas	0,4154	4,154	4,26
		0,472	4,72	
		0,4342	4,342	
		0,3805	3,805	
	2 ciklas	0,3047	3,047	3,68
		0,3855	3,855	
		0,3562	3,562	
		0,398	3,98	
		0,3976	3,976	
	3 ciklas	0,3201	3,201	2,85
		0,2894	2,894	
		0,2571	2,571	
		0,2816	2,816	
		0,2754	2,754	
	4 ciklas	0,2494	2,494	2,52
		0,2589	2,589	
		0,254	2,54	
		0,244	2,44	
	5 ciklas	0,203	2,03	1,93
		0,232	2,32	
0,178		1,78		
0,195		1,95		
0,155		1,55		
	0,1 m.d.			
60	1 ciklas	0,38	3,8	3,90
		0,4	4	
		0,39	3,9	
		0,39	3,9	
	2 ciklas	0,37	3,7	3,80
		0,38	3,8	
		0,38	3,8	
		0,33	3,3	
		0,44	4,4	
	3 ciklas	0,36	3,6	3,78
		0,4	4	
		0,4	4	
		0,37	3,7	
		0,36	3,6	

60	4 ciklas	0,35	3,5	3,54
		0,35	3,5	
		0,37	3,7	
		0,28	2,8	
		0,42	4,2	
	5 ciklas	0,35	3,5	3,20
		0,38	3,8	
		0,26	2,6	
		0,35	3,5	
		0,26	2,6	
60	0,3 m.d.			
	1 ciklas	0,37	3,7	4,35
		0,41	4,1	
		0,45	4,5	
		0,51	5,1	
	2 ciklas	0,36	3,6	3,54
		0,37	3,7	
		0,35	3,5	
		0,35	3,5	
		0,34	3,4	
	3 ciklas	0,28	2,8	3,54
		0,44	4,4	
		0,32	3,2	
		0,4	4	
		0,33	3,3	
	4 ciklas	0,39	3,9	3,48
		0,41	4,1	
		0,3	3	
		0,33	3,3	
		0,31	3,1	
	5 ciklas	0,31	3,1	3,06
		0,29	2,9	
		0,3	3	
		0,3	3	
		0,33	3,3	
0,5 m.d.				
60	1 ciklas	0,32	3,2	3,43
		0,34	3,4	
		0,37	3,7	
		0,34	3,4	
	2 ciklas	0,34	3,4	3,56
		0,35	3,5	
		0,34	3,4	
		0,34	3,4	
		0,34	3,4	
		0,41	4,1	

60	3 ciklas	0,34	3,4	3,28
		0,3	3	
		0,3	3	
		0,35	3,5	
		0,35	3,5	
	4 ciklas	0,34	3,4	3,12
		0,29	2,9	
		0,33	3,3	
		0,33	3,3	
		0,27	2,7	
	5 ciklas	0,29	2,9	2,92
		0,27	2,7	
		0,28	2,8	
		0,29	2,9	
		0,33	3,3	

3 PRIEDAS
NAUDOTŲ MEDŽIAGŲ CHARAKTERISTIKOS