



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Indrė Petuškaitė

Projekto autorė

Lekt. Laura Gegeckienė

Vadovė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Indrė Petuškaitė

Projekto autorė

Lekt. Laura Gegeckienė

Vadovė

Lekt. Ingrida Venytė

Recenzentė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Indrė Petuškaitė

Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Indrės Petuškaitės, baigiamasis projektas tema „Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Indrė Petuškaitė

1. Projekto tema –

Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimo tyrimas

(Lietuviškai)

Optimization Study of Lightweight Product Packaging

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas: atlikti pasirinktos lengvasvorio produkto vidinės pakuotės ir išorinės pakuotės optimizavimą.

Uždaviniai:

1. Suprojektuoti lengvasvorio produkto vidinės pakuotės, kuri yra pagaminta iš gofruotojo kartono, ir išorinės pakuotės, kuri yra pagaminta iš kartono, modelį.
2. Kaip optimizavimo būdą pasirinkti geometrinių matmenų sumažinimą ir nustatyti, kokią įtaką pakuotės dydžio pokytis turi jos stiprumui ir deformacijoms.
3. Apskaičiuoti, koks kiekis medžiagų būtų sutaupomas, sumažinus pakuotės geometrinius matmenis.
4. Atlikti ekonominius skaičiavimus ir įvertinti pakuotės kainos kitimą sumažinus jos geometrinius matmenis.

3. Pradiniai projekto duomenys –

Netaikome

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Programa: SOLIDWORKS. Taikomas geometrinių matmenų optimizavimas.

Projekto autorė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Vadovė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų
programų vadovė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Petuškaitė, Indrė. Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. Laura Gegeckienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybos inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: optimizavimas, kartoninė pakuotė, geometriniai matmenys, lengvasvoris produktas, stiprumas, gniuždymas.

Kaunas, 2020. 60 p.

Santrauka

Siekiant atlikti lengvasvorio produkto kartoninės pakuotės optimizavimo tyrimą, analizuojami galimi pakavimo medžiagos tobulinimo būdai. Nustatyta, kad geometrinių matmenų mažinimas, kaip optimizavimo būdas, naudojamas kartoninėms pakuotėms. Siekiant sumažinti lengvasvorio produkto kartoninės pakavimo medžiagos matmenis, suprojektuotas pakuotės modelis. Atliekamas modelio stiprumo tyrimas, keičiami geometriniai matmenys ir nustatoma, kokią įtaką pakuotės stiprumui turi geometrinių matmenų sumažinimas. Remiantis gautais bandymų rezultatais, pasirenkamas optimaliausias pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas, pagaminama reali produkto pakuotė. Atliekami gniuždymo tyrimai pagamintai pakuotei ir nustatoma, kaip kinta pakuotės stiprumas sumažinus matmenis. Apskaičiuojama, kiek sumažinamas pakuotės plotas, ir, kaip kinta kartoninės pakavimo medžiagos kaina, atlikus pakuotės optimizavimo tyrimą.

Petuškaitė, Indrė. Optimization Study of Lightweight Product Packaging. Master's Final Degree Project / supervisor lect. Laura Gegeckienė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: optimization, cardboard packaging, geometric dimensions, light weight products, strength, load test.

Kaunas, 2020. 60 p.

Summary

In order to perform optimization study on a light weight product in cardboard packaging, possible ways to improve the packaging material are analysed. It has been found that the reduction of geometric dimensions is used as an optimization method for cardboard packaging. A packaging model has been designed to reduce the dimensions of the lightweight product cardboard packaging material. A model strength test is performed, geometric changes are made, and the effect of reduced dimensions to the strength of the package is determined. Based on the results obtained from the test, the optimum reduction of geometric dimensions of the package is selected and the actual package of the product is produced. Load test research is performed on the finished package to determine changes in its strength. The reduction of packaging area is calculated as well as the changes in price of cardboard packaging material after the packaging optimization study is performed.

Turinys

| | |
|--|-----------|
| Lentelių sąrašas | 8 |
| Paveikslų sąrašas | 9 |
| Įvadas | 11 |
| 1. Kartoninės pakavimo medžiagos ir jų optimizavimas | 12 |
| 1.1. Gofruotojo kartono rūšys ir savybės..... | 12 |
| 1.2. Pakuotės projektavimas ir gamyba | 15 |
| 1.3. Kartoninių pakuočių optimizavimo būdai | 16 |
| 1.4. Kartoninių pakuočių optimizavimo kliūtys | 17 |
| 1.5. Kartoninių pakuočių optimizavimo tyrimai | 18 |
| 1.6. Mechaninės kartoninių pakuočių savybės | 20 |
| 2. Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimas..... | 22 |
| 2.1. Pasirinktos lengvasvorio produkto pakuotės specifikacija..... | 22 |
| 2.2. Pakuotės projektavimas | 23 |
| 2.3. Lengvasvorio produkto pakuotės modelio stiprumo tyrimai..... | 27 |
| 2.4. Lengvasvorio produkto pakuotės modelio geometrinių matmenų sumažinimas ir stiprumo tyrimai..... | 31 |
| 2.5. Pakuotės gniuždymo tyrimai | 47 |
| 3. Ekonominė dalis..... | 54 |
| Išvados | 57 |
| Literatūros sąrašas | 58 |

Lentelių sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 lentelė. Lengvasvorio produkto ir jo pakuotės specifikacija..... | 23 |
| 2 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys..... | 23 |
| 3 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys..... | 25 |
| 4 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 1)..... | 32 |
| 5 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 2)..... | 34 |
| 6 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 3)..... | 36 |
| 7 lentelė. Tyrimų rezultatai: vidinės pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas | 38 |
| 8 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 1)..... | 38 |
| 9 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 2)..... | 40 |
| 10 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 3)..... | 42 |
| 11 lentelė. Tyrimų rezultatai: išorinės pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas | 45 |
| 12 lentelė. Pakuotės stiprumo tyrimų rezultatų palyginimas | 46 |
| 13 lentelė. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pradinė pakuotė)..... | 50 |
| 14 lentelė. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pakuotė atlikus optimizavimą)..... | 51 |
| 15 lentelė. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pradinė pakuotė) | 52 |
| 16 lentelė. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pakuotė atlikus optimizavimą)..... | 53 |
| 17 lentelė. Pakuotės ploto duomenys | 55 |
| 18 lentelė. Pakuotės medžiagos rinkos kaina | 55 |
| 19 lentelė. Pakuotės kainos pokytis | 56 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 pav. Dvisluoksnis gofruotasis kartonas [11] | 12 |
| 2 pav. Trijų sluoksnių gofruotasis kartonas [11]..... | 13 |
| 3 pav. F ir E bangos trisluoksnis gofruotasis kartonas [12] | 13 |
| 4 pav. B ir C bangos trisluoksnis gofruotasis kartonas [11] | 14 |
| 5 pav. EF, EB ir BB bangos penkių sluoksnių gofruotas kartonas [11] | 14 |
| 6 pav. BC bangos penkių sluoksnių gofruotasis kartonas [11] | 14 |
| 7 pav. Septynių sluoksnių gofruotasis kartonas [13] | 15 |
| 8 pav. Atliekų hierarchijos modelis [16]..... | 16 |
| 9 pav. Kartoninės sunkiasvorių produktų pakavimo dėžės formos pokytis [25]..... | 18 |
| 10 pav. Esama gofruoto kartono dėžė ir jos modelis [26]..... | 19 |
| 11 pav. Reali gofruoto kartono dėžė ir sukurtas dėžės modelis [26] | 19 |
| 12 pav. Šlyties testas pakuotei iš gofruotojo kartono [12]..... | 20 |
| 13 pav. Lengvasvorio produkto išorinė ir vidinė pakuotė | 22 |
| 14 pav. Išorinės pakuotės modelis | 24 |
| 15 pav. Išorinės pakuotės modelis su vidinėmis kraštinėmis..... | 24 |
| 16 pav. Išorinės pakuotės modelio išklotinė | 25 |
| 17 pav. Vidinės pakuotės modelis..... | 26 |
| 18 pav. Vidinės pakuotės modelis su vidinėmis kraštinėmis..... | 26 |
| 19 pav. Vidinės pakuotės modelio išklotinė | 27 |
| 20 pav. Vidinės pakuotės apkrovos kryptis..... | 28 |
| 21 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas | 28 |
| 22 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas | 29 |
| 23 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas..... | 29 |
| 24 pav. Išorinės pakuotės apkrovos kryptis | 30 |
| 25 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas..... | 30 |
| 26 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas | 31 |
| 27 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas..... | 31 |
| 28 pav. Sumažintas vidinės pakuotės modelis (bandymas 1) | 32 |
| 29 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 1)..... | 33 |
| 30 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 1)..... | 33 |
| 31 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 1)..... | 33 |
| 32 pav. Sumažintas vidinės pakuotės modelis (bandymas 2) | 34 |
| 33 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 2)..... | 35 |
| 34 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 2)..... | 35 |
| 35 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 2)..... | 35 |
| 36 pav. Sumažintas vidinės pakuotės modelis (bandymas 3) | 36 |
| 37 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 3)..... | 37 |
| 38 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 3)..... | 37 |
| 39 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 3)..... | 38 |
| 40 pav. Sumažintas išorinės pakuotės modelis (bandymas 1) | 39 |
| 41 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 1)..... | 39 |
| 42 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 1) | 40 |
| 43 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 1)..... | 40 |
| 44 pav. Sumažintas išorinės pakuotės modelis (bandymas 2) | 41 |

| | |
|---|----|
| 45 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 2)..... | 41 |
| 46 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 2) | 42 |
| 47 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 2)..... | 42 |
| 48 pav. Sumažintas išorinės pakuotės modelis (bandymas 3) | 43 |
| 49 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 3)..... | 43 |
| 50 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 3) | 44 |
| 51 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 3)..... | 44 |
| 52 pav. Vidinės pakuotės modelis prieš geometrinių matmenų sumažinimą (1) ir po geometrinių matmenų sumažinimo (2) | 46 |
| 53 pav. Išorinė pakuotė po geometrinių matmenų sumažinimo ir pradiniais geometriniais matmenimis | 47 |
| 54 pav. Vidinė pakuotė po geometrinių matmenų sumažinimo ir pradiniais geometriniais matmenimis | 47 |
| 55 pav. Gniuždymo tyrimams naudojama įranga | 48 |
| 56 pav. Gniuždymo tyrimo pradžia..... | 48 |
| 57 pav. Gniuždymo tyrimas išorinei pakuotei | 49 |
| 58 pav. Gniuždymo tyrimas vidinei pakuotei | 49 |
| 59 pav. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pradinė pakuotė)..... | 50 |
| 60 pav. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pakuotė atlikus optimizavimą) | 51 |
| 61 pav. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pradinė pakuotė)..... | 52 |
| 62 pav. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pakuotė atlikus optimizavimą)..... | 53 |
| 63 pav. Išorinės pakuotės vaizdas po optimizavimo | 54 |
| 64 pav. Vidinės pakuotės vaizdas po optimizavimo | 54 |

Įvadas

Pakuotė, tai talpa arba produkto apvalkalas, kuris atlieka tokias tris pagrindines funkcijas: apsaugos funkciją, identifikavimo ir rėmimo funkciją. Taip pat pakuotė gali atlikti papildomą patogumo funkciją. Rinkoje vyrauja didelė pakuočių įvairovė, jos gali būti pagamintos iš medžio, plastiko, metalo, kartoninio popieriaus ir kitų medžiagų, pasižyminčių įvairiomis mechaninėmis, cheminėmis, fizikinėmis charakteristikomis ir savybėmis [1].

Šiandienos vartotojai tikisi tokių produktų ar paslaugų, kurie galėtų patenkinti jų poreikius kiek įmanoma mažiau darant poveikį aplinkai. Prekyboje vis labiau reikalaujama mažesnės produktų pakuotės, nes visuomenė nori būti tikra, kad įmonės veikia atsakingai. Taip pat naudojant mažesnių geometrinių parametrų pakuotes yra sutaupomos ir transporto išlaidos, dėl to sumažėja išlaidos gamintojui ir pirkėjui [2].

Reikalavimai pakuotėms yra akcentuojami ir pagrindiniuose Europos dokumentuose, tokiuose kaip direktyva 94/62/EB (dėl pakuočių ir pakuočių atliekų), ši direktyva buvo įgyvendinta visoje Europos Sąjungoje. Direktyvos tikslas yra skatinti atliekų hierarchiją, pasauliniu mastu (kadangi pakuočių atliekos yra vis didesnė visuomenės problema), taip pat užtikrinti didesnę gamintojo atsakomybę [3].

Pakuotės yra skirstomos pagal įvairius kriterijus: paskirtį, sudėtį, naudojimo dažnumą bei medžiagą, iš kurios pagaminta pakuotė. Didžiausią įtaką pakuočių tobulinimui turi produktų kokybės išsaugojimas ir aplinkos apsauga nuo teršimo pakuočių medžiagų atliekomis. Pakuotė potencialų pirkėją turi patraukti spalvingumu, neįprasta forma, originalumu, taip pat suteikti kuo daugiau informacijos apie prekę [4].

Populiariausia medžiaga pakavimui yra kartoninis popierius ir gofruotasis kartonas. Plačiausiai naudojama dėl sąlyginai mažos kainos, transportavimo ir sandėliavimo privalumų, didelio dizaino ir konstrukcijų pasirinkimo, paprastos gamybos bei minimalios taršos. Žaliavos, naudojamos gaminti pakuotes iš popieriaus, yra lengvai perdirbamas produktas, o tai leidžia pakuotes iš kartono priskirti prie ypač ekologiškos medžiagos. Popierius, paveikus klimato sąlygoms, greitai suyra, priešingai plastikui kuris gamtoje gali išbūti per 500 metų [5].

Projekto tikslas: atlikti pasirinktos lengvasvorio produkto vidinės pakuotės ir išorinės pakuotės optimizavimą.

Projekto uždaviniai:

1. Suprojektuoti lengvasvorio produkto vidinės pakuotės, kuri yra pagaminta iš gofruotojo kartono, ir išorinės pakuotės, kuri yra pagaminta iš kartono, modelį.
2. Kaip optimizavimo būdą pasirinkti geometrinių matmenų sumažinimą ir nustatyti, kokią įtaką pakuotės dydžio pokytis turi jos stiprumui ir deformacijoms.
3. Apskaičiuoti, koks kiekis medžiagų būtų sutaupomas, sumažinus pakuotės geometrinius matmenis.
4. Atlikti ekonominius skaičiavimus ir įvertinti pakuotės kainos kitimą, sumažinus jos geometrinius matmenis.

1. Kartoninės pakavimo medžiagos ir jų optimizavimas

Popierius – tai viena seniausių dirbtinių pakavimo medžiagų, kuri aplinkosaugos požiūriu yra labai ekologiška medžiaga. Ši medžiaga yra gaminama iš atsinaujinančios žaliavos – medienos. Viena iš dažniausiai naudojamų pakuočių šiuo metu yra gofruotasis kartonas, kuris priskiriamas popieriui. Gofruotasis kartonas yra pagamintas pagal DIN 55405 standartą, iš vieno ar daugiau gofruotojo popieriaus sluoksnių. Pastaruoju metu popieriaus naudojimas pakavimo tikslams konkuruoja su plastikų pramone. Tačiau popieriaus, kaip pigios, ekologiškos medžiagos, naudojimas pakavimo srityje nemažėja, kadangi skirtingose šalyse popierius sudaro apie 40–60 % visų pakavimo medžiagų [3, 6].

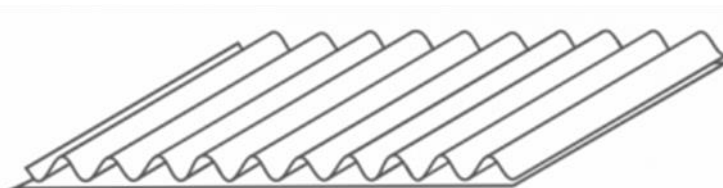
Didelę kartono naudojimo paklausą lemia keli veiksniai: šios medžiagos kokybė, kadangi naudojant gofruotąjį kartoną kaip pakuotę, ši medžiaga užtikrina gerą produkto apsaugą, taip pat minimalios gamybos išlaidos ir, žinoma, galimybė gofruotą kartoną perdirbti. Svarbu tai, jog pakuotės būtų stiprios, tačiau lengvos, be to, jos turėtų būti perdirbamos dėl aplinkos ir ekonominių priežasčių. Reikalavimai pakuočių atliekų perdirbimui, kuris gali būti suprantamas kaip atliekų perdirbimas į žaliavas medžiagoms gaminti, į medžiagas ir kt. yra numatomi standartuose LST EN 13430:2005, LST EN 13432:2002 [7, 8].

1.1. Gofruotojo kartono rūšys ir savybės

Pagrindinis gofruotojo kartono požymis yra banguotas sluoksnis kartono lakšto viduje. Būtent tuo gofruotasis kartonas skiriasi nuo paprasto kartono, kuris yra tiesiog storas, kietas popierius. Gofruotasis kartonas gaunamas klijuojant gofruotus (banguotus) ir lygius popieriaus sluoksnius į vieną. Gofruotojo kartono tipas priklauso nuo suklijuotų sluoksnių skaičiaus, bangos aukščio ir bangos žingsnio ilgio. Dažniausiai naudojamos gofruotojo kartono rūšys: dviejų sluoksnių, trijų sluoksnių, penkių sluoksnių ir septynių sluoksnių gofruotasis kartonas [9, 10].

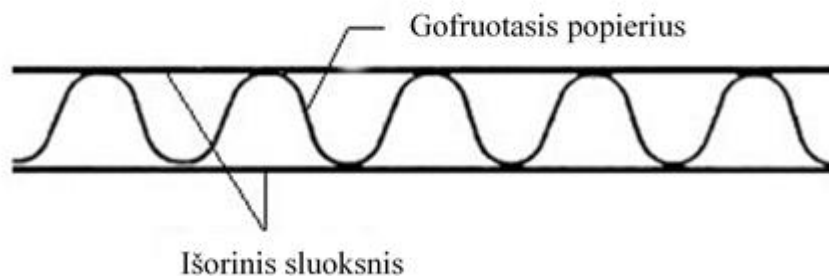
Dviejų sluoksnių gofruotasis kartonas (1 pav.). Sudarytas iš dviejų suklijuotų popieriaus sluoksnių: vienas sluoksnis – kartonas, kitas banguotas (gofruotas) kartonas. Toks kartono tipas visiškai netinka pakavimo ir transportavimo dėžių gamybai, tačiau dėl savo lankstumo ir atsparumo plyšimui jis yra naudojamas kaip vyniojimo medžiaga, o gofruotas sluoksnis yra kaip amortizatorius, būtinas apsaugoti transportuojamus ir sandėliuojamus trapius daiktus, kadangi sluoksnis sugeria smūgius ir apsaugo prekes nuo mechaninių pažeidimų [11].

Dėl dviejų sluoksnių pakuotės svoris yra mažesnis, taip pat ši žaliava tinka perdirbti ir yra ekologiška. Dviejų sluoksnių gofruotasis kartonas dažniausiai tiekiamas rulonais ir naudojamas kaip vyniojimo ir kaip perdengimo medžiaga. Taip pat yra dekoratyvinių dvisluoksnių gofruotojo kartono lakštų, iš kurių yra daromos dovanų dėžutės, reprezentacinės pakuotės, įvairūs dirbiniai. Galimos įvairios dekoratyvinio dvisluoksnių gofruotojo kartono spalvos, taip pat ir įvairūs subangavimai [11].



1 pav. Dvisluoksnis gofruotasis kartonas [11]

Trijų sluoksnių gofruotasis kartonas (2 pav.). Sudarytas iš dviejų išorinių sluoksnių kartono ir vieno tarpinio sluoksniu iš gofruoto popieriaus, šis kartonas yra skirstomas pagal F, E, B ir C bangų tipus. Iš trijų sluoksnių gofruotojo kartono paprastai yra gaminamos kartoninės dėžės [12].



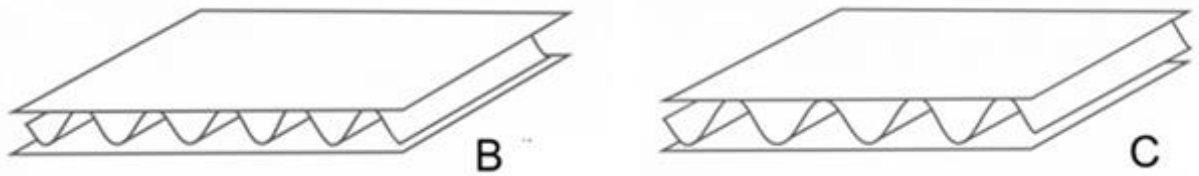
2 pav. Trijų sluoksnių gofruotasis kartonas [11]

- F bangos (3 pav.): trijų sluoksnių gofruotasis kartonas, kurio storis dažniausiai svyruoja tarp 0,9–1,2 mm. Šio tipo kartonas yra naudojamas rečiau nei E tipo mikrogofruotasis kartonas. Jis yra ypač plonas ir dažniausios tokio kartono panaudojimo sritys yra parfumerijos pramonė (vidiniams įdėklams gaminti) bei mažų dekoratyvinių dėžučių gamyba. F bangos kartonas gali būti gaminamas įvairių spalvų. Spalvoti būna ne tik lygūs viršutinis ir apatinis lakšto sluoksniai, bet ir vidinė banga [12].
- E bangos (3 pav.): trijų sluoksnių gofruotasis kartonas. Kitaip dar vadinamas „mikrogofra“, šio tipo kartono storis svyruoja tarp 1,5–2,0 mm. Iš E bangos tipo kartono galima gaminti sudėtinės konstrukcijos, pakankamai tvirtas pakuotes. Mikrogofruotasis kartonas gali būti rudos arba baltos spalvos. Išorinė ir vidinė lakšto pusės gali būti iš perdirbto popieriaus, taip pat išorinė lakšto pusė gali būti ir iš balto kreidinio popieriaus, kuris puikiai tinka dekoratyvinės pakuotės gamybai. E tipo gofruoto kartono lakštai yra itin populiarūs įvairiems prekių perdengimams, apsaugoti paviršiams nuo susibraizymų, plačiai naudojami baldų pramonėje [12].



3 pav. F ir E bangos trisluoksnis gofruotasis kartonas [12]

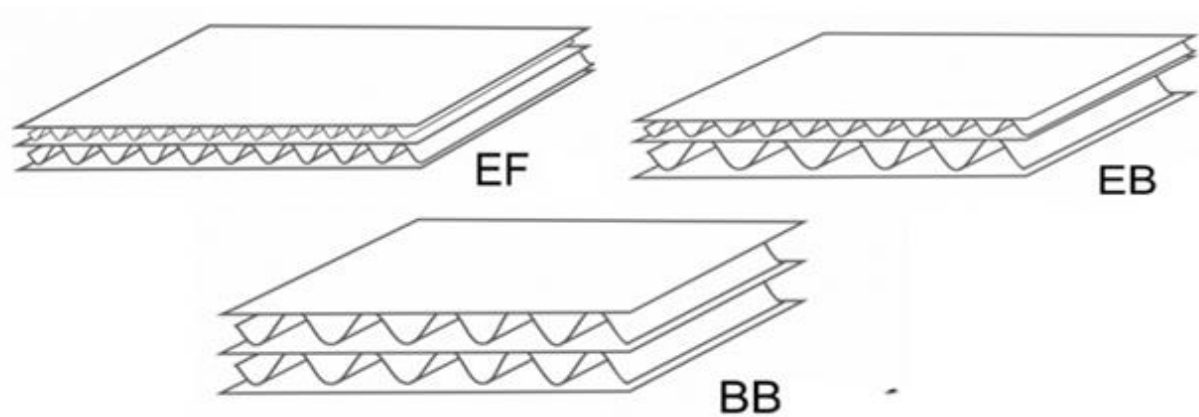
- B banga (4 pav.): šio tipo kartono storis dažniausiai yra 3 mm. B tipo kartonas dažniausiai naudojamas įvairios konstrukcijos vidutinio dydžio kartoninėms dėžėms gaminti, puikiai atlaiko pakankamai sunkius daiktus ar supakuotą produkciją transportavimo metu [12].
- C banga (4 pav.): storis svyruoja tarp 4,0–4,5 mm. Šio tipo gofruotas kartonas yra vienas populiariausių rinkoje. Iš jo gaminama dauguma dėžių, skirtų transportuoti ar sandėliuoti produkcijai įvairiose pramonės šakose. C tipo kartonas yra tvirtas, gerai amortizuoja smūgius, atlaiko didelį svorį, supakuotą produkciją dėžėse galima krauti keliais aukštais [11, 12].



4 pav. B ir C bangos trisluoksnis gofruotasis kartonas [11]

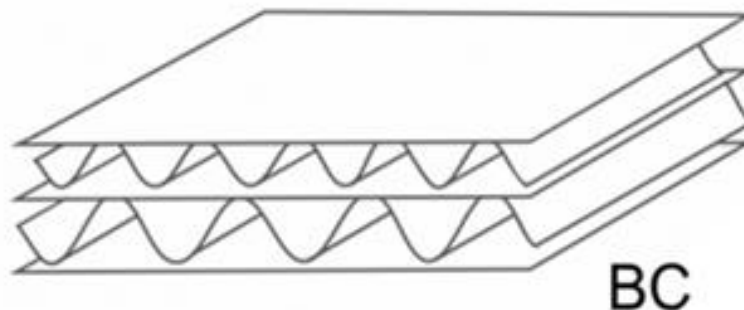
Penkių sluoksnių gofruotasis kartonas. Sudarytas iš dviejų išorinių sluoksnių kartono ir dviejų sluoksnių gofruoto popieriaus bei tarp jų vieno vidinio sluoksnio kartono. Jis skirstomas pagal EF, EB, BB ir BC bangų tipus. Padidinto stiprumo gofruoto kartono dėžės yra gaminamos iš didelio stiprumo penkių sluoksnių gofruotojo kartono [12].

- EF bangos kartono storis yra apie 3 mm, EB bangos apie 5 mm, BB bangos apie 6 mm (5 pav.) [11].



5 pav. EF, EB ir BB bangos penkių sluoksnių gofruotas kartonas [11]

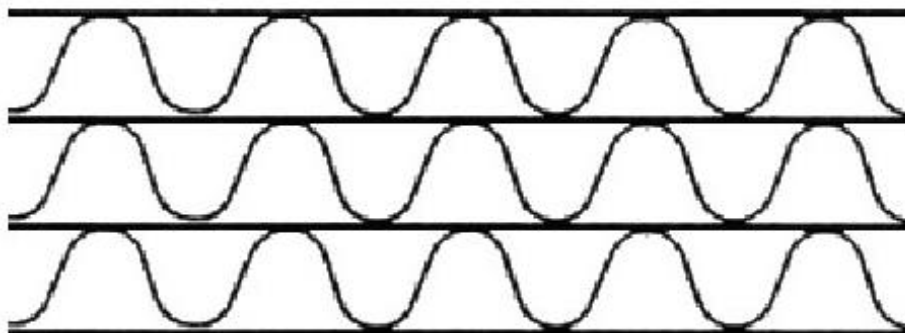
- BC banga (6 pav.), tai penkių sluoksnių gofruotasis kartonas. BC tipo kartonas yra 7 mm storio, gaminamas iš 3 lygaus kartono sluoksnių ir 2 gofruoto kartono sluoksnių. Šio tipo kartonas yra itin tvirtas, atsparus gniuždymui, spaudimui, smūgiams. Kartoninės dėžės, pagamintos iš BC kartono, naudojamos sunkios ir didelės apimties produkcijai transportuoti [12].



6 pav. BC bangos penkių sluoksnių gofruotasis kartonas [11]

Septynių sluoksnių gofruotasis kartonas (7 pav.). Septynių sluoksnių gofruotasis kartonas sudarytas iš dviejų išorinių sluoksnių kartono bei trijų vidinių sluoksnių gofruoto popieriaus bei tarpe jų dviejų vidinių sluoksnių kartono. Padidinto stiprumo gofruotojo kartono dėžės gaminamos iš didelio

stiprumo septynių sluoksnių gofruotojo kartono. Tokie gaminiai paprastai naudojami transportuojant produkciją įprastomis bei esant sunkioms klimatinėms sąlygoms, siekiant apsaugoti krovinius nuo mechaninio poveikio [13].



7 pav. Septynių sluoksnių gofruotasis kartonas [13]

Akivaizdu, kad priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai skiriasi ir gofruoto kartono atsparumas gniuždymui, kuris didėja esant didesniai sluoksnių skaičiui, taip pat ir panaudoto popieriaus kokybės. Gofruotąjį kartoną apibūdina tokios pagrindinės atsparumo charakteristikos – tai atsparumas trūkimui [kPa], atsparumas pradūrimui [J], atsparumas išilginiam gniuždymui [kN/m]. Pagal atsparumą gofruotas kartonas skirstomi į klases, kurios yra apibrėžtos DIN 55468 standarto [9, 12].

1.2. Pakuotės projektavimas ir gamyba

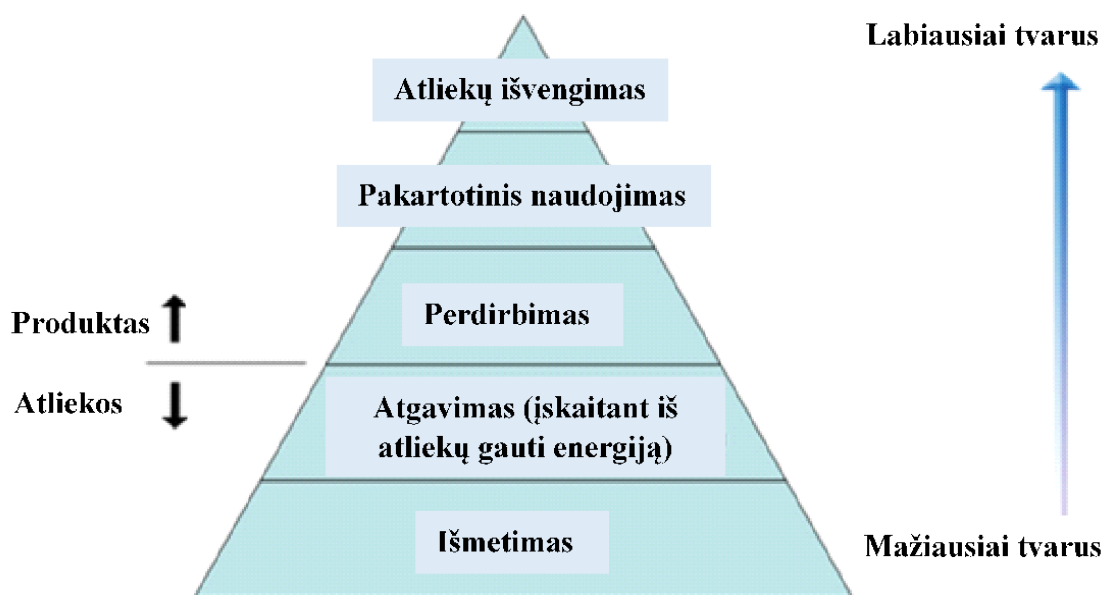
Kartoninės pakuotės kūrėjai yra orientuoti į produkto apsaugą ir vis daugiau dėmesio kreipia į medžiagų naudojimo efektyvumą ir pakavimo medžiagos poveikį aplinkai. Europos teisinės sistemos numatyta, kad projektuojant produktų pakuotes bei pakavimo medžiagas būtų kuo labiau sumažintas medžiagų naudojimas. Galima pastebėti, kad pakuotės iš gofruotojo kartono dizaineriai siekia suderinti produkto apsaugos poreikį, medžiagų naudojimo efektyvumą ir pakavimo medžiagos poveikį aplinkai [14, 15].

Pakuotės projektavimas prasideda nuo jos medžiagos, mechaninių savybių bei konstrukcijos įvertinimo. Tačiau pakuočių projektavimui, jų naudojimui yra taikomi ir teisiniai reikalavimai (ES pakuočių direktyva 94/62/EB), kurių tikslas yra mažinti dėl pakuočių susidarančius atliekų kiekius. Nors Europos teisinės sistemos yra nustatyta, kad reikia kuo labiau sumažinti medžiagų naudojimą projektavimo metu, tačiau reikėtų nepamiršti, kad pakuotė yra reikalinga tam, kad būtų apsaugotas produktas. Teigiama, jog pakuotės turi būti gaminamos taip, kad jų tūris ir svoris būtų minimalūs dydžiai, kurie būtini tam, kad pakuotė atitiktų keliamus reikalavimus. Todėl turėtų būti pasiekiamas optimalus balansas tarp produktų apsaugos ir pakuočių naudojimo, kuris būtų pagrįstas medžiagų sąnaudų ir susidariusių atliekų klausimais [2, 14].

Nuo projektavimo iki pat naudojimo pakuotė gali atitikti Europos atliekų hierarchijos direktyvos principus, pavaizduotus 8 paveiksle. Naudojant šį modelį galima rasti optimalų pakuotės naudojamos medžiagos kiekį ir suprojektuoti aplinkai palankesnę pakuotę. Be to, aplinkai palankaus pakavimo medžiagos dizaino akcentavimas gali būti naudingas tam, kad būtų suprantama, koks poveikis aplinkai yra daromas, kai nėra optimalaus balanso tarp produktui apsaugoti panaudotų medžiagų ir susidariusių atliekų [16, 17].

Šis modelis yra aprašomas trimis procesais [16]:

- Techniniu projektu, tai pakavimo struktūros ir naudojamos medžiagos pakuotei optimizavimas (medžiagų mažinimas), taip, kad būtų suteikta apsauga produktams.
- Projektavimu, tai techninio projekto išplėtimas, šis procesas apima stadijas nuo projektavimo iki vartojimo, taip siekiant sumažinti atliekų kiekį ir apsaugoti produktą.
- Aplinkos dizainu, šio proceso tikslas yra padidinti medžiagų pakartotinį naudojimą ir sumažinti jų šalinimą visame pakuotės gyvavimo cikle.



8 pav. Atliekų hierarchijos modelis [16]

Taip pat pačios gamybos metu didelę įtaką pakuotės kokybei turi medžiagos. Galima teigti, kad gaminat kartonines dėžes labai svarbu atkreipti dėmesį į įvairias kartono savybes, pvz.: atsparumą lenkimui, charakteristikas eksploatuojant kartoną įvairiomis sąlygomis (esant skirtingai oro temperatūrai). Gamintojams yra svarbu, kokios kartono rūšys yra patvariausios skirtingomis eksploatavimo sąlygomis, kadangi gamintojas turi užtikrinti, kad produkcija išliktų nepažeista eksploatavimo metu bei išlaikytų savo pagrindines mechanines savybes [18, 19].

1.3. Kartoninių pakuočių optimizavimo būdai

Analizuotame tyrime [20] yra aprašomi šie optimizavimo būdai – medžiagos geometrinių parametru keitimas bei pakuotės dizaino optimizavimas.

Medžiagos geometrinių parametru keitimas yra pagrįstas principais, kai siekiama išlaikyti gofruotojo kartono stiprumą ir išsaugoti mechanines savybes. Naudojant tokį būdą bus reikalingas mažesnis gofruotojo kartono sunaudojimo kiekis [20].

Gofruotojo kartono pakuotės dizaino optimizavimas yra susijęs su pakuotės dydžio ir proporcijos keitimu bei formavimo procesu. Siekiant užtikrinti, jog pakuotė būtų nedidelė, galima optimizuoti supakuotų prekių išdėstymo skaičių, išdėstymo kryptį, taip pat gofruotojo kartono pakuotės dydį. Gofruotojo kartono dėžių formavimo procesas turi didelį poveikį šių pakuočių kokybei, todėl tokie procesai, kaip pjovimas, spaudimas ar klijavimas, taip pat turėtų būti optimizuoti [20, 21].

Kitame analizuotame tyrime [22] daugiausiai dėmesio yra skiriama sunaudojamų medžiagų mažinimo galimybėms bei pakuotės geometrinį matmenų sumažinimui. Taip pat analizuojami įvairūs būdai, tokie kaip medžiagų efektyvumo didinimas, didesnis energijos efektyvumas bei atliekų išvengimas.

Medžiagų efektyvumo didinimas yra apibrėžiamas kaip priemonė taupyti medžiagas ir atitinkamai sumažinti pirminių medžiagų naudojimą bei išteklių ir atliekų kiekį. Inovacijos ir techninė pažanga leido sumažinti pakuotės svorį, dydį ir medžiagų pasirinkimą, todėl gamintojams yra užtikrinamos mažesnės transporto išlaidos, susidariusių atliekų kiekiai, taip pat mažesnės medžiagų sąnaudos ir mažesnis energijos naudojimas [17, 22].

Remiantis analizuota literatūra [22] prie medžiagų efektyvumo didinimo yra priskiriama tokia pakuotės optimizavimo kategorija, kai pašalinamas nereikalingas kiekis pakavimo medžiagos. Tačiau pakuočių mažinimas pašalinant nereikalingą kiekį pakavimo medžiagų, priklauso nuo įvairių kriterijų, kurie riboja pakuočių optimizavimą pagal svorį arba tūrio mažinimą, taip užtikrinant tinkamas barjerines savybes ir būtiną saugos, higienos ir vartotojo priimtimumo lygį bei standartų laikymąsi. Norint sumažinti naudojamų medžiagų kiekį, kurios skirtos pakuotės gaminimui yra naudojamos tokios kryptys:

- Per didelės pakuotės sumažinimas, tai gausių komponentų pašalinimas nekenkiant kitoms pakavimo funkcijoms tokioms, kaip pakuotės kokybė ir estetika.
- Kitas metodas yra pakuotės matmenų, tūrio ar sudėties pokytis.
- Produktų pakavimas, kai yra mažinama tuščia erdvė/užpildai.
- Kartoninės pakuotės išorinių matmenų sumažinimas: konkretus būdas sumažinti pakuočių medžiagų kiekį yra išlaikyti panašius vidinius matmenis, tuo pačiu mažinant pakuotės išorinius matmenis, suteikiant tokį patį arba didesnę stiprumą. Galimybės, kurias galima išskirti, yra šios: a) vidutinės naudojamos medžiagos storio sumažinimas; b) didelio poveikio aplinkai pakavimo medžiagų mažinimas pakeičiant kita alternatyva; c) sudarant lengvą kompoziciją (kompozitą), derinant įvairias (lanksčias) medžiagas su tinkamomis barjerinėmis savybėmis, kurios palaiko produktų vientisumą.

1.4. Kartoninių pakuočių optimizavimo kliūtys

Pakuočių optimizavimo procesas yra pakankamai sudėtingas, nes yra pripažįstama, kad įvairios kliūtys riboja gamintojų galimybes keisti pakuotes [23]. Teigiama, jog pakuočių optimizavimas yra nuolatinis kompromisų ieškojimas tarp daugelio socialinių, ekonominių ir aplinkos rodiklių. Siekiant geriau suprasti pakuočių modifikacijų tarpusavio priklausomybę analizuotuose tyrimuose [22, 24] yra pateikiamos kelios kliūtys, kurios turi įtakos pakuočių optimizavimo proceso sudėtingumui.

Ekonominės kliūtys. Įgyvendinant esamų pakuočių pokyčius atsiranda investicinių sąnaudų, dėl kurių reikia ilgalaikio kapitalo naudojimo [22].

Rinkos kliūtys. Rinkos mechanizmai ir numatomi pelno dydžiai yra dar vienas veiksnys, darantis įtaką pakuočių pramonės optimizavimo spartai, tai medžiagų kaina, produkto poreikis ir prieštaringi interesai. Didelę dalį pakuočių kainos nulemia žaliavų kaina, o tuo tarpu kuriamos alternatyvios medžiagos yra brangesnės nei įprastinės medžiagos [24].

Žinių kliūtytys. Ribotas supratimas apie pakuočių specifikacijas sukelia sunkumus pakuočių optimizavimui. Teigiama, jog pakuotės dizaineriams yra pateikiamas mažas informacijos kiekis. Tai sukelia nesugebėjimą nustatyti ir priimti papildomų (technologinių) pokyčių, kurie palaiko pakuočių naujoves. Pakuočių pakeitimai dažnai apsiriboja tik į rinką orientuotu pakuotės išorinio dizaino pakeitimu [22].

1.5. Kartoninių pakuočių optimizavimo tyrimai

Analizuojami atlikti optimizavimo tyrimai kartoninėms pakuotėms. Viename iš tyrimų buvo tirtos kartoninės pakavimo dėžės, skirtos sunkiasvoriams produktams. Dėžės yra didesnių geometrinių matmenų, buvo tiriamas kartoninių dėžių stiprumas ir nustatoma, kiek šiam parametru turi įtakos naudojamos medžiagos, kaip rasti optimalų naudojamų medžiagų kiekį, kai yra naudojamas gofruotasis kartonas. Taip pat buvo nustatyta kiek susidaro atliekų keičiant tos pačios kartoninės pakavimo dėžės geometrinius matmenis (9 pav.) [25].

Tyrime [25] buvo nustatyta, kad geometrinių matmenų pokytis nedaro didelės įtakos pakuotės stiprumui. Šiame tyrime buvo tirta sunkiasvorio produkto pakuotė, kurios geometriniai matmenys yra didesni nei legvasvorio produkto pakuotės.



9 pav. Kartoninės sunkiasvorių produktų pakavimo dėžės formos pokytis [25]

Kitame tyrime [26] buvo atliktas kartoninės pakuotės dydžio optimizavimas, taip pat analizuojama dydžio pokyčio įtaka dėžės deformacijoms, stiprumui. Visa gofruotojo lakšto dėžutė sukurta trimis parametrais ilgis, plotis, aukštis (mm).

Naudojant kompiuterinius metodus buvo atlikta eksperimentinė analizė gofruotojo kartono dėžėms. Pirmos pasirinktos dėžės išoriniai matmenys yra 670 mm × 640 mm × 920 mm, o vidiniai – 660 mm × 630 mm × 910 mm, taip pat produkto matmuo 630 mm × 600 mm × 880 mm, produkto svoris 30 kg, todėl galima teigti, jog tyrimas buvo atliktas sunkiasvorių produktų pakuotei, taip pat dėžutės popierius yra 7 sluoksnių. Šiame tyrime buvo pasirinkta dėžė (10 pav.) ir sukurtas jos modelis [26].

Su turimais matmenimis buvo atlikti deformacijų ir įtempių tyrimai, tuomet buvo pakeisti (sumažinti) dėžės išoriniai ir vidiniai matmenys. Išorinis matmuo: 660 mm × 630 mm × 910 mm ir vidinis matmuo: 650 mm × 620 mm × 900 mm, kaip matoma matmenys buvo sumažinti 10 mm. Tuomet buvo atlikti tokie pat tyrimai kaip ir su pirminiais matmenimis, buvo gauti tokie rezultatai: deformacija (mm) – 0,00013422, o įtempiai (kPa) – 671,79. Sumažinus dėžės matmenis, buvo gauti tokie rezultatai: deformacija (mm) – 0,00012088, o įtempiai (kPa) – 478,49 [26].



10 pav. Esama gofruoto kartono dėžė ir jos modelis [26]

Taip pat buvo pasirinkta kita (mažesnė) gofruotojo kartono dėžė (11 pav.) ir atlikti tokie patys tyrimai. Gofruotojo kartono dėžės išoriniai matmenys yra 440 mm × 440 mm × 290 mm, o vidiniai – 430 mm × 430 mm × 280 mm, taip pat produkto matmuo 400 mm × 400 mm × 250 mm, produkto svoris 20 kg, todėl galima teigti, jog tyrimas buvo atliktas sunkiasvorių produktų pakuotei, taip pat dėžutės popierius yra 7 sluoksnių [26].



11 pav. Reali gofruoto kartono dėžė ir sukurtas dėžės modelis [26]

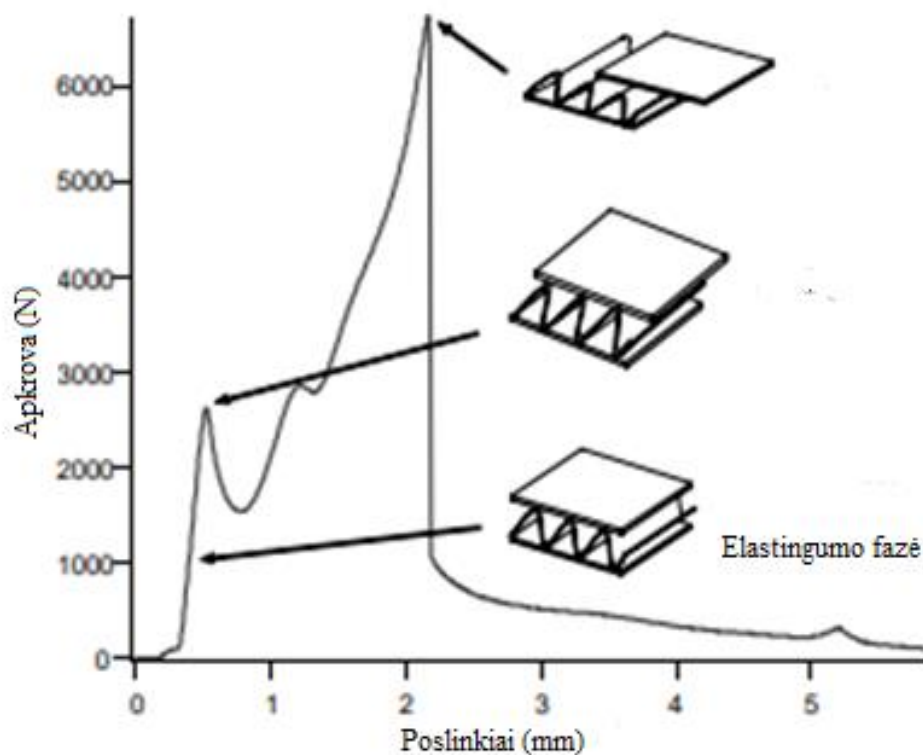
Su turimais matmenimis buvo atlikti deformacijų ir įtempių tyrimai, tuomet buvo pakeisti (sumažinti) dėžės išoriniai ir vidiniai matmenys. Išorinis matmuo: 425 mm × 425 mm × 275 mm ir vidinis matmuo: 415 mm × 415 mm × 265 mm, kaip matoma matmenys buvo sumažinti 15 mm. Tuomet buvo atlikti tokie pat tyrimai kaip ir su pirminiais matmenimis, buvo gauti tokie rezultatai: deformacija (mm) – 0,00006603, o įtempiai (kPa) – 515,16 Sumažinus dėžės matmenis buvo gauti tokie rezultatai: deformacija (mm) – 0,00006839, o įtempiai (kPa) – 382,57 [26].

Nagrinėjant įvairias pakavimui skirtas kartonines dėžes pastebima, kad dėžių deformacija yra nedidelė, o stiprumas pakankamas. Sumažinus matmenis, rezultatų skirtumas yra gana mažas ir yra

leistinose ribose. Iš anksčiau pateikto eksperimento daroma išvada, kad sumažinti matmenys buvo pasirinkti tinkamai ir buvo gautas optimalus dėžės dydis [26].

1.6. Mechaninės kartoninių pakuočių savybės

Analizuotuose tyrimuose [12, 27] buvo atlikti mechaniniai bandymai su trijų sluoksnių gofruotoju kartonu (F bangos tipo). Buvo atliktas tempimas, šlyties testas, siekiant nustatyti tamprumą ir deformacijas (12 pav.). Tyrime buvo nustatytas trijų sluoksnių gofruotojo kartono tampros modulis, kurio skaitinė vertė yra 500 N/mm^2 .



12 pav. Šlyties testas pakuotei iš gofruotojo kartono [12]

Pakuočių mechaninių charakteristikų tyrime [28], buvo atlikti gniuždymo bandymai, kai pakuotės yra veikiamos statinėmis apkrovomis. Buvo ištirtos pakuotės, kurių dugno siūlės suklijuotos ir dugno siūlės prasilenkiančios ir neklijuotos, taip pat stačiakampės formos dėžės ir dėžės kvadratinės formos, pakuotės buvo pagamintos iš 275 g/m^2 gramatūros kartono (išilgine kryptimi).

Sulyginus stačiakampės formos dėžes su klijuotu dugnu yra pastebima, kad didėjant dugno plotui atlaikoma apkrova mažėja tolygiai, tačiau tas pats dėžės lyginant su dėžėmis kurių dugnas yra neklijuotas, apkrova sumažėja beveik 5 kartus, kai yra naudojamas mažiausias dugno plotas, didėjant dugno plotui, dėžių su neklijuotu dugnu apkrova kinta nežymiai. Lyginant kvadratinių matmenų dėžes su panašiu dugno plotu yra pastebima, kad kvadratinės dėžės atlaiko mažesnes apkrovas, o esant klijuotam dugnui, jų atlaikomos apkrovos mažėja tolygiai [28].

Iš aukščiau apžvelgtų rezultatų daroma išvada, kad norint pakuoti sunkesnio svorio gaminius, reikia atkreipti dėmesį ar dėžės yra pakankamai atsparios, jei jų dugno siūlės yra neklijuotos. Taip pat galima pastebėti, kad stačiakampės formos dėžės atlaiko didesnes apkrovas, už panašaus dugno ploto

kvadratinės dėžės. Palyginus visas dėžes, kurių dugnai yra neklijuoti pastebima, kad visų stačiakampių dėžių atlaikomos apkrovos mažėja nežymiai [28].

Tuo tarpu tiriant kartoninių pakuočių atsparumą gniuždymui, buvo atliktas pakuočių pagamintų iš gramatūrų kartonų bei skirtingų gamintojų tyrimas [18], gniuždant kartono liejimo kryptimi ir skersine liejimui kryptimi. Šiame tyrime nustatyta kartono atsparumo gniuždymui priklausomybė nuo kartono liejimo krypties, analizuojamos trijų skirtingų išmatavimų pakuotės – pirma pakuotė: 230 mm × 118 mm × 48 mm iš minkšto kartono, antra pakuotė: 165 mm × 118 mm × 48 mm iš vidutinio minkštumo kartono, trečia pakuotė 137 mm × 77 mm × 37 mm iš kieto kartono, visos pakuotės yra skirtingų gramatūrų [18].

Atlikus tyrimo [18] analizę galima padaryti išvadą, jog pakuotės, kurios yra gniuždomos skersine liejimui kryptimi silpnesnės, tai yra joms sugniuždyti reikalinga mažesnė maksimali apkrova. Taip pat iš pateiktų tyrimų rezultatų galima pastebėti, kad antra pakuotė atsparesnė (reikalinga didesnė maksimali apkrova joms sugniuždyti), nei pirma ir trečia pakuotės, tam įtakos galėjo turėti pakuotės ilgio ir pločio santykis, kadangi, kuo santykis mažesnis, tuo pakuotė standesnė, o šio tyrimo atveju antros pakuotės ilgio ir pločio santykis yra mažiausias lyginant su pirma ir trečia pakuotėmis [18].

2. Lengvasvorio produkto pakuotės optimizavimas

Pakuotės optimizavimui buvo pasirinkta X gamintojo lengvasvorio produkto vidinė ir išorinė pakuotė (13 pav.), skirta kvepalų buteliuko pakavimui. Lengvasvoris produktas yra kvepalų buteliukas, tai parfumerijos prekė. Šis produktas laikomas lengvu, kadangi jo svoris yra iki 1 kg. Dėl tokio produkto svorio, jis yra priskiriamas lengvasvorių produktų kategorijai.



13 pav. Lengvasvorio produkto išorinė ir vidinė pakuotė

2.1. Pasirinktos lengvasvorio produkto pakuotės specifikacija

Produktas yra pagamintas iš stiklo, gaminio svoris su skysčiu yra 297 g, buteliuko ilgis yra 6,5 cm, plotis 4,5 cm, o aukštis yra 9,0 cm. Produkto pakavimo medžiaga susideda iš dviejų dalių, tai vidinės pakuotės ir išorinės pakuotės. Vidinė pakuotė yra pagaminta iš gofruotojo kartono, kuris yra trijų sluoksnių ir F bangos tipo. Vidinės pakuotės svoris yra 25 g, ilgis 9,2 cm, plotis 6,3 cm, o aukštis yra 12,0 cm, taip pat nustatyta, kad gofruotojo kartono storis yra 1 mm. Išorinė pakuotė yra pagaminta iš kartono, kurio storis 0,5 mm, pakuotės svoris yra 24 g, ilgis 9,9 cm, plotis 7,0 cm, aukštis 12,3 cm.

Produkto ir jo pakuotės specifikacija yra pateikta 1 lentelėje. Naudojamas pakuotės optimizavimo būdas, tai išorinės ir vidinės pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas. Lengvasvorio produkto pakuotė buvo pasirinkta dėl to, kad pakuotė yra ženkliai didesnė nei pats produktas, tai galima pastebėti iš duomenų, kurie pateikti 1 lentelėje. Kadangi pačio produkto ilgis yra 6,5 cm, vidinės pakuotės ilgis yra 9,2 cm, skirtumas tarp produkto ir pakuotės ilgio yra 2,7 cm, taip pat produkto plotis yra 4,5 cm, o vidinės pakuotės 6,3 cm, skirtumas tarp produkto ir pakuotės pločio yra 1,8 cm. Galima palyginti produkto ir vidinės pakuotės aukštį, tai produkto aukštis yra 9,0 cm, o vidinės pakuotės 12,0 cm, tai skirtumas tarp produkto ir jo pakuotės aukščio yra 3,0 cm.

1 lentelė. Lengvasvorio produkto ir jo pakuotės specifikacija

| | Lengvasvoris produktas | Išorinė pakuotė | Vidinė pakuotė |
|--------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| Medžiaga | Stiklas | Kartonas | Gofruotasis kartonas (Trijų sluoksnių, F bangos) |
| Svoris, g | 297 (su skysčiu) | 24 | 25 |
| Ilgis, cm | 6,5 | 9,9 | 9,2 |
| Plotis, cm | 4,5 | 7,0 | 6,3 |
| Aukštis, cm | 9 | 12,3 | 12,0 |
| Storis, mm | - | 0,5 | 1,0 |

Sumažinus pakuotės geometrinius matmenis galima sumažinti pakuotei naudojamų medžiagų kiekį, kas būtų naudinga tiek aplinkos atžvilgiu, tiek ekonomiškai. Tačiau reikia nepamiršti, jog pakuotė yra skirta apsaugoti produktą, kad šis išsaugotų visus gamintojo nustatytus reikalavimus, kol produktas pasieks vartotoją. Todėl atliekant pakuotės optimizavimą būtina išlaikyti vienodas mechanines pakuotės savybes, tokias kaip pakuotės stiprumas.

2.2. Pakuotės projektavimas

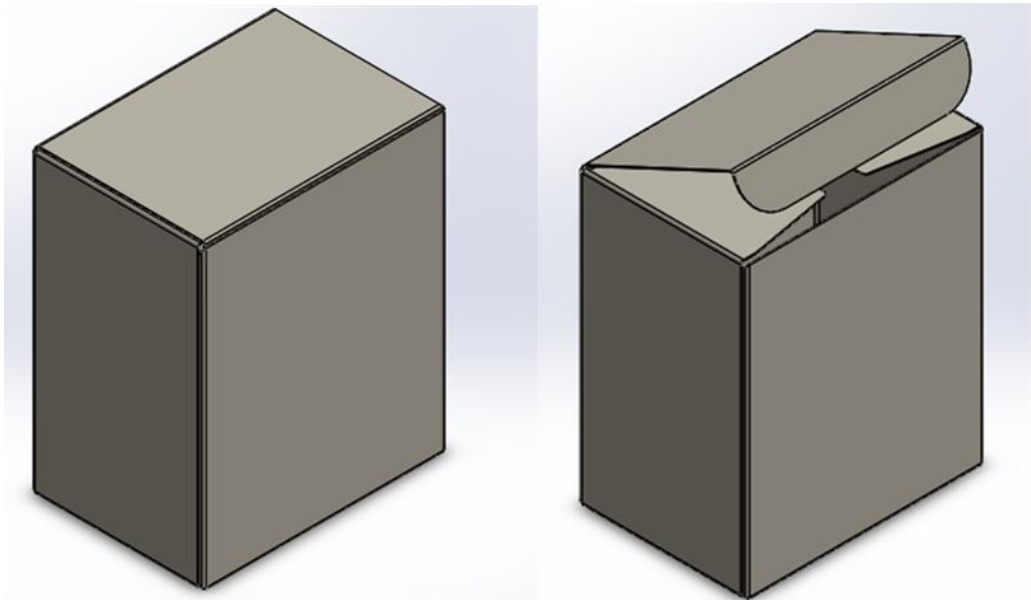
Naudojant automatizuotą trimatę projektavimo sistemą – „SolidWorks“, buvo suprojektuota X gamintojo lengvasvorio produkto išorinė ir vidinė pakuotė. Suprojektuoti pakuočių modeliai yra pateikti 14 ir 17 paveiksluose.

Išorinės pakuotės medžiaga yra kartonas, ši medžiaga yra pasirinkta iš „SolidWorks“ programoje pateiktų projektavimui reikalingų medžiagų sąrašo, medžiagos storis 0,5 mm. Modelio geometriniai matmenys yra tokie pat kaip ir realios pakuotės, tai ilgis 99 mm, plotis 70 mm, aukštis 123 mm. Visi išorinės pakuotės duomenys (geometriniai matmenys, storis, medžiaga), pagal kuriuos yra suprojektuotas modelis pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys

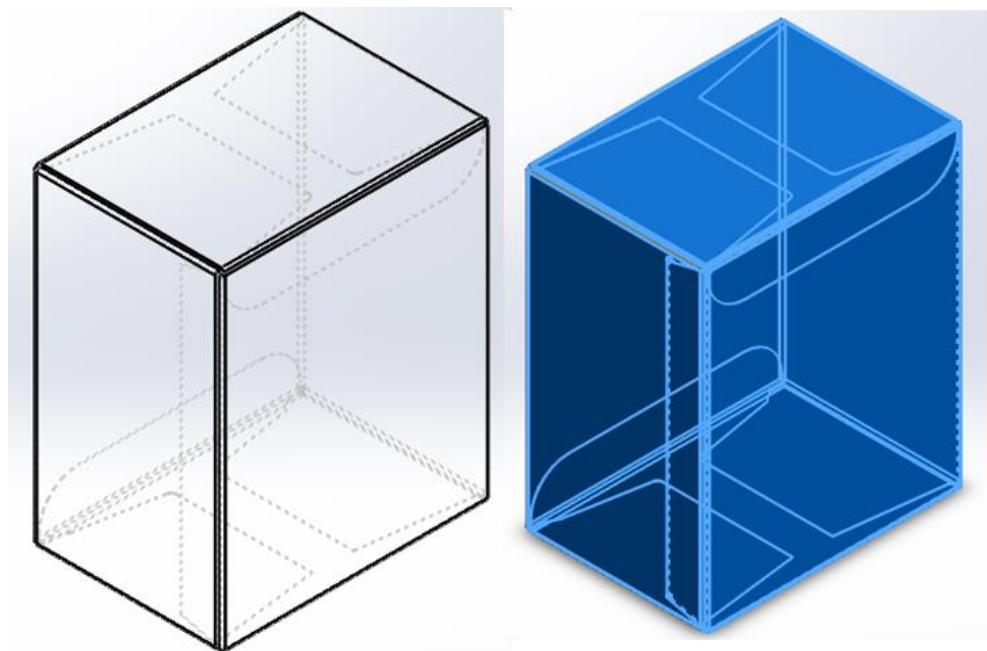
| Medžiaga | Kartonas |
|--------------------|----------|
| Svoris, g | 24 |
| Ilgis, mm | 99 |
| Plotis, mm | 70 |
| Aukštis, mm | 123 |
| Storis, mm | 0,5 |

Žemiau esančiame paveiksle (14 pav.) yra pavaizduotas suprojektuotas išorinės pakuotės modelis. Galima pastebėti, kad paveiksle pateiktas pakuotės modelis, nesiskiria nuo realus pakuotės vaizdo. Taip pat suprojektavus pakuotės modelį, naudojantis programos parametrais, buvo nustatytas pakuotės plotas: 1430,94 cm².



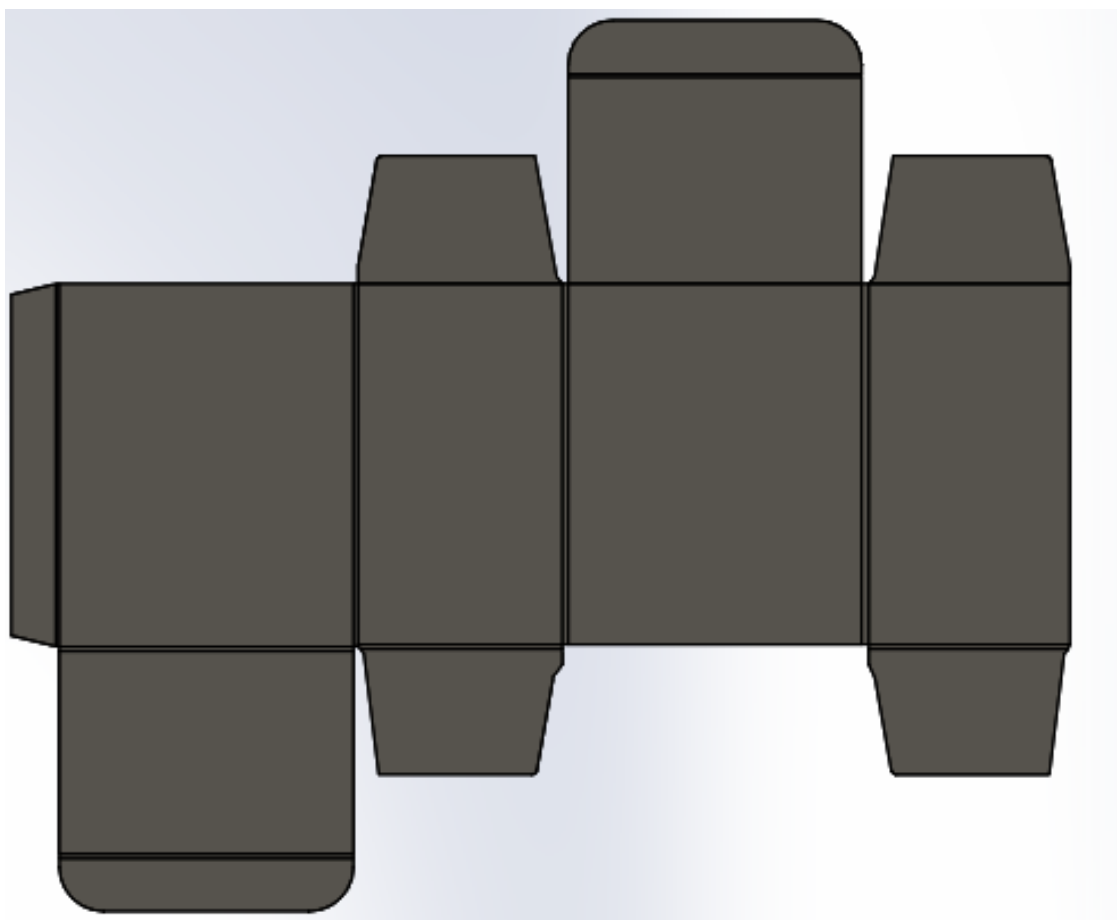
14 pav. Išorinės pakuotės modelis

Taip pat 15 pav., yra pateiktas suprojektuotos išorinės pakuotės modelio vidinių kraštinių vaizdas, kuris įprastai nėra matomas. Iš šio paveikslo galima matyti, kaip sulenkiamos vidinės pakuotės dalys, kuriuose vietose pakuotė yra klijuojama, taip pat galima pastebėti, kad pakuotės dugnas dėl apatinių kraštinių (dešinėje ir kairėje pusėse) yra sutvirtinamas.



15 pav. Išorinės pakuotės modelis su vidinėmis kraštinėmis

Lengvasvorio produkto išorinės pakuotės suprojektuoto modelio išklotinė yra pavaizduota 16 pav. Išklotinėje yra matomos dėžutės lenkimo linijos, taip pat yra matomos visų pakuotės sienelių formos.



16 pav. Išorinės pakuotės modelio išklotinė

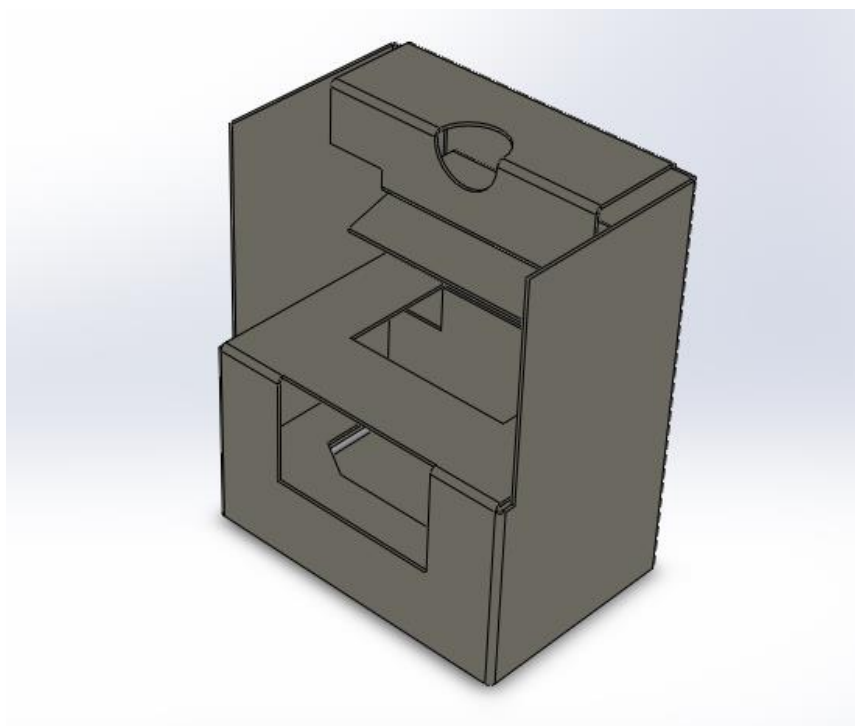
Vidinės pakuotės medžiaga yra gofruotasis kartonas, trijų sluoksnių, ši medžiaga yra pasirinkta iš „SolidWorks“ programoje pateiktų projektavimui reikalingų medžiagų sąrašo, medžiagos storis 1,0 mm. Modelio geometriniai matmenys yra tokie pat kaip ir realios pakuotės, tai ilgis 92 mm, plotis 63 mm, aukštis 120 mm. Visi vidinės pakuotės duomenys (geometriniai matmenys, storis, medžiaga), pagal kuriuos yra suprojektuotas modelis pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys

| Medžiaga | Gofruotasis kartonas |
|--------------------|----------------------|
| Svoris, g | 25 |
| Ilgis, mm | 92 |
| Plotis, mm | 63 |
| Aukštis, mm | 120 |
| Storis, mm | 1,0 |

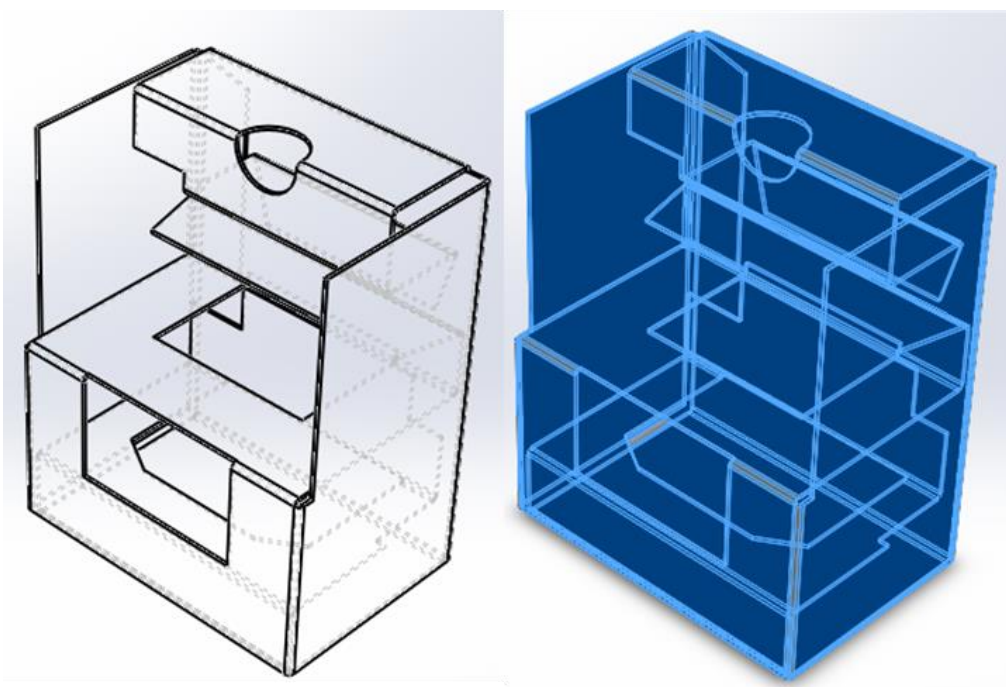
Žemiau esančiame paveiksle (17 pav.) yra pavaizduotas suprojektuotas vidinės pakuotės modelis. Galima pastebėti, kad paveiksle pateiktas pakuotės modelis, nesiskiria nuo realus pakuotės vaizdo.

Suprojektavus pakuotės modelį, naudojantis programos parametrais, buvo nustatytas pakuotės plotas: 1173,08 cm².



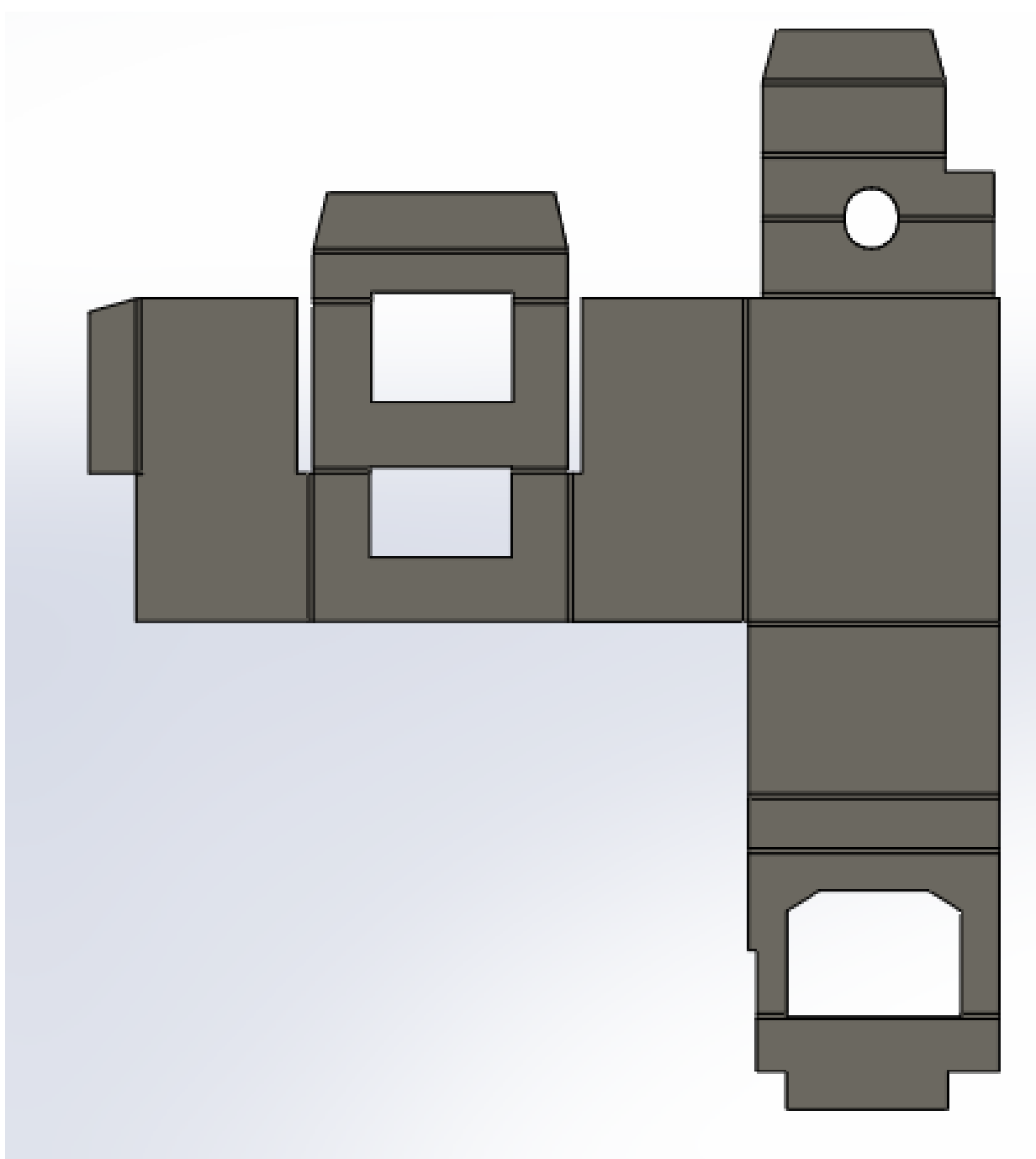
17 pav. Vidinės pakuotės modelis

Taip pat 18 pav., yra pateiktas suprojektuotos vidinės pakuotės modelio kraštinių vaizdas, kuris įprastai nėra matomas. Iš šio paveikslo galima matyti, kaip yra sulenkiamos vidinės pakuotės dalys, kuriuose vietose pakuotė yra klijuojama, taip pat galima pastebėti, kad visas produkto svoris tenka pakuotės dugnui, kadangi visos kitos pakuotės dalys yra skirtos tam, kad produktas būtų prilaikomas ir pakuotėje stovėtų tvirtai.



18 pav. Vidinės pakuotės modelis su vidinėmis kraštinėmis

Lengvasvorio produkto vidinės pakuotės suprojektuoto modelio išklotinė yra pavaizduota 19 pav. Išklotinėje yra matomos pakuotės lenkimo linijos, taip pat galima nustatyti tikslias sienelių iškirtime vietas. Pateiktame paveiksle yra matomos visos pakuotės sienelių formos.

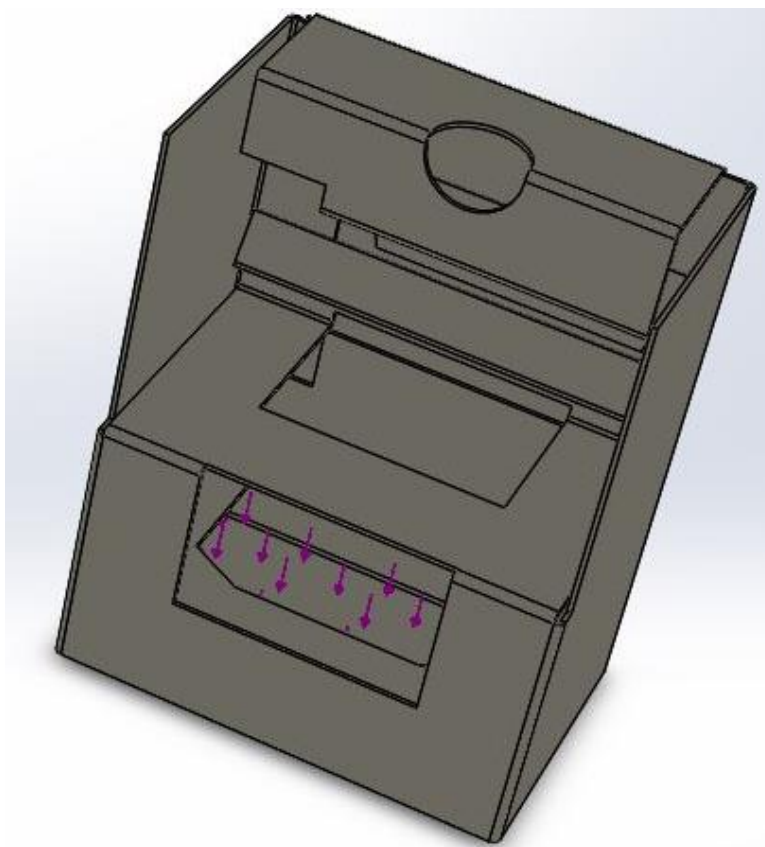


19 pav. Vidinės pakuotės modelio išklotinė

2.3. Lengvasvorio produkto pakuotės modelio stiprumo tyrimai

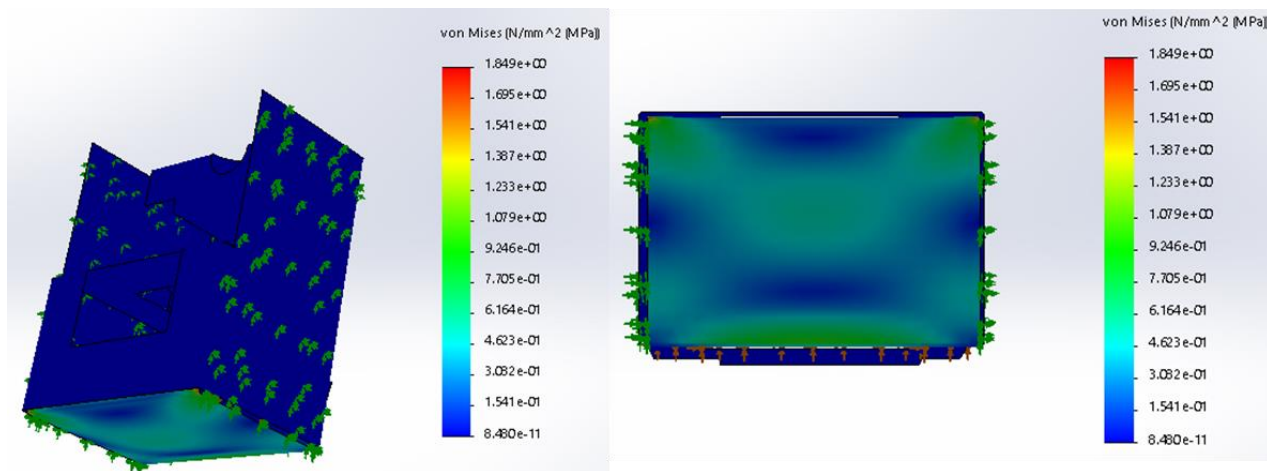
Suprojektavus X gamintojo lengvasvorio produkto išorinę ir vidinę pakuotę, buvo atlikti stiprumo tyrimai, gauti rezultatai pateikti žemiau esančiuose paveiksluose (20–27 pav.).

Vidinė pakuotė. Vidinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Žemiau esančiame paveiksle (20 pav.) yra pateiktas vaizdas, kaip vidinės pakuotės dugnas yra veikiamas jėgos, nustatyta skaitinė jėgos vertė yra 2,91 N.



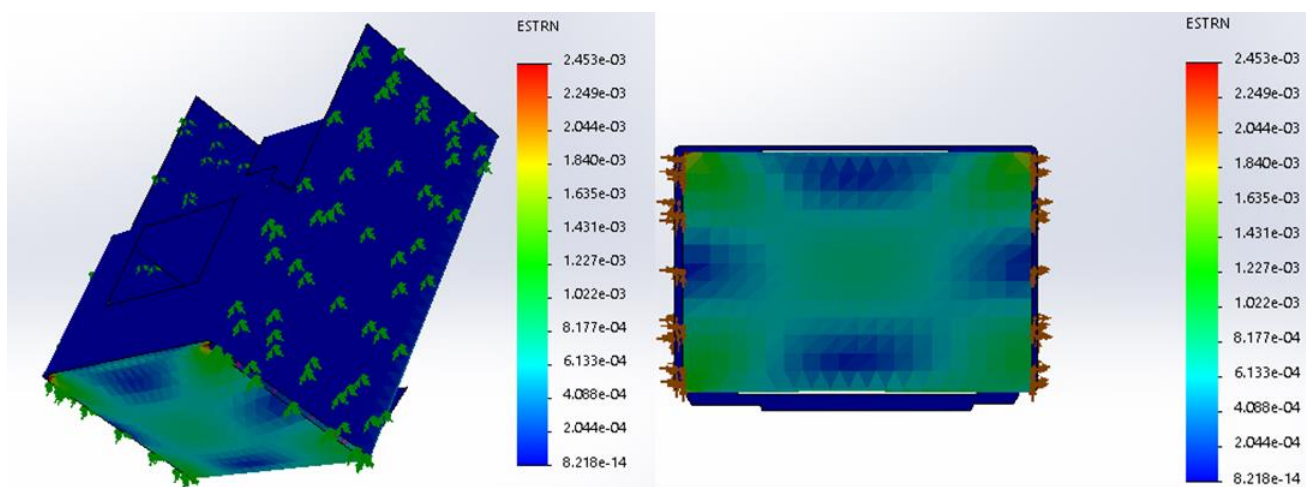
20 pav. Vidinės pakuotės apkrovos kryptis

Pakuotės įtempių vaizdas yra pateiktas 21 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempiai siekia 1,849 MPa, o vidutinė įtempių skaitinė vertė yra 0,925 MPa. Iš paveikslo matyti, kad pakuotės dugno centre ir kraštuose vyrauja vidutinė įtempių skaitinė vertė, tik kraštinių kampuose, nedideliame plote, galima pastebėti, kad susidaro maksimalūs įtempiai.



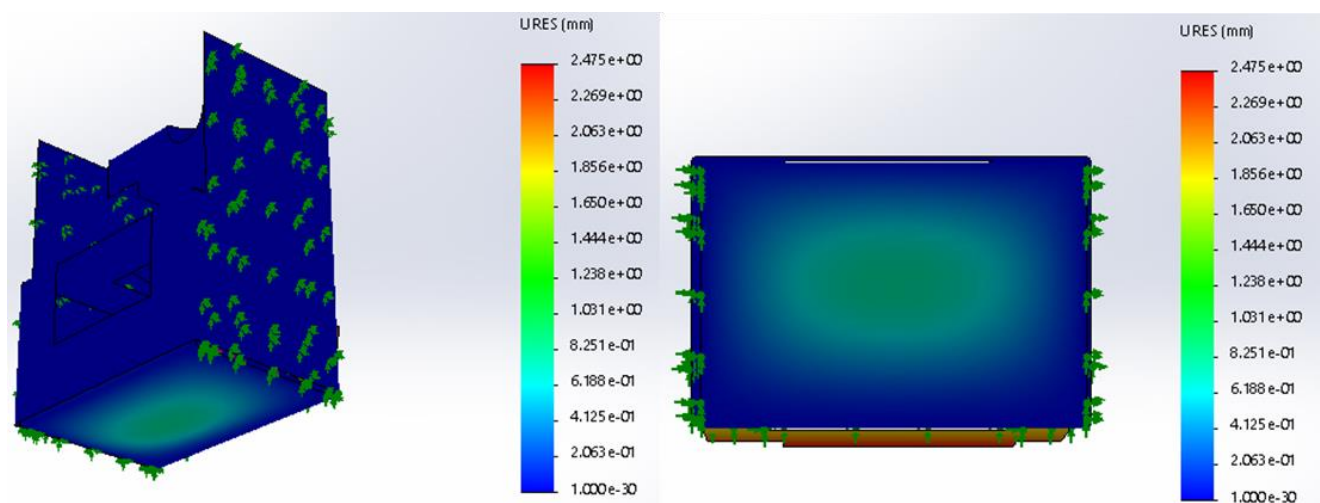
21 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas

Taip pat 22 pav. yra pavaizduotas vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiamas dėžutės dugno centras ir kampai. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $1,227 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $2,453 \cdot 10^{-3}$. Tačiau, kaip matyti iš pateikto paveikslo, pakuotės dugne susidariusios deformacijos nesiekia maksimalios reikšmės.



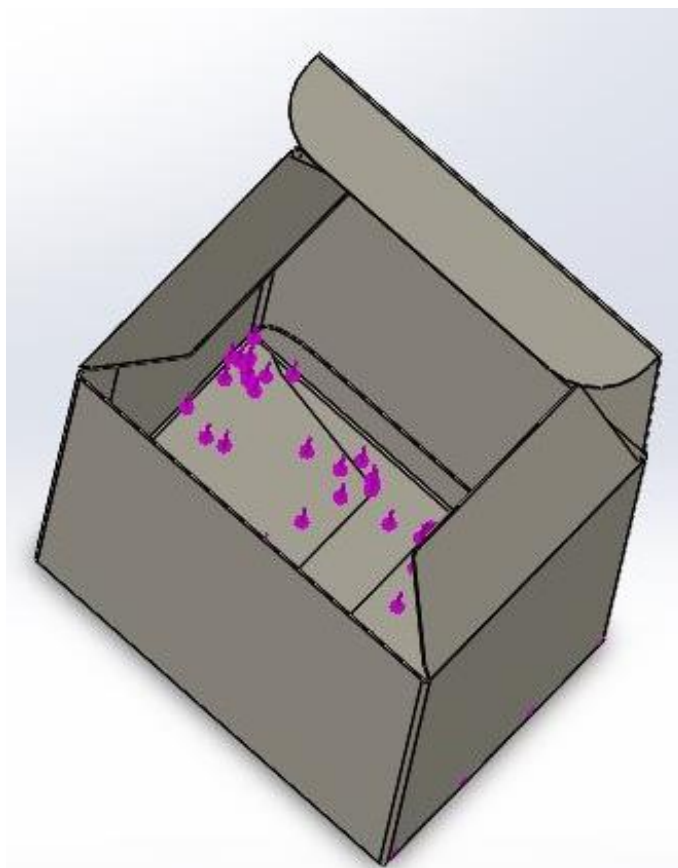
22 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 23 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 2,475 mm, o vidutiniai 1,238 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras, tačiau čia poslinkių vertė yra vidutinė, tai yra 1,238 mm.



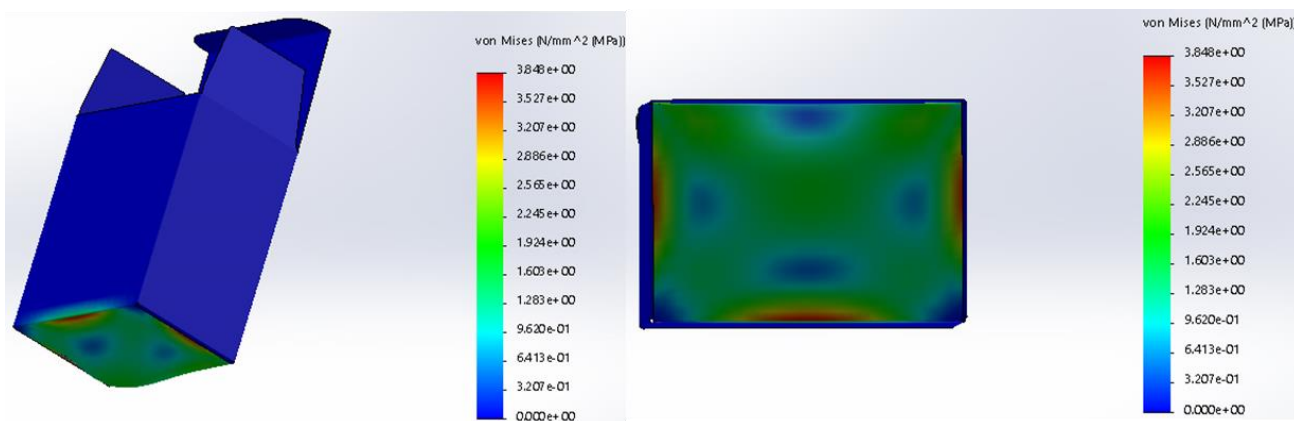
23 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas

Išorinė pakuotė. Išorinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g) ir vidinės pakuotės svorio (25 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Žemiau esančiame paveiksle (24 pav.) yra pateiktas vaizdas, kaip vidinės pakuotės dugnas yra veikiamas jėgos, nustatyta skaitinė jėgos vertė yra 3,16 N.



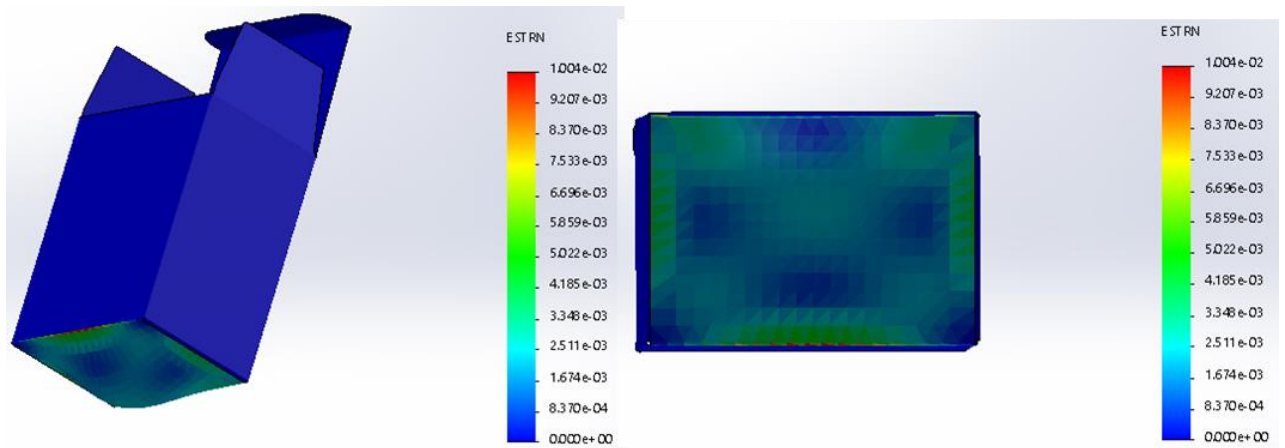
24 pav. Išorinės pakuotės apkrovos kryptis

Pakuotės įtempių vaizdas pateiktas 25 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempiai siekia 3,848 MPa, o vidutinė įtempių skaitinė vertė yra 1,924 MPa. Iš paveiklo matyti, kad pakuotės dugno centras yra veikiamas vidutinės įtempių skaitinės vertės. Tačiau yra matoma, kad maksimalūs įtempiai pasiskirsto pakuotės dugno trejose kraštinėse, tai dešinėje ir kairėje pusėje bei apatinėje kraštinėje.



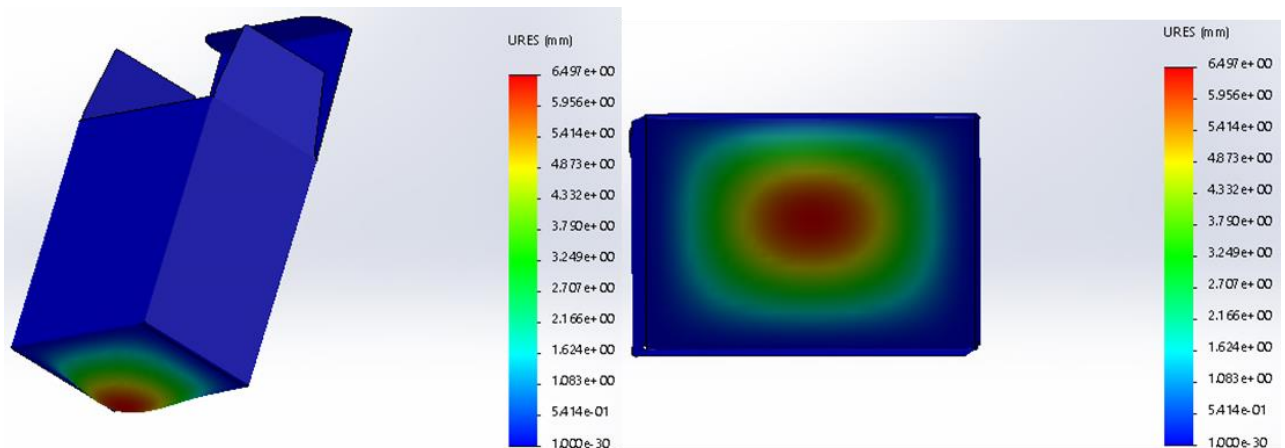
25 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas

Taip pat 26 pav. yra pavaizduotas išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiami dėžutės dugno kampai. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $5,022 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $1,004 \cdot 10^{-2}$. Kaip matoma iš pateikto paveiklo, tai pakuotės dugno deformacijos nesiekia maksimalios reikšmės.



26 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 27 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 6,497 mm, o vidutiniai 3,249 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras, čia vyrauja maksimalūs poslinkiai, aplink šį tašką yra išsidėstę vidutiniai poslinkiai, tai 3,249 mm.



27 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas

2.4. Lengvasvorio produkto pakuotės modelio geometrinių matmenų sumažinimas ir stiprumo tyrimai

Atlikus stiprumo tyrimą yra mažinami geometriniai tiek vidinės, tiek išorinės pakuotės matmenys, nes pasirinktas toks pakuotės optimizavimo būdas. Mažinant geometrinius pakuotės matmenis yra stebimas pakuotės stiprumo kitimas, kadangi siekiama kiek galima labiau sumažinti pakuotę, nedarant įtakos jos stiprumui.

Lengvasvorio produkto vidinei pakuotei buvo atlikti trys geometrinių matmenų mažinimo bandymai, kiekvienam bandymui buvo atliktas stiprumo tyrimas, nustatytos įtempių ir deformacijų skaitinės vertės. Išorinei lengvasvorio produkto pakuotei, taip pat buvo atlikti trys geometrinių matmenų mažinimo bandymai, kiekvienam bandymui buvo atliktas stiprumo tyrimas bei nustatytos įtempių ir deformacijų skaitinės vertės. Tačiau išorinės pakuotės matmenys buvo mažinami remiantis vidinės pakuotės geometriniais matmenimis, kadangi vidinė pakuotė su produktu yra pakuojama į išorinę pakavimo medžiagą.

Vidinė pakuotė. Atlikti 3 bandymai mažinant vidinės pakuotės geometrinius matmenis (duomenys pateikti 4–6 lentelėse), gauti rezultatai pavaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose (28–39 pav.).

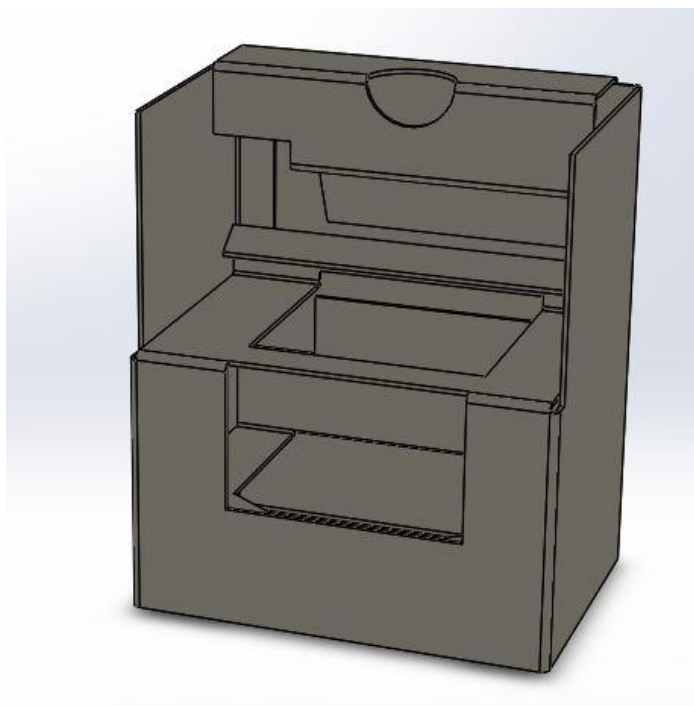
- *Bandymas 1:*

Pirmojo bandymo metu vidinės pakuotės matmenys yra sumažinami. Ilgis sumažintas iki 90 mm, plotis iki 60 mm, aukštis iki 110 mm. Pakuotės storis yra nekeičiamas, kadangi keičiant storį, pasikeistų ir mechaninės pakuotės savybės.

4 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 1)

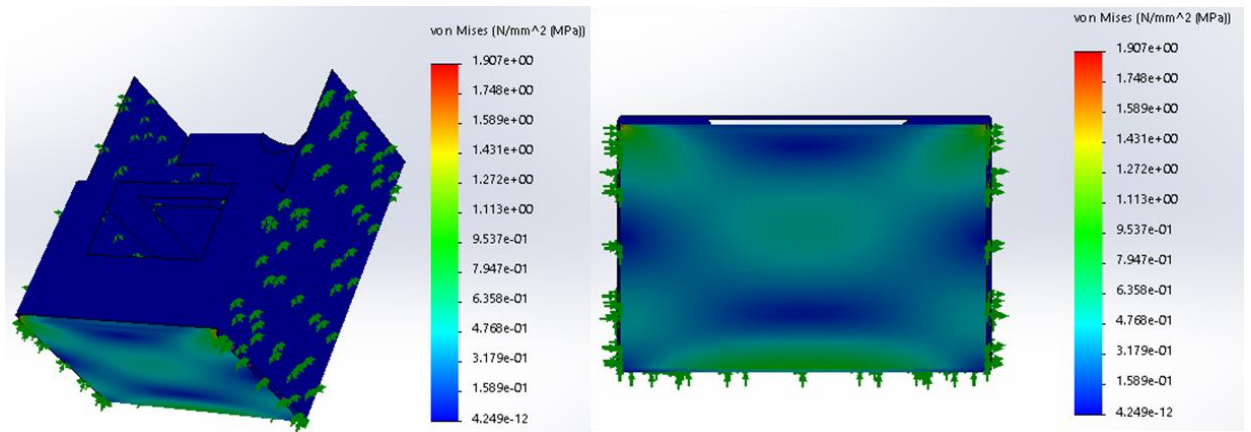
| Medžiaga | Gofruotasis kartonas |
|-------------|----------------------|
| Ilgis, mm | 90 |
| Plotis, mm | 60 |
| Aukštis, mm | 110 |
| Storis, mm | 1,0 |

Žemiau esančiame paveiksle (28 pav.) yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis, skirtas atlikti bandymui 1. Sumažinus modelio matmenis (4 lentelė), taip pat sumažėja ir pakuotės plotas. Nustatyta, kad pakuotės plotas yra 1020,35 cm².



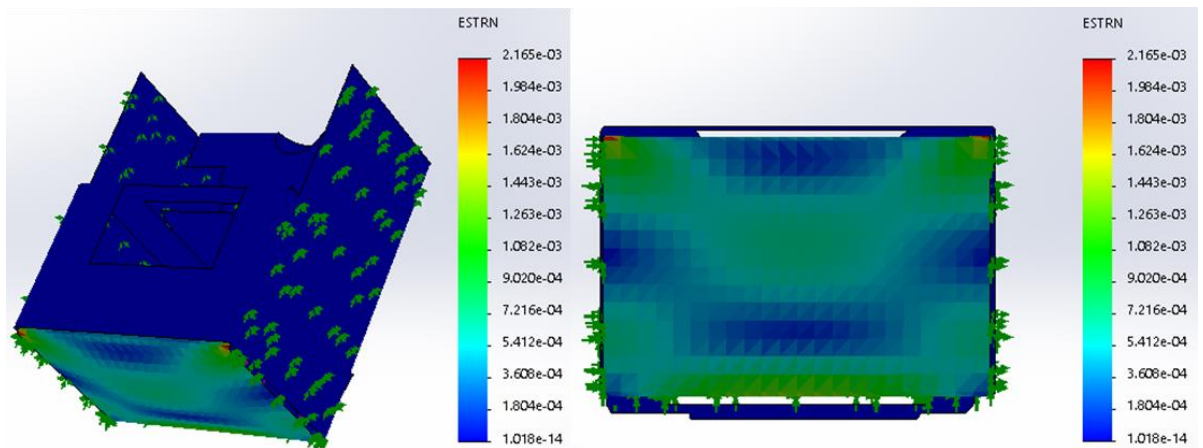
28 pav. Sumažintas vidinės pakuotės modelis (bandymas 1)

Vidinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Pakuotės įtempimų vaizdas pateiktas 29 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempimai siekia 1,907 MPa, o vidutinė skaitinė vertė yra 0,954 MPa. Galima pastebėti, kad įtempimai labiausiai veikia pakuotės dugno centrą, kampus ir apatinę kraštinę, tačiau įtempimų skaitinės vertės nesiekia maksimalių verčių.



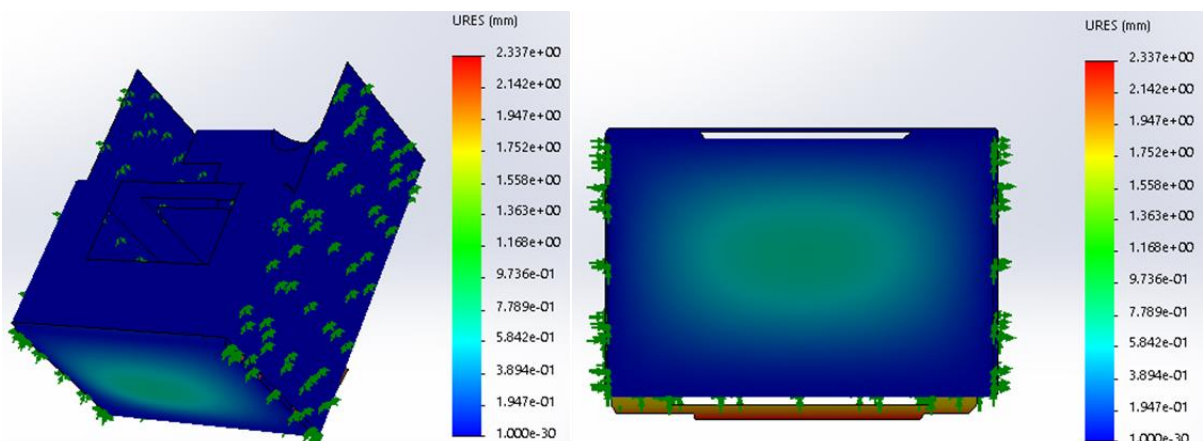
29 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 1)

Taip pat 30 pav. yra pavaizduotas vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiamas dėžutės dugno centras ir kampai. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $1,082 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $2,165 \cdot 10^{-3}$. Matoma, kad deformacijos vertė nesiekia maksimalios, vyrauja vidutinis deformacijų pasiskirstymas.



30 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 1)

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 31 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 2,337 mm, o vidutiniai 1,168 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras, čia vyrauja vidutinė poslinkių vertė.



31 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 1)

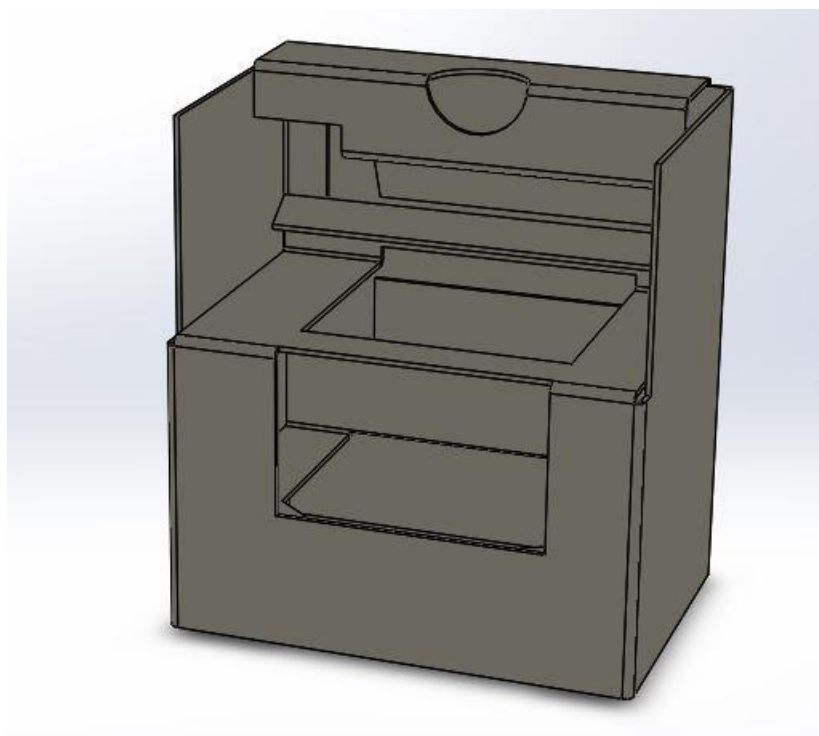
- *Bandymas 2:*

Antrojo bandymo metu vidinės pakuotės matmenys yra dar kartą sumažinami. Ilgis sumažintas iki 88 mm, plotis iki 58,5 mm, aukštis iki 100 mm. Pakuotės storis yra nekeičiamas, kadangi keičiant storį, pasikeistų ir mechaninės pakuotės savybės.

5 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 2)

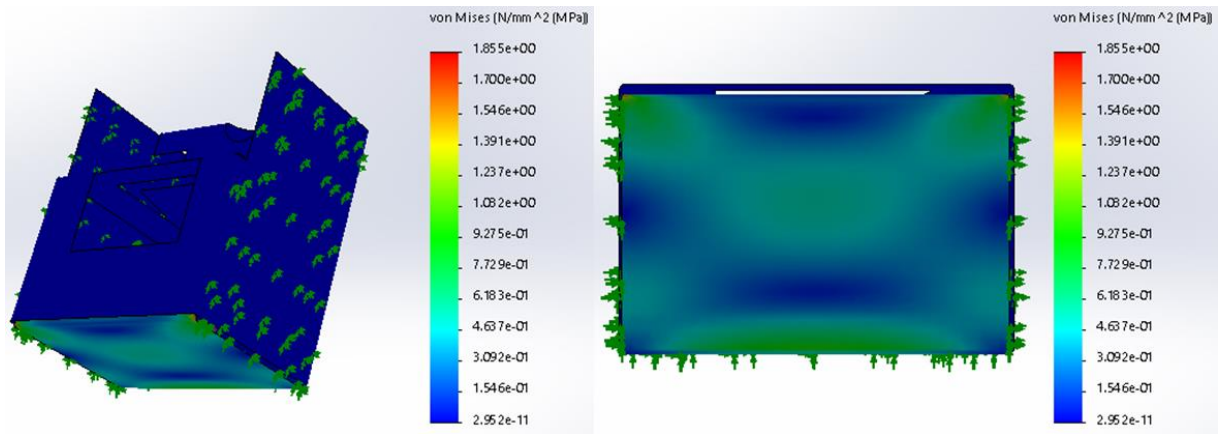
| Medžiaga | Gofruotasis kartonas |
|-------------|----------------------|
| Ilgis, mm | 88 |
| Plotis, mm | 58,5 |
| Aukštis, mm | 100 |
| Storis, mm | 1,0 |

Žemiau esančiame paveiksle (32 pav.) yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis, skirtas atlikti bandymui 2. Sumažinus modelio matmenis (5 lentelė), taip pat sumažėja ir pakuotės plotas. Nustatyta, kad pakuotės plotas yra 935,90 cm².



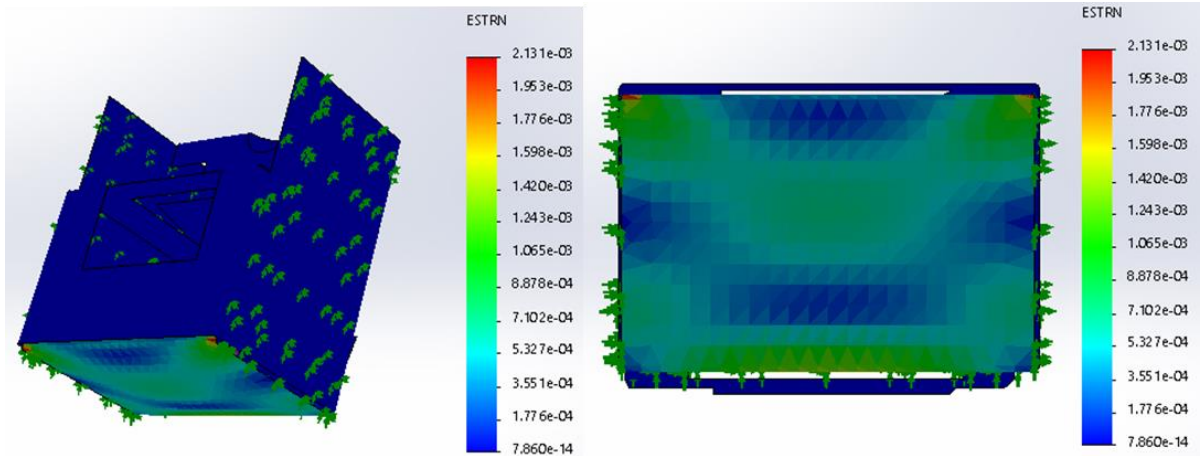
32 pav. Sumažintas vidinės pakuotės modelis (bandymas 2)

Vidinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Pakuotės įtempimų vaizdas pateiktas 33 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempimai siekia 1,855 MPa, o vidutinė skaitinė vertė yra 0,928 MPa. Labiausiai įtempimų veikiamos vietos yra dugno centras ir kampai, čia yra pasiskirstę vidutinės skaitinės vertės įtempiai.



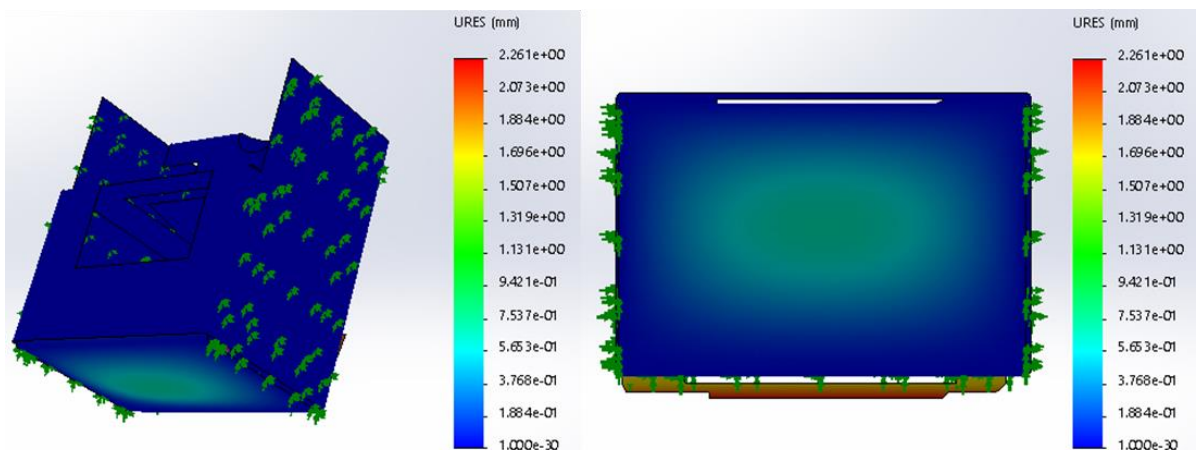
33 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 2)

Taip pat 34 pav. yra pavaizduotas vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiamas dėžutės dugno centras ir kampai, čia vyrauja vidutinis deformacijų pasiskirstymas. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $1,065 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $2,131 \cdot 10^{-3}$.



34 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 2)

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 35 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 2,261 mm, o vidutiniai 1,131 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras, kuriame vyrauja vidutinės skaitinės vertės poslinkių pasiskirstymas.



35 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 2)

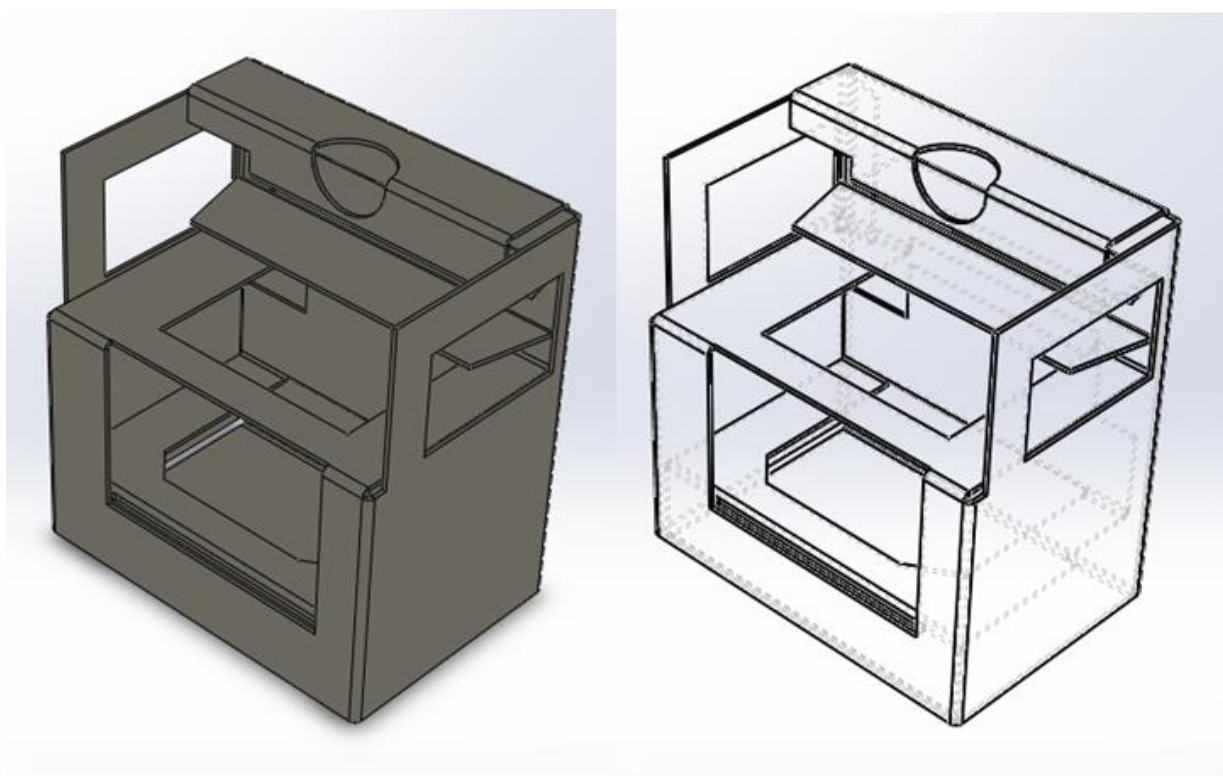
- *Bandymas 3:*

Trečiojo bandymo metu vidinės pakuotės matmenys yra sumažinami tiek kiek daugiausiai galima, atsižvelgiant į produkto matmenis. Ilgis sumažintas iki 86 mm, plotis iki 57,5 mm, aukštis iki 95 mm. Pakuotės storis yra nekeičiamas, kadangi keičiant storį, pasikeistų ir mechaninės pakuotės savybės.

6 lentelė. Vidinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 3)

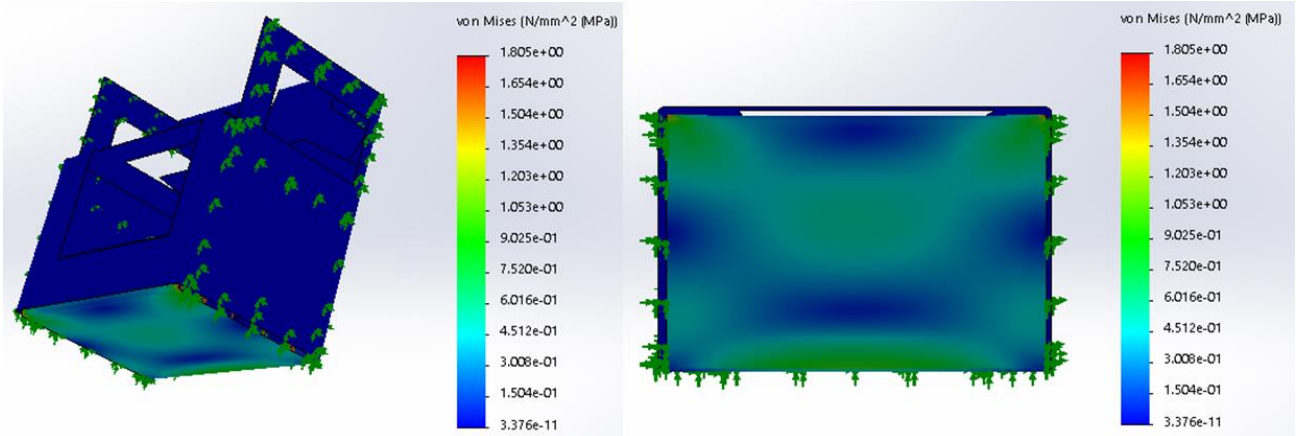
| | |
|--------------------|----------------------|
| Medžiaga | Gofruotasis kartonas |
| Ilgis, mm | 86 |
| Plotis, mm | 57,5 |
| Aukštis, mm | 95 |
| Storis, mm | 1,0 |

Žemiau esančiame paveiksle (36 pav.) yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis, skirtas atlikti bandymui 3. Sumažinus modelio matmenis (6 lentelė), taip pat sumažėja ir pakuotės plotas. Nustatyta, kad pakuotės plotas yra 828,52 cm². Taip pat atlikus bandymą 1 ir bandymą 2, pastebėta, kad pakuotės stiprumas mažinant geometrinius matmenis kinta nežymiai, todėl bandymui 3 pakuotės modelis patobulintas, sumažintas pakuotei reikalingos medžiagos kiekis, dėl to sumažėja pakuotės plotas.



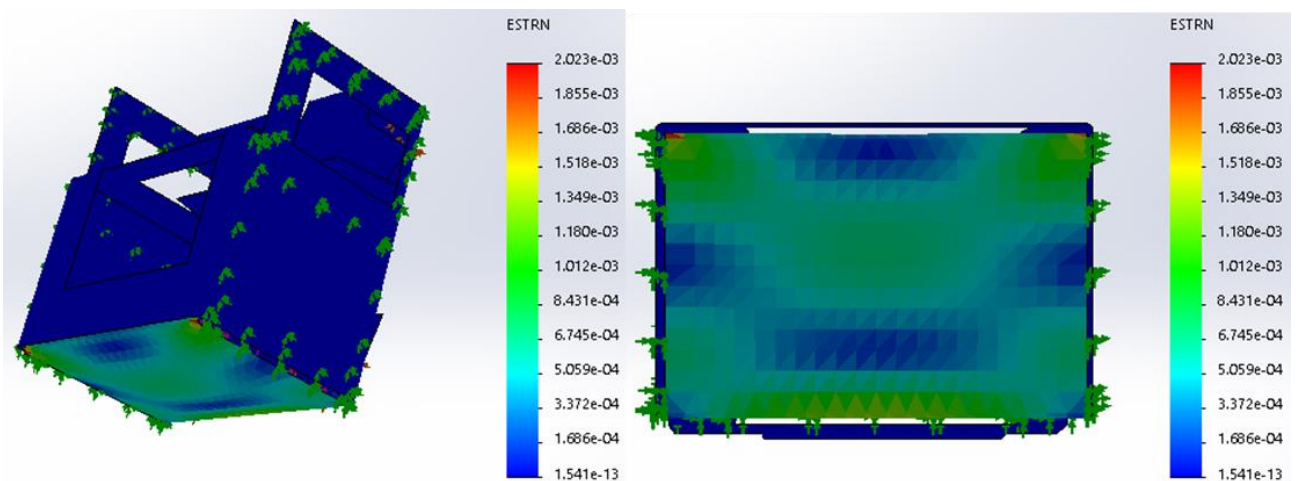
36 pav. Sumažintas vidinės pakuotės modelis (bandymas 3)

Vidinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Pakuotės įtempių vaizdas pateiktas 37 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempiai siekia 1,805 MPa, o vidutinė skaitinė vertė yra 0,903 MPa. Šių įtempių skaitinės vertės mažai skiriasi nuo pradinių duomenų, čia taip pat vyrauja vidutinės skaitinės vertės įtempiai.



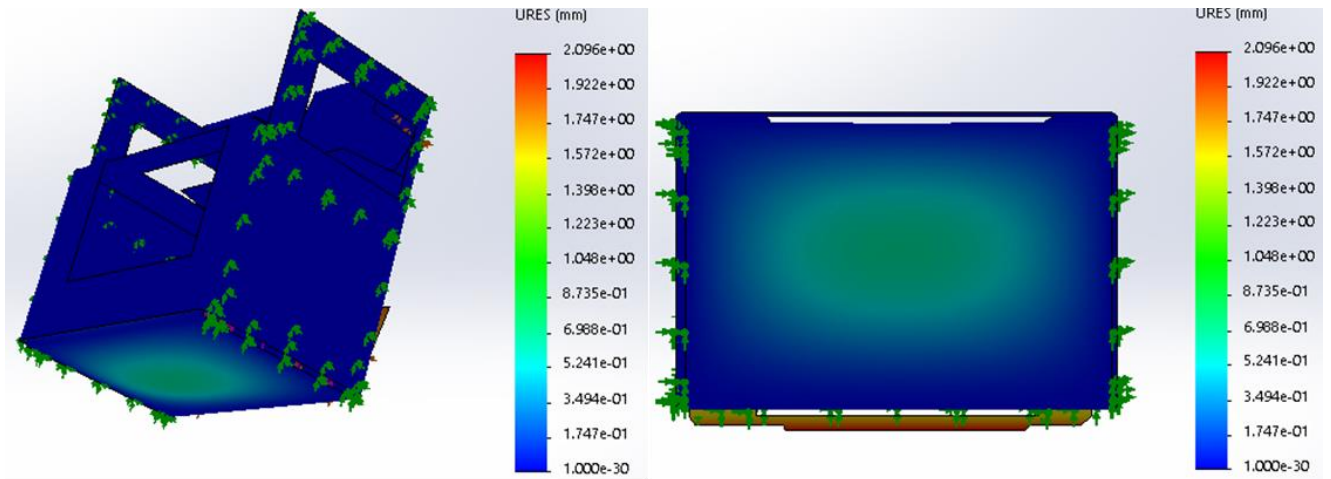
37 pav. Vidinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 3)

Taip pat 38 pav. yra pavaizduotas vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiamas dėžutės dugno centras ir kampai. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $1,012 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $2,023 \cdot 10^{-3}$. Matoma, kad deformacijos, lyginant su pirminiais duomenimis sumažėjo, kadangi vidinės pakuotės vidutinės deformacijos prieš geometrinių matmenų mažinimą yra $1,227 \cdot 10^{-3}$, o maksimalios $2,453 \cdot 10^{-3}$.



38 pav. Vidinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 3)

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 39 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 2,096 mm, o vidutiniai 1,048 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras. Lyginant trečiojo bandymo metu nustatytą poslinkių pasiskirstymą, su pakuotės poslinkiais prieš geometrinių matmenų sumažinimą, yra pastebima, kad poslinkių skaitinė vertė sumažėjo. Kadangi šio bandymo metu gauti maksimalūs poslinkiai yra 2,096 mm, o prieš pakuotės geometrinių matmenų sumažinimą jų vertė yra 2,475 mm.



39 pav. Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 3)

Žemiau esančioje lentelėje pateikti atliktų tyrimų rezultatai (7 lentelė). Iš lentelėje pateiktų duomenų yra matyti, kad vidinės pakuotės plotas sumažėjo, kai buvo mažinami geometriniai pakuotės matmenys. Pirmojo bandymo metu pakuotės plotas yra $1020,35 \text{ cm}^2$, o trečiojo bandymo metu plotas sumažėjo iki $828,52 \text{ cm}^2$. Taip pat yra matoma, kad vidinės pakuotės įtempių skaitinės vertės mažėjo nuosekliai. Tarp pirmojo ir antrojo bandymų įtempių skirtumas yra $0,052 \text{ MPa}$, o tarp antrojo ir trečiojo bandymų skirtumas yra $0,050 \text{ MPa}$, šis kitimas yra nežymus, todėl pakuotės stiprumas dėl to nemažėja.

7 lentelė. Tyrimų rezultatai: vidinės pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas

| | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| Plotas, cm^2 | 1020,35 | 935,90 | 828,52 |
| Įtempiai, MPa | 1,907 | 1,855 | 1,805 |

Išorinė pakuotė. Atlikti 3 bandymai mažinant išorinės pakuotės geometrinius matmenis (duomenys pateikti 7–9 lentelėse), gauti rezultatai pavaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose (40–51 pav.).

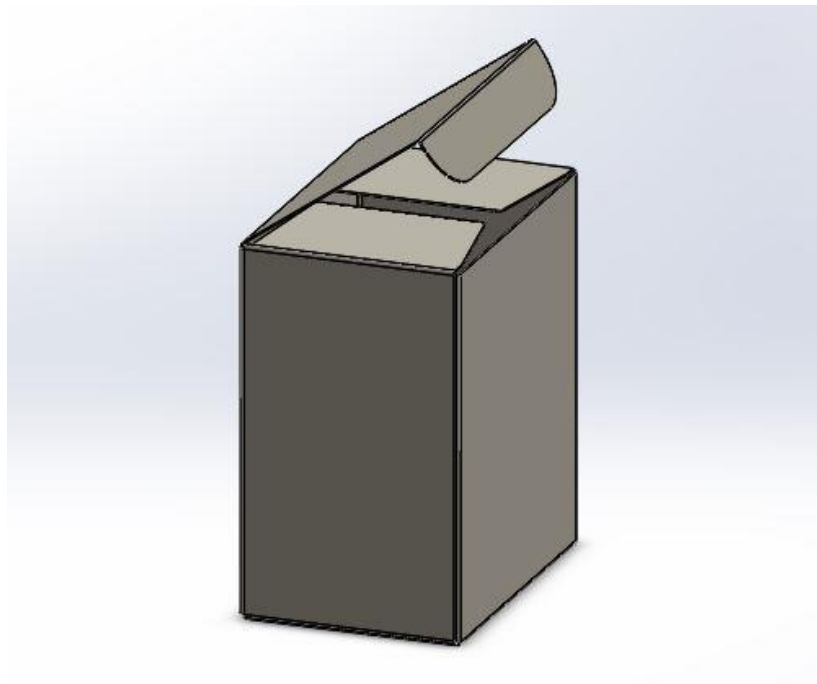
- *Bandymas 1:*

Pirmojo bandymo metu išorinės pakuotės matmenys yra sumažinami. Ilgis sumažintas iki 96 mm, plotis iki 67 mm, aukštis iki 115 mm. Pakuotės storis yra nekeičiamas, kadangi keičiant storį, pasikeistų ir mechaninės pakuotės savybės.

8 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 1)

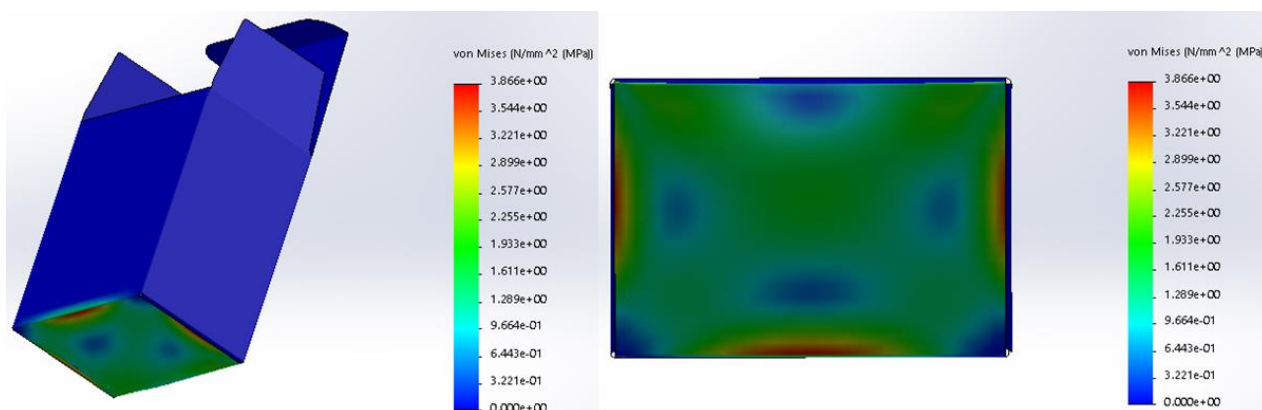
| | |
|-------------|----------|
| Medžiaga | Kartonas |
| Ilgis, mm | 96 |
| Plotis, mm | 67 |
| Aukštis, mm | 115 |
| Storis, mm | 0,5 |

Žemiau esančiame paveiksle (40 pav.) yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis, skirtas atlikti bandymui 1. Sumažinus modelio matmenis (7 lentelė), taip pat sumažėja ir pakuotės plotas. Nustatyta, kad pakuotės plotas yra 1329,99 cm².



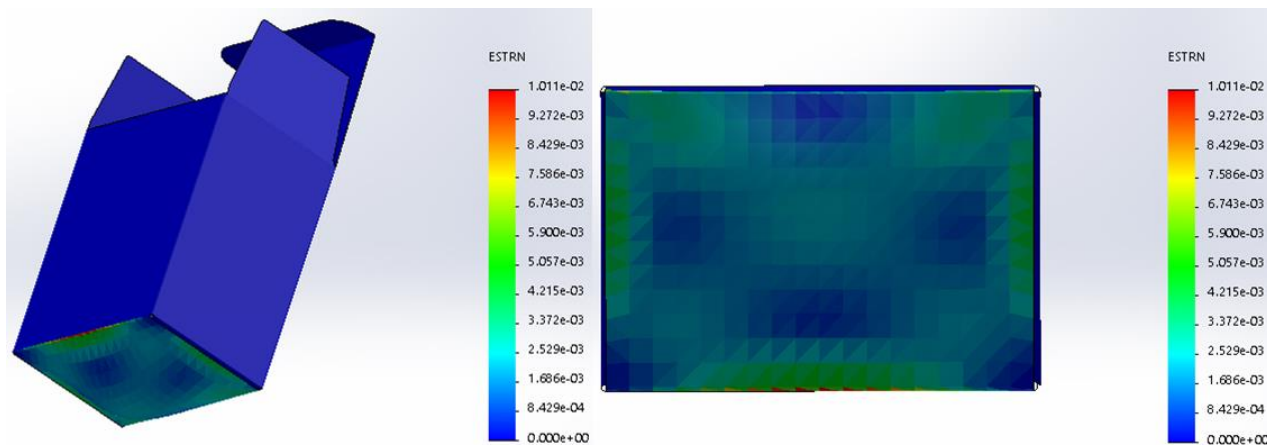
40 pav. Sumažintas išorinės pakuotės modelis (bandymas 1)

Išorinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g) ir vidinės pakuotės svorio (25 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Pakuotės įtempių vaizdas pateiktas 41 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempiai siekia 3,866 MPa, o vidutinė skaitinė vertė yra 1,933 MPa. Iš žemiau esančio paveikslo yra matoma, kad įtempiai pasiskirsto dugno centre ir kraštuose, jų reikšmės yra vidutinės skaitinės vertės, tačiau pakuotės dugno šoninėse kraštinėse ir apatinėje kraštinėje vyrauja maksimali įtempių skaitinė vertė.



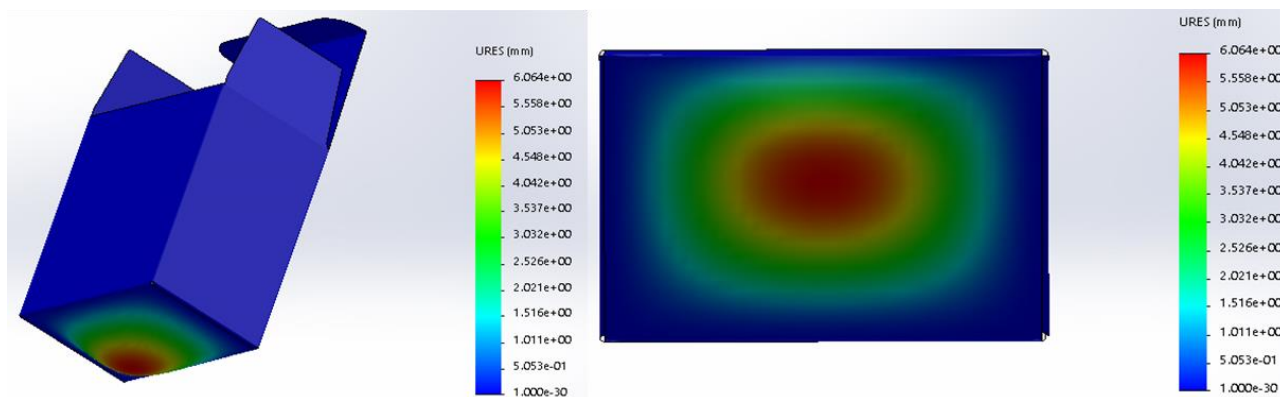
41 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 1)

Taip pat 42 pav. yra pavaizduotas išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $5,057 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $1,011 \cdot 10^{-2}$. Galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiami dėžutės dugno kampai, tačiau juose vyrauja vidutinis deformacijų pasiskirstymas, o ne maksimalus.



42 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 1)

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 43 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 6,064 mm, o vidutiniai 3,032 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras.



43 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 1)

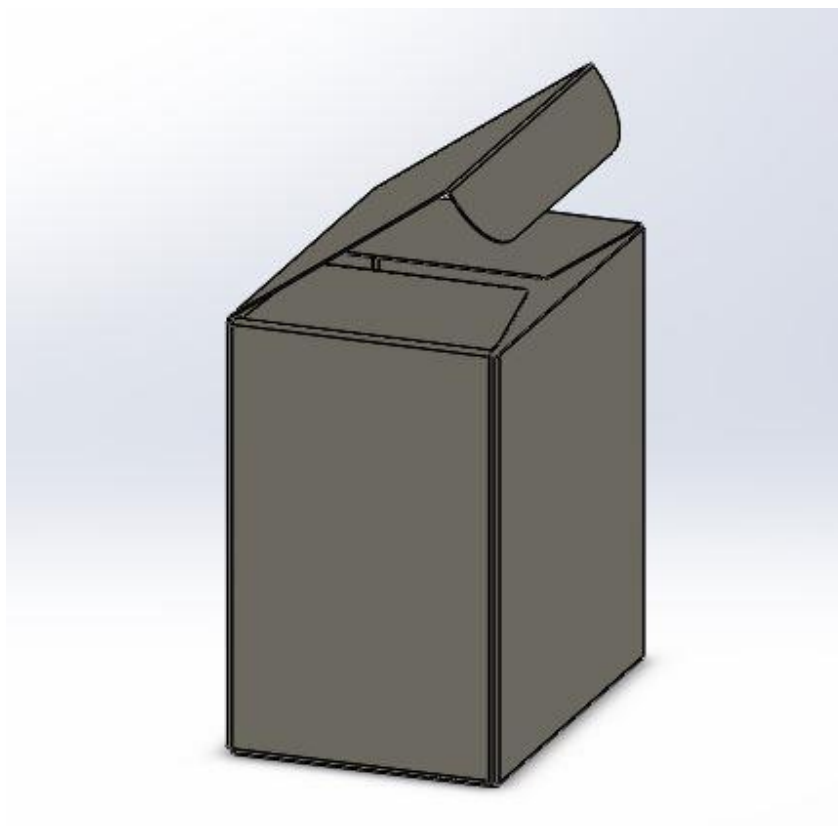
- *Bandymas 2:*

Pirmojo bandymo metu išorinės pakuotės matmenys yra sumažinami. Ilgis sumažintas iki 94 mm, plotis iki 65 mm, aukštis iki 105 mm. Pakuotės storis yra nekeičiamas, kadangi keičiant storį, pasikeistų ir mechaninės pakuotės savybės.

9 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 2)

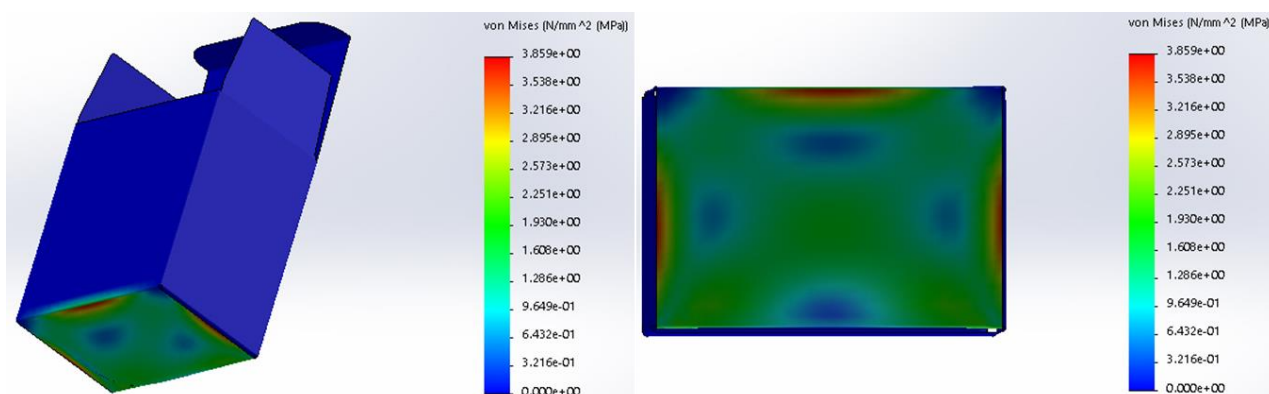
| Medžiaga | Kartonas |
|-------------|----------|
| Ilgis, mm | 94 |
| Plotis, mm | 65 |
| Aukštis, mm | 105 |
| Storis, mm | 0,5 |

Žemiau esančiame paveiksle (44 pav.) yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis, skirtas atlikti bandymui 2. Sumažinus modelio matmenis (8 lentelė), taip pat sumažėja ir pakuotės plotas. Nustatyta, kad pakuotės plotas yra 1223,42 cm².



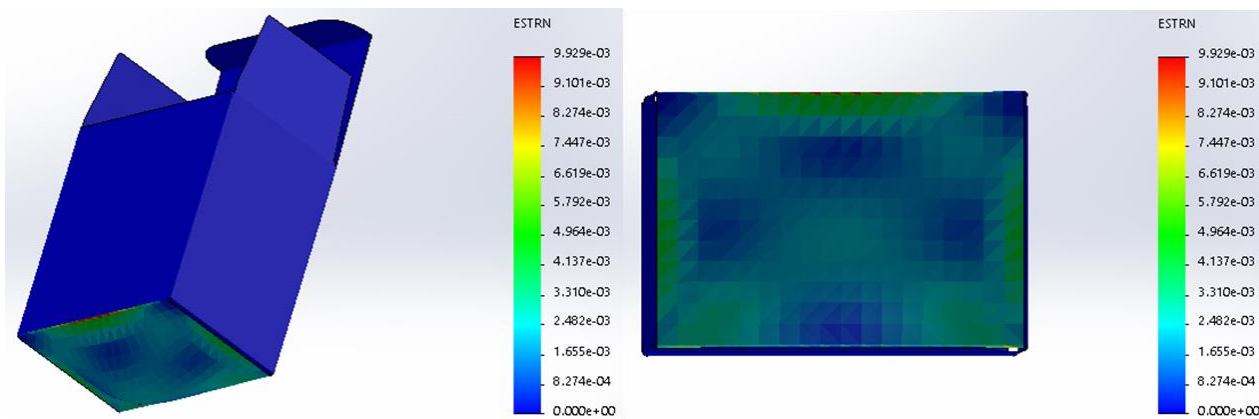
44 pav. Sumažintas išorinės pakuotės modelis (bandymas 2)

Išorinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g) ir vidinės pakuotės svorio (25 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne, labiausiai yra veikiamas dėžutės dugno centras ir kraštai. Pakuotės įtempių vaizdas pateiktas 45 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempiai siekia 3,859 MPa, o vidutinė skaitinė vertė yra 1,930 MPa.



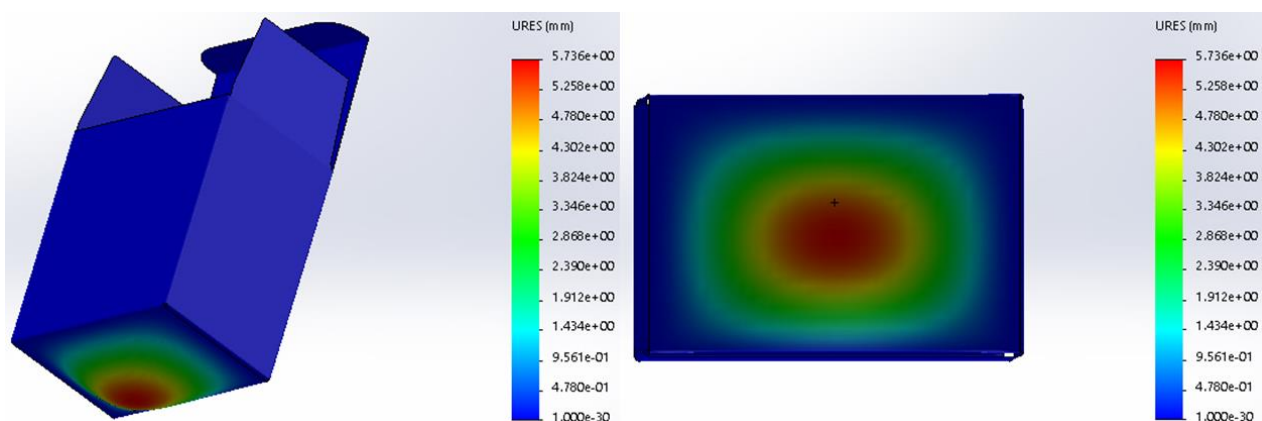
45 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 2)

Taip pat 46 pav. yra pavaizduotas išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiami dėžutės dugno kampai. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $9,929 \cdot 10^{-3}$, o maksimalus $4,964 \cdot 10^{-3}$.



46 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 2)

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 47 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 5,736 mm, o vidutiniai 2,868 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras.



47 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 2)

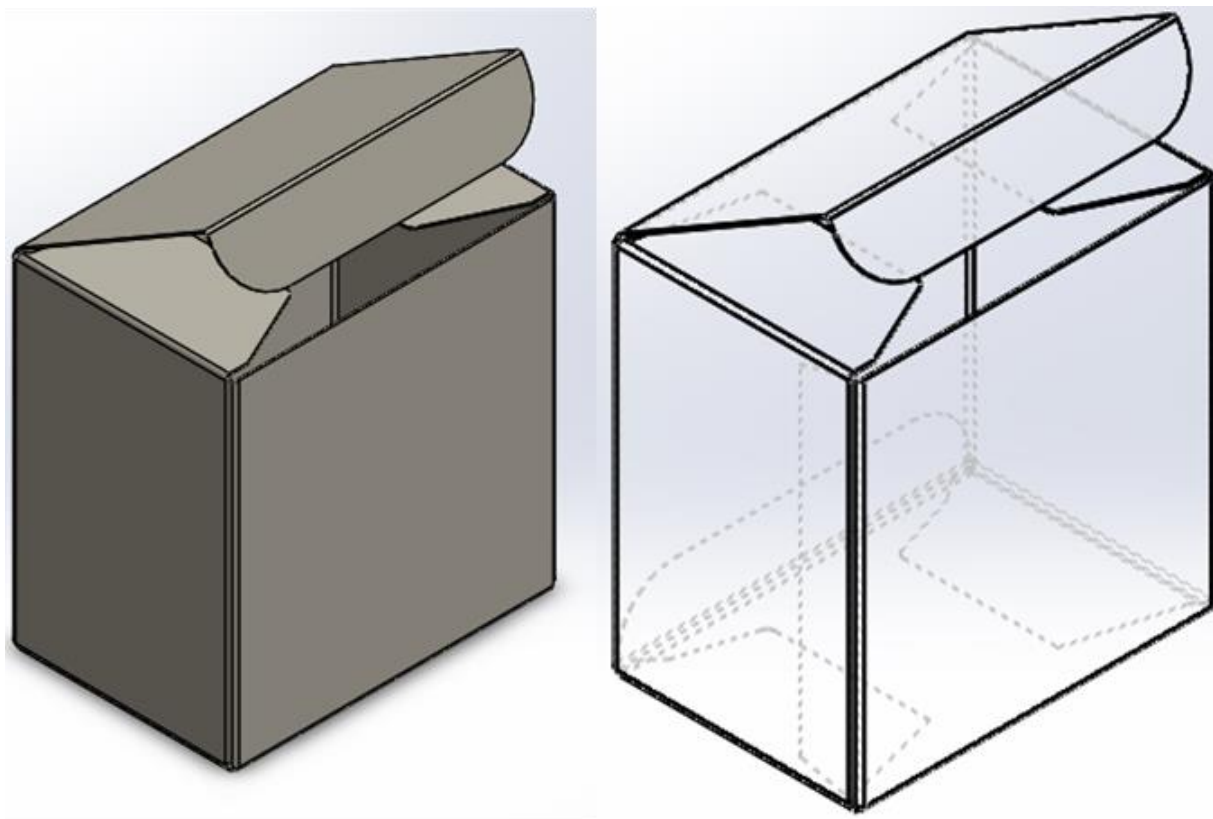
- *Bandymas 3:*

Pirmojo bandymo metu išorinės pakuotės matmenys yra sumažinami. Ilgis sumažintas iki 92 mm, plotis iki 63 mm, aukštis iki 98 mm. Pakuotės storis yra nekeičiamas, kadangi keičiant storį, pasikeistų ir mechaninės pakuotės savybės.

10 lentelė. Išorinės pakuotės modelio duomenys (bandymas 3)

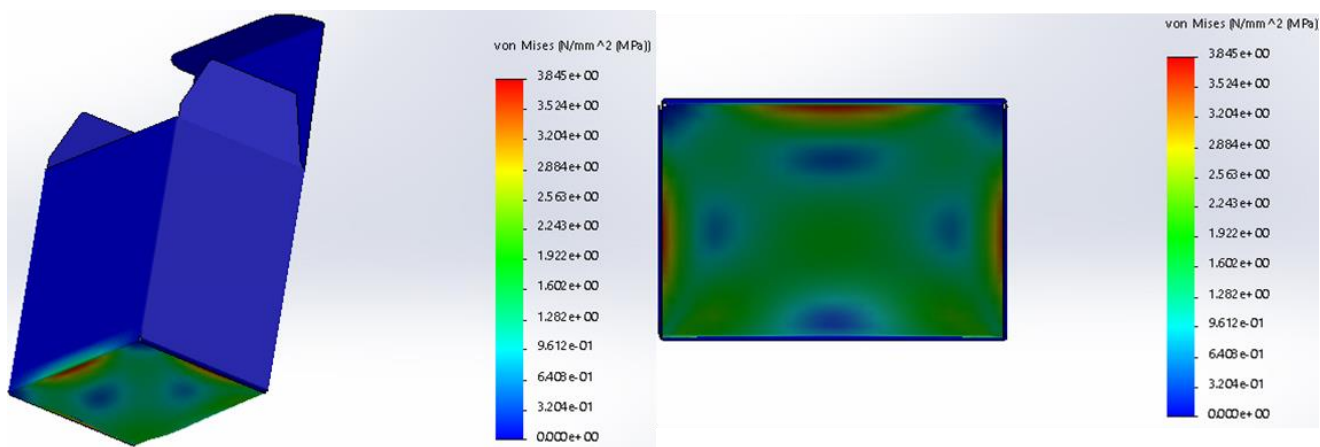
| Medžiaga | Kartonas |
|-------------|----------|
| Ilgis, mm | 92 |
| Plotis, mm | 63 |
| Aukštis, mm | 98 |
| Storis, mm | 0,5 |

Žemiau esančiame paveiksle (48 pav.) yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis, skirtas atlikti bandymui 3. Sumažinus modelio matmenis (9 lentelė), taip pat sumažėja ir pakuotės plotas. Nustatyta, kad pakuotės plotas yra 1059,54 cm².



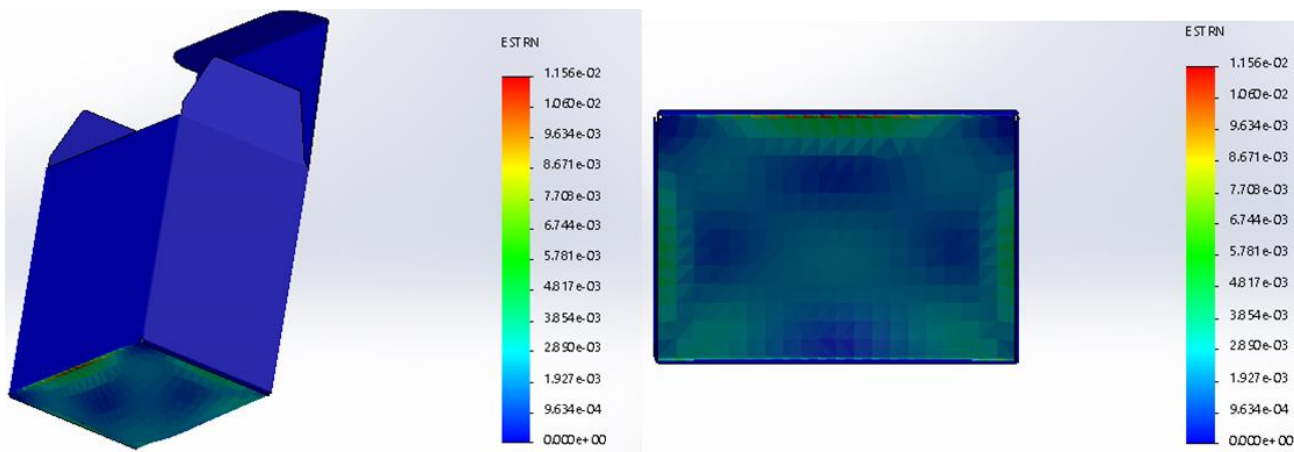
48 pav. Sumažintas išorinės pakuotės modelis (bandymas 3)

Išorinė pakuotė yra veikiamą produkto svorio (297 g) ir vidinės pakuotės svorio (25 g), visa apkrova tolygiai pasiskirsto dėžutės dugne. Pakuotės įtempių vaizdas pateiktas 49 pav., nustatyta, kad maksimalūs susidarantys įtempiai siekia 3,845 MPa, o vidutinė skaitinė vertė yra 1,922 MPa. Šių įtempių skaitinės vertės mažai skiriasi nuo pradinių duomenų, čia taip pat vyrauja vidutinės skaitinės vertės įtempiai.



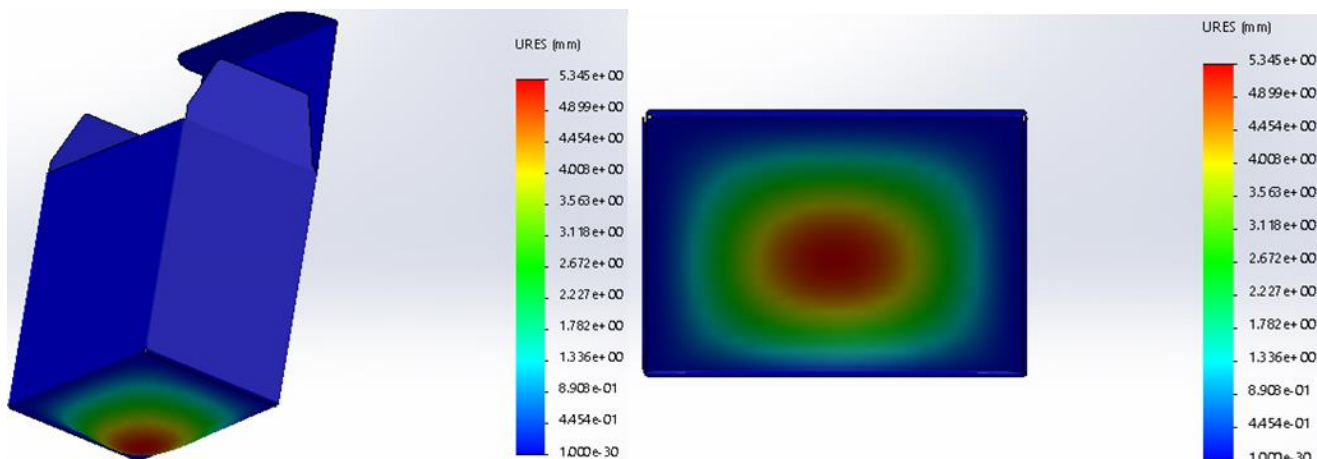
49 pav. Išorinės pakuotės įtempių grafinis vaizdas (bandymas 3)

Taip pat 50 pav. yra pavaizduotas išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas, galima pastebėti, kad stipriausiai yra veikiami dėžutės dugno kampai. Nustatyta, kad deformacijos vidutinis pasiskirstymas yra $1,156 \cdot 10^{-2}$, o maksimalus $5,781 \cdot 10^{-3}$. Matoma, kad deformacijos, lyginant su pirminiais duomenimis padidėjo, kadangi vidinės pakuotės vidutinės deformacijos prieš geometrinių matmenų mažinimą yra $1,004 \cdot 10^{-2}$, o maksimalios $5,022 \cdot 10^{-3}$.



50 pav. Išorinės pakuotės deformacijų pasiskirstymas (bandymas 3)

Vidinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas yra pateiktas 51 pav., čia maksimalūs poslinkiai yra 5,345 mm, o vidutiniai 2,672 mm. Taip pat iš pateikto vaizdo galima pastebėti, kad labiausiai yra veikiamas pakuotės dugno centras. Lyginant trečiojo bandymo metu nustatytą poslinkių pasiskirstymą, su pakuotės poslinkiais prieš geometrinių matmenų sumažinimą, yra pastebima, kad poslinkių skaitinė vertė sumažėjo. Kadangi šio bandymo metu gauti maksimalūs poslinkiai yra 5,345 mm, o prieš pakuotės geometrinių matmenų sumažinimą jų vertė yra 6,497 mm.



51 pav. Išorinės pakuotės poslinkių pasiskirstymas (bandymas 3)

Žemiau esančioje lentelėje pateikti atliktų tyrimų rezultatai (11 lentelė). Iš lentelėje pateiktų duomenų yra matyti, kad išorinės pakuotės plotas sumažėjo, pakeitus pakuotės geometrinius matmenis. Pirmojo bandymo metu išorinės pakuotės plotas yra $1329,99 \text{ cm}^2$, o trečiojo bandymo metu plotas pakito iki $1059,54 \text{ cm}^2$. Taip pat galima pastebėti, kad išorinės pakuotės įtempiai mažėjo. Tarp pirmojo ir antrojo bandymo metu gautų įtempių skaitinių verčių skirtumas yra nežymus, tai $0,007 \text{ MPa}$, o skirtumas tarp antrojo ir trečiojo bandymo metu gautų rezultatų yra $0,014 \text{ MPa}$. Iš gautų rezultatų

galima daryti prielaidą, kad geometrinių matmenų sumažinimas išorinės pakuotės stiprumui įtakos neturi.

11 lentelė. Tyrimų rezultatai: išorinės pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas

| | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Plotas, cm² | 1329,99 | 1223,42 | 1059,54 |
| Įtempiai, MPa | 3,866 | 3,859 | 3,845 |

Atlikus tiek vidinės pakuotės tris bandymus, tiek išorinės buvo nustatyta, kad geometrinių matmenų mažinimas neturi didelės įtakos pakuotės stiprumui. Kadangi iš atliktų tyrimų, naudojant programinę įrangą „SolidWorks“, pastebėta, kad stiprumas keičiant geometrinius matmenis kinta nežymiai. Žemiau esančioje lentelėje pateikti atliktų tyrimų rezultatai (12 lentelė), kuriais remiantis galima atlikti bandymų palyginimus.

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, kad atliekant tyrimus vidinei pakuotei įtempių skaitinės vertės svyruoja. Prieš bandymus vidinės pakuotės įtempių vertė yra 1,849 MPa, po pirmojo bandymo įtempių vertė padidėjo iki 1,907 MPa, pakito 0,058 MPa. Po antrojo bandymo ši vertė taip pat yra didesnė nei prieš bandymus, tai 1,855 MPa, skirtumas nežymus: 0,006 MPa. Atlikus trečiąjį bandymą įtempių vertė sumažėjo iki 1,805 MPa, skirtumas nuo pradinių duomenų, taip pat yra nežymus, tai 0,044 MPa. Atlikus šiuos tris bandymus yra pasirinktas optimaliausias geometrinių matmenų sumažinimo variantas, tai bandymas 3. Kadangi pagal gautus rezultatus yra matoma, kad toks įtempių skirtumas, neturi įtakos pakuotės stiprumui.

Atlikus tris bandymus išorinei pakuotei, taip pat galima pastebėti, kad įtempių skaitinės vertės svyruoja: pirmojo ir antrojo bandymų metu padidėja, o trečiojo bandymo metu sumažėja. Po pirmojo bandymo įtempių vertė nuo pradinės skiriasi 0,018 MPa, po antrojo 0,011 MPa, o po trečiojo 0,003 MPa. Todėl galima teigti, kad trečiojo bandymo metu gauti rezultatai nuo pradinių skiriasi nežymiai ir neturi įtakos išorinės pakuotės stiprumui.

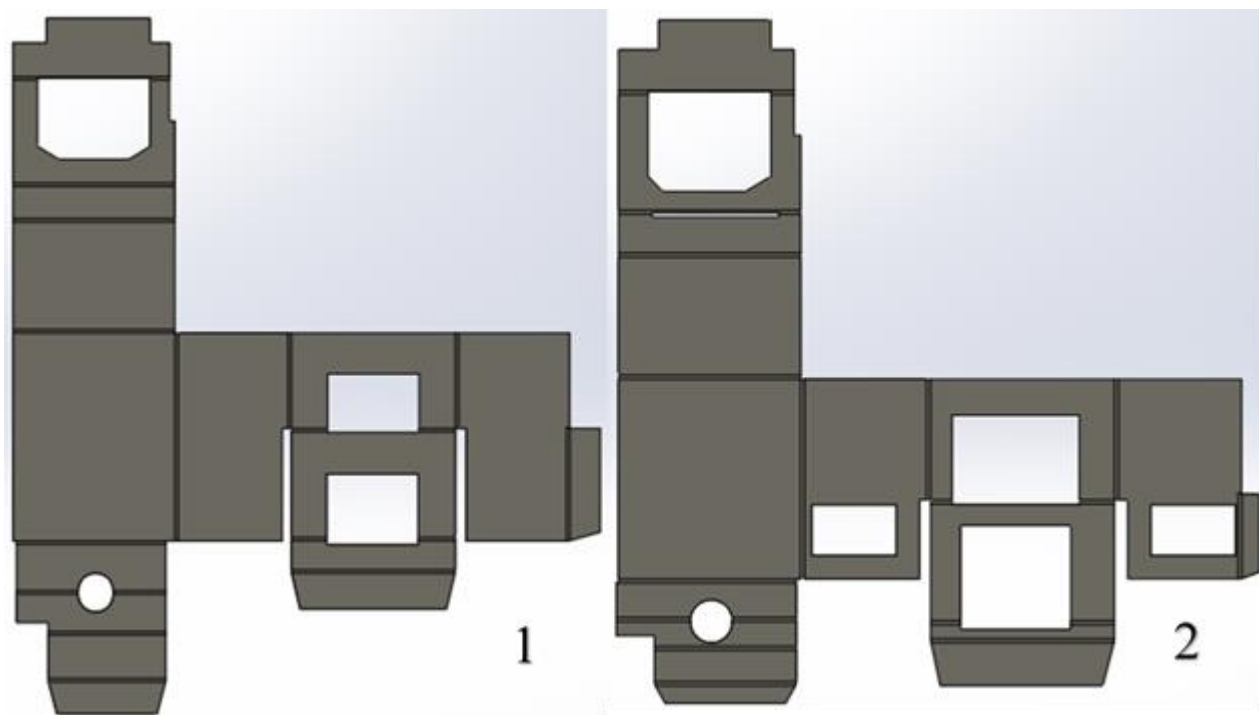
Iš lentelėje pateiktų duomenų yra matoma, kad lengvasvorio produkto pakuotės plotas sumažėjo. Atliekant bandymus vidinei pakuotei plotas sumažėjo iki 828,52 cm², pagal pradinius duomenis prieš bandymus pakuotės plotas yra 1173,08 cm². Vidinės pakuotės plotas sumažėjo 344,56 cm², o tai yra 29,4 %. Išorinės pakuotės plotas prieš bandymus yra 1430,94 cm², o po bandymų plotas sumažėjo iki 1059,54 cm². Skirtumas tarp plotų yra 371,40 cm², išorinės pakuotės plotas sumažintas 25,9 %. Bendras produkto pakuotės sumažinimas yra 27,5 %.

12 lentelė. Pakuotės stiprumo tyrimų rezultatų palyginimas

| Vidinė pakuotė | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Pradiniai duomenys | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 |
| Plotas, cm² | 1173,08 | 1020,35 | 935,90 | 828,52 |
| Įtempiai, MPa | 1,849 | 1,907 | 1,855 | 1,805 |
| Išorinė pakuotė | | | | |
| | Pradiniai duomenys | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 |
| Plotas, cm² | 1430,94 | 1329,99 | 1223,42 | 1059,54 |
| Įtempiai, MPa | 3,848 | 3,866 | 3,859 | 3,845 |

Taip pat remiantis turimais duomenimis galima pastebėti, kad sumažinus vidinės pakuotės plotą iki 828,52 cm², galima pagaminti daugiau pakuočių iš turimos medžiagos. Kadangi pradiniai pakuotei sunaudojama 1173,08 cm² medžiagos, o skirtumas tarp pradinės pakuotės ploto ir sumažintos pakuotės ploto yra 344,56 cm². Todėl sutaupius tokį kiekį medžiagos nuo 3 vnt. pakuočių galima pagaminti 1 vnt. patobulintos pakuotės.

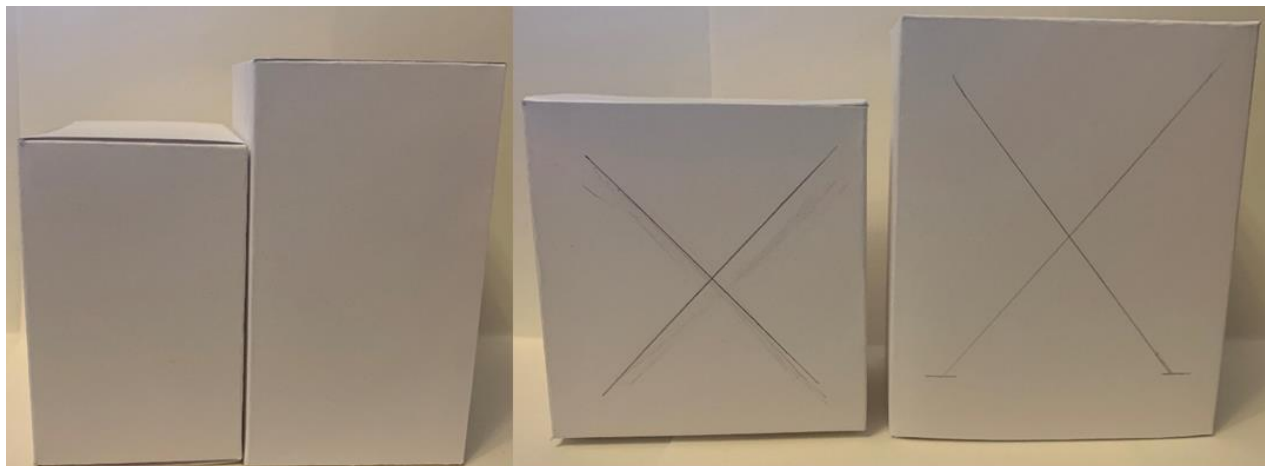
Taip pat vidinės pakuotės modelis bandymui 3 buvo patobulintas, dėl to pakuotės plotas ir pakuotei reikalingų medžiagų kiekis dar labiau sumažėjo. Žemiau esančiame paveiksle yra pavaizduotas vidinės pakuotės modelis prieš optimizavimą (1) ir atlikus geometrinių duomenų sumažinimą (2).



52 pav. Vidinės pakuotės modelis prieš geometrinių matmenų sumažinimą (1) ir po geometrinių matmenų sumažinimo (2)

2.5. Pakuotės gniuždymo tyrimai

Atlikus pakuotės geometrinių matmenų sumažinimą ir pasirinkus optimaliausią sumažinimo būdą (bandymas 3), pagal turimus duomenis (6 ir 10 lentelė) pagaminta išorinė ir vidinė produkto pakuotė (53–54 pav.). Tiek vidinei, tiek išorinei pakuotei paruošta po 3 bandinius, su realiais pakuotės matmenimis, ir, kai geometriniai pakuotės matmenys yra sumažinti.



53 pav. Išorinė pakuotė po geometrinių matmenų sumažinimo ir pradiniais geometriniais matmenimis



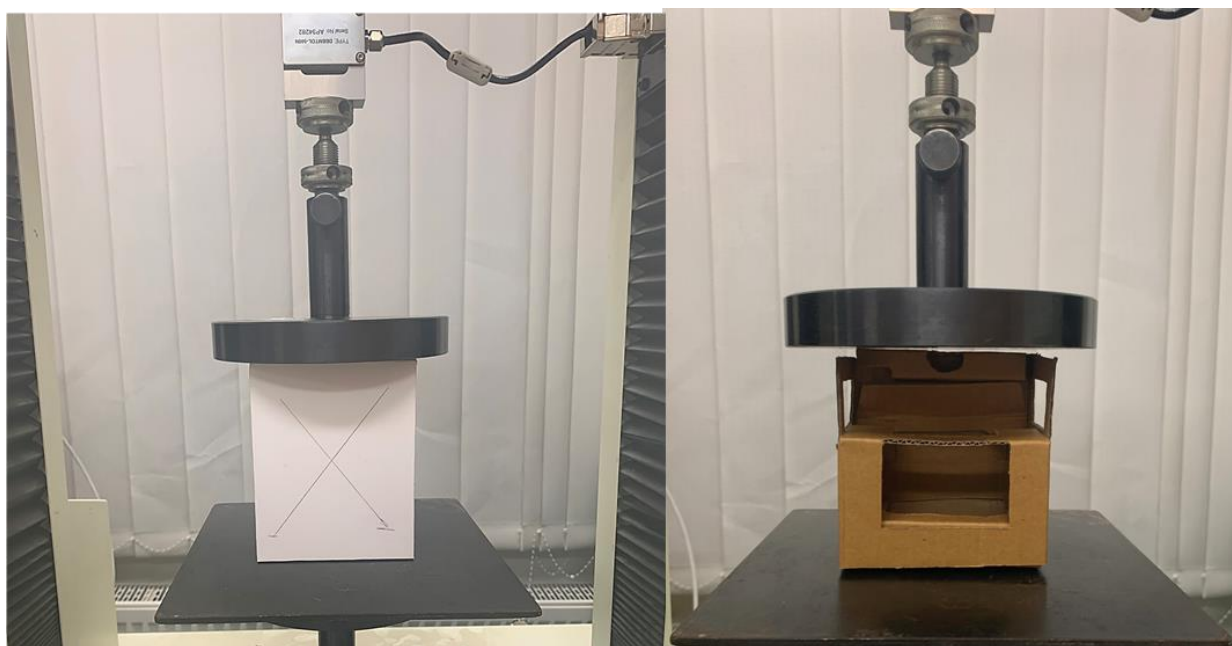
54 pav. Vidinė pakuotė po geometrinių matmenų sumažinimo ir pradiniais geometriniais matmenimis

Su turimais bandiniais yra atliekami gniuždymo tyrimai, pagal standartą LST EN ISO 527-3:2019. Atliekant tyrimus yra norima įrodyti, kad mažinant geometrinius pakuotės matmenis pakuotės stiprumas nemažėja. Gniuždymo tyrimai atliekami su tyrimams skirtu įrenginiu „Tinius Olsen, H10KT“ (55 pav.). Maksimali gniuždymo jėga yra 500 N (~50 kg), gniuždymo kryptis yra iš viršaus į apačią, o naudojamas gniuždymo greitis 12,5 mm/min.



55 pav. Gniuždymo tyrimams naudojama įranga

Naudojant programinę įrangą yra įvedami reikalingi duomenys, tai gniuždymo greitis, atstumas tarp gniaužtų, pakuotės ilgis ir plotis. Tuomet atliekamas tyrimas: įstatoma pakuotė (56 pav.), naudojant programinę įrangą pradedamas gniuždymas, nustatoma, kokia maksimali jėga naudojama gniuždant pakuotę, tyrimo metu gniuždymo greitis yra 12,5 mm/min. Tyrimas atliekamas keturis kartus, vienam bandymui yra naudojami trys bandiniai.

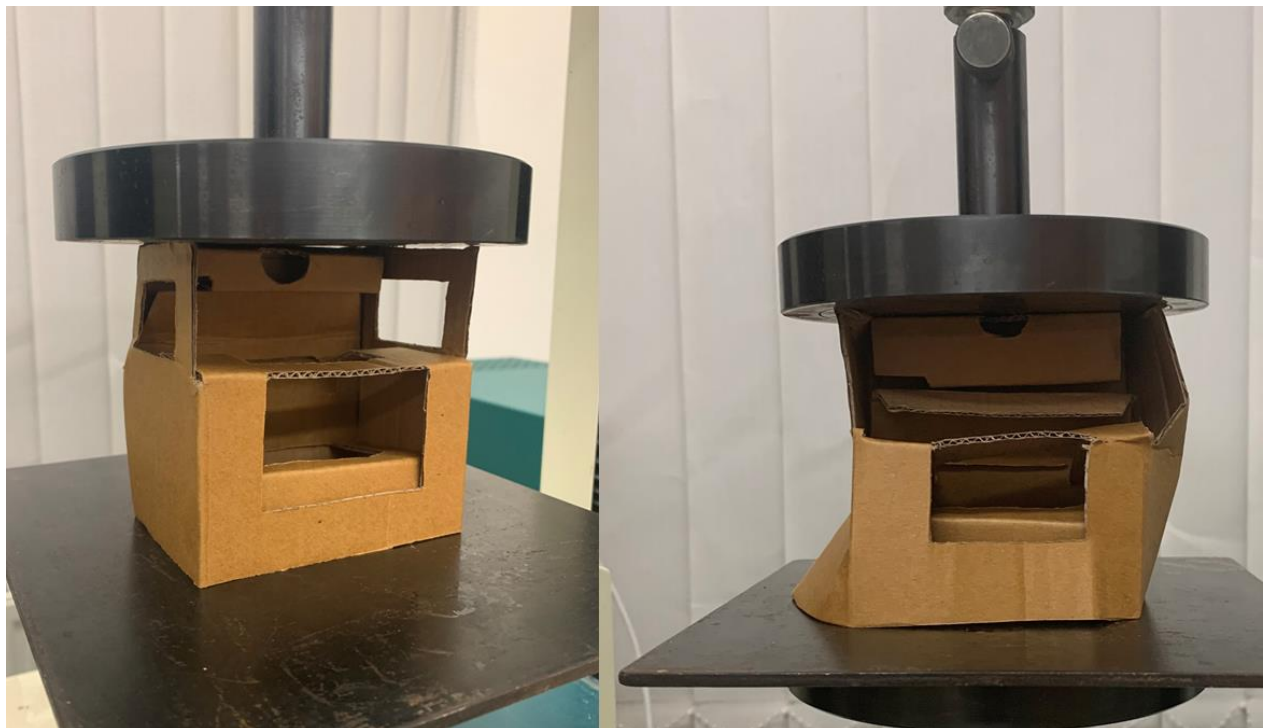


56 pav. Gniuždymo tyrimo pradžia

Vidinės pakuotės ir išorinės pakuotės gniuždymo tyrimo vaizdas pateikiamas žemiau esančiame paveiksle (57–58 pav.). Matoma, kad pakuotės gniuždymo tyrimas yra įpusėjęs, kadangi pakuotės jau yra deformuotos. Galima atkreipti dėmesį, kad gniuždymo metu išorinės pakuotės kampinės briaunos atlaiko didžiausią apkrovą, taip pat vykstant gniuždymui kampinėse kraštinėse susidaro nauja standumo briauna. Vidinės pakuotės gniuždymo metu didžiausią apkrovą atlaiko trys pakuotės sienos.



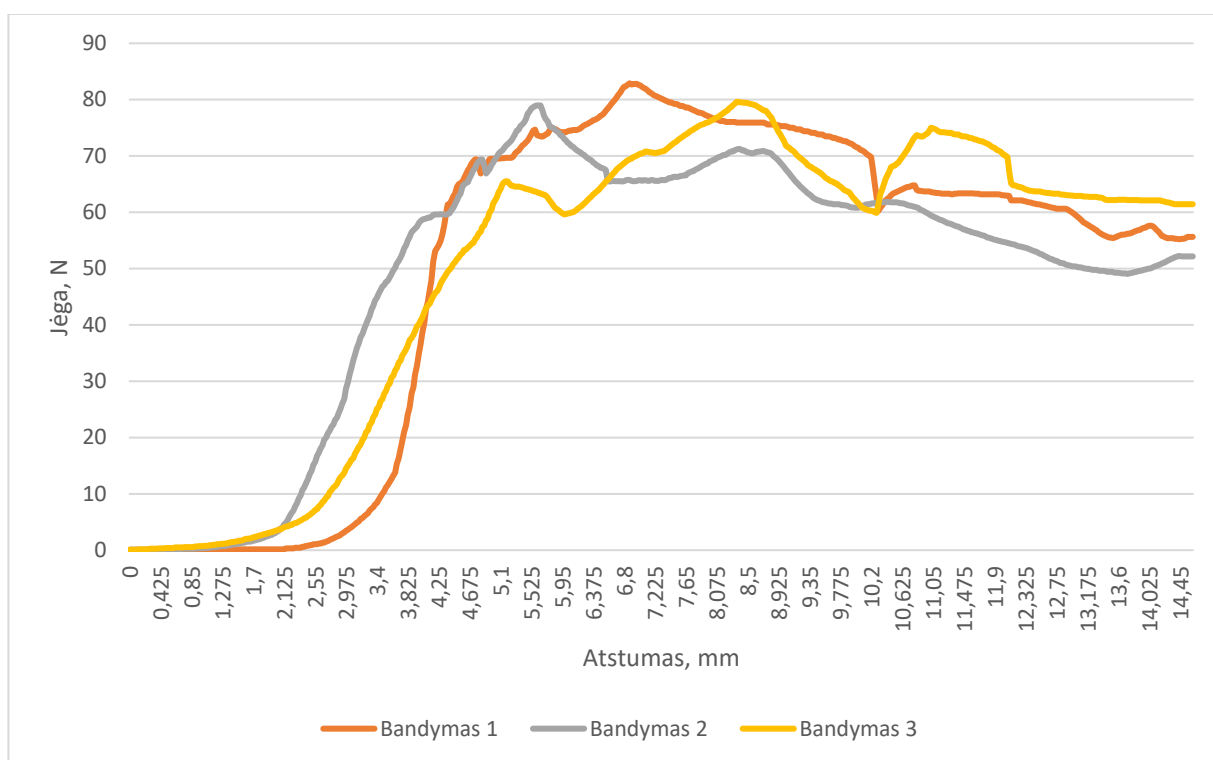
57 pav. Gniuždymo tyrimas išorinei pakuotei



58 pav. Gniuždymo tyrimas vidinei pakuotei

Atlikus gniuždymo tyrimus gauti rezultatai yra pateikiami žemiau esančiuose paveiksluose ir lentelėse. Tyrimo metu yra nustatyta, kokia didžiausia jėga (N) veikia pakuotę, kol ji pradeda deformuotis.

Vidinė pakuotė, pradiniai duomenys. Tyrimo rezultatai, kai naudojama pradinių matmenų pakuotė yra pateikti 59 pav., yra matoma, kad mažėjant atstumui tarp gniaužtų vyksta pakuotės gniuždymas. Pirmo ir antro bandymo metu pastebima, kad jėga didėja ir pasiekia maksimalią reikšmę, tuomet jėga tolygiai mažėja, nes pakuotė jau yra deformuota. Trečiojo bandymo metu gaunama maksimali jėgos reikšmė, tuomet jėga tolygiai mažėja, kol vėl pradeda didėti, tai vyksta dėl to, kad veikiant jėgai ir deformuojantis pakuotei susidaro nauja standumo briauna, kurios gniuždymui reikalinga didesnė apkrova.



59 pav. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pradinė pakuotė)

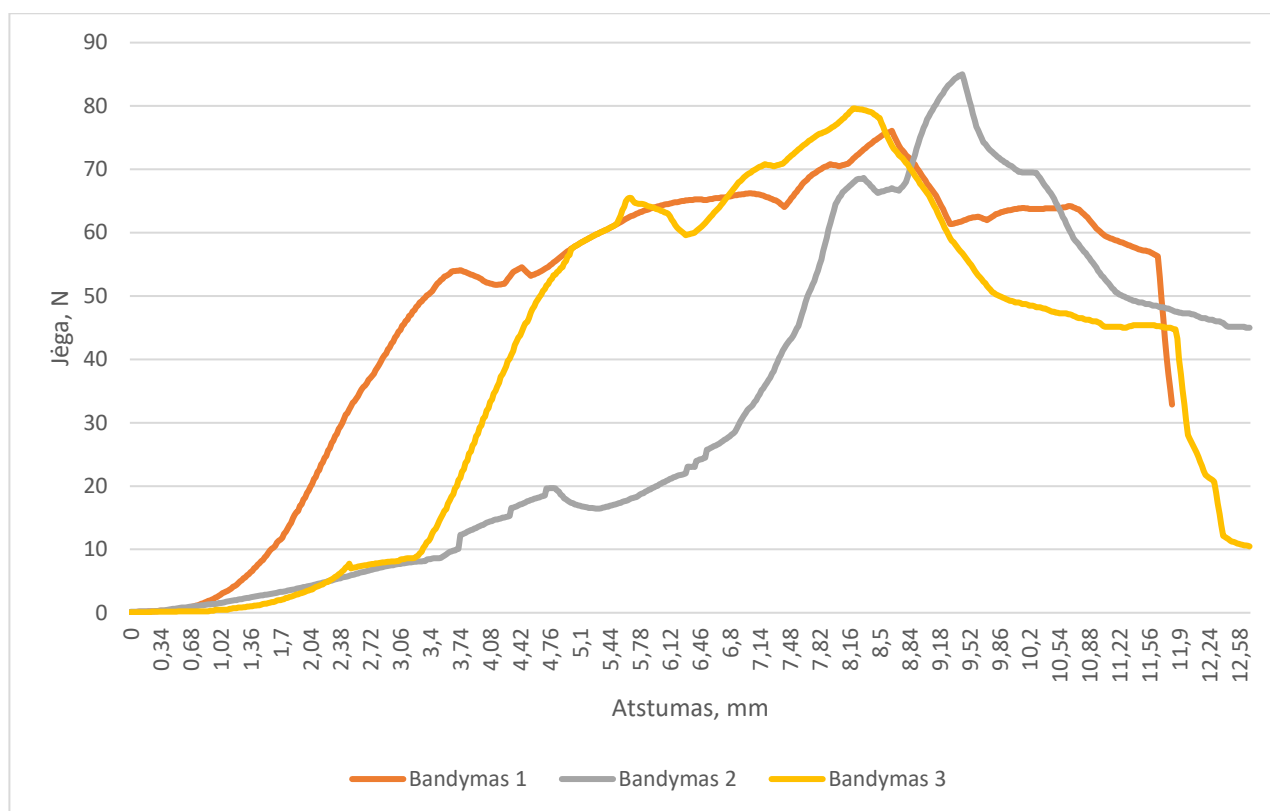
Nustatytos maksimalios jėgos (N) reikšmės, pateikiamos 13 lentelėje. Nustatyta, kad pirmojo bandymo metu maksimali jėgos reikšmė yra 82,9 N, antrojo bandymo metu – 79,0 N, o trečiojo – 79,6 N. Apskaičiuota, kad trijų atliktų bandymų metu jėgos vidurkis yra 80,5 N.

13 lentelė. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pradinė pakuotė)

| | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 | Vidurkis |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Jėga (maksimali), N | 82,9 | 79,0 | 79,6 | 80,5 |

Vidinė pakuotė atlikus optimizavimą. Tyrimo rezultatai, kai naudojama pakuotė atlikus optimizavimą yra pateikti 60 pav., yra matoma, kad mažėjant atstumui tarp gniaužtų vyksta pakuotės gniuždymas.

Visų trijų bandymų metu pastebima, kad jėga didėja ir pasiekia maksimalią reikšmę, tuomet jėga tolygiai mažėja, nes pakuotė jau yra deformuota.



60 pav. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pakuotė atlikus optimizavimą)

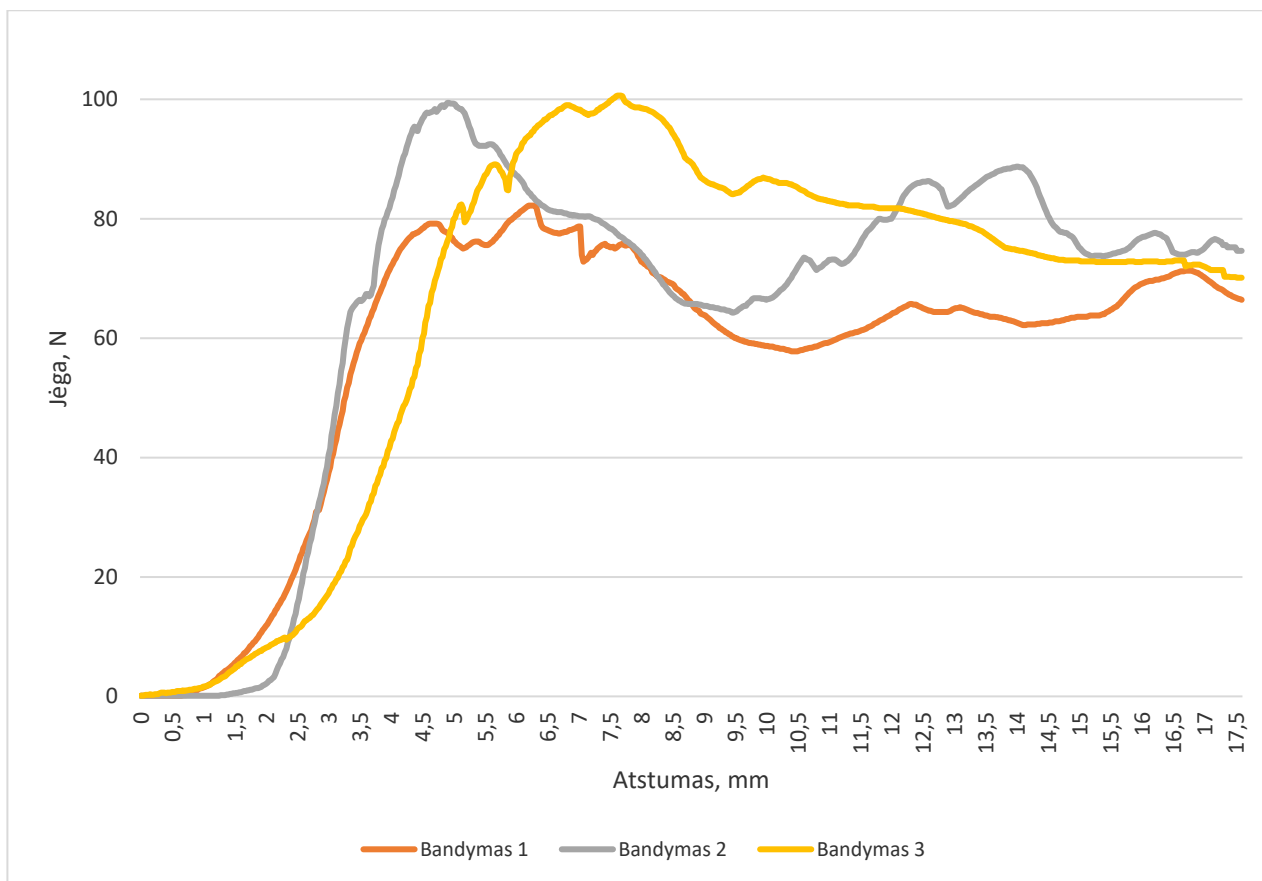
Nustatytos maksimalios jėgos (N) reikšmės, pateikiamos 14 lentelėje. Nustatyta, kad pirmojo bandymo metu maksimali jėgos reikšmė yra 76,1 N, antrojo bandymo metu – 85,0 N, o trečiojo – 79,6 N. Apskaičiuota, kad trijų atliktų bandymų metu jėgos vidurkis yra 80,2 N.

14 lentelė. Vidinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pakuotė atlikus optimizavimą)

| | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 | Vidurkis |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Jėga (maksimali), N | 76,1 | 85,0 | 79,6 | 80,2 |

Atlikus gniuždymo tyrimus vidinei pakuotei prieš optimizavimą ir po optimizavimo, nustatytos jėgos veikiančios gofruotojo kartono pakuotę. Galima pastebėti, kad atliekant tyrimą, tiek vidinei pakuotei prieš optimizavimą, tiek po optimizavimo, trečiojo bandymo metu gaunamos maksimalios jėgos reikšmės yra vienodos, tačiau reikėtų pastebėti, kad 59 ir 60 paveiksluose, esančios kreivės trečiojo bandymo metu yra skirtingos. Iš atliktų tyrimų pastebima, kad pakuotę prieš optimizavimą veikiančios jėgos apskaičiuotas vidurkis yra 80,5 N, o po optimizavimo 80,2 N. Jėgos skirtumas nėra didelis, todėl galima teigti, kad geometrinių matmenų mažinimas neturi įtakos pakuotės stiprumui. Dėl to vidinės pakuotės geometrinių matmenų mažinimo optimaliausias būdas pasirinktas tinkamai.

Išorinė pakuotė, pradiniai duomenys. Tyrimo rezultatai, kai naudojama pradinių matmenų pakuotė yra pateikti 61 pav., yra matoma, kad mažėjant atstumui tarp gniaužtų vyksta pakuotės gniuždymas. Pirmo ir trečio bandymo metu pastebima, kad jėga didėja ir pasiekia maksimalią reikšmę, tuomet jėga tolygiai mažėja, nes pakuotė jau yra deformuota. Antrojo bandymo metu gaunama maksimali jėgos reikšmė, tuomet jėga tolygiai mažėja, kol vėl pradeda didėti, tai vyksta dėl to, kad veikiant jėgai ir deformuojantis pakuotei susidaro nauja standumo briauna, kurios gniuždymui reikalinga didesnė apkrova. Tačiau tiksli reikšmė, gauta tyrimo metu, yra pirminė pasiekta maksimali jėgos reikšmė.



61 pav. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pradinė pakuotė)

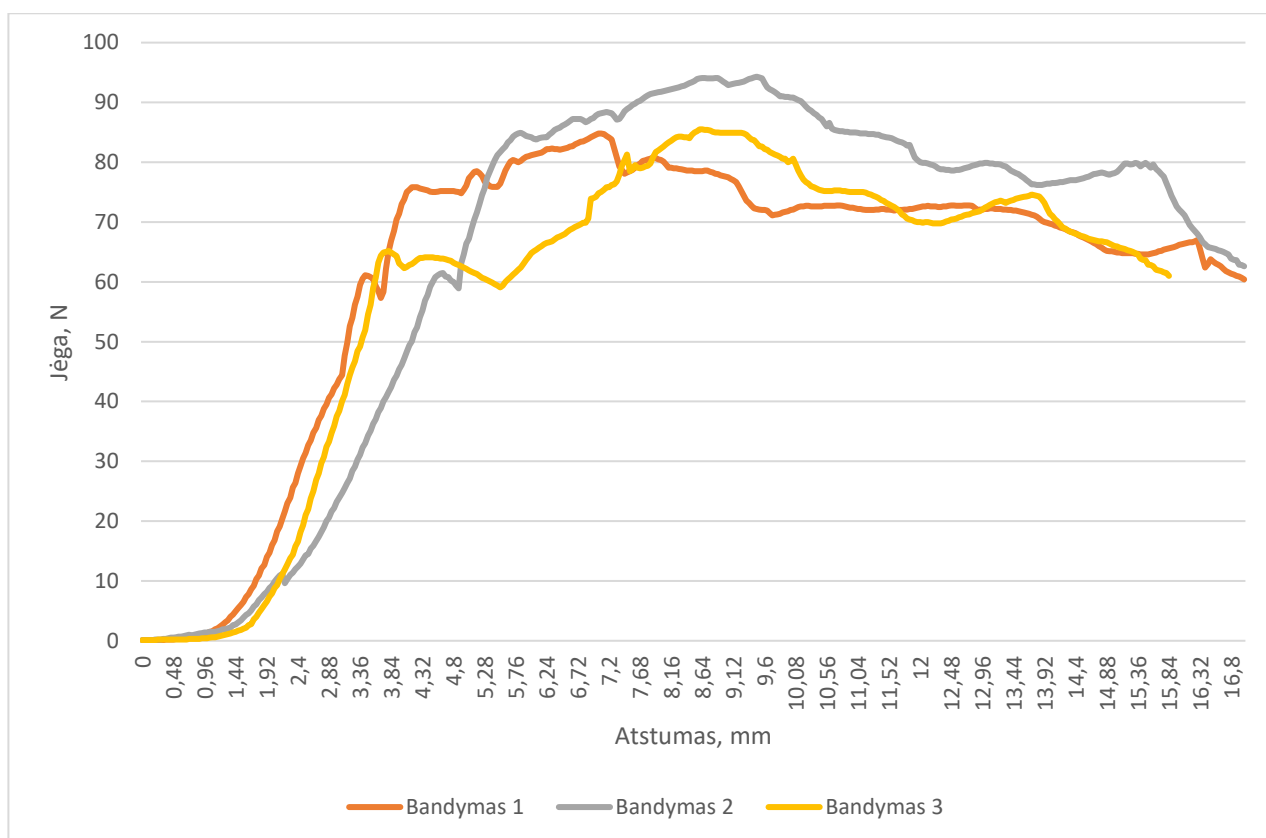
Nustatytos maksimalios jėgos (N) reikšmės, pateikiamos 15 lentelėje. Nustatyta, kad pirmojo bandymo metu maksimali jėgos reikšmė yra 82,2 N, antrojo bandymo metu – 99,4 N, o trečiojo – 100,6 N. Apskaičiuota, kad trijų atliktų bandymų metu jėgos vidurkis yra 94,1 N.

15 lentelė. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pradinė pakuotė)

| | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 | Vidurkis |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Jėga (maksimali), N | 82,2 | 99,4 | 100,6 | 94,1 |

Išorinė pakuotė atlikus optimizavimą. Tyrimo rezultatai, kai naudojama pakuotė atlikus optimizavimą yra pateikti 62 pav., yra matoma, kad mažėjant atstumui tarp gniaužtų vyksta pakuotės gniuždymas.

Visų trijų bandymų metu pastebima, kad jėga didėja ir pasiekia maksimalią reikšmę, tuomet jėga tolygiai mažėja, nes pakuotė jau yra deformuota.



62 pav. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimas (pakuotė atlikus optimizavimą)

Nustatytos maksimalios jėgos (N) reikšmės, pateikiamos 16 lentelėje. Nustatyta, kad pirmojo bandymo metu maksimali jėgos reikšmė yra 84,8 N, antrojo bandymo metu – 94,3 N, o trečiojo – 85,5 N. Apskaičiuota, kad trijų atliktų bandymų metu jėgos vidurkis yra 88,2 N.

16 lentelė. Išorinės pakuotės gniuždymo tyrimų rezultatai (pakuotė atlikus optimizavimą)

| | Bandymas 1 | Bandymas 2 | Bandymas 3 | Vidurkis |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Jėga (maksimali), N | 84,8 | 94,3 | 85,5 | 88,2 |

Atlikus gniuždymo tyrimus išorinei pakuotei prieš optimizavimą ir po optimizavimo, nustatytos jėgos veikiančios kartono pakuotę. Galima pastebėti, kad atliekant tyrimą, tiek išorinei pakuotei prieš optimizavimą, tiek po optimizavimo. Iš atliktų tyrimų pastebima, kad pakuotę prieš optimizavimą, veikiančios jėgos apskaičiuotas vidurkis yra 94,1 N, o po optimizavimo 88,2 N. Jėgos skirtumas yra 5,9 N, o tai maždaug 0,59 g. Galima pastebėti, kad šis skirtumas nėra didelis, todėl jis įtakos pakuotės stiprumui neturi. Teigiama, kad geometrinių matmenų mažinimas neturi įtakos pakuotės stiprumui. Dėl to išorinės pakuotės geometrinių matmenų mažinimo optimaliausias būdas pasirinktas tinkamai.

3. Ekonominė dalis

Atlikus stiprumo tyrimus ir pagaminus pakuotę sumažintais matmenimis yra nustatoma kiek sumažėja pakuotės medžiagų kaina. Žemiau esančiame paveiksle (61 pav.) pavaizduota, kaip sumažėja išorinė pakuotė po optimizavimo yra matoma, kad pakuotė telpa į pradinę pakuotę.



63 pav. Išorinės pakuotės vaizdas po optimizavimo

Taip pat sumažėja ir vidinė pakuotė, jos vaizdas yra pateiktas 62 pav. Galima matyti, kad pokytis yra akivaizdus.



64 pav. Vidinės pakuotės vaizdas po optimizavimo

Pagal turimus duomenis pakuotės plotas pradiniais duomenimis yra: išorinės 1430,94 cm² ir vidinės 1173,08 cm². Po atlikto geometrinių matmenų sumažinimo pakuotės plotas sumažėjo. Visi duomenys yra pateikti lentelėje. Vidinės pakuotės plotas yra 828,52 cm² ir išorinės 1059,54 cm². Vidinės pakuotės plotas sumažėjo 344,56 cm², o tai yra 29,4 %. Išorinės pakuotės plotas prieš bandymus yra 1430,94 cm², o po bandymų plotas sumažėjo iki 1059,54 cm². Skirtumas tarp plotų yra 371,40 cm², išorinės pakuotės plotas sumažintas 25,9 %. Remiantis turimais duomenimis visos lengvasvorio produkto pakuotės plotas yra sumažinamas 27,5 %.

17 lentelė. Pakuotės ploto duomenys

| | Pradinis plotas, cm² | Plotas po optimizavimo, cm² | Skirtumas, cm² |
|------------------------|--|---|----------------------------------|
| Vidinė pakuotė | 1173,08 | 828,52 | 344,56 |
| Išorinė pakuotė | 1430,94 | 1059,54 | 371,40 |

Turint pakuotės plotą, galima nustatyti, kiek yra sumažinama pakuotės medžiagų kaina. Žemiau esančioje lentelėje yra pateikiama rinkoje vyraujanti pakuotei naudojamų medžiagų kaina. Kaina nustatoma apskaičiavus vidurkį tarp skirtingų kainų, kurias pateikia medžiagų tiekėjai. Nustatyta, kad vidinės pakuotės kaina už 100 cm² yra 0,015 Eur, o išorinės 0,013 Eur.

18 lentelė. Pakuotės medžiagos rinkos kaina

| | Kaina, Eur (100 cm²) | | | | Vidurkis |
|-----------------------------------|--|-------|-------|-------|-----------------|
| Vidinės pakuotės medžiaga | 0,01 | 0,003 | 0,035 | 0,012 | 0,015 |
| Išorinės pakuotės medžiaga | 0,008 | 0,022 | 0,010 | 0,012 | 0,013 |

Atlikus kainos tyrimus yra apskaičiuojama, kiek sumažėja pakuotės kaina, sumažinus medžiagos kiekį. Gauti rezultatai yra pateikiami 19 lentelėje. Kainos pokytis nėra labai didelis, vidinės pakuotės medžiagos kainos skirtumas yra 0,05 Eur, o išorinės pakuotės medžiagos kainos skirtumas – 0,04.

Tačiau pateikta pakuotės medžiagos kaina yra vieneto, o produktas vyrauja pasaulinėje rinkoje. Galima pastebėti, kad atlikus pakuotės tobulinimą yra sutaupoma 0,09 Eur medžiagai, kuri skirta vienai pakuotei, tačiau gaminant 10 vnt. pakuočių yra sutaupoma 0,9 Eur, gaminant 100 vnt. pakuočių yra sutaupoma 9 Eur, gaminant 1000 vnt. pakuočių yra sutaupoma 90 Eur ir t.t. Galima daryti išvadą, nors kainos skirtumas, sumažinus pakuotę, nėra didelis, tačiau produktas vyrauja pasaulinėje rinkoje, todėl gaminant didelius kiekius šios pakuotės, skirtumas yra jaučiamas ir iš ekonomikos pusės.

19 lentelė. Pakuotės kainos pokytis

| | Vidinė pakuotė | Išorinė pakuotė |
|---|-----------------------|------------------------|
| Kaina prieš optimizavimą, Eur/vnt. | 0,17 | 0,18 |
| Kaina po optimizavimo, Eur/vnt. | 0,12 | 0,14 |
| Skirtumas, Eur/vnt. | 0,05 | 0,04 |

Išvados

1. Remiantis analizuota literatūra ir moksliniuose straipsniuose pateikta tyrimų informacija, lengvasvorio produkto pakuotei, kaip optimizavimo būdas pasirinktas geometrinių matmenų sumažinimas. Atliktame tyrime naudojama lengvasvorio produkto pakuotė. Lengvasvoris produktas, tai kvepalų buteliukas. Pakuotę sudaro vidinė ir išorinė pakuotės, kurios pagamintos iš popieriaus. Nustatyta, kad vidinė pakuotė yra pagaminta iš trijų sluoksnių gofruotojo kartono (1,0 mm storio), kuris yra F bangos tipo, o išorinė pakuotė pagaminta iš kartono (0,5 mm storio).
2. Atliekant pakuotės optimizavimą, naudojamas geometrinių matmenų sumažinimas. Nustatyti pakuotės pradiniai geometriniai duomenys, kurie bandymų metu mažinami. Sumažinus geometrinius pakuotės matmenis atliekamas stiprumo tyrimas (naudojant programą „SolidWorks“), kurio metu nustatyta, kad vidinės pakuotės įtempių skaitinė vertė prieš optimizavimą yra 1,849 MPa ir po optimizavimo – 1,805 MPa, išorinės pakuotės įtempių skaitinė vertė prieš optimizavimą yra 3,848 MPa ir po optimizavimo 3,845 MPa. Pastebima, kad skirtumas tarp gautų rezultatų nėra didelis, todėl yra teigiama, kad geometrinių matmenų sumažinimas pakuotės stiprumui įtakos neturi.
3. Remiantis turimais duomenimis pasirinktas optimalus pakuotės dydis ir pagaminta reali pakuotė pagal geometrinius matmenis, kurie gauti atlikus pakuotės optimizavimo tyrimą. Atliktų bandymų metu nustatyta, kad geometrinių matmenų sumažinimas pakuotės stiprumui įtakos neturi. Papildomai yra atliekami pakuotės gniuždymo tyrimai, kurių metu nustatyta, kad vidinę pakuotę, prieš optimizavimą, veikianti maksimali jėga yra 80,5 N, o po optimizavimo – 80,2 N. Išorinę pakuotę veikianti maksimali jėga prieš optimizavimą yra 94,1 N ir po optimizavimo – 88,2 N. Remiantis gautais tyrimų rezultatais yra teigiama, kad pakuotės geometrinių matmenų sumažinimas nedaro įtakos pakuotės stiprumui, jeigu yra pasirinktas optimaliausias pakuotės geometrinių matmenų sumažinimo būdas.
4. Apskaičiuota, kad pakuotės plotas sumažėjo, kadangi išorinės pakuotės plotas prieš optimizavimą yra 1430,94 cm² ir po optimizavimo plotas sumažėjo iki 1059,54 cm², skirtumas yra 371,40 cm², išorinės pakuotės plotas sumažintas 25,9 %. Vidinės pakuotės plotas prieš optimizavimą yra 1173,08 cm² ir po optimizavimo plotas sumažėjo iki 828,52 cm², skirtumas yra 344,56 cm², vidinės pakuotės plotas sumažintas 29,4 %. Bendras produkto pakuotės sumažinimas yra 27,5 %.
5. Atlikti ekonominiai skaičiavimai, kurių metu įvertintas pakuotės medžiagos kainos kitimas sumažinus geometrinius pakuotės matmenis. Nustatyta, kad pakuotės medžiagos kainos skirtumas prieš optimizavimą ir po nėra labai didelis. Vidinės pakuotės medžiagos kainos skirtumas yra 0,05 Eur, o išorinės 0,04, tačiau pateikta kaina yra vieneto, o produktas vyrauja pasaulinėje rinkoje. Galima pastebėti, kad atlikus pakuotės tobulinimą yra sutaupoma 0,09 Eur vienai pakuotei. Atsižvelgiant į gautus rezultatus yra teigiama, kad pakuotės sumažinimas yra naudingas.

Literatūros sąrašas

1. KLIAUGAITĖ, D., VARŽINSKAS, V., MILIŪNAS, V. *Environmentasl impact minimization ant the reduction of greenhouse gas emmissions in frozen food packaging*. [žiūrėta 2019 m. kovo 25 d.]. Prieiga per internetą: http://www.esparama.lt/documents/10157/490675/Environmental_Kliaugaite.pdf/6c27e07c-93cb-4889-a8ba-02ef293bf409
2. Business Resource Efficiency Guide. *Packaging Optimisation for SMEs*. 2015. Prieiga per internetą: www.wrap.org.uk
3. *European Parliament and Council Directive 94/62/EB on packaging and packaging waste*. Official Journal of the European Communities. No. L 36, 31/12/1994. P. 10–23. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1994/62/oj>
4. PULLMAN, Madeleine, WIKOFF, Robin. *Institutional sustainable purchasing priorities. Stakeholder perceptions vs environmental reality*. International Journal of Operations & Production Management Vol. 37 No. 2, 2017. Prieiga per internetą: <https://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/IJOPM-07-2014-0348>
5. RUBIOA, S., RAMOSB, T. R.P., LEIT, M.M., BARBOSA-POVOA, A.P. *Effectiveness of extended producer responsibility policies implementation: The case of Portuguese and Spanish packaging waste systems*. Journal of Cleaner Production Volume 210, 10 February 2019, Pages 217-230. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618333328>
6. KALYANKAR, Nilesh V., MAHAKALKAR, Sachin G., GIRI, Jayant P. *A Review on Optimization of Corrugated Sheet Box Size for an Industrial Part*. International Journal of Research in Advent Technology (E-ISSN: 2321-9637), 2015. [žiūrėta 2019 m. vasario 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ijrat.org/downloads/icatest2015/ICATEST-2015011.pdf>
7. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13430:2005]. *Pakuotė. Naudotų pakuočių, numatomų perdirbti į medžiagas, reikalavimai = Packaging – Requirements for packaging recoverable by material recycling*. Vilnius, Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
8. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13432:2002]. *Pakuotės. Pūdymo ir biologinio irimo būdu atgaunamų pakuočių reikalavimai. Bandyto schema ir galutinio pakuočių priėmimo vertinimo kriterijai = Packaging - Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging*. Vilnius, Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005
9. Waste & Resources Action Programme. *Reducing corrugated cardboard weight without compromising performance*. The Old Academy, 21 Horse Fair, Banbury, Oxon. [žiūrėta 2019 m. rugsėjo 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/15203-01%20Kite%20Packaging%20report.pdf>
10. HAVENKO, S., BERNATSEK, V., KHADZHYNOVA, S. *Investigation of stress-strain state of micro-corrugated cardboard components in the process of its laminating and manufacturing packaging*. Ukrainian Academy of Printing, 2017. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/318010883>
11. MCKINNON, Mark B., STOLIAROV, Stanislav I., WITKOWSKI, Artur. *Development of a pyrolysis model for corrugated cardboard*. United States, 2015. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218013002113>

12. ALLAOU, S., ABOURA, Z., BENZEGGAGH, M.L. *Effects of the environmental conditions on the mechanical behaviour of the corrugated cardboard*. France, 2015. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353807004587>
13. KAUSHAL, M.C., SIROHYA, V.K., RATHORE, R.K. *Corrugated Board Structure: A Review*. Prieiga per internetą: https://pdfs.semanticscholar.org/6602/d55803c5bceb7e73fde82360cc75d9b8610f.pdf?_ga=2.223400539.1915719937.1574183412-1571822418.1574183412
14. RUDAWSKA, Anna, ČUBONOVA, POMARANSKA, Kamila, STANČEKOVÁ, Dana, GOLA, Arkadiusz. *Technical and organizational improvements of packaging production process*. Advances in Science and Technology Research Journal Volume 10, No. 30, June 2016, pages 182–192. [žiūrėta 2019 m. vasario 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-ff30f093-3051-45c3-ab3d-42ebf93e7283>
15. ZHAO, P., OUYANG, Y., XU, M., YANG, L., REN, Y. *Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging*. China Academic Conference on Printing and Packaging, 2018.
16. DOMINIC, C.A.S., OSTLUND, S., BUFFINGTON, J., MASOUD, M. M. M. *Towards a Conceptual Sustainable Packaging Development Model: A Corrugated Box Case Study*. Stockholm, Sweden: Packag. Technol. Sci. 2015. [žiūrėta 2019 m. vasario 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pts.2113>
17. RUI, Wang. *Four ways to achieve reduction of corrugated packaging*. Printing Technology, 2009, p. 43-44.
18. KABELKAITĖ, A. Popieriaus ir kartono liejimo krypties ir medžiagos defektų įtakos savosioms virpesių modoms tyrimas. Kaunas: KTU, 2009
19. ČEPAITĖ, G., DABKEVIČIUS, A. *Eksploatacinių veiksnių įtaka pakuočių kartono mechaninėms charakteristikoms*. Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2008, p. 243-249.
20. CHENA, Jing, ZHANGA, Yao-li, SUNB, Jian. *An Overview of the Reducing Principle of Design of Corrugated Box Used in Goods Packaging*. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology: 2011. [žiūrėta 2019 m. kovo 2 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029611003549>
21. SHUDI, Guo. *The Research on the Relationship Between Dimension Scale and Compression Strength for Corrugated Box*. Logistics Sci-Tech, 2009, p. 97-98.
22. MARIËSSE, A.E., WORRELL, Ernst. *The paradox of packaging optimization – a characterization of packaging source reduction in the Netherlands*. Resources, Conservation and Recycling: 2013, p. 133– 142. [žiūrėta 2019 m. kovo 7 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000256>
23. ZHANG, Z., QIU, T., SONG, R., SUN, Y. *Nonlinear Finite Element Analysis of the Fluted Corrugated Sheet in the Corrugated Cardboard*. China, 2014. Prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/654012/abs/>
24. MONTAGUE-JONES, G. *Plenty of scope remains for more lightweighting, argues Euromonitor online news article on Beverage Daily*. 2010. Prieiga per internetą: <http://www.foodproductiondaily.com/Packaging/Plenty-of-scope-remains-formorelightweighting-argues-Euromonitor>
25. DOSHI, Hardik B., LEHMANN, Sebastian. *Optimization of packaging sizes*. Patent No.: US 9,098,822 B1. 2015. Prieiga per internetą: <https://patentimages.storage.googleapis.com/dc/f9/25/5a516286d27c5b/US9098822.pdf>

26. KALYANKAR, Nilesh V., MAHAKALKAR, Sachin G. *Optimization of Corrugated Sheet Box Size for an Industrial Part – A Case Study*. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), ISSN: 2321-9653, 2015. [žiūrėta 2019 m. vasario 25 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=2199>
27. REN, N., VRIES, J., ZHOU, X., MEREDITH, K., WANG, Y. *Large-scale fire suppression modeling of corrugated cardboard boxes on wood pallets in rack-storage configurations*. USA, 2017. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711217301893>
28. MILIŪNAS, V., BIVAINIS, V., KIBIRKŠTIS, E. *Pakuočių mechaninių charakteristikų tyrimai. Konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 2008, p. 253-257
29. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 527-3:2019]. Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 3 dalis. Plėvelių ir lakštų bandymų sąlygos (ISO 527-3:2018) = Plastics - Determination Of Tensile Properties - Part 3: Test Conditions For Films And Sheets (ISO 527-3:2018). Vilnius, Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.