

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Mechanikos inžinerijos katedra

Aurimas Kubilius

**BIRIŲ MEDŽIAGŲ ŠLYTIES
SAVYBIŲ TYRIMAI**

Perdirbimo pramonės inžinerijos studijų programos
magistro baigiamasis darbas

KLAIPĖDA, 2010

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠČIO FORMA

Pildo bakalauro/magistro baigiamojo darbo autorius

.....
(bakalauro/magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

.....
(bakalauro/magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

Patvirtinu, kad bakalauro/magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis bakalauro/magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.

.....
(bakalauro/ magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Sutinku, kad bakalauro/magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.

.....
(bakalauro/ magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Pildo bakalauro/magistro baigiamojo darbo vadovas

Bakalauro/magistro baigiamąjį darbą ginti

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....
(data)

.....
(bakalauro/magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje

.....
(data)

.....
(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, vedėjas

Bakalauro/magistro baigiamąjį darbą ginti

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....
(data)

.....
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Recenzentu(-ais) skiriu

.....
(įrašyti recenzento(u) vardą, pavardę)

.....
(data)

.....
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

ANOTACIJA

Autorius: *Aurimas Kubilius*

Magistro baigiamojo darbo pavadinimas: Birių medžiagų šlyties savybių tyrimai

Magistro baigiamojo darbo tikslas – paruošti birių medžiagų šlyties savybių tyrimams skirtą įrangą ir atlikti eksperimentinius matavimus.

Perdirbimo pramonėje dažnai naudojama žaliava birių medžiagų pavidalu. Tokią medžiagą lengva sandėliuoti, transportuoti ir perdirbti. Perdirbant birių medžiagą taikoma sraigtinio ekstruzerio technologija. Vykstant medžiagos transportavimui ekstruzijos metu, sraigto kanalu, vyksta medžiagos deformavimo procesas.

Moksliniame tiriamajame darbe nagrinėjama, sprendžiama problema – šlyties įtempių nustatymas tarp besisukančio rotoriaus ir birios medžiagos. Šlyties įtempiams tirti pasiūlyta nauja tyrimo metodika. Atlikti eksperimentiniai matavimai. Nustatytos šlyties įtempių priklausomybės tarp besisukančio rotoriaus kukurūzų miltų, kintant slėgiui ir apsisukimų dažniui.

PAGRINDINIAI ŽODŽIAI: ekstruzija, šlytis, biri medžiaga, metodika.

ANOTATION

Author: *Aurimas Kubilius*

Title of master theses: Investigating the share of bulk matter

The aim of my master project was to set up the laboratory equipment and test it measuring the share of bulk matter.

The bulk matter is often used in the processing industry, because it is ease to store and transport. The helical extrusion technology is used processing the bulk matter. This manipulation causes deformation of the bulk matter when transporting it through the helical canal.

The main question analysid in this work was how to estimate the tention of the share between the spined rotor and bulk matter. The new method was sugested for this and used in the experimental research. The relation of the tention of the share between the spined rotor and bulk matter of corn flour to the changes of preasure and rotation speed. He relation of the tention of the share between the spined rotor and bulk matter of corn flour to the changes of preasure and rotation speed were estimated.

KEY WORDS: extrusion, shear, bulk matter, new method

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1.1 pav. Polimerų grūdelių slydimo trinties koeficiento nustatymo principinė schema
- 1.2 pav. Slydimo trinties koeficiento kitimas laike viso suspaudimo proceso metu. Suspaudimo greitis 6,2 m/s ir apkrovos dažnis $0,35 \cdot 10^3 \text{s}^{-1}$
- 1.3 pav. A. Kasahara trinties koeficiento nustatymo įrenginio principinė schema
- 1.4 pav. B. A. Svensson trinties koeficiento matavimo prietaisas.
- 1.5 pav. Šlyties deformacijų principas šlyties įrenginyje
- 1.6 pav. Sukamieji šlyties matavimo įrenginiai: a – sukamosios šlyties bandymų įrenginys, b – žiedinis šlyties įrenginys
- 1.7 pav. Jenike'no šlyties matavimo įrenginio principinė schema
- 1.8 pav. Schulzo žiedinio šlyties matavimo įrenginio principinė schema
- 2.1 pav. Vieno sraigto ekstruderio schema.
- 2.2 pav. Medžiagos tekėjimas ekstruderio sraigto kanalu
- 2.3 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas skerspjūvio plote.
- 3.1 pav. Tiriamojo stendo kinematinė schema.
- 3.2 pav. Birių medžiagų šlyties tyrimų stendas paruoštas darbui
- 3.3 pav. Tyrimo principinė schema
- 3.4 pav. Rotoriaus schema
- 3.5 pav. Rotorius paruoštas darbui
- 3.6 pav. Duomenų kaupimo sistemos schema
- 3.7 pav. Keitiklio elektrinė schema
- 3.8 pav. Įtampos priklausomybė nuo jėgos. Mėlyna linija sujungti taškai iš gautų rezultatų. Juoda linija regresijos kreivė.
- 3.9 pav. LabVIEW programos priekinis panelis naudojamas birių medžiagų šlyties savybių tyrimo stende.
- 3.10 pav. LabVIEW programos schemas langas naudojamas birių medžiagų trinties koeficiento nustatymo stende.
- 3.11 pav. Kukurūzų miltų grūdeliai, padalos reikšmė 1 mm.
- 3.12 pav. Tiriamai medžiagai sukeliama slėgio priklausomybė nuo masės.
- 4.1 pav. Pasipriešinimo jėgos matavimo parodymai kai apsisukimų dažnis 42 aps/min, tačiau kinta prispaudimo jėga Q: $Q_1 - 58,1 \text{ N}$; $Q_2 - 107,2 \text{ N}$; $Q_3 - 156,2 \text{ N}$; $Q_4 - 205,3 \text{ N}$; $Q_5 - 254,3 \text{ N}$; $Q_6 - 303,4 \text{ N}$.
- 4.2 pav. Užfiksuoti duomenys bandymo metu kai apsisukimų dažnis 18 aps/min ir prispaudimo jėga 156,2 N.

- 4.3 pav. Tiriamos medžiagos būvio kaita: a – bandymo pradžioje; b – esant nusistovėjusiam periodui.
- 4.4 pav. Kukurūzų miltų dalelių kaita: a – prieš bandymą; b – po bandymo
- 4.5 pav. Sutankintos dalelės po bandymo.
- 4.6 pav. F reikšmės grafike.
- 4.7 pav. Medžiagą veikiančių, šlyties įtempių santykinio mažėjimo priklausomybė nuo veikiančios jėgos Q.
- 4.8 pav. Šlyties įtempių diagramos kai apsisukimų dažnis 42 aps/min *tačiau kinta prispaudimo jėga*
 $Q: Q_1 - 58,1 \text{ N}; Q_2 - 107,2 \text{ N}; Q_3 - 156,2 \text{ N}; Q_4 - 205,3 \text{ N}; Q_5 - 254,3 \text{ N}; Q_6 - 303,4 \text{ N}.$
- 4.9 pav. Mažiausių kvadratų metodu nubrėžtos kreivės gautiems eksperimento rezultatams, kada n – 42 aps/min, $Q: 1 - 58,1 \text{ N}; 2 - 107,2 \text{ N}; 3 - 156,2 \text{ N}; 4 - 205,3 \text{ N}; 5 - 254,3 \text{ N}; 6 - 303,4 \text{ N}.$
- 4.10 pav. Šlyties įtempių diagramos kai apkrovimo jėga Q - 303,4 N tačiau kinta apsisukimų dažnis n.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Reologinių savybių matavimo metodų klasifikacija

3.1 lentelė Taravimo duomenys.

3.2 lentelė: Kukurūzų miltų charakteristikos.

3.3 lentelė Tiriamos medžiagos slėgio priklausomybė nuo svorio.

4.1 lentelė Šlyties įtempių didėjimo laipsniai.

4.2 lentelė. Bandymo metu gautų rezultatų šlyties įtempių priklausomybės nuo laiko

IVADAS

Birių žaliavos produktų naudojimas perdirbimo pramonėje yra dažnas. Jos dažnai sutinkamos maisto, farmacijos, chemijos, plastiko, statybų ir kitose pramonės šakose. Visos kietos birios medžiagos turi būti sandėliuojamos, transportuojamos ir perdirbamos. Didėjant šių produktų paklausai, didėja būtinybė tobulinti perdirbimo procesą, nustatyti optimalius perdirbimo režimus gaminamų produktų kokybei, įvertinti medžiagų mechanines – struktūrines savybes, bei birių medžiagų sąveiką su technologinių įrenginių darbiniais paviršiais.

Žaliavų vir produktų struktūrinės – mechaninės savybės priklauso nuo tokių faktorių kaip temperatūra, drėgmė, mechaninio poveikio dydis, trukmė ir greitis, o taip pat saugojimo laikas, transportavimo būdas, perdirbimo būdas.

Birių medžiagų transportavimo ir perdirbimo procesuose dažnai taikomi sraigtiniai įrenginiai. Tačiau sraigtiniai įrenginiai dažniausiai taikomi ekstruziniams procesams vykdyti.

Ekstruzijos sraigtiniai įrenginiai pasižymi dideliu našumu, sąlyginiu konstrukcijos paprastumu, greitu pritaikymu naujoms medžiagoms perdirbti, įgalina lengvai kontroliuoti ir keisti gaminamo produkto parametrus. Ekstruderiais gaminama aukštos kokybės gaminiai ir pusfabrikačiai. Tokie įrenginiai naudojami atskirose technologinėse ar didelio našumo automatizuotose linijose. Ekstruderių našumą galima derinti su kitų įrenginių, sudarančių technologinę sistemą, našumu. Tokių įrenginių plataus taikymo galimybės yra neatsiejamą nuo jose vykstančių technologinių procesų gero išmanymo ir supratimo.

Didėjant reikalavimams mašinoms ir prietaisams, norint padidinti jų efektyvumą, bei išleidžiamos produkcijos kokybę, atsirado būtinybė ištirti gamybinius technologinius procesus, įvertinant fizines, mechanines – frikcines birių medžiagų savybes. Tirti vykstančius technologinius procesus gamybos metu nėra tikslinga, dėl nutraukiamo gamybos darbo. Todėl būtina kurti laboratorinius įrenginius - standus, kurių bandymo procesas yra mažai pakitęs nuo realaus technologinio proceso. Taip pat būtina kurti matavimo metodikas atitinkančias keliamus reikalavimus.

Ekstruzijos proceso specifika yra kintantis slėgis, temperatūra, judantys paviršiai ir pan. Yra pasiūlyta daug laboratorinių įrenginių matuoti trintį tarp įvairių paviršių, tačiau nedaugelis nagrinėja birios medžiagos šlyties ir frikcines savybes į darbinį paviršių imituojantį įrankį. Be to nėra tokios matavimo metodikos, kurios metu gauti duomenys būtų adekvatūs realiam ekstruzijos procesui.

Darbo tikslas – paruošti birių medžiagų šlyties įtempių tyrimo metodiką ir nustatyti kukurūzų miltų šlyties įtempių priklausomybes nuo technologinių parametru.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti mokslinę literatūrą tiriančią šlyties įtempius ir frikcines savybe biriose medžiagose.
2. Pasiūlyti šlyties įtempių tyrimo metodą.
3. Sukonstruoti tyrimo stendą su šiuolaikinėmis matavimo priemonėmis šlyties įtempių tyrimams.
4. Paruošti birių medžiagų šlyties savybių tyrimo metodiką.
5. Ištirti kukurūzų miltų šlyties įtempių priklausomybę kai:
 - Tyrimo temperatūra 18 °C;
 - Kinta apsisukimų dažnis;
 - Kinta šlyties paviršių veikiantis slėgis.
6. Atlikti gautų rezultatų analizę.
7. Pateikti išvadas.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Yra atlikta nemažai darbų tiriant įvairių birių medžiagų frikcines savybes ant darbinių įrenginių paviršių, adhezijos reiškinių medžiagose ir technologinių procesų, kuriuose didelę reikšmę turi trintis. Tačiau didelė dalis mokslinių tyrimų yra atlikta nagrinėjant polimerinių medžiagų ir metalo miltelių frikcines savybes. [9,10,11,12,13,14,15,16,].

Frikinės savybės buvo išnagrinėtos tarp guminės formos ir birios medžiagos po šalto izostatinio formavimo. Matavimai buvo atliekami naudojantis žiedo ir disko tipo matuokliu (JIS K 7218). Biri medžiaga buvo pasirinkta nerūdijančio plieno milteliai, kurie buvo tirpinami 1000°C temperatūroje, 30 minučių. Po kaitinimo buvo suformuotas žiedas su 20 ir 28 mm vidiniu ir išoriniu diametrais, pagal nurodytą tvarką standarte. Suformuotas žiedas ir guminis diskas talpinamas ant bandymų mašinos. Žiedas dedamas ant nesisukančios ašies, o guminis diskas ant besisukančios ašies. Sukimosi greitis buvo 200 mm min⁻¹, bandymo laikas 15 min. Bendras išmatuotas trinties koeficientas yra 0,52 (Lee, at al., 2008).

Kitame darbe buvo nagrinėjama dinaminė trintis, slydimo trintis ir prilipimo-slydimo fenomenas polimerų grūdeliuose, didelio greičio suspaudimo metu. Trintis tarp grūdelių dalelių ir štampos sienelių proceso metu yra pagrindinis faktorius, įtakojantis struktūrines variacijas suspaustos medžiagos viduje. Slydimo koeficientui rasti buvo naudojama Ballhauseno formulė:

$$\eta = \left(\frac{P_t}{\frac{D}{a}} \right)^{\frac{4F}{H}} \quad (1.1)$$

čia: P_t – perduodamas slėgis

P_a – suteikiamas slėgis

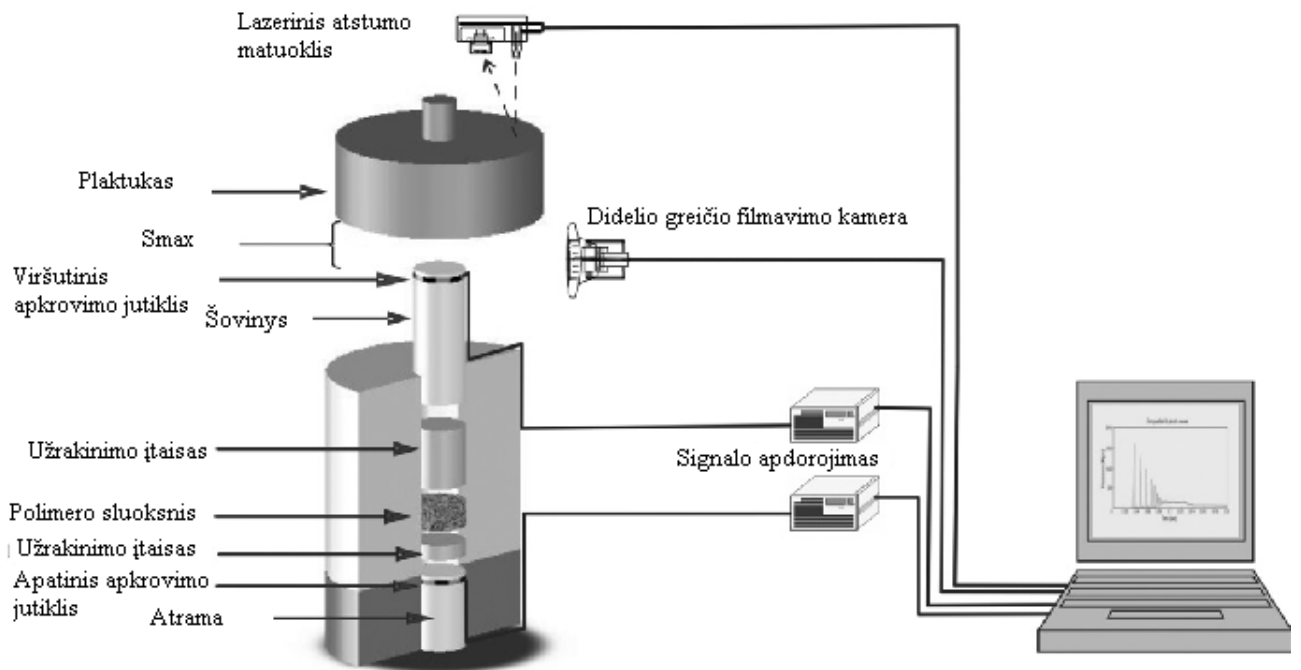
F – plotas

S – perimetras

H – grūdelių aukštis

Slydimo trinties koeficientas η charakterizuoja perdavimo efektyvumą suspaudimo jėgos per polimerinius grūdelius. Šis laipsnis paprastai apibrėžia pasipriešinimą (jėgos) judant dviejų kūnų paviršiams (polimerų grūdeliams ir štampos sienai) kontakto zonoje.

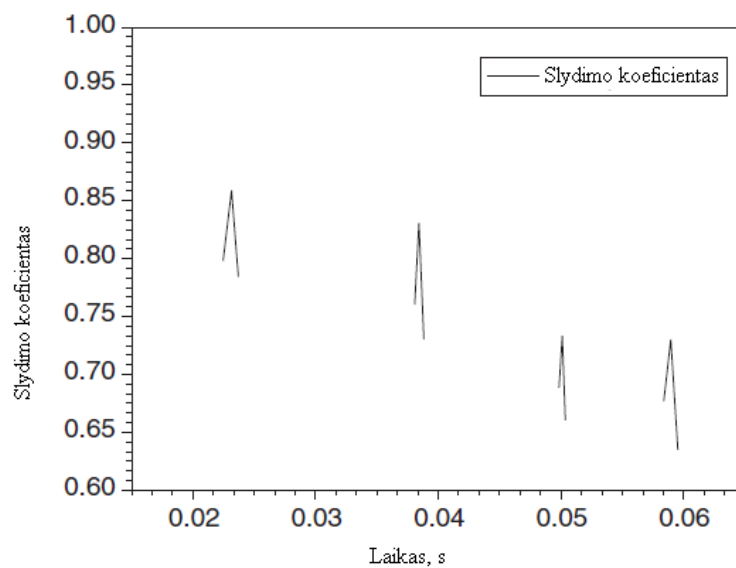
Matavimo schema pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Polimerų grūdelių slydimo trinties koeficiento nustatymo principinė schema

Polimerų grūdeliai dideliu greičiu yra suspaudžiami šovinio pagalba. Relaksacijos strypas yra reikalingas, kad užrakintų grūdelius suslėgtoje padėtyje. Buvo pasirinkti trys suspaudimo greičiai: 4,8; 5,3 ir 6,2 m/s

Trinties koeficiento reikšmės gautos bandymo metu galime matyti 1.2 paveiksle.

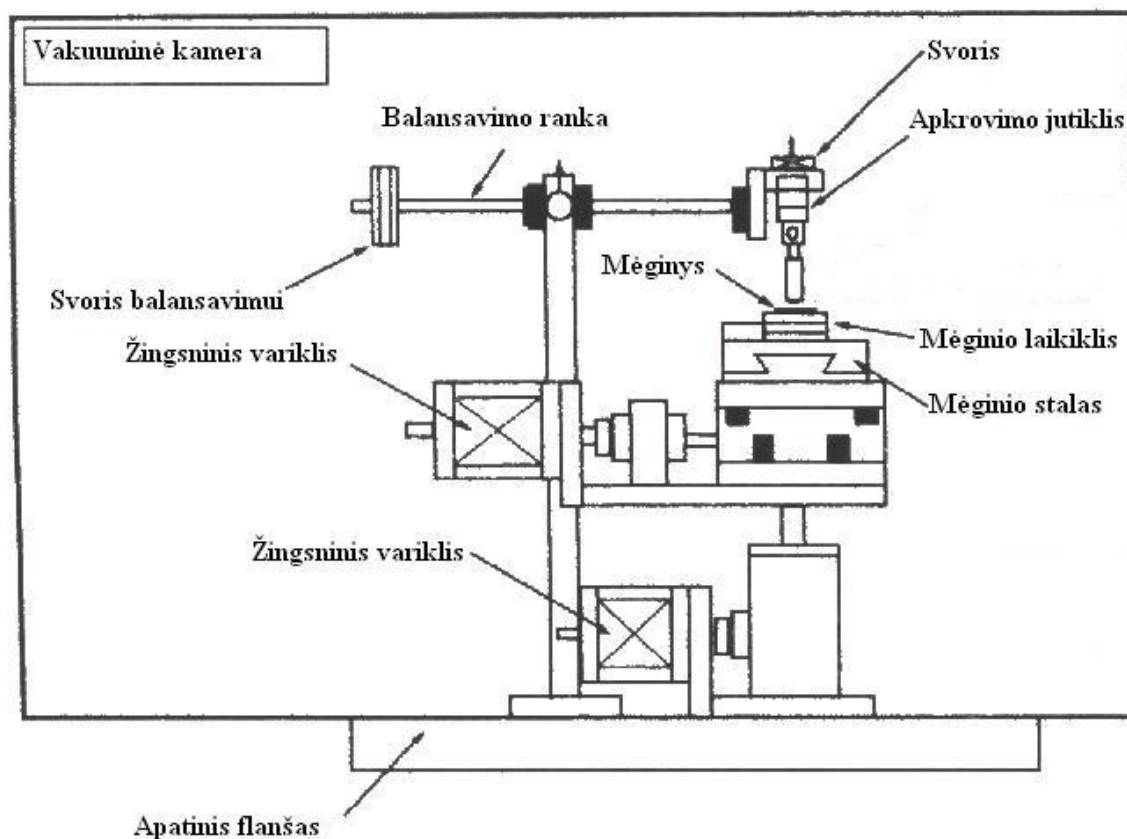


1.2 pav.: Slydimo trinties koeficiento kitimas laike viso suspaudimo proceso metu. Suspaudimo greitis 6,2 m/s ir apkrovos dažnis $0,35 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$

Nors trinties koeficientą įtakoja slydimo greitis, kontakto slėgis, šampo paviršiaus būklė, polimerų dalelių dydis, suspaudimo laipsnis ir laikas, šie faktoriai nėra pilnai išaiškinti. Būtina atlikti daugiau bandymų ir matavimų, kad išaiškinti šių faktorių įtaką suspaudimo procesui (Azhdar, at al., 2006).

Nemažai mokslinių darbų nagrinėja birios medžiagos tekėjimą ar transportavimą. Tam dažnai taikomi analitiniai metodai. Tam kuriamos birios medžiagos tekėjimą imituojančios programos. Tyrimai atliekami naudojant atskirų elementų metodą (Guo, at al., 2009) ir baigtinių elementų metodą (Pan Shi, at al., 2009).

Iš nagrinėtų straipsnių galime pastebėti, kad daugumai atliktiems trinties matavimams buvo naudojamos šiuolaikinės matavimo priemonės (Kasahara, at al., 2003). Straipsnyje nagrinėjama trinties koeficiento matavimai vakuume, tarp nerūdijančio plieno ir plieninio šrato. Tam panaudota apkrovos matavimo prietaisas (1.3 pav.).

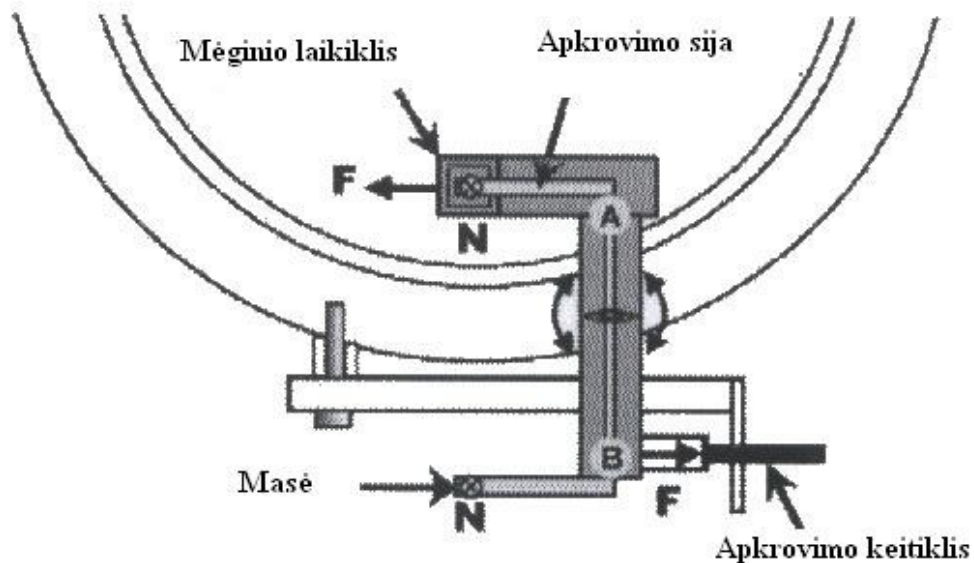


1.3 pav. A. Kasahara trinties koeficiento nustatymo įrenginio principinė schema

Iš kameros oras ištraukiamas dviem vakuuminiais siurbliais. Kameros sienos pagamintos iš nerūdijančio plieno, kurio markė 304. Visas matavimo prietaisas pastatytas ant UFC306 flanšo, pro jį praeina visi elektros kabeliai reikalingi sistemai. Mėginio poziciją galima keisti xyz ašių kryptimis, tam yra sumontuoti du žingsniniai elektros varikliai. Mėginys lengvai pritvirtinamas prie lėkštelės. Matavimo šratas virš mėginio turi apkrovimo sistemą ir apkrovos keitiklį. Kamera

ištraukiama vakuuminiais siurbliais ($0,55$ ir $0,06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Vakuumas matuojamas su BA ir Piranio matuokliais. Matavimas gali būti atliekamas dvejais būdais. Pirmas būdas kada šrato apkrovimas yra nuo $9,8 \text{ mN}$ iki $1,47 \text{ N}$. Antras būdas kada apkrovimas siekia nuo $980 \mu\text{N}$ iki 98 mN . Mėginys pagamintas iš nerūdijančio plieno 304, matmenys $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}$. Visi mėginiai, prieš atliekant matavimą, yra poliruojami.

Švedų mokslininkų suprojektuotame stende, trinties koeficientas matuojamas tarp medienos ir plieno (Svensson, at al., 2004). Matavimams atlikti jie panaudojo tenzorezistorinį apkrovimo keitiklį (1.4 pav.).



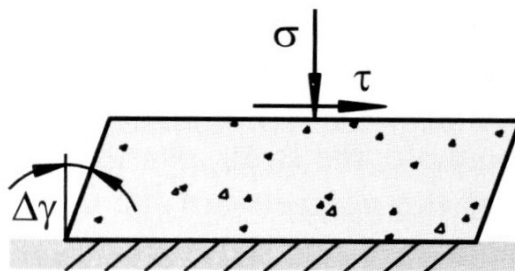
1.4 pav. B. A. Svensson trinties koeficiento matavimo prietaisas.

Trinties matavimo įrenginys turi nerūdijančio plieno slėginę kamerą. Įeinančių garų temperatūrą gali pasiekti nuo 100 C^0 iki 180 C^0 laipsnių. Įrenginio judančios dalys yra 269 mm diametro plokščias, plieninis diskas (3 mm storio) ir medienos mėginys ($12 \times 12 \times 12 \text{ mm}$). Diskas gali būti greitai pakeičiamas, jis sumontuotas ant įrenginio pagrindinio veleno sujungto diržine pavara prie elektros variklio. Variklis pajungtas prie kompiuterio, kad būtų galima kontroliuoti variklio apsisukimų dažnį.

Diskui sukantis viena medinio mėginio pusė (bandinio pusė) slysta fiksuotu diametru. Slydimo greitis siekia apie 150 m/s . Medinį mėginį spaudžia prie disko apkrovimo ranka. Trintis matuojama piezorezistoriniu apkrovimo keitikliu.

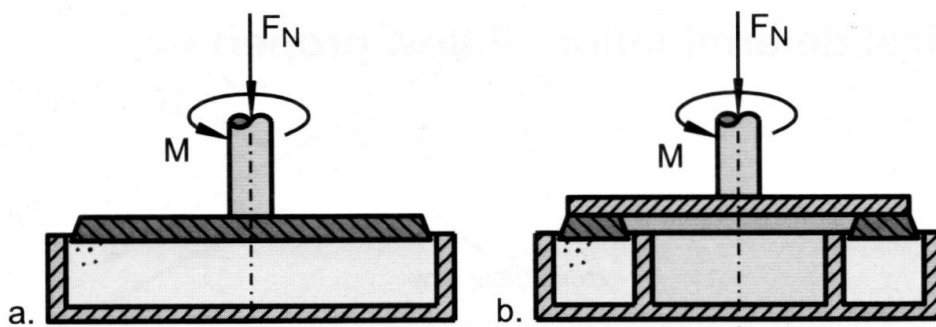
Šiuolaikinių matavimo priemonių naudojimas trinties savybių tyrimuose yra tikslingas dėl keitiklių ir jutiklių tikslių parodymų. Dėl didelio jautrumo galima nustatyti trinties koeficientą mažame paviršiaus plote (Andersen, at al., 2001; John Rajesh, at al., 2004; Rosochowski, at al., 2001).

Birių medžiagų frikcinėms ir tekėjimo savybėms tirti dažnai taikomi šlyties matavimo įrenginiai. Kietą birią medžiagą veikia vertikalūs normaliniai įtempiai σ ir nepastovūs šlyties įtempiai horizontalioje plokštumoje (1.5 pav.). Bandymų metu matuojami šlyties įtempiai τ ir su tuo susijusios deformacijos. Jeigu santykinis poslinkis yra perduodamas, bandymų šlytimi įrenginys vadinamas perduodančiu šlyties įrenginiu. Šiam tipui atitinka Jenike'no bandymų šlytimi įrenginys.



1.5 pav. Šlyties deformacijų principas šlyties įrenginyje

Bandymų šlytimi įrenginys, kuriame santykiniai poslinkiai yra gaunami sukant birios kietos medžiagos bandinio viršutinį paviršių apatinio atžvilgiu, yra vadinamas bandymų sukamąja šlytimi įrenginiu. Birios medžiagos bandinys (1.6 a pav.) yra apkrautas normaline jėga per apvalų dangtelį, turintį šiurkštų vidinį paviršių, ir tokiu būdu medžiaga yra veikiamą vertikaliais įtempiais. Sukant dangtelį, bandomoji biri medžiaga yra veikiamą šlyties deformacijų. Bandymo metu matuojamas momentas M , kuriuo turi būti įveiktas šlyties įtempių τ poveikis mėginyje. Tokio veikimo principo bandymų šlytimi įrenginys yra vadinamas įrenginiu, bandymų sukamąja šlytimi. Birios kietos medžiagos bandinio šlyties deformacijos kinta priklausomai nuo dangtelio spindulio. Centre deformacijos lygios nuliui ir tiesiškai didėja, didėjant spinduliui.

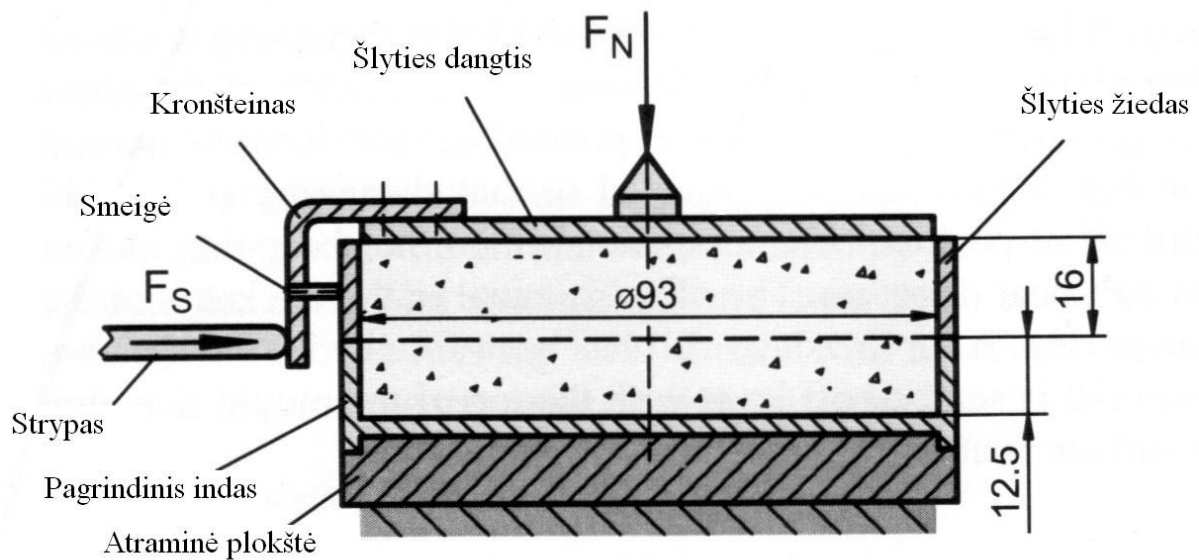


1.6 pav. Sukamieji šlyties matavimo įrenginiai: a – sukamosios šlyties bandymų įrenginys, b – žiedinis šlyties įrenginys

Priešingas bandymų sukamąja šlytimi įrenginiui yra žiedinio bandymų šlytimi įrenginys. Kietą biri medžiaga dedama į žiedo formos celę (1.6 b pav.). Tokiu atveju, birios kietos medžiagos bandinio deformacija yra vienodesnė, bet tuo pačiu yra priklausoma nuo žiedo spindulio.

Šių dviejų konstrukcijų bandymų įrenginiai buvo ištirti mokslininkų daugiau, palyginus su kitais įrenginiais. Tokių konstrukcijų bandymų įrenginiai buvo sukurti, sukonstruoti ir pagaminti įvairiuose daugelio šalių mokslo tyrimų institutuose tirti, pavyzdžiui, šlyties skirstinius biriose kietose medžiagose ir celės geometrijos įtaką medžiagos deformacijai šlytimi. Bandymų sukamąja šlytimi įrenginiai yra naudojami keliose laboratorijose, bet bandymų metodika yra šiek tiek kitokia palyginus su Jenike'no bandymų įrenginio metodika [4.5-4.7].

Jenike'no šlyties bandymų įrenginys yra pavaizduotas 1.7 pav. Šlyties cilindro pagrindas yra pritvirtintas prie atraminės plokštumos. Šlyties žiedas yra ant atraminės plokštumos. Į žiedą patalpinta biri medžiaga, kuri uždengta dangčiu. Dangtis ir tuo pačiu biri medžiaga yra apkrauti per centrą normaline jėga F_N , kuri gaunama kabančių svorių pagalba.



1.7 pav. Jenike'no šlyties matavimo įrenginio principinė schema

Standartinio dydžio šlyties cilindras pateiktas 1.7 pav. Tačiau šlyties cilindrai gali būti didesnių ar mažesnių gabaritinių matmenų, tada bandymams yra ribotas, birios medžiagos kiekis arba turi būti bandoma biri medžiaga stambiomis dalelėmis. Pagrindinis reikalavimas tas, kad bandinys privalo turėti pakankamą dalelių skaičių tam, kad medžiaga būtų kaip ištisinė aplinka. Jeigu dalelių skaičius yra per mažas, matuotos šlyties jėgos bus nepastovios. Pavaizduotu 1.7 pav. šlyties cilindru galima tirti birias kietas medžiagas, kurių didžiausias dalelės dydis yra apie 2 mm ir yra labai siauras dalelių skirstinys.

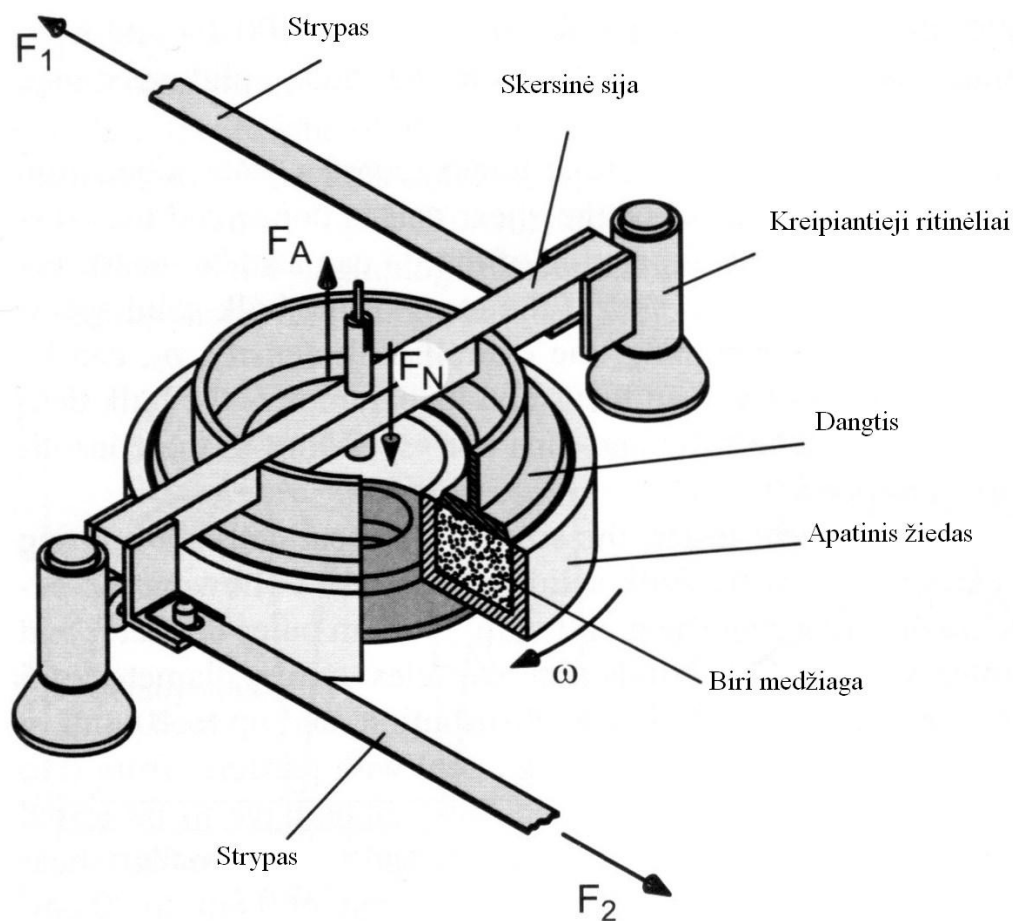
Bandant birios medžiagos bandinį šlytimi, šlyties cilindro viršutinė dalis, pvz., šlyties žiedas ir dangtis, juda horizontaliai (į dešinę 1.7 pav.). Tai atlieka galvutė, kuri spaudžia į kromšteiną, sujungtą su dangčiu. Galvutė yra varoma pastoviu 1 – 3 mm/min greičiu. Galvutė yra sujungta su perdavos sistema ir perduoda jėgą, kuri matuoja šlyties jėgą F_S . Šlyties jėga yra

perduodama biriai kietai medžiagai per kronšteiną ir dangtį, o taip pat per mažą pirštą sujungtą su kronšteinu.

Šlyties bandymų metodika minėtam Jenike'no šlyties bandymų įrenginiui praktiškai sutampa su procedūromis, pateiktomis „Šlyties bandymų technikos standarte“. Šis standartas yra pripažintas tarptautiniu mastu ir taikomas Jenike'no šlyties bandymų įrenginiui. Panašios procedūros yra pateiktos ASTM standarte D-6128.

Rotacinio šlyties bandymų įrenginio esminis pranašumas yra tai, kad šlyties deformacijos yra neribojamos palyginus su Jenike'no šlyties bandymų įrenginiu. Žiedinio šlyties bandymų įrenginio principas buvo išplėtotas 1930 metais dirvožemio tyrimams. Tokiu būdu, natūraliai dirvožemio tyrimams yra taikomi didelių reikšmių įtempiai, todėl ir įrenginys atitinkamai yra sunkus bei netinkamas mažų reikšmių įtempių gavimui birių kietų medžiagų technologijose. Pirmasis žiedinis bandymų šlytimi įrenginys birių kietų medžiagų bandymams sukurtas bei suprojektuotas 1960 metais (1.8 pav.). Jis labai gerai tiko pramonės reikmėms. Šių įrenginių privalumas toks, kad šlyties cilindras gali būti pašalintas iš įrenginio su dangteliu ir biria kietą medžiaga, galimybė pasirinkti sienelės trinties bandymus ir taikyti labai mažų reikšmių įtempius.

Žiedinio šlyties bandymų įrenginio konstrukcija pateikta 1.8 paveiksle. Žiedo formos cilindre talpinama biri kietų dalelių medžiaga. Žiedinis rotorius sumontuotas virš birios kietos medžiagos ir sujungtas su skersine sija. Dvi lygiagrečios traukės sujungtos su skersine sija. Kiekviena traukė yra sujungta su apkrovos sija (1.8 paveiksle neparodyta) tokiu būdu, kad jėgos F_1 ir F_2 , kurios veikia traukes, galima būtų matuoti. Žiedinis cilindras ir žiedinis rotorius privalo sukis vienas kito atžvilgiu. Žiedinis cilindras gali sukis rodyklės ω kryptimi, o žiedinis rotorius ir skersinė sija stabdoma traukėmis. Žiedinio cilindro dugnas bei žiedinio rotoriaus žemesnioji pusė yra šiurkštūs ir stabdo birios kietos medžiagos slydimą minėtų paviršių atžvilgiu. Todėl žiedinio cilindro sukimasis žiedinio rotoriaus atžvilgiu sukelia birios medžiagos šlyties deformacijas. Šlyties jėgos, kurios yra jėgų F_1 ir F_2 suma, yra įrašinėjamos. Šlyties jėgos yra tiesiogiai proporcingos šlyties įtempiams, veikiantiems birioje kietoje medžiagoje apskritimo perimetro kryptimi.



1.8 pav. Schulzo žiedinio šlyties matavimo įrenginio principinė schema

Žiedinio rotoriaus horizontali padėtis yra palaikoma dviejų traukių ir šoninių lydinčiųjų ritinėlių. Tokios konstrukcijos pranašumas yra tai, kad žiedinis rotorius gali šiek tiek pakrypti ir gali liesti birią kietą medžiagą, o tai sudaro galimybę gauti tolygesnį įtempių skirstinį kietoje birioje medžiagoje. Dar daugiau, panašiai kaip ir Jenike'no bandymų šlytimi įrenginyje, tokia konstrukcija įgalina pašalinti žiedinį cilindą išilgai su žiediniu rotoriumi ir biri medžiaga, pavyzdžiui, konsolidacijos bandymams su išoriniu saugojimu.

Vertikali normalinė jėga F_N veikia skersinę siją, kuri yra pritvirtinta prie žiedinio rotoriaus. Jėga gaunama svoriais, kurie yra pakabinti ir sujungti su skersine sija. Žiedinio rotoriaus svoriai, laikikliai, skersinė sija ir traukės galima atsverti kontrastvorais F_A , kuri yra nukreipta į viršų ir veikia skersinę siją.

Šlyties jėgos yra matuojamos laike. Jeigu žiedinis rotorius yra sujungtas su sumontuotu keitikliu, gali būti matuojama ir žiedinio rotoriaus vertikali padėtis.

Žiediniu šlyties įrenginiu buvo išmatuota sausų keramikos ir metalo granulių vidinė trintis. Gauti duomenys palyginti su kitais būdais tirtais duomenimis. Palyginti duomenys parodė, kad didelių pokyčių nebuvo (Yousuff, at al., 1992).

Žiedinis šlyties matavimo įrenginys atitinka šiuos kriterijus (Schulze, 2008, 169 p.):

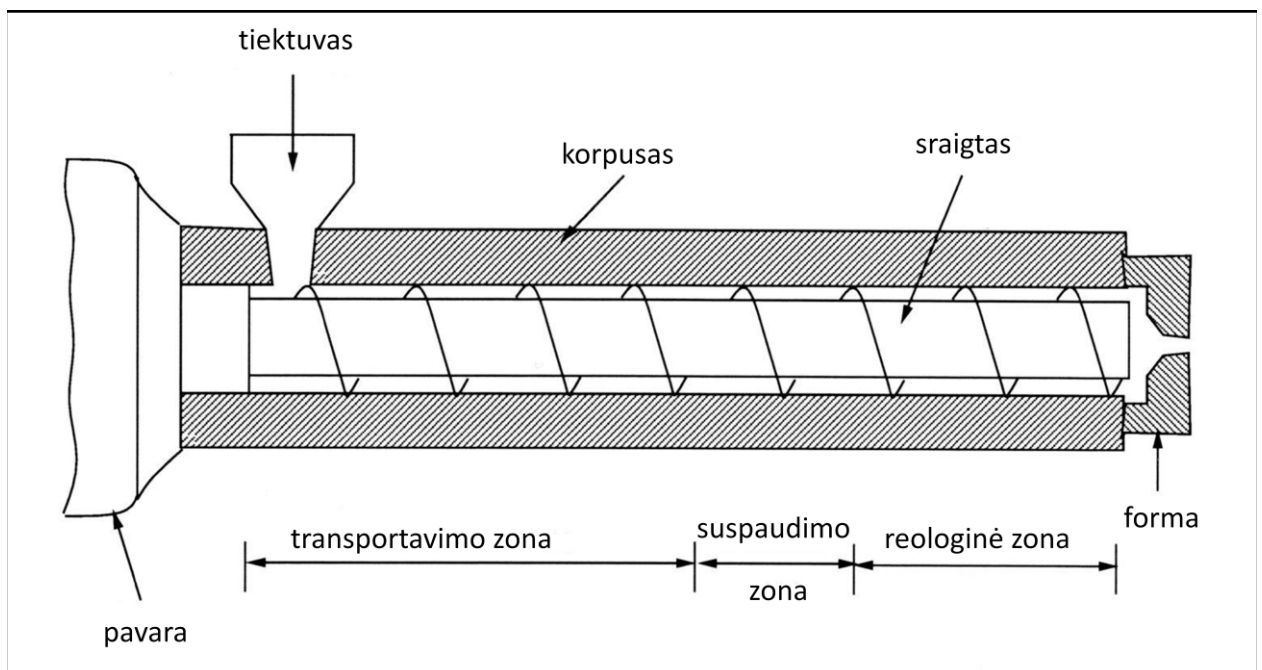
1. Kietėjimo procesas su vėlesniu jėgos matavimu;
2. Bandomų miltų sukietėjimas iki tol kol pasiekiamas stabilus tekėjimas;
3. Nelabai svarbus apkrovimo jėgos kryptis bandymo metu;
4. Apkrovimo atkūrimas taikomas birios medžiagos sukietėjimui ir atsparumui matuoti;
5. Galimybė kisti kietėjimo įtempiams;
6. Galimybė matuoti augančią jėgą laike.

2. BIRIŲ MEDŽIAGŲ ŠLYTIES SAVYBIŲ TYRIMO TEORINĖ ANALIZĖ

2.1 Ekstruzijos teoriniai aspektai

Ekstruzija yra plastiškas ruošinio apdirbimas, kurio metu medžiaga veikiamą išorinės jėgos išspaudžiama per formuojančią galvutę. Yra du pagrindiniai ekstruzijos tipai: pertraukiamo veikimo ekstruzija, nepertraukiamo veikimo ekstruzija arba kombinuoto veikimo ekstruzija. Pertraukiamo veikimo ekstruzija vyksta kai ribotas medžiagos (rūšinio) kiekis išstumiamas per formuojančią galvutę. Nepertraukiamo veikimo ekstruzija vyksta kai medžiaga nepertraukiamu srautu stumiama per formuojančią galvutę. Nepertraukiamo veikimo ekstruzija vykdoma sraigto pagalba. Sraigtinė ekstruzija dažnai naudojama medžiagų perdirbimo pramonėje: plastmasės, metalo ir maisto.

Sraigtinė ekstruzija būna dviejų tipų: vieno sraigto ir dvigubo sraigto ekstruzija. Vieno sraigto ekstruderio pjūvis pavaizduotas 2.1 pav.



2.1 pav. Vieno sraigto ekstruderio schema.

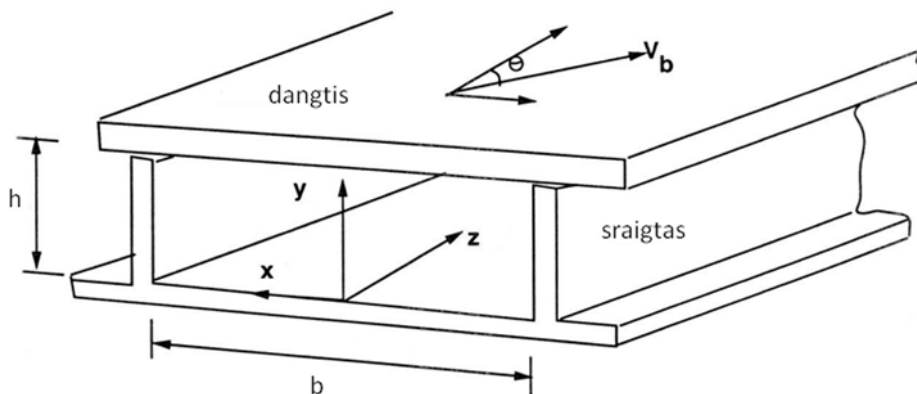
Pagal procesų charakterį, vykstantį atskirose sraigto ilgio dalyse yra išskiriamos trys zonos:

- Medžiagos transportavimo zona
- Medžiagos suspaudimo zona
- Reologinė zona

Besisukantis sraigtas pagauna iš tiektuvo įkraunamą medžiagą. Sraigto pirmosios vijos atlieka medžiagos transportavimo funkciją, kuri yra kontroliuojama slydimo trinties jėgų veikiančių sraigto ir ekstruderio vidinių sienelių paviršiuose (Spalding, at al., 1993). Transportavimo zonos našumas gali keistis priklausomai nuo trinties koeficiento. Šios zonos paskaičiavimui būtina žinoti besitrinančių paviršių slydimo trinties koeficientą. Daugeliu atvejų trinties koeficientas yra svarbus faktorius, įtakojantis medžiagų tekėjimą, slėgį bei temperatūrą ekstruderyje.

Medžiagos tekėjimą sraigto kanalu galima supaprastinti į tam tikros geometrijos ir formos kanalą, kuriame perdirbama medžiaga juda dėl viršutinės sienelės judėjimo ir slėgių skirtumo, susidarancio dėl formuojančios galvutės pasipriešinimo.

Sraigto skerspjūvyje parenkame stačiakampę koordinačių sistemą, kaip parodyta 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Medžiagos tekėjimas ekstruderio sraigto kanalu

Nagrinėsime ekstruderio skerspjūvio elementą, kurio matmenys yra b ir h . Tarkime, kad kanale esančios medžiagos tankis ρ , jos judėjimo greitis išilgai kanalo ašies v , įtempiai p_{ij} (atsirandantys kaip tamprių jėgų poveikio rezultatas), slėgis p ir temperatūra T nagrinėjami kaip laiko t ir erdviųjų koordinačių x , y ir z funkcijos (Masiulis, 2005).

Sprendžiant medžiagos judėjimo kanale uždavinį nežinomi dydžiai yra:

- 1) medžiagos tankis $\rho = \dots$);
- 2) trys greičio vektoriaus komponentės:

$$\begin{aligned}
 v_x &= \dots(x, y, z); \\
 v_y &= \dots(x, y, z); \\
 v_z &= \dots(x, y, z);
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

3) šešios įtempių tenzoriaus komponentės (tik šešios iš dešimties yra nepriklausomos, kadangi tenzorius yra simetriškas ($p_{ij} = p_{ji}$)):

$$\begin{aligned}
 p_{xx} &= \dots(y, z); \\
 p_{xy} &= \dots(y, z); \\
 p_{yz} &= \dots(y, z); \\
 p_{zx} &= \dots(y, z); \\
 p_{yy} &= \dots(y, z); \\
 p_{zz} &= \dots(y, z).
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Daugelyje literatūros šaltinių normaliniai ir šlyties įtempiai būna žymimi σ ir τ . Žymenyje p_{ij} pirmasis indeksas rodo plokštumos, kurioje yra įtempis, normalę, antrasis – ašį, kuriai yra lygiagretus įtempio vektorius. Taigi, normaliniai įtempiai bus žymimi dviem vienodais indeksais, pvz., p_{xx} , o šlyties – dviem skirtingais, pvz., p_{zx} ;

4) judančios medžiagos temperatūra $T = \dots(z)$.

Norint rasti šiuos vienuolika nežinomųjų, reikia sudaryti ir išspręsti sistemą, susidedančią iš tiek pat lygčių, kiek yra nežinomųjų. Tokios lygtys yra (Masiulis, 2005):

1) vientisumo lygtis (matematinė masės tvermės dėsnio išraiška, pagal kurią masė uždaroje sistemoje nekinta):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0;
 \tag{2.3}$$

2) trys judesio (Navje-Stokso) lygtys stačiakampėje koordinačių sistemoje (tai matematinė antrojo Niutono dėsnio formuluotė):

$$\begin{aligned}
 \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \dots \\
 \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \dots \\
 \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \dots
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

čia: F_x, F_y, F_z – masės jėgų projekcijos į koordinačių ašis.

3) judesio lygtys (2.4) nenusako ryšio tarp šlyties įtempių ir šlyties greičio. Todėl deformuojamos perdirbamos medžiagos būviui pilnai apibūdinti būtina minėtas matematinės išraiškas papildyti medžiagos būvio reologinėmis lygtimis, siejančiomis įtempių tenzoriaus komponentes su medžiagos deformacijos greičių tenzoriaus komponentėmis:

$$R \dot{\gamma} = \dots \quad (2.5)$$

čia R – reologinė funkcija.

Šis ryšys apibūdina perdirbamos medžiagos reologines savybes;

4) pagaliau, energijos tvermės dėsnis tvirtina, kad elementariame skysčio elemente pilnos energijos, sudarytos iš kinetinės ir vidinės energijų, kaita yra lygi kinetinės ir vidinės energijos srautams per paviršių, ribojantį minėtą elementą, šilumos srautui per tą patį paviršių ir įtempių darbui virš šio elemento. Iš energijos tvermės dėsnio, taikyto skysčio elementui, galima užrašyti šilumos balanso lygtį stačiakampėse koordinatėse:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{1}{2} v^2 + c_v T \right) = \text{div} \left(q_x, q_y, q_z \right) + \text{div} \left(\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx} \right) \quad (2.6)$$

čia T – temperatūra;

c_v – medžiagos pastovaus tūrio specifinė šiluma, išreikšta mechaninio darbo vienetais;

q_x, q_y, q_z – šilumos srauto, išreikšto mechaninio darbo vienetais, vektoriaus projekcijos į stačiakampes Dekarto ašis nurodytame taške.

Užrašytos lygčių sistemos analitinis bendras sprendinys bet kokiems atvejams nėra surastas dėl matematinių lygybių sudėtingumo arba gali būti sprendžiama tik skaitiniais metodais. Todėl sprendimui naudojami įvairūs minėtų lygčių supaprastinimai (Masiulis, 2005).

1. Izoterminiam procesui nagrinėti pakanka medžiagos vientisumo (masės tvermės) ir judesio (Navje-Stokso) lygčių bei naudojamos šios pradinės ir kraštinės sąlygos:

- medžiagos dalelių greičių prie nejudančių paviršių skaitinės reikšmės lygios nuliui

$$v_x = v_y = v_z = 0 \quad (2.7)$$

- medžiagos dalelių greičių prie judančių paviršių skaitinės reikšmės lygios paviršiaus taškų greičių skaitinėms reikšmėms

$$v_x = v_{x0}, v_y = v_{y0}, v_z = v_{z0} \quad (2.8)$$

- ant judančių paviršių įtempio normalinė komponentė turi būti lygi pastoviam slėgiui, o tangentinė turi virsti nuliui

$$\sigma = - \quad = \quad (2.9)$$

- nenusistovėjusio judesio atveju ieškomos greičių skaitinės reikšmės turi tenkinti pradines sąlygas

$$v_x = \dots = \dots = \dots (2.10)$$

Ypatingais atvejais, kai įrenginyje perdirbama masė yra šildoma arba šaldoma, kai proceso metu dėl trinties jėgų poveikio mechaninė energija virsta šiluma ir medžiagos temperatūra labai pasikeičia, tai yra vertinama sprendžiant papildomą uždavinį, išreikštą funkcija $T = T(x, y, z, t)$.

2. Nagrinėjama nespūdi medžiaga, t.y. tariama, kad $\rho = \text{const}$. Jei projektuojant perdirbamą produktą praktiškai galima laikyti nespūdžiu, tai toks supaprastinimas uždavinio sprendinį įtakos nežymiai (priimtina paklaida). Projektuojant mašiną, perdirbančią spūdžią terpę, sprendimą galima nagrinėti tik apytiksliai ir pirmu priartėjimu. Jeigu medžiaga yra nespūdi, tai vientisumo lygtis įgis kitokį pavidalą. Jei $\rho = \text{const}$, tai $\partial\rho/\partial t = 0$, ir iš vientisumo lygties yra gaunama:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.11)$$

kadangi $\rho \neq 0$, tai vientisumo lygtis bus tokio pavidalo:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

3. Įrenginys perdirba klampią niutoninę terpę. Tokiu atveju šešios reologinės lygtys bus užrašomos taip:

$$\begin{aligned} p_{xx} &= - \quad + \quad \frac{\partial}{\partial} \\ p_{yy} &= - \quad + \quad \frac{\partial}{\partial} \\ p_{zz} &= - \quad + \quad \frac{\partial}{\partial} \\ p_{xy} &= \dots = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial} \\ \dots \end{array} \right) \\ p_{yz} &= \dots = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial} \\ \dots \end{array} \right) \\ p_{zx} &= \dots = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial} \\ \dots \end{array} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

čia: p – niutoninių terpių hidrostatinis slėgis;

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (2.14)$$

čia: p_{11}, p_{22}, p_{33} – įtempių pagrindiniai normaliniai komponentai;

μ – niutoninis klampis.

Į lygtis įrašę atitinkamas išraiškas ir padalinę iš ρ , gausime tris klampiosios terpės judėjimo (Navje – Stokso) lygtis:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} - \nu \nabla^2 \sigma_{xx} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 v_x \\ \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} - \nu \nabla^2 \sigma_{yy} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v_y \\ \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} - \nu \nabla^2 \sigma_{zz} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z \end{aligned} \quad (2.15)$$

čia: ν – medžiagos kinematinis klampis.

4. Nagrinėjamas nusistovėjęs medžiagos tekėjimas (stacionarus režimas). Įrenginio paleidimo ir sustabdymo režimų nenagrinėja. Tokiu atveju visų kintamųjų dydžių išvestinės laiko atžvilgiu lygios nuliui, pavyzdžiui, $\partial v_x / \partial t = 0$ ir t.t.

5. Nepaiso masinių jėgų, t.y. taria, kad F_x, F_y ir F_z lygtyse lygios nuliui. Nevertina svorio jėgų, turint omenyje, kad perdirbamos masės judėjimas vyksta dėl kitų energijos šaltinių poveikio, pavyzdžiui, slėgio skirtumo. Masių judėjimo greičiai kanaluose nedideli, o tai leidžia nepaisyti judėjimo metu susidarančių inercinių apkrovų.

6. Nagrinėja laminarinį tekėjimą, kuris praktiškai visada susidaro klampių ir labai klampių medžiagų perdirbimo (pvz., ekstruzijos) metu, nes $Re = vd/\mu$ bus daug mažesnis už kritinę reikšmę, kadangi yra pakankamai didelis klampis μ ir pakankamai mažos greičių v ir matmenų d reikšmės. Tokiu atveju, kai nėra turbulencijos, iš trijų medžiagos greičio komponentų bus tik komponentė v_z , o v_x ir v_y laikysime lygiomis nuliui. Tačiau gali būti atvejų, ypač nagrinėjant mažai klampių medžiagų perdirbimą, kai tokia prielaida apie laminarinį tekėjimą yra neleistina.

Taigi, izoterminiam nespūdžios niutoninės terpės judėjimui nusistovėjusio režimo atveju, nepaisant masinių jėgų ir tariant, kad nėra turbulenciškumo, Navje-Stokso lygtis bus užrašoma taip (Masiulis, 2005):

$$\begin{aligned}
0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\
0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\
0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)
\end{aligned}
\tag{2.16}$$

Lygties analizė parodė, kad slėgis p skerspjūvyje nekinta (X ir Y ašių atžvilgiu), o priklauso tik nuo z ir kinta pjūviuose kintant z . Tokiu atveju toliau skaičiuojant dalinę išvestinę $\partial p/\partial z$ galima pakeisti visa išvestine dp/dz . Tare, kad $v_x = v_y = 0$, iš vientisumo lygties gausime $\partial v_z/\partial z = 0$. Vadinasi, priešingai nei slėgis p , greičio komponentė v_z kinta tik pačiuose skerspjūviuose, o skirtinguose pjūviuose ji yra pastovi. Tada:

$$\begin{aligned}
v_z &= v_z(x, y); \\
v_z &\neq v_z(z); \\
p &= p(z); \\
p &\neq p(x, y).
\end{aligned}$$

Lygčių sistemos paskutiniąją išraišką galima užrašyti taip:

$$\frac{\partial v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial v_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz}$$

Įvertinus, kad slėgio p pokytis per kanalo ilgį l lygus Δp ir priimtus supaprastinimus, galima gauti Puasono lygtį:

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = -\frac{\Delta p}{\mu}
\tag{2.17}$$

Tariame, kad kanalo skerspjūvis – tai mažo aukščio ir didelio pločio (plotis daug didesnis už aukštį) stačiakampis plyšys. Tokių kanalų skerspjūvis yra vadinamas siauru ištemptu stačiakampiu plyšiu.

Nagrinėjant tokio skerspjūvio kanalus galima nepaisyti šoninių sienelių poveikio srauto formavimui ir laikyti, kad turime labai siauro stačiakampio plyšio skerspjūvį, kuriame v_z nekinta x atžvilgiu, t.y. $\frac{\partial v_z}{\partial x} = 0$. Tada Puasono lygtis taps dar paprastesnė (Masiulis, 2005):

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = -\frac{\Delta p}{\mu}
\tag{2.18}$$

Naudodamiesi lygtimi, galime apskaičiuoti įrenginio svarbiausią charakteristiką – debito Q priklausomybę nuo slėgio Δ .

Lygtį integruojame, darydami prielaidą, kad nesusidaro slydimas išilgai kanalo sienelių, o tai leidžia priimti tokias ribines sąlygas:

$$\begin{aligned} v_z &= 0 & \text{at } y = \pm h/2 \\ v_z &= 0 & \text{at } x = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Integravę ir įvertinę ribines sąlygas, gauname:

$$v_z = \frac{\Delta p h^2}{8\mu} \left[1 - \left(\frac{2y}{h} \right)^2 \right]. \quad (2.20)$$

Tyrimo pradžioje tarę, kad $v_x = v_y = 0$, kartu laikome, kad $v_z = v$, t.y. medžiagos greičio vektoriaus komponentė, lygiagreti Z ašiai, yra judančios medžiagos srauto greitis. Nuo jo ir priklauso medžiagos našumas (tūrinis debitas) per kanalo skerspjūvio ploto vienetą (Masiulis, 2005).

Kadangi v_z , pagal lygtį, yra kintanti kanalo aukštyje, tai debitui nustatyti išskirsime elementarų paviršių $b dy$ atstumu y nuo koordinatinių pradžių. Tada:

$$dQ = v_z b dy; \quad (2.21)$$

$$Q = \int_{-h/2}^{h/2} dQ = \int_{-h/2}^{h/2} v_z b dy. \quad (2.22)$$

Vietoje greičio v_z įstatę jo išraišką ir integravę, gauname:

$$Q = \frac{1}{12} \frac{b h^3}{\mu} l \Delta. \quad (2.23)$$

Lygtis parodo medžiagos debito, pratekančio per formavimo įrenginį, priklausomybę nuo slėgių skirtumo Δp . Ši lygtis yra kanalo debito-slėgio charakteristika.

2.2 Šlyties įtempių skaičiavimas

Sukimu vadinamas toks apkrovimas, kai sukamo birios medžiagos žiedo skersiniuose pjūviuose veikia tik sukimo momentas, o likusios įrašos (lenkimo momentai, ašinė ir skersinė jėgos) lygios nuliui (Feodosjevas, 1977). Elementarios jėgos $\tau l F$ sudaro sukimo momentą:

$$M_s = \int_F \tau \rho \quad (2.24)$$

Integravimas taikomas visame skerspjūvio plote F . Taria, kad šlyties įtempiai paklūsta Huko dėsnui:

$$\tau = G\rho\theta \quad (2.25)$$

Įrašę į pointegralinę funkciją įtempimo τ reikšmę (2.25) gausime:

$$M_s = G\theta \int_F \rho \, dF \quad (2.26)$$

Integralas $\int_F \rho \, dF$ apibūdina tik skerspjūvio geometriją:

$$\int_F \rho \, dF = 2\pi \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \rho \, d\rho \quad (2.27)$$

Atlikus integravimo veiksmus gauname išraišką:

$$\int_F \rho \, dF = \frac{\pi}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad (2.28)$$

Gautą išraišką įrašome į 2.2 formulę.

$$\tau = \frac{M_s \rho}{\frac{\pi}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right)} \quad (2.29)$$

Sukimo momentą M_s tiriamai medžiagai sukelia besisukantis rotorius. Sukimo momentą apskaičiuojame iš formulės:

$$M_s = \tau \cdot l, \text{ [Nm]} \quad (2.30)$$

čia: F – jėga veikianti keitiklį, [N];

l – strypo ilgis, [m].

Galutinė šlyties įtempių, birioje medžiagoje, išraiška bus:

$$\tau = \frac{Fl\rho}{\frac{\pi}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right)}, [\text{N/m}^2] \quad (2.31)$$

Tangentiniai įtempiai skerspjūvyje pasiskirsto išilgai spindulio pagal tiesę ir jų didžiausios reikšmės yra tolimiausiuose nuo strypo ašies taškuose (2.1 pav.) (Feodosjevas, 1977).



2.3 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas skerspjūvio plote.

2.3 Medžiagų reologinių savybių matavimo metodai

Tiriant kietų medžiagų reologines savybes galima išskirti kelias grupes:

- šlyties;
- kompresinės;
- paviršiaus.

Reologinių savybių matavimo prietaisai pasižymi sava specifika, bet bendri yra šie keturi kintamieji (išskyrus temperatūrą ir technologinius parametrus):

- jėga, momentas arba įtempis;
- atstumas, deformacija, plotas arba tūris;
- laikas, deformacijos greitis arba linijinis greitis;
- energija.

Todėl mechaniniuose matavimo įrenginiuose yra jėgų, deformacijų ir laiko registravimo prietaisai. Energija apskaičiuojama naudojant minėtus rodmenis arba matuojama specialiais prietaisais.

2.1 lentelė. Reologinių savybių matavimo metodų klasifikacija

Matuojamas dydis	Pastovūs dydžiai	Prietaiso pavyzdys
Dinaminis (jėga, momentas, įtempis)	Geometriniai, kinematiniai	Rotaciniai viskozimetrai, šlyties įtempių matuokliai, universalūs prietaisai ir kt.
Kinematinis (laikas, greitis, pagreitis)	Dinaminiai, geometriniai	Ostvaldo, Geplerio ir kiti viskozimetrai
Geometrinis (ilgis, plotas, tūris)	Dinaminiai, kinematiniai (laikas)	Penetrometrai (kūginis ir kt.)
Energija (galia)	Geometriniai, kinematiniai	Prietaisai, kuriais sudaroma jėgos-poslinkio diagramos

Ši klasifikacija yra sąlyginė, kadangi kai kurie prietaisai įgalina keisti du dydžius, esant nekintamam trečiam.

Labiausiai paplitę yra pirmieji du metodai dinaminis ir kinematinis. Jie taikomi medžiagų viskozimetrijoje.

Pirmas metodas - pastovaus šlyties greičio – realizuojamas naudojant elektrines-mechanines arba hidraulinės perdavas, jėga matuojama įvairiais dinamometrais.

Antras metodas - pastovios apkrovos metodas – kurio konstrukcija yra paprastesnė, kadangi slinkties arba sūkio greičius lengva matuoti įprastu sekundmačiu arba fiksuoti kitais prietaisais (juostoje, monitoriuje ir pan.).

Trečiame metode - pastovi apkrovos jėga sąlygojama prietaiso judančiosios dalies nekintančia mase, matavimo laikas dažniausiai yra nekintantis (180 – 300 s) ir pasirenkamas didesnis už relaksacijos periodą. Prietaisuose matuoja išmeigimo (panardinimo) gylį esant mažėjančiam greičiui, kuris ribiniu atveju artėja prie nulio.

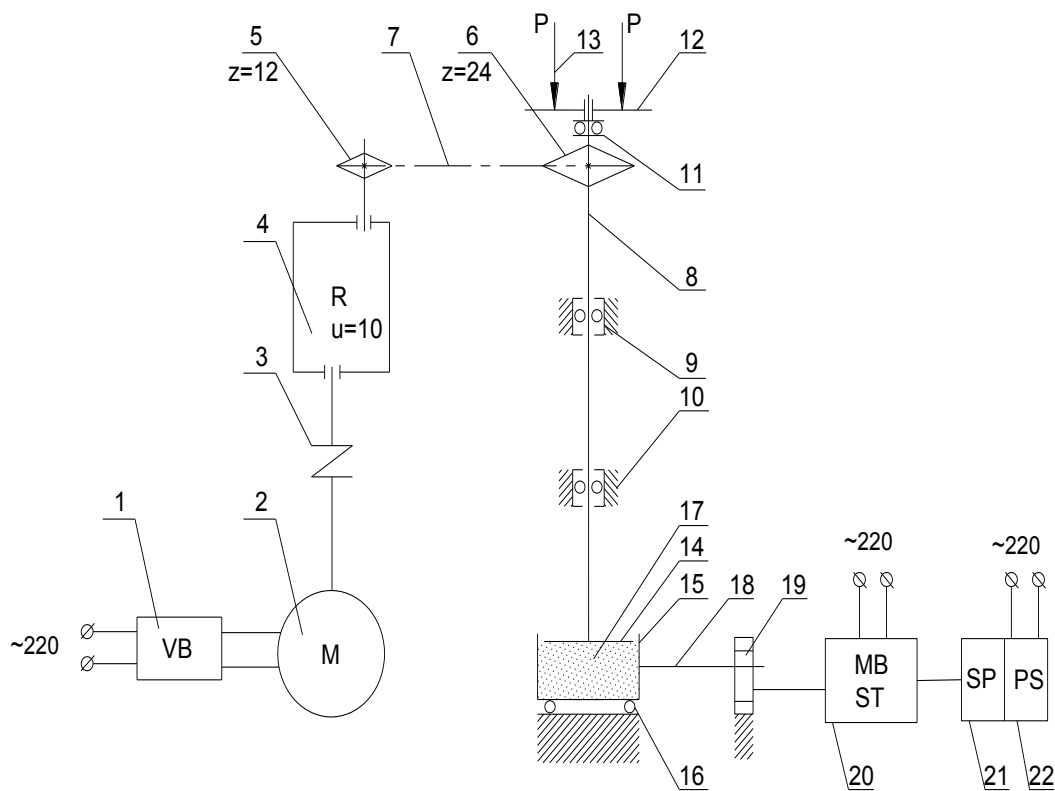
Ketvirtas metodas - įgalina nustatyti deformacijos energiją pagal diagramos plotą, o koordinatėse ordinatė atliepia jėgą (įrašą). Šios grupės prietaisuose energiją galima apskaičiuoti pagal galią, jeigu prietaisas yra aprūpintas vatmetru ar panašiu matuokliu.

EKSPERIMENTO STENDAS

3.1 Eksperimento stendas

Tirti birios medžiagos frikcines savybes į pramoninių įrenginių darbinius paviršius yra sudėtinga dėl esančių technologinių procesų perdirbimo mašinose ir specifinių įrenginių konstrukcijų. Matavimus galima atlikti supaprastinus įrenginį ar technologinį procesą, tačiau medžiagos tyrimus atlikti prie panašių realaus technologinio proceso sąlygų. Birių medžiagų frikcinėms savybėms tirti naudojame eksperimentinį stendą (3.1 pav.). Išanalizavus stendo veikimo principą ir trūkumus, stendas buvo modernizuotas.

Įrenginio principinė kinematinė schema pavaizduota 3.1 paveiksle. 1 - kintamos srovės lygintuvas ir variklio valdymo blokas, 2 – nuolatinės srovės elektros variklis, 3 – mova, 4 – reduktorius (perdavimų skaičius $u=10$), 5 – varančioji žvaigždutė, 6 – varomoji žvaigždutė, 7 – grandinė, 8 – ašis, 9 – radialinis guolis, 10 – guoliavietė, 11 – atraminis guolis, 12 – atraminė plokštė svarmenims, 13 – birios medžiagos apkrovimo jėga, 14 – rotorius, 15 – cilindras, 16 – atraminis guolis, 17 – tiriamoji medžiaga, 18 – strypas, 19 – tenzorezistoriaus jutiklis, 20 – signalo stiprintuvas, 21 – įtaisas analoginiam signalui konvertuoti į skaitmeninį, 22 – personalinis kompiuteris.



3.1 pav. Tiriamojo stendo kinematinė schema.

Judesys perduodamas nuo nuolatinės srovės elektros variklio (2), kuris valdomas valdymo bloko (1). Valdymo bloke 220V 50 Hz kintama elektros srovė, išlyginama į nuolatinę 220 V elektros srovę. Variklio apsisukimų dažnis gali būti keičiamas nuo 0 iki 150 aps/min. Dažnis keičiamas reostatu, esančiu valdymo bloke. Elektros variklis per movą (3) perduoda judesį reduktoriui (4), kuris redukuoja greitį (perdavimo skaičius $u = 10$). Pagrindiniai ašiai, kuri įtvirtinta guoliavietėse (10) su guoliais (9), nuo reduktoriaus judesį perduoda grandininė pavara (7), kurios perdavimo skaičius $u = 2$. Apatinėje ašies dalyje pritvirtintas rotorius (14), kitame atraminė plokštė svarmenims (12). Kad atrama bei masė, sukelianti slėgį tiriamai medžiagai, nesisuktų kartu su velenu po atrama įmontuotas atraminis guolis (11). Ant darbo stalo įtaisytas atraminis guolis (16) ant kurio yra cilindras (15) su bria medžiaga (17). Rotorius (14) sukdamasis aplink savo ašį remiasi tik į tiriamą medžiagą. Prie cilindro šono pritvirtintas strypas (18). Cilindro sukimašį apriboja strypas atremtas į tenzorezistoriaus jutiklį (19). Sukdamasis rotorius, per tiriamą medžiagą, perduoda sukimo momentą cilindru. Keitiklis maitinamas nuolatinė elektros srove iš maitinimo bloko (20). Elektrinis signalas iš maitinimo bloko perduodamas stiprintuvui (20). Sustiprintas analoginis signalas pakeičiamas į skaitmeninį signalą priėmimo plokštėje (21). Gauti duomenys, (22), įrašomi į laikmeną ar apdorojami vaizdinėmis priemonėmis.

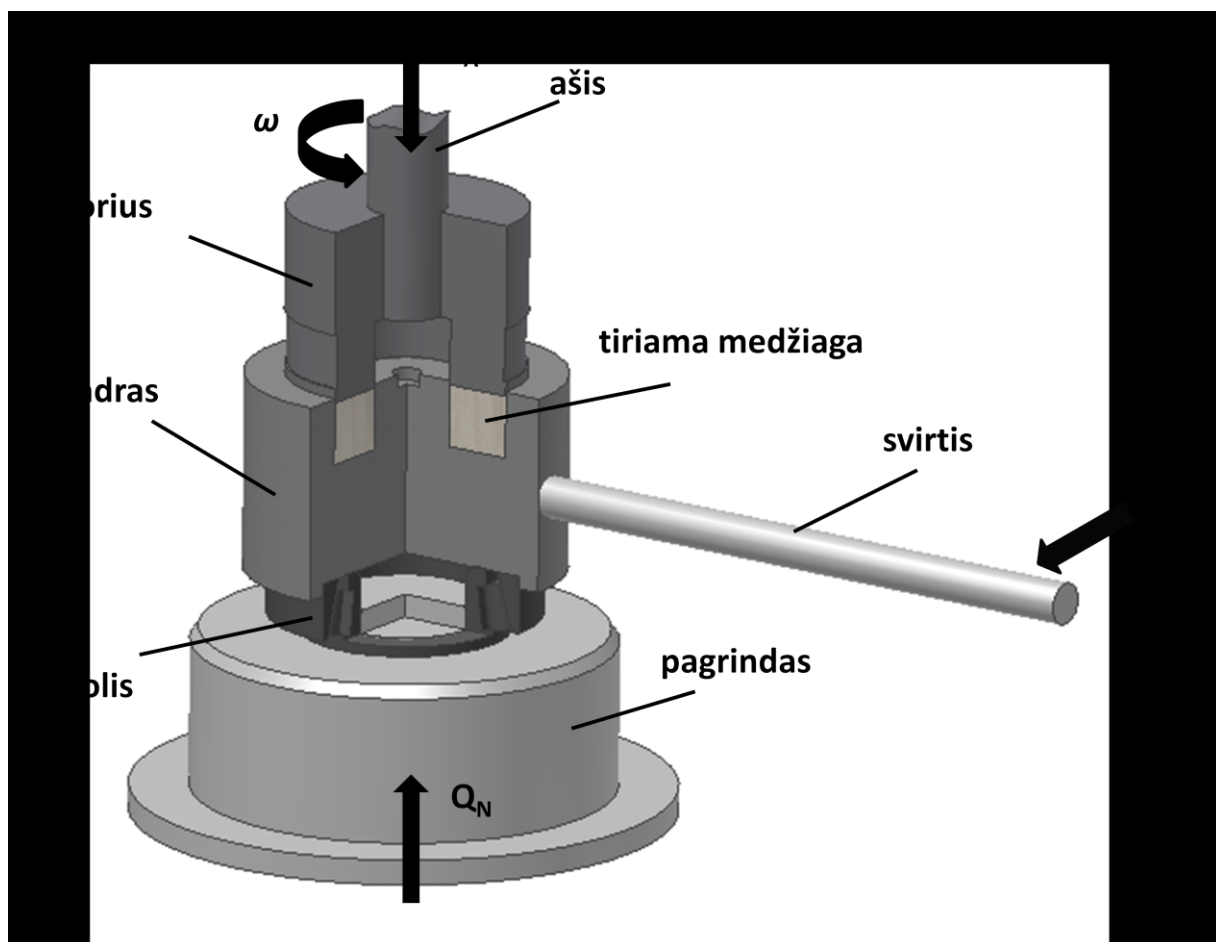
Paruoštas stendas darbui pavaizduotas 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Birių medžiagų šlyties tyrimų stendas paruoštas darbui

Eksperimento metu tirsime kukurūzų miltų šlyties savybes. Kukurūzų miltai pasirinkti dėl jų dažno naudojamo maisto pramonėje.

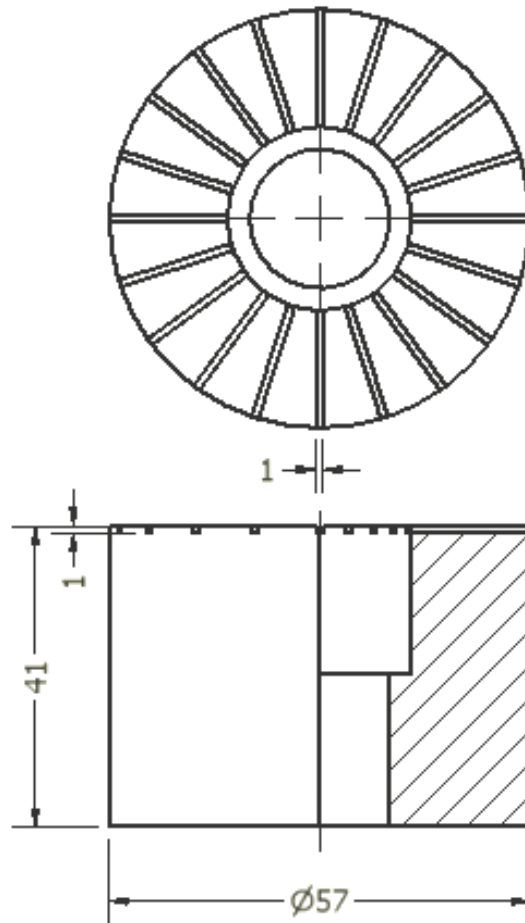
Kukurūzų miltų šlyties matavimui pasirinkta matavimo schema parodyta 3.3 pav. Schema artima Shulzo žiedinio šlyties bandymų įrenginio konstrukcijai. Apie šį įrenginį rašyta 1 skyriuje.



3.3 pav. Tyrimo principinė schema

Cilindras padėtas ant atraminio guolio, todėl laisvai gali sukstis apie savo ašį. Prie šono pritvirtinta strypas, kurio gale yra sumontuotas tenzorezistoriaus jutiklis matuojantis jėgą F (paveiksle nepavaizduota). Rotorius sukamą judesį gauna per ašį. Kontaktodama biri medžiaga su rotoriaus paviršiumi perduoda sukamą judesį cilindriui. Prispaudimo jėga Q_A reguliuojama svarmenimis.

Rotorius pagamintas iš plieno. Rotoriaus apatinėje dalyje, tiesioginio kontakto zonoje su bria medžiaga, rotoriaus gamybos metu, išfrezuoti stačiakampės formos grioveliai (3.4, 3.5 pav.).



3.4 pav. Rotoriaus schema



3.5 pav. Rotorius paruoštas darbui

Grioveliai padidina birios medžiagos sukibimą su rotoriaus paviršiumi. Besisukant rotoriumi kukurūzų miltų dalelės užpildo kanalą. Užpildytas kanalas neleidžia dalelėms praslysti paviršiumi, todėl tuo momentu dalelės veikiamos išorinės jėgos yra gniuždomos ar kerpamos kitų dalelių.

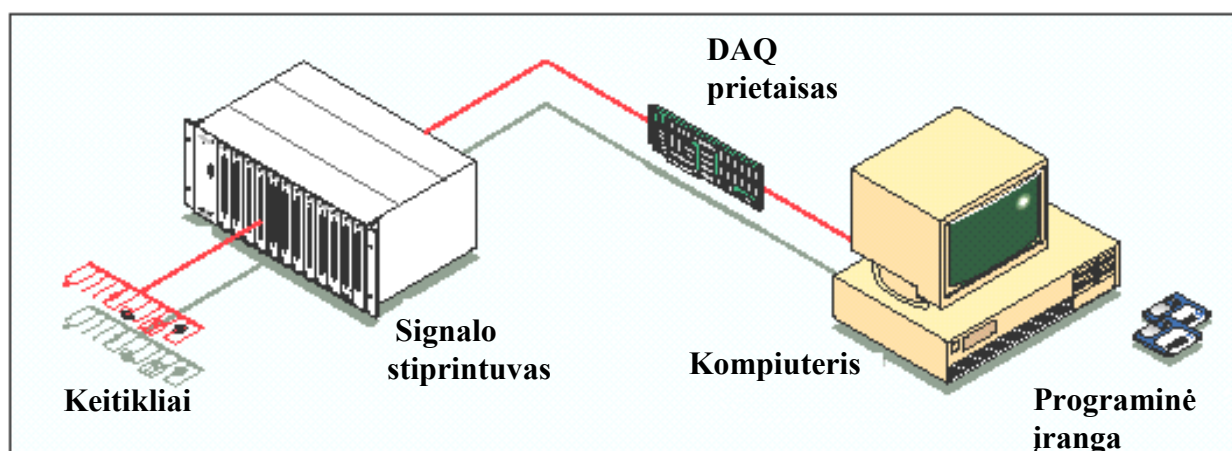
3.2. Duomenų kaupimo sistema

Tradiciniai matavimai daromi su autonomiškais matavimo prietaisais. Tačiau yra būtinybė įrašyti visus matavimus ir proceso metu vykstančius veiksnius tolesniam duomenų vizualizavimui.

Šiandien daugelis mokslininkų ir inžinierių, laboratorinių tyrimų, bandymų, matavimų ir pramonės automatikos duomenų kaupimui naudoja personalinius kompiuterius su PCI, PXI, USB ir panašiomis ar serijinėmis jungtimis. Daugelis vartotojų duomenų surinkimui ir jų pervedimui tiesiai į kompiuterio atmintį naudoja įjungiamas jungtimi stotis. Kiti naudoja DAQ (iš anglų kalbos „Data AcQuisition – duomenų kaupimas“) prietaisus nutolusius nuo personalinio kompiuterio, jie sujungti per lygiagrečias ar serijines jungtis. Gaunama viena tinkama sistema priklausanti nuo kiekvieno elemento (3.6 pav.):

- Personalinio kompiuterio;
- Keitiklio;
- Signalų stiprintuvo;
- DAQ prietaiso;
- Programinė įranga.

Trumpai apžvelgsime apie kiekvieną iš šių elementų ir aptarsime pagrindinius kriterijus.



3.6 pav. Duomenų kaupimo sistemos schema

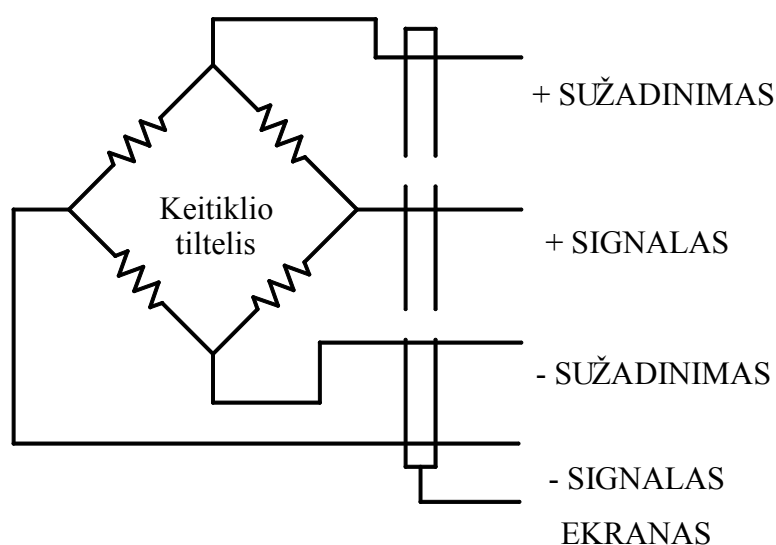
3.2.1. Personalinis kompiuteris

Kompiuteris naudojamas duomenų rinkimo sistemoje. Kompiuteris gali pasiekti maksimalų greitį duomenų sekimui ir apdorojimui. Šiuolaikinė technologija naudoja Pentium ir PowerPC klasės procesorius sujungtus su aukščiausios kokybės PCI jungtimis, žinomomis kaip ISA jungtis ir USB. Nešiojami kompiuteriai duomenų rinkimą padarė lankstesnį negu staliniai personaliniai kompiuteriai.

Kompiuteris yra svarbi vizualizavimo priemonė. Gautus tyrimo rezultatus galima išreikšti vaizdinėmis priemonėmis diagramomis, histogramomis ar skaitine išraiška.

3.2.2. Keitiklis

Keitiklis fiksuoja tiesialinijinį judėjimą ir siunčia elektrinį signalą į signalo stiprintuvą, kad galėtų būti išmatuotas. Birių medžiagų trinties koeficiento nustatymui naudojamas žemos galios vieno taško apkrovimo keitiklis. Keitiklis apkrovos jėgą verčia į elektros srovę. Didėjant apkrovos jėgai proporcingai didėja ir įtampa. Keitiklio elektrinė schema parodyta 3.7 paveikslėlyje.



3.7 pav. Keitiklio elektrinė schema

Keitiklis maitinamas 10 V nuolatinės srovės įtampa. Didžiausias leistinas apkrovimas 10 kg.

Keitiklio fiksuojamo signalo reikšmė nėra žinoma etalono reikšmė. Norint sužinoti keitiklio rodomas skaitines reikšmes būtina sutaruoti keitiklį.

Taravimas atliekamas pasinaudojus kalibruotais svarmenimis. Kalibruoti svarmenys dedami ant pakabinamos konstrukcijos, kuri pritvirtinta prie keitiklio galo, o kitas keitiklio galas yra

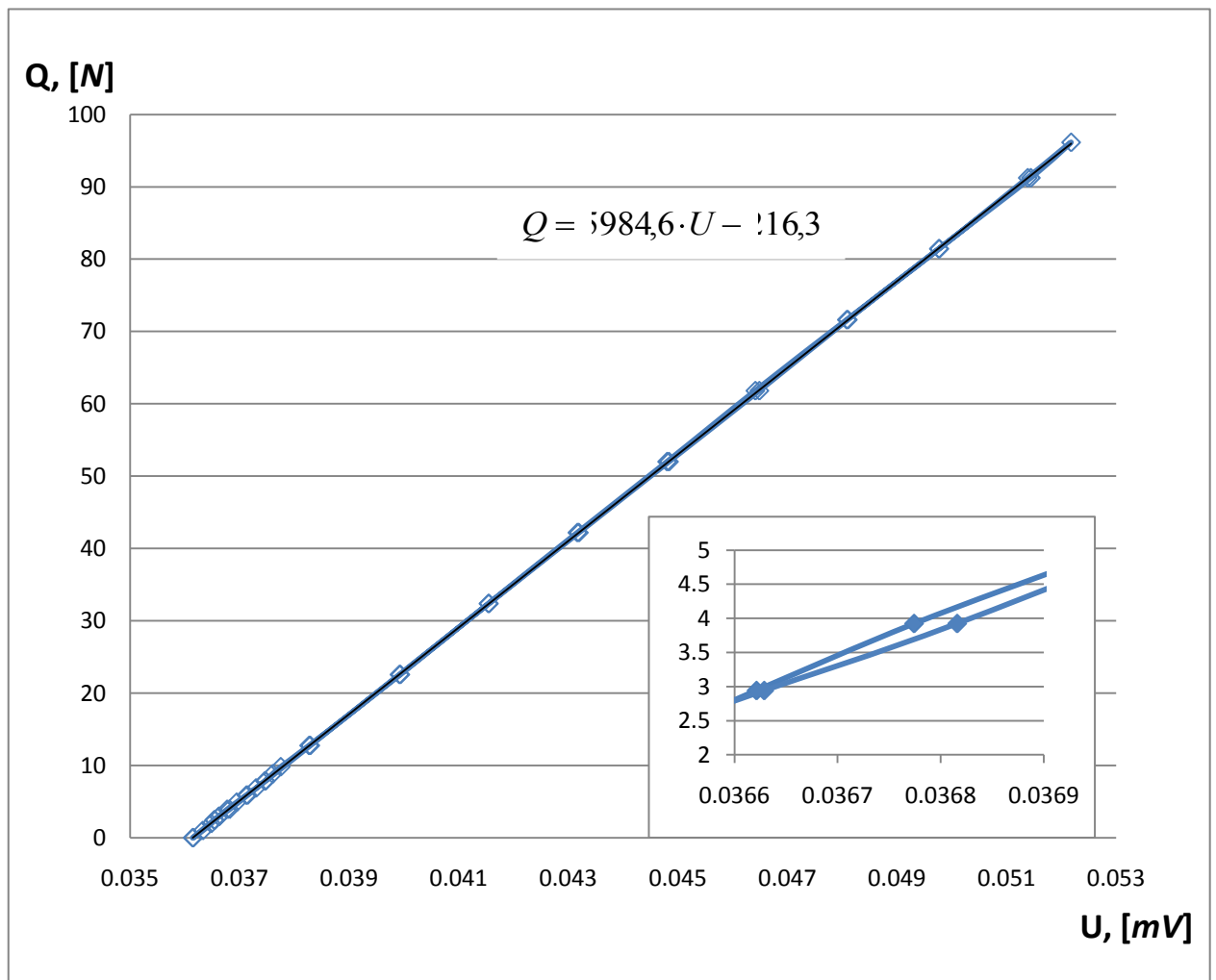
įtvirtintas standžiai prie nejudamo pagrindo. Svarmenys dedami nuo 0 kg iki 1 kg kas 0,1 kg, o nuo 1 kg iki 10 kg kas 1 kg. Po kiekvieno svarmenio uždėjimo fiksuojami keitiklio parodymai ir įrašomi į laikmeną. Duomenys rašomi vienodą laiko tarpą, tai yra 4 s. Dėl keitiklio korpuso liekamų įtempių, keitiklio taravimas atliekamas dviem etapais: pirmas etapas keitiklio parodymai fiksuojami uždedant kalibruotus svarmenis iki leistinos ribos (10 kg); antras etapas parodymai fiksuojami nuimant svarmenis.

Iš gautų keitiklio parodymų apskaičiuojame aritmetinį vidurkį. Atitinkamai veikiantį svorį verčiame į Niutoninę jėgą. Gautus duomenis surašome į 3.1 lentelę.

3.1 lentelė Taravimo duomenys.

El Nr.	Jėga, N	Įtampa, mV	El Nr.	Jėga, N	Įtampa, mV	El Nr.	Jėga, N	Įtampa, mV
1	0	0,036157	13	12,753	0,03827	25	71,613	0,048103
2	0,981	0,036327	14	22,563	0,039936	26	61,803	0,046489
3	1,962	0,036484	15	32,373	0,041542	27	51,993	0,044839
4	2,453	0,036548	16	42,183	0,043167	28	42,183	0,043194
5	2,943	0,036621	17	51,993	0,044805	29	32,373	0,041552
6	3,924	0,036774	18	61,803	0,046416	30	22,563	0,039919
7	4,905	0,036948	19	71,613	0,048085	31	12,753	0,038292
8	5,886	0,037125	20	81,423	0,049773	32	7,848	0,037474
9	6,867	0,037300	21	91,233	0,051387	33	5,886	0,037146
10	7,848	0,037463	22	96,138	0,052179	34	3,924	0,036816
11	8,829	0,037605	23	91,233	0,051443	35	2,943	0,036629
12	9,810	0,037752	24	81,423	0,049764	36	2,453	0,036537
						37	0	0,036145

Iš 3.1 lentelės duomenų ant stačiakampės koordinačių sistemos atidedame taškus. Ant abscisių ašies atidedamos apkrautos jėgos reikšmės, o ant ordinačių ašies atidedamos užfiksuotos keitiklio įtampos parodymų aritmetinis vidurkis. Per atidėtus taškus brėžiame grafiką. Grafikas pavaizduotas 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Įtampos priklausomybė nuo jėgos. Mėlyna linija sujungti taškai iš gautų rezultati. Juoda linija regresijos kreivė.

Iš grafiko matyti, kad įtampa tiesiogiai proporcingas nuo masės. Padidinus mastelį matyti histerezės kilpa.

Iš gauto grafiko matyti, kad grafiko kreivė yra tiesinė, todėl jos išraiška bus:

$$Q = 4 \cdot U - 3 \quad (3.1)$$

A ir B reikšmes gauname pasinaudojant mažiausių kvadratų metodą (kai taškų nuotolių nuo tiesės kvadratų suma yra mažiausia), gautos reikšmės: A – 5984,6, B – 216,3. Taip pat nubraižome regresijos kreivę.

Įstačius reikšmes į lygtį gauname:

$$Q = 5984,6 \cdot U - 216,3 \quad (3.2)$$

Determinacijos koeficientas:

$$R^2 = \quad (3.3)$$

Iš determinacijos koeficiento sprendžiame, kad regresijos lygtis geriausiai atitinka taškų išsidėstymą, todėl galime šia lygtį taikyti tolimesniems trinties koeficiento skaičiavimams.

3.2.3. Signalų stiprintuvas

Elektrinis signalas generuojamas keitiklio privalo būti optimizuojamas, kad tiktų DAQ prietaiso įėjimo diapazonui. Signalų sustiprinimo prietaisai gali sustiprinti žemo lygio signalus ir juos izoliuoti taip pat filtruoti kalibruotam matavimui.

Sustiprinimas – dažniausiai taikomas būdas signalui sustiprinti.

Izoliavimas – kitas, dažnai taikomas būdas signalo gerai būklei palaikyti yra keitiklio signalo izoliavimas.. Sistema tikrina galimą aukštos įtampos šuolį, kuris gali pakenkti kompiuterinei sistemai ar iškraipyti įraščius duomenis.

Filtravimas – filtro tikslas yra pašalinti nepageidaujamus signalus nuo matuojamo signalo. Pavyzdžiui, daugelis SCXI modulių turi žemo pralaidumo 4 Hz ir 10 kHz filtras, kurie eliminuoja triukšmą prieš signalą paverčiant skaitmeniniu.

3.2.4. DAQ prietaisas

DAQ prietaiso tikslas analoginį sustiprintą signalą paversti į skaitmeninį. Skaitmeninį signalą gali apdoroti personalinis kompiuteris. DAQ prietaisas turi kelis parametrus:

Matavimo dažnis – šis parametras nulemia kaip dažnai signalas gali būti matuojamas per laiko vienetą. Didelis matavimo dažnis užfiksuoja daugiau taškų duotame laiko vienetė ir gali atvaizduoti tikslesnį signalą.

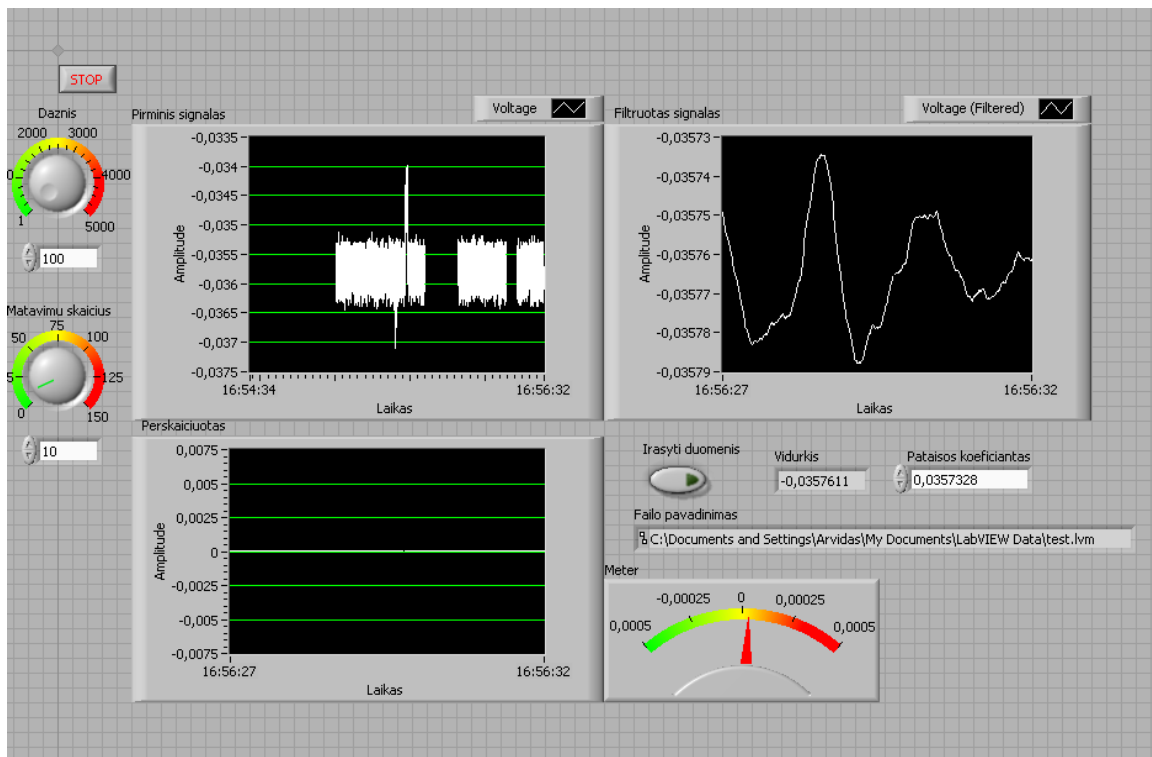
Suderinimas – naudojant keletą matavimų viename procese, būtina suderinti signalus. Ši funkcija leidžia perjungti gaunamo signalo kanalą nenutraukus matavimo proceso.

3.2.5 Programinė įranga

Skaitmeninio signalo surinkimo prietaisą (DAQ) be programinės įrangos būtų labai sudėtinga programuoti ir naudoti moksliniams tikslams. Speciali programinė įranga padeda suderinti sistema ir dirbti su įranga:

- Surinkti duomenis pasirinktu dažniu;
- Paleisti duomenis iš kietojo disko;
- Integruoti skirtingus signalo kaupimo prietaisus į kompiuterį ir naudotis skirtingomis integruotomis plokštėmis nepakeičiant vartotojo sąsajos.

LabVIEW yra programa su komplektu simbolių kurie reiškia valdymą ir funkcijas, prieinamos programos meniu lange. Toks programavimas vadinamas *vizualiuoju programavimu*. Vartotojo sąsaja kuri vadinama *vi* (virtualus instrumentas) susideda iš dviejų dalių – **priekiniu paneliu** ir **schema**. Priekinis panelis naudojamas programos valdymui ir duomenų atvaizdavimui, gaunamų iš DAQ prietaisų. Taip pat į šį langą gali būti įkelti mygtukai, indikatoriai ir grafikai. Birių medžiagų šlyties savybių tyrimui naudojamos programos priekinis panelis pavaizduotas 3.9 paveiksle.

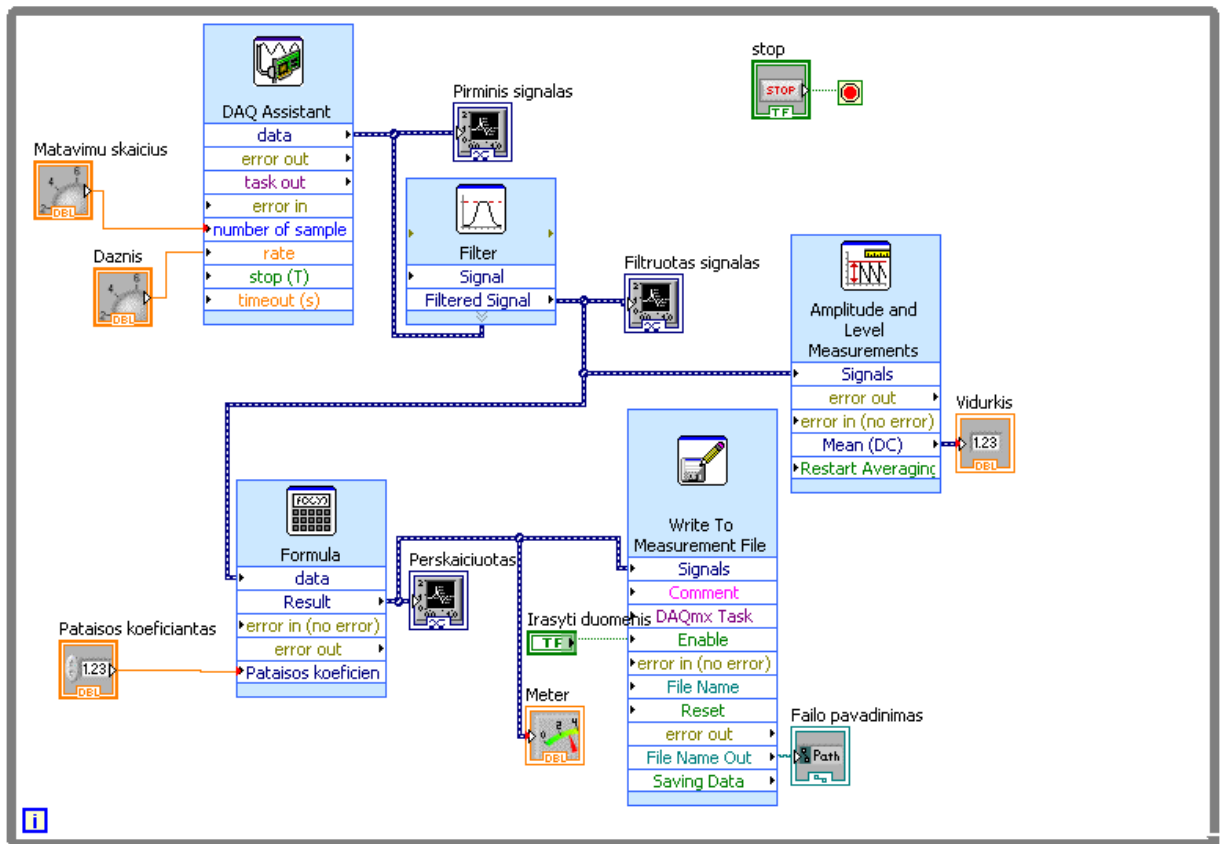


3.9 pav. LabVIEW programos priekinis panelis naudojamas birių medžiagų šlyties savybių tyrimo stende.

Paveiksle grafikas esantis kairėje pusėje viršuje rodo gaunamą tiesioginį signalą iš DAQ prietaiso. Šalia jo, dešinėje esantis grafikas rodo išfiltruotą signalą LabView programos. Apačioje esantis grafikas rodo koreguoto signalo rodmenis. Signalas gali būti koreguotas formulėmis (pvz. taravimo metu gauta lygtimi). Šis grafikas palengvina rinkti duomenis, nes jo atskaitos taškas yra nulis, kitaip nei kiti du esantys prieš tai. Kitų esančių funkcinių mygtukų pagalba galime keisti matavimo dažnį ir matavimų skaičių. Skaitinės reikšmės įrašomos į atskirą failą paspaudus įrašymo mygtuką.

Schemos lange yra kuriamas virtualus prietaisas. Tai yra kuriama programa, kuri sujungia priekinio panelio vizualizavimo priemones su valdymo ir funkciniais mygtukais. Schemos langas

parodytas 3.10 paveiksle. Ši schema atitinka 3.9 paveiksle pavaizduoto priekinio panelio virtualų prietaisą.



3.10 pav. LabVIEW programos schemas langas naudojamas birių medžiagų trinties koeficiento nustatymo stende.

Programoje panaudojamos funkcijos padedančios išsivinti gautus rezultatus: signalo priėmimo, signalo filtro, formulės ir duomenų įrašymo į failą. Taip pat programoje naudojami mygtukai ir diagramų vizualizavimas.

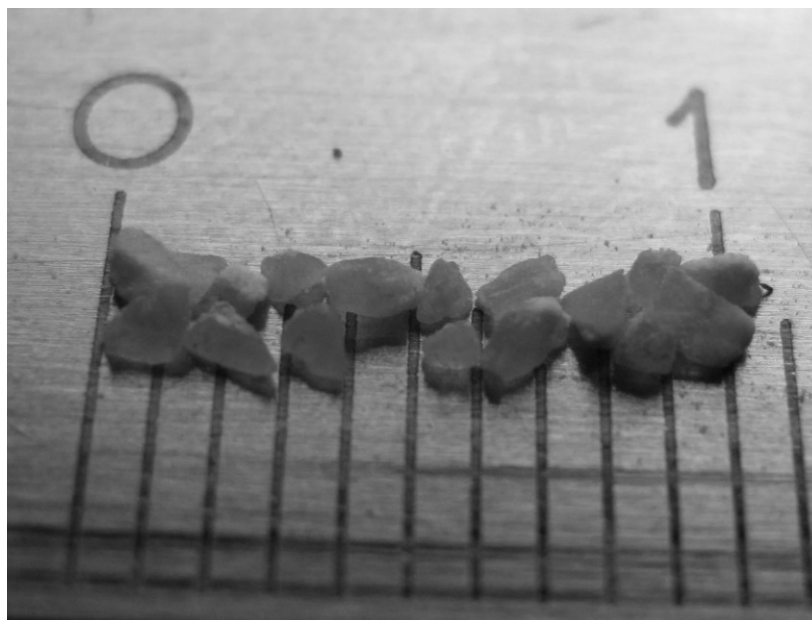
3.3 Tiriama medžiaga

Tiriamam darbui pasirinkta kukurūzų kruopų miltai. Kukurūzų žaliava aukštos kokybės genetiškai nemodifikuoti. Kukurūzų kilmės šalis ES.

Atliekant frikcinių savybių tyrimus svarbu kukurūzų miltų drėgnumas. Vanduo daugeliu atvejų yra kaip dispersinė terpė, žymia dalimi apsprendžianti produkto struktūrą. Todėl vandens ryšio su kukurūzų miltų kruopomis forma ir kiekis įtakoja technologinius produkto rodiklius ir jo struktūrinės – mechaninės charakteristikas. Nenurodžius produkto technologinių charakteristikų sumažinimas gautų rezultatų vertingumas. Kukurūzų miltų drėgnumas nustatytas su

matavimo prietaisu INSTALAB 600. Matavimo metu kukurūzų miltų drėgnumo reikšmės buvo: 11,80 – 11,90 %.

Kitas svarbus faktorius įtakojantis tyrimo rezultatus - dalelės dydis. Pagal pateiktus duomenis dalelių dydis yra 630 – 1250 μm . Dalelių dydis yra apsprendžiamas pagal daugelių dalelių dydį (3.11 pav.).



3.11 pav. Kukurūzų miltų grūdeliai, padalos reikšmė 1 mm.

Kitos kukurūzų miltų charakteristikos, gautos iš kokybės sertifikato, pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė: Kukurūzų miltų charakteristikos.

Rodikliai	Kiekis
Spalva	Geltona
Skonis	Būdingas kruopoms
Kvapaspas	Tipinis kruopų
Riebalų	0,56 – 0,64 %
Angliavandenių	83,90 – 84,50 %
Baltymai	7,00 – 7,30 %
Pelenų	0,32 – 0,36 %
Pelenų tirpimas 10% HCL tirpale	0,04 %

3.4 Eksperimento atlikimo eiga

Eksperimento atlikimo eiga svarbi matavimo procesui. Būtina laikytis nustatytos tvarkos, kad būtų užtikrinta rezultatų gavimo vienodos sąlygos. Jeigu nesilaikoma eksperimento metodikos rezultatai gali kisti ir iškreipti bendrus duomenis.

Kukurūzų miltų šlyties savybių tyrimus atliksime su eksperimentiniu tyrimo stendu, kuris buvo aptartas 3.1 skyriuje. Visi matavimai bus atliekami prie kambario temperatūros $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prieš pilant kukurūzų miltus į cilindrą nusistatomas reikalingas rotoriaus apsisukimų dažnis. Apsisukimų dažnis reguliuojamas elektros variklio valdymo bloko pagalba. Tiriama medžiaga beriama į cilindro kanalą. Kukurūzų miltų įkrovos tūrį apskaičiuojame išmatavę cilindro griovelio gabaritinius matmenis ir pasinaudojimą formulę:

$$V = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \cdot h \quad (3.4)$$

čia: D – žiedinio kanalo išorinis diametras, [m];

d – žiedinio kanalo vidinis diametras, [m];

h – žiedinio kanalo aukštis, [m].

Išmatavus visus reikiamus matmenis buvo gauta:

- Žiedinio kanalo išorinis diametras $D = 0,057\text{ m}$;
- Žiedinio kanalo vidinis diametras $d = 0,025\text{ m}$;
- Žiedinio kanalo aukštis $h = 0,016\text{ m}$.

Išmatuotas reikšmes įstatome į 3.4 formulę:

$$V = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \cdot h = \frac{3,14 \cdot (0,057^2 - 0,025^2)}{4} \cdot 0,016 = 1,296 \cdot 10^{-6}\text{ m}^3$$

Kanalas užpildomas iki viršutinės cilindro briaunos. Užpildytas cilindras dedamas ant atraminio guolio ir iš viršaus kukurūzų miltų grūdėliai prispaudžiami rotoriumi. Prispaudimo jėga yra reguliuojamas kalibruotų svarmenų pagalba. Svarmenys dedami ant viršutinės platformos. Svarmenų išvystomą slėgį biriai medžiagai apskaičiuojame pasinaudojimą formulę:

$$p = \frac{4Q_A}{\pi D^2} - \frac{4Q_A}{\pi d^2}, [\text{Pa}]; \quad (3.5)$$

čia: p – slėgis tiriamai medžiagai, [Pa];

D – rotoriaus skersmuo, [m];

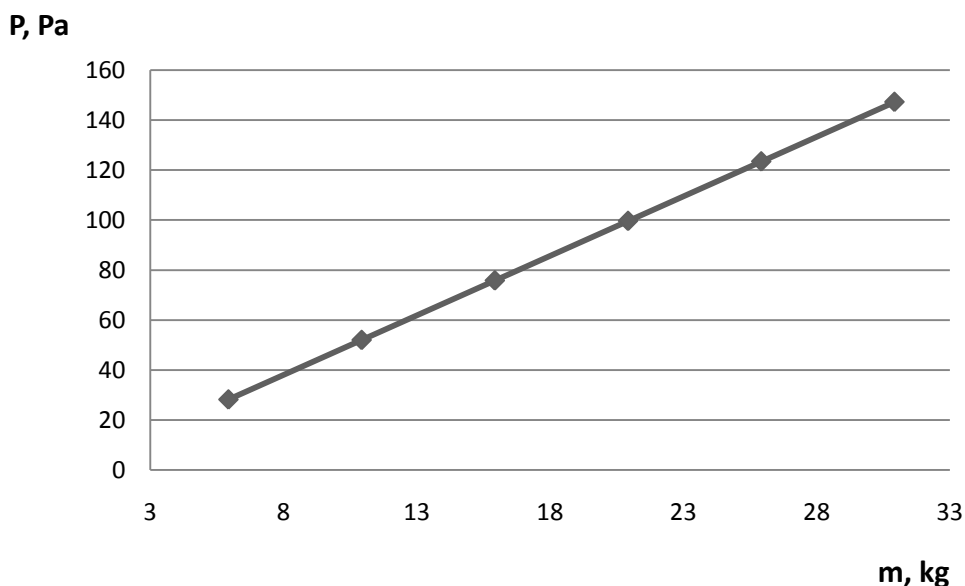
d – cilindro šerdis, [m].

Slėgį tiriamai medžiagai sukelia rotorius, velenas, atrama ir papildomi svoriai. Pagal 3.5 formulę apskaičiuotas reikšmes surašome į 3.3 lentelę.

3.3 lentelė Tiriamos medžiagos slėgio priklausomybė nuo svorio.

Pavadinimas	Masė, kg	Slėgis tiriamajai medžiagai, Pa	Sukauptas masė, kg	Sukauptas slėgis tiriamajai medžiagai, Pa
Velianas ir ašis	5,923	28206,13	5,923	28206,13
Masė 1	5,000	23810,68	10,923	52016,81
Masė 2	5,000	23810,68	15,923	75827,49
Masė 3	5,000	23810,68	20,923	99638,17
Masė 4	5,000	23810,68	25,923	123448,85
Masė 5	5,000	23810,68	30,923	147259,53

Nubraižomas tiriamai medžiagai sukeliama slėgio priklausomybė nuo masės grafikas. Grafikas pateiktas 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Tiriamai medžiagai sukeliama slėgio priklausomybė nuo masės.

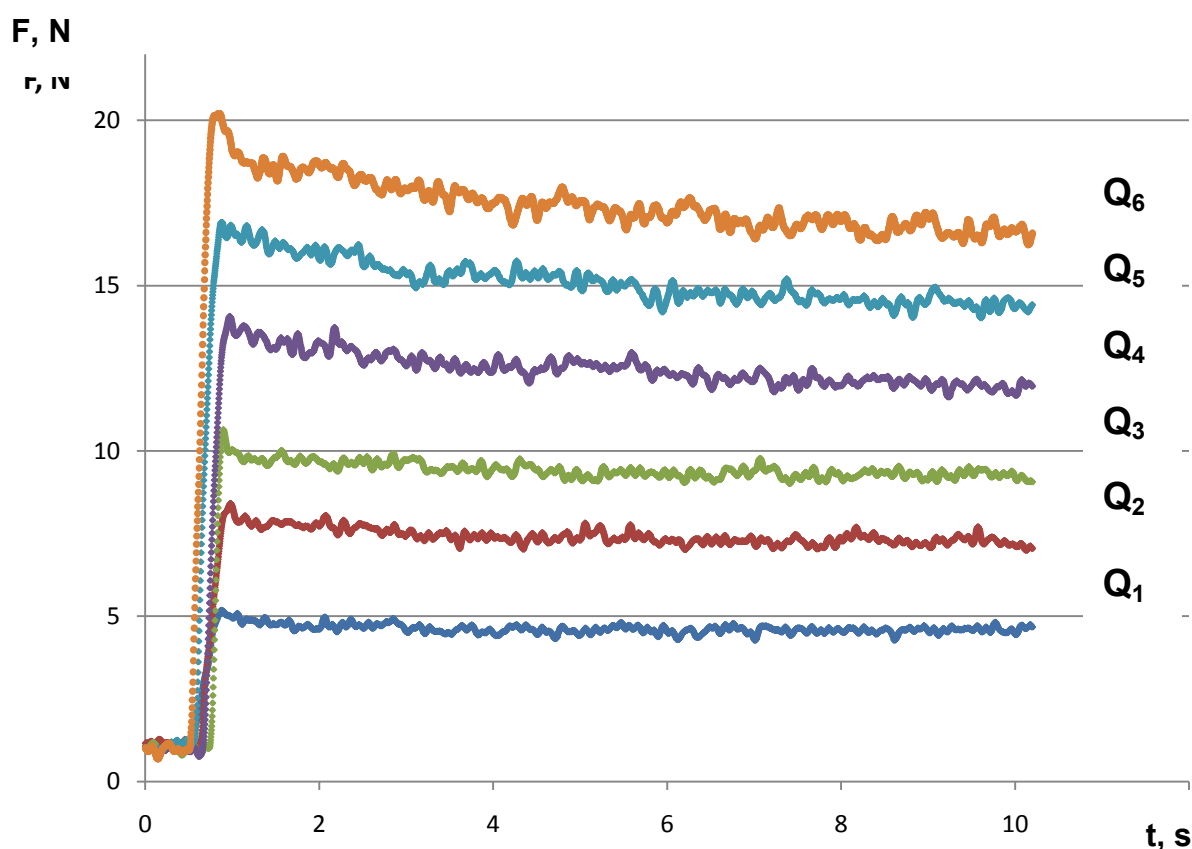
Kiekvieno matavimo metu masė yra didinama kas 5 kg. Nustačius norimą prispaudimo jėgą patikriname strypą. Atstumas tarp tenzorezistoriaus keitiklio ir svirties turi būti minimalus, kad paleidus elektros variklį neįvyktų smūgis ir neiškraipytų duomenų. Patikriname

matavimo sistemą. Kompiuteryje paleidžiama programinė įranga ir pradedame fiksuoti keitiklio parodymus. Po programos paleidimo paleidžiame elektros variklį. Pasiekus varikliui nustatytą apsisukimų dažnį ir nusistovėjus darbui galima stabdyti elektros variklį ir baigti fiksuoti duomenis. Sukauptus duomenis įrašome į laikmeną tolesniam apdorojimui. Bandyką atliekame prie skirtingų apsisukimų dažnių ir prispaudimo jėgos. Kiekvienam matavimui keičiama miltų įkrova.

4. EKSPERIMENTŲ REZULTATAI

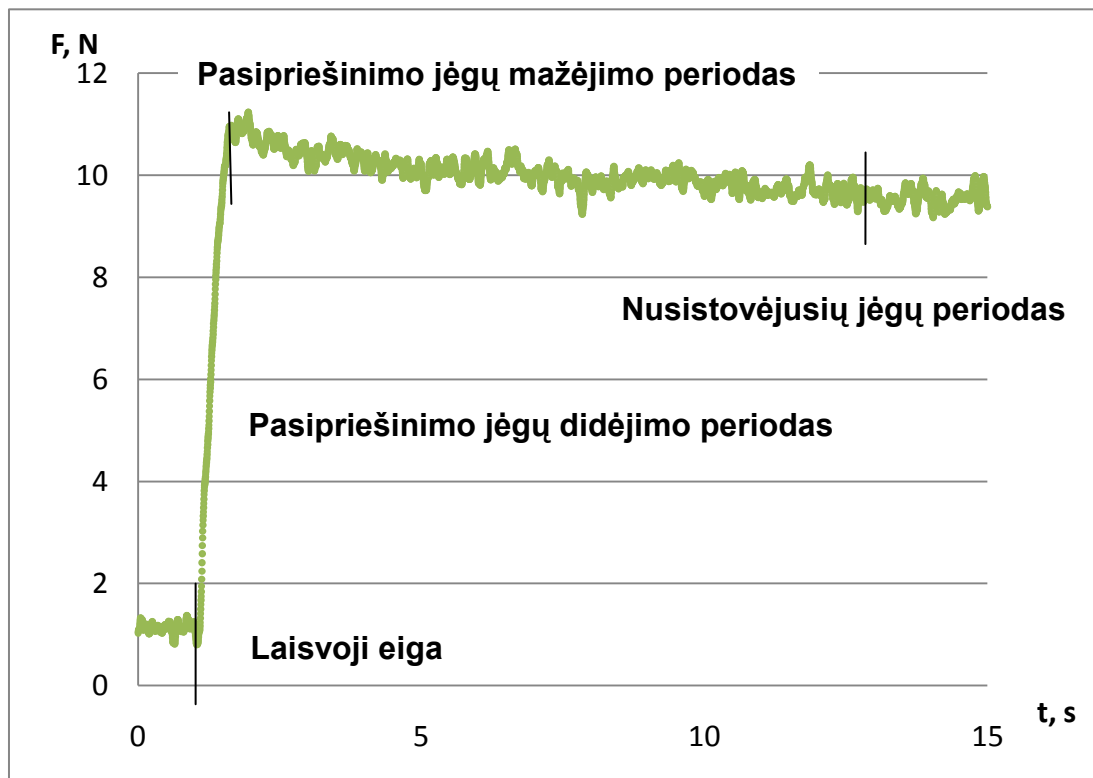
Kukurūzų miltų frikcinių savybių tyrimas buvo atliekamas su eksperimentiniu trinties nustatymo įrenginiu, kartu naudojant šiuolaikinę matavimo sistemą. Tyrimai buvo atliekami nustatant trinties koeficientą iš LAB VIEW programos surinktų, keitiklio parodymų, kai buvo keičiama prispaudimo jėga tiriamai medžiagai ir rotoriaus apsisukimų dažnis.

Atlikus eksperimentinius matavimus su nustatytu apsisukimų dažniu, bet keičiama prispaudimo jėga buvo gauti matavimo duomenys, tai yra keitiklio įtampos parodymai. Pasinaudojus taravimo metu gauta lygtimi, iš gautų duomenų nubraižome grafiką (4.1 pav.). Kitų bandymų grafikai pateikti priede.



4.1 pav. Pasipriešinimo jėgos matavimo parodymai kai apsisukimų dažnis 42 aps/min, tačiau kinta prispaudimo jėga Q: Q₁ – 58,1 N; Q₂ – 107,2 N; Q₃ – 156,2 N; Q₄ – 205,3 N; Q₅ – 254,3 N; Q₆ – 303,4 N.

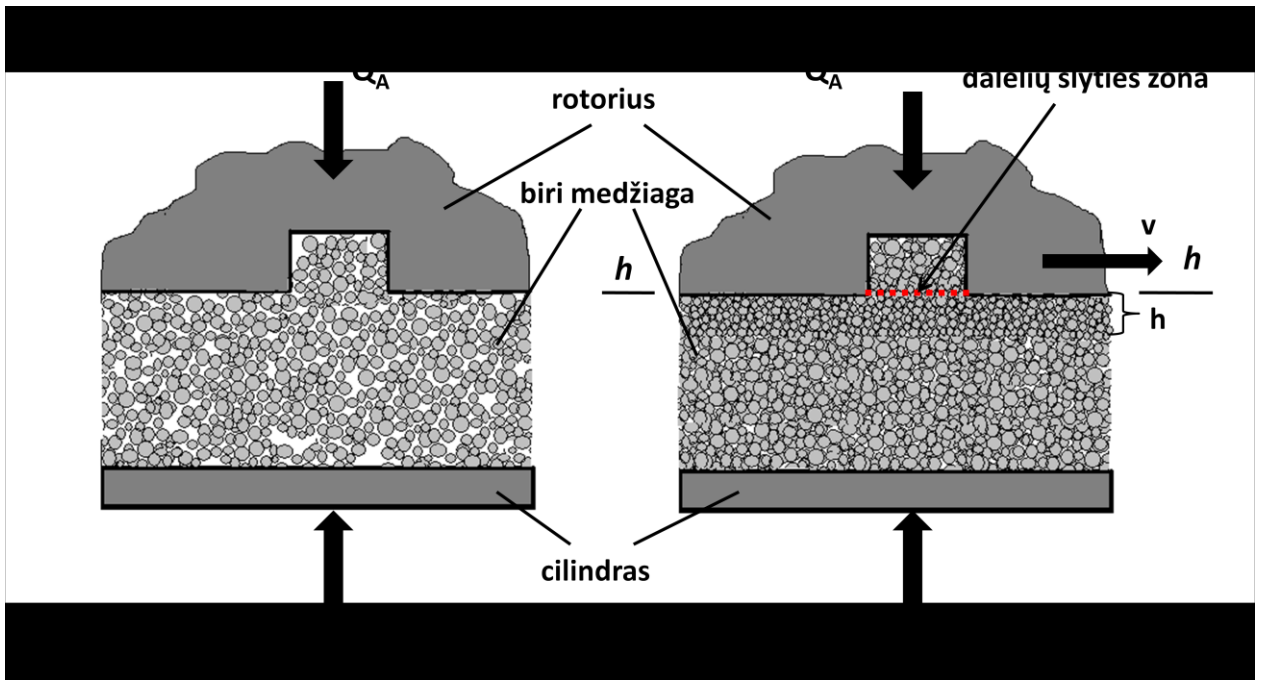
Gautų rezultatų analizės metu pastebėta tendencingas perduodamos jėgos mažėjimas. Vertinant gautus rezultatus, galima išskirti tris judesio etapus (4.2 pav.).



4.2 pav. Užfiksuoti duomenys bandymo metu kai apsisukimų dažnis 18 aps/min ir prispaudimo jėga 156,2 N.

Gautoje diagramoje galima skirti tris skirtingas zonas. Laisvosios eigos zonoje užfiksuoti duomenys dar nevykstant šlyties procesui. Šiuo metu rotorius nesisuka. Pasipriešinimo jėgų didėjimo periode renkami duomenys kada paleidžiamas elektros variklis iki jam pasiekiant nustatytą maksimalų greitį.

Pasipriešinimo jėgų mažėjimo periode vyksta sudėtingi šlyties, dalelių glemžimo kirpimo, tankinimo ir frikciniai procesai. Galime teigti, kad birios medžiagos grūdelių deformacijos jau prasidėjo rotoriumi pradėjus sukintis, tačiau nuo rotoriaus paleidimo iki jo išibėgėjimo praeina mažas laiko tarpas (žr. 4.2 pav.). Darome prielaidą, kad pasipriešinimo jėgų periodo metu biri medžiaga nepakito. Pasiekus rotoriumi nustatytą apsisukimų dažnį vyksta tiriamos medžiagos dalelių tankinimo procesai. Veikiant medžiagos daleles išorine jėga ir šlyties įtempiais, dalelės persislenka į laisvas, tuščias ertmes (4.3 pav. a ir b).



a

b

4.3 pav. Tiriamos medžiagos būvio kaita:

a – bandymo pradžioje;

b – esant nusistovėjusiam periodui.

Pasipriešinimo jėgų mažėjimo periode vyksta medžiagos dalelių sutankinimas. Kada dalelės užpildo visas laisvas ertmes, kontakto su rotoriumi zonoje, dalelės yra gniuždomos ir ardomos rotoriaus griovelių (4.3 pav. b). Susmulkintos dalelės užpildo laisvas ertmes, todėl viršutinis kukurūzų miltų sluoksnis yra daugiau sutankintas negu gilesni sluoksniai (4.4 pav. a. ir b.).



a

b

4.4 pav. Kukurūzų miltų dalelių kaita: a – prieš bandymą; b – po bandymo

Cilindre esančios medžiagos tūris rotoriaus, o tuo pačiu ir sukeliamu šlyties įtempį, verčiamas tekėti. Tekėjimas yra dvimatis šlyties ir dalelių greičių skirstiniai gaunami iš horizontalios ir vertikalios plokštumų. Šlyties įtempiai veikia tiriamą medžiagą gylyje h (4.3 pav. b.). Atlikus medžiagos analizę po bandymo buvo pastebėta, kad kukurūzų miltų dalelių sutankintas sluoksnis yra gilesniuose sluoksniuose (4.5 pav.). Nuotraukoje matyti gilesnio sluoksnio suspausti grudeliai. Juos veikia adhezijos ir sutankinimo jėgos, kurio neleidžia dalelėms išbirti apvertus cilindą. Apvertus cilindą išbyrėjo šlyties paveiktas sluoksnis. Iš 4.5 pav. matyti, šlyties veikiamas sluoksnis h buvo labai mažas.



4.5 pav. Sutankintos dalelės po bandymo.

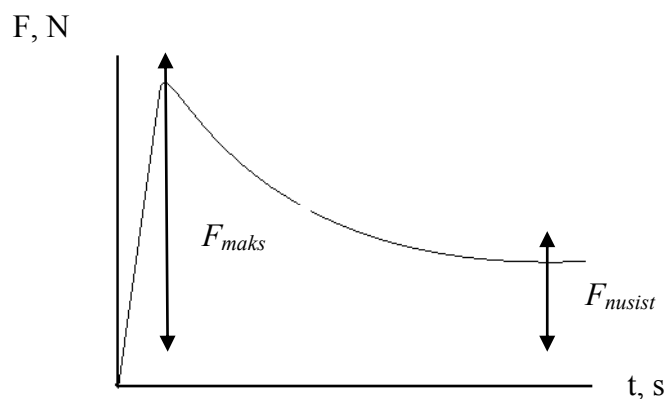
Nusistovėjusio slydimo zonoje gauti duomenys rodo nusistovėjusį slydimą tarp rotoriaus ir kietos birios medžiagos. Susmulkintos dalelės užima laisvas ertmes, slystamas paviršius pasidaro lygesnis, todėl praslydimas yra lengvesnis negu bandymo pradžioje (4.2 pav.).

Analizuojant bandymo metu gautas diagramas (4.1 pav.) galima nustatyti tendencingą šlyties įtempių poveikio mažėjimą. Didėjant apkrovimo jėgai Q didėja šlyties įtempiai. Šlyties įtempių didėjimo laipsnis k apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$k = \frac{F_{maks}}{F_{nusist}} \quad (4.1)$$

čia: F_{maks} - didžiausias keitiklį veikianti jėga, [N]

F_{nusist} - keitiklį veikianti jėga nusistovėjusio judėjimo metu, [N]



4.6 pav. F reikšmės grafike.

Apskaičiuosime šlyties įtempių laipsnį kai sukimosi dažnis yra 42 aps/min, tačiau kinta apkrovimo jėga Q . Pirmam skaičiavimui imame duomenis kai apkrovos jėga buvo 58,1 N.

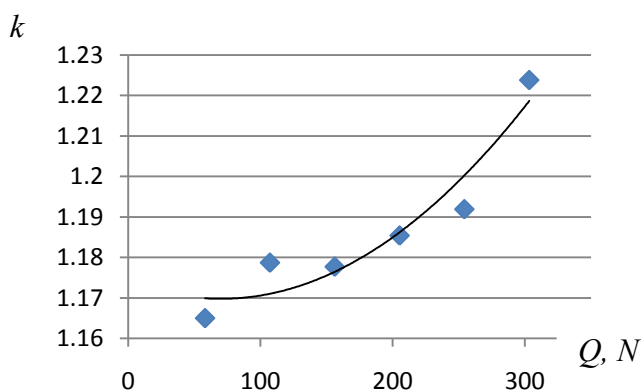
$$k = \frac{F_{nysis}}{F_{maks}} = \frac{4,18}{3,59} = ,17$$

Apskaičiuojame kitų matavimų šlyties įtempių laipsnį. Gautus rezultatus surašome į lentelę.

4.1 lentelė Šlyties įtempių didėjimo laipsniai.

Apkrovimo jėga Q [N]	k
58,1	1,17
107,2	1,18
156,2	1,16
205,3	1,19
254,3	1,18
303,4	1,22

Santykinio dydžio k skaitinių reikšmių priklausomybę nuo medžiagą veikiančios apkrovimo jėgos galima pavaizduoti grafiškai (4.7 pav.).



4.7 pav. Medžiagą veikiančių, šlyties įtempių santykinio mažėjimo priklausomybė nuo veikiančios jėgos Q.

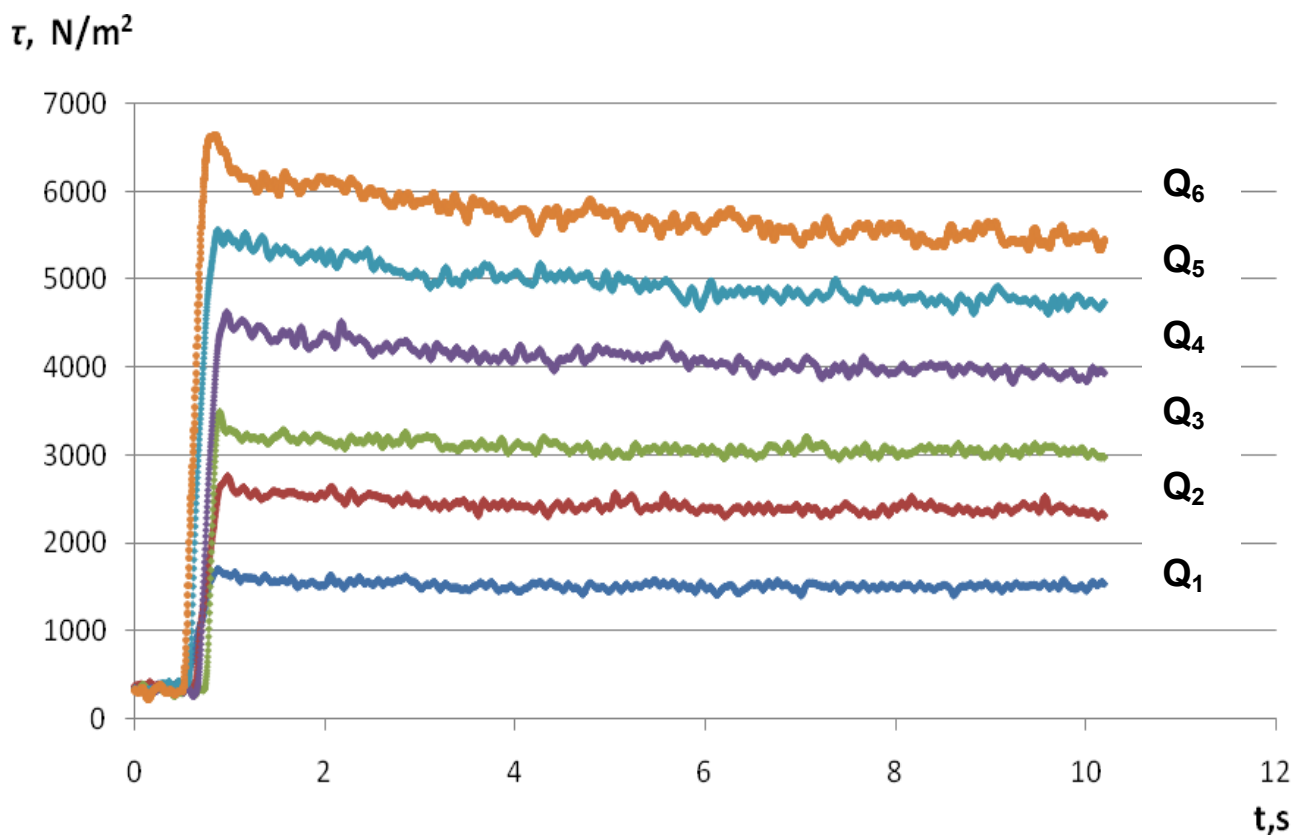
Iš 4.7 pav. pateikto grafiko matyti, kad šlyties įtempių laipsnis didėja didėjant apkrovimo jėgai Q. Atlikus gautų rezultatų regresinę analizę, nustatyta statistinė funkcinė priklausomybė

$$k = ,17 - ,0 \cdot 10^{-3} \cdot Q + ,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \quad (4.2)$$

Šlyties įtempis tiriamai medžiagai apskaičiuojame pasinaudoję 2.31 formulę. Skaičiavimams reikalingus gabaritinius rotoriaus matmenis imame iš 3.4 pav. Atstumas tarp cilindro sukimo ašies ir keitiklio atraminės plokštumos centro $l = 0,016$ m. Sustatę visas reikšmes į formulę gausime:

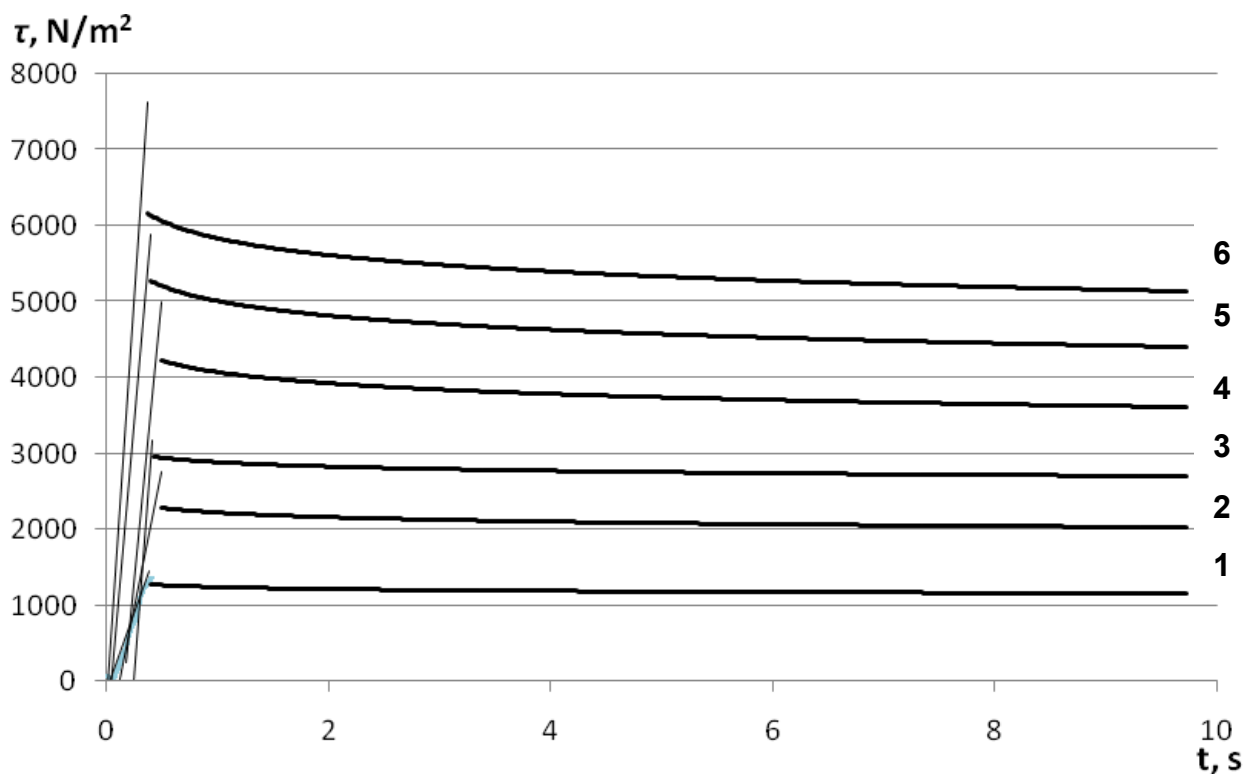
$$\tau = \frac{Fl\rho}{\frac{\pi}{32} \left(\frac{d^4}{D^4} \right)} = \frac{1,07 \cdot 0,016 \cdot 0,0205}{\frac{3,14 \cdot 0,057^4}{32} \left(\frac{0,025^2}{0,057^2} \right)} = 354,7 \text{ N/m}^2$$

Apdorojus atliktų eksperimentų gautus duomenis pagal 2.31 formulę gauti rezultatai atvaizduojami grafike (4.8 pav.).



4.8 pav. Šlyties įtempio diagramos kai apsisukimų dažnis 42 aps/min tačiau kinta prispaudimo jėga Q : $Q_1 = 58,1$ N; $Q_2 = 107,2$ N; $Q_3 = 156,2$ N; $Q_4 = 205,3$ N; $Q_5 = 254,3$ N; $Q_6 = 303,4$ N.

Gautose diagramose analizuojant šlyties įtempio kaitą jų mažėjimo periode, būtina vertinti šlyties įtempio kaitą priklausomai nuo laiko (4.9 pav.). Funkcijos užrašymui naudojant regresinę analizę. Žinant, kad kurios medžiagos šlyties tyrimo procese yra keli periodai (4.2 pav.) užrašome dvi funkcijas. Viena funkcija rašoma šlyties įtempio didėjimo periode, antra užrašoma šlyties įtempio mažėjimo periode (4.2 lentelė). Laisvos eigos periodas dėl mažaverčių duomenų eliminuojamas.



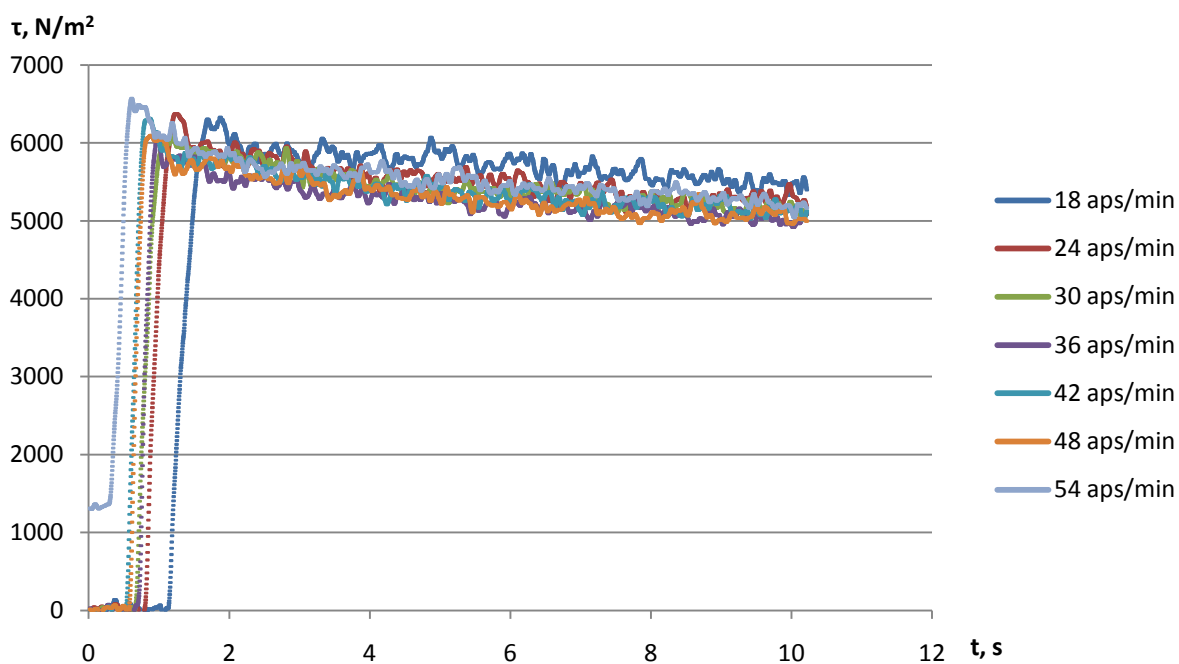
4.9 pav. Mažiausių kvadratų metodu nubrėžtos kreivės gautiems eksperimento rezultatams, kada $n = 42$ aps/min, Q : 1 – 58,1 N; 2 – 107,2 N; 3 – 156,2 N; 4 – 205,3 N; 5 – 254,3 N; 6 – 303,4 N.

Iš gautų duomenų galima nustatyti, kad įtempių mažėjimo iki nusistovėjusios reikšmės zona ilgėja, didėjant medžiagą veikiančiai prispaudimo jėgai Q . Visos regresijos analizės metu gautos lygtys surašytos į 4.2 lentelę.

4.2 lentelė. Bandymo metu gautų rezultatų šlyties įtempių priklausomybės nuo laiko

Eil. Nr	Elektro variklio paleidimo zonos lygtis	Šlyties nusistovėjimo lygtis
1	$\tau = 4061.9 t - 148.49$	$\tau = 1242.6 t^{-0.03}$
2	$\tau = 7095.1 t - 824.1$	$\tau = 2230.5 t^{-0.04}$
3	$\tau = 15591 t - 2662.3$	$\tau = 2882.8 t^{-0.029}$
4	$\tau = 16605 t - 833.64$	$\tau = 4065 t^{-0.052}$
5	$\tau = 18109 t - 4423.1$	$\tau = 5018.9 t^{-0.057}$
6	$\tau = 21471 t - 414.36$	$\tau = 5838 t^{-0.056}$

Tiriant birios medžiagos šlyties įtempių savybes būtina žinoti kaip jie kinta nuo rotoriaus sukimosi greičio. Bandymas atliekamas prie nustatytos apkrovimo jėgos, tačiau keičiant apsisukimų dažnį. Gautus rezultatus atvaizduojame grafiškai (4.10 pav.).



4.10 pav. Šlyties įtempių diagramos kai apkrovimo jėga $Q - 303,4 \text{ N}$ tačiau kinta apsisukimų dažnis n .

Gautų rezultatų analizės metu pastebėta, kad birios medžiagos, veikiančios pastovios prispaudimo jėgos, šlyties įtempiai labai nežymiai kinta keičiantis apsisukimų dažniui (4.9 pav.). Apsisukimų dažnis buvo keičiamas nuo 18 aps/min iki 54 aps/min. Galime pastebėti, kad birios medžiagos įtempiai nepriklauso nuo rotoriaus slydimo greičio.

IŠVADOS

Šiame moksliniame – tiriamajame darbe nagrinėjama birių medžiagų šlyties savybių tyrimas tarp besisukančio rotoriaus ir birios medžiagos, kintant pripaudimo jėgai (slėgiui) ir rotoriaus apsisukimų dažniui.

Darbe buvo atlikta:

1. Atlikta mokslinės literatūros apžvalga.
2. Pasiūlytas šlyties įtempių tyrimo metodas.
3. Sukonstruotas tyrimo stendas su šiuolaikinėmis matavimo priemonėmis.
4. Paruošta birių medžiagų šlyties savybių tyrimo metodika.
5. Ištirta kukurūzų miltų šlyties įtempių priklausomybė kai:
 - Tyrimo temperatūra 18 °C;
 - Kito apsisukimų dažnis 18 ÷ 56 aps/ min;
 - Kito šlyties paviršių veikiantis slėgis.
6. Atlikta gautų rezultatų analizė

Kukurūzų miltų šlyties įtempių tyrimui buvo sukonstruotas eksperimentinis įrenginys meliuojantis realų ekstruzijos procesą. Šlyteis įtempiai matuojami atliekant bandymus prie sąlygų artimų realiam ekstruzijos procesui.

Nustatytos sekančios kukurūzų miltų šlyties kitimo tendencijos:

1. Kukurūzų miltų šlyties įtempiams įtakos neturi bandymų atlikimo eliškumas.
2. Tirtų kukurūzų miltams būdinga dalelių konsideracija, dėl dalelių didumo ir sąlyginio kietumo. Daleles veikiant išorinėmis jėgomis jos persislenka į laisvas ertmes.
3. Didinant apkrovimo jėgą (slėgį) šlyties įtempiai didėja.
4. Didinant rotoriaus apsisukimų greitį šlyties įtempiai, tirtame greičių diapozone, nekinta.

Todėl galime teigti:

Šlyties įtempiai, dėl dalelių fizinių savybių, tiriamoje medžiagoje nėra pastovūs. Jų kaitą, mažėjimo periode, galime vertinti laike. Kas leidžia įvertinti birios medžiagos deformacijos laipsnį. To pasekoje ši informacija leidžia optimizuoti ekstruzijos procesą.

Didėjant prispaudimo jėgai didėja šlyties įtempiai ir šlyties įtempių laipsnis. Šlyties įtempių padidėjimas gali būti aiškinamas dėl didesnio dalelių gniuždymo laipsnio. Taip pat padidėjus apkrovimo jėgai padidėja šlyties įtempių sluoksnis.

Didinant rotoriaus apsisukimų dažnį šlyties įtempiai, tirtame greičių diapozone, nekito esant pastoviai prispaudimo jėgai. Tai rodo, kad greičių kaita nedaro įtakos dalelių gniuždymui.

Suprojektuotu birių medžiagų šlyties įtempių tyrimo stendu galima tirti ne tik kukurūzų miltus, bet ir kitas birias medžiagas. Iš gautų rezultatų ir palyginus su kitais moksliniai rezultatais galime teigti, kad šlyties įtempių tyrimo stendas atitinka realų ekstruzijos technologinį procesą. Šis įrenginys gali būti naudojamas birių medžiagų šlyties savybių tyrimams.

Šiame moksliniame darbe gauti rezultatai gali būti panaudojami praktikoje, projektuojant sraigtinius įrenginius.

LITERATŪRA

- Andersen C. B., Ravn B. G., Wanheim T. 2001, Development of a commercial transducer for measuring pressure and friction on a model die surface. *Journal of Materials Processing Technology* Nr. 115(2) [žiūrėta 2009 m. spalio 6], 205-211 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Azhdar B., Stenberg B., Kari L., 2006. Determination of dynamic and sliding friction, and observation of stick-slip phenomenon on compacted polymer powders during high-velocity compaction. *Polymer testing* Nr 25(8), [žiūrėta 2009 m. spalio 10], 1069-1080 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Chiruvella, R. V., Jaluria V., Sernas V., 1996 Extrusion of Non – Newtonian fluids in a single – screw extruder with pressure back flow. New jersey: The state University of New Jersey, Nr. 3(36), [žiūrėta 2009 m. spalio 29]. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Galanty M., Kazanowski P., Kansuwan P., 2002. Consolidation of metal powders during the extrusion process. University of Mining and Metallurgy, Cracow, Poland, [žiūrėta 2009 m. spalio 6]. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Hassan H. A., Lewandowski J. J. 2008. Effects of Changes in Notch Radius and Test Temperature on the Toughness of a Nano-crystalline Aluminum Alloy Composite Produced via Extrusion of Amorphous Aluminum Alloy Powders. *Materials Science and Engineering* Nr. 497(2) [žiūrėta 2009 m. spalio 6], 212-215 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Yusaku F., 2006. Method for measuring transient friction coefficients for rubber wiper blades on glass surface. *Tribologija* Nr 41, [žiūrėta 2009 m. lapkričio 15], 17-23 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Kasahara A., Goto M., Tosa M., Yoshihara K., 2003. Measurement of friction force electrochemical buffing and chemical polishing to decrease sliding friction in high vacuum with control of surface nano roughness. *Journal of Electroanalytical Chemistry* Nr. 559 [žiūrėta 2009 m. spalio 6], 45-48 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Keshavarza S., Khoei A., Khalooa A., Contact friction simulation in powder compaction process based on the penalty approach. aCenter of Excellence in Structures and Earthquake Engineering, , Sharif University of Technology, P.O. Box 11365-9313, [žiūrėta 2009 m. spalio 10], prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Lee S., Kim K., 2008. A densification model for powder materials under cold isostatic pressing—Effect of adhesion and friction of rubber molds. *Materials Science and*

- Engineering Nr 498(2) [žiūrėta 2009 m. lapkričio 24], 359-368 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Manoi K, Rizvi S., 2008. Rheological characterizations of texturized whey protein concentrate-based powders produced by reactive supercritical fluid extrusion. Food Research International Nr 41(8) [žiūrėta 2009 m. spalio 6], 786-796 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Mechler A., Kokavec J., Heszler. P., 2001. The observability of poorly bound powder-like material on hard surface by atomic force microscopy. Materials Science and Engineering Nr. 55(2) [žiūrėta 2009 m. lapkričio 15], 29-32 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Nor S., Rahman S., Tarlochan F., Shahida B., Ariffin K., 2008. The effect of lubrication in reducing net friction in warm powder compaction process. Journal of Materials Processing Technology Nr 207(3) [žiūrėta 2009 m. lapkričio 24], 118-124 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Rajesh j. J., Bijwe J., 2004. Influence of fillers on the low amplitude oscillating wear behaviour of polyamide 11. Wear Nr. 256(1) [žiūrėta 2009 m. spalio 6], 1-8 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Reitsma M., Robert G., Cain R., Biggs S., David W., 2006. Observed transition from linear to non-linear friction-load behavior using a lateral force microscope. Applied Surface Science Nr. 252(14) [žiūrėta 2009 m. lapkričio 15], 4964-4968 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Rosochowski A., 2001. Technical feasibility of a three-axis force transducer for measuring pressure and friction on the model die surface — prototype development. Journal of Materials Processing Technology Nr. 115(2) [žiūrėta 2009 m. spalio 6], 192-204 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Schikorra M., Donati L., Tomesani L., Kleiner M., 2007. The role of friction in the extrusion of AA6060 aluminum alloy, process analysis and monitoring. Materials Processing Technology Nr. 191(3) [žiūrėta 2009 m. spalio 10], 288-292p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
 - Schulze D. 2008. Powders and bulk solids. Berlin: Springer
 - Son I. H., Jin Y. G., Im Y. T., Chon S. H., Park J.K., 2007 Sensitivity of friction condition in finite element investigations of equal channel angular extrusion. Materials Science and Engineering Nr 445, [žiūrėta 2009 m. spalio 18], 676-685 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.

- Wang L. G., Sun X. P., Huang Y., 2005 Friction analysis of microcosmic elastic-plastic contact for extrusion forming. *Materials Processing Technology* Nr. 187, [žiūrėta 2009 m. spalio 16], 631-634 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Shi D., Luo Z., Zheng Z., 2009 Numerical simulation of liquid–solid two-phase flow in a tubular loop polymerization reactor. *Powder technology* Nr. 198(1), [žiūrėta 2010 m. gegužės 18], 135-143 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.
- Guo Y., Wu C.-Y., Kafui K. D., 2010 Numerical analysis of density-induced segregation during die filling. *Powder technology* Nr. 197(1), [žiūrėta 2010 m. gegužės 18], 111-119 p. Prieiga per SCIENCE DIRECT.

PRIEDAI