



J O N A S M A T U L E V I Č I U S

---

**NANOPLUOŠTINIŲ  
MEDŽIAGŲ FORMAVIMAS  
ELEKTRINIO  
VERPIMO BŪDU IR JŲ  
FILTRAVIMO SAVYBIŲ  
TYRIMAS**

---

D A K T A R O D I S E R T A C I J O S  
S A N T R A U K A

T E C H N O L O G I N I A I  
M O K S L A I , C H E M I J O S  
I N Ž I N E R I J A ( 0 5 T )

K a u n a s  
2 0 1 6

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

JONAS MATULEVIČIUS

**NANOPLUOŠTINIŲ MEDŽIAGŲ FORMAVIMAS ELEKTRINIO  
VERPIMO BŪDU IR JŲ FILTRAVIMO SAVYBIŲ TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologiniai mokslai, chemijos inžinerija (05T)

2016, Kaunas

Disertacija rengta 2011–2015 m. Kauno technologijos universitete, Cheminės technologijos fakultete, Aplinkosaugos technologijos katedroje.

**Mokslinis vadovas:**

**Prof. dr. Linas KLIUČININKAS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, chemijos inžinerija, 05T).

**Chemijos inžinerijos mokslo krypties taryba:**

**Prof. dr. Raimundas ŠIAUČIŪNAS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, chemijos inžinerija – 05T) – **pirmininkas**;

**Prof. habil. dr. Juozas Vidas GRAŽULEVIČIUS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, chemijos inžinerija – 05T);

**Dr. Kęstutis KVIETKUS** (Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

**Prof. dr. Jolanta LIESIENĖ** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, chemijos inžinerija – 05T);

**Prof. habil. dr. Ireneusz ZBICINSKI** (Lodzės technikos universitetas, Lenkija, chemijos inžinerija – 05T).

Lietuvių kalbos redaktorė  
Aurelija Gražina Rukšaitė  
Leidykla „Technologija“

Anglų kalbos redaktorė  
Brigita Brasienė  
Leidykla „Technologija“

Disertacija bus ginama viešame Chemijos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje, kuris įvyks 2016 m. vasario 5 d. Kauno technologijos universiteto Rektorato salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-402, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 30 00 42; faksas (370) 37 32 41 44; el. paštas: *doktorantura@ktu.lt*

Disertacijos santrauka išsiųsta 2016 m. sausio 5 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje *http://ktu.edu* ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

## IŽANGA

Pasaulio sveikatos organizacijos duomenimis, kietosios dalelės ore (aerozoliai) labiau nei kiti teršalai daro įtaką žmogaus sveikatai (World Health Organisation, 2005). Smulkieji aerozoliai ( $<2,5\mu\text{m}$ ) dėl jų didelio skvarbumo į plaučius yra traktuojami kaip kenksmingiausi. Todėl įvairiuose procesuose dalelėms sulaikyti ir atskirti iš paduodamo ar cirkuliacinio oro srauto yra plačiai naudojami įvairūs oro filtrai. Tradiciniai oro filtrai, kurių pluošto skersmuo yra mikrometro lygmens, pasižymi gana dideliu filtravimo efektyvumu. Remiantis filtravimo teorijomis (Hinds, 1999), yra žinoma, kad mažesnis filtro pluošto skersmuo, esant vienodam filtro supakavimo tankiui, lemia geresnį filtravimo efektyvumą. Dėl šios priežasties filtrų su mažesniu nei mikrometro pluošto skersmeniu, t. y. nano lygmens, taikymas filtruojant yra patrauklus ir inovatyvus tiek moksliniu, tiek ir praktiniu požiūriu. Pastaraisiais metais išstobulėjus vienam iš nanopluoštų formavimo metodų – elektriniam verpimui, nanopluoštų filtrų naudojimas tapo aktualiu ir populiariu mokslinių tyrimų objektu.

Elektrinis verpimas – tai paprastas ir plačiai naudojamas metodas, skirtas pluoštams formuoti mikro- ir nanolygmenimis (Askari et al., 2014; Barhate et al., 2011). Elektrinio verpimo metodu suformuoti pluoštai pasižymi unikaliomis savybėmis: dideliu paviršiaus ir tūrio santykiu, maža kvadratinio metro mase, dideliu poringumu, mažu porų dydžiu ir sąlyginai vienodu pluošto gijų skersmeniu (Leung et al., 2010). Kadangi nanopluošto skersmuo yra itin mažas, filtro slėgio nuostolių padidėjimas, oro molekulėms judant aplink pluoštą, nėra toks didelis, palyginti su tokio pat paviršiaus ploto mikropluoštais (Sambaer et al., 2011). Be viso to, režime, kai oro molekulės, judėdamos per pluoštą, su juo nesusiduria, padidėja sąveika tarp mažų filtruojamų dalelių ir pluošto paviršiaus – tai nulemia didesnę filtravimo efektyvumą.

Pastaruoju metu keletas mokslininkų išsamiai analizavo nanopluoštų filtravimo rodiklius. Minėti mokslininkai tyrė elektrinio verpimo parametrų (Zhang et al., 2009) ir nanopluoštų filtro charakteristikų (Hung & Leung, 2011; Leung et al., 2010; Sambaer et al., 2011) įtaką filtravimo rodikliams. Remdamiesi mokslinių tyrimų rezultatais, galime teigti, kad filtravimo parametrų ir filtro savybių priklausomybės yra pakankamai moksliskai išanalizuotos. Tačiau stokojama detalesnių tyrimų, susijusių su nanopluoštų filtrų, pagamintų iš skirtingų medžiagų, filtravimo rodiklių analizei atlikti. Kai kuriuose tyrimuose nanopluoštų filtrams gaminti naudotos medžiagos dėl prastų mechaninių ir atsparumo cheminėms medžiagoms savybių yra netinkamos smulkioms aerozolio dalelėms filtruoti. Todėl detalus polimerinių tirpalų parametrų, elektrinio verpimo sąlygų ir jų įtakos nanopluoštų savybėms charakterizavimas yra aktualus mokslinių palyginamųjų eksperimentinių tyrimų objektas.

### **Disertacijos tikslas:**

Elektrinio verpimo būdu pagaminti nanopluoštus, iširti jų savybes ir atlikti palyginamąjį nanopluoštinių medžiagų filtravimo savybių oro sraute vertinimą.

### **Disertacijos uždaviniai:**

1. Parengti ir optimizuoti acetilceliuliozės pluoštų formavimą elektrinio verpimo būdu.
2. Nustatyti ir įvertinti polimerinio tirpalo sudėties ir elektrinio verpimo parametrų įtaką nanopluoštų filtrų rodikliams.
3. Atlikti palyginamuosius filtravimo tyrimus su nanopluoštų filtrais, pagamintais iš skirtingų polimerinių medžiagų.
4. Įvertinti ir palyginti vienasluoksnių ir daugiasluoksnių nanopluoštų filtrų kokybės veiksnius.
5. Įvertinti ir palyginti polistireno latekso ir natrio chlorido aerozolio dalelių filtravimo nanopluoštų filtrais efektyvumą.

### **Darbo naujumas:**

1. Greta mokslininkų atliktų tyrimų su polimeriniais nanopluoštais (poliamidais 6 ir 6/6, poliakrilnitrilu), filtruojant pirmą kartą buvo tirti acetilceliuliozės ir polivinilacetato nanopluoštai, suformuoti elektrinio verpimo būdu.
2. Acetilceliuliozės nanopluoštams formuoti pirmą kartą panaudotas ir parengtas trinaris tirpiklių (acetono / dichlormetano / dimetilformamido 2/1/1 tūrio santykiu) mišinys, užtikrinęs nepertraukiamą (be adatos užsikimšimo) acetilceliuliozės nanopluoštų formavimą elektrinio verpimo metu.
3. Gauti nauji duomenys, leidžiantys įvertinti polimerinių tirpalų koncentracijų ir elektrinio verpimo parametrų įtaką nanopluoštų savybėms; sudarantys galimybes palyginti vienasluoksnių ir daugiasluoksnių nanopluoštinių medžiagų filtravimo rodiklius ir leidžiantys nustatyti polistireno latekso ir natrio chlorido aerozolio dalelių prasiskverbimą per nanopluošto medžiagą.

### **Disertacijos struktūra:**

Disertacija yra sudaryta iš santrumpų sąrašo, įžangos, mokslinės literatūros apžvalgos, eksperimento metodikos, rezultatų ir diskusijos, išvadų, literatūros sąrašo ir publikacijų sąrašo. Disertacija pateikiama 83 puslapiuose, įskaitant 10 lentelių ir 21 paveikslą.

## **Disertacijos tyrimų rezultatų publikavimas:**

Tyrimo rezultatai publikuoti trijuose (3) „Thomson Reuters“ sąrašo leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, viena (1) publikacija – kituose recenzuojamuose leidiniuose ir penkios (5) publikacijos / pranešimai – konferencijų pranešimų medžiagoje.

## **Disertacijos praktinė vertė:**

1. Sukonstruota eksperimentinė įranga, skirta nanopluoštams formuoti elektrinio verpimo metodu, ir įranga nanopluoštų filtravimo rodikliams nustatyti, kuri gali būti sėkmingai panaudota atliekant panašius tyrimus ateityje.
2. Disertacijoje pateikiami teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, susiję su nanopluoštų filtro ir filtravimo rodiklių nustatymu, pasižymi moksliniu naujumu. Siekiant geriau suvokti ryšius tarp elektrinio verpimo metu formuojamų nanopluoštų ir nanopluoštų filtrų rodiklių, buvo nustatyti eksploatacijos parametrai.
3. Buvo identifikuoti pagrindiniai nanopluoštų oro filtrų trūkumai ir pateiktos atitinkamos rekomendacijos, siekiant integruoti nanopluoštų filtrus į pramoninius procesus, taip užtikrinant praktinį šių filtrų pritaikomumą.

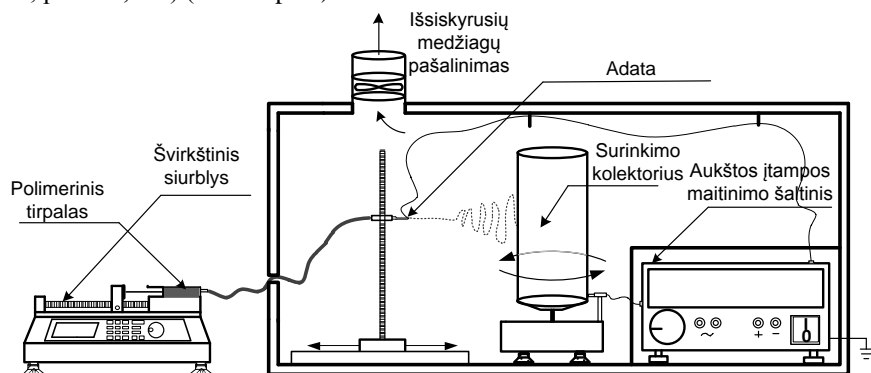
## 2. TYRIMŲ METODIKA

### 2.1. Medžiagos, naudotos nanopluoštams formuoti ir filtravimo rodikliams nustatyti

Atliekant tyrimus naudotos medžiagos suskirstytos į polimerus, tirpiklius ir filtravimo efektyvumo testavimo daleles. Polimerai ir tirpikliai yra būtini siekiant paruošti polimerinį tirpalą, iš kurio elektrinio verpimo metodu yra formuojami nanopluoštai. Polimeriniams tirpalams ruošti buvo naudoti šie polimerai ir tirpikliai: acetilceliuliozė (AC), poliamidas 6 (PA 6), poliamidas 6/6 (PA 6/6), poliakrilnitrilas (PAN), polivinilacetatas (PVAc), acetonas, dichlormetanas (DCM), *N,N*-dimetilformamidas, (DMF), acto rūgštis (AA), skruzdžių rūgštis (FA). Filtravimo efektyvumo testavimo dalelės buvo generuojamos „Collinso“ nebulizatoriuje iš NaCl druskos tirpalo ir polistireno latekso (PSL) suspensijos. Visos medžiagos, išgytos „Sigma-Aldrich“ kompanijoje, buvo naudojamos be jokio papildomo apdorojimo.

### 2.2. Nanopluoštų formavimas elektrinio verpimo metodu

Tyrimams buvo sukurtas elektrinio verpimo stendas (aukštis 0,4 m; ilgis 1,2 m; plotis 0,4 m) (žr. 2.2. pav.).



2.2. pav. Elektrinio verpimo stendo principinė-technologinė schema

Elektrinio verpimo pagrindas – aukšto įtampos nuolatinės srovės maitinimo šaltinis, kurio neigiamas elektrodas prijungtas prie besisukančio kolektoriaus, o teigiamas elektrodas – prie švirkšto adatos. Išmaišyti polimeriniai tirpalai buvo supilami į švirkštą su adata, horizontaliai pritvirtintą prie švirkštinio siurblio. Suformuoti nanopluoštai buvo surenkami ant vertikalios besisukančio cilindrinio kolektoriaus, apvilktu tam tikru pagrindu (substratu). Elektrinio verpimo proceso metu buvo kontroliuojamos aplinkos oro sąlygos (~19–21 °C ir ~34–42 % santykinis oro drėgnumas). Formuojant nanopluoštus iš skirtingų polimerinių

medžiagų, buvo taikomi skirtingi elektrinio verpimo parametrai, kurie yra pateikiami tolesniuose poskyriuose.

### **2.2.1 Nanopluoštų formavimas iš acetilceliuliozės**

AC nanopluoštams formuoti buvo panaudota aliuminio folija, kadangi jos laidumas suteikia galimybę efektyviau atlikti pluoštų paviršiaus analizę mikroskopu. AC polimeriniai tirpalai buvo paruošti naudojant acetono / DCM/DMF trinarį tirpiklių mišinį tūriu 1/1/1 ir 2/1/1. AC masės / tūriui koncentracija tirpaluose buvo 9 %, 10 %, 11 %, 12 %. Eksperimento metu buvo taikyti tokie elektrinio verpimo parametrai: įtampa (V) – 18 kV, išpurškimo greitis (FR) – 2,8 ml/h, verpimo atstumas (TTCD) – 11 cm.

### **2.2.2. Nanopluoštų formavimas iš poliamidų**

PA 6 ir PA 6/6 nanopluoštai buvo formuojami ant poliesterio audinio substrato. Pasirinktas substratas yra lankstus, lengvai atsiskiriantis nuo suformuotų nanopluoštų sluoksnio, suteikiantis galimybę atlikti storio ir kvadratinio metro masės nustatymo matavimus. Polimeriniai tirpalai buvo parengti iš PA 6 ir PA 6/6 šiuose tirpikliuose: FA, FA/AA (3/2 tūriu) ir FA/DCM (3/2 ir 3/1 tūriu). PA 6 masės / tūriui koncentracija tirpaluose buvo 20 %, 24 % ir 28 %, o PA 6/6 koncentracija – 8 %, 11 % ir 14 %. Eksperimento metu buvo taikyti tokie elektrinio verpimo parametrai: V – 12 ir 20 kV (abiem PA), FR – 0,25 ml/h (abiem PA), TTCD – 6 ir 12 cm (PA 6/6); 7 ir 14 cm (PA 6).

Prieš formuojant PA 6 ir PA 6/6 nanopluoštus, buvo sudarytas matematinis eksperimento planas. Eksperimento planas yra paremtas „D-optimal“ modeliu, taikant MODDE7 programą („Umetrics“ AB, Švedija). Remiantis „D-optimal“ eksperimento planavimo modeliu, buvo atlikti 34 kontroliniai eksperimentai (po 17 eksperimentų PA 6 ir PA 6/6). PA 6 ir PA 6/6 nanopluoštų formavimo eksperimentai buvo vykdomi su iš anksto nustatytu kintamųjų deriniu, apimančiu polimerinių tirpalų koncentracijas, tirpiklio rūšį, V, TTCD ir verpimo trukmę. Suformuotų PA nanopluoštų filtrų rodikliams (pluošto skersmeniui, kvadratinio metro masei, storiui ir supakuotam tankiui) buvo pritaikytas mažiausių kvadratų metodas, sukuriant daugianarį modelį, kurio tikslas – nustatyti priklausomybes tarp eksperimento kintamųjų ir filtro rodiklių. Buvo sukurti du modeliai, skirti PA 6/6 ir PA 6 nanopluoštams formuoti. Modeliai apibūdinti pagal apskaičiuotas modelio tinkamumo (R<sup>2</sup>) ir modelio prognozavimo (Q<sup>2</sup>) reikšmes, atskleidžiančias bendrą modelio tikslumą.

### **2.2.3. Nanopluoštų formavimas iš acetilceliuliozės, poliamidų, polivinilacetato ir poliakrilnitrilo**

Nanopluoštai buvo surenkami ant stiklo pluošto tinklelio (substrato), kadangi šis substratas turėjo nedidelį filtravimo efektyvumą (300 nm dalelėms) – 0,2 %,



esant filtravimo greičiui 5,3 cm/s. Polimerinių tirpalų charakteristikos ir elektrinio verpimo parametrai pateikiami 2.2.3. lentelėje.

### 2.2.3. lentelė. Polimerinių tirpalų charakteristikos ir elektrinio verpimo parametrai

Mėginys	Polimeras	Tirpiklis	Polimero koncentracija, %	Įtampa, kV	TTCD*, cm	FR**, ml/h	Verpimo trukmė, min.
PA6/6_120s	PA 6/6	FA	9,0	20	16	0,25	120
PA6/6_120I	PA 6/6	FA	14,0	20	16	0,25	120
PA6/6_160I	PA 6/6	FA	14,0	20	16	0,25	160
PA6_300	PA 6	FA	26,0	20	16	0,25	300
PVAc_30	PVAc	DMF/AA (10/1 tūriu)	37,5	24	20	0,5	30
PVAc_40	PVAc	DMF/AA (10/1 tūriu)	37,5	24	20	0,5	40
PVAc_60	PVAc	DMF/AA (10/1 tūriu)	37,5	24	20	0,5	60
PVAc_80	PVAc	DMF/AA (10/1 tūriu)	37,5	24	20	0,5	80
PAN_40_6	PAN	DMF	6,0	19	20	0,8	40
PAN_40_8	PAN	DMF	8,0	19	20	0,8	40
PAN_60	PAN	DMF	8,0	19	20	0,8	60
PAN_80	PAN	DMF	8,0	19	20	0,8	80
AC_40	AC	Acetonas/DCM/DMF (2/1/1 tūriu)	11,0	18	16	3	40
AC_70	AC	Acetonas/DCM/DMF (2/1/1 tūriu)	11,0	18	16	3	70

\*TTCD – elektrinio verpimo atstumas; \*\*FR – tirpalo išpurškimo greitis elektriniame verpime

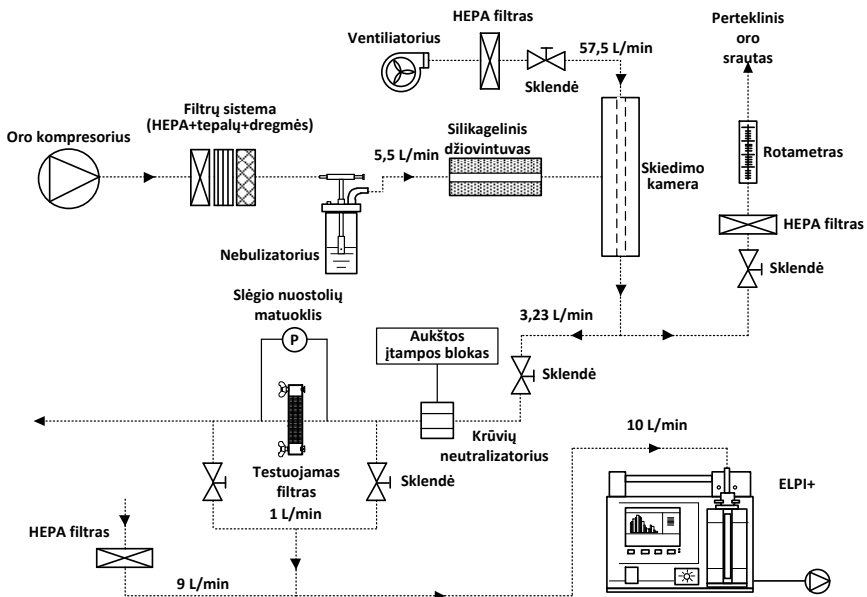
### 2.3. Elektrinio verpimo būdu suformuotų pluoštų charakterizavimas

Suformuotų nanopluoštų morfologija ir ją atitinkantys pluoštų skersmenys buvo analizuojami skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM). Naudoti du skirtingi SEM įrenginiai: „Hitachi S-4800“ (Japonija) ir „Quanta 200“ FEG (JAV).

Suformuotų nanopluoštų filtrų kvadratinio metro masė ( $\text{g/m}^2$ ) buvo kontroliuojama elektrinio verpimo proceso trukme ir nustatoma analitinėmis svarstyklėmis. Nanopluoštų filtrų storis buvo matuojamas filtrų centre skaitmeniniu mikrometru. Nanopluoštų supakavimo tankis buvo apskaičiuotas pagal formulę (3), pateiktą disertacijos mokslinės literatūros apžvalgoje. Nanopluoštų skersmenys buvo nustatyti iš SEM nuotraukų naudojant ImageJ (Wayne Rasband, JAV) kompiuterinę programą.

### 2.4. Iš skirtingų polimerų suformuotų nanopluoštų filtravimo rodiklių nustatymas

Filtravimo rodiklių eksperimentinis standas (žr. 2.4. pav.) buvo sukonstruotas ir naudojamas filtravimo efektyvumui ir slėgio nuostoliams nustatyti.



2.4. pav. Eksperimentinis stendas filtravimo efektyvumui ir slėgio nuostoliams nustatyti

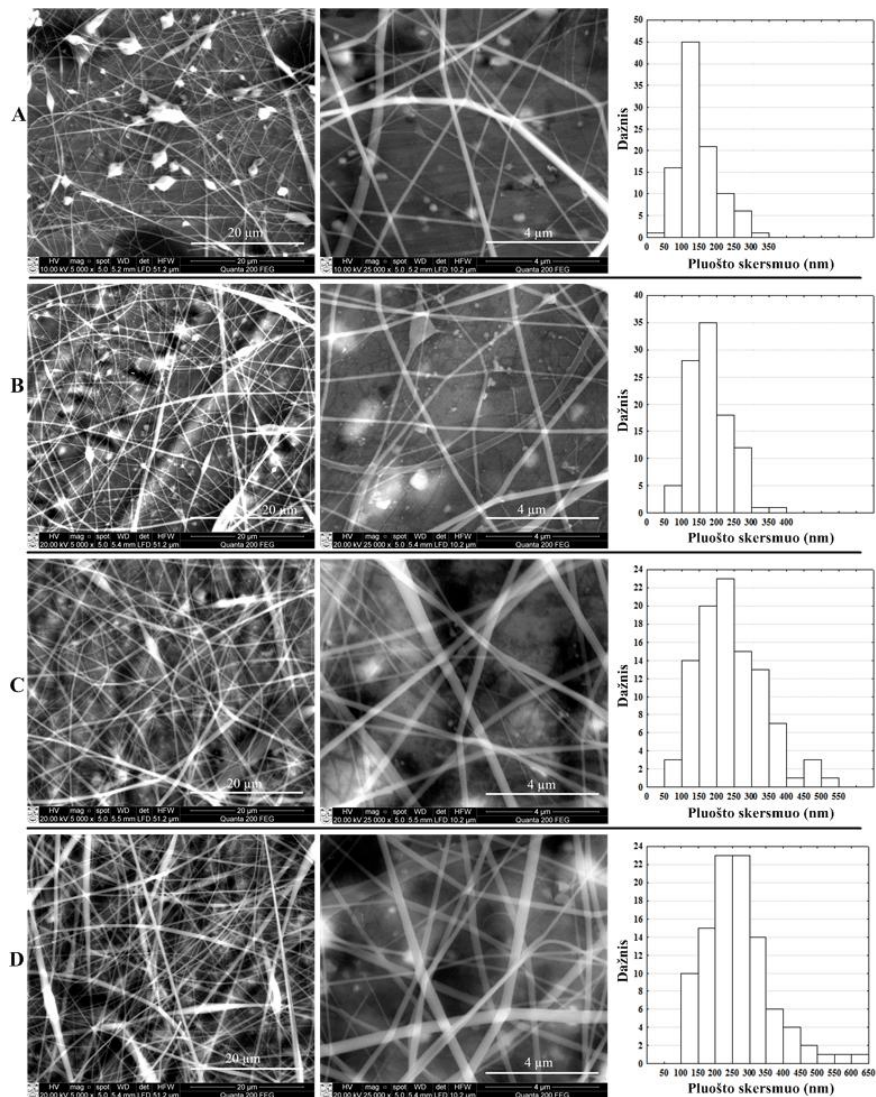
Filtravimo rodiklių nustatymo procesas prasideda testavimo dalelių (NaCl ar PSL) generavimu nebulizatoriuje, į kurį oro kompresoriumi yra paduodamas 2 bar slėgio oras. Aerosolio dalelės, prieš nukreipiant į filtrą, pereina kompleksą papildomų įrenginių. Pradžioje jos perleidžiamos per difuzinį džiovintuvą, pripildytą silikagelio, iš ten patenka į skiedimo kamerą, kurioje yra papildomai atskiedžiamos švriu oru. Vėliau dalis oro srauto su dalelėmis, perėjusiomis elektrostatinėms krūvių neutralizatorių, juda į filtro testavimo kamerą, kurioje yra įmontuotas nanopluoštų filtras ( $\phi=36$  mm). Filtravimo greitis yra fiksuotas – 5,3 cm/s. Aerosolio dalelių koncentracija prieš joms patenkant ir po patekimo į filtrą matuojama elektriniu žemaslėgiu impaktoriumi ELPI+ (Suomija). Slėgio nuostoliai prieš oro srautui patenkant ir po jo patekimo į filtrą matuojami slėgio davikliu P300-5-in-D (JAV). Siekiant įvertinti nanopluoštų filtrų kokybę pagal 14 formulę, pateiktą disertacijos mokslinės literatūros apžvalgoje, buvo apskaičiuotas kokybės veiksnys ( $QF$ ).

### 3. EKSPERIMENTO REZULTATAI

#### 3.1. Acetilceliuliozės nanopluoštų formavimo elektrinio verpimo būdu parengimo sąlygų optimizavimas

Nanopluoštų formavimas iš biologiškai skaidžių polimerų ir tokių nanopluoštų panaudojimas yra reikšmingas filtruojant. Vienas iš biologiškai

skaidžių polimerų – AC, pasižymintis kartu ir neblogu terminiu stabilumu, yra plačiai taikomas ir kitose žmogaus veiklos srityse.



**3.1. pav.** AC nanopluoštų SEM nuotraukos ir pluošto skersmens pasiskirstymo histogramos, kai AC koncentracija (masė/tūriui): A – 9 %, B – 10 %, C – 11 %, D – 12 %

Tačiau AC pluoštų formavimas elektrinio verpimo būdu yra ribojamas: silpnu AC tirpumu tradiciniuose vienanariuose tirpikliuose; nevientisos struktūros pluošto formavimu naudojant kai kuriuos dvinarius tirpiklius ir adatos užsikimšimu elektrinio verpimo metu naudojant lakius tirpiklius. Dėl šios priežasties buvo parengtas naujas trinaris tirpiklių mišinys (pašalinant adatos užsikimšimo tikimybę) elektrinio verpimo būdu formuojamiems AC pluoštams gauti nenutrūkstamai. Verpiant AC iš acetono / DCM / DMF 1/1/1 (tūriu) tirpiklių mišinio buvo gautos „rutulingos struktūros“ pluoštų gijos su lašais ir sulipusiais pluoštais. Tokia filtrų struktūra paaiškinama tuo, kad 1/3 trinario tirpiklio tūrio sudaro DMF tirpiklis, pasižymintis aukšta virimo temperatūra (154 °C). Formuojant nanopluoštus iš tirpiklių, pasižyminčių aukšta virimo temperatūra, iš adatos išlėkusi įkrauta polimero čiurkšlė prieš patekdama ant kolektoriaus neturi pakankamai laiko, kad tirpiklis visiškai išdžiūtų. Todėl gaunami pluoštai pasižymėjo susiliejimu ir sulipimu. Vientisa nanopluoštų struktūra buvo gauta sumažinus DMF kiekį trinaryje mišinyje ir padidinus acetono kiekį, t. y. verpiant iš acetono / DCM / DMF 2/1/1 (tūriu). Formuojant AC nanopluoštus iš 9 ir 10 % (masė / tūriui) koncentracijos tirpalų, buvo gauti „rutulingos struktūros“ pluoštai (žr. 3.1. pav. a ir b). Vientisi AC pluoštai, kurių vidutinis skersmuo – 241±92 nm ir 264±97 nm, buvo išverpti iš 11 ir 12% koncentracijų tirpalų (žr. 3.1. pav. c ir d). Šiuo tyrimu patvirtinta tendencija, nusakanti, kad didėjanti polimerinio tirpalo koncentracija (9 iki 12 %) daro tiesioginę įtaką išverptų nanopluoštų vidutiniam skersmeniui (nuo 152 iki 264 nm) ir morfologijai (nuo „rutulingos struktūros“ pluoštų iki vientisų pluoštų).

### **3.2. Polimerinio tirpalo sudėties ir elektrinio verpimo parametrų įtaka poliamidų nanopluoštų filtrų rodikliams**

Elektriniu verpimu suformuotų PA nanopluoštų panaudojimas įvairiose srityse yra plačiai išanalizuotas (Yan et al., 2015; Schoenmaker et al., 2012; Pang et al., 2014; Pant et al., 2013; Panthi et al., 2013). Nepaisant to, mokslinėje literatūroje stokojama tyrimų, susijusių su PA pritaikymo galimybėmis filtruojant (Hung ir Leung, 2011; Shahrabi et al., 2014; Zhang et al., 2009). Dėl šios priežasties buvo atliktas išsamus tyrimas, apimantis eksperimento planavimą ir išverptų PA nanopluoštų filtrų rodiklių charakterizavimą. Tyrimas yra paremtas parametrų analizavimo modeliu, kurio tikslas – nustatyti ryšius tarp polimerinio tirpalo sudėties, elektrinio verpimo sąlygų ir filtrų rodiklių jau suformuotuose nanopluoštuose.

#### **3.2.1. Poliamidų nanopluoštų filtrų rodikliai**

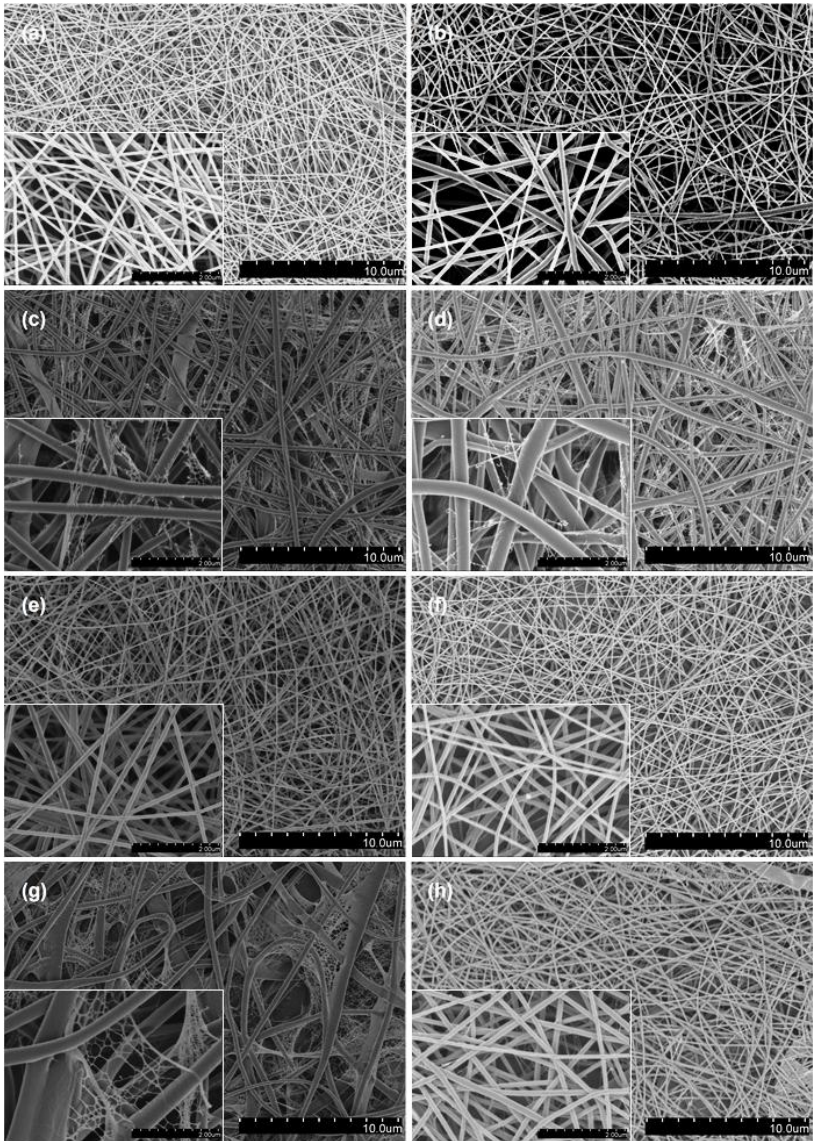
Išverpus visus nanopluoštų bandinius (po 17 bandinių PA 6 ir PA 6/6), buvo nustatyti nanopluoštų filtrų rodikliai, kurie kartu su polimerinio tirpalo ir elektrinio verpimo sąlygomis yra pateikiami 3.2.1. lentelėje. Gautais rezultatais atskleidžiama, kad PA 6/6 turi platesnį išverptų nanopluoštų skersmenų

intervalą: nuo 60 iki 376 nm, o PA 6 – 99–236 nm. Abiejų PA nanopluoštų kvadratinio metro masės ir storis ilgėjant verpimo laikui didėja panašiu mastu. O supakuotas tankis ir kvadratinio metro masė daugelyje bandinių didėja, tačiau didėjimo greitis lėtėja, kvadratinio metro masei pasiekus 0,6 g/m<sup>2</sup> reikšmę.

**3.2.1. lentelė.** Polimerinio tirpalo sudėties ir elektrinio verpimo parametrų įtaka suformuotų PA nanopluoštų filtrų (medžiagų) rodikliams

Eksp. nr.*	Polimerinio tirpalo sudėtis		Verpimo parametrai			Morfologija**	Suformuotų nanopluoštų filtrų rodikliai			
	Koncentracija, %	Tirpiklių sudėtis	Įtampa, kV	TTCD, cm	Verpimo trukmė, min		Pluošto skersmuo, nm	Kv. metro masė, g/m <sup>2</sup>	Storis, μm	Supakuotas tankis
1	8	FA	20	6	20	UF	68	1,01	15	0,059
2	8	FA	12	6	5	UF	67	0,25	8	0,027
3	8	FA	20	12	5	UF	60	0,12	6	0,018
4	8	FA	12	12	20	UF	66	0,29	8	0,032
5	8	FA	20	12	20	UF	62	0,36	9	0,035
6	11	FA	20	6	5	UF+FSN	132	0,34	8	0,037
7	11	FA	20	12	20	UF+FSN	137	0,38	9	0,037
8	11	FA	12	6	5	UF+FSN	184	0,27	8	0,030
9	11	FA	12	12	20	UF+FSN	160	0,32	8	0,035
10	14	FA	20	6	5	F+FSN	347	0,42	10	0,037
11	14	FA	12	12	5	F	376	0,16	6	0,023
12	14	FA	12	6	20	F+SN	349	0,94	15	0,055
13	14	FA	20	12	20	F+SN	351	0,62	10	0,055
14	8	FA/AA3:2	20	12	20	UF	95	0,63	10	0,054
15	11	FA/AA3:2	12	6	20	UF	197	1,84	16	0,101
16	8	FA/DCM3:2	20	12	20	F+ST+SN	511	0,62	10	0,054
17	11	FA/DCM3:2	12	6	20	F+ST+SN	-	1,29	11	0,103
18	20	FA	20	7	20	UF	135	0,89	14	0,059
19	20	FA	12	7	5	UF	99	0,27	7	0,036
20	20	FA	20	14	5	F	103	0,11	5	0,020
21	20	FA	12	14	20	UF	101	0,23	9	0,024
22	20	FA	20	14	20	UF	106	0,38	11	0,032
23	24	FA	20	7	5	UF+FSN	200	0,32	10	0,030
24	24	FA	20	14	20	UF+FSN	184	0,43	11	0,036
25	24	FA	12	7	5	UF	144	0,38	10	0,035
26	24	FA	12	14	20	UF+FSN	169	0,32	9,5	0,031
27	28	FA	20	7	5	UF+FSN	236	0,47	11	0,039
28	28	FA	12	14	5	F	223	0,21	6	0,032
29	28	FA	12	7	20	F+SN	215	1,07	14	0,070
30	28	FA	20	14	20	UF+SN	228	0,48	11	0,403
31	20	FA/AA3:2	20	14	20	UF	90	0,31	10	0,029
32	24	FA/AA3:2	12	7	20	UF+FSN	144	0,58	10	0,054
33	20	FA/DCM3:1	20	14	20	UF+FSN	94	0,34	9	0,035
34	24	FA/DCM3:1	12	7	20	F+SN	192	1,02	14	0,067

\*Eksperimento numeris 1-17 – eksperimentai su PA 6/6 tirpalais; 18-34 – eksperimentai su PA 6. \*\* F – pluoštai; UF – vientisi pluoštai; ST – sulipę pluoštai; SN – voratinklinė struktūra; FSN – dalinė voratinklinė struktūra



**3.2.1. pav.** PA nanopluoštų nuotraukos (pateikiamos koncentracijos % masė/tūriui): (a) PA 6/6 8 % FA, (b) PA6 20 % FA, (c) PA 6/6 14 % FA, (d) PA 6 28 % FA, (e) PA 6/6 8 % FA/AA 3:2 (tūriui), (f) PA 6 20 % FA/AA 3:2 (tūriui), (g) PA 6/6 8 % FA/DCM 3:2 (tūriui), (h) PA 6 20 % FA/DCM 3:1 v/v (tūriui)

Reprezentatyvios suformuotų nanopluoštų nuotraukos yra pateikiamos 3.2.1. paveiksle. Ypač vientisi PA nanopluoštai buvo suformuoti iš FA ir AA tirpiklių mišinio (3.2.1. pav. e ir f). Kai kurie iš šių PA nanopluoštų pasižymi „voratinklio struktūra“, turinčia daug mažesnių pluoštelių tarp pagrindinių pluoštų (3.2.1. pav. c, d ir h). Šių pluoštelių skersmuo varijuoja nuo 7 iki 28 nm. Voratinklio struktūros buvo gautos bandiniuose, išverptuose iš didelės koncentracijos tirpalų, tokių kaip PA 6 iš 28 %, PA 6/6 iš 14 %, taip pat esant ilgesnei verpimo trukmei, t. y. 20 min.; PA 6/6 atveju – naudojant lakesnį tirpiklių mišinį (3.2.1. lentelė). „Voratinklio struktūros“ dėl jų tankaus sluoksnio gali padidinti filtravimo efektyvumą.

### **3.2.2. Nanopluoštų filtrų rodiklių ir jiems įtaką darančių parametru analizė**

Nanopluoštų filtrų rodikliams ir joms įtaką darantiems polimerinio tirpalo sudėties ir elektrinio verpimo parametrams išanalizuoti buvo taikomas mažiausių kvadratų metodas – siekiant nustatyti priklausomybės tarp šių dviejų grupių stiprumą. Sudaryti priklausomybių modeliai pasižymėjo tikslumu – R2 reikšmės >0,9, Q2 reikšmės svyravo nuo 0,62 iki 0,71 visoms charakteristikoms.

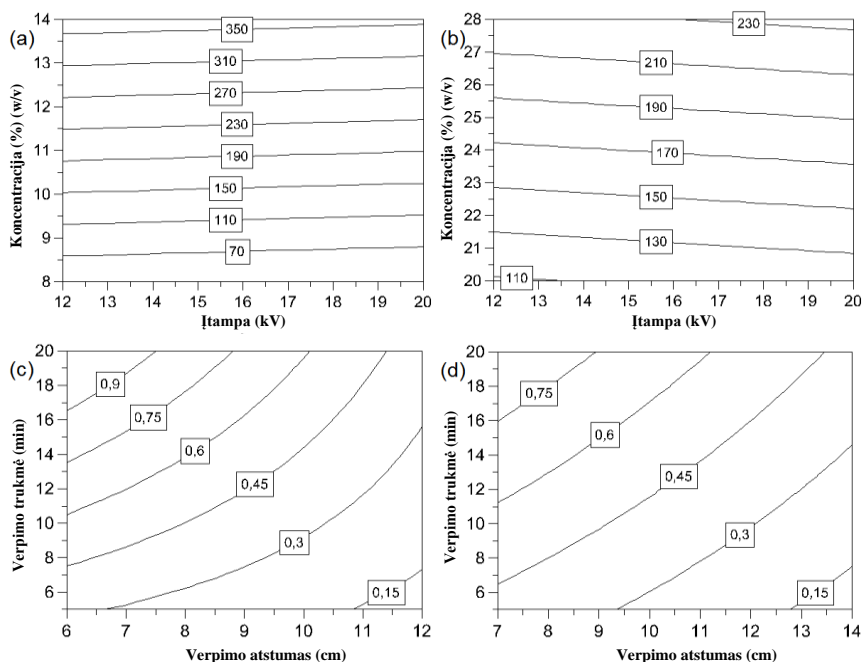
Analize patikrinti Beachley ir Wen, 2009; Guerrini et al., 2009; Pant et al., 2012 atliktų tyrimų rezultatai, patvirtinantys, kad polimerinio tirpalo koncentracija turi didžiausią įtaką pluošto skersmeniui (3.2.2. pav. a ir d). PA 6/6 nanopluoštų atveju didesnis DCM kiekis tirpiklių mišinyje turėjo didelę įtaką pluošto skersmeniui. Kadangi FA/DCM 3/2 v/v tirpiklis pasižymėjo lakumu, todėl verpiant iš šio tirpiklio adata dažnai užsikimšdavo. Siekiant išvengti adatos užsikimšimo buvo padidintas polimerinio tirpalo išpurškimo greitis, nulėmęs didesnio skersmens pluoštų formavimą.

TTCD daro šiek tiek didesnę poveikį suformuotų PA 6/6 nanopluoštų kvadratinio metro masei ir storiui (3.2.2. pav. b ir c), palyginti su PA 6 nanopluoštais (-0,27 g/m<sup>2</sup> ir -2,26 μm). Tai reiškia, kad didėjantis verpimo atstumas leidžia suformuoti didesnio paviršiaus ploto, bet mažesnės masės ir storio nanopluoštų verpinį. Verpimo trukmė daro įtaką nanopluošto gijų storiui. Nustatyta, kad verpimo trukmė PA 6 storiui daro šiek tiek didesnę įtaką nei PA 6/6 (atitinkamai 2,17 μm ir 2,07 μm).





Kiti parametrai (verpimo atstumai PA 6/6 – 9 cm ir PA 6 – 10,5 cm, tirpiklis FA ir verpimo trukmė 12,5 min.) turėtų būti laikomi nekintami.



**3.2.3. pav.** Pluošto skersmens ir kvadratinio metro masės modeliavimo grafikai: (a) – PA 6/6 pluošto skersmeniui, (b) – PA 6 pluošto skersmeniui, (c) – PA 6/6 kvadratinio metro masei, (d) – PA 6 kvadratinio metro masei

Pažymėtina, kad, keičiant verpimo atstumą ir trukmę pagal nustatytas ribas (žr. 3.2.3. pav. c PA 6/6 ir 3.2.3. pav. d PA 6), galima suformuoti pageidaujamos kvadratinio metro masės nanopluoštus, išlaikant kitus parametrus (įtampa 16 kV, tirpalo koncentracija PA 6/6 – 11 % ir PA 6 – 24 %, tirpiklis FA) nekintamus.

### 3.3. Palyginamasis aerozolio dalelių filtravimas nanopluoštų filtrais, pagamintais iš skirtingų polimerų

Atlikus mokslinės literatūros analizę ir remiantis empirinių tyrimų rezultatais, pateiktais 3.1. ir 3.2. poskyriuose, palyginamajam aerozolių filtravimo tyrimui atlikti buvo pasirinkti PA 6/6, PA 6, AC ir PAN polimerai. PVAc polimeras, pasižymintis lipnumu ir nedideliu hidrofiliškumu (Park et al., 2008), buvo įtrauktas kaip papildomas. Mokslinės literatūros analizė atskleidė, kad filtrų tinkamumo gamybai požiūriu tikslinga atlikti palyginamąjį elektrinio verpimo metodu suformuotų nanopluoštų, pagamintų iš skirtingų polimerinių medžiagų,

tyrimą. Atlikti eksperimentiniai tyrimai yra pirmieji ir vieninteliai, kuriuose filtruojant buvo naudojami nanopluoštų filtrai, pagaminti iš PVAc ir AC.

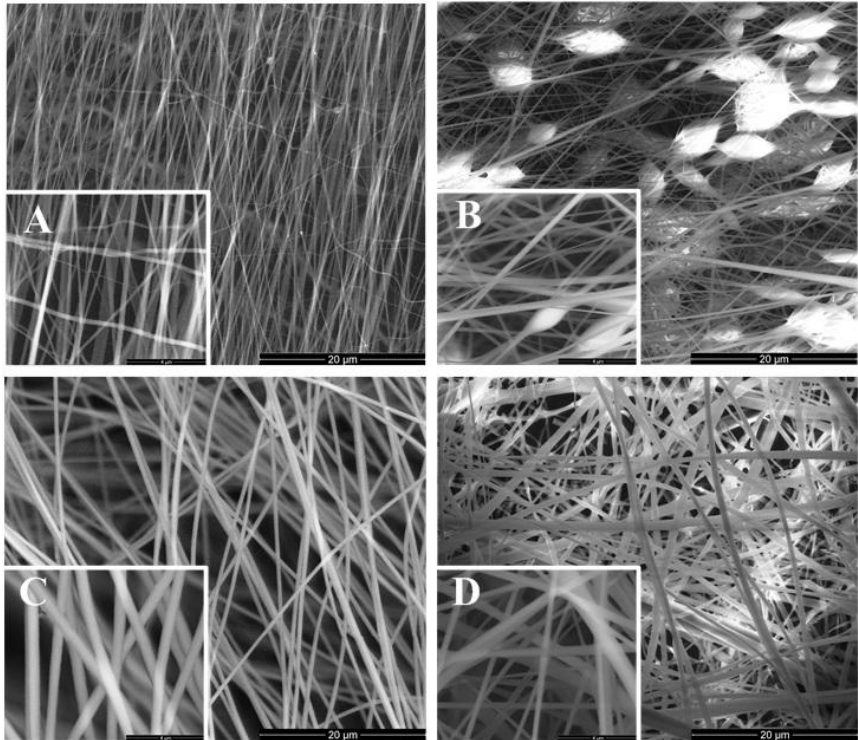
### 3.3.1. Nanopluoštų filtrų rodikliai

Nanopluoštų, pagamintų iš PA 6/6, PVAc, PAN ir AC polimerų, SEM nuotraukos yra pateikiamos 3.3.1. pav., o 3.3.1. lentelėje yra pateikti nanopluoštų filtrų morfologijos, pluoštų skersmens ir kvadratinio metro masės eksperimentiniai rezultatai. Atsižvelgiant į SEM nuotraukas ir standartinių nuokrypių bei pluoštų vidurkių santykį (kitimo koeficientą (KF)), buvo išskirti trys skirtingų morfologijų tipai – pluoštai (KF>0,3), vientisi pluoštai (KF<0,3) ir rutulingi nanopluoštai.

Visi PVAc ir PAN\_40\_6 nanopluoštų filtrai pasižymėjo rutulingu nanopluoštų morfologija (žr. 3.3.1. pav. b). Rutulingų pluoštų susiformavimas gali būti paaiškinamas padidėjusiu polimero grandinių molekulinio suvaržymu, kuris yra pakankamai didelis, kad užkirstų kelią visiškam įkrautos čiurkšlės vientisumo nutrūkimui elektrinio verpimo metu, tačiau kartu nėra pajėgus nuslopinti atsiradusį kapiliarinį nestabilumą (Somvipart et al., 2013). Rutulingi nanopluoštai susiformuoja verpiant iš mažesnės koncentracijos tirpalų, taikant aukštesnę įtampą ir trumpesnę verpimo atstumą. Esant didesnėms polimero koncentracijoms, yra formuojami vientisi pluoštai dėl polimerų grandinių suvaržymo, viskoelastinės jėgos dominavimo, slopinančio kapiliaro nestabilumą elektrinio verpimo metu (Cui et al., 2007). Šiuo atveju susiformavusių rutuliukų dydis svyravo nuo 1 iki 5 μm, o didžiausiu vidutinio dydžio (3,28 μm) rutuliukų skaičiumi pasižymėjo PVAc\_60 filtras.

#### 3.3.1. lentelė. Išverptų nanopluoštų filtrų rodikliai

Filtras	Morfologija	Pluošto skersmuo, nm	Kitimo koeficientas	Kvadratinio metro masė, g/m <sup>2</sup>
PA6/6_120s	Vientisi pluoštai	149±34	0,23	1,36±0,25
PA6/6_120l	Puoštai	362±131	0,36	1,55±0,27
PA6/6_160l	Puoštai	373±119	0,32	2,07±0,30
PA6_300	Puoštai	326±100	0,31	4,56±0,28
PVAc_30	Rutulingi pluoštai	331±94	0,28	6,45±0,31
PVAc_40	Rutulingi pluoštai	298±101	0,34	8,09±0,90
PVAc_60	Rutulingi pluoštai	235±65	0,28	11,34±0,40
PVAc_80	Rutulingi pluoštai	399±109	0,27	12,03±0,76
PAN_40_6	Rutulingi pluoštai	292±101	0,35	3,36±0,41
PAN_40_8	Vientisi pluoštai	512±35	0,07	3,88±0,32
PAN_60	Vientisi pluoštai	437±60	0,14	4,37±0,23
PAN_80	Vientisi pluoštai	535±55	0,10	5,26±0,31
AC_40	Pluoštai	350±129	0,37	8,89±0,52
AC_70	Pluoštai	363±131	0,36	23,67±1,04



**3.3.1. pav.** Elektrinio verpimo metodu suformuotų nanopluoštų filtrų nuotraukos: (a) vientisi nanopluoštai (PA6/6\_120s), (b) rutulingi nanopluoštai (PVAc\_60), (c) vientisi nanopluoštai (PAN\_80), (d) nanopluoštai (nevientisi) (AC\_70)

Mažiausiu pluošto skersmeniu (149 nm) su vientisų pluoštų struktūra pasižymėjo PA6/6\_120s nanopluošto filtras. Vientisiais pluoštais taip pat pasižymėjo PAN\_40\_8, PAN\_60 ir PAN\_80 nanopluoštų filtrai, kurių skersmuo vidutiniškai svyravo nuo 437 iki 535 nm. Nanopluoštų kvadratinio metro masė yra laikoma elektrinio verpimo trukmės funkcija, todėl ilgesnė elektrinio verpimo trukmė nulėmė didesnę kvadratinio metro masę. Didžiausia kvadratinio metro masė (23,67 g/m<sup>2</sup>) pasižymėjo AC\_70 filtras dėl jį veikusių verpimo sąlygų – ilgesnio verpimo laiko (70 min.) ir didžiausio išpurškimo greičio (3 ml/h).

### 3.3.2. Polistireno latekso dalelių filtravimas nanopluoštų filtrais

100 ir 300 nm polistireno latekso (PSL) dalelių filtravimo tyrimų rodikliai yra pateikiami 3.3.2. lentelėje. Filtruojant buvo naudojami tiek vieno sluoksnio nanopluoštų filtrai, tiek iš dviejų bei trijų nanopluoštų sluoksnių sudaryti filtrai.

Didžiausias filtravimo efektyvumas buvo pasiektas PVAc ir PAN nanopluoštų filtrais (3.3.2. lentelė). Didžiausias filtravimo efektyvumas 100 nm dalelėms pasiektas PVAc\_80 (99,57 %), PVAc\_60 (98,79 %) ir PAN\_80 (98,01 %) filtrais.

### 3.3.2. lentelė. Nanopluoštų medžiagų filtravimo rodikliai

Filtrai	Slėgio nuostoliai, Pa	Filtravimo efektyvumas, %		Kokybės veiksnys, Pa <sup>-1</sup>	
		100 nm	300 nm	100 nm	300 nm
PA6/6_120s	50,77±3,67	62,02±3,17	72,30±2,75	0,019	0,025
PA6/6_120sx2	94,13±2,74	82,83±2,31	87,6±2,01	0,019	0,022
PA6/6_120sx3	125,50±3,32	85,36±2,72	90,17±1,89	0,015	0,019
PA6/6_120l	5,10±2,01	24,33±3,34	22,22±3,89	0,055	0,049
PA6/6_120lx2	9,60±2,22	26,43±3,05	24,22±3,54	0,032	0,029
PA6/6_120lx3	14,02±2,39	32,16±2,56	32,02±2,89	0,028	0,028
PA6/6_160l	18,70±1,70	25,79±0,13	26,69±0,05	0,016	0,017
PA6_300	148,00±17,19	84,73±1,94	89,24±1,38	0,013	0,015
PVAc_30	4,93±1,31	21,51±0,53	21,16±2,18	0,049	0,047
PVAc_30x2	8,80±1,98	26,62±1,24	23,61±1,87	0,035	0,031
PVAc_30x3	15,20±2,01	36,29±1,67	31,81±1,48	0,030	0,025
PVAc_40	21,68±4,92	39,73±6,51	43,20±6,57	0,023	0,026
PVAc_60	80,57±16,03	98,79±0,37	96,79±0,49	0,055	0,042
PVAc_80	132,83±15,49	99,57±0,31	97,38±0,16	0,041	0,027
PAN_40_6	21,37±1,25	55,94±2,17	59,92±2,30	0,038	0,043
PAN_40_6x2	42,40±2,10	80,90±1,45	83,36±1,98	0,039	0,042
PAN_40_6x3	60,00±2,45	86,61±1,23	88,27±1,55	0,034	0,036
PAN_40_8	33,77±8,39	77,64±6,27	79,49±6,75	0,044	0,047
PAN_40_8x2	64,01±4,21	94,29±2,52	91,89±3,01	0,045	0,039
PAN_40_8x3	99,80±2,10	95,91±1,20	96,02±1,34	0,032	0,032
PAN_60	64,60±1,54	94,24±0,90	91,96±0,94	0,044	0,039
PAN_80	90,37±2,57	98,01±0,47	95,83±0,35	0,043	0,035
AC_40	6,57±0,25	24,47±1,77	24,18±2,61	0,043	0,042
AC_40x2	13,60±2,43	44,30±1,57	30,74±1,76	0,043	0,027
AC_40x3	20,20±2,78	55,51±1,42	50,79±1,36	0,040	0,035
AC_70	49,03±1,21	62,91±0,59	60,22±2,16	0,020	0,019
AC_70x2	105,99±2,49	85,83±1,24	84,40±1,80	0,018	0,018
AC_70x3	139,90±3,81	88,64±1,00	88,59±0,92	0,016	0,016

Be didžiausio filtravimo efektyvumo, buvo matomas ir slėgio nuostolių augimas visuose nanopluoštų filtruose. Priešingai nei PVAc ir PAN filtrai, filtrai, pagaminti iš PA 6, PA 6/6 ir AC polimerų, nepasiekė didesnio nei 91 % filtravimo efektyvumo, slėgio nuostoliams perkopus 100 Pa, nepaisant to, kad PA nanopluoštų filtrai buvo formuojami ilgiausiai, o AC nanopluoštai išverpti taikant didžiausią išpurškimo greitį (lėmusį didžiausią kvadratinio metro masę). Tokius filtravimo efektyvumo skirtumus nulėmė skirtinga filtrų morfologija.

Nanopluoštų filtrai, pagaminti iš PVAc, pasižymėjo „rutulinga“ gijų struktūra. Rutulingos struktūros pluoštai geba efektyviau atskirti nanopluoštų sluoksnius, palyginti su kitais morfologijų tipais (Yun et al., 2010). Dėl šios priežasties padidėję atstumai tarp nanopluoštų nulėmė efektyvesnį oro pralaidumą ir geresnius filtravimo rodiklius. O geri PAN nanopluoštų filtravimo rodikliai gali būti paaiškinami poringomis (Yu et al., 2010; Nataraj et al., 2012) ir labai vientisomis gijomis, kurių skersmuo yra pasiskirstęs siauru intervalu (žr. 3.3.1. pav. c ir 3.3.2. lentelę).

### **3.3.3. Vienasluoksnių ir kelių sluoksnių nanopluoštų filtrų kokybės veiksniai**

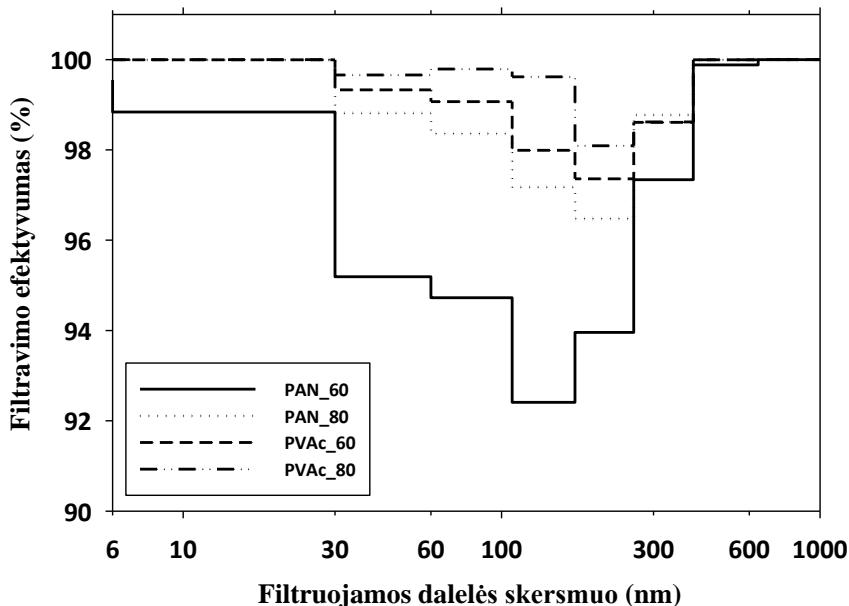
Nanopluoštų kokybės veiksniai ( $QF$ ) buvo apskaičiuoti iš eksperimentinių filtravimo efektyvumo ir slėgio nuostolių rodiklių (3.3.2. lentelė).

Vienasluoksnių ir kelių sluoksnių nanopluoštų filtrų palyginimas atskleidė, kad tik nedaugelis kelių sluoksnių nanopluoštų filtrų padidina  $QF$  vertes, palyginti su vienasluoksniomis struktūromis. Tik nedaugeliu PAN ir AC nanopluoštų buvo pagerintos  $QF$  reikšmės suformuotose kelių sluoksnių filtruose: dviejų sluoksnių PAN\_40\_6x2 filtru filtruojant 100 nm daleles pasiekta  $QF=0,039 \text{ Pa}^{-1}$ , o vienasluoksniu PAN\_40\_6 pasiekta  $QF=0,038 \text{ Pa}^{-1}$ ; dviejų sluoksnių PAN\_40\_8x2 filtru, palyginti su vienasluoksniu PAN\_40\_8 (filtruojant 100 nm daleles), pasiekta atitinkamai  $QF=0,045$  ir  $0,044 \text{ Pa}^{-1}$ ; AC\_40x2 filtru, palyginti su AC\_40 (filtruojant 100 nm daleles), pasiekta atitinkamai  $QF=0,0430$  ir  $0,0427 \text{ Pa}^{-1}$ ; o AC\_40x3 filtru, palyginti su AC\_40x2 (filtruojant 300 nm daleles), pasiekta atitinkamai  $QF=0,035$  ir  $0,027 \text{ Pa}^{-1}$ . Gauti rezultatai atskleidžia, kad kelių sluoksnių nanopluoštų, suformuotų iš mažesnės kvadratinio metro masės filtrų,  $QF$  reikšmės gali šiek tiek padidėti arba netgi sumažėti, palyginti su pradiniu vienasluoksniu filtru. Tai patvirtina Leung et al. (2010) gautus tyrimų rezultatus, atskleidžiančius, kad nanopluoštų multisluoksniavimas yra reikšmingas tuo atveju, kai nanopluoštų filtrai sluoksniuojami iš nanopluoštų, pasižyminčių didesne kvadratinio metro mase. Zhang et al. (2010) tyrimų rezultatai prieštarauja anksčiau aptartiems Leung et al. (2010) tyrimų rezultatams. Zhang et al. (2010) įrodė, kad mažesnės kvadratinio metro masės nanopluoštų multisluoksniavimas yra reikšmingas tuo atveju, kai nanopluoštų filtrai yra sluoksniuojami iš nanopluoštų, pasižyminčių mažesne mase. Šio mokslininko tyrimuose naudota elektrinio verpimo įranga neturėjo besisukančio kolektoriaus, sudarančio sąlygas didesniam formuojamų nanopluoštų struktūros vientisumui.

### **3.3.4. Palyginamasis polistireno latekso ir natrio chlorido dalelių filtravimas nanopluoštų filtrais**

Atsižvelgiant į filtravimo rodiklių rezultatus su monodispersinėmis PSL dalelėmis, siekiant detaliau nustatyti NaCl dalelių, kurių skersmuo kito 6–1000

nm, filtravimo efektyvumą, buvo pasirinkti PAN\_60, PAN\_80, PVAc\_60 ir PVAc\_80 nanopluoštų filtrai. Filtravimo efektyvumo rezultatai pateikiami 3.3.4. pav., kuriame matyti, kad PVAc\_80 nanopluoštų filtras pasižymėjo didžiausiu efektyvumu (98,09–99,99 %) filtruojant 30–300 nm daleles, o PAN\_80 pasižymėjo didžiausiu efektyvumu (98,50–99,99 %) filtruojant 300–600 nm daleles. Filtruojant didesnes nei 600 nm daleles, visi nanopluoštų filtrai pasižymėjo ~100 % filtravimo efektyvumu.



**3.3.4. pav.** Filtravimo efektyvumo priklausomybė (%) nuo filtruojamų NaCl dalelių dydžio (nm), kai filtravimo greitis 5,3 cm/s

Pažymėtina, kad, filtruojant NaCl polidispersines daleles, nanopluoštų filtrai pasižymėjo šiek tiek didesniu filtravimo efektyvumu, palyginti su PSL dalelių filtravimo metu pasiektu filtravimo efektyvumu. Filtravimo efektyvumas filtruojant 100 ir 300 nm NaCl daleles buvo ~0,65 % didesnis nei filtruojant to paties dydžio PSL daleles. Viena iš priežasčių, nulėmusių geresnį NaCl aerozolio dalelių sulaikymą, yra NaCl dalelių nesferiškumas. PSL dalelės yra taisyklingos sferos formos, ir tik nedidelė dalis NaCl dalelių, suformuojamų nebulizatoriuje, gali būti artima sferinėms ar aglomeratams, nes didžiosios jų dalies morfologija yra kubai (Zelenyuk et al., 2006). Dėl šių priežasčių yra didesnė tikimybė, kad tokio tipo dalelės susidurs su filtro pluoštu ir bus sulaikytos. Kita vertus, nevientisos struktūros NaCl dalelės dėl didesnio tankio ( $\text{g/cm}^3$ ) turi didesnę

aerodinami, o ne fizikinį (ar tūrinį) skersmenį, ypač didėjant medžiagos tankiui (De Carlo et al., 2004).

## IŠVADOS

1. Tolygiems acetilceliuliozės nanopluoštams formuoti elektrinio verpimo metodu buvo optimizuotos sąlygos, pagrįstos trinario tirpiklio acetono/*N,N*-dimetilformamido/dichlormetano (2/1/1 tūriu) panaudojimu. Verpiant iš 11 ir 12 % (masė/tūriui) tirpalų gauti tolygios struktūros acetilceliuliozės nanopluoštai, kurių vidutinis skersmuo buvo atitinkamai 241 ir 264 nm.
2. Poliamido 6/6 tirpalų formuojami nanopluoštai turi platesnį pluošto skersmens pasiskirstymo intervalą (60–376 nm) nei poliamido 6 tirpalų (90–236 nm). Minėtų pluoštų skersmens padidėjimui didžiausią įtaką turėjo didesnė polimero tirpalo koncentracija: ribiniai poliamido 6/6 nanopluošto gijų skersmenys buvo gauti keičiant tirpalo koncentraciją nuo 8 iki 14 %, o poliamido 6 ribiniai skersmenys buvo gauti didinant tirpalo koncentraciją nuo 20 iki 28 % masė / tūriui. Elektrinio verpimo trukmė ir elektrinio verpimo atstumas turėjo didesnę poveikį poliamido 6/6 nanopluoštų kvadratinio metro masės pokyčiams: padidinus elektrinio verpimo trukmę 15 min., kvadratinio metro masė vidutiniškai padidėjo  $0,24 \text{ g/m}^2$ , o, padidinus verpimo atstumą 6 cm, kvadratinio metro masė vidutiniškai sumažėjo  $0,27 \text{ g/m}^2$ .
3. Palyginamaisiais poliamido 6 ir 6/6, poliakrilnitrilo, polivinilacetato ir acetilceliuliozės nanopluoštų filtravimo tyrimais atskleista, kad didžiausias filtravimo efektyvumas ir kokybės veiksnys yra pasiekiamas polivinilacetato ir poliakrilnitrilo filtrais. Dėl ypatingos „rutulingų“ nanopluoštų morfologijos polivinilacetato filtrai pasižymėjo didžiausiomis kokybės veiksnio ir filtravimo efektyvumo reikšmėmis:  $0,0548 \text{ Pa}^{-1}$  (98,79 %), filtruojant 100 nm daleles, ir  $0,0423 \text{ Pa}^{-1}$  (96,79 %) – 300 nm daleles.
4. Palyginamaisiais vienasluoksniais ir daugiasluoksniais, sudėliotais iš dviejų ar trijų vienodų vienasluoksnių nanopluoštų filtrų, tyrimais nustatyta, kad tik nedaugeliu poliakrilnitrilo ir acetilceliuliozės daugiasluoksnių filtrų galima pagerinti kokybės veiksnį, palyginti su pradine vienasluoksne forma. Padidėjimo intervalas svyruoja nuo 0,0003 iki  $0,008 \text{ Pa}^{-1}$ .
5. Vienodo dydžio natrio chlorido aerozolio dalelės turi didesnę polinkį užsilaikyti nanopluoštų filtruose, palyginti su polistireno latekso dalelėmis, todėl, filtruojant 100 ir 300 nm natrio chlorido daleles, filtravimo efektyvumas vidutiniškai padidėja ~ 0,65 %, palyginti su tokio paties dydžio polistireno latekso dalelėmis.

## LITERATŪRA

1. ASKARI, M. et al. Fabrication of high performance chitosan/polyvinyl alcohol nanofibrous mat with controlled morphology and optimised diameter. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2014, 92(6), 1008-1015. ISSN 1939-019X.
2. BARHATE, R. S. et al. Porous nano- and microfibrinous polymeric membrane material for catalytic support. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89(6), 621-630. ISSN 0263-8762.
3. BEACHLEY, V. and X. WEN. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diametre and length. *Materials Science and Engineering: C Materials for Biological Applications*, 2009, 29(3), 663-668. ISSN 0928-4931.
4. CHEN, H.-M. and YU, D.-G. An elevated temperature electrospinning process for preparing acyclovir-loaded PAN ultrafine fibers. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(12), 1551-1555. ISSN 0924-0136.
5. CHEN, Y. et al. Measurements of emission factors of PM<sub>2.5</sub>, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China. *Atmospheric Environment*, 2015, 109, 190-196. ISSN 1352-2310.
6. COLVILE, R. N. et al. The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(9), 1537-1565. ISSN 1352-2310.
7. CUI, W. et al. (2007). Investigation on process parameters of electrospinning system through orthogonal experimental design. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 103(5), 3105-3112. ISSN 1097-4628.
8. DeCARLO, P. F. et al. Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 1: Theory. *Aerosol Science and Technology*, 2004, 38, 1185-1205. ISSN 0278-6826.
9. FISK, W. J. et al. Performance and costs of particle air filtration technologies. *Indoor air*, 2002, 12(4), 223-234. ISSN 1600-0668.
10. GUERRINI, L. M. et al. Electrospinning and Characterization of Polyamide 66 Nanofibers With Different Molecular Weights. *Materials Research*, 2009, 12(2), 181-190. ISSN 1516-1439.
11. HINDS, W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Edition. New York, 1999.
12. HOSSEINI, S. A. and H.V. TAFRESHI. Modeling permeability of 3-D nanofiber media in slip flow regime. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(6), 2249-2254. ISSN 0009-2509.
13. HUNG, C.H. and W.W.F. LEUNG. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Separation and Purification Technology*, 2011, 79(1), 34-42. ISSN 1383-5866.



14. YAN, X. Y. et al. Dual-functional OPH-immobilized polyamide nanofibrous membrane for effective organophosphorus toxic agents protection. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, 98, 47-55. ISSN 1369-703X.
15. YU, X. et al. Preparation of porous polyacrylonitrile fibers by electrospinning a ternary system of PAN/DMF/H<sub>2</sub>O. *Materials Letters*, 2010, 64(22), 2407-2409. ISSN 0167-577X.
16. YUN, K. M. et al. Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration. *Separation and Purification Technology*, 2010, 75(3), 340-345.
17. JI, L. and X. ZHANG (2008). Ultrafine polyacrylonitrile/silica composite fibers via electrospinning. *Materials Letters*, 2008, 62(14), 2161-2164. ISSN 0167-577X.
18. KIBBLE, A. and R. HARRISON. Point sources of air pollution. *Occupational Medicine*, 2005, 55, 425-431. ISSN 0962-7480.
19. LEUNG, W.W.F. et al. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Separation and Purification Technology*. 2010, 71(1), 30-37. ISSN 1383-5866.
20. MAZE, B. et al. A simulation of unsteady-state filtration via nanofiber media at reduced operating pressures. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(5), 550-571. ISSN 0021-8502.
21. NATARAJ, S. K. et al. Polyacrylonitrile-based nanofibers—A state-of-the-art review. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(3), 487-513. ISSN 0079-6700.
22. OH, G. Y. et al. Adsorption of toluene on carbon nanofibers prepared by electrospinning. *Science of Total Environmental*, 2008, 393(2-3), 341-347. ISSN 0048-9697.
23. PANG, Z. et al. Fabrication of PA6/TiO<sub>2</sub>/PANI composite nanofibers by electrospinning–electrospraying for ammonia sensor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2014, 461, 113-118. ISSN 0927-7757.
24. PANT, B. et al. Characterization and antibacterial properties of Ag NPs loaded nylon-6 nanocomposite prepared by one-step electrospinning process. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2012, 395, 94-99. ISSN 0927-7757.
25. PANT, H. R. et al. Synthesis, characterization, and mineralization of polyamide-6/calcium lactate composite nanofibers for bone tissue engineering. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 102, 152-175. ISSN 0927-7765.

26. PANTHI, G. et al. Preparation and characterization of nylon-6/gelatin composite nanofibers via electrospinning for biomedical applications. *Fibers and Polymers*, 2013, 14(5), 718-723. ISSN 1229-9197.
27. PARK, J. Y. et al. Optimization of the electrospinning conditions for preparation of nanofibers from polyvinylacetate (PVAc) in ethanol solvent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2008, 14(6), 707-713. ISSN 1226-086X.
28. SAMBAER, W. et al. 3D modeling of filtration process via polyurethane nanofiber based nonwoven filters prepared by electrospinning process. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(4), 613-623. ISSN 0009-2509.
29. SCHOENMAKER, B. et al. Electrospun polyamide 4.6 nanofibrous nonwovens: parameter study and characterization. *Journal of Nanomaterials*, 2012, Article ID 860654, 1-9. ISSN 1687-4110.
30. SHAHRABI, S. et al. Fabrication of electrospun polyamide-66 nanofiber layer for high-performance nanofiltration in clean room applications. *Journal of Industrial Textile*, 2014, DOI: 10.1177/1528083714553688, 1-15. ISSN 1528-0837.
31. SOMVIPART, S., et al. Development of electrospun beaded fibers from Thai silk fibroin and gelatin for controlled release application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 55, 176-184. ISSN 0141-8130.
32. WANG, J., et al. Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate. *Journal of Aerosol Science*. 2008, 39(4), 323-33. ISSN 0021-8502.
33. WANG, Na, et al. Tortuously structured polyvinyl chloride/polyurethane fibrous membranes for high-efficiency fine particulate filtration. *Journal of Colloid Interface Science*, 2013, 398, 240-246. ISSN 0021-9797.
34. World Health Organisation (WHO). *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide*. Global update, 2005.
35. ZELENYUK, A. et al. From Agglomerates of Spheres to Irregularly Shaped Particles: Determination of Dynamic Shape Factors from Measurements of Mobility and Vacuum Aerodynamic Diameters. *Aerosol Science and Technology*, 2006, 40, 197-217. ISSN 0278-6826.
36. ZHANG, Q. et al. Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *Journal of Aerosol Science*, 2010, 41(2), 230-236. ISSN 0021-8502.
37. ZHANG, S. et al. Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency. *Materials & Design*, 2009, 30(9), 3659-3666. ISSN 0261-3069.

## MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

### Straipsniai „Thomson Reuters“ sąrašo leidiniuose:

1. MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., PRASAUSKAS, T., BUIVYDIENE, D., MARTUZEVICIUS, D. The comparative study of aerosol filtration by electrospun polyamide, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile and cellulose acetate nanofiber media. *Journal of Aerosol Science*. Oxford: Pergamon-Elsevier Science. ISSN: 0021-8502. 2016, Vol. 92, pp. 27-37. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [0.200]. [IF (E): 2.236 (2014)]
2. MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., MARTUZEVICIUS, D., KRUGLY, E., TICHONOVAS, M., BALTRUSAITIS, J. Design and Characterization of Electrospun Polyamide Nanofiber Media for Air Filtration Applications. *Journal of Nanomaterials*. New York: Hindawi. ISSN 1687-4110. 2014, vol. 2014, article No. 859656, p. [1-13]. DOI: 10.1155/2014/859656 [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [0.167]. [IF (E): 1.644 (2014)]
3. MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., MARTUZEVICIUS, D. Electrospinning of cellulose acetate fibers from a ternary solvent system. *Chemija*. Vilnius: Lietuvos mokslų akademija. ISSN 0235-7216. 2014, Vol. 25, iss. 2, p. 125-129. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [0.333]. [IF (E): 0.472 (2014)]

### Straipsniai kituose recenzuojamuose Lietuvos ir užsienio leidiniuose:

1. MATULEVICIUS, J., KRUGLY, E., KLIUCININKAS, L. Utilisation of thermoplastic polymer waste for nanofiber air filter production. In Leal Filho, Walter; Úbelis, Arnolds; Berzina, Dina (eds.). *Sustainable Development, Knowledge Society and Smart Future Manufacturing Technologies* Springer, Switzerland. 2015. ISBN 978-3-319-14882-3 p. 283-290.

### Konferencijų pranešimų medžiagos:

1. MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., MARTUZEVICIUS, D., KRUGLY, E. Filtration properties of monodisperse airborne particles by electrospun nanofiber media. In *Aerosol technology 2014: international conference*, 16–18 June 2014 Karlsruhe, Germany / Association for Aerosol Researchers (GAeF). 2014, p. T290A14.
2. MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., MARTUZEVIČIUS, D. The comparative study of nanofiber filters fabricated by needle and needleless electrospinning techniques. In *Chemistry and chemical technology: proceedings of the international conference*, 25 April, 2014 / Kaunas University of Technology. Kaunas: Technologija, 2014. ISSN 2351-5643, p. 34-37.
3. MATULEVIČIUS, Jonas; KLIUCININKAS, Linas; MARTUZEVICIUS, Dainius. Electrospinning of cellulose acetate fibers from ternary solvent system. In *EcoBalt 2013: 18th international scientific*

conference, October 25-27, 2013 Vilnius, Lithuania: book of abstracts. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla. 2013, ISBN 978-609-459-241-6 p. 116.

4. MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., MARTUZEVICIUS, D. Characterization of polyamide nanofiber media for aerosol filtration applications. In *EAC 2013: European Aerosol Conference*, 1-6 September 2013, Prague / Czech Aerosol Society. 2013, p. 1.

5. MATULEVICIUS, J., KRUGLY, E., GRIGONYTE, J. Utilisation of thermoplastic polymer waste for nanofiber air filter production. In *abstracts of 3rd International Conference on Integrative Approaches towards Sustainability „Sustainable development, knowledge society and smart future manufacturing technologies”* (Knowledge), June 27-30, 2012, Jūrmala, Latvia, p. 18-19.

### KITOS MOKSLINĖS PUBLIKACIJOS

#### Straipsniai (ne disertacijos tema) „Thomson Reuters“ sąrašo leidiniuose:

1. PRASAUSKAS, T., MATULEVICIUS, J., KLIUCININKAS, L., KRUGLY, E., VALINCIUS, V., MARTUZEVICIUS, D. Filter Media Properties of Mineral Fibers Produced by Plasma Spray. *Environmental Technology*. Oxon: Taylor & Francis. ISSN 0959-3330. 2016, p. 1-33. DOI: 10.1080/09593330.2015.1114028. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [0.167]. [IF (E): 1.560 (2014)]

2. KLIUCININKAS, L., MATULEVICIUS, J., MARTUZEVICIUS, D. The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolleybuses. *Journal of Environmental Management*. London Elsevier. ISSN 0301-4797. 2012, Vol. 99, p. 98-103. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)] [0.333]. [IF (E): 3.057 (2012)]

### INFORMACIJĄ APIE AUTORIŲ

Vardas Pavardė

Jonas Matulevičius

Gimimo data

1985-06-28, Kaunas (Lietuva)

El. Paštas

jonas.matulevicius@gmail.com

2004–2008 – Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas. Aplinkos inžinerijos bakalauro kvalifikacinis laipsnis.

2008–2010 – Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas. Aplinkos inžinerijos magistro kvalifikacinis laipsnis su pagyrimu.

2011–2015 – Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas. Doktorantūros studijos Chemijos inžinerijos kryptyje.

## SUMMARY

Air pollution is a major environment related health threat to human and a risk factor for both acute and chronic respiratory diseases (World health organization, 2005). The main sources of air pollution still remain automotive exhausts, power generation, industrial air emissions and other human activities like home heating and cooking (Colville et al., 2001; Chen et al., 2015; Kibble and Harrison, 2005). Aerosols affect more people than any other pollutants (World health organization, 2005). Aerosols consist of complex mixtures of solid particles and droplets of liquids of inorganic and organic substances suspended in the air. Due to the better ability to penetrate and lodge deep inside the lungs, fine particles with aerodynamic diameter less than  $2.5\ \mu\text{m}$  are considered to be the most health damaging particles. Air filters and other particle air cleaners are used extensively in various industrial processes to remove particles from the incoming or recirculated air (Fisk et al., 2002). The conventional filters consist of quite high performance filtration medium, including glass fibers, meltblown fibers and spunbonded fibers, and are based on the micro sized fiber diameter. However, the fact that the decreasing fiber diameter leads to a better filtration efficiency makes the submicron filter media (including nano scale) attractive for the filtration applications (Hinds, 1999). The usage of nanofiber media filters becomes a viable area, since the development of electrospinning has been accelerated during the recent years. Electrospinning is a simple and widely used technique to fabricate fibers in a submicron scale (Askari et al., 2014; Barhate et al., 2011; Maze et al., 2007; Oh et al., 2008). Electrospun fibers have unique characteristics such as large surface area to the volume ratio, low basis weight, small pore size and relatively uniform fiber size (Leung et al., 2010). Because the fiber diameter is very small, the increase of pressure drop due to the gas phase "slips" around the fibers is not as large as in the case of an equivalent surface area of micron size fibers (Brown, 1993; Sambaer et al., 2011). The gas slip effect increases the single fiber capture efficiency of impaction, interception and diffusion due to the increased contact of air and small particles with the fiber surface (Hosseini and Tafreshi, 2010; Sambaer et al., 2011).

Numerous experimental studies were carried out to examine the filtration performance of electrospun fibers. The effects of some electrospinning parameters (Zhang et al., 2009) as well as nanofiber filter characteristics (Hung and Leung, 2011; Leung et al., 2010; Sambaer et al., 2011; Wang et al., 2008a) on filtration performance were extensively studied theoretically and experimentally. The influence of fiber media properties to achieve the enhanced filtration quality factor were gained by using multi-ply layer fiber mats (Leung et al., 2010; Wang et al., 2014; Zhang et al., 2010). This shows that the effects of various parameters and media properties on air filtration performance are quite well examined; however, there are no studies that are specifically focused on the comparative assessment of filtration characteristics of the nanofibers produced

from various polymeric materials. Thus, the detailed characterization of polymer solution parameters, electrospinning conditions as well as nanofiber filtration characteristics in the airflow is a relevant task for the experimental research.

### **Aim of the thesis**

To produce nanofibers by using electrospinning and investigate the characteristics as well as to perform the comparative evaluation of filtration properties of nanofiber media in an air stream.

### **Objectives of the thesis**

1. To prepare and optimize the formation of nanofibers in electrospinning.
2. To assess the effects of the polymer concentration as well as electrospinning parameters on the characteristics of nanofiber media.
3. To perform a comparative evaluation of filtration properties of nanofiber media produced from various polymeric materials.
4. To assess and compare filters quality factors of one-ply and multi-ply nanofiber media.
5. To assess and compare filtration efficiency of polystyrene latex and sodium chloride aerosol particles through the nanofiber media.

### **Scientific novelty**

1. The formation of nanofiber media for filtration applications was performed from various polymeric materials (including polyamide 6, polyamide 6/6 and polyacrylonitrile), while, for the first time, the electrospun cellulose acetate and polyvinyl acetate nanofiber media were used for filtration applications.
2. The novel ternary solvent system consisting of acetone/dichloromethane/*N,N*-dimethylformamide at the ratio of 2/1/1 (v/v/v) was developed for the electrospinning of cellulose acetate nanofiber media. The suggested composition of the solvents ensured the continuous formation of cellulose acetate nanofiber media.
3. The unique data covering the comparison of filtration performance of various nanofiber media, the comparison of single-ply to multi-ply nanofiber mats as well as the comparison of the penetration ability of polystyrene latex and sodium chloride aerosol particles through the nanofiber media were obtained.

## **Structure and outline of the dissertation**

The dissertation is divided into the following parts: list of abbreviations, introduction, literature review, experimental part, results and discussion, conclusions, list of 168 references, list of publications on the dissertation topic. The literature survey and results of the research are presented in 83 pages, including 10 tables and 21 figures.

## **Practical value of the work**

1. The findings of the thesis provide new knowledge and data associated with the electrospun nanofiber media characterization and testing of filtration properties in the airflow. For better understanding of the interplay between the nanofiber formation in the electrospinning process and nanofiber filter media characteristics, the operational parameters were defined.
2. The main challenges of nanofiber media filters were identified, and the subsequent recommendations were provided in order to adapt nanofiber filters as closely as possible in practical air filtration processes.
3. The experimental setups for electrospun nanofiber media formation and filtration testing were developed by supporting the improved methodologies of further knowledge-based experimental work.

## **CONCLUSIONS**

1. The regular electrospun cellulose acetate fibers were prepared from a novel ternary acetone/*N,N*-dimethylformamide/dichloromethane solvent system with an optimized ratio of 2/1/1 v/v/v. The electrospinning of the 11 and 12 % (w/v) cellulose acetate solutions have resulted in a uniform morphology of the nanofiber media with the mean fiber diameter of 241-264 nm.
2. The experimental results showed that the polyamide 6/6 had a wider distribution of the fiber diameter (60-376 nm) compared to the polyamide 6 (90-236 nm). The increase of polymer concentration was responsible for the increase of fiber diameter: the marginal diameters of polyamide 6/6 were received for 8 and 14 % w/v of polymer concentration, while for polyamide 6/6, the marginal diameters were obtained for 20 to 28 % w/v polymer concentration solutions. The collection time as well as tip-to-collector distance had more significant effect on the basis weight of the nanofibrous materials from polyamide 6/6; the increase of collection time by 15 min in average raised the basis weight by 0.24 g/m<sup>2</sup>, while the increase of distance by 6 cm decreased the basis weight values on average by -0.27 g/m<sup>2</sup>.

3. The comparative filtration properties of the single-ply polyamide 6, polyamide 6/6, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile and cellulose acetate nanofiber media mats indicated that polyvinyl acetate and polyacrylonitrile media have the highest filtration efficiencies and quality factors. Due to the unique morphology of the beaded nanofibers, the polyvinyl acetate media were characterized by the ultimate values of quality factors and filtration efficiencies:  $0.0548 \text{ Pa}^{-1}$  (98.79 %) for 100 nm particles and  $0.0423 \text{ Pa}^{-1}$  (96.79 %) for 300 nm particles, accordingly.
4. The comparison of single-ply to multi-ply nanofiber mats of the same medium showed that only some polyacrylonitrile and cellulose acetate of the multi-layer media increased their quality factor compared to the single-ply form. The increase interval was between  $0.0003$  and  $0.008 \text{ Pa}^{-1}$ .
5. The comparison of filtration efficiency of polystyrene latex and sodium chloride aerosol particles showed moderate difference. The filtration efficiency of 100 and 300 nm sodium chloride particles was on average  $\sim 0.65$  % higher compared to the same size polystyrene latex particles.

UDK: 66.074.2 + 677.022.3/.5] (043.3)

SL344. 2015-12-14, 2 leidyb. apsk. 1. Tiražas 50 egz. Užsakymas 464.  
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas