

## ORO SRAUTO TIESINIMO KORIŲ ĮTAKA PUČIAMO ORO SRAUTO TOLYGUMUI VĖJO TUNELYJE

**Žygmantas NIEKIS**, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas [zygmantas.niekis@vdu.lt](mailto:zygmantas.niekis@vdu.lt)

**Tadas JOMANTAS**, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas [tadas.jomantas@vdu.lt](mailto:tadas.jomantas@vdu.lt)

**Albinas ANDRIUŠIS**, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas [albinas.andriusis@vdu.lt](mailto:albinas.andriusis@vdu.lt)

**Dainius STEPONAVIČIUS**, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas [dainius.steponavicius@vdu.lt](mailto:dainius.steponavicius@vdu.lt)

### Santrauka

Oro srauto netolygumas vėjo tuneliuose viena iš didžiausių problemų, dėl kurios iškreipiami ir gaunami netikslūs bandymo rezultatai. Siekiant sumažinti oro srauto netolygumą, tikslinga naudoti oro srauto tiesinimo korius. Jie ištiesina oro srautą taip, kad jis būtų lygiagretus tunelio išilginės ašies kryptimi. Taip siekiama sumažinti oro srauto turbulenciją tunelio skerspjūvio plote.

Tyrimai atlikti su laboratoriniu stendu (15 m ilgio, 2 m pločio ir 1 m aukščio vėjo tuneliu) Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Žemės ūkio inžinerijos ir saugos katedros Žemės ūkio mašinų technologinių procesų tyrimo laboratorijoje. Oro srauto greičio matavimai vėjo tunelyje atlikti 4 skirtinguose skerspjūviuose – I, II, III ir IV, nutolusiuose nuo ventiliatorių atitinkamai 5 m, 7 m, 9 m ir 11 m atstumais. Tirta oro srauto tiesinimo korių įtaka oro srauto greičio pasiskirstymo tolygumui tunelio skerspjūvio plote, pučiant oro srautą bei keičiant oro srauto greitį tunelio ilgyje nuo  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  iki  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vėjo tunelio priekinėje bei galinėje dalyse, 1 m ir 14 m atstumu už ventiliatorių, sumontuoti du lengvai išimami oro srauto tiesinimo koriai. Koriai yra šešiakampio profilio vamzdžiai – 33 mm aukščio, 40 mm pločio ir 400 mm ilgio. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad oro srauto tiesinimo koriai, esant oro srauto greičiams nuo  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  iki  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , užtikrina oro srauto didesnį tolygumą tunelio ilgyje. Tuomet oro srauto greičio skaitinės reikšmės 11 m atstumu nuo ventiliatorių, yra apie 10 % didesnės nei tuomet, kai nėra naudojami oro srauto tiesintuvai. Dviem ašiniaus ventiliatoriais vėjo tunelyje didinant pučiamo oro srauto greitį nuo  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  iki  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , turbulencija palaipsniui mažėja. Nustatyta, kad oro srauto tiesinimo koriai 25–30 % sumažina turbulenciją tik esant oro srauto greičiams nuo  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  iki  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Esant  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oro srauto greičiui, turbulencija išlieka reikšmingai nepakitusi.

**Reikšminiai žodžiai:** vėjo tunelis, oro srauto greitis, turbulencija, oro srauto tiesinimo koriai.

### Įvadas

Atliekant įvairių inžinerijos sričių tyrimus ar tam tikrų mazgų bei jų detalių aerodinamikos patikrinimus, dažnai atliekami eksperimentai tuo tikslu pagamintuose vėjo tuneliuose. Jie skirti įvairiems inžineriniams tikslams, pavyzdžiui, įvertinti pastatų reakcijas, vėjo poveikį tiltų konstrukcijai, orlaivių, traukinių ar automobilių modelių, oro srauto aptakumo bandymams (Hamzak et al., 2021). Be to, naudojant vėjo tunelius, kuriuose sudaromos stabilesnės aplinkos sąlygos, atliekami purkštukais išpurškiamų lašelių dreifo tyrimai (Dauzals et al., 2016). Oro srauto greičio tolygumas vėjo tunelyje yra vienas iš svarbiausių kriterijų, lemiančių gautų rezultatų tikslumą (Fadilah et al., 2018). Oro srauto tolygumo dydis vėjo tunelyje įvertinamas apskaičiavus turbulencijos lygį (Nader et al., 2006). Turbulencijos skaitinė reikšmė bet kuriame vėjo tunelio skerspjūvyje turi būti kuo mažesnė. Turbulencija mažėja, kai oro srauto greitis skerspjūvio plote yra vienodesnis (Kulkarni et al., 2011). Siekiant užtikrinti ar bent padidinti oro srauto vienodumą tunelyje, dažniausiai naudojami srauto tiesintuvai, pvz., tinkleliai ar įvairių formų koriai (Barlow et al., 1999). Jie tiesina oro srautą taip, kad jis būtų artimai lygiagretus tunelio išilginei ašiai (Cattafesta et al., 2010).

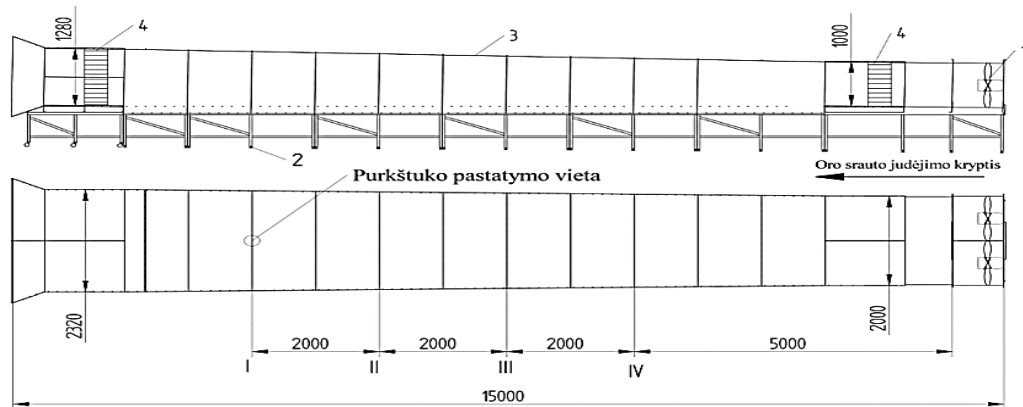
**Tyrimo tikslas** – nustatyti oro srauto tiesinimo korių įtaką pučiamo oro srauto tolygumui vėjo tunelyje.

### Tyrimų objektas ir metodai

Naujo sukonstruoto vėjo tunelio (15 m ilgio, 2 m pločio ir 1 m aukščio) aerodinaminių savybių tyrimai atlikti Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Žemės ūkio inžinerijos ir saugos katedros Žemės ūkio mašinų technologinių procesų tyrimo laboratorijoje (1 pav.).

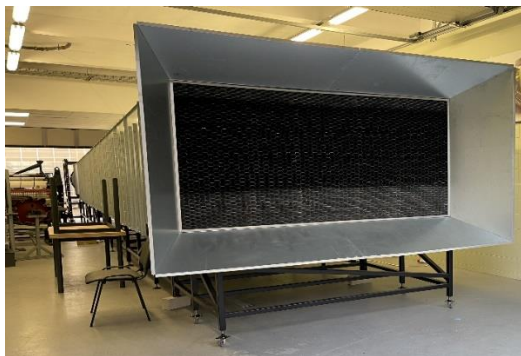
Vėjo tunelio forma yra kūgis, kurio skerspjūvis atitinkamai didėja nuo  $1 \times 2 \text{ m}$  iki  $1,28 \times 2,32 \text{ m}$ , o jo ilgis siekia 15 m (2 pav., a). Stende yra sumontuoti du ašiniai oro pūtimo ventiliatoriai ML 1004 DT, kurių dešimties plastikinių menčių sparnuotės skersmuo – 1000 mm, (Electrovent, Italija) ir elektros varikliai 7SM3 160L4 (galia 15 kW, kai veleno sukimosi dažnis  $1465 \text{ min}^{-1}$ ) (Smem Monza, Italija). Elektros variklių sukimosi dažniui keisti naudojami du įtampos dažnio keitikliai Delta VFD-C2000. Pakeitus ventiliatorių sparnuočių sukimosi dažnius, kinta oro srauto greitis tunelyje (nuo  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  iki  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kas  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Tinklo įtampos dažnis yra 50 Hz. Jį sumažinus iki 9 Hz, oro srauto greitis I ruože

(11 m atstumu nuo ventiliatorių) pasiekia  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Įtampos dažnį padidinus iki 35 Hz, oro srauto greitis siekia  $12 \text{ m s}^{-1}$ . Oro srauto greičiui išmatuoti naudoti kaitinamosios vielutės jutikliai FS5A (2 pav., b). Vėjo tunelio priekinėje ir galinėje dalyje, 1 m ir 14 m atstumu už ventiliatorių, sumontuoti du lengvai išimami oro srauto tiesinimo koriai (3 pav., a). Pirmasis korys, įrengtas 1 m atstumu už ašinių ventiliatorių, suardo jų sukuriamo srauto netolygumus, o antrasis, įrengtas 14 m atstumu nuo ventiliatorių (tunelio pabaigoje), – ištekancio oro srauto netolygumus. Koriai yra šešiakampio profilio vamzdžiai: 33 mm aukščio, 40 mm pločio ir 400 mm ilgio (3 pav., b). Jie pagaminti atsižvelgiant į mokslininkų rekomendacijas, kuriose pagrįsta efektyviausia korių forma, jų matmenys bei išdėstymo vieta tunelyje (Kulkarni et al., 2011).



**1 pav.** Purkštuku išpurkštų lašelių nunešimo pavėjui tyrimo stendas – vėjo tunelis: 1 – ašiniai ventiliatoriai, 2 – konstrukcinis rėmas, 3 – tunelio skardos, 4 – oro srauto tiesinimo koriai, I, II, III, IV – ruožai, kuriuose matuojamas oro srauto greitis

**Fig. 1.** Test stand for the spray drift investigation – wind tunnel: 1 – axial-flow fans, 2 – structural frame, 3 – wind tunnel plates, 4 – air flow straighteners, I, II, III, IV – sections in which the velocity of the air flow is measured



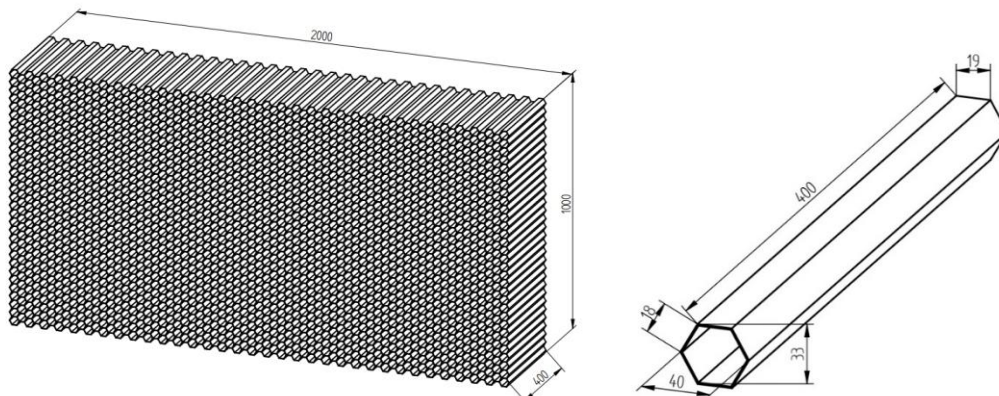
a)



b)

**2 pav.** Vėjo tunelis su oro tiesinimo korium (a) ir oro srauto greičio jutikliais (b)

**Fig. 2.** Wind tunnel with air straightener (a) and air flow speed sensors (b)



a)

b)

**3 pav.** Oro srauto tiesinimo korys (a) ir jo vieno elemento profilis (b)

**Fig. 3.** Airflow straightener honeycomb (a) and its single element profile (b)

Oro srauto greičio matavimai vėjo tunelyje atlikti 4 skirtinguose skerspjūviuose I, II, III ir IV (1 pav.), nutolusiuose nuo ventiliatorių atitinkamai 5 m, 7 m, 9 m ir 11 m atstumais. Kiekviename skerspjūvio plote atlikta 50 matavimų skirtinguose taškuose. Oro srautas matuotas penkiuose skirtinguose aukščiuose (20 cm; 40 cm; 60 cm; 80 cm ir 100 cm) nuo tunelio dugno bei kas 20 cm atstumais tunelio plotyje. Kiekviename skerspjūvyje buvo atliekami matavimai esant 6 skirtingiems oro srauto greičiams, su oro srauto tiesinimo koriais ir be jų.

Oro srauto judėjimo tipas stačiakampio formos vėjo tunelyje buvo nustatomas pagal Reinoldso skaičių (Pratt, 2021):

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D_h}{\mu}, \quad (1)$$

čia  $\bar{v}$  – oro srauto greičio aritmetinis vidurkis matavimo taške  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

$D_h$  – hidraulinis skersmuo, m;

$\mu$  – kinematinės klamos koeficientas,  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$D_h = \frac{4A}{P}, \quad (2)$$

čia  $A$  – tunelio skerspjūvio plotas,  $\text{m}^2$ ;

$P$  – tunelio skerspjūvio perimetras, m.

Oro srauto turbulencijos lygis tunelio skerspjūvio plote yra išreiškiamas oro srauto greičio vidurkio standartinio nuokrypio ir oro srauto greičio aritmetinio vidurkio santykiu, išreikštu procentais (Nader et al., 2006):

$$T = \frac{S_x}{\bar{v}} \cdot 100, \quad (3)$$

čia  $S_x$  – oro srauto greičio vidurkio standartinio nuokrypis,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$S_x = \frac{S}{\bar{n}} \cdot 100, \quad (4)$$

čia  $S$  – oro srauto greičio atskiro matavimo standartinis nuokrypis,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

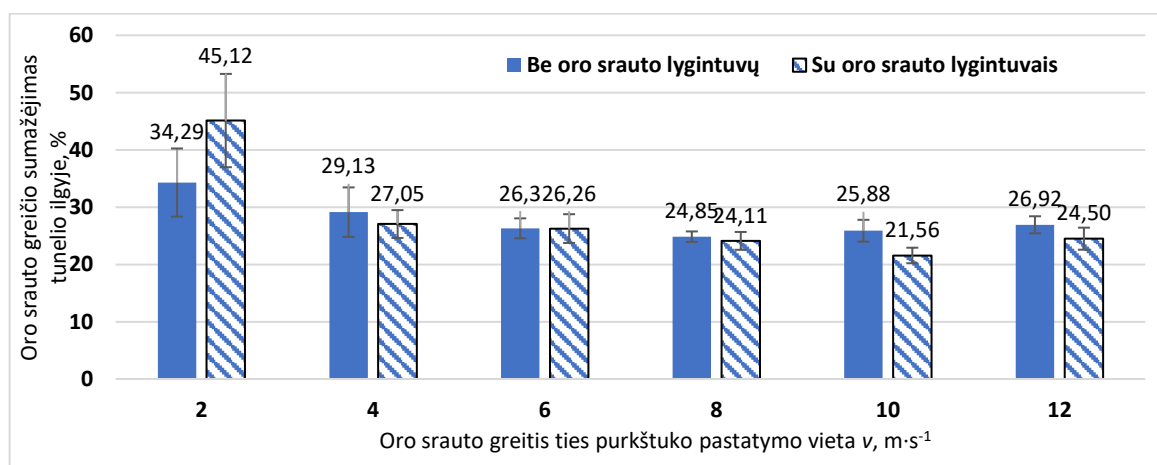
Oro srauto tipui vėjo tunelyje nustatyti buvo apskaičiuotas Reinoldso skaičius esant skirtingiems oro srauto greičiams. Gauti rezultatai (1 lentelė) parodė, kad vėjo tunelyje vyrauja turbulentinis judėjimas, kadangi Reinoldso skaičiai ženkliai viršija laminarinio tekėjimo ribą. Esant laminariniam oro srauto judėjimui, Reinoldso skaičius turėtų būti ne didesnis nei  $Re = 3000$  (Pratt, 2021).

**1 lentelė.** Reinoldso skaičiaus reikšmės, esant skirtingiems oro srauto greičiams

**Table 1.** Reynolds number values at different air flow speeds

Oro srauto greitis, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2	4	6	8	10	12
Reinoldso skaičius, $Re$	180180	360360	540541	720721	900901	1081081

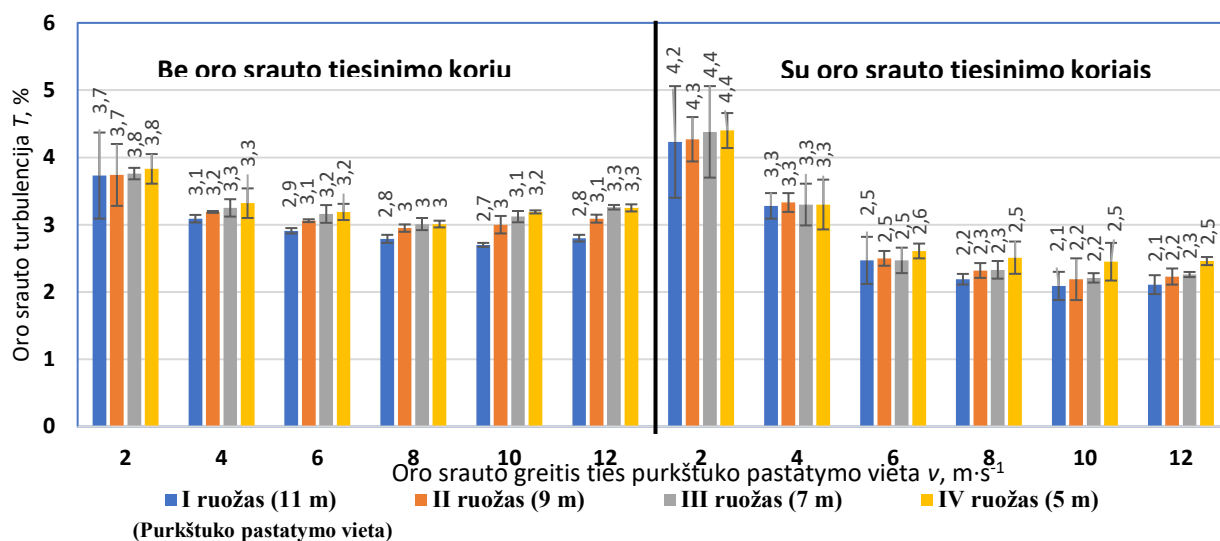
Tirta oro srauto tiesinimo korių įtaka oro srauto greičio pokyčiui tunelio ilgyje 5 m (IV ruožas) ir 11 m (I ruožas) atstumais nuo ventiliatorių. Šis vėjo tunelis daugiausia yra skirtas purškimo proceso tyrimams, todėl 11 m atstumu nuo ventiliatorių nutolęs I ruožas yra svarbus, nes jame įrengiamas purkštukas (1 pav.). Didžiausias oro srauto greičio sumažėjimas minėtuose ruožuose nustatytas esant  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oro srauto greičiui (4 pav.). Tuomet, nenaudojant oro srauto tiesinimo korių, oro srauto sumažėjimas siekia 34,29 %, o įmontavus oro srauto tiesinimo korius – 45,12 %. Šiuo atveju tiesinimo korių įtaka oro srauto pastovumui yra neigiama, nes greitis 11 m atstume nuo ventiliatorių sumažėja 10,83 %. Nustatyta, kad oro srauto tiesinimo koriai, esant didesniems oro srauto greičiams (nuo  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  iki  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), užtikrina oro srauto didesnę tolygumą tunelio ilgyje. Naudojant tiesinimo korius, oro srauto greičio skaitinės reikšmės 11 m atstume nuo ventiliatorių yra apie 10 % didesnės nei tuomet, kai nėra naudojami oro srauto tiesintuvai.



**4 pav.** Oro srauto tiesinimo korių įtaka oro srauto greičio kitimui tunelio ilgyje 5 m (IV ruožas) ir 11 m (I ruožas, purkštuko pastatymo vieta) atstumuose nuo ventiliatorių

**Fig. 4.** The influence of air flow straighteners on the variation of air flow speed along the length of the tunnel, comparing 5 m (Section IV) and 11 m (Section I, location of the nozzle) includes from the axial-flow fans

Dviem ašniais ventiliatoriais vėjo tunelyje pučiamo oro srauto turbulencija, tostant nuo ventiliatorių tunelio skerspjūviuose, turi tendenciją mažėti (5 pav.). Didinant oro srauto greitį nuo 2 m·s<sup>-1</sup> iki 12 m·s<sup>-1</sup>, turbulencija palaipsniui mažėja. Pagal atliktus tyrimus matoma, kad oro srauto tiesinimo koriai sumažina turbulenciją, vėjo greičiui esant nuo 6 m·s<sup>-1</sup> iki 12 m·s<sup>-1</sup>. Tuomet ji sumažinama 25–30 %. Esant 4 m·s<sup>-1</sup> oro srauto greičiui, turbulencija išlieka reikšmingai nepakitusi (5 pav.). Turbulencijos skaitinė reikšmė bet kuriame vėjo tunelio skerspjūvyje neturėtų viršyti 8 % ribos (DRT Protocol, 2016; ISO 22856:2008).



5 pav. Oro srauto turbulencijos  $T$  priklausomybė nuo oro srauto greičio  $v$  bei atstumo nuo ventiliatorių  $L$   
 Fig. 5. Dependence of turbulence  $T$  intensity on air flow speed  $v$  and distance from axial-flow fans  $L$

## Išvados

1. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad suprojektuotame ir pagamintame 15 m ilgio, 2 m pločio ir 1 m aukščio vėjo tunelyje vyrauja turbulentinis oro srauto judėjimas, kadangi Reynoldso skaičius ženkliai viršija laminarinio tekėjimo ribą ( $Re = 3000$ ).
2. Tyrimais nustatyta, kad oro srauto tiesinimo koriai, esant oro srauto greičiams nuo 10 m·s<sup>-1</sup> iki 12 m·s<sup>-1</sup>, užtikrina oro srauto didesnę tolygumą tunelio ilgyje. Tuomet oro srauto greičio skaitinės reikšmės 11 m atstumu nuo ventiliatorių yra apie 10 % didesnės, negu tuomet, kai nėra naudojami oro srauto tiesintuvai.
3. Dviem ašniais ventiliatoriais vėjo tunelyje didinant pučiamo oro srauto greitį nuo 2 m·s<sup>-1</sup> iki 12 m·s<sup>-1</sup>, turbulencija palaipsniui mažėja. Nustatyta, kad oro srauto tiesinimo koriai 25–30 % sumažina turbulenciją tik esant oro srauto greičiams nuo 6 m·s<sup>-1</sup> iki 12 m·s<sup>-1</sup>. Esant 4 m·s<sup>-1</sup> oro srauto greičiui, turbulencija išlieka reikšmingai nepakitusi.

## Literatūra

1. Barlow, J. B., Rae, W. H., Pope, A. 1999. Low-speed wind tunnel testing. John Wiley & Sons.
2. Cattafesta, L., Bahr, C., Mathew, J. 2010. Fundamentals of wind-tunnel design. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, p. 1–10.
3. Douzals, J. P., Al Heidary, M. A. J. I. D., Sinfort, C. A. R. O. L. E. 2016. Spray deposition in a wind tunnel: a kinetic approach of wind speed effects. *International Advances in Pesticide Application*, Vol. 132, p. 299–309.
4. Fadilah, P. A., Erawan, D. F. 2018. Effect of applying screen and honeycomb to the flow characteristic in wind tunnel based on CFD simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1130, No. 1, 012008.
5. Hamzah, H., Jasim, L. M., Alkhabbaz, A., Sahin, B. 2021. Role of honeycomb in improving subsonic wind tunnel flow quality: numerical study based on orthogonal grid. *Journal of Mechanical Engineering Research*, Vol. 44(7), p. 352–369.
6. Kulkarni, V., Sahoo, N., Chavan, S. D. 2011. Simulation of honeycomb–screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 99(1), p. 37–45.
7. Nader, G., dos Santos, C., Jabardo, P. J., Cardoso, M., Taira, N. M., Pereira, M. T. 2006. Characterization of low turbulence wind tunnel. *XVIII IMEKO World Congress-Metrology for a sustainable development*.
8. Pratt, J. 2021. Reynolds Number. Prieiga per internetą: <https://lt.warbletoncouncil.org/numero-de-reynolds-12425> (žiūrėta 2023-02-06)
9. U.S. EPA Generic Verification Protocol for Testing Pesticide Application Spray Drift Reduction Technologies for Row and Field Crops, 2016.
10. ISO 22856:2008. Equipment for crop protection. Methods for the laboratory measurement of spray drift. Wind tunnels. 2008.

## THE INFLUENCE OF WIND TUNNEL AIRFLOW STRAIGHTENING HONEYCOMBS ON AIRFLOW UNIFORMITY

### Summary

Airflow turbulence in wind tunnels are one of the biggest problems that distort and produce inaccurate test results. In order to reduce airflow turbulence it is appropriate to use airflow straightening honeycombs. They straighten the airflow so that it is parallel to the longitudinal axis of the tunnel. The aim is to reduce the turbulence in the cross-sectional area of the tunnel.

The research was carried out on a laboratory bench (15 m long, 2 m wide and 1 m high wind tunnel), in the Agricultural Engineering and Safety Department of the Vytautas Magnus University. Air velocity measurements in the wind tunnel were carried out in 4 different cross-sections, I, II, III and IV, at distances of 5 m, 7 m, 9 m and 11 m respectively from the axial-fans. The influence of the airflow straightening honeycombs on the uniformity of the airflow velocity distribution over the cross-sectional area was investigated by blowing the airflow and varying the airflow velocity in the test section of the tunnel (11 m away from the fans) between  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Two easily removable airflow straightening honeycombs are installed at the front and rear of the wind tunnel, 1 m and 14 m downstream of the fans. The honeycombs are hexagonal tubes of 33 mm high, 40 mm wide and 400 mm long. The flow straightening honeycombs have been shown to provide a constant airflow over the length of the tunnel at air velocities between  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The numerical values of the air velocity at 11 m from the fans are then about 10 % higher. As the velocity of the blowing air in the wind tunnel is increased from  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  to  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  by the two axial fans, the turbulence gradually decreases. It has been found that airflow straightening honeycombs reduce turbulence by 25–30 % only at airflow speeds between  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . At air velocities of  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  turbulence remains significantly unaffected.

**Keywords:** wind tunnel, airflow velocity, turbulence, airflow straightening honeycombs.