



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

OPTIMALIZACE TRANSPORTU VZDUCHU VE VENTILÁTOROVÉ KOMOŘE S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM

OPTIMIZATION OF AIR TRANSPORT IN THE FAN CHAMBER WITH FREE IMPELLER
WHEEL

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Dominik Čákl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.

BRNO 2024

Abstrakt

Práce se zabývá zlepšením hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorových komorách s volnými oběžnými koly, kterými jsou opatřeny každé větší centrální vzduchotechnické systémy. Každý větší centrální vzduchotechnický systém je opatřen sáním čerstvého vzduchu, které transportuje vzduch do ventilátorové komory, ve které je ventilátor s volným oběžným kolem, který zajišťuje transport vzduchu a dodává proud vzduchu kinetickou energií. Z ventilátorové komory je vzduch dále transportován vzduchotechnickým systémem do jednotlivých distribučních elementů. Analogicky je skrze ventilátorovou komoru řešen i odvod znečištěného vzduchu. Turbulentní proudění vzduchu na výstupu z oběžného kola způsobuje tlakovou ztrátu ve výtláčné komoře vzduchotechnické jednotky, neboť vzduch je dopravován pulzně podle záběru lopatek. V praxi jsou do vzduchotechnických jednotek osazovány ventilátory o menších výkonových parametrech naměřených v laboratořích za ideálních okrajových podmínek, které neřeší problém v rozdílu reálného dopravního tlaku mezi přívodním a odvodním vzduchovodem s následkem, že instalované ventilátory v reálné ventilátorové skříni nedosahují parametrů udávaných výrobcem. Snižování tlakových ztrát ve ventilátorových komorách koreluje se snižováním spotřeby energie u zařízení zajišťujících transport vzduchu v souvislosti s udržitelnou výstavbou. Na základě vývoje aerodynamické účinnosti ventilátorů a evropské legislativy byl popsán aktuální trend významného snižování spotřeby energie, mimo jiné u zařízení zajišťujících transport vzduchu, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků a budov. Dále jsou uvedeny tři rešeršní principy a metody zlepšení účinnosti zařízení za účelem snížení energetické potřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu, jejichž autoři přistupují k výzkumu numericky a experimentálně. Cílem originálních technických řešení uváděných v této práci, je představit vývoj, pomocí kterého se optimalizují tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem. První řešení popisuje princip náběhových plechů, kde je cílem pomoci proud vzduchu eliminovat negativní dopady víření a ulehčit výtok vzduchu z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše, čímž dochází ke snížení měrného příkonu ventilátoru až o 5,9 % (za daných okrajových podmínek). Podstatou druhého inovativního technického řešení je představit volné oběžné kolo, které vychází ze spojení dvou řad zakřivených lopatek konkávního a konvexního tvaru, které slouží k optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem, které produkuje menší, rovnoměrnější, vzájemně interagující proudy, které pomáhají proud vzduchu plynuleji změnit směr víření ve ventilátorové komoře a které nenašlo pro konkrétní měřené okrajové podmínky prakticky žádný význam. Podstatou třetího inovativního technického řešení je představení moderní výroby produktů z „udržitelných“ materiálů za pomoci 3D tisku, v podobě volného oběžného kola pro ventilátory s volným oběžným kolem. Výsledky geometrických kopií volných oběžných kol vyrobených z lehčího materiálu reflektují, že došlo ke snížení průměrného měrného příkonu ventilátoru až o 4,4 %, přičemž došlo zároveň ke snížení součtové hladiny zvuku. Ve spolupráci s Ústavem pozemního stavitelství se práce dále zabývá metodikou hledání environmentálně přijatelnějšího zlepšení vlastností volných oběžných kol, která lze po dobu životnosti ventilátoru vyměnit za oběžná kola s vyšší účinností dopravovaného vzduchu podle toho, jakým směrem se bude ubírat vývoj ideálního tvaru oběžných kol. Při použití volných oběžných kol z plastových recyklátů s vysokou tepelnou stabilitou a dostatečnými mechanickými vlastnostmi, došlo ke snížení uhlíkové stopy, přičemž snížení je více než desetinásobné. Výsledky experimentálních měření originálních výzkumných projektů nám ukázaly způsob, jakým směrem se ubírat ke zlepšení hydraulických vlastností ve ventilátorových jednotkách v souvislosti s požadavky naplnění myšlenek a cílů trvale udržitelného rozvoje. Závěry práce reflektují zvýšení účinnosti systému a jsou adresovány pro průmyslovou využitelnost a rozvoj vědních oborů.

Abstract

The work deals with the improvement of the hydraulic properties of air transport in fan chambers with free impeller wheels, which are equipped in every larger central air handling system. Every larger central air handling system is equipped with a fresh air intake that transports the air into a fan chamber, which contains a free-wheel fan that provides air transport and provides kinetic energy to the air stream. From the fan chamber, the air is further transported by the air handling system to the individual distribution elements. Similarly, the extraction of polluted air is solved through the fan chamber. The turbulent flow of air at the outlet of the impeller causes a pressure loss in the discharge chamber of the air handling unit, as the air is transported in pulses according to the slip of the blades. In practice, fans with smaller performance parameters measured in laboratories under ideal boundary conditions are installed in air handling units, which do not solve the problem of the difference in real traffic pressure between the supply and exhaust air ducts, with the result that the installed fans in the real fan box do not reach the parameters specified by the manufacturer. Reduction of the pressure losses in fan chambers is correlated with the reduction of energy consumption of equipment ensuring air transport in the context of sustainable construction. Based on the development of aerodynamic efficiency of fans and European legislation, the current trend of a significant reduction in energy consumption was described, among other things, for equipment providing air transport, through repairs, reuse, repurposing and recycling of used materials, and through extending the life of products and buildings. Furthermore, three research principles and methods of improving the efficiency of equipment in order to reduce the energy demand of equipment ensuring air transport are presented, the authors of which approach the research numerically and experimentally. The goal of the original technical solutions presented in this work is to present a development that optimizes the pressure losses of a fan chamber with a free impeller. The first solution describes the principle of lead-in plates, where the goal is to help the air stream eliminate the negative effects of swirling and facilitate the outflow of air from the fan chamber by means of a smooth slide along an inclined surface, which reduces the specific power of the fan, under the given marginal conditions, by up to 5.9 %. The essence of the second innovative technical solution is to present a free impeller, which is based on the connection of two rows of curved blades of concave and convex shape, which serves to optimize the pressure loss of the fan chamber with a free impeller, which produces smaller, more uniform, mutually interacting currents that help the flow of air to more smoothly change the direction of swirling in the fan chamber and which found practically no value for the specific measured boundary conditions. The essence of the third innovative technical solution is the introduction of modern production of products from "sustainable" materials with the help of 3D printing, in the form of a free impeller for fans with a free impeller. The results of geometric copies of free impellers made of lighter material reflect that there was a reduction in the average specific power of the fan by up to 4.4 %, while at the same time there was a reduction in the total sound level. Improving the properties of the free impellers, which can be replaced during the life of the fan with impellers with a higher efficiency of air transport, depending on the direction in which the development of the ideal shape of the impellers will go. By using free impellers made of recycled plastic with high thermal stability and sufficient mechanical properties, the carbon footprint has been reduced, with the reduction being more than tenfold. The results of experimental measurements of original research projects showed us the way in which to go to improve hydraulic properties in fan units in connection with the requirements of fulfilling the ideas and goals of sustainable development. The conclusions of the work reflect an increase in the efficiency of the system and are addressed for industrial applicability and the development of scientific fields.

Klíčová slova

Centrální klimatizační systém, volné oběžné kolo, ventilátorová komora, tlakové ztráty ventilátorů, moderní udržitelný materiál, 3D tisk, redistribuce vzduchu, měrný příkon ventilátoru. Vývoj volného oběžného kola.

Keywords

Central air conditioning system, free impeller wheel, fan chambre, pressure loss of the fans, modern sustainable material, 3D printing, air redistribution, specific fan power, development of the free impeller wheel.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690: 2022

ČAKL, Dominik, 2024. Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technického zařízení budov. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE ACORDING TO ISO 690: 2022 STANDARD

ČAKL, Dominik, 2024. Optimization of air transport in the fan chamber with free impeller wheel. Doctoral thesis. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of building services. Supervisor doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že disertační práci s názvem *Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem* jsem zpracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 4. 2024

Ing. Dominik Cakl

Autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem *Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 3. 4. 2024

Ing. Dominik Cakl

Autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi v průběhu tvorby disertační práce poskytli pomoc. Na prvním místě je to pan školitel doc. Ing. Aleš Rubina Ph.D., který se ujal vedení práce a poskytl mi mnoho cenných rad. Vážím si jeho skvělého přístupu a podpory. Dále za celkovou neustálou akademickou, výzkumnou a publikační spolupráci děkuji celému Ústavu technických zařízení budov.

Poděkování taktéž patří panu Ing. Michalu Trčkovi za velmi podnětné myšlenky.

Speciální dík patří Ing. Michalu Brandtnerovi za podněty a cennou zpětnou vazbu v průběhu studia, taktéž i společnosti EnergySim s. r. o. za desetiletou odbornou praxi vykonávanou v průběhu celého vysokoškolského studia, zejména specialistům Ing. Petru Kotkovi Ph.D. a Ing. Janu Antonínovi Ph.D.

OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY V REÁLNÝCH APLIKACÍCH	12
1.1	SOUČASNÁ ZAŘÍZENÍ ZAJIŠŤUJÍCÍ TRANSPORT VZDUCHU	12
1.1.1	<i>Ventilátorové komory s volným oběžným kolem</i>	12
1.1.2	<i>Aerodynamická efektivita</i>	13
1.1.3	<i>Modernizace systému - retrofit</i>	14
1.2	ZÁVĚR SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	16
1.3	REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY ENERGIE PŘI TRANSPORTU VZDUCHU	17
1.3.1	<i>Širší kontext z pohledu vývoje evropské legislativy na snižování spotřeby energie u zařízení pro transport vzduchu.....</i>	17
1.3.2	<i>Kontext balíčku norem „Fit for 55“</i>	18
1.3.3	<i>Kontext návrhu směrnice EPBD4 s ohledem na prodloužení životnosti výrobků</i>	18
1.4	ZÁVĚR SOUČASNÉHO STAVU SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY ENERGIE PŘI TRANSPORTU VZDUCHU	19
1.5	REŠERŠE OPTIMALIZACE AERODYNAMICKÉ EFEKTIVITY	20
1.5.1	<i>Zvýšení účinnosti volnoběžných kol u ventilátorů prostřednictvím jednotky pro opětovné získání tlaku použité ve vzduchotechnické jednotce</i>	21
1.5.2	<i>Numerické modelování a optimalizace vzduchotechnické jednotky</i>	22
1.5.3	<i>Numerické a experimentální výzkumy turbodmychadel a kompresorových kol vyrobených z aditivně vyrobených plastů</i>	23
1.6	ZÁVĚR REŠERŠNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACE AERODYNAMICKÉ EFEKTIVITY	24
2	VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	25
2.1	RELEVANCE A KONTEXTUALIZACE PROBLEMATIKY	25
2.2	CÍLE PRÁCE.....	25
2.3	STANOVENÍ VĚDECKÝCH HYPOTÉZ	25
3	METODY ZPRACOVÁNÍ	27
4	TEORETICKÝ PŘÍSTUP K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU	29
4.1	TEORIE K EXPERIMENTŮM OPTIMALIZUJÍCÍ TRANSPORTU VZDUCHU VE VENTILÁTOROVÉ KOMOŘE. 29	
4.1.1	<i>Teorie k experimentu Č. 1 optimalizace víření vzduchu ve vzduchotechnických jednotkách pomocí redistributoru vzduchu.....</i>	30
4.1.2	<i>Teorie k experimentu Č. 2: optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru pomocí konkávní a konvexní geometrie lopatek</i>	33
4.1.3	<i>Teorie k experimentu Č. 3 a Č. 4 optimalizace volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů a retrofit</i>	34
4.2	ZÁVĚR TEORIE K EXPERIMENTŮM OPTIMALIZUJÍCÍ TRANSPORTU VZDUCHU VE VENTILÁTOROVÉ KOMOŘE	35
5	EXPERIMENTÁLNÍ PŘÍSTUP K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU	36
5.1	ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	36
5.2	NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK.....	37
5.2.1	<i>Metody měření ventilátorových charakteristik</i>	39
5.3	POROVNÁVACÍ PARAMETRY VÝKONU VENTILÁTORŮ.....	41
5.3.1	<i>Měrný příkon pro budovu nebo ucelený systém SFP.....</i>	41
5.4	EXPERIMENT.....	42
5.4.1	<i>Experiment Č. 1 optimalizace víření vzduchu ve vzduchotechnických jednotkách pomocí redistributoru vzduchu.....</i>	42
5.4.2	<i>Experiment Č. 2 optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru pomocí konkávní a konvexní geometrie lopatek.....</i>	49
5.4.3	<i>Experiment Č. 3 optimalizace standardního volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu a recyklaci materiálů.....</i>	56

	5.4.4 Experiment Č. 4 optimalizace dvouřadého volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu A recyklaci materiálů	59
	5.5 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH PŘÍSTUPŮ K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU	65
6	SYNTÉZA TEORETICKÉHO A EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍSTUPU K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU	66
	6.1 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT VÝZKUMNÝCH PROJEKTŮ A DÍLČÍ VÝSLEDKY	66
	6.1.1 Syntéza naměřených dat dílčího cíle č. 1.....	67
	6.1.2 Syntéza naměřených dat dílčího cíle č. 2.....	68
	6.1.3 Syntéza naměřených dat dílčího cíle č. 3.....	69
	6.1.4 Syntéza naměřených dat dílčího cíle č. 4.....	70
	6.1.5 Syntéza naměřených dat dílčího cíle č. 5.....	71
	6.2 SYNTÉZA VÝSLEDKŮ DÍLČÍCH CÍLŮ.....	72
	6.3 VÝSLEDKY A GRAFICKÁ PREZENTACE SYNTÉZY DÍLČÍCH CÍLŮ	73
7	VÝSLEDNÁ CHARAKTERISTIKA POTRUBNÍ SÍTĚ A VENTILÁTORU	76
8	VYHODNOCENÍ HYPOTÉZ.....	78
9	DISKUSE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR.....	80
	9.1 ZÁVĚRY K VÝSLEDKŮM EXPERIMENTÁLNÍCH PŘÍSTUPŮ	80
	9.2 ZÁVĚR K VÝSLEDKŮM SYNTÉZY DÍLČÍCH CÍLŮ	80
	9.3 ZÁVĚR K VÝSLEDNÉ CHARAKTERISTICE POTRUBNÍ SÍTĚ A VENTILÁTORŮ.....	81
	9.4 VÝZNAM PRÁCE PRO VĚDNÍ OBOR	81
	9.5 VÝZNAM PRÁCE PRO PRAXI A PRŮMYSLOVOU VYUŽITELNOST	82
	9.6 MOŽNÁ LEPŠÍ APLIKACE	82
	9.7 NÁROKY NA OCHRANU	82
	9.8 MOŽNOSTI DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ VÝZKUMU	83
	9.8.1 Metodika možného dalšího pokračování budoucího výzkumu.....	83
10	SEZNAM ZDROJŮ.....	84
	10.1 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	84
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	87
	10.2 SEZNAM OBRÁZKŮ	88
	10.3 SEZNAM TABULEK.....	90
	10.4 SEZNAM GRAFŮ.....	91
11	VĚDECKÉ VÝSTUPY AUTORA	92
	11.1 SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ AUTORA	92
	11.2 OCHRANNÉ ZNÁMKY AUTORA	93
12	PŘÍLOHY	94
	12.1 PŘÍLOHA - OKRAJOVÉ PODM. CFD SIMULACE	94
	12.2 PŘÍLOHA - CHARAKTERISTICKÉ VÝKONY VENTILÁTORU	96
	12.3 PŘÍLOHA - ZKUŠEBNÍ METODA ZAŘÍZENÍ DLE ČSN EN 12599.....	98
	12.4 PŘÍLOHA - FOTODOKUMENTACE EXPERIMENTÁLNÍCH SESTAV	99
	12.5 PŘÍLOHA - DOKUMENTACE ZAŘÍZENÍ REDISTRIBUTORU VZDUCHU	102
	12.6 PŘÍLOHA - UŽITNÉ VZORY.....	105

ÚVOD

S rostoucím zájmem o kvalitu vnitřního prostředí a snižování energetické spotřeby ve fázi výstavby a používání budov jsou v současné době ze strany investorů a směrnic Evropského parlamentu předkládány stále přísnější požadavky na vysoce účinné technologie větracích jednotek. Problematika rozšiřování nejúčinnějších technologií a snižování spotřeby energie je aktuální téma v souvislosti s požadavky naplnění myšlenek a cílů trvale udržitelného rozvoje a bezemisní výstavby, zejména u zařízení zajišťujících transport vzduchu, protože tato zařízení jsou prakticky výhradně poháněna elektrickou energií. Energetická náročnost systému nuceného větrání je a bude základním ukazatelem dílčí dodané energie v nástrojích hodnocení energetické náročnosti budovy, jako jsou průkazy energetické náročnosti budovy, energetické pasy a vnitrostátní plány pro „renovaci“ budov.

Jednou z možných cest, jak snížit energetickou spotřebu zařízení zajišťujících transport vzduchu, je zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře prostřednictvím optimalizace tlakových ztrát ventilátorů a to s ohledem na častěji zjišťované nestability chování vzduchotechnických systémů. Jedná se zejména o v praxi často neřešitelný problém v rozdílu deklarovaného dopravního tlaku měřeného za ideálních podmínek a reálným, v praxi často nedosažitelným dopravním tlakem. Ve spolupráci s Ústavem pozemního stavitelství se práce dále zabývá metodikou hledání environmentálně přijatelnějšího zlepšení vlastností volného oběžného kola, které lze po dobu životnosti ventilátoru vyměnit za oběžné kolo s vyšší účinností dopravovaného vzduchu podle toho, jakým směrem se bude ubírat vývoj ideálního tvaru oběžných kol za použití plastových recyklátů s vysokou tepelnou stabilitou a dostatečnými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí.

Za pomoci teoretického a experimentálního přístupu jsou v této práci zkoumány přínosy inovativních řešení proti standardním řešením. Skrze porovnávací parametr aerodynamické účinnosti ventilátoru, vyjádřeným měrným příkonem ventilátoru, je cílem této práce zvýšit účinnost systému. Snižování energetické spotřeby zařízení je opřeno o čtyři originální výzkumné úkoly, které byly měřeny na reálné sestavě aerodynamické trati. Výsledky výzkumných projektů měly zásadní vliv na autorovu práci, vznikla z nich řada užitečných vzorů a publikací, které byly prezentovány a oceněny na mezinárodní vědecké konferenci Young Scientists 2022 se zaměřením na environmentální inženýrství.

Za účelem získání co nejlépe interpretovatelných výsledků získaných v průběhu teoretických analýz a rozsáhlých experimentálních měření výzkumných projektů jsou výsledky syntézovány do přehledných tabulek a grafů, kde jsou za ustálených hydraulických okrajových podmínek barevně posouzeny na jejich aerodynamickou účinnost, snížení zvukové součtové hladiny a environmentální přínos.

Výstupem této práce je dosažení jednoznačného snížení měrného příkonu ventilátoru a stanovení strukturovaného grafického znázornění zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře. Grafické znázornění v podobě diagramu charakteristické křivky transportu vzduchu ve ventilátorové komoře reflektuje originálních výzkumných úkolů a dílčí cíle práce.

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY V REÁLNÝCH APLIKACÍCH

1.1 SOUČASNÁ ZAŘÍZENÍ ZAJIŠŤUJÍCÍ TRANSPORT VZDUCHU

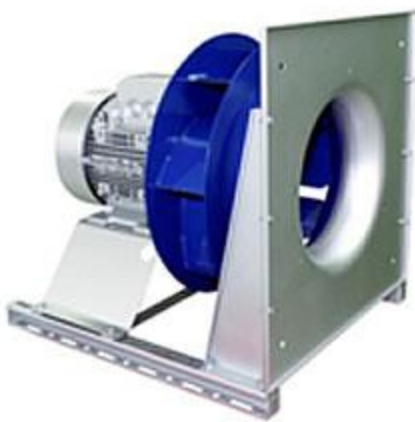
„Ventilátory jsou nedílnou součástí každé vzduchotechnické jednotky a zajišťují transport vzduchu. Jedná se o rotační lopatkový stroj, který patří do skupiny tekutinových strojů, transformuje energii kontinuálně, jeho sací a výtlačný prostor je navzájem spojen, aerodynamické a energetické řešení lopatek má významný vliv na hydraulické poměry: celkový dopravní tlak, objemový průtok vzduchu a elektrický příkon.“ [1].

1.1.1 VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM

Ve ventilátorových komorách vzduchotechnických jednotek jsou volná oběžná kola instalována přímo na hřídel motoru, proto nedochází ke ztrátám na převodech vlivem řemenového pohonu. Charakteristické pro tyto ventilátory je, že pro efektivní výkon nepotřebují skříň, ale jsou umístěny přímo ve ventilátorové komoře [2].

ŠIRŠÍ KONTEXT OPTIMALIZACE TRANSPORTU VZDUCHU VE VENTILÁTOROVÉ KOMOŘE

„Vstupní sací hrdlo a motor s oběžným kolem tvoří sestavu, která je namontována na jednom rámu. Tato ventilátorová jednotka je zabudována do ventilátorové komory přes elastická připojení. Modul je posazen na gumových nebo pružinových tlumičích a pro připojení na straně sání se používají pružné manžety. Tyto prvky minimalizují přenos vibrací.“ [2].



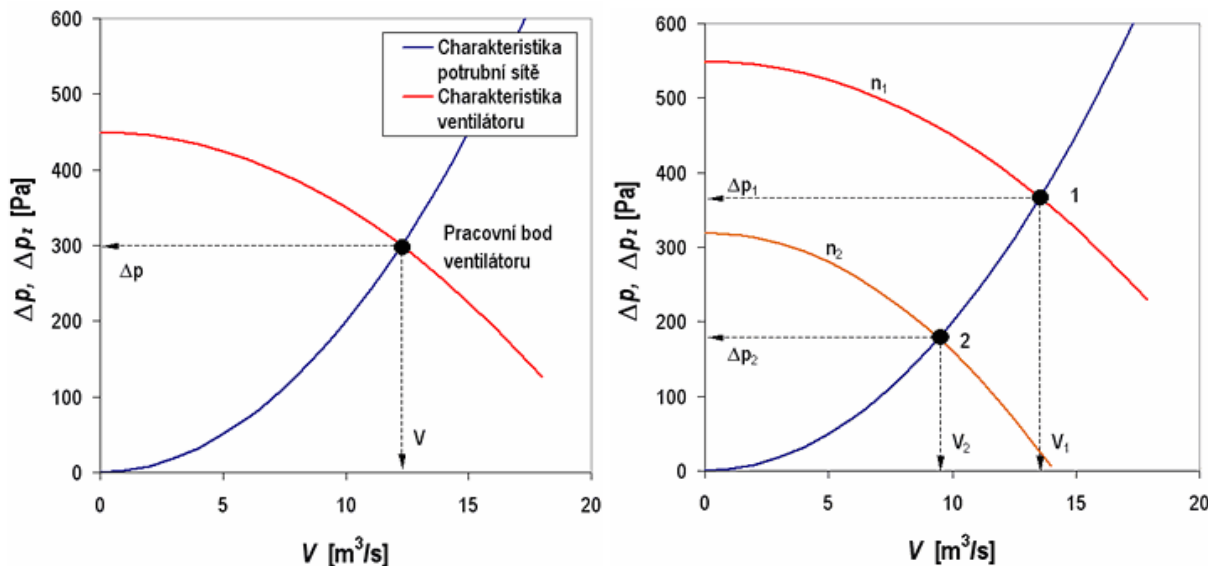
Obr. 1.1: Ventilátor s volným oběžným kolem instalovaný ve ventilátorové komoře [2].

Kvalitu vnitřního prostředí v obsluhovaných prostorách z hlediska akustiky posuzují dva parametry: ekvivalentní hladina akustického tlaku (L_p) a doba dozvuku v místnosti (T) [3]. Hlavní příčina hluku ve vzduchotechnice je aerodynamického původu. Nejvýznamnějšími zdroji aerodynamického hluku jsou ventilátory umístěné ve ventilátorových komorách. Hlavní příčinou hluku ventilátorů je vysoce turbulentní proudění vzduchu ventilátorovým kolem a spirální skříň, případně ventilátorovou komorou. Možné metody snižování hluku ve vzduchotechnice jsou: redukci akustického výkonu zdroje, dispozičním uspořádáním, zvukovou izolací a plochami z pohltivého materiálu [4] [5].

S ohledem na kontext optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem se tato práce dále zabývá snížením součtové hladiny akustického tlaku (L_p) metodou redukci akustického výkonu zdroje (L_w) prostřednictvím zvýšení aerodynamické efektivity transportu vzduchu ve ventilátorové komoře.

CHARAKTERISTIKY VENTILÁTORŮ A JEJICH PŘEPOČET

S ohledem na různé hygienické a energetické požadavky na provětrávání prostoru v reálném čase požadujeme od ventilátoru plynulou regulaci výkonu. Pro tento způsob se používají (i v této práci byl použit) frekvenční měniče, které umožňují regulovat průtok vzduchu v plném rozsahu od 0 do 100 % prostřednictvím změny frekvence a změnou otáček [6].



Graf 1.1, 1.2: Vlevo – obecná charakteristika ventilátoru a potrubní sítě, vpravo regulace ventilátoru změnou otáček ventilátoru [6].

1.1.2 AERODYNAMICKÁ EFEKTIVITA

„Ventilátory jsou v laboratořích testovány za ideálních podmínek, které mohou být ve skutečných budovách nedosažitelné. V praxi se dá očekávat o 10 % vyšší tlaková ztráta (30 Pa na každý ventilátor ve velkém systému) kvůli ztrátám v sacím a výtlačném hrdle ventilátoru, ale špatný návrh může způsobit min. o 75 % vyšší ztráty (několik set Pascalů u velkých systémů). Tyto ztráty se souhrnně nazývají „účinky systému“ a jsou způsobeny vířením v sacím hrdle, tlakovou ztrátou v místě sacího a výtlačného hrdla ventilátoru a přídatnou tlakovou ztrátou za ventilátorem předtím, než se vyrovná rychlostní profil. Finální volbu ventilátoru a motoru lze provést jedině poté, co se provede korekce vypočtené tlakové ztráty na vliv účinků systému.“ [1] [7].

ŠIRŠÍ KONTEXT Z POHLEDU AERODYNAMICKÉ EFEKTIVITY

Mezi faktory ovlivňující aerodynamickou účinnost patří povrchová úprava lopatek, tvar příčného průřezu, průměr volného oběžného kola a počet lopatek [1] [8].



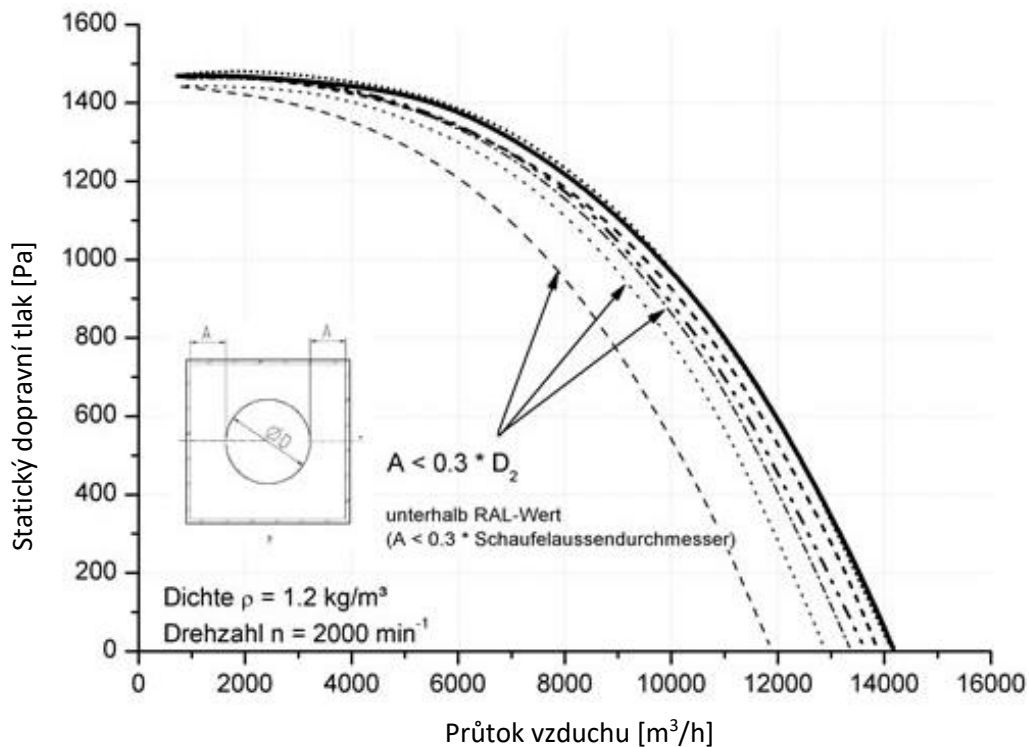
„Obecně jsou neúčinnější „letecké“ profily, ale zahnutý profil vytvořený z plechu o stejné tloušťce je jen o trochu méně účinný.“ [1] [8].

Důležitý je také tvar lopatek, např.: neúčinnější osově rotory mají tvar zahnuté „mačety“, nebo „slzy“, zatímco tvar plochého „pádlá“, nebo „jetelového lístku“ je efektivní méně. Mezera mezi listy rotoru a skříní ventilátoru by měla být malá, aby se minimalizovala lokální recirkulace. Velký počet lopatek pomáhá snížit intenzitu, s jakou dochází ke ztrátě rychlosti (při škrcení průtoku vzduchu) [1][8].

Obr. 1.2: Oběžné kolo s bionickým profilováním 3D díky inovativnímu designu ve tvaru speciálně zakřivené geometrie lopatek [9].

Větší ventilátory mají vyšší účinnost než ty malé, protože ztráty nenarůstají lineárně s velikostí ventilátoru. Vliv mechanických, objemových ztrát a viskózních sil (Reynoldsovo číslo) je větší u malých ventilátorů [1] [8].

„Při snižování vzdálenosti mezi stěnou a oběžným kolem se snižuje vzduchový výkon ventilátoru, podobně jako při snižování šířky lopatek radiálního oběžného kola.“ [2] Přerušované křivky v grafu níže ukazují, že při nedodržení minimálních vzdáleností „A“ prudce klesá aerodynamická efektivita. Například se stěnou ve vzdálenosti $A = 0,1 * D$ vzduchový výkon volného oběžného kola klesá o 10 % níže, než jsou jeho deklarované parametry [2].



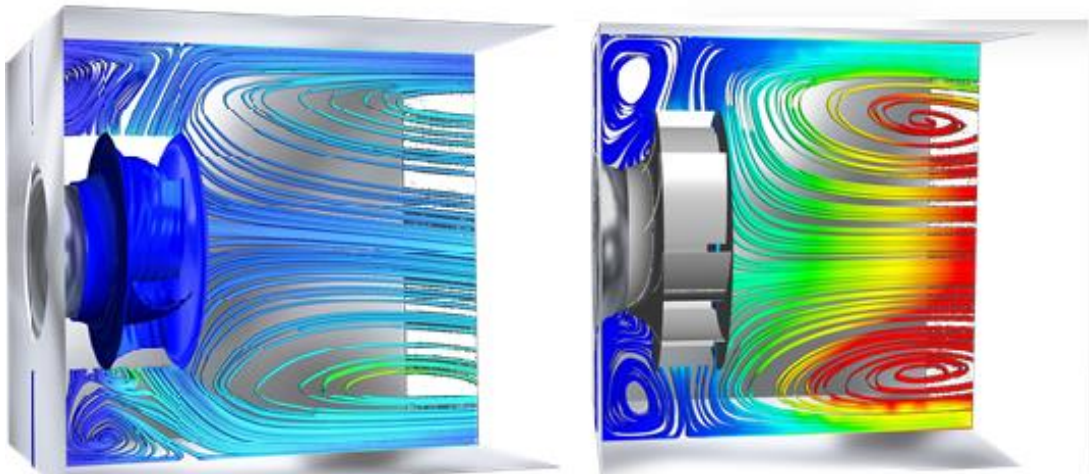
Graf 1.3: Vliv rozměrů jednotky na výkonové křivky volného oběžného kola. [2]

S ohledem na kontext optimalizace aerodynamické efektivity ve ventilátorové komoře se tato práce dále zabývá zvýšením aerodynamické efektivity prostřednictvím úpravy geometrického tvaru ventilátorové komory a optimalizací volného oběžného kola.

1.1.3 MODERNIZACE SYSTÉMU – RETROFIT

V současné době je provozován vysoký počet vzduchotechnických jednotek bez ohledu na požadavky ecodesignu, protože byly uvedeny do provozu před rokem 2016, kdy nemusely být vybaveny vícerychlostním pohonem nebo **pohonem s proměnnými otáčkami** a nemusely uvádět **parametr SFP_{int}** (specific fan power) pro referenční konfiguraci [1][10][11].

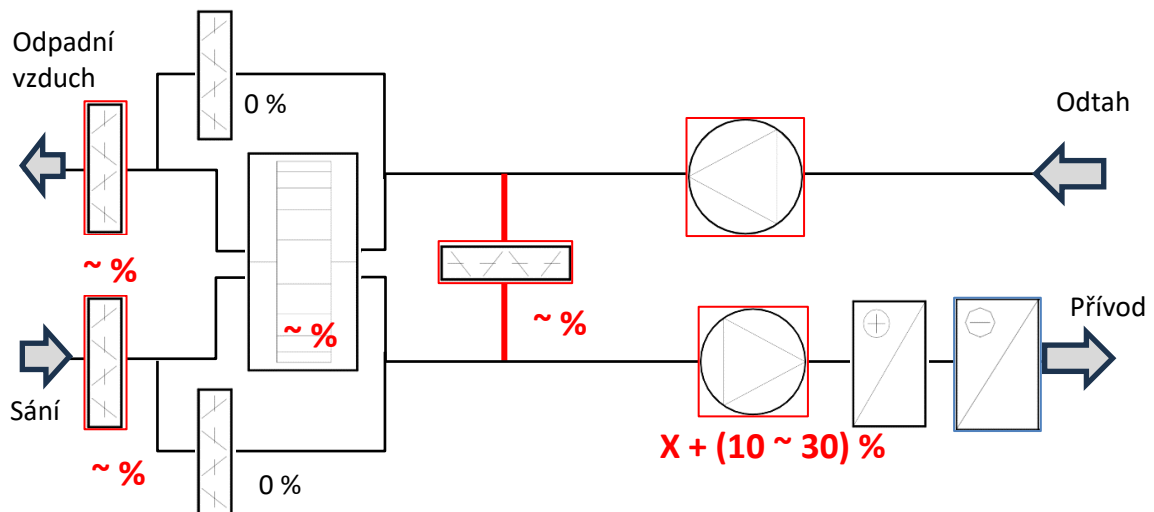
Při přestavbě vzduchotechnické jednotky a výměně ventilátoru za účelem modernizace nový ventilátor splňuje požadavky na úsporu provozních nákladů na elektrickou energii pomocí účinnějšího motoru a efektivnějšího plynového výkonu volného oběžného kola dle obrázku níže. Při pravidelných kontrolách větrání dle vyhlášky č. 38/2022 Sb. a vyhlášky č. 284/2022 Sb. zpracovaný na základě požadavku dle zákona č. 406/2000 Sb. bylo autorem zjištěno, že při rekonstrukci vzduchotechnických jednotek dochází k doplnění stávajících systémů o prvky MAR (měření a regulace) a systému řízení otáček ventilátoru pomocí frekvenčních měničů tak, aby byla možná změna otáček ventilátoru například dle aktuálního požadavku CO₂ [1].



Obr. 1.3: Rozdíl výstupu proudění z oběžného kola při užití „rotujícího“ difuzoru oproti běžnému oběžnému kolu [12].

ŠIRŠÍ KONTEXT Z POHLEDU MODERNIZACE SYSTÉMU

„Prvním krokem je pasportizace aktuálního, současného technického stavu zařízení, během které proběhne fotodokumentace jednotlivých aktivních komponentů se zaměřením na výrobní štítky. Zvaží se, v jakém stavu se zařízení nachází a zda není spíše lepší vyměnit celkový systém za nové zařízení. Následně se zohlední veškerá potřebná a dostupná dokumentace o jednotlivých komponentech. Ve fázi shromažďování dokumentace se pravděpodobně stane, že dokumentace nebude kompletní, zvláště ve výrobních závodech, ve kterých se mění vlastníci a výroba.“ [1].



Obr. 1.4: Schéma hydrauliky potrubní sítě ve vzduchotechnice v režimu topení / chlazení / provětrávání čerstvým vzduchem / tlakové poměry. Proměnlivě nastavitelný výkon a regulace jednotlivých energeticky účinných komponent optimalizuje energetickou spotřebu systému. V rámci modernizace systému se zvažuje, v jakém stavu se zařízení nachází a zda není spíše lepší vyměnit celkový systém za nové vzduchotechnické zařízení, než jednotlivé komponenty v rámci retrofit.

V souvislosti s modernizací systémů se zaměřením na ventilátorové komory se tato práce dále zabývá zvýšením aerodynamické efektivity u současných zařízení prostřednictvím výrobků, které umožňují sériovou výrobu, představují levnou součást ventilátorových komor po stránce materiálu, pracnosti montáže a které nenavyšují nebo výrazně nenavyšují energetickou náročnost.

1.2 ZÁVĚR SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Ventilátorové komory s volným oběžným kolem přímo namontovaným na jednom rámu jsou nedílným prvkem většiny moderních vzduchotechnických sestav, které mají specifické vlastnosti a podle toho je s nimi potřeba zacházet za účelem energetických úspor, omezení nebo vyloučení nestability chování vzduchotechnického systému.

S ohledem na kontext optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem se tato práce dále zabývá snížením součtové hladiny akustického tlaku (L_p) metodou redukci akustického výkonu zdroje (L_w) prostřednictvím zvýšení aerodynamické efektivity transportu vzduchu ve ventilátorové komoře.

Mezi faktory ovlivňující aerodynamickou účinnost systému patří povrchová úprava lopatek, tvar příčného průřezu, průměr oběžného kola, počet lopatek a vzdálenost volného oběžného kola od stěn ventilátorové komory.

S ohledem na kontext optimalizace aerodynamické efektivity ve ventilátorové komoře se tato práce dále zabývá zvýšením aerodynamické efektivity prostřednictvím úpravy geometrického tvaru ventilátorové komory a optimalizací volného oběžného kola s cílem zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře.

V současné době je provozován vysoký počet vzduchotechnických jednotek bez ohledu na požadavky ecodesignu, protože byly uvedeny do provozu před rokem 2016, kdy nemusely být vybaveny vícerychlostním pohonem, nebo **pohonem s proměnnými otáčkami** a nemusely uvádět **parametr SFP_{int}** (specific fan power) pro referenční konfiguraci. Při přestavbě vzduchotechnické jednotky a výměně ventilátoru za účelem modernizace nový ventilátor splňuje požadavky na úsporu provozních nákladů na elektrickou energii.

V souvislosti s modernizací systémů se zaměřením na ventilátorové komory se tato práce dále zabývá zvýšením aerodynamické efektivity u současných zařízení prostřednictvím originálních výrobků, které umožňují sériovou výrobu, představují levnou součást ventilátorových komor po stránce materiálu, pracnosti montáže a které nenavýšují nebo výrazně nenavýšují energetickou náročnost.

1.3 REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY ENERGIE PŘI TRANSPORTU VZDUCHU

Problematika posuzování a snižování spotřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu je aktuální téma v souvislosti s udržitelnou výstavbou. Balíček norem „Fit for 55“, který odkazuje na cíl EU snížit do roku 2030 čisté emise skleníkových plynů alespoň o 55 % navazuje na směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie a soubor parametrů, které musí dodržet výrobce anebo dovozce za účelem rozšíření nejúčinnějších technologií s cílem snížit tak spotřebu energie ve fázi používání výrobku [13], [11], [14]. Stále se zvyšující nároky na využití primární energie z neobnovitelných zdrojů u novostaveb, rekonstrukcí stávajících objektů a nově i stávajících objektů [15], [16], [17] vyvíjí stále přísnější požadavky na spotřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu, protože jsou prakticky výhradně poháněny elektrickou energií.

1.3.1 ŠIRŠÍ KONTEXT Z POHLEDU VÝVOJE EVROPSKÉ LEGISLATIVY NA SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY ENERGIE U ZAŘÍZENÍ PRO TRANSPORT VZDUCHU

Oficiální internetové stránky Rady EU a Evropské rady [14] poskytují přehled o vývoji nových iniciativ s cílem EU snížit do roku 2030 čisté emise skleníkových plynů alespoň o 55 %. Tiskové zprávy ministerstev jednotlivých zemí poskytují přehled o aktuálním vývoji nově nastavených pravidel s cílem naplnit balíček norem „Fit for 55“ [14]. Jako validní nástroj pro transformaci energetické spotřeby v rámci udržitelné výstavby je v ČR používán průkaz energetické náročnosti budovy dle vyhlášky č. 264/2020 Sb., která zpracovává příslušné předpisy Evropské unie [16], [17], [18]. Pro účely stanovení ukazatele energetické náročnosti budovy a primární energie z neobnovitelných zdrojů energie pro hodnocenou budovu se posuzují dílčí dodané energie pro technické systémy vytápění, chlazení, nuceného větrání, úpravy vlhkosti vzduchu, přípravy teplé vody a osvětlení vnitřního prostoru budovy za rok vztažené na metr čtvereční energeticky vztažené plochy [18]. Na základě výše uvedených zdrojů je popsán aktuální trend významného snižování spotřeby energie, mimo jiné u zařízení zajišťujících transport vzduchu.

NOVÁ PRAVIDLA SNIŽENÍ SPOTŘEBY — JAK SE EU STANE ENERGETICKY ÚČINNĚJŠÍ

„Aby mohla EU účinně snížit své emise skleníkových plynů a dosáhnout klimatické neutrality, je zapotřebí transformace energetiky. Aby k této transformaci došlo, jsou úspora energie a snížení její spotřeby stejně zásadní jako přechod k čistším formám energie.“ [17].



Obr. 1.5: Nová pravidla snížení spotřeby – nové cíle pro spotřebu primární a konečné spotřeby [17].

1.3.2 KONTEXT BALÍČKU NOREM „FIT FOR 55“

Balíček norem „Fit for 55“ byl Radě Evropské unie předložen v červenci 2021 a odkazuje na cíl EU snížit do roku 2030 čisté emise skleníkových plynů alespoň o 55 %. V návaznosti na jednání Evropské rady z 20. 10. 2022, které předsedal ministr průmyslu a obchodu Jozef Síkela, byla 25. 10. 2022 odsouhlasena pravidla pro energeticky efektivnější budovy [13], [14].

„Kompromisní návrh počítá s tím, že od roku 2030 budou všechny nové budovy v bezemisním standardu, pro veřejné budovy tato povinnost bude platit již od roku 2028. Do roku 2050 by měly být bezemisní všechny stávající budovy. Pravidla počítají také s výjimkami pro některé budovy, jako například historické či architektonicky chráněné budovy.“ [14].

Balíček „Fit for 55“ je souborem návrhů na revizi a aktualizaci právních předpisů EU a na zavedení nových iniciativ, který má zajistit dosažení cílů spravedlivé a sociálně vyvážené transformace společnosti, zachová a posílí inovace a konkurenceschopnost průmyslu EU a současně zajistí rovné podmínky vůči hospodářským subjektům ze třetích zemí, podpoří vedoucí postavení EU v rámci celosvětového boje proti změně klimatu [13].





S ohledem na kontext úspor energií se tato práce dále zabývá snížením spotřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu prostřednictvím snížení měrného příkonu ventilátoru.

1.3.3 KONTEXT NÁVRHU SMĚRNICE EPBD4 S OHLEDEM NA PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI VÝROBKŮ

V době zpracování této práce se Evropská směrnice EPBD4, která definuje certifikaci energetické náročnosti budov, připomínkuje. Pro účely této směrnice se „oběhovostí“ rozumí: „*snížení potřeby těžby původních materiálů snižováním poptávky po nových materiálech, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků a budov*“ [18].

Dále jsou v této směrnici stanoveny, mimo jiné, požadavky na technické systémy budov při jejich instalaci, nahrazení nebo modernizaci [18].

S ohledem na výše zmíněný kontext směrnice EPBD4, která definuje certifikaci energetické náročnosti budov, se dá předpokládat, mimo jiné, požadavek na prodloužení životnosti výrobků technických systémů budov, zejména systému nuceného větrání, s ohledem na zvýšení účinnosti systému.

Evropská směrnice:		Vyhlášky o energetické náročnosti budov:
2002/91/EC EPBD1		Vyhláška č. 148/2007 Sb.
2010/31/EU EPBD2		Vyhláška č. 78/2013 Sb.
2018/844 /EU EPBD3		Vyhláška č. 264/2020 Sb.
202x/xxx/EU EPBD4		Zatím nezveřejněno.

Tab. 1.1: Tabulka vývoje vyhlášky o energetické náročnosti budov, s ohledem na EPBD4.

S ohledem na připravenou vyhlášku, která nahradí současnou platnou vyhlášku č. 264/2020 Sb., jsou v této práci zkoumány a porovnávány environmentální přínosy a výroby volných oběžných kol z recyklovaných plastových materiálů s nižší uhlíkovou stopou.

1.4 ZÁVĚR SOUČASNÉHO STAVU SNIŽOVÁNÍ SPOŘEBY ENERGIE PŘI TRANSPORTU VZDUCHU

Na základě výše uvedených referencí lze konstatovat, že snižování spotřeby energie u zařízení zajišťujících transport vzduchu je aktuální téma v souvislosti s udržitelnou výstavbou. Současné návrhy počítají s tím, že od roku 2030 budou všechny nové budovy v bezemisním standardu a do roku 2050 budou v bezemisním standardu prakticky všechny stávající budovy. Pojem bezemisní budovy bude zřejmě upřesněn později v podobě příslušné vyhlášky, jako dříve pojem budovy s téměř nulovou spotřebou energie, který byl upřesněn vyhláškou 264/2020. Na základě výše uvedených informací byl popsán aktuální trend významného snižování spotřeby energie, mimo jiné u zařízení zajišťujících transport vzduchu, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků a budov.

S ohledem na kontext úspor energií se tato práce dále zabývá snížením spotřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu prostřednictvím snížení měrného příkonu ventilátoru.

S ohledem na připravenou vyhlášku, která nahradí současnou platnou vyhlášku č. 264/2020 Sb., jsou v této práci zkoumány a porovnávány environmentální přínosy a možnosti výroby volných oběžných kol z recyklovaných plastových materiálů s nižší uhlíkovou stopou.

1.5 REŠERŠE OPTIMALIZACE AERODYNAMICKÉ EFEKTIVITY

V této kapitole jsou níže uvedeny tři principy a metody zlepšení účinnosti zařízení za účelem zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře a snížení energetické potřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu. Autoři přistupují k výzkumu numericky a experimentálně.

REŠERŠE RELEVANTNÍCH ZDROJŮ

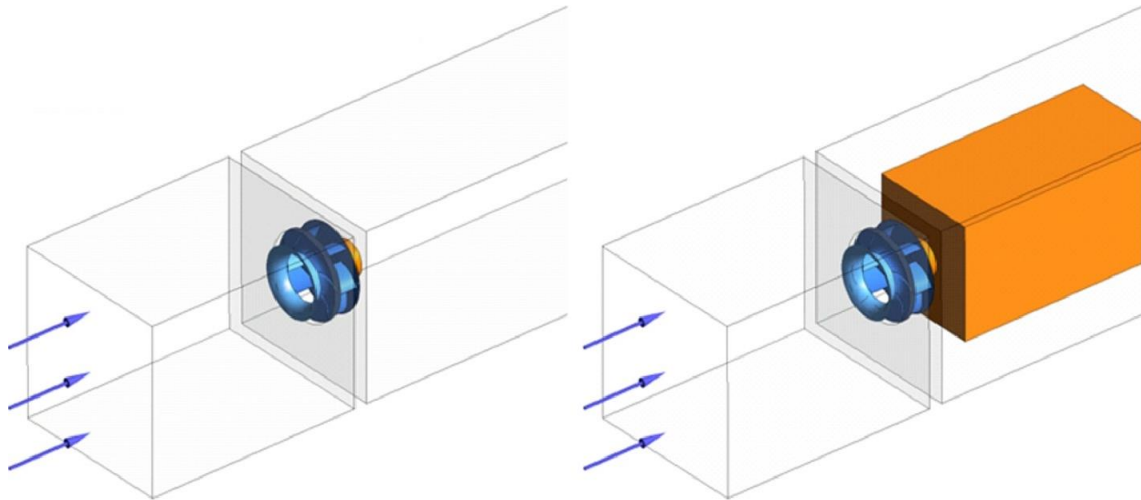
Jednou z možností, jak snižovat spotřeby energií je zvyšování účinností systémů [11]. Autoři rešeršního článku [19] popisují nové uspořádání vzduchotechnické jednotky s volnoběžným kolem ventilátoru pomocí „pressure regain unit“ tedy jednotky opětovného získání tlaku, která oproti prázdnému vzduchotechnickému potrubí umožňuje zvýšení účinnosti až o 10 %.

Další rešeršní článek popisuje další inovativní přístup v hledání efektivního zvyšování účinnosti ventilátoru. Autoři ve své publikaci posuzují vylepšení energetické účinnosti vzduchotechnických jednotek pomocí numerického nástroje výpočetní dynamiky tekutin (CFD) pro dvě různé jednotky pro usměrňování proudění vzduchu. Numerický model poskytl rozumnou shodu rychlosti proudění vzduchu s experimentálními výsledky reálných podmínkách bylo dosaženo zlepšení statického tlaku ventilátoru o 15,1 % [20].

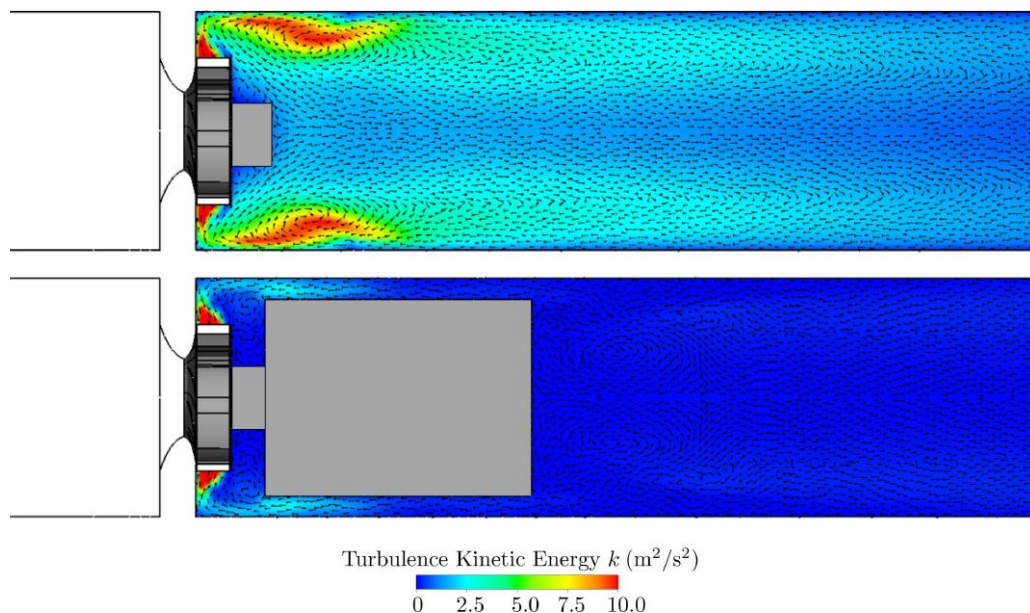
Autoři dalšího článku [21] přichází s numerickou a experimentální metodou měření při vysokých otáčkách s referenčním kolem dmychadla z hliníku a z polymeru. Přičemž výroba pomocí 3D tisku přináší úspornější dobu výroby a náklady se složitými tvary. Výroba produktů z plastu je obecně energeticky úspornější a udržitelnější než výroba z kovů.

1.5.1 ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI VOLNOBĚŽNÝCH KOL U VENTILÁTORŮ PROSTŘEDNICTVÍM JEDNOTKY PRO OPĚTOVNÉ ZÍSKÁNÍ TLAKU POUŽITÉ VE VZDUCHOTECHNICKÉ JEDNOTCE

Autoři ve své publikaci popisují metody zkoumání chování jednotky opětovného získání tlaku u ventilátoru s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí pomocí experimentálního měření a numerické simulace CFD [19]. Měření v článku ukazují, že ve srovnání s volně běžícím ventilátorem v prázdném potrubí je možné pomocí jednotky opětovného získání tlaku zvýšení účinnosti o 10 %.



Obr. 1.6: Vlevo standardní ventilátor s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí a vpravo s jednotkou opětovného získání tlaku [19].

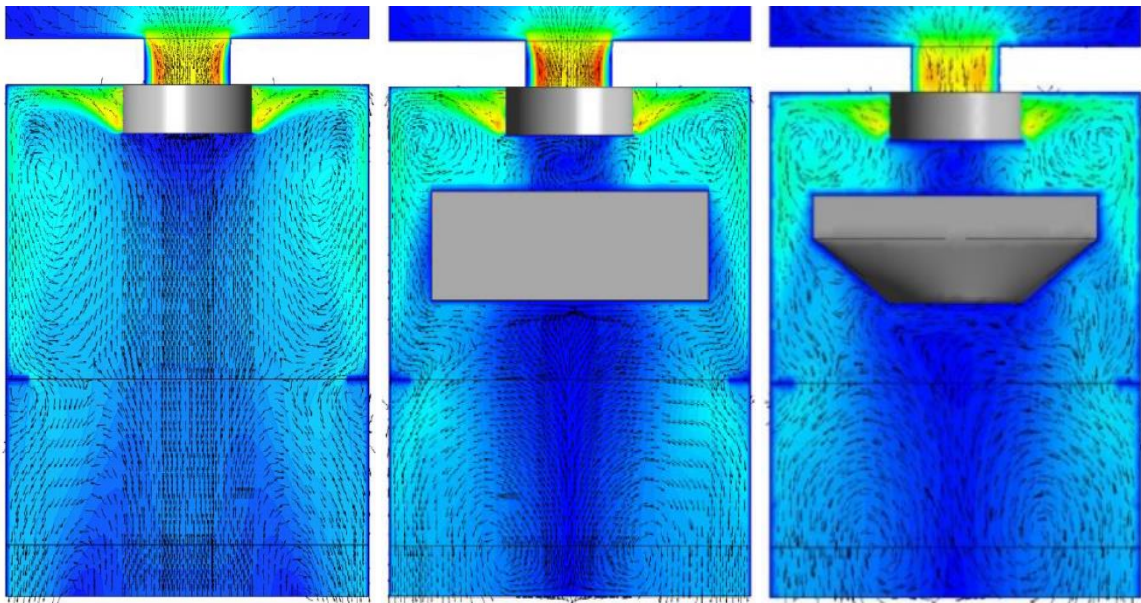


Obr. 1.7: Standardní ventilátor s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí a dole s jednotkou opětovného získání tlaku [19].

1.5.2 Numerické modelování a optimalizace vzduchotechnické jednotky

Autoři ve své publikaci posuzují vylepšení energetické účinnosti vzduchotechnických jednotek pomocí numerického nástroje výpočetní dynamiky tekutin (CFD) pro dvě různé jednotky pro usměrňování proudění vzduchu. Numerický model poskytl rozumnou shodu rychlosti proudění vzduchu a předpokládaná zjednodušení s experimentálními výsledky.

V reálných podmínkách bylo dosaženo zlepšení statického tlaku ventilátoru o 15,1 % ve srovnání s případem bez kvádřové jednotky pro usměrňování proudění vzduchu. Dále byl učiněn závěr, že axiální složka rychlosti vzduchu na výstupu ventilátoru může mít rozhodující vliv na životaschopnost jednotky usměrňující proud vzduchu. Konečně vylepšená geometrie FCU s novým tvarem tělavedla k dalšímu zlepšení nárůstu statického tlaku ventilátoru o 6,1 % [20].



Obr. 1.8: Vlevo rychlost proudění pro standardní ventilátor s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí a vpravo s jednotkami pro usměrnění proudu vzduchu, s cílem opětovného získání tlaku [20].

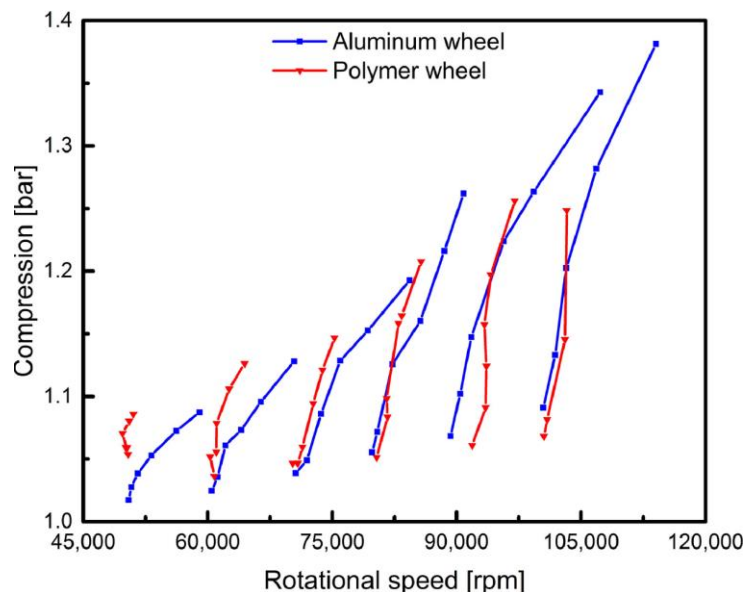
1.5.3 NUMERICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUMY TURBODMYCHADEL A KOMPRESOROVÝCH KOL VYROBENÝCH Z ADITIVNĚ VYROBENÝCH PLASTŮ

Studie zkoumá provozní vlastnosti kompresoru turbodmychadla s komponenty vyrobených tiskovou technologií 3D tisku technologií multiJet. „V současné době probíhají celosvětově studie, které mají za cíl se rozvíjet části inovativních strojů s průtokem tekutin prostřednictvím aditivních výrobních technik. Tato výrobní technika má ve srovnání s konvenčními prototypovacími metodami používanými pro komponenty kratší dobu výroby a náklady se složitými tvary“ [21].

Experimentální měření bylo prováděno při vysokých otáčkách s referenčním kolem z hliníku a z polymeru. Článek dále popisuje různé provozní vlastnosti, přesné charakteristiky kompresoru a vibrodiagnostickou analýzu.



Obr. 1.9: Vlevo originální hliníkové kolo kompresoru a vpravo polymerové kolo [21].



Graf 4.4: Kompresní tlak vs. rychlost otáčení (experimentální výsledky kompresoru turbodmychadla) originální hliníkové kolo kompresoru vs. polymerové kolo [21].

Při škrcení hmotnostního toku na výstupu dmychadla vychází porovnání kompresního tlaku téměř identicky. U hliníkového kola byl získán vyšší rozsah otáček. To lze vysvětlit nižší hmotností polymerového kola a nižší tuhostí jeho lopatek [21].

S ohledem na kontext porovnávání provozních vlastností výrobků vyrobených konvenčními metodami a metodou 3D tisku je v této práci rozsáhlým experimentálním měřením porovnán a následně verifikován rozsah otáček na dvou ocelových kolech a jejich plastových geometrických kopiích.

1.6 ZÁVĚR REŠERŠNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACE AERODYNAMICKÉ EFEKTIVITY

Byly uvedeny tři principy zlepšení účinnosti zařízení za účelem snížení energetické potřeby zařízení zajišťujících transport vzduchu, jejichž autoři přistupují k výzkumu numericky a experimentálně.

První řešení popisovalo nové uspořádání vzduchotechnické jednotky s volnoběžným kolem ventilátoru pomocí „pressure regain unit“ tedy jednotky opětovného získání tlaku, která oproti prázdnému vzduchotechnickému potrubí umožňuje zvýšení účinnosti až o 10 %.

Podstatou druhého inovativního přístupu bylo hledání efektivního zvyšování účinnosti ventilátoru pomocí usměrňování proudění vzduchu. Numerický model poskytl rozumnou shodu rychlosti proudění vzduchu a následně s experimentálními výsledky reálných podmínkách bylo dosaženo zlepšení statického tlaku ventilátoru o 15,1 %.

Třetí inovativní technické řešení bylo vyrobeno z udržitelného materiálu a následně bylo porovnáno metodou numerickou a experimentální při vysokých otáčkách s referenčním kolem z hliníku. Při škrčení hmotnostního toku na výstupu kompresoru vycházelo porovnání kompresního tlaku téměř identicky, ale u hliníkového kola byl získán vyšší rozsah otáček.

S ohledem na kontext porovnávání provozních vlastností výrobků vyrobených konvenčními metodami a metodou 3D tisku je dále v této práci rozsáhlým experimentálním měřením porovnán a následně verifikován rozsah otáček na dvou ocelových kolech a jejich plastových geometrických kopiích.

Dílčí výsledky a závěry rešeršních článků nám ukazují, jakým směrem se ubírat ke zlepšení hydraulických vlastností vzduchotechnických jednotek, výrobků z udržitelných materiálů, při zachování podobných hydraulických vlastností a naznačují trend budoucího a rozsáhlejšího výzkumu.

2 VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

2.1 RELEVANCE A KONTEXTUALIZACE PROBLEMATIKY

Podle výše zmíněného legislativního vývoje podloženého rešeršní prací je možné stanovit další směřování vývoje stavu legislativních požadavků v oblasti vysoce účinných technických zařízení budov s ohledem na budovy v bezemisním standardu. Na základě evropských legislativních a normalizačních tendencí lze predikovat požadavky na zvýšení účinnosti technických systémů budov při jejich instalaci, nahrazení, nebo modernizaci. Energetická náročnost systému nuceného větrání je a bude základním ukazatelem dílčí dodané energie v nástrojích hodnocení energetické náročnosti budovy, jako jsou průkazy energetické náročnosti budovy, energetické pasy a vnitrostátní plány pro „renovaci“ budov.

2.2 CÍLE PRÁCE

Na základě výše zmíněné kontextualizace problematiky je možné definovat oblast cílů disertační práce, které budou dosaženy systematickou syntézou originálních výzkumných projektů, které přispívají k poznání v oblasti transportu vzduchu ve ventilátorových komorách s volným oběžným kolem. Analýza multidimenzionálních přístupů a definování rozdílů mezi standardními řešeními a inovativními řešeními víření vzduchu s udržitelným přesahem v rámci bezemisního standardu a cirkulární ekonomiky bude ověřena **experimentálními přístupy** skrze porovnávací parametr aerodynamické účinnosti ventilátoru vyjádřeným měrným příkonem ventilátoru.

HLAVNÍ CÍL

Hlavním cílem disertační práce je dosáhnout jednoznačného snížení měrného příkonu ventilátoru a stanovit strukturované grafické znázornění **zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře**. Grafické znázornění v podobě diagramu charakteristické křivky transportu vzduchu ve ventilátorové komoře vznikne pomocí syntézy originálních výzkumných projektů a dílčích cílů.

DÍLČÍ CÍLE

Splnění hlavního cíle disertační práce je opřeno o následující originální výzkumné projekty:

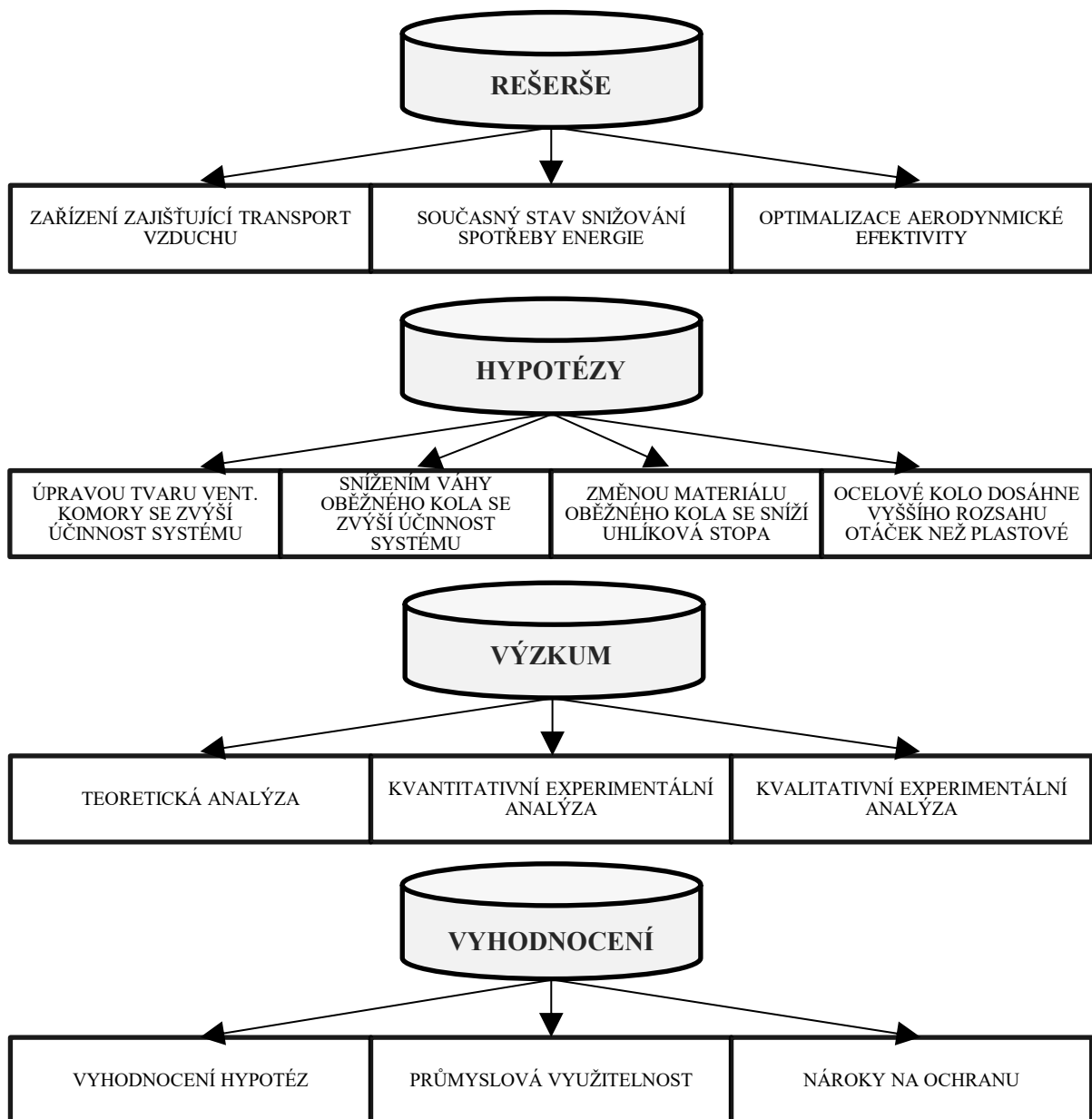
- Dílčí cíl 1: Snížení měrného příkonu ventilátoru prostřednictvím optimalizace proudění vzduchu ve ventilátorové komoře VZT pomocí redistributoru vzduchu.
- Dílčí cíl 2: Vývoj volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek, které mísí proudění vzduchu ve ventilátorové komoře
- Dílčí cíl 3: Snížení měrného příkonu ventilátoru pomocí optimalizace běžného volného oběžného kola lopatkového ventilátoru prostřednictvím geometrické kopie vyrobené z lehčího materiálu.
- Dílčí cíl 4: Snížení měrného příkonu ventilátoru pomocí optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek prostřednictvím geometrické kopie vyrobené z lehčího materiálu.
- Dílčí cíl 5: Vývoj volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů.

Uvedenými dílčími cíli a jejich synergickým působením lze vytyčit hlavní cíl disertační práce a to: **Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem**.

2.3 STANOVENÍ VĚDECKÝCH HYPOTÉZ

V návaznosti na hlavní cíl budou u originálních výzkumných projektů a dílčích cílů vyhodnoceny následující hypotézy:

1. **HYPOTÉZA:** Úprava geometrického tvaru ventilátorové komory a optimalizace tlakové ztráty ve ventilátorové komoře umožní proud vzduchu plynuleji změnit směr víření kolem rohů komory a ulehčí výtok vzduchu z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše, čímž se zvýší účinnost systému.
2. **HYPOTÉZA:** Inovativní oběžné kolo vyrobené z „udržitelných“ lehkých materiálů bude mít lepší aerodynamickou účinnost ventilátoru.
3. **HYPOTÉZA:** Environmentální opatření pomocí inovativního oběžného kola z „udržitelných“ lehkých materiálů sníží uhlíkovou stopu oběžného kola.
4. **HYPOTÉZA:** Ocelové kolo dosáhne vyššího rozsahu otáček než plastové.



Obr. 2.1: Vizualizace sekvencí vztahů v rámci dedukčního výzkumu.

3 METODY ZPRACOVÁNÍ

REŠERŠE

Rešerše současných zařízení zajišťujících transport vzduchu

Uvedení současného poznání se zaměřením na ventilátorové komory s volným oběžným kolem přímo namontovaným na jednom rámu a faktory ovlivňující aerodynamickou účinnost systému.

Rešerše současného stavu snižování spotřeby energie

Přehled o aktuálním vývoji snižování spotřeby energie u zařízení zajišťujících transport vzduchu, snížení potřeby těžby původních materiálů a snižováním poptávky po nových materiálech, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků a budov.

Rešerše optimalizace aerodynamické efektivity

Uvedení systematického sběru informací na téma Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem a souhrn aktuálních poznatků.

TEORETICKÁ ANALÝZA

Teoretický rozbor faktorů a okrajových podmínek, které mohou mít vliv na zvýšení účinnosti systému. Analýza zahrnuje vytvoření vědeckého přístupu, který bude následně testován pomocí experimentálních metod.

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

Proces, při kterém jsou zkoumány jednotlivé výzkumné projekty. Analýza zahrnuje opakovaná měření, statistické analýzy dat a dílčí závěry jednotlivých výzkumných projektů.

Kvantitativní obsahová analýza

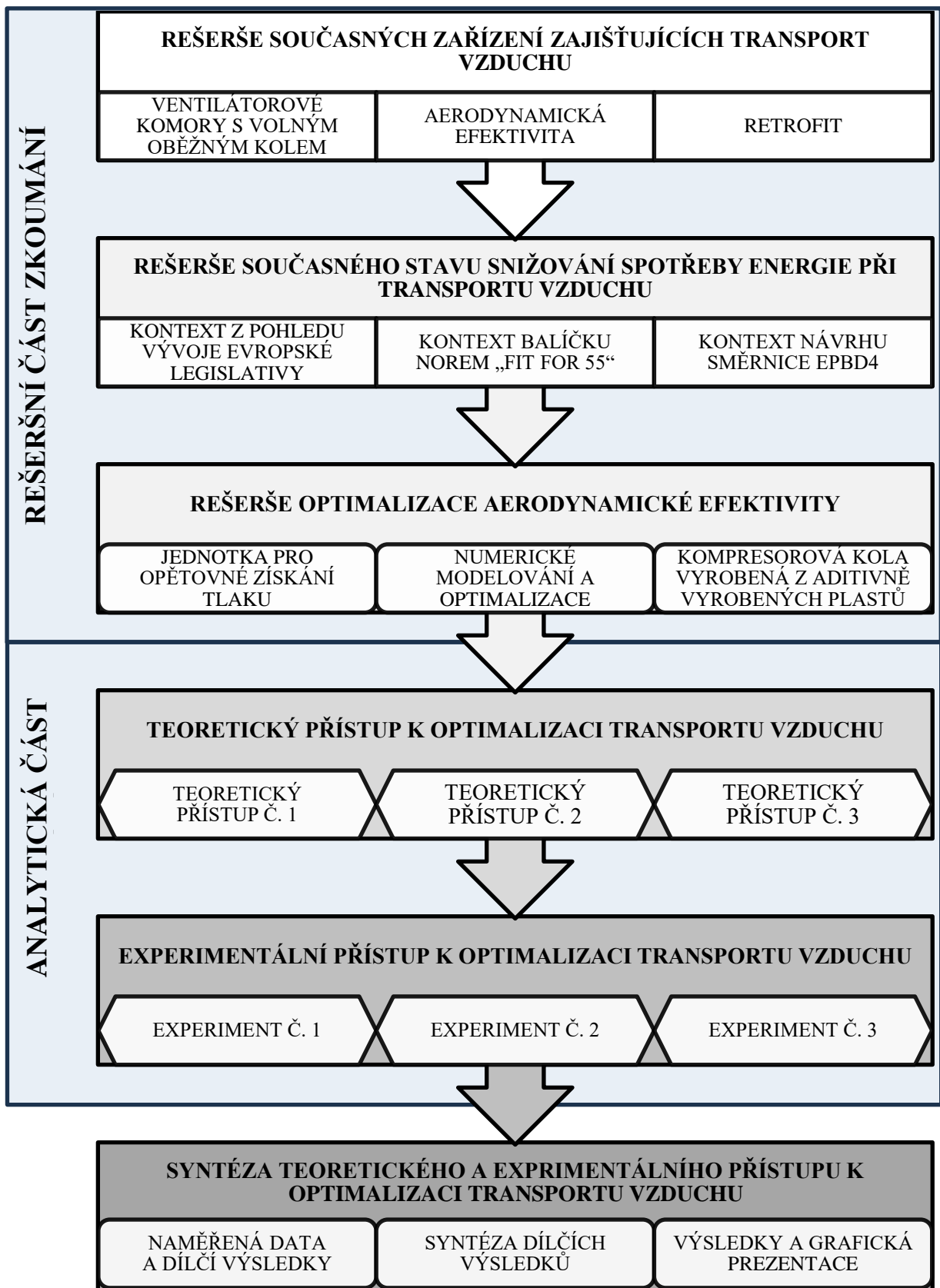
Systematické měření základních veličin při konstantních průtocích vzduchu.

Kvalitativní přístup

Koncepční a analytické zaměření na faktory a okrajové podmínky, které mohou mít vliv na zvýšení účinnosti systému, pro které je zkoumání inovativních přístupů přínosné a pro které přínosné není.

SYNTÉZA VÝZKUMU

Interpretace výsledků získaných v průběhu teoretických analýz a experimentálních měření výzkumných projektů, které jsou shrnuty do jednoho celku. Výsledky výzkumu budou posouzeny na jejich aerodynamickou účinnost, environmentální přínos a další vlastnosti a doporučení. Grafické znázornění v podobě diagramu charakteristické křivky vznikne pomocí analytických vztahů odvozených z fyzikálních principů, jako je zachování hmotnosti, energie a hybnosti, které jsou využívány pro řešení problémů v oblasti proudění tekutin a mechaniky tekutin.



Obr. 3.1: Diagram chronologického postupu optimalizujícího transport vzduchu ve ventilátorové komoře.

4 TEORETICKÝ PŘÍSTUP K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU

4.1 TEORIE K EXPERIMENTŮM OPTIMALIZUJÍCÍ TRANSPORTU VZDUCHU VE VENTILÁTOROVÉ KOMOŘE

Turbulentní proudění vzduchu v sací a výtlačné komoře vzduchotechnické jednotky způsobuje tlakovou ztrátu ventilátorů. Do vzduchotechnických jednotek jsou osazeny ventilátory o výkonových parametrech naměřených v laboratořích za ideálních okrajových podmínek na kruhové cloně. To v praxi způsobuje často těžce řešitelný problém, kdy nainstalované ventilátory v reálné ventilátorové skříni nedosahují projektovaných parametrů [7].

Teorie optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře prostřednictvím inovativních přístupů reaguje na existující současné problémy vzduchotechnických jednotek, u kterých výrobce ventilátoru uvádí idealizované, v praxi nedosažitelné hodnoty dopravovaného tlaku ventilátoru, který je v laboratorních podmínkách měřen na kruhovém tvaru měřicí clony a tím dosahuje lepších hydraulických poměrů. V hranatém tvaru vzduchotechnické jednotky potom vznikají víry, které tvoří tlakovou ztrátu. Tři teoretické přístupy optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře jsou dále uvedeny pro tři následující experimenty:

Experiment Č. 1: optimalizace víření vzduchu ve vzduchotechnických jednotkách pomocí redistributoru vzduchu.

Experiment Č. 2: optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru pomocí konkávní a konvexní geometrií lopatek.

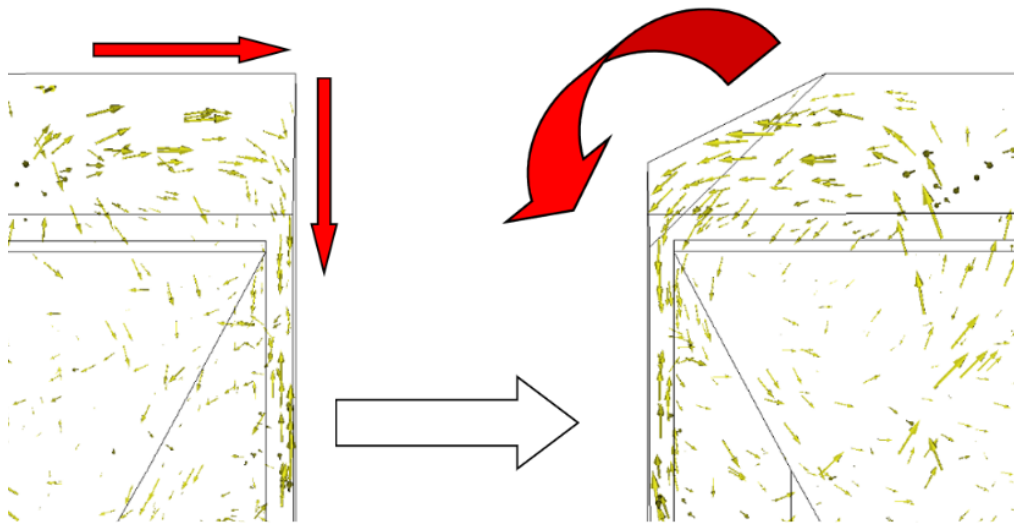
Experiment Č. 3: optimalizace volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů a retrofit.

Experiment Č. 4: optimalizace dvouřadého volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu a recyklaci materiálů.

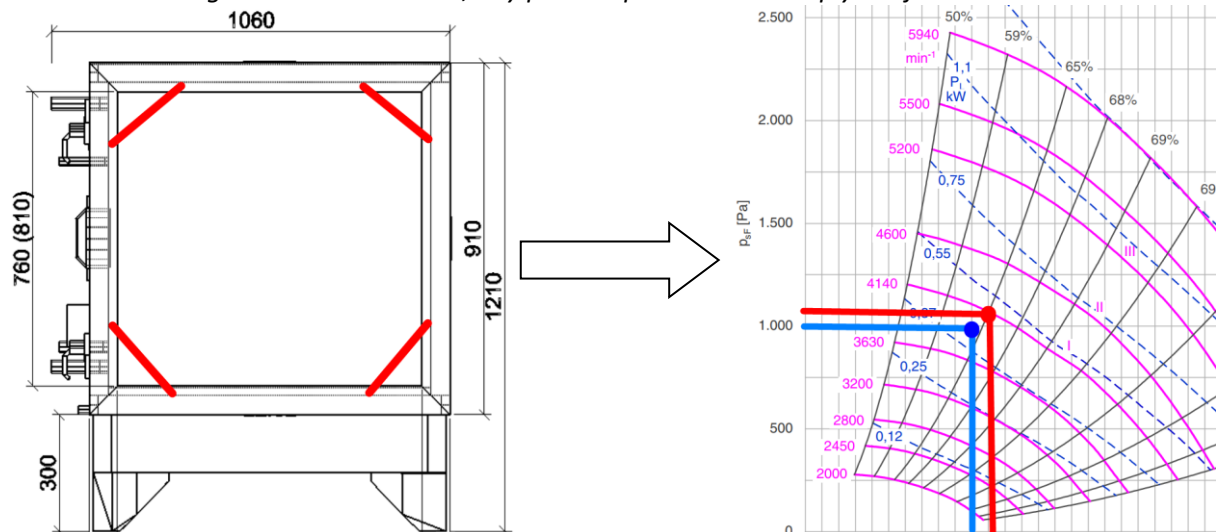
4.1.1 TEORIE K EXPERIMENTU Č. 1 OPTIMALIZACE VÍŘENÍ VZDUCHU VE VZDUCHOTECHNICKÝCH JEDNOTKÁCH POMOCÍ REDISTRIBUTORU VZDUCHU

Inovativní přístup se zabývá prouděním vzduchu v uzavřeném vnitřním prostoru hranatých ventilátorových komor, které jsou nedílnou součástí většiny vzduchotechnických jednotek. Princip náběhových plechů je pomocí proudu vzduchu změnit směr víření a ulehčit výtok vzduchu z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše. Do vzduchotechnické jednotky budou umístěny náběhové plechy, které změni víření vzduchu tak, aby připomínalo dopravování vzduchu v kruhovém potrubí.

Zkoumání náběhových plechů bude spočívat v nalezení optimálního umístění náběhových plechů, povrchové úpravě plechů a instalaci ve ventilátorové komoře vzduchotechnické jednotky. Pro návrh a validaci dat aerodynamického modelu je využita technologie softwaeru 3D modeláře a CFD simulace.



Obr. 4.1: Pohled na CFD model. Geometrie pravého úhlu neumožní plynulé víření vzduchu uvnitř ventilátorové komory a společně se sekundárními víry tvoří lokální tlakovou ztrátu. Inovativní přístup má za cíl změnit geometrii v rozích tak, aby pomohl proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření.



Obr. 4.2: Řez vzduchotechnickou jednotkou, do které se vloží náběhové plechy a následně dojde k příznivému posunutí pracovního bodu ventilátoru. (Zdroj charakteristiky ventilátoru: ZIEHL-ABEGG)

ANALÝZA POMOCÍ CFD SIMULACE

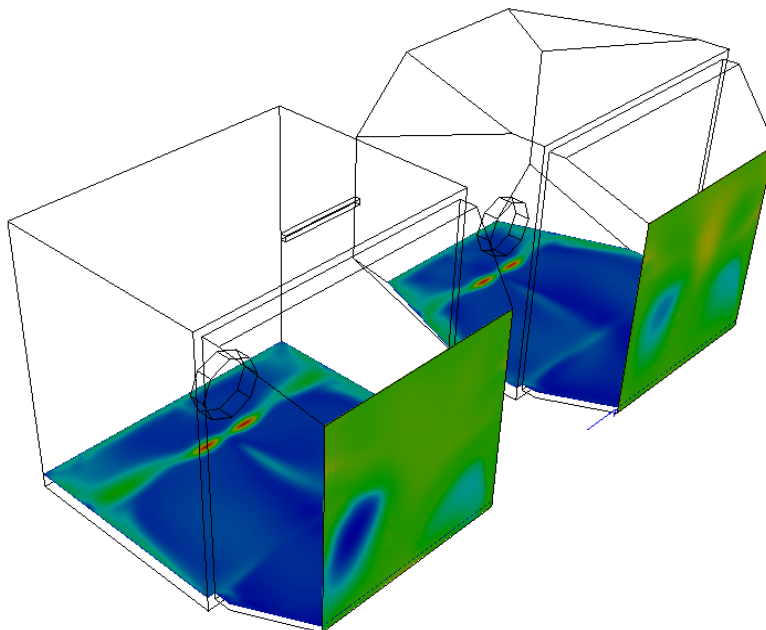
Na základě rozměrů reálné ventilátorové komory a umístění a průměru oběžného kola je vytvořen geometrický model tak, aby odpovídal experimentálnímu modelu. Geometrie modelu byla vytvořena v programu SketchUp a následně byla exportována ve formátu .STL do simulačního CFD programu BlueCFD-AIR¹.

Tato konkrétní CFD simulace interaguje s experimentálním měřením rychlostí průtoku vzduchu, poukazuje na předpokládané rozdílné tlakové ztráty proudění vzduchu pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory prostřednictvím inovativního redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů.

OKRAJOVÉ PODMÍNKY SIMULACE CFD S REDISTRIBUTOREM VZDUCHU

Na vstupu vzduchu do ventilátorové komory skrze stacionární volné oběžné kolo je pro okrajové podmínky² stanoven průtok vzduchu 2000 m³/hod a na výstupu z jednotky nastaven po celém průřezu stacionární tlak 750 Pa.

CFD model níže neslouží k přesnému vyjádření ustálených hydraulických veličin ve ventilátorové komoře, které by byly následně podrobeny experimentálnímu ověření, ale pouze k sledování trendu, při kterém dochází k příznivější změně víření proudu vzduchu směrem ven z ventilátorové komory při zachování stejného, nebo mírně příznivějšího stacionárního tlaku ve ventilátorové komoře.



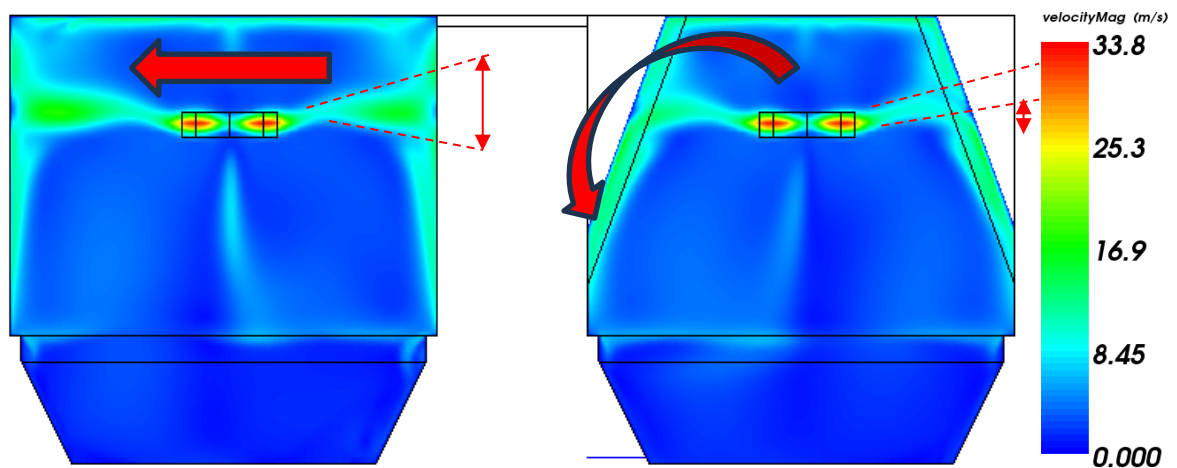
Obr. 4.3: Axonometrický pohled na CFD model a roviny řezu ventilátorovou komorou.

¹ Program BlueCFD-AIR umožňuje dynamické výpočty tekutin, obsahuje nástroj pro generování „mesh“ sítě, řešič výpočtu pro tok tekutin a prostředí pro prezentaci výsledků.

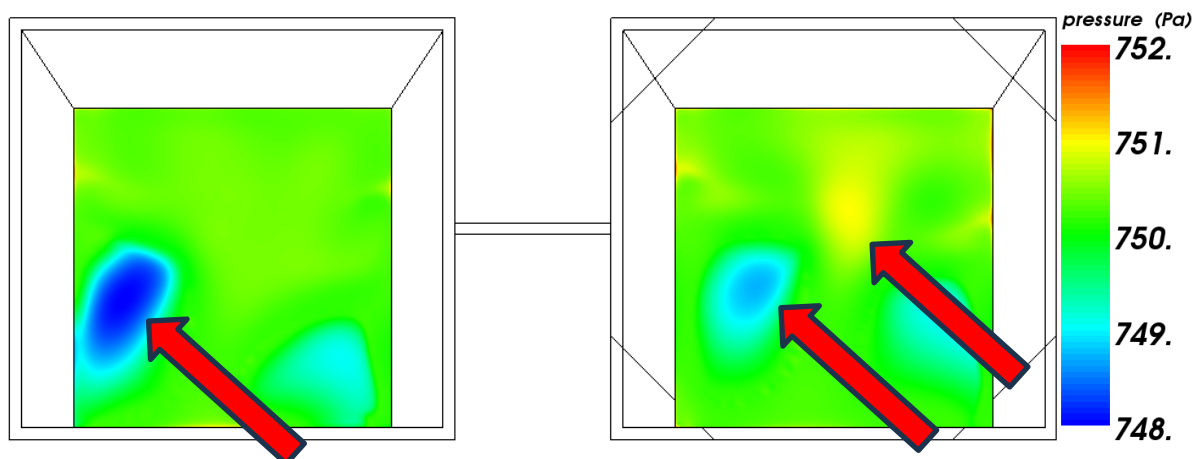
² Zbývající část okrajových podmínek je uvedena v samostatné příloze „okrajové podm. CFD simulace“

POSOUZENÍ CFD SIMULACE

Z analýzy výzkumu pomocí CFD simulace bylo prokázáno nerovnoměrné rozvrstvení transportovaného proudu vzduchu ve ventilátorové komoře. Je prokázáno, že transportovaný izotermní, nestlačitelný vzduch v uzavřeném systému ventilátorové komory jednoznačně, predikovatelně přilne ke stěně ventilátorové komory a dále se šíří přilnutý podél stěny komory směrem k výtlaku. Pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory je prokázáno, že transportovaný izotermní, nestlačitelný vzduch v uzavřeném systému ventilátorové komory jednoznačně, predikovatelně přilne k povrchu náběhových plechů, mění směr víření a následně se dále šíří přilnutý podél stěny komory směrem k výtlaku.



Obr. 4.4: CFD simulace rychlosti průtoku vzduchu ventilátorovou komorou. Vlevo je půdorysný pohled na CFD model s pravoúhlou geometrií ventilátorové komory a vpravo proudění vzduchu pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory prostřednictvím inovativního redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů, které pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření.

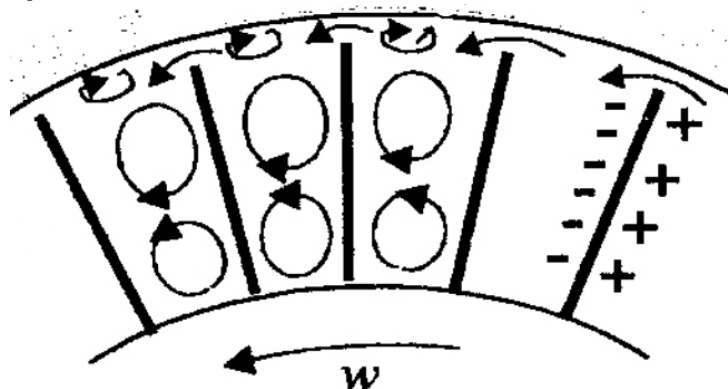


Obr. 4.5: CFD simulace stacionárního tlaku ve ventilátorové komoře. Vlevo je pohled na CFD model s pravoúhlou geometrií ventilátorové komory a vpravo stacionární tlak vzduchu pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory prostřednictvím inovativního redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů, které pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření.

4.1.2 TEORIE K EXPERIMENTU Č. 2: OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA LOPATKOVÉHO VENTILÁTORU POMOCÍ KONKÁVNÍ A KONVEXNÍ GEOMETRI LOPATEK

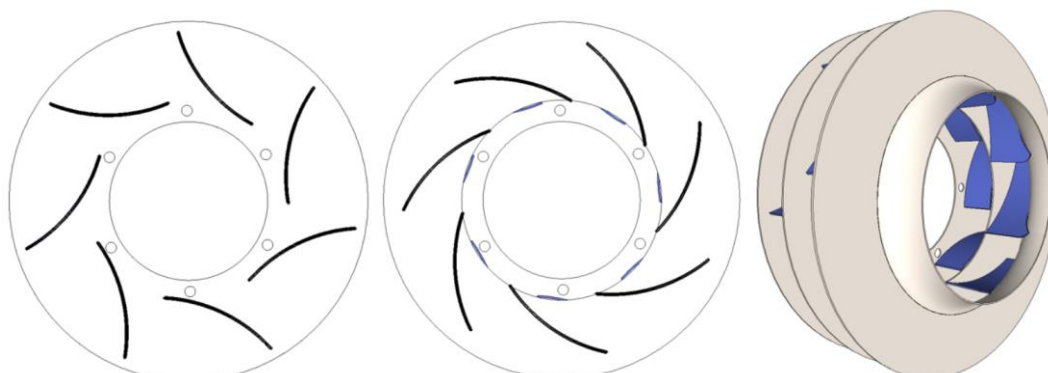
Inovativní přístup se zabývá prouděním vzduchu v uzavřeném vnitřním prostoru hranatých ventilátorových komor, které jsou nedílnou součástí většiny vzduchotechnických jednotek.

Princip inovativního přístupu je představit volné oběžné kolo pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem, které produkuje **menší a rovnoměrnější proudy vzduchu**, které spolu interagují a pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření ve ventilátorové komoře a následným homogenějším proděním vzduchu eliminují tlakové ztráty ventilátorové komory [22].



Obr. 4.6: Vznik menších vířů v rotující lopatkové mříži, které se lépe přizpůsobí směru rotace víření ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem [23].

Cílem technického řešení je představit oběžné kolo ventilátoru, které spočívá v tom, že po jeho tloušťce jsou uspořádané vedle sebe po vnějším i vnitřním obvodě otevřené krajní disky a mezi nimi střední disk, přičemž krajní disk blíže k sání vzduchotechnické jednotky a střední disk jsou vzájemně spojeny rovnoměrně rozmístěnými konkávními lopatkami. Střední disk a krajní disk blíže k výtlačku vzduchotechnické jednotky jsou vzájemně spojeny rovnoměrně rozmístěnými konvexními lopatkami. Toto uspořádání, spolu s objímkou na výstupní straně, přiléhá na krajní disk, tvoří kompaktní celek, přičemž konkávní lopatky jsou v čelním řezu orientovány šikmo pod úhlem 35° a jsou ve tvaru zakřivených oblouků, které jsou vypouklé směrem dovnitř oběžného kola. Konvexní lopatky jsou orientovány šikmo pod úhlem a jsou ve tvaru zakřivených oblouků, které jsou vůči středu oběžného kola vyduuté, přičemž sestava konkávních lopatek a sestava konvexních lopatek jsou vůči sobě úhlově přesazené [22].



Obr. 4.7: Řez jednotlivými řadami inovativním oběžným kolem radiálního ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek a obrázek celého volného oběžného kola.

4.1.3 TEORIE K EXPERIMENTU Č. 3 A Č. 4 OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ŽIVOTNÍ CYKLUS PRODUKTU, RECYKLACI MATERIÁLŮ A RETROFIT

Vzhledem ke stávající situaci na trhu s energiemi a společenským tlakem na výrobu produktů z „udržitelných“ materiálů a evropské strategie v rámci Nového akčního plánu pro oběhové hospodářství, která uvádí, mimo jiné, následující zásady udržitelnosti:

- Zlepšení životnosti výrobků a jejich opětovné použitelnosti, možnosti modernizace a opravitelnosti řešení přítomnosti nebezpečných chemických látek ve výrobcích a zvyšování jejich energetické účinnosti a účinného využívání zdrojů.
- Zvýšení obsahu recyklovaných materiálů ve výrobcích a zároveň zajištění jejich výkonnosti a bezpečnosti.
- Umožnění repasování a vysoce kvalitní recyklace.
- Snížení uhlíkové a environmentální stopy [24].

se snažíme vytvořit, ve spolupráci s Ústavem pozemního stavitelství, postup **3D tisku volného oběžného kola** pro ventilátory s volným oběžným kolem. Oběžné kolo lze po dobu životnosti ventilátoru **vyměnit za oběžné kolo s vyšší účinností dopravovaného vzduchu** podle toho, jakým směrem se bude ubírat vývoj ideálního tvaru oběžných kol. Oběžné kolo je dále vyrobeno z plastových recyklátů s vysokou tepelnou stabilitou a dostatečnými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí. Plastové oběžné kolo oproti ocelovému spotřebuje při výrobě a následné recyklaci méně energie [25].

Předpokládaným přínosem experimentálního měření bude ověření, že inovativní řešení nenavýšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky vlivem nižší hmotnosti volného oběžného kola a tím souvisejícími menšími třecími silami působícími na stator motoru ventilátoru. Dalším předpokládaným přínosem uvedeného experimentu je ukázat způsob, jakým směrem se ubírat ke zlepšení hydraulických vlastností ve ventilátorových jednotkách a naznačit trend možných budoucích a rozsáhlejších aplikací výrobců vzduchotechnických systémů s cílem omezení tlakových ztrát s environmentálními aspekty snížení potřeby těžby původních materiálů snižováním poptávky po nových materiálech, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a **prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků** u vzduchotechnických systémů.



Obr. 5.8: Technické řešení vyrobené z moderních udržitelných materiálů na bázi polymerů pomocí 3D tisku (Zdroj: Fotografie poskytnuta Ústavem pozemního stavitelství.)

4.2 ZÁVĚR TEORIE K EXPERIMENTŮM OPTIMALIZUJÍCÍ TRANSPORTU VZDUCHU VE VENTILÁTOROVÉ KOMOŘE

Byly uvedeny tři teoretické principy rozboru faktorů a okrajových podmínek, které mohou mít vliv na zvýšení účinnosti systému. Analýza zahrnuje vytvoření vědeckého přístupu, který bude následně testován pomocí experimentálních metod.

První řešení popisovalo inovativní uspořádání ventilátorové komory s volnoběžným kolem pomocí náběhových plechů, které jsou velmi levné řešení na materiál, pracnost montáže, údržbu a které budou testovány, zda pasivně navyšují průtok vzduchu vzduchotechnickou jednotkou.

Podstatou druhého inovativního přístupu je představit volné oběžné kolo pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem, které produkuje menší a rovnoměrnější proudy vzduchu, které spolu interagují a pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření ve ventilátorové komoře.

Třetí inovativní technické řešení bylo vyrobeno z udržitelného materiálu a následně bude porovnáno experimentální metodou při vysokých otáčkách s referenčními koly z oceli. Naměřená data budou posouzena z hlediska zlepšení aerodynamické efektivity, snížení uhlíkové a environmentální stopy při zachování podobných hydraulických vlastností ventilátorové komory s volným oběžným kolem.

5 EXPERIMENTÁLNÍ PŘÍSTUP K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU

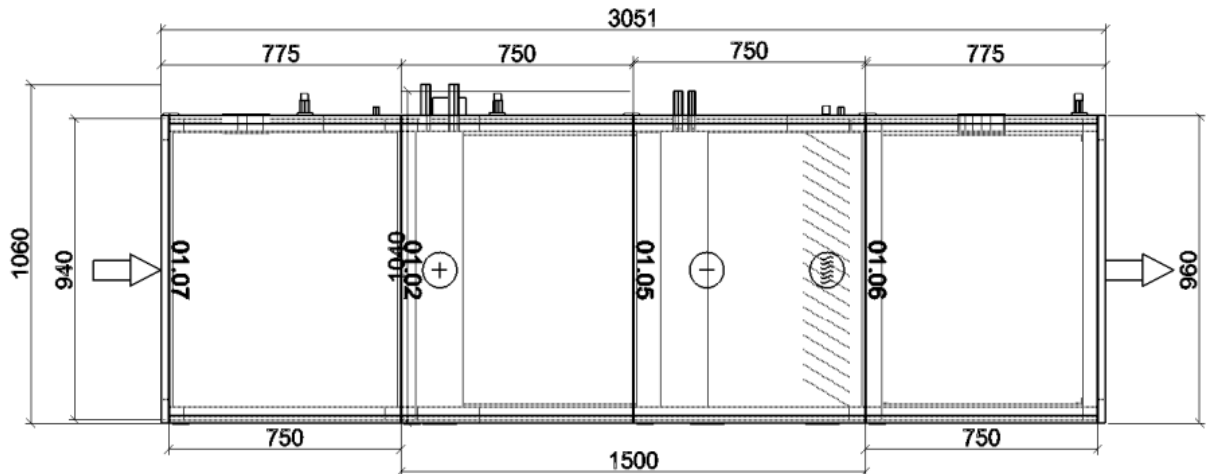
5.1 ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Turbulentní proudění vzduchu ve výtlačné komoře vzduchotechnické jednotky způsobuje tlakovou ztrátu ventilátorů. Do vzduchotechnických jednotek jsou osazeny ventilátory o výkonových parametrech naměřených v laboratořích za ideálních okrajových podmínek na kruhové cloně. To v praxi způsobuje často těžce řešitelný problém, kdy nainstalované ventilátory v reálné ventilátorové skříni nedosahují projektovaných parametrů. Většina výrobců tento problém neřeší. Cílem technických řešení je představit vývoj, pomocí kterého se optimalizují tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem. První řešení popisuje princip náběhových plechů, kde je cílem pomoci proudu vzduchu změnit směr víření a ulehčit výtok vzduchu z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše. Podstatou druhého inovativního technického řešení je představit volné oběžné kolo, které vychází ze spojení dvou řad zakřivených lopatek konkávního a konvexního tvaru, které slouží pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem, které produkuje menší, rovnoměrnější, vzájemně interagující proudy, které pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření ve ventilátorové komoře. Podstatou třetího inovativního technického řešení je představit moderní výrobu produktů z „udržitelných“ materiálů za pomoci 3D tisku volného oběžného kola pro ventilátory s volným oběžným kolem. Oběžné kolo lze po dobu životnosti ventilátoru vyměnit za oběžné kolo s vyšší účinností dopravovaného vzduchu podle toho, jakým směrem se bude ubírat vývoj ideálního tvaru oběžných kol. Oběžné kolo je dále vyrobeno z plastových recyklátů s vysokou tepelnou stabilitou a dostatečnými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí. Plastové oběžné kolo oproti ocelovému spotřebuje při výrobě a následné recyklaci méně energie [14], [15], [16].

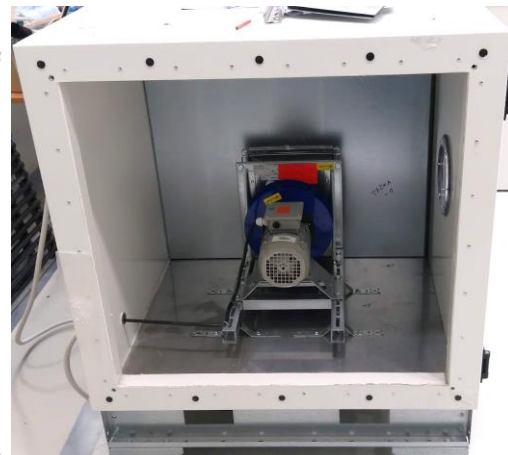
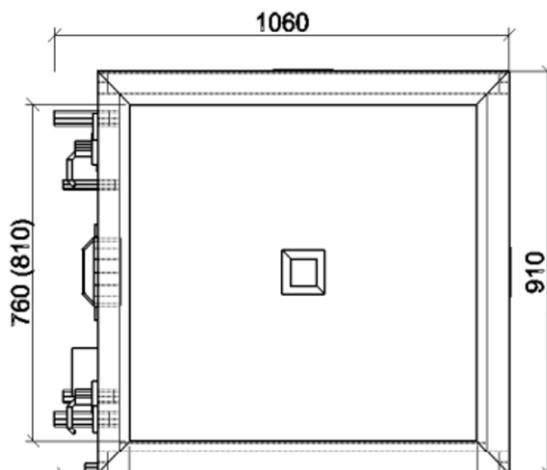
Tato část byla zpracována na bázi dřívějších prací a zkušeností autora a Ústavu technických zařízení budov, Ústavu pozemního stavitelství, které byly zakončeny zápisem do rejstříku užitných vzorů. Výzkum a vývoj, který byl prováděn a stále probíhá byl prováděn s cílem reálného využití v nových i stávajících ventilátorových komorách vzduchotechnických a klimatizačních jednotek. Poznání naznačuje, že výsledky jednotlivých přístupů mají a budou mít konkrétní význam pro vědní obor v rozšíření a prohloubení poznatků této aktuální problematiky při sériové výrobě levných součástí po stránce materiálu, pracnosti montáže a údržby. Svou podstatou byl vývoj cílen, aby jednotlivé přístupy byly aplikovatelné do oblasti praktického využití v provozech, které potřebují dopravní tlak a jsou v nepřetržitém provozu. Typickým příkladem takového provozu jsou čisté prostory (nemocnice, laboratoře, výroba mikro a nanoelektroniky a další příbuzné prostory), kde je vyšší tlaková ztráta způsobená filtry s vysokou odlučovací schopností pevných částic. Dále se dá použít u stávajících VZT sestav, kde je identifikován nedostatečný průtok vzduchu vzhledem k průtoku udávaný výrobcem vzduchotechnické jednotky, při zachování velikosti, respektive průměru oběžného kola.

5.2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK

Cílem technického řešení je sestavit aerodynamickou trať, na které se budou měřit reálné ventilátorové charakteristiky a tlakové ztráty ve ventilátorové komoře, které vznikají v reálných vzduchotechnických aplikacích negativním vlivem víření a tření vzduchu. Pro tento účel byla převzata vzduchotechnická sestava od výrobce REMAK a Ing. Trčkou doplněna ventilátorem Ziehl – Abegg ER22C-2DN.A7.1R. Seřízení bylo po zapnutí, frekvenčním měničem stanoveno v rozsahu mezi 25 Hz až 74 Hz (další technická data ventilátoru jsou uvedena v samostatné příloze charakteristické výkony ventilátoru).

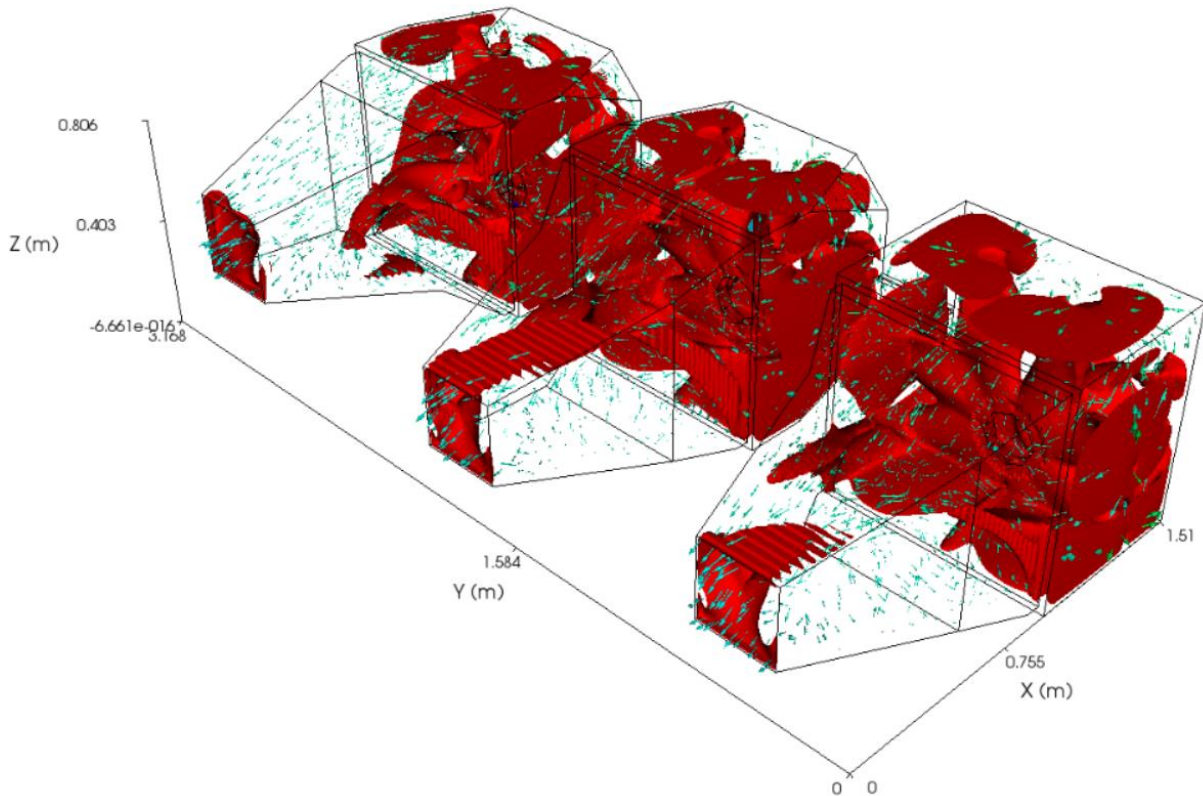


Obr. 5.1, 5.2: Náčrso rozměrů jednotky výrobce (nahore) a příslušné foto stávajícího stavu (dole).

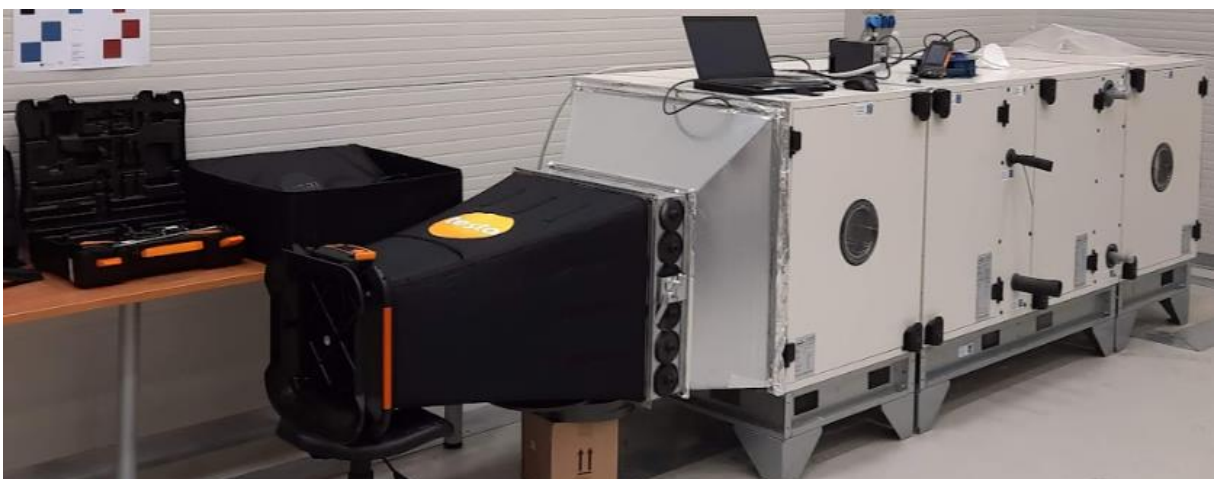


Obr. 5.3, 5.4: Náčrso rozměrů řezu jednotky výrobce (vlevo) a foto stávajícího stavu (vpravo).

Sohledem na umístění ventilátoru níže od středu ventilátorové komory byla pomocí Geometrického modelu a simulačního CFD programu BlueCFD-AIR modelována orientace přechodové plechové trouby za účelem omezení tlakových ztrát ventilátoru. Oblast rychlosti proudění nad 6 m/s poukázala na vhodnou orientaci přechodové trouby tak, aby proud vzduchu z níže umístěného ventilátoru nemusel měnit směr proudění před vstupem do příruby měřícího přístroje pro měření průtoku vzduchu.



Obr. 5.5: Model CFD zohledňující orientaci přechodového potrubí v kombinaci s náběhovými plechy. Červená barva v místě nad 6 m/s.



Obr. 5.6: Pohled na kompletní sestavu aerodynamické trati, na které se budou měřit reálné ventilátorové charakteristiky a tlakové ztráty ve ventilátorové komoře, které vznikají v reálných vzduchotechnických aplikacích.

5.2.1 METODY MĚŘENÍ VENTILÁTOROVÝCH CHARAKTERISTIK

Měření za účelem sestavení jednoznačného diagramu charakteristické křivky ventilátoru a optimalizaci jejich výkonu zahrnuje následující měřené veličiny, které jsou zaznamenávány pro různé frekvence (25–74 Hz) nastavené na frekvenčním měniči tak, aby byl dopočítán měrný příkon ventilátoru „SFP“. Měření proběhne na, pro tento účel vytvořené, aerodynamické trati, která má reflektovat reálné tlakové ztráty vzduchotechnické jednotky. V praxi se pro nastavení průtoku vzduchu ventilátorovou komorou využívá odečtu tlakového rozdílu před a za volným oběžným kolem ventilátoru. Na základě zjištěného tlakového rozdílu a průtoku vzduchu jednotkou pak lze určit charakteristickou křivku daného ventilátoru s příslušným oběžným kolem. Proběhla zkušební metoda k ověřování způsobilosti instalovaných zařízení pro účely přejímky dle ČSN EN 12599, protokol měření funkčnosti zřízení je uveden v příloze.

MĚŘENÉ VELIČINY:

Objemový průtok vzduchu V [m^3/h]

Statický (absolutní) tlak v místě měření Δp_s [Pa] ve výtlačném hrdle.

Příkon ventilátoru P [W]

Frekvence elektrického proudu f [Hz]

MĚŘÍCÍ APARATURA:

Balometr TESTO 420 pro měření průtoku vzduchu

Balometr Airflow pro měření statického tlaku

Prandtlova sonda TESTO 400 – multifunkční měřicí ústředna

Zvukoměr

Měřič spotřeby elektřiny

Frekvenčnímu měnič Micro Drive FC 51

KONTROLA ÚPLNOSTI — POROVNÁNÍ ZAŘÍZENÍ S INSTALAČNÍ SPECIFIKACÍ:

Rozměr VZT jednotky se shoduje

KONTROLA ÚPLNOSTI — SEŘÍZENÍ:

Seřízení bylo po zapnutí, frekvenčním měničem stanoven rozsah mezi 25 Hz až 74 Hz.

KONTROLA ÚPLNOSTI — TĚSNOST:

Jednotlivé provedení VZT komor je provedeno s těsněním. Mezi jednotlivými komorami těsnění nebylo kvůli manipulaci.

Byl proveden experiment těsnosti, kdy těsná regulační klapka na sání byla zcela uzavřena a naměřený průtok jednotkou byl 2017 m^3/hod . Při zcela otevřené regulační klapce byl naměřený průtok 2328 m^3/hod , což je podobná hodnota a vypovídá o velké netěsnosti potrubí.

	Zcela otevřená regulační klapka	Zcela zavřená regulační klapka na sání
Nastavená frekvence (Hz)	74	74
Statický tlak v sací komoře (Pa)	3,2	325
Průtok vzduchu (m ³ /hod)	2328	2017

Tab. 5.2: Tabulka kontroly těsnosti převzaté sestavy aerodynamické trati.

Z tohoto důvodu byly styky jednotlivých komor následně důsledně utěsněny tak, že následné zkušební měření nebylo možné provést z důvodu možného spálení vinutí motoru ventilátoru.

KONTROLA FUNKČNOSTI — UVEDENÍ ZAŘÍZENÍ DO PROVOZU:

Po spuštění zařízení se měřené veličiny ustálí na nastavených okrajových podmínkách.

KONTROLA FUNKČNOSTI — UVEDENÍ ZAŘÍZENÍ DO PROVOZU:

Po zapnutí frekvenčního měniče se spustí režim Hand On. Následně lze plynule regulovat otáčky asynchronního motoru. Postupně volíme frekvenci 20 až 74 Hz.

SPECIÁLNÍ MĚŘENÍ — STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ:

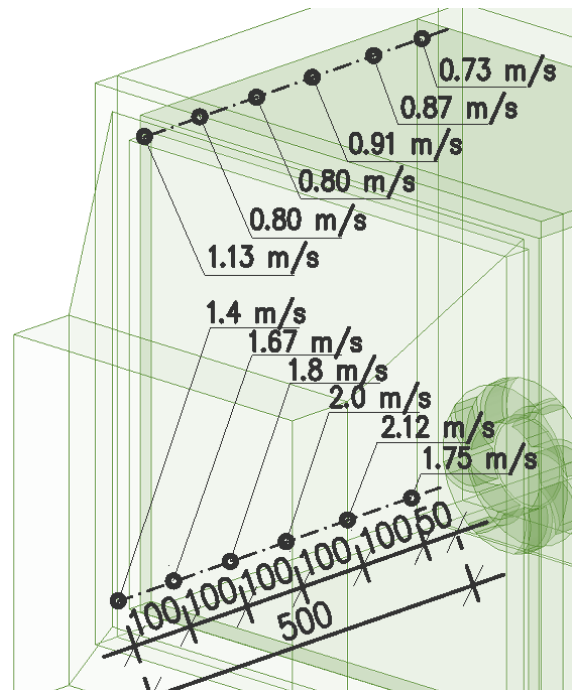
Okrajové podmínky měření experimentu Č.1 až experimentu Č.4:

Teplota 25 °C, ± 2°C. Relativní vlhkost vzduchu 58 % ± 15 %.

Testo 480 ± (0,3 Pa ± 1,5 % z naměřené hodnoty)

Předpokládaná odchylka Testo 400 ± 0,1%

Orientační měření rychlostních poměrů ve ventilátorové komoře za účelem ověření výrazně nižší rychlosti vzduchu v horní části ventilátorové komory vlivem necentrálně umístěného oběžného kola. Průměrná rychlost v horní části vent. komory je dvakrát nižší než ve spodní části.



Obr. 5.7, 5.8: Umístění anemometru a schéma bodů ventilátorové komory, u kterých byla měřena rychlost proudění vzduchu při konstantním průtoku a nastavené frekvenci frekvenčního měniče.

5.3 POROVNÁVACÍ PARAMETRY VÝKONU VENTILÁTORŮ

V návaznosti na relevantnost metody výpočtu účinnosti vzduchotechnického systému, kterou jsem se zabýval ve své diplomové práci a optimalizaci transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem, jsou níže zmíněny pasáže měrného příkonu a aerodynamické účinnosti ventilátoru [1] [8].

5.3.1 MĚRNÝ PŘÍKON PRO BUDOVU NEBO UCELENÝ SYSTÉM SFP

SFP představuje elektrický příkon P [W] vydělený průtokem vzduchu ventilátorem podle návrhu $[m^3/s]$. SFP_{int} vnitřní měrný příkon ventilátoru větracích součástí (specific fan power) vyjádřený v $[Ws/m^3]$ se rozumí poměr mezi vnitřní tlakovou ztrátou větracích součástí a účinností ventilátoru stanovenou pro referenční konfiguraci.

$$SFP = \frac{\Sigma P}{q_v} [kWh/\frac{m^3}{s}] \quad (1)$$

Kde:

ΣP je příkon ventilátor [kW]

q_v celkové množství proudícího vzduchu $[m^3/s]$

Naměřená hodnota nesmí být více než 1,07násobkem maximální deklarované hodnoty.

Referenční hodnota pro měrný příkon ventilátoru systému nuceného větrání dle vyhl. č. 78/2013 Sb. je $1750 [Ws/m^3]$. Referenční hodnota pro měrný příkon ventilátoru systému nuceného větrání dle pozdější vyhl. č. 264/2020 Sb. se zpřísnila na $1500 [Ws/m^3]$ [5], [6].

Od 1. ledna 2016 dle Nařízení komise (EU) č. 1253/2014 musí být poskytován v informacích o výrobku [1], [11].

„Ecodesign je soubor parametrů (především energetická účinnost), které musí dodržet dodavatel (výrobce nebo dovozce) výrobku spojeného se spotřebou energie při jeho uvedení na trh EU, popř. do provozu.“ [12]

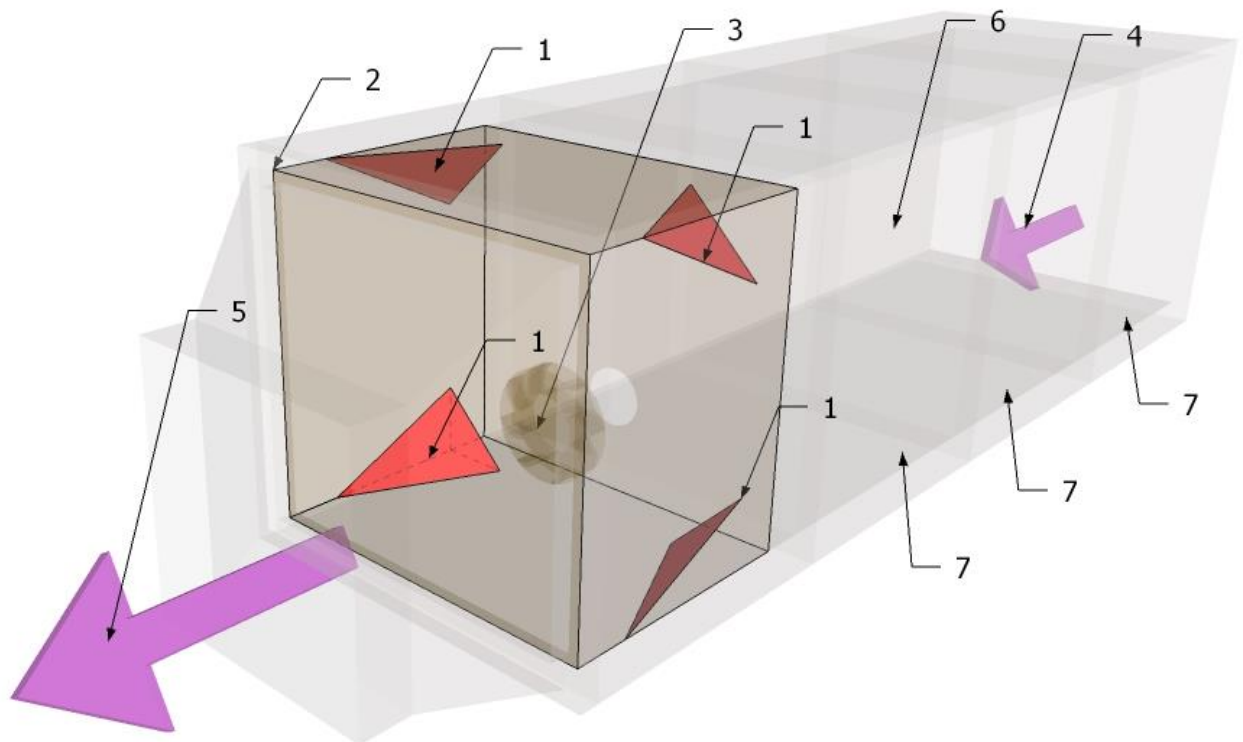
5.4 EXPERIMENT

5.4.1 EXPERIMENT Č. 1 OPTIMALIZACE VÍŘENÍ VZDUCHU VE VZDUCHOTECHNICKÝCH JEDNOTKÁCH POMOCÍ REDISTRIBUTORU VZDUCHU

Předmětem tohoto experimentu je model vzduchotechnické jednotky, který vznikl jako reakce na existující současné problémy vzduchotechnických jednotek, u kterých výrobce ventilátoru uvádí idealizované, v praxi nedosažitelné hodnoty dopravovaného tlaku ventilátoru, který je v laboratorních podmínkách měřen na kruhovém tvaru měřící clony a tím dosahuje lepších hydraulických poměrů. V hranatém tvaru vzduchotechnické jednotky potom vznikají víry, které tvoří tlakovou ztrátu. Do vzduchotechnické jednotky byly umístěny náběhové plechy, které změni víření vzduchu tak, aby připomínalo dopravování vzduchu v kruhovém potrubí.

Zkoumání náběhových plechů spočívá v optimální poloze náběhových plechů, povrchové úpravě plechů a instalaci ve ventilátorové komoře vzduchotechnické jednotky. Pro návrh a validaci dat aerodynamického modelu byla využita technologie softwaeru 3D modeláře a CFD simulace. Pro výrobu modelu je využita technologie ohýbání pozinkovaného plechu na ohýbačce plechu (dodal pan Ing. Trčka). Pro měření a následnou verifikaci dat je použita měřící aparatura která zaznamenává data o nastavené frekvenci frekvenčního měniče, elektrickém příkonu, průtoku vzduchu a diferenciálního tlaku ventilátorové komory v reálném čase.

Redistributor vzduchu pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem obsahuje jednotlivé náběhové plechy (1) pro vzduchotechnickou jednotku (6), která ve směru sání (4) obsahuje jednotlivé komory (7) vzduchotechnické jednotky (6) a ve směru výtlaku (5) vymezuje vnitřní prostor ventilátorové komory (2) uvnitř které je umístěno zařízení pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory (1), které je umístěno kolmo na osu oběžného kola tak, aby proud vzduchu pomohl změnit směr víření a vytlačit ho z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé, nebo zaoblené ploše.



Obr. 5.9: Schéma jednotlivých částí vzduchotechnické sestavy s inovativním řešením.

Cílem studie byla identifikace hydraulických podmínek, pro které mají náběhové plechy význam a naopak, pro které aplikace náběhové plechy praktický význam postrádají. Experimentální výzkum se nezabývá nalezením nejlepšího aerodynamického tvaru náběhových plechů.

Jsou popsány, analyzovány a měřeny hydraulické poměry vzduchotechnické jednotky pro vybranou sadu měření. Sada měření má dva samostatné stupně regulace těsné regulační klapky (II, III).

Sada měření s regulací regulační klapky na výtlaku u VZT jednotky - s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory.

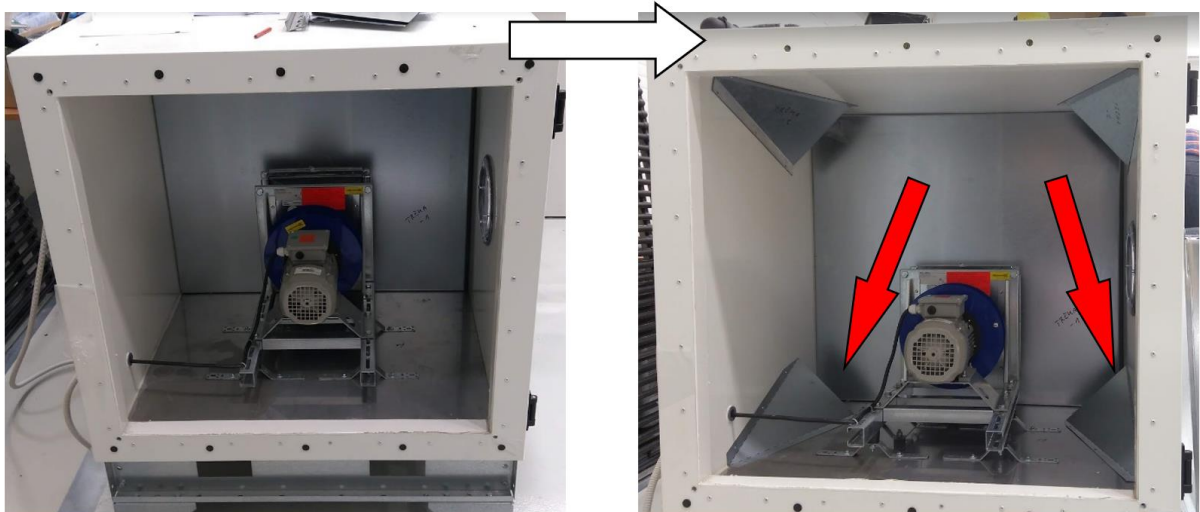
Dále je měřen a analyzován vliv náběhových plechů na akustický výkon uvnitř vzduchotechnické jednotky.

SESTAVA VZT JEDNOTKY A POHLED DO VENTILÁTOROVÉ KOMORY

Instalovaný průměr oběžného kola ventilátoru je malý vůči rozměru ventilátorové komory. Ventilátor je umístěn tak, že všechny čtyři náběhové plechy nejsou vystaveny rovnoměrně obtékajícímu vzduchu. Náběhové plechy v horních rozích jsou vystaveny přímému náporu vzduchu výrazně méně než spodní. Tato sestava není ideální, ale postačuje k popsání trendu.

Náběhové plechy nejsou přiřazeny až k plechu oddělující jednotlivé komory VZT jednotky, protože proud vzduchu z oběžného kola vychází kolmo na osu hřídele a do „zadní části vent. komory nemá tendenci foukat. Vzduch má naopak tendenci z ventilátorové komory co nejdříve uniknout a proto jsou náběhové plechy zešikmeny pod úhlem cca 15° tak, **aby proudy vzduchu pomohly změnit směr víření a vytlačit ho z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše.**

Pro sadu měření byl přechod náběhových plechů na vent. skříň důkladně přelepen hliníkovou fólií a vyhlazen pomocí molitanu. Dále je přiložena fotodokumentace experimentálního řešení:



Obr. 5.10, 5.11: Ventilátorová komora před umístěním náběhových plechu a ventilátorová komora po instalaci náběhových plechů.



Obr. 5.12, 5.13: Pohled do ventilátorové komory po instalaci náběhových plechů s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory, pohled na měření.

MĚŘENÍ

Měřicí aparatura zaznamenávala data o nastavené frekvenci frekvenčního měniče, průtoku vzduchu, diferenciálního tlaku a hladinu akustického tlaku uvnitř jednotky. Krok frekvenčního měniče byl pro všechna měření nastaven převážně 74 Hz. Celkový počet naměřených hodnot z aparatur je 1164.

SFP představuje elektrický příkon ventilátoru P [W] vydělený průtokem vzduchu ventilátorem podle návrhu $[m^3/s]$. Tabulka níže udává parametr SFP pro všechny tři sady měření při nastavené frekvenci 74 Hz, u které výrobce udává nominální příkon ventilátoru. Pro porovnání je v tabulce doplněna hodnota referenčního měrného příkonu jednoho ventilátoru systému nuceného větrání dle vyhlášky o energetické náročnosti budov 264/2020, která má v tomto konkrétním případě vliv na energetické ukazatele technických systémů. Poslední řádek tabulky popisuje příznivý vliv změny plynového výkonu ventilátoru na výsledný parametr SFP.³

³ Legenda barevného podkreslení:

Bez zvýraznění:

Výchozí přednastavné hodnoty v rámci regulačních členů na vzduchotechnické trati v rámci experimentálního měření.

Šedá:

Výchozí referenční hodnoty stávajícího stavu k následnému porovnání.

Zelená:

Naměřená hodnota, která se vůči referenční hodnotě zlepšila.

Oranžová:

Naměřená hodnota, která se vůči referenční hodnotě pohoršila.

MĚŘENÍ PRO NASTAVENÝ III. STUPEŇ REGULACE REGUL. KLAPKY

Měření s regulací regulační klapky na výtlačku u VZT jednotky s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory.

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu.

Druh měření		Bez náběhových plechů – Nastavený III. stupeň regulace regul. klapky									
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	344	473,5	597,8	656,5	696,3	781,5	831	888,3	927,8
Δps	Dopravní tlak	[pa]	133	254	406,5	493,5	589	689,8	797	914,3	1004,8
f	Frekvence f. meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60	65	70	74
P _N	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	2134,1
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	68	75,25	80,5	83	85	86,8	-	-	-

Tab. 5.4: Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu.

Druh měření		S důkladně utěsněnými plechy – Nastavený III. stupeň regulace regul. klapky									
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	385	524,8	660,8	714,3	751,8	825,3	882,5	965,3	982,8
Δps	Dopravní tlak	[pa]	128,7	245,3	397,5	484,5	580,8	686,3	797,5	912	1002,3
f	Frekvence f. meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60	65	70	74
P _N	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	2014,7
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	67	75	80	82,75	84,25	86	-	-	-

Tab. 5.5: Porovnání naměřených hodnot.

Druh měření		S důkladně utěsněnými plechy – Nastavený III. stupeň regulace regul. klapky									
	Odchyłka dopravního tlaku	max 1,75 pa	2,15	4,35	4,5	4,5	4,1	1,75	0,25	1,15	1,25
V	Navýšení průtok vzduchu	[m ³ /h]	-	-	-	-	-	43,80	51,50	77,00	55,00
		%	-	-	-	-	-	5,60	6,20	8,67	5,93
SFP	Snížení SFP	[Ws/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	119,43
SFP	Snížení SFP	%	-	-	-	-	-	-	-	-	5,93
Lp	Snížení zvukové součt. hlad.	dB(A)	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-

MĚŘENÍ PRO NASTAVENÝ II. STUPEŇ REGULACE REGUL. KLAPKY

Měření s regulací regulační klapky na výtlaku u VZT jednotky s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory.

Tab. 5.6: Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu.

Druh měření		Bez náběhových plechů									
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	797,5	1114,5	1426,0	1562,0	1712,5	1861,5	2025,0	2171,25	2257,5
Δps	Dopravní tlak	[pa]	9,58	16,83	25,70	30,25	35,375	41,05	46,675	54,58	60,00
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60	65	70	74
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	877,08

Tab. 5.7: Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu.

Druh měření		S náběhovými plechy									
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	803,8	1126,3	1425,3	1580,5	1741,3	1886,8	2026,5	2185,5	2289,8
Δps	Dopravní tlak	[pa]	9,30	16,15	24,25	29,25	34,40	40,13	46,78	52,75	58,50
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60	65	70	74
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	864,72

Tab. 5.8: Porovnání naměřených hodnot.

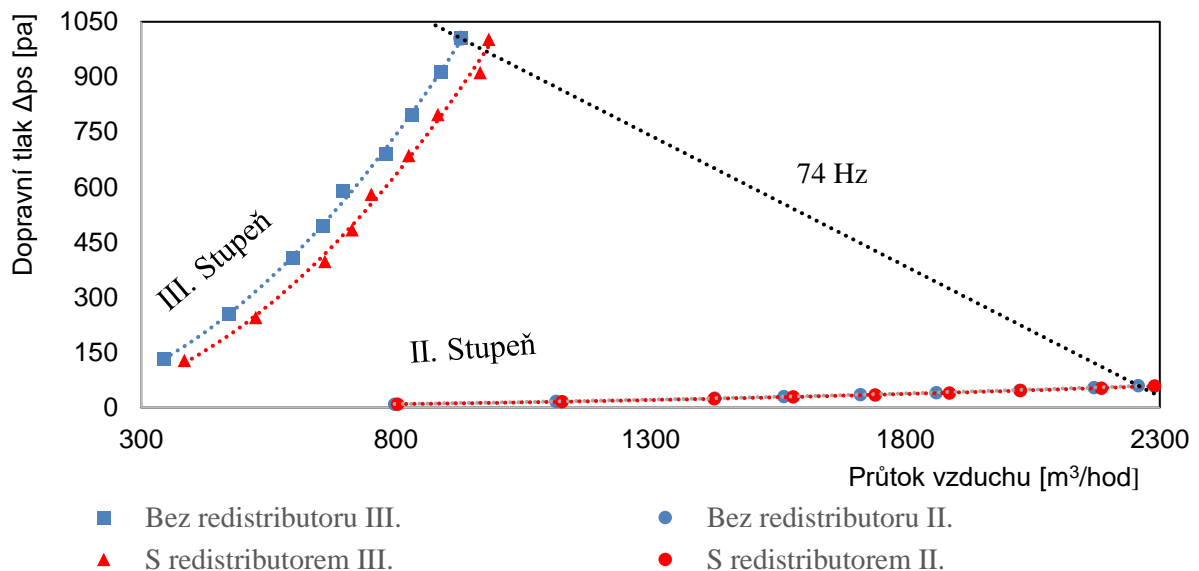
Druh měření		S důkladně utěsněnými plechy									
	Odchylka dopravního tlaku	max 1,0 pa	0,13875	0,3375	0,725	0,5	0,4875	0,4625	0,05	0,9125	0,75
V	Navýšení průtok vzduchu	[m ³ /h]	6,25	11,75	-0,75	18,50	28,75	25,25	1,50	14,25	32,25
		%	0,78	1,05	-0,05	1,18	1,68	1,36	0,07	0,66	1,43
SFP	Snížení SFP	[Ws/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	12,35
SFP	Snížení SFP	%	-	-	-	-	-	-	-	-	1,43

POSOUZENÍ SADY MĚŘENÍ

Pomocí níže uvedené tabulky a grafů je znázorněno, že užití náběhových plechů ve ventilátorové komoře má význam, pokud na výtlačné straně je větší tlaková ztráta. Po důkladném utěsnění a vyhlazení styků náběhových plechů uvnitř ventilátorové komory byly naměřeny zajímavé hodnoty, které vypovídají o jednoznačném trendu navýšení průtoku vzduchu. Pro takto stanovené okrajové podmínky se měrný příkon ventilátoru snížil až o necelých 6 %.

SADA MĚŘENÍ S REGULACÍ REGULAČNÍ Klapky NA VÝTLAKU U VZT JEDNOTKY. (S DŮKLADNÝM UTĚSNĚNÍM A VYHLAZENÍM STYKU NÁBĚHOVÉHO PLECHU A VENTILÁTOROVÉ KOMORY)

Níže v grafu 3 jsou měřené hodnoty diferenciálu reálného dopravovaného tlaku a dopravovaného vzduchu. Z grafu je patrné, že instalace náběhových plechů a regulace klapky na výtlačku s volným sáním má význam napříč měřených frekvencí asynchronního motoru pouze pro III. stupeň regulace klapky. Průměrné navýšení průtoku vzduchu pro III. stupeň je o 8,5 %. Druhý stupeň regulační klapky byl v tomto případě zvolen tak, aby spíše připomínal volný výtok vzduchu z ventilátorové komory a jasně udává trend účinnosti náběhových plechů při nízkém dopravním tlaku ve ventilátorové komoře. Průměrné navýšení průtoku vzduchu pro II. stupeň je pouze 0,9 %.



Graf 5.5: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření s regulací regulační klapky na výtlačku.

Mezi hlavní přínosy představeného technického řešení tedy patří:

- navýšení průměrného průtoku vzduchu až o 8,5 %,
- nenavýšuje tlakovou ztrátu ventilátorové komory,
- snadná instalace jak do nových, tak již stávajících vzduchotechnických jednotek.

Mezi předpokládané, ale neověřené přínosy představeného technického řešení z důvodu optimálního nevyvážení oběžného kola patří:

- nenavýšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky

Doporučení:

- V další etapě výzkumu doporučuji podle předešlých měření optimalizovat tvar náběhových plechů do vypuklého tvaru, připomínajícího více ventilátor umístěný v kruhové cloně.

ANALÝZA VLIVU NÁBĚHOVÝCH PLECHŮ NA AKUSTICKÝ VÝKON.

S představou snížení tlakové ztráty vířením ve vzduchotechnické komoře bylo podezření na možné snížení hlučnosti vzduchotechnické jednotky. Níže v grafu 5.6 jsou měřené hodnoty akustického tlaku. Z grafu 5.6 je patrné, že hladina akustického výkonu se prakticky neměnila. Pro měření III. stupně s regulací regulační klapky na výtlačku u VZT jednotky je průměrné snížení akustického výkonu o pouhý 0,6 dB. Hlavními zdroji hluku v našem experimentálním modelu nebylo víření ve ventilátorové komoře, ale motor ventilátoru a „pískání“ vzduchu při průchodu regulační klapkou.

Tab. 5.9: Hladina akustického tlaku 1 m od vent. komory bez redistributoru vzduchu.

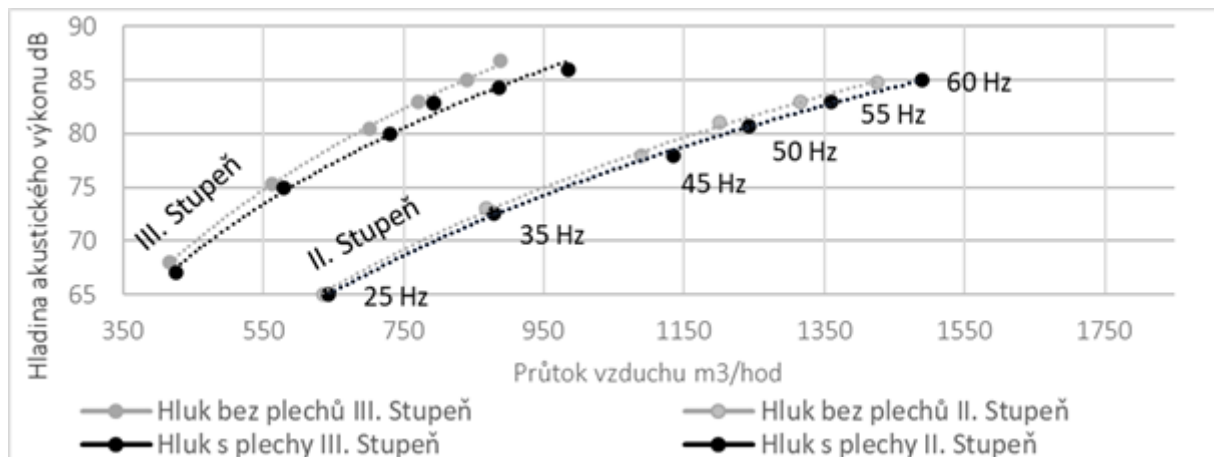
Druh měření		Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu						
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60
Lp	Zvuk součtová hladina pro III. stupeň regulace	dB(A)	68	75,3	80,5	83	85	86,8
Lp	Zvuk součtová hladina pro II. stupeň regulace	dB(A)	65	73	78	81	83	84,8

Tab. 5.10: Hladina akustického tlaku 1 m od vent. komory s redistributorem vzduchu.

Druh měření		Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu						
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60
Lp	Zvuk součtová hladina pro III. stupeň regulace	dB(A)	67	75	80	82,8	84,3	86
Lp	Zvuk součtová hladina pro II. stupeň regulace	dB(A)	65	72,5	78	80,8	83	85

Tab. 5.11: Porovnání naměřených hodnot.

Druh měření		Snížení zvukové součtové hladiny						
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	25	35	45	50	55	60
Lp	Snížení zvukové součtové hlad. pro III. stupeň regulace	dB(A)	1	0,3	0,5	0,2	0,7	0,8
Lp	Snížení zvukové součtové hlad. pro II. stupeň regulace	dB(A)	0	0,5	0	0,2	0	-0,2



Graf 5.6: Grafické porovnání měřeného průběhu hladiny akustického výkonu do 60 Hz pro sadu měření s regulací regulační klapky na výtlačku.

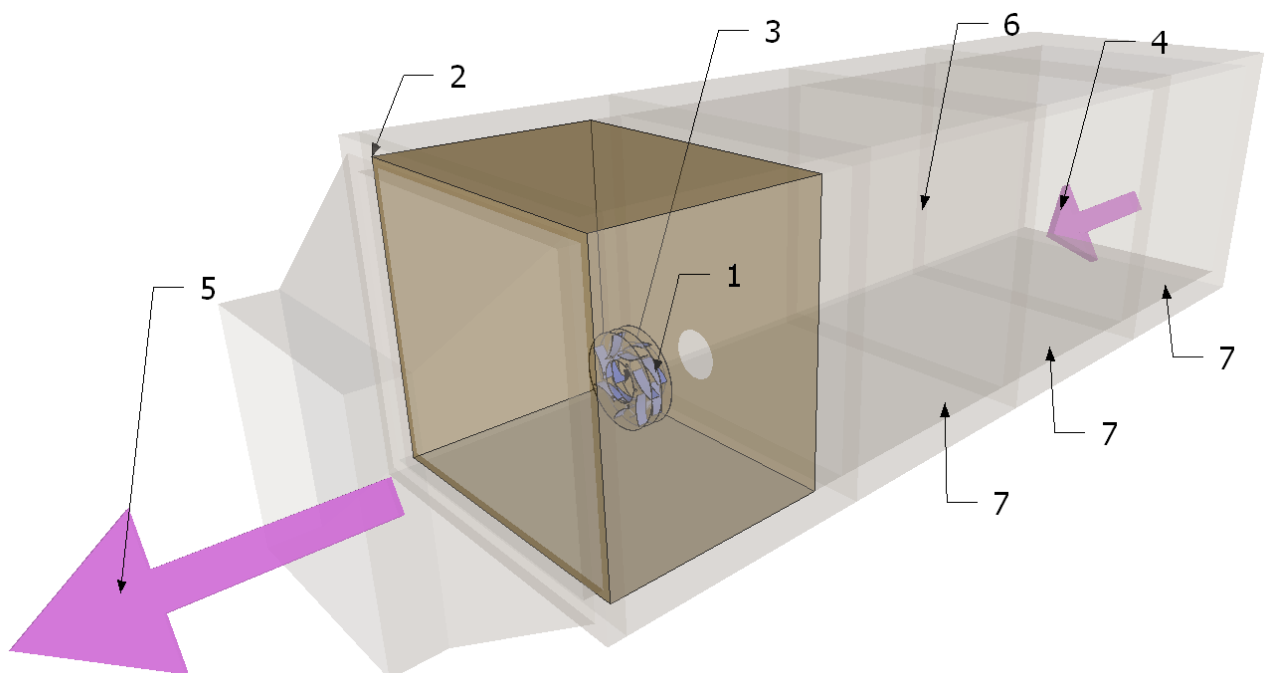
5.4.2 EXPERIMENT Č. 2 OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA LOPATKOVÉHO VENTILÁTORU POMOCÍ KONKÁVNÍ A KONVEXNÍ GEOMETRIE LOPATEK

Technické řešení se týká úpravy proudění vzduchu v prostoru ventilátorové komory s vestavěným volným oběžným kolem za účelem homogenizace proudu vzduchu vycházejícího z oběžného kola a následné eliminace tlakové ztráty ventilátorové komory.

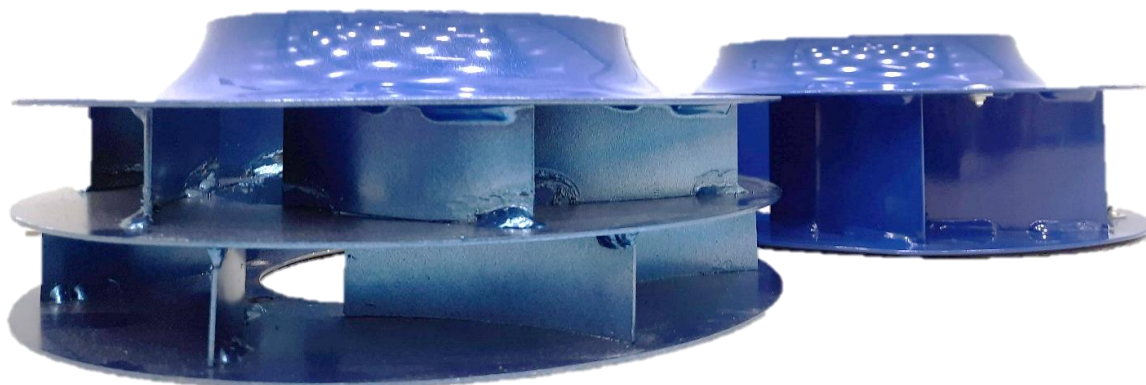
Podstatou inovativního oběžného kola pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem je spojení dvou řad zakřivených lopatek konkávního a konvexního tvaru, které mohou mít různý počet a zaujímat různý geometrický tvar a následný výtlač vzduchu z oběžného kola do ventilátorové komory je homogenizován tak, aby co nejméně vznikaly velké víry, dynamické rázy proudu vzduchu a tím se snížila lokální tlaková ztráta. Oběžné kolo je zhotoveno z plechu a při sériové výrobě představuje levnou součást ventilátoru po stránce materiálu, pracnosti montáže a údržby. Inovativní oběžné kolo dodal pan Ing. Trčka.

Cílem technického řešení je představit volné oběžné kolo pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem které produkuje menší a rovnoměrnější proudy, které spolu interagují a pomáhá proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření ve ventilátorové komoře. Níže jsou popsány, analyzovány a měřeny hydraulické poměry vzduchotechnické jednotky.

Volné oběžné kolo radiálního ventilátoru (3) s konkávní a konvexní geometrií lopatek (1) zjemňující proud vzduchu ve ventilátorové komoře (2) obsahuje jednotlivé konkávně a konvexně zahnuté lopatky (1) volného oběžného kola (3) pro vzduchotechnickou jednotku (6), která ve směru sání (4) obsahuje jednotlivé komory (7) vzduchotechnické jednotky (6) a ve směru výtlačku (5) vymezuje vnitřní prostor ventilátorové komory (2) uvnitř které je umístěné volné (malé) oběžné kolo radiálního ventilátoru (3).



Obr. 5.14: Pohled do ventilátorové komory po instalaci inovativního oběžného kola.



Obr. 5.15: Fotografie inovativního oběžného kola v popředí. V pozadí standardně používané volně oběžné kolo.

ORIENTAČNÍ MĚŘENÍ

Níže v tabulce jsou měřené hodnoty diferenciálu statického tlaku a množství dopravovaného vzduchu. Z tabulky je patrné, že instalace inovativního oběžného kola má význam napříč měřeními frekvencemi asynchronního motoru. Při vysokém dopravním tlaku průměrné navýšení průtoku vzduchu je 10,1 %, přičemž průměrné zhoršení SFP je o 8,7 % (což je způsobeno pravděpodobně větší hmotností oběžného kola a jeho nedokonalým vyvážením oběžného kola v době měření).

Tab. 5.12: Orientační data pro standardní ocelové kolo.

Druh měření			Naměřené hodnoty pro standardní ocelové kolo						
f	Frekvence frekv. meniče	[Hz]	35,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	288,0	378,5	413,0	425,3	453,0	504,8	522,3
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	0,087	0,165	0,219	0,277	0,351	0,44	0,54
SFP	Prům. měrný příkon vent.	[Ws/m ³]	2365,8						

Tab. 5.13: Orientační data pro inovativní ocelové dvouřadé kolo.

Druh měření			Naměřené hodnoty pro ocelové dvouřadé kolo						
f	Frekvence frekv. meniče	[Hz]	35	45	50	55	60	65	70
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	328,0	406,0	471,8	487,3	521,8	524,3	578,0
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	0,108	0,21	0,262	0,335	0,423	0,529	0,656
SFP	Prům. měrný příkon vent.	[Ws/m ³]	2594,1						

Tab. 5.14: Porovnání naměřených hodnot.

Druh měření			Porovnaná data						
f	Frekvence frekv. meniče	[Hz]	35	45	50	55	60	65	70
V	Zvýšení průtoku vzduchu	[m ³ /h]	40	27,5	58,8	62	68,8	19,5	55,8
PN	Snížení nom. příkonu	[kW]	0,02	0,05	0,04	0,06	0,07	0,09	0,12
Navýšení prům.o průtoku vzduchu		%	10,1						
Snížení prům. měrného příkonu vent.		%	-8,7						

VYHODNOCENÍ ORIENTAČNÍHO MĚŘENÍ

Z prezentovaného měření lze tvrdit, že instalace inovativního oběžného kola s **malým průtokem vzduchu a s velkým dispozičním tlakem** přispívá ke zvýšení průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou. Pro takto stanovené okrajové podmínky může navýšení průtoku vzduchu činit průměrně až 10,1 %. Současně se zhoršuje měrný příkon ventilátoru průměrně o 8,7 %. Z grafu níže je patrné, že instalace inovativního oběžného kola má význam napříč měřeními frekvencemi asynchronního motoru z hlediska průtoku vzduchu v závislosti na nastavenou frekvenci.

Mezi hlavní přínosy představeného technického řešení tedy patří:

- navýšení průměrného průtoku vzduchu o 10,1 %,
- automatický chod,
- nenavýšuje tlakovou ztrátu ventilátorové komory,
- snadná instalace jak do nových, tak již stávajících vzduchotechnických jednotek.

Negativní dopad řešení:

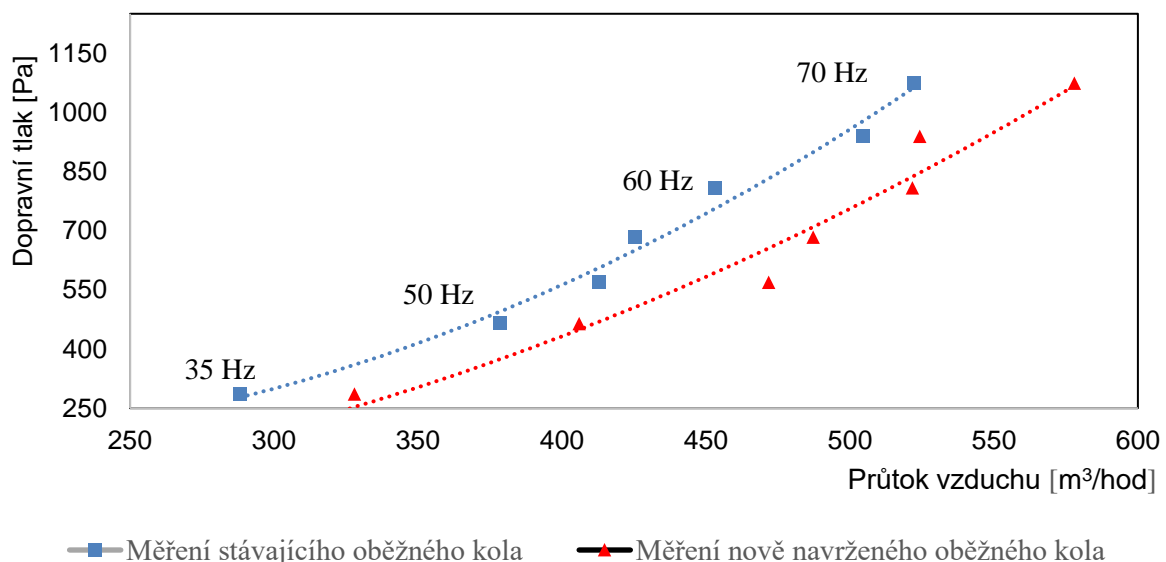
- zhoršení průměrného měrného příkonu o 8,7 %.

Mezi předpokládané, ale neověřené přínosy představeného technického řešení z důvodu optimálního nevyvážení oběžného kola patří:

- nenavýšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky,
- navýšení SFP u vyváženého oběžného kola bude nižší, protože při měření docházelo k vibracím, které nepříznivě ovlivňovaly tření rotoru.

Doporučení:

- v další etapě výzkumu doporučuji podle předešlých měření snížit počet lopatek oběžného kola tak, aby se snížily třecí síly mezi vzduchem stěnami oběžného kola.



Graf 5.7: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření inovativního oběžného kola s regulací regulační klapky na výtlačku

DETAILNÍ MĚŘENÍ

Rozsáhlé měření veličin pro vytvoření ventilátorových charakteristik probíhalo za ustáleného průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou 500; 750; 1000; 1250; 1500 a 1750 m³/h.

Tab. 5.15: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.

Druh měření																	
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	500					1000					1500				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	750	1000	150	250	500	750	970	150	250	500	750	-
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	2,458	2,462	2,472	2,501	-	9,566	9,553	9,55	9,642	9,538	21,05	21,03	21	21,07	-
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	1608	1974	2710	3290	-	2067	2420	3006	3512	3916	2862	3059	3492	3928	-
P _N	Příkon vent.	[W]	75,5	112,4	225,6	348,9	493,2	121,3	187	333,7	508,2	683,4	254,6	320,7	505,8	731,3	-
I	proud	[A]	0,624	0,765	1,104	1,385	-	0,793	1,005	1,407	1,792	2,122	1,184	1,345	1,8	2,258	-
f	Frekvence	[Hz]	27,8	34,2	47,3	57,6	66,7	35,9	42,4	53,1	62,7	70,3	49,8	53,6	62	70,8	-
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	77,81	86,04	91,44	94,56	-	85,88	89,37	91,41	95,8	98,5	92,18	92,95	96,24	98,79	-
SFP	Měrný příkon vent.	[Ws/m ³]	544	809	1624	2512	3551	437	673	1201	1830	2460	611	770	1214	1755	-
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1372					1035					1087				

Tab. 5.16: Naměřené hodnoty pro ocelové kolo, dvouřadé.

Druh měření																	
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	500					1000					1500				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	750	1000	150	250	500	750	1000	150	250	500	683	-
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	2,514	2,443	2,422	2,424	2,427	9,528	9,32	9,53	9,444	9,408	20,82	20,61	20,57	20,35	-
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	1637	1980	2646	3180	3648	2283	2506	3077	3535	3968	3108	3269	3694	3952	-
P _N	Příkon vent.	[W]	88	128,5	233,4	351	484	174,5	230	417,2	608,2	857,2	359,4	443,3	693,2	926	-
I	proud	[A]	0,672	0,828	1,13	1,398	1,656	0,965	1,17	1,632	2,037	2,552	1,452	1,659	2,214	2,752	-
f	Frekvence	[Hz]	28,4	34,5	46,3	55,9	64,5	40	44,3	55,2	64,1	72,9	54,8	58,2	67	73,9	-
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	80,2	85,94	92	96,86	99,74	88,01	90,84	95,24	98,61	101,5	96,42	97,39	99,87	101,1	-
SFP	Měrný příkon	[Ws/m ³]	633,6	925,2	1680	2527	3485	628,2	828	1502	2190	3086	862,6	1064	1664	2222	-
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1442					1287					1453				

DETAILNÍ MĚŘENÍ – POKRAČOVÁNÍ TABULKY

Tab. 5.17: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.

Druh měření												
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	1750					2000				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	-	-	150	346,6	-	-	-
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	28,11	28,21	28,11	-	-	36,33	36,28	-	-	-
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	3282	3429	3838	-	-	3691	3946	-	-	-
P _N	Příkon vent.	[W]	344,4	414,4	639,4	-	-	459,2	627,6	-	-	-
I	proud	[A]	1,355	1,54	2,038	-	-	1,589	1,197	-	-	-
f	Frekvence	[Hz]	57,6	60,5	68,7	-	-	65	70,3	-	-	-
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	95,35	96,46	99,79	-	-	99,03	100,5	-	-	-
SFP	Měrný příkon vent.	[Ws/m ³]	708	852	1315	-	-	827	1130	-	-	-
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	959					978				

Tab. 5.18: Naměřené hodnoty pro plechové kolo, dvouřadé.

Druh měření												
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	1750					2000				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	468	-	-	150	219	-	-	-
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	27,54	27,48	27,45	-	-	35,23	35,4	-	-	-
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	3524	3684	3987	-	-	3980	4056	-	-	-
P _N	Příkon vent.	[W]	499,8	603,7	865,9	-	-	706,6	783,3	-	-	-
I	proud	[A]	1,732	1,961	2,572	-	-	2,134	2,333	-	-	-
f	Frekvence	[Hz]	63,1	66,6	74	-	-	72	74	-	-	-
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	100,1	101	102,2	-	-	103,3	104	-	-	-
SFP	Měrný příkon	[Ws/m ³]	1028	1242	1781	-	-	1272	1410	-	-	-
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1350					1341				

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Sledováním hodnot měrného příkonu ventilátoru v tabulce níže je patrné, že pro instalované inovativní oběžné kolo s rostoucím průtokem vzduchu se zhoršuje měrný příkon ventilátoru. Toto konkrétní oběžné kolo není vhodné pro velké průtoky vzduchu. Z tabulky je patrné, že instalace inovativního oběžného kola nemá význam napříč téměř všemi měřenými dopravními tlaky, což je způsobeno pravděpodobně větší hmotností oběžného kola a vlivem větší aerodynamické třecí plochy oběžného kola.

Tab. 5.19: Hodnocení dat pro plechové kolo dvouřadé.

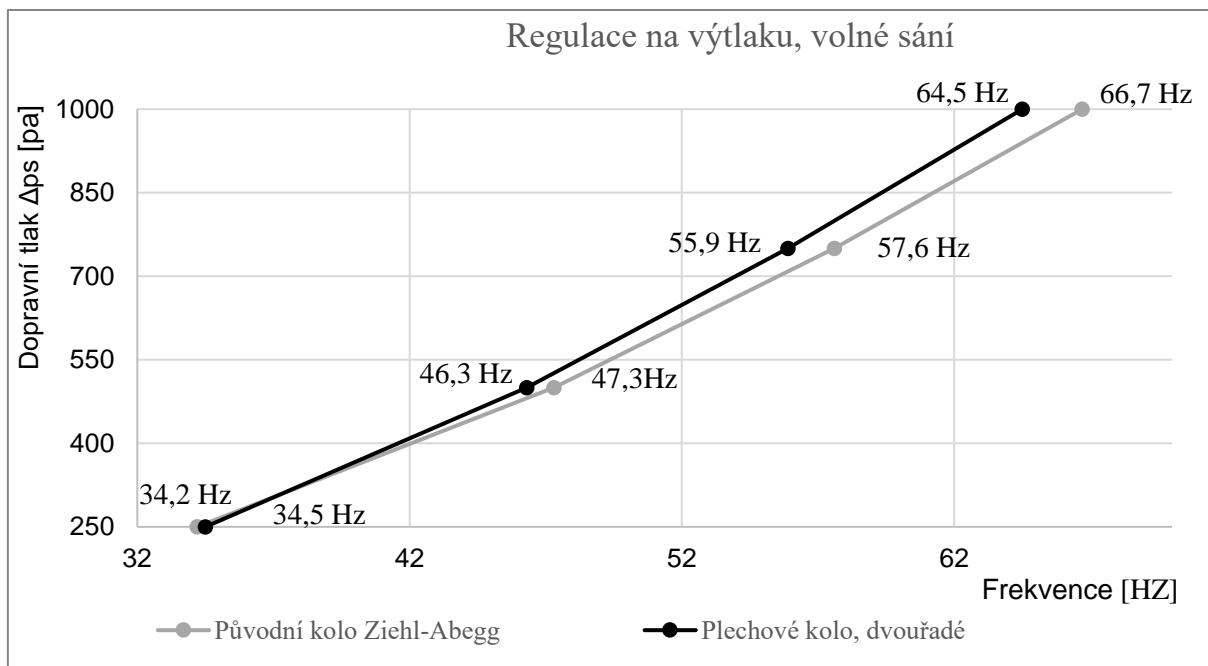
Druh měření			500					1000					1500				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]														-	-
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	750	1000	150	250	500	750	1000	150	250	500	-	-
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[W]	-12,5	-16,1	-7,8	-2,1	9,2	-53,2	-43,0	-83,5	-100	-174	-105	-123	-187	-	-
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	-90,0	-116	-56,2	-15,1	66,2	-192	-155	-301	-360	-626	-252	-294	-450	-	-
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	-2,4	0,1	-0,6	-2,3	-0,5	-2,1	-1,5	-3,8	-2,8	-3,0	-4,2	-4,4	-3,6	-	-

Tab. 5.20: Hodnocení dat pro plechové kolo dvouřadé.

Druh měření			1750					2000				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]										
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	-	-	-	150	-	-	-	-
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[W]	-155	-189	-227	-	-	-247	-156	-	-	-
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	-320	-389	-466	-	-	-445	-280	-	-	-
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	-4,8	-4,5	-2,4	-	-	-4,3	-3,5	-	-	-

POROVNÁNÍ DAT ORIENTAČNÍHO MĚŘENÍ S DETAILNÍM MĚŘENÍ

Z prezentovaných měření lze tvrdit, že instalace inovativního oběžného kola s **malým průtokem vzduchu a s velkým dispozičním tlakem mírně** přispívá ke zlepšení parametru SFP ventilátoru. Pomocí grafu níže můžeme verifikovat vyhodnocení orientačního měření. Porovnáním obou grafů je patrné, že instalace inovativního oběžného kola má význam napříč měřeními frekvencemi asynchronního motoru v rozmezí 46,8 až 64,6 Hz a potvrdilo trend orientačního měření.⁴



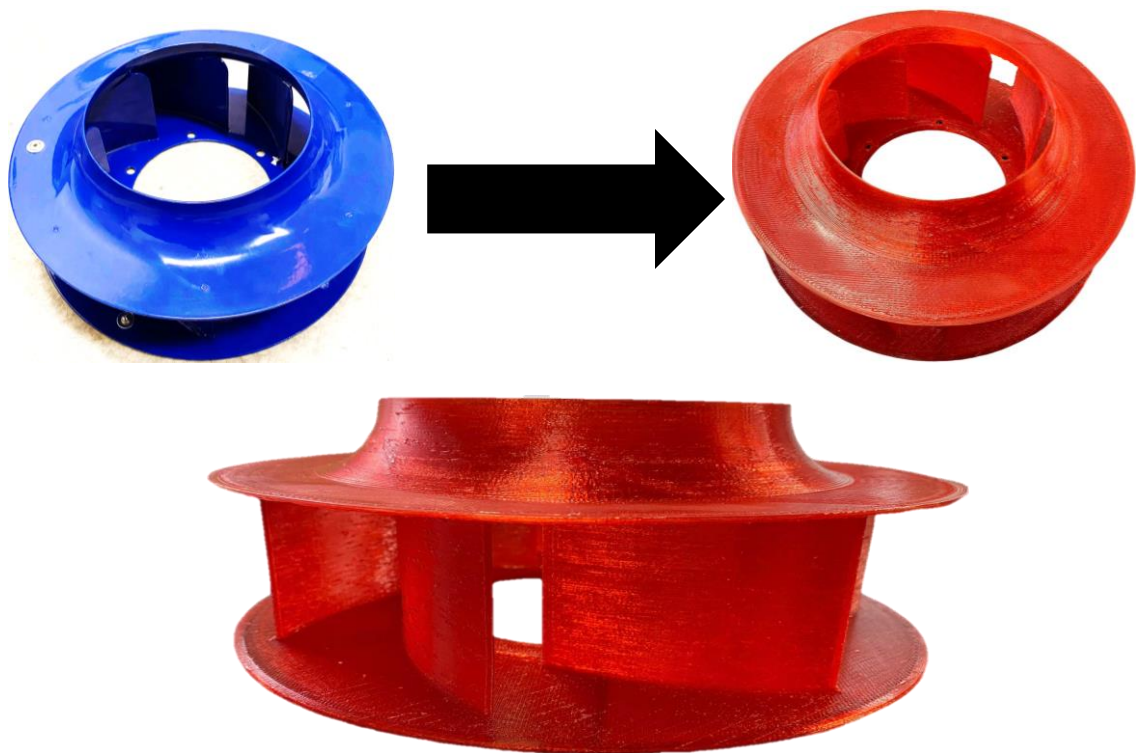
Graf 5.8: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření inovativního oběžného kola s regulací regulační klapky na výtlaku.

⁴ Inovativní oběžné kolo není vhodné pro velké průtoky vzduchu. Z tabulek výše je patrné, že instalace inovativního oběžného kola nemá význam napříč téměř všemi uváděnými dopravními tlaky a průtoky vzduchu, což je způsobeno pravděpodobně větší hmotností oběžného kola a vlivem větší aerodynamické třecí plochy oběžného kola. Orientační měření se pouze úzce zaměřilo na průtoky vzduchu a dopravní tlaky, pro které inovativní volné oběžné kolo smysl má a vykazuje snížení měrného příkonu ventilátoru

5.4.3 EXPERIMENT Č. 3 OPTIMALIZACE STANDARDNÍHO VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ŽIVOTNÍ CYKLUS PRODUKTU A RECYKLACI MATERIÁLŮ

Na základě teoretického přístupu a společného výzkumu mezi Ústavem technických zařízení budov a Ústavem pozemního stavitelství bylo vytvořeno inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku k výrobě volného oběžného kola. Po dobu životnosti ventilátoru lze stávající oběžné kolo nahradit oběžným kolem s vyšší účinností dopravovaného vzduchu. To bude ovlivněno vývojem tvaru oběžného kola. Další výhodou oběžného kola vyrobeného pomocí 3D tisku je absence nutnosti vyvažování oběžného kola. Předmětem tohoto experimentu je model vzduchotechnické jednotky, do které bylo umístěno inovativní volné oběžné kolo vyrobené z udržitelného materiálu. Experimentální měření bylo prováděno a následně porovnáno s referenčním ocelovým kolem o stejné geometrii.

Oběžné kolo bylo vyrobeno z plastových recyklátů PET s vysokou tepelnou stabilitou a dostatečnými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí. Plastové oběžné kolo oproti ocelovému spotřebuje při výrobě a následné recyklaci méně energie. Svou podstatou byl vývoj cílen, aby inovativní přístup byl aplikovatelný do oblasti praktického využití v reálných provozech, při sériové výrobě levných součástek, pracnosti montáže a údržby.



Obr. 5.16: Obrázek standardně používaného ocelového volně oběžného kola (vlevo) a jeho geometrické kopie - inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu PLA pomocí 3D tisku.

MĚŘENÍ

Rozsáhle měření veličin pro vytvoření ventilátorových charakteristik probíhalo, pro běžné ocelové kolo, za ustáleného průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou 500; 750; 1000; 1250; 1500 a 1750 m³/h.

Níže v tabulce jsou měřené hodnoty různých veličin pro konstantní průtok vzduchu vzduchotechnickou jednotkou pro **500 m³/h**. Presentované naměřené hodnoty jsou pouze pro nízký průtok vzduchu z důvodu klesající účinnosti oběžného kola vlivem vyššího průtoku vzduchu a vzrůstu třecích sil na povrchu materiálu, ze které je volné oběžné kolo vyrobeno. Toto konkrétní oběžné kolo není vhodné pro velké průtoky vzduchu. Sledováním hodnot měrného příkonu ventilátoru v tabulce níže je patrné, že instalace inovativního oběžného kola má význam s rostoucími dopravními tlaky.

Tab. 5.21: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.

Druh měření		Jednotka	Běžné ocelové kolo				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	500,00				
Δp_s	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	1608	1974	2710	3290	-
f	Frekvence frekvenčního měniče	[Hz]	27,80	34,20	47,30	57,60	66,70
P _N	Příkon ventilátoru	[kW]	0,075	0,11	0,23	0,35	0,49
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	543,60	809,28	1624,32	2512,08	3551,04
L _p	Zvuk součtová hladina	dB(A)	77,81	86,04	91,44	94,56	99,23

Tab. 5.22: Naměřená data pro plastovou kopii běžného ocelového kola.

Druh měření		Plastová kopie běžného ocelového kola						
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	500,00					
Δp_s	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00	
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	1586	1930	2626	3178	*	
f	Frekvence frekvenčního měniče	[Hz]	27,50	33,40	45,70	55,50	*	
P _N	Příkon ventilátoru	[kW]	0,079	0,11	0,21	0,31	*	
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	565,20	804,24	1512,00	2236,32	*	
L _p	Zvuk součtová hladina	dB(A)	76,58	83,23	89,39	94,01	*	

* Došlo k poškození oběžného kola
 - Nezměřeno2

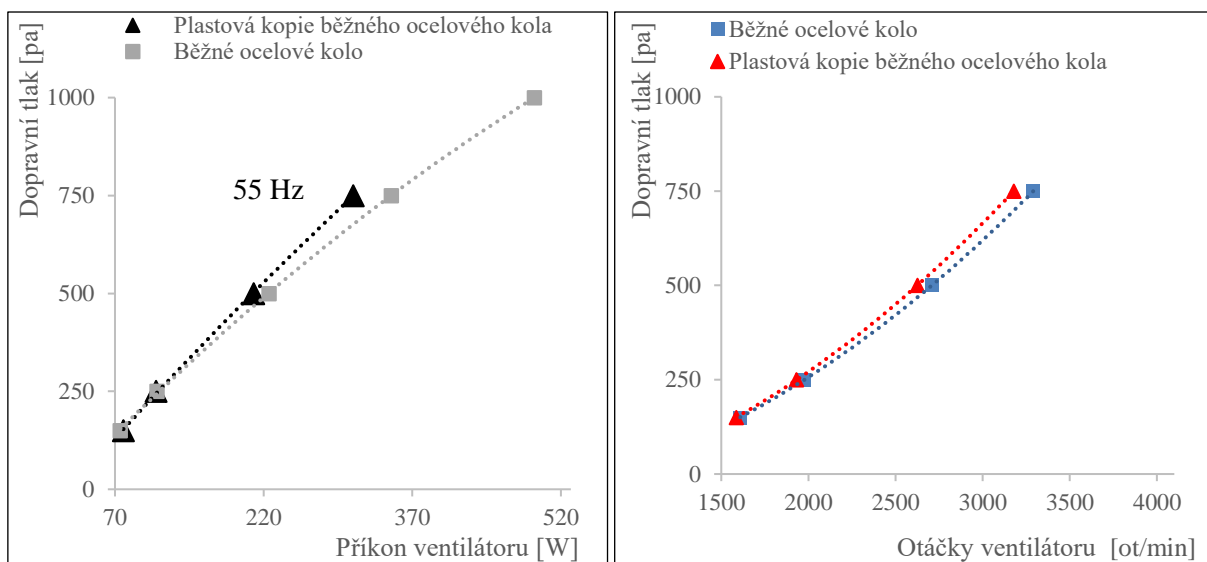
VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Z prezentovaného měření lze tvrdit, že instalace inovativního oběžného kola s **malým průtokem vzduchu a se středním dopravním tlakem** přispívá ke snížení měrného příkonu ventilátoru. Pro takto stanovené okrajové podmínky může snížení měrného příkonu ventilátoru činit až 275 Ws/m³. Měřením bylo prokázáno, že inovativní řešení má vliv na snížení součtové hladiny zvuku, které může činit až 2,8 dB. Z grafu níže je patrné, že instalace inovativního oběžného kola má příznivý význam napříč vyššími měřeními frekvencemi asynchronního motoru z hlediska průtoku vzduchu v závislosti na nastavenou frekvenci.

Tab. 5.23: Hodnocení dat pro plastovou kopii běžného ocelového kola.

Druh měření			Plastová kopie běžného ocelového kola				
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[kW]	0,00	0,00	0,02	0,04	*
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	-21,60	5,04	112,32	275,76	*
Lp	Snížení součtové hladiny zvuku	dB(A)	1,2	2,8	2,1	0,5	*

*Došlo k poškození oběžného kola



Graf 5.9: Naměřené experimentální výsledky běžného volného oběžného kola z oceli a jeho plastové kopie.

Mezi hlavní přínosy představeného technického řešení tedy patří:

- snížení měrného příkonu ventilátoru až o 275 Ws/m³,
- nenavýšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky,
- při výrobě, v provozu a při následné recyklaci výrobek spotřebuje méně energie,
- automatický chod,
- nenavýšuje tlakovou ztrátu ventilátorové komory,
- snadná instalace jak do nových, tak již stávajících vzduchotechnických jednotek.

Negativní dopad řešení:

- došlo k poškození výrobku při vysokém dopravním tlaku vlivem nízké tuhosti výrobku vlivem torzního namáhání kolem osy příruby ventilátoru.

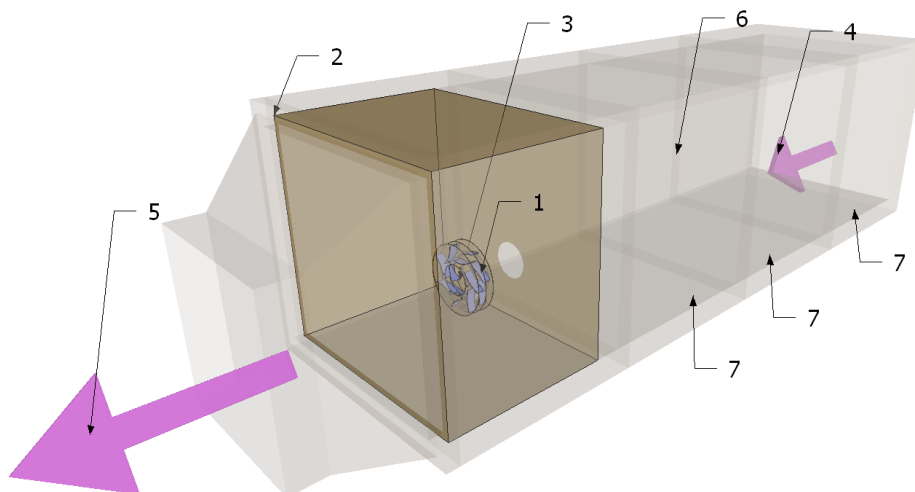
5.4.4 EXPERIMENT Č. 4 OPTIMALIZACE DVOUŘADÉHO VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ŽIVOTNÍ CYKLUS PRODUKTU A RECYKLACI MATERIÁLŮ

Na základě společného výzkumu mezi Ústavem technických zařízení budov a Ústavem pozemního stavitelství bylo vytvořeno inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku k výrobě volného oběžného kola. Po dobu životnosti ventilátoru lze stávající oběžné kolo nahradit oběžným kolem s vyšší účinností dopravovaného vzduchu. To bude ovlivněno vývojem tvaru oběžného kola. Další výhodou oběžného kola vyrobeného pomocí 3D tisku je absence nutnosti vyvažování oběžného kola. Předmětem tohoto experimentu je model vzduchotechnické jednotky, do které bylo umístěno inovativní volné oběžné kolo vyrobené z udržitelného materiálu. Experimentální měření bylo prováděno a následně porovnáno s referenčním ocelovým kolem o stejné geometrii. Oběžné kolo bylo vyrobeno z plastových recyklátů PET s vysokou tepelnou stabilitou a dostatečnými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí. Plastové oběžné kolo oproti ocelovému spotřebuje při výrobě a následné recyklaci méně energie. Svou podstatou byl vývoj cílen, aby inovativní přístup byl aplikovatelný do oblasti praktického využití v reálných provozech, při sériové výrobě levných součástek, pracnosti montáže a údržby.



Obr. 5.17: Obrázek inovativního volného oběžného kola (vlevo) a jeho geometrická kopie – inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku (vpravo).

Volné oběžné kolo radiálního ventilátoru (3) vyrobené z moderního udržitelného materiálu (1) ve ventilátorové komoře (2) obsahuje moderní udržitelný materiál (1) volného oběžného kola (3) pro vzduchotechnickou jednotku (6) ve směru výtlaku (5) vymezuje vnitřní prostor ventilátorové komory (2) uvnitř které je umístěné volné (malé) oběžné kolo radiálního ventilátoru (3).



Obr. 5.18: Pohled do ventilátorové komory po instalaci inovativního oběžného kola.

DETAILNÍ MĚŘENÍ

Rozsáhlé měření veličin pro vytvoření ventilátorových charakteristik probíhalo za ustáleného průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou 500; 750; 1000; 1250; 1500 a 1750 m³/h.

Tab. 5.24: Naměřené hodnoty pro plechové kolo, dvouřadé.

Druh měření		500						1000						1500				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]																
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	750	1000	150	250	500	750	1000	150	250	500	683	-	
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	2,514	2,443	2,422	2,424	2,427	9,528	9,32	9,53	9,444	9,408	20,82	20,61	20,57	20,35	-	
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	1637	1980	2646	3180	3648	2283	2506	3077	3535	3968	3108	3269	3694	3952	-	
P _N	Příkon vent.	[W]	88	128,5	233,4	351	484	174,5	230	417,2	608,2	857,2	359,4	443,3	693,2	926	-	
I	proud	[A]	0,672	0,828	1,13	1,398	1,656	0,965	1,17	1,632	2,037	2,552	1,452	1,659	2,214	2,752	-	
f	Frekvence	[Hz]	28,4	34,5	46,3	55,9	64,5	40	44,3	55,2	64,1	72,9	54,8	58,2	67	73,9	-	
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	80,2	85,94	92	96,86	99,74	88,01	90,84	95,24	98,61	101,5	96,42	97,39	99,87	101,1	-	
SFP	Měrný příkon	[Ws/m ³]	633,6	925,2	1680	2527	3485	628,2	828	1502	2190	3086	862,6	1064	1664	2222	-	
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1442						1287						1453			

Tab. 5.25: Naměřené hodnoty pro plastové kolo, dvouřadé.

Druh měření		500						1000						1500				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]																
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	750	1000	150	250	500	750	1000	150	250	500	-	-	
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	2,398	2,405	2,401	2,383	2,337	9,278	9,352	9,298	9,295	9,283	20,25	20,23	20,24	-	-	
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	1553	1913	2696	3215	3643	2118	2373	2922	3404	3835	2836	3052	3486	-	-	
P _N	Příkon vent.	[W]	81,2	121,1	233,5	338,3	459,6	179,7	240,5	401,9	590,6	804,3	397,6	500	759	-	-	
I	proud	[A]	0,641	0,795	1,115	1,339	1,585	1,01	1,196	1,623	2,028	2,445	1,555	1,804	2,449	-	-	
f	Frekvence	[Hz]	27	33,4	47,1	56,4	64,2	37,6	42,4	52,8	62	70,3	51,4	55,8	65,3	-	-	
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	77,12	83,47	90,01	94,24	97,25	91,67	88,91	92,1	95,46	100,3	97,53	98,38	99,37	-	-	
SFP	Měrný příkon	[Ws/m ³]	584,6	871,9	1681	2436	3309	646,9	865,8	1447	2126	2895	954,2	1200	1822	-	-	
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1393						1271						1325			

DETAILNÍ MĚŘENÍ – POKRAČOVÁNÍ TABULKY

Tab. 5.26: Naměřené hod noty pro plechové kolo, dvouřadé.

Druh měření												
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	1750					2000				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	468	-	-	150	219	-	-	-
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	27,54	27,48	27,45	-	-	35,23	35,4	-	-	-
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	3524	3684	3987	-	-	3980	4056	-	-	-
P _N	Příkon vent.	[W]	499,8	603,7	865,9	-	-	706,6	783,3	-	-	-
I	proud	[A]	1,732	1,961	2,572	-	-	2,134	2,333	-	-	-
f	Frekvence	[Hz]	63,1	66,6	74	-	-	72	74	-	-	-
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	100,1	101	102,2	-	-	103,3	104	-	-	-
SFP	Měrný příkon	[Ws/m ³]	1028	1242	1781	-	-	1272	1410	-	-	-
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1350					1341				

Tab. 5.27: Naměřené hodnoty pro plastové kolo, dvouřadé.

Druh měření												
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	1750					2000				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150	250	-	-	-	150	-	-	-	-
ΔP _{ex}	Tlaková ztráta externí	[pa]	27,25	27,1	-	-	-	35,09	-	-	-	-
n	Otáčky ventilátoru	[ot/min]	3255	3421	-	-	-	3662	-	-	-	-
P _N	Příkon vent.	[W]	595,6	703,6	-	-	-	864,6	-	-	-	-
I	proud	[A]	1,982	2,215	-	-	-	2,501	-	-	-	-
f	Frekvence	[Hz]	59,9	63,5	-	-	-	68,8	-	-	-	-
L _p	Zvuk souč. hlad.	[dB(A)]	101,6	102,2	-	-	-	105	-	-	-	-
SFP	Měrný příkon	[Ws/m ³]	1225	1447	-	-	-	1556	-	-	-	-
SFP _{prům.}	Prům. SFP	[Ws/m ³]	1336					1556				

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

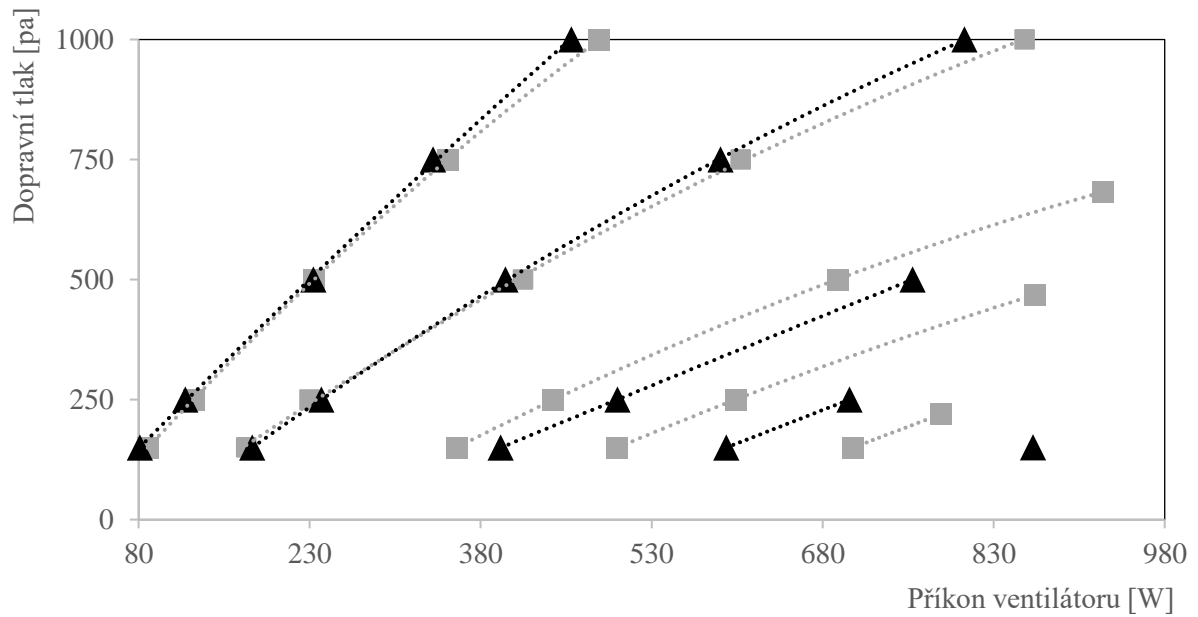
Sledováním hodnot měrného příkonu ventilátoru v tabulce níže je patrné, že instalace inovativního oběžného kola má pozitivní vliv pro nízké průtoky vzduchu. V tabulce a grafu níže je vidět, že s rostoucím průtokem vzduchu se zhoršuje měrný příkon ventilátoru vlivem zvýšení třecích sil vlivem horší povrchové úpravy plastových oběžných kol. Pro takto stanovené okrajové podmínky může snížení měrného příkonu ventilátoru činit až 190 Ws/m^3 . Měřením bylo prokázáno, že inovativní řešení má vliv na snížení součtové hladiny zvuku, které může činit až 2,8 dB v závislosti na nastavenou frekvenci.

Tab. 5.28: Hodnocení výsledků dat pro plastové kolo dvouřadé.

Druh měření			500					1000					1500				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]															
Δp_s	Dopravní tlak	[pa]	150	250	500	750	1000	150	250	500	750	1000	150	250	500	-	-
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[W]	6,8	7,4	-0,1	12,7	24,4	-5,2	-10,5	15,3	17,6	52,9	-38,2	-56,7	-65,8	-	-
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	49,0	53,3	-0,7	91,4	175,7	-18,7	-37,8	55,1	63,4	190,4	-91,7	-136	-158	-	-
Lp	Zvuk součtová hladina	[dB(A)]	3,1	2,5	2,0	2,6	2,5	-3,7	1,9	3,1	3,2	1,2	-1,1	-1,0	0,5	-	-

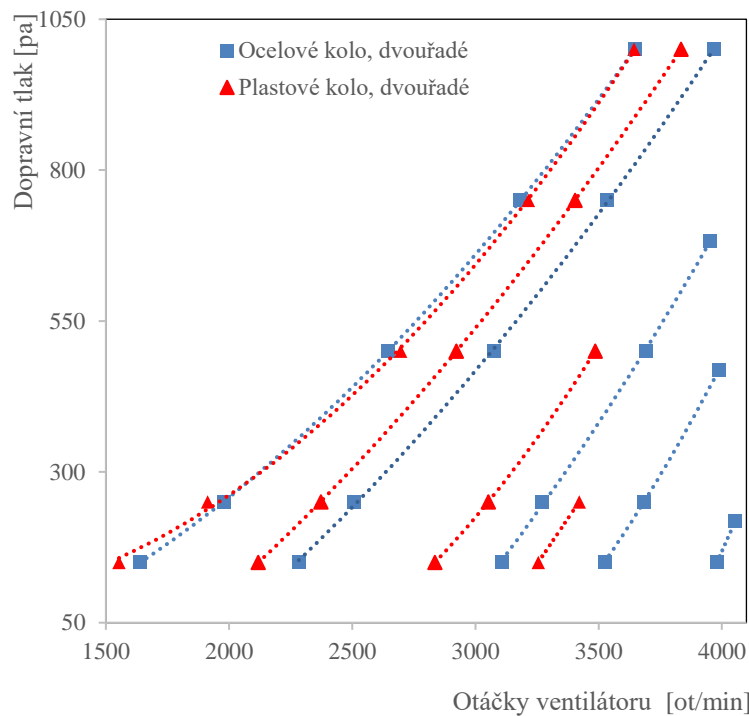
Tab. 5.29: Pokračování hodnocení výsledků dat pro plastové kolo dvouřadé.

Druh měření			1750					2000				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]										
Δp_s	Dopravní tlak	[pa]	150	250	-	-	-	150	-	-	-	-
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[W]	-95,8	-99,9	-	-	-	-158	-	-	-	-
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	-197	-206	-	-	-	-284	-	-	-	-
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	[dB(A)]	-1,5	-1,2	-	-	-	-1,7	-	-	-	-



■ Naměřené hodnoty pro plechové kolo, dvouřadé ▲ Naměřené hodnoty pro plastové kolo, dvouřadé

Graf 5.10: Naměřené experimentální výsledky volného dvouřadého oběžného kola z oceli a jeho plastové kopie.



Graf 5.11: Dopravní tlak vs. naměřené otáčky volného oběžného kola (experimentální výsledky měření volných oběžných kol). Referenční ocelové kolo vs. plastové kolo.

Mezi hlavní přínosy představeného technického řešení tedy patří:

- snížení měrného příkonu ventilátoru až o 190,4 Ws/m³,
- nenavýšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky,
- při výrobě, v provozu a při následné recyklaci výrobek spotřebuje méně energie,
- automatický chod,
- nenavýšuje tlakovou ztrátu ventilátorové komory,
- snadná instalace jak do nových, tak již stávajících vzduchotechnických jednotek.

Negativní dopad řešení:

- oproti ocelovému kolu nižší pevnost materiálu ze kterého je výrobek vyroben,
- případné vyšší abrazivní opotření v případě transportu jemných částic ve vzduchu.

Doporučení:

- v další etapě výzkumu doporučuji podle předešlých měření zvýšit tuhost oběžného kola, například pomocí větší tloušťky stěny, omezení vnitřního pnutí materiálu, nebo použitím pružnějšího materiálu,
- v další etapě výzkumu doporučuji snížit drsnost povrchu oběžného kola.

Poznámka:

- naměřená data během experimentálního měření ukazují, že při škrcení hmotnostního toku na výstupu ventilátoru vychází porovnání dopravní tlak pro ocelová kola a jejich plastové kopie téměř identicky. U ocelového kola byl získán vyšší rozsah otáček. To lze vysvětlit menší setrvačností způsobené nižší hmotností plastového kola a nižší tuhostí jeho lopatek.

5.5 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH PŘÍSTUPŮ K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU

Experiment č. 1 s názvem „*optimalizace víření vzduchu ve vzduchotechnických jednotkách pomocí redistributoru vzduchu*“ hodnotil zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem. Cílem bylo pomoci proudy vzduchu změnit směr víření vzduchu a usnadnit přívod vzduchu z komory ventilátoru plynulým klouzáním po nakloněné ploše. Výsledky popisovaly zlepšení hydraulických vlastností, pokud na výtlačné straně je větší tlaková ztráta. Po důkladném utěsnění a vyhlazení styků náběhových plechů uvnitř ventilátorové komory byly naměřeny zajímavé hodnoty, které vypovídají o jednoznačném trendu navýšení průtoku vzduchu. **Pro taktó stanovené okrajové podmínky se měrný příkon ventilátoru snížil až o necelých 6 %.**

Podstatou experimentu č. 2 „*optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru pomocí konkávní a konvexní geometrie lopatek*“ bylo zavedení volného oběžného kola založeného na spojení dvou řad zakřivených lopatek s konkávními a konvexními tvary. Tyto lopatky byly navrženy tak, aby optimalizovaly tlakovou ztrátu komory ventilátoru s volným oběžným kolem, které vytváří menší, rovnoměrnější a společně interaktivní toky. Záměrem bylo, aby tyto proudy vedly k plynulejší změně směru víření vzduchu v komoře ventilátoru, ale toto oběžné kolo nenalezlo v této aplikaci komplexní přínos. Z prezentovaných měření lze tvrdit, že instalace inovativního oběžného kola s **malým průtokem vzduchu a s velkým dispozičním tlakem mírně** přispívá ke zlepšení parametru SFP ventilátoru.

Třetí experiment č. 3 „*optimalizace standardního volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu a recyklaci materiálu*“ bylo vyrobeno z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku a představuje vytvoření udržitelného volného oběžného kola. Po dobu životnosti ventilátoru lze stávající oběžné kolo nahradit oběžným kolem s vyšší účinností dopravovaného vzduchu. To bude ovlivněno vývojem tvaru oběžného kola. Oběžné kolo bylo vyrobeno z recyklovaných plastů s vysokou tepelnou stabilitou a přiměřenými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí. Ve srovnání s ocelí spotřebuje plastové oběžné kolo méně energie při výrobě a následné recyklaci materiálu. Naměřené výsledky extra popisovaly zlepšení hydraulických vlastností ventilátoru v podobě **snížení měrného příkonu ventilátoru až o 275 Ws/m³** ve srovnání s podobným ocelovým kolem. Výsledky navíc popsaly, že inovativní řešení nenavyšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky,

Třetí experiment č. 4 „*optimalizace dvouřadého volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu a recyklaci materiálů*“ byl vyroben z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku a představuje vytvoření udržitelného volného oběžného kola. Oběžné kolo bylo vyrobeno z recyklovaných plastů s vysokou tepelnou stabilitou a přiměřenými mechanickými vlastnostmi, které šetří životní prostředí. Ve srovnání s ocelí spotřebuje plastové oběžné kolo méně energie při výrobě a následné recyklaci materiálu. Naměřené výsledky extra popisovaly zlepšení hydraulických vlastností ventilátoru v podobě **snížení měrného příkonu ventilátoru až o 190 Ws/m³** ve srovnání s podobným ocelovým kolem. Výsledky navíc popsaly, že inovativní řešení nenavyšuje produkci vlastního akustického výkonu vzduchotechnické jednotky.

Dílčí závěry výše uvedených experimentů nám ukazují způsob, jakým směrem se ubírat ke zlepšení hydraulických vlastností ve ventilátorových jednotkách a naznačují trend možných budoucích a rozsáhlejších aplikací výrobců vzduchotechnických systémů s cílem omezení tlakových ztrát a environmentální aspekty snížení potřeby těžby původních materiálů snižováním poptávky po nových materiálech, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a **prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků** u vzduchotechnických systémů.

6 SYNTÉZA TEORETICKÉHO A EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍSTUPU K OPTIMALIZACI TRANSPORTU VZDUCHU

6.1 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT VÝZKUMNÝCH PROJEKTŮ A DÍLČÍ VÝSLEDKY

Rozsáhlé, detailní měření veličin pro vytvoření ventilátorových charakteristik probíhalo za ustáleného průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou 500; 750; 1000; 1250; 1500, 1750 a 2000 m³/h. Za účelem získání co nejlépe interpretovatelných výsledků získaných v průběhu teoretických analýz a experimentálních měření výzkumných projektů jsou v této kapitole uvedeny výsledky pro výřez měřených charakteristik.

Nejzajímavější naměřené charakteristiky jednotlivých originálních výzkumných projektů jsou syntezovány do následujících tabulek a výsledná data, která byla předmětem zkoumání, jsou barevně rozlišena⁵. Syntéza výsledků proběhlých měření a dílčích výsledků inovativních výzkumných projektů je posouzena na jejich aerodynamickou účinnost, snížení zvukové součtové hladiny a environmentální přínos za ustálených hydraulických okrajových podmínek.

V první syntéze dat dílčího cíle disertační práce se interpretuje zlepšení účinnosti víření vzduchu ve vzduchotechnických **jednotkách pomocí redistributoru vzduchu – náběhových plechů**. Výsledný měrný příkon ventilátoru je uveden při referenční frekvenci 74 Hz a porovnatelném reálném dopravním tlaku.

V syntézách naměřených dat dílčích cílů č. 2, 3 a 4 jsou uvedeny měřené hodnoty různých veličin pro konstantní průtok vzduchu vzduchotechnickou jednotkou **500 m³/h**. Prezentované naměřené hodnoty jsou pouze pro nižší průtok vzduchu z důvodu klesající účinnosti inovativních oběžných kol vlivem zvýšení třecích sil z důvodu horší povrchové úpravy plastových oběžných kol.

⁵ Legenda barevného podkreslení:

Bez zvýraznění: Výchozí přednastavené hodnoty v rámci regulačních členů na vzduchotechnické trati v rámci experimentálního měření.

Šedá: Výchozí referenční hodnoty stávajícího stavu k následnému porovnání.

Zelená: Naměřená hodnota, která se vůči referenční hodnotě zlepšila.

Oranžová: Naměřená hodnota, která se vůči referenční hodnotě pohoršila.

6.1.1 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT DÍLČÍHO CÍLE Č. 1

První syntéza měření dílčího cíle disertační práce interpretuje, v tabulkách níže, zlepšení účinnosti víření vzduchu ve vzduchotechnických **jednotkách pomocí redistributoru vzduchu**.

Z prezentovaných výsledků v tabulce „**Hodnocení výsledků syntézy dat**“ můžeme pro dílčí cíl č. 1: optimalizace víření vzduchu ve vzduchotechnických jednotkách pomocí redistributoru vzduchu potvrdit, že došlo k navýšení průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou průměrně o 6,6 % při zachování stejného dopravovaného tlaku, přičemž nedošlo k navýšení součtové hladiny zvuku. Posuzovaný měrný příkon ventilátoru se při referenční frekvenci 74 Hz a porovnatelným dopravním tlaku snížil až o necelých 6 %.

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu.

Druh měření			Bez plechů			
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	781,50	831,00	888,30	927,80
Δps	Dopravní tlak	[pa]	689,80	797,00	914,30	1004,80
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	60,00	65,00	70,00	74,00
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	0,55
SFP	Specific fan power	[Ws/m ³]	-	-	-	2134,08
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	86,8	*	*	*
*	Mimo rozsah měření zvukoměru.					
-	Neměřeno/neuvedeno.					

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu.

Druh měření			S důkladně utěsněnými plechy			
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	825,30	882,50	965,30	982,80
Δps	Dopravní tlak	[pa]	686,30	797,50	912,00	1002,30
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	60,00	65,00	70,00	74,00
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	0,55
SFP	Specific fan power	[Ws/m ³]	-	-	-	2014,65
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	86	*	*	*
*	Mimo rozsah měření zvukoměru.					
-	Neměřeno/neuvedeno.					

Tab. 6.3: Hodnocení výsledků syntézy dat.

Druh měření			S důkladně utěsněnými plechy			
V	Navýšení průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	43,80	51,50	77,00	55,00
		[%]	5,60	6,20	8,67	5,93
		Ø [%]	6,6			
Δps	Dopravní tlak	[pa]	686,3	797,5	912	1002,3
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	60	65	70	74
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	-	-	-	0,55
SFP	Snížení specific fan power	[Ws/m ³]				119,43
SFP	Snížení specific fan power	%	-	-	-	5,9
Lp	Snížení zvuk. součtové hladiny	dB(A)	0,8	-	-	-

6.1.2 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT DÍLČÍHO CÍLE Č. 2

Druhá syntéza měření dílčího cíle disertační práce interpretuje, v tabulkách níže, zlepšení účinnosti víření vzduchu ve vzduchotechnických **jednotkách pomocí optimalizovaného volného oběžného kola s konkávní a konvexní geometrií lopatek**.

Z prezentovaných výsledků v tabulce „**Hodnocení výsledků syntézy dat**“ můžeme pro dílčí cíl č. 3: optimalizace víření vzduchu ve vzduchotechnických jednotkách pomocí optimalizovaného volného oběžného kola s konkávní a konvexní geometrií lopatek potvrdit, že došlo ke snížení měrného příkonu ventilátoru pouze v jednom případě a to pouze o 66,24 [Ws/m³], přičemž nebyla zachována součtová hladina zvuku o 0,8 dB(A) a došlo k jejímu zvýšení. Důvodem může být vyšší hmotnost oběžného kola.

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.

Druh měření		Jednotka	Běžné ocelové kolo				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	500,00				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
f	Frekvence frekvenčního měniče	[Hz]	27,80	34,20	47,30	57,60	66,70
PN	Příkon ventilátoru	[kW]	0,075	0,11	0,23	0,35	0,49
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	543,60	809,28	1624,32	2512,08	3551,04
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	77,81	86,04	91,44	94,56	99,23

Tab. 6.5: Naměřená data pro ocelové dvouřadé kolo.

Druh měření		Jednotka	Ocelové kolo, dvouřadé				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	500,00				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
f	Frekvence frekvenčního měniče	[Hz]	28,40	34,50	46,30	55,90	64,50
PN	Příkon ventilátoru	[kW]	0,09	0,13	0,23	0,35	0,48
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	633,60	925,20	1680,48	2527,20	3484,80
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	80,2	85,94	92	96,86	99,74

Tab. 6.6: Hodnocení výsledků syntézy dat.

Druh měření		Jednotka	Ocelové kolo, dvouřadé				
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[kW]	-0,01	-0,02	-0,01	0,00	0,01
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	-90,00	-115,92	-56,16	-15,12	66,24
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	-2,4	0,1	-0,6	-2,3	-0,5

6.1.3 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT DÍLČÍHO CÍLE Č. 3

Třetí syntéza měření dílčího cíle disertační práce interpretuje, v tabulkách níže, zlepšení měrného příkonu ventilátoru pomocí optimalizace běžného volného oběžného kola lopatkového ventilátoru prostřednictvím **geometrické kopie vyrobené z lehčího materiálu**.

Z prezentovaných výsledků v tabulce „**Hodnocení výsledků syntézy dat**“ můžeme pro dílčí cíl č. 3: zlepšení měrného příkonu ventilátoru pomocí optimalizace běžného volného oběžného kola lopatkového ventilátoru prostřednictvím geometrické kopie vyrobené z lehčího materiálu potvrdit, že s rostoucím dopravním tlakem dochází ke snížení měrného příkonu ventilátoru až o 275 [Ws/m³], při zachování stejného dopravovaného tlaku, přičemž nedochází k navýšení součtové hladiny zvuku.

Tab. 6.7: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.

Druh měření		Jednotka	Běžné ocelové kolo				
V	Průtok vzduchu	[m ³ /h]	500,00				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
f	Frekvence frekvenčního měniče	[Hz]	27,80	34,20	47,30	57,60	66,70
PN	Příkon ventilátoru	[kW]	0,075	0,11	0,23	0,35	0,49
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	543,60	809,28	1624,32	2512,08	3551,04
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	77,81	86,04	91,44	94,56	99,23

Tab. 6.8: Naměřená data pro plastovou kopii běžného ocelového kola.

Druh měření		Jednotka	Plastová kopie běžného ocelového kola				
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	500,00				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
f	Frekvence frekvenčního měniče	[Hz]	27,50	33,40	45,70	55,50	64,20
PN	Příkon ventilátoru	[kW]	0,079	0,11	0,21	0,31	*
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	565,20	804,24	1512,00	2236,32	*
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	76,58	83,23	89,39	94,01	*

*Došlo k poškození oběžného kola

Tab. 6.9: Hodnocení výsledků syntézy dat

Druh měření		Jednotka	Plastová kopie běžného ocelového kola				
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[kW]	0,00	0,00	0,02	0,04	*
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	-21,60	5,04	112,32	275,76	*
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	1,2	2,8	2,1	0,5	*

*Došlo k poškození oběžného kola

6.1.4 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT DÍLČÍHO CÍLE Č. 4

Čtvrtá syntéza měření dílčího cíle disertační práce interpretuje, v tabulkách níže, zlepšení měrného příkonu ventilátoru pomocí optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek prostřednictvím **geometrické kopie vyrobené z lehčího materiálu**.

Z prezentovaných výsledků v tabulce „**hodnocení výsledků syntézy dat**“ můžeme pro dílčí cíl č. 4: optimalizace volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek prostřednictvím geometrické kopie vyrobené z lehčího materiálu potvrdit, že dochází ke snížení měrného příkonu ventilátoru až o 175 [Ws/m³], při zachování stejného dopravovaného tlaku, přičemž nedochází k navýšení součtové hladiny zvuku.

Tab. 6.10: Naměřená data pro ocelové dvouřadé kolo.

Druh měření			Ocelové kolo, dvouřadé				
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	500,00				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	28,40	34,50	46,30	55,90	64,50
PN	Nom. příkon vent.	[kW]	0,09	0,13	0,23	0,35	0,48
SFP	Specific fan power	[Ws/m ³]	633,60	925,20	1680,48	2527,20	3484,80
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	80,2	85,94	92	96,86	99,74

Tab. 6.11: Naměřená data pro plastovou kopii ocelového dvouřadého kola.

Druh měření			Plastové kolo, dvouřadé				
V	Průtok vzduchu [m ³ /h]	[m ³ /h]	500,00				
Δps	Dopravní tlak	[pa]	150,00	250,00	500,00	750,00	1000,00
f	Frekvence frekvenčního meniče	[Hz]	27,00	33,40	47,10	56,40	64,20
PN	Příkon ventilátoru	[kW]	0,08	0,12	0,23	0,34	0,46
SFP	Měrný příkon ventilátoru	[Ws/m ³]	584,64	871,92	1681,20	2435,76	3309,12
Lp	Zvuk součtová hladina	dB(A)	77,12	83,47	90,01	94,24	97,25

Tab. 6.12: Hodnocení výsledků syntézy dat.

Druh měření			Plastové kolo, dvouřadé				
PN	Snížení příkonu ventilátoru	[kW]	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru	[Ws/m ³]	48,96	53,28	-0,72	91,44	175,68
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	3,1	2,5	2,0	2,6	2,5

6.1.5 SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH DAT DÍLČÍHO CÍLE Č. 5

Pátá syntéza měření dílčího cíle disertační práce interpretuje, v tabulkách níže volného oběžné kolo lopatkového ventilátoru s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů a retrofit prostřednictvím **geometrické kopie volného oběžného kola vyrobené z lehčího materiálu**.

Z prezentovaných výsledků v tabulkách níže můžeme pro dílčí cíl č. 5: vývoj volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů a retrofit potvrdit, že došlo ke snížení uhlíkové stopy⁶, přičemž snížení je více než desetinásobné.

Tab. 6.13: Naměřená data pro environmentální opatření.

	Druh měření		Běžné ocelové kolo	Plastová kopie (PLA)	Plastová kopie (PET)
m	Naměřená hmotnost oběžného kola	[kg]	1,50	0,28	-
m	Dopočtená hmotnost oběžného kola	[kg]	-	-	0,24
GWP	Uhlíková stopa oceli [13]	[kg CO2 ekv./kg]	2,09	-	-
GWP	Uhlíková stopa plastu PLA [12]	[kg CO2 ekv./kg]	-	0,5 - 0,9	-
GWP	Uhlíková stopa recyklovaného plastu [11]	-	-	-	25% - 75% původního materiálu
GWP	Přibližná uhlíková stopa konkrétního kola	[kg CO2]	3,14	0,19	0,11

Tab. 6.14: Naměřená data pro environmentální opatření.

	Druh měření		Ocelové kolo dvouřadé	Plastová kopie (PLA)	Plastová kopie (PET)
m	Hmotnost oběžného kola	[kg]	1,71	-	0,37
m	Dopočtená hmotnost oběžného kola	[kg]	-	0,42	-
GWP	Uhlíková stopa oceli [13]	[kg CO2 ekv./kg]	2,09	-	-
GWP	Uhlíková stopa plastu PLA [12]	[kg CO2 ekv./kg]	-	0,5 - 0,9	-
GWP	Uhlíková stopa recyklovaného plastu [11]	-	-	-	25% - 75% původního materiálu
GWP	Přibližná uhlíková stopa konkrétního kola	[kg CO2]	3,58	0,29	0,16

⁶ Jako databáze produktů a dopadů jejich výroby na životní prostředí byl použit katalog Envimat [26].

6.2 SYNTÉZA VÝSLEDKŮ DÍLČÍCH CÍLŮ

Tabulky níže porovnávají syntézu výsledků parametrů měrného příkonu ventilátoru (SFP), zvukové součtové hladiny a environmentálního přínosu. Z prezentovaných výsledků lze tvrdit, že za daných okrajových podmínek a z uvedených inovativních technických řešení je redistributor vzduchu nejlepší variantou pro optimalizaci transportu vzduchu ve ventilátorové komoře. Dvouřadé kolo je vhodnější pro jiné aplikace. Okrajové podmínky měření jsou uvedeny v předchozí kapitole 6.1 „Syntéza naměřených dat výzkumných projektů a dílčí výsledky“

Tab. 6.15: Výsledek dílčího cíle č. 1: Náběhové plechy.

Druh měření			Běžné ocelové kolo	Běžné ocelové kolo s náběh. plechy	Zvýšení účinnosti?
V	Průměrné navýšení průtok vzduchu	[%]	-	6,60	
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru ⁷	[Ws/m ³]	-	119,43	✓
		[%]	-	5,90	
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny ⁸	dB(A)	-	0,80	

Tab. 6.16: Výsledek dílčího cíle č. 2: Oběžné kolo s konkávní a konvexní geometrií lopatek.

Druh měření			Běžné ocelové kolo	Dvouřadé ocelové kolo	Zvýšení účinnosti?
SFP	Průměrné snížení měrného příkonu vent.	[Ws/m ³]	-	-42,19	✗
		[%]	-	-6,60	
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	-	-1,13	

Tab. 6.17: Výsledek dílčího cíle č. 3: Plastové kopie běžného oběžného kola.

Druh měření			Běžné ocelové kolo	Plastová kopie běžného kola	Zvýšení účinnosti?
SFP	Průměrné snížení měrného příkonu vent.	[Ws/m ³]	-	92,88	✓
		[%]	-	3,60	
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	-	1,66	

Tab. 6.18: Výsledek dílčího cíle č. 4: Plastové kopie dvouřadého oběžného kola.

Druh měření			Dvouřadé ocelové kolo	Plastová kopie dvouřadého kola	Zvýšení účinnosti?
SFP	Průměrné snížení měrného příkonu vent.	[Ws/m ³]	-	73,73	✓
		[%]	-	4,40	
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	-	2,53	

Tab. 6.19: Výsledek dílčího cíle č. 5: Opatření pro snížení uhlíkové stopy.

Druh měření			ocelové kolo	Plastová kopie z recykl. plastu (PET)	Snížení CO ₂ ?
GWP	Uhlíková stopa běžného kola	[kg/CO ₂]	3,14	0,11	✓
GWP	Uhlíková stopa dvouřadého kola	[kg/CO ₂]	3,58	0,16	

⁷ Neproběhlo dílčí měření příkonu ventilátoru. Pro výpočet SFP byla použita hodnota nominálního příkonu ventilátoru uváděnou výrobcem pro příslušnou frekvenci.

⁸ Uvedená hodnota snížení zvukové součtové hladiny je pouze pro nastavenou frekvenci frekvenčního měniče 60 Hz z důvodu omezeného rozsahu měření měřícího přístroje.

6.3 VÝSLEDKY A GRAFICKÁ PREZENTACE SYNTÉZY DÍLČÍCH CÍLŮ

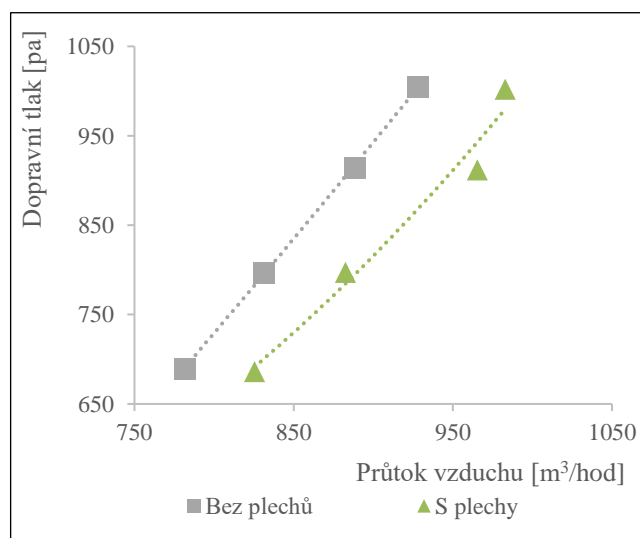
Syntéza dílčích výsledků v předchozí kapitole hodnotila zlepšení hydraulických vlastností ventilátoru a to především prostřednictvím reálného měrného příkonu ventilátoru v reálném modelu vzduchotechnické jednotky.

První řešení dílčího cíle v tabulce č. 6.15 popisovalo přínosy redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů umístěných do ventilátorové komory, které mění víření vzduchu tak, aby připomínalo dopravování vzduchu v kruhovém potrubí. Výsledky popisovaly zlepšení hydraulických vlastností vzduchotechnické jednotky. Syntéza výsledků z měření potvrdila, že došlo k navýšení průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou průměrně o 6,6 % při zachování stejného dopravovaného tlaku, přičemž nedošlo k navýšení součtové hladiny zvuku. **Posuzovaný měrný příkon ventilátoru se při referenční frekvenci 74 Hz a porovnatelným dopravním tlaku snížil až o 5,9 %.**

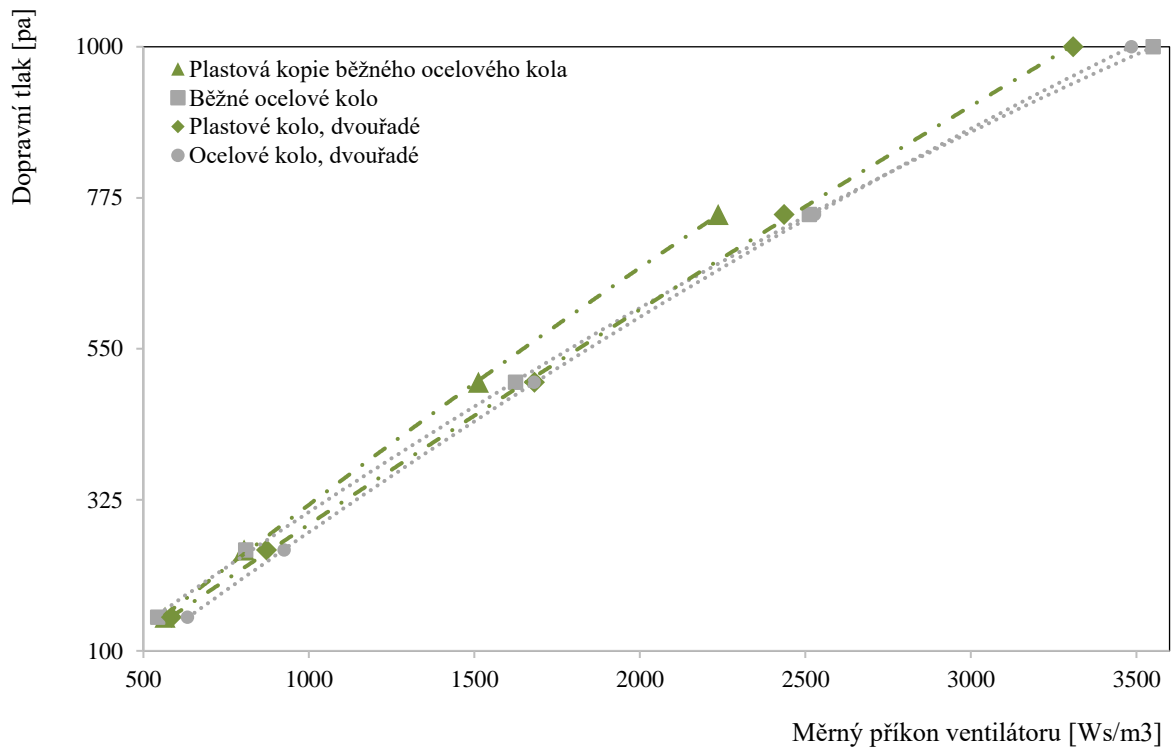
Podstatou syntézy výsledků druhého dílčího cíle uvedených v tabulce č. 6.16 bylo zhodnocení přínosu zavedení volného oběžného kola založeného na spojení dvou řad zakřivených lopatek s konkávními a konvexními tvary. **Výsledky popisovaly zhoršení průměrných hydraulických a akustických vlastností vzduchotechnické jednotky pro dané okrajové podmínky měření.** Z výsledků je patrné, že instalace inovativního oběžného kola nemá význam pro konkrétní měřené okrajové podmínky a toto oběžné kolo nenalezlo v této konkrétní aplikaci prakticky žádný přínos.

Podstatou syntézy výsledků třetího a čtvrtého dílčího cíle uvedených v tabulkách č. 6.17 a 6.18 bylo zhodnocení přínosu zavedení volného oběžného kola vyrobeno z moderního udržitelného materiálu s pomocí 3D tisku. Z prezentovaných výsledků můžeme prostřednictvím geometrických kopií volných oběžných kol vyrobených z lehčího materiálu potvrdit, že **dochází ke snížení průměrného měrného příkonu ventilátoru až o 4,4 %**, při zachování stejného dopravovaného tlaku a průtoku vzduchu, přičemž **dochází ke snížení součtové hladiny zvuku.**

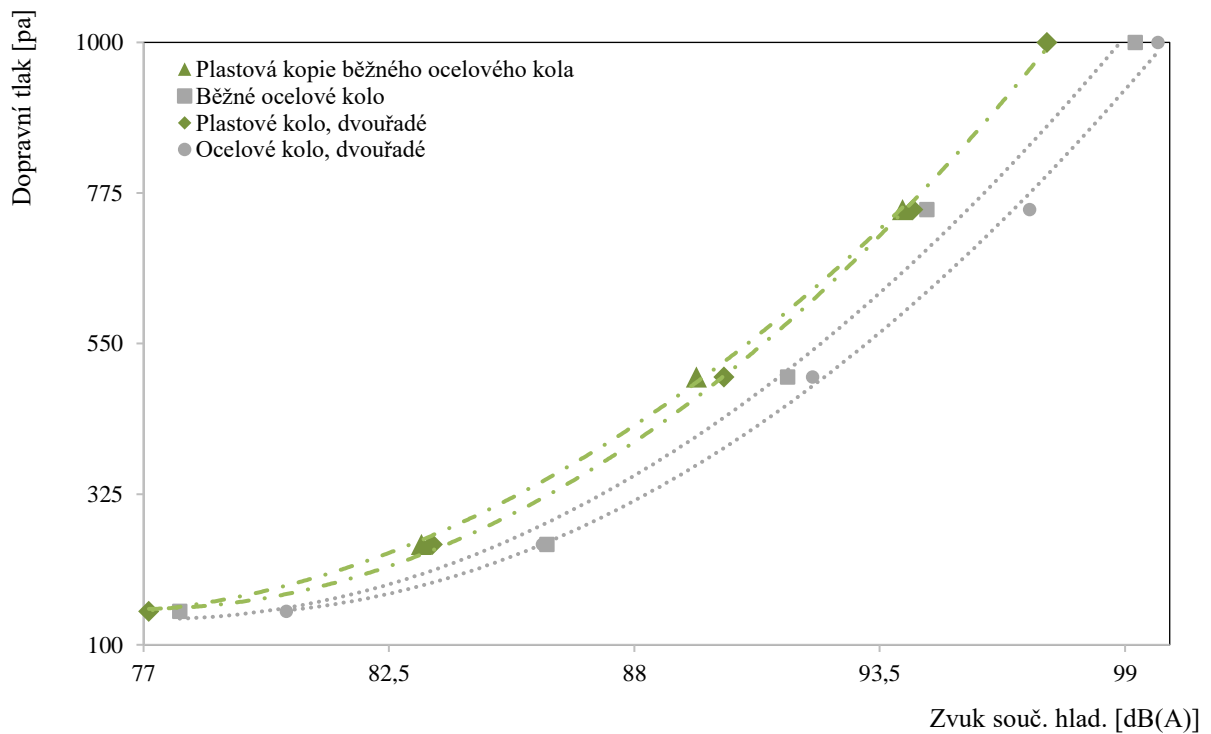
Páté a poslední řešení dílčího cíle, uváděné v tabulce č. 6.19, popisovalo přínosy vývoje volného oběžného kola lopatkového ventilátoru s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů a retrofit umístěných do ventilátorové komory. Z prezentovaných výsledků můžeme pro dílčí cíl potvrdit, že došlo ke snížení uhlíkové stopy, přičemž snížení je více než desetinásobné.



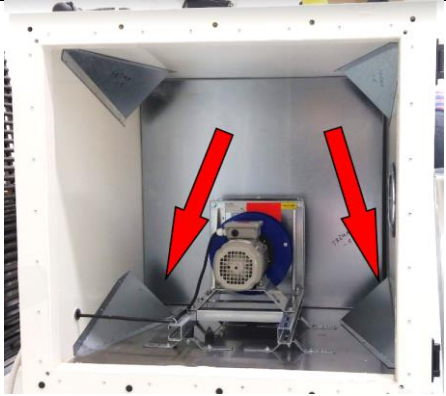

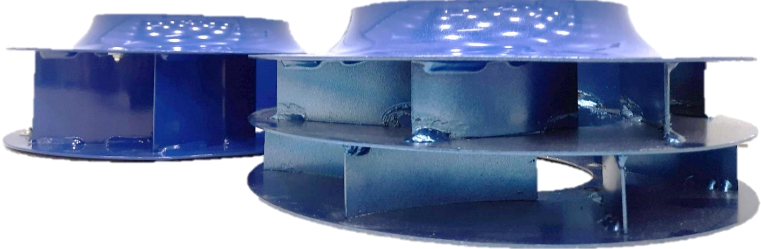




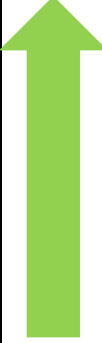
Graf 6.1: Naměřená charakteristická křivka ventilátoru s redistributorem vzduchu a bez redistributoru vzduchu.



Graf 6.2: Syntéza naměřených experimentálních výsledků měrných příkonů ventilátoru, pro referenční běžná ocelová kola a jejich inovativní plastové kopie. Okrajová podmínka 500 m³/hod.



Graf 6.3: Syntéza naměřených experimentálních výsledků zvukové součtové hladiny ventilátoru, pro referenční běžná ocelová kola a jejich inovativní plastové kopie. Okrajová podmínka 500 m³/hod.

		<p>Zlepšení systému o 5,9 %</p> <p>Sledovaný parametr měrný příkon ventilátoru SFP.</p>
		<p>Zhoršení systému o 6,6 %</p> <p>Sledovaný parametr měrný příkon ventilátoru SFP.</p>
		<p>Zlepšení systému o 4,4 %</p> <p>Sledovaný parametr měrný příkon ventilátoru SFP.</p>
		<p>Zlepšení systému o 3,6 %</p> <p>Sledovaný parametr měrný příkon ventilátoru SFP.</p>

Obr. 5.1: Závěrečný obrázek zlepšení systému pomocí inovativních řešení

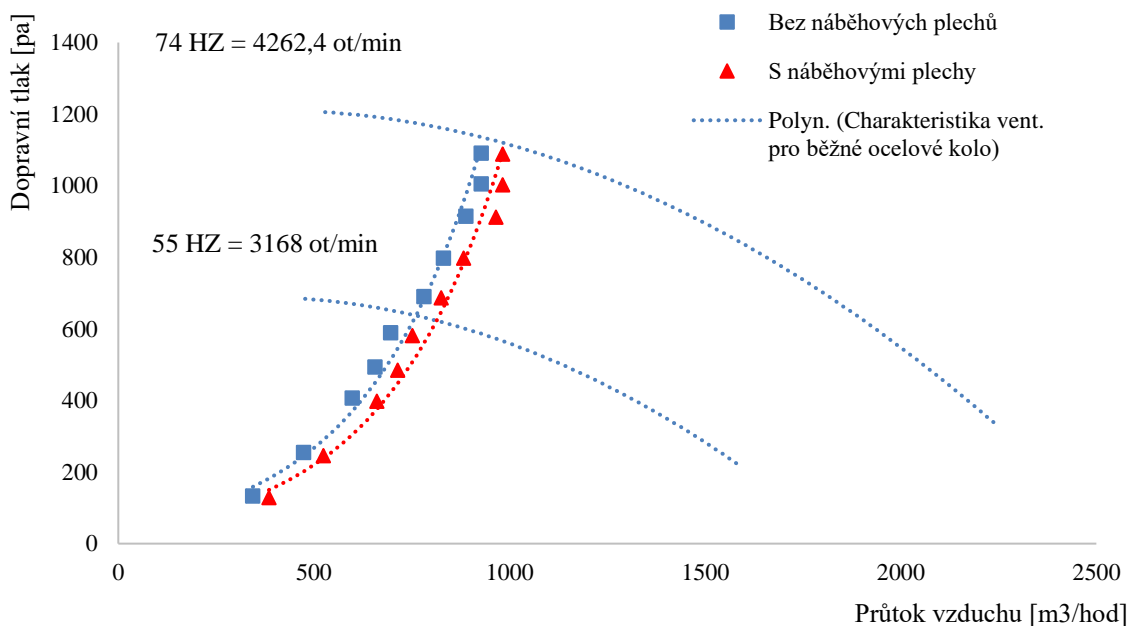
7 VÝSLEDNÁ CHARAKTERISTIKA POTRUBNÍ SÍTĚ A VENTILÁTORU

Sohledem na izobarické a izotermické vlastnosti plynu ve většině lopatkových strojů používaných ve vzduchotechnických jednotkách k transportu vzduchu lze teoreticky spočítat změny provozních parametrů v závislosti na změně otáček dle následujících vztahů:

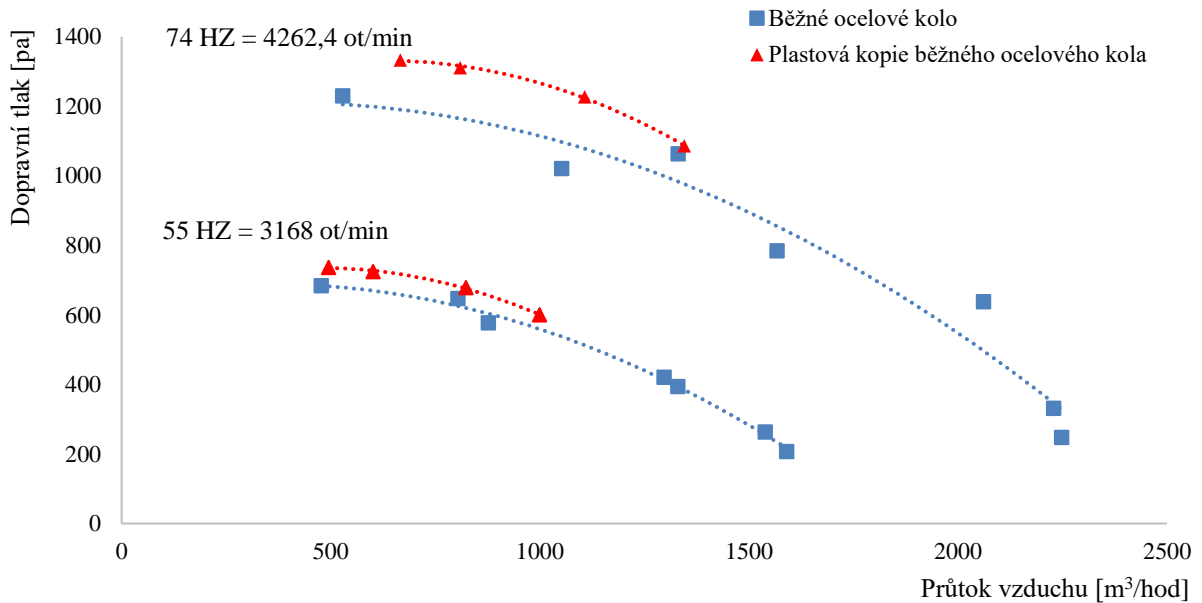
Tab. 7.1: Vztahy pro přepočet vlastností ventilátoru.

Druh měření		Změna otáček při $\rho = \text{konst.}$	
V	Objemový průtok vzduchu	[m ³ /hod]	$V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1}$ (2)
Δp	Celkový dopravní tlak	[Pa]	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$ (3)
P	Výkon ventilátoru	[W]	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$ (4)
n	Otáčky rotoru	[1/min]	$n = \frac{120f}{p_{\text{pólů}}}(1 - s)$ (5)

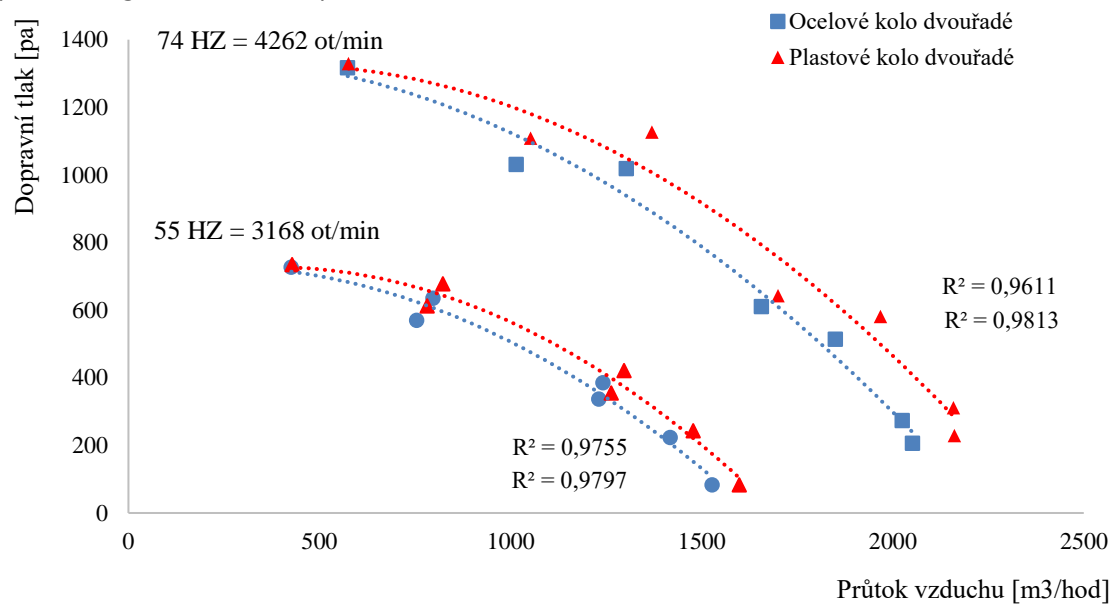
Dle naměřených hodnot v předchozích kapitolách, okrajových podmínek a vztahů pro přepočet vlastností ventilátorů, jsou dále stanovena jednoznačně strukturovaná grafická znázornění **zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře** v podobě diagramu charakteristiky potrubní sítě pro inovativní redistributor vzduchu v podobě náběhových plechů a tlakové charakteristiky ventilátoru pro inovativní plastové geometrické kopie plastových oběžných kol. Sloupcový graf na závěr kapitoly znázorňuje směrodatnou odchylku experimentálně naměřených a vztahově přepočítaných otáček asynchronního motoru, které mají zásadní vliv na přesnost výpočtu hydraulických charakteristik, dle výše uvedených vztahů. Výsledná charakteristická křivka je průměr reálných naměřených a vypočítaných otáček volného oběžného kola.



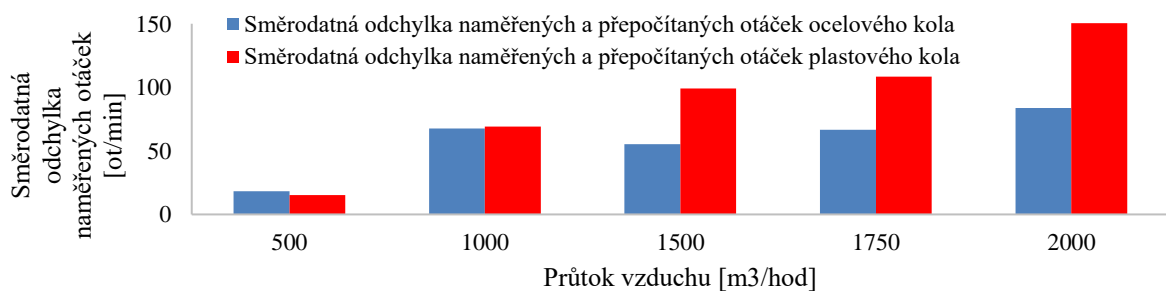
Graf 7.1: Charakteristika potrubní sítě bez náběhových plechů a s náběhovými plechy.



Graf 7.2: Tlaková charakteristika ventilátoru s běžným volným ocelovým oběžným kolem a jeho plastovou geometrickou kopií.



Graf 7.3: Tlaková charakteristika ventilátoru s dvouřadým ocelovým volným oběžným kolem a jeho plastovou geometrickou kopií.



Graf 7.4: Směrodatná odchylka naměřených a přepočítaných otáček oběžného kola.

8 VYHODNOCENÍ HYPOTÉZ

Na závěr práce, kdy již jsou známy všechny dosažené výsledky, ze všech dílčích cílů, je možné provést vyhodnocení vědeckých hypotéz, které byly předem popsány v kapitole č. 2.

HYPOTÉZA Č. 1: Úprava geometrického tvaru ventilátorové komory a optimalizace tlakové ztráty ve ventilátorové komoře umožní proud vzduchu plynuleji změnit směr víření kolem rohů komory a ulehčí výtoku vzduchu z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše, čímž se zvýší účinnost systému.

ODPOVĚĎ NA HYPOTÉZU Č. 1: Hypotéza byla zkoumána analyticky a experimentálně. Z teoretické analýzy výzkumu pomocí CFD simulace bylo prokázáno, že pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory vzduch jednoznačně a predikovatelně přilne k povrchu náběhových plechů, změni směr víření a následně se dále šíří přilnutý podél stěny komory směrem k výtaku.

Z experimentální analýzy a prezentovaných vyhodnocení a grafů lze jednoznačně tvrdit, že náběhové plechy s hladkým přechodem a velkým dispozičním tlakem výrazně přispívají ke zvýšení průtoku vzduchu vzduchotechnickou jednotkou.

POSOUZENÍ HYPOTÉZY Č. 1: Hypotéza byla jednoznačně potvrzena.

HYPOTÉZA Č. 2: Inovativní oběžné kolo vyrobené z „udržitelných“ lehkých materiálů bude mít lepší aerodynamickou účinnost ventilátoru.

ODPOVĚĎ NA HYPOTÉZU Č. 2: Naměřené výsledky v rámci experimentálního měření popisovaly, ve srovnání s podobným ocelovým kolem, zlepšení hydraulických vlastností ventilátoru při nižších průtocích vzduchu, kdy zároveň došlo ke snížení zvukové součtové hladiny ve srovnání s podobným ocelovým kolem. Při vyšších průtocích vzduchu klesá účinnost inovativních oběžných kol vlivem zvýšení třecích sil z důvodu horší povrchové úpravy plastových oběžných kol.

POSOUZENÍ HYPOTÉZY Č. 2: Hypotéza byla potvrzena v rámci syntézy dat, jasně definovaných okrajových podmínek a průtoku vzduchu 500 m³/hod.

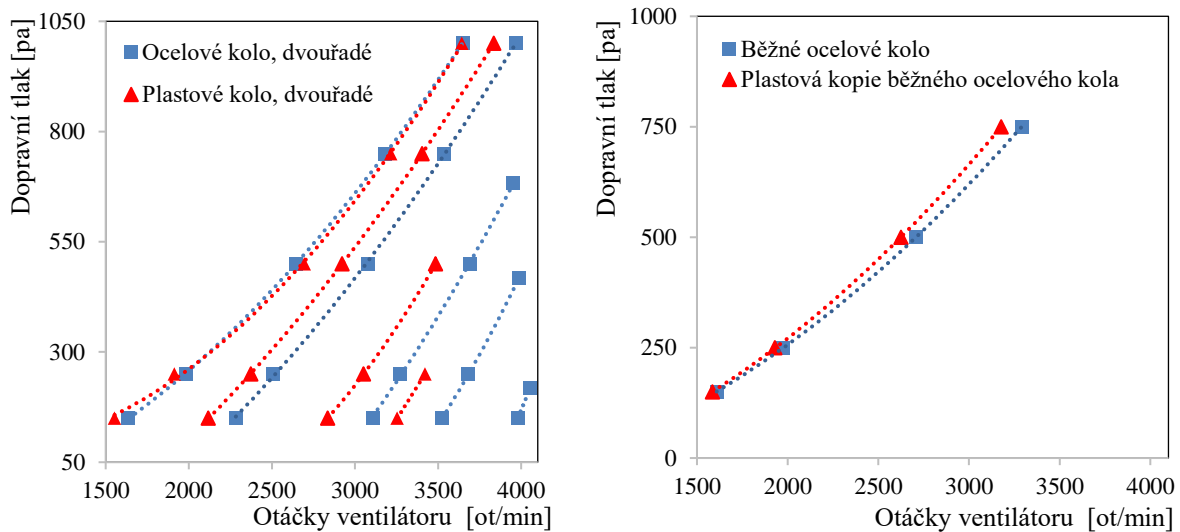
HYPOTÉZA Č. 3: Environmentální opatření pomocí inovativního oběžného kola z „udržitelných“ lehkých materiálů sníží uhlíkovou stopu oběžného kola.

ODPOVĚĎ NA HYPOTÉZU Č. 3: Z prezentovaných výsledků v tabulkách můžeme pro volná oběžná kola lopatkového ventilátoru vyrobená z moderního udržitelného materiálu PLA a z moderního udržitelného materiálu recyklovaného PET s ohledem na životní prostředí, životní cyklus produktu, recyklaci materiálů a retrofit potvrdit, že došlo ke snížení uhlíkové stopy. Ve srovnání s ocelí spotřebuje plastové oběžné kolo méně energie při výrobě a následné recyklaci materiálu, přičemž snížení uhlíkové stopy může být i více než desetinásobné.

POSOUZENÍ HYPOTÉZY Č. 3: Hypotéza byla jednoznačně potvrzena.

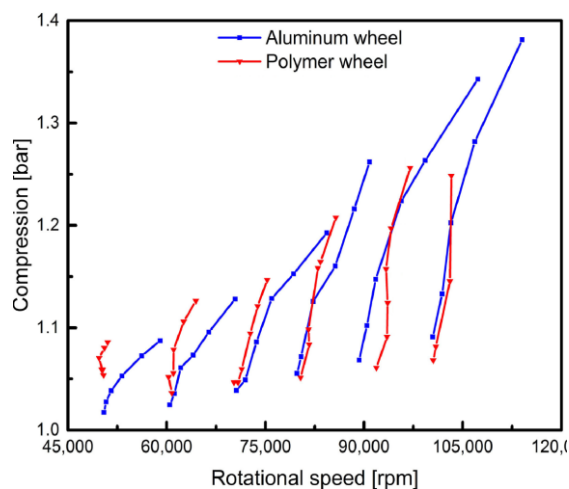
HYPOTÉZA Č. 4: Ocelové kolo dosáhne vyššího rozsahu otáček než plastové.

ODPOVĚĎ NA HYPOTÉZU Č. 4: Hypotéza byla zkoumána teoreticky a experimentálně na dvou ocelových kolech a jejich plastových geometrických kopiích. Z teoretické analýzy výzkumu řešeršního článku se dalo předpokládat, že ocelové kolo predikovatelně dosáhne vyššího počtu otáček. Naměřená data během experimentálního měření ukazují, že při škrcení hmotnostního toku na výstupu ventilátoru vychází dopravní tlak a počet otáček pro ocelová kola a jejich plastové kopie téměř identicky. S rostoucím hmotnostním průtokem vzduchu byl u ocelového kola byl získán vyšší rozsah otáček. To lze vysvětlit menší setrvačností prostřednictvím nižší hmotností plastového kola a nižší tuhostí jeho lopatek.



Graf 5.5: Dopravní tlak vs. naměřené otáčky volného oběžného kola (experimentální výsledky měření volných oběžných kol). Referenční ocelové kolo vs. plastové kolo.

POSOUZENÍ HYPOTÉZY Č. 4: Výsledky teoretického řešeršního přístupu byly verifikovány rozsáhlým experimentálním měřením a hypotéza byla jednoznačně potvrzena. Níže je uveden graf studie uvedené v kapitole 1.5.3, která zkoumala provozní vlastnosti kompresoru turbodmychadla s komponenty vyrobených technologií 3D tisku a který posloužil k potvrzení pravdivosti hypotézy.



Graf 4.6: Kompresní tlak vs. rychlost otáčení (experimentální výsledky kompresoru turbodmychadla) originální hliníkové kolo kompresoru vs. polymerové kolo [9].

9 DISKUSE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR

Práce poukazovala na složitost současného stavu řešené problematiky v reálných aplikacích při transportu vzduchu uvnitř ventilátorových komor s volným oběžným kolem za účelem energetických úspor, omezení nestability chování vzduchotechnického systému, současný vývoj legislativní požadavků a posuzovaných parametrů v oblasti vysoce účinných technických zařízení budov. Pomocí systematické syntézy experimentálních výsledků originálních výzkumných projektů bylo dosaženo hlavního cíle disertační práce, kterým bylo jednoznačné zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře prostřednictvím reálného měrného příkonu ventilátoru v reálném modelu vzduchotechnické jednotky, grafické znázornění v podobě diagramu charakteristické křivky transportu vzduchu ve ventilátorové komoře a definování rozdílu mezi standardními řešeními a inovativními řešeními víření vzduchu s udržitelným přesahem v rámci bezemisního standardu a cirkulární ekonomiky.

9.1 ZÁVĚRY K VÝSLEDKŮM EXPERIMENTÁLNÍCH PŘÍSTUPŮ

Experimentální část této práce se zabývala turbulentním prouděním vzduchu ve výtlačné komoře vzduchotechnické jednotky, které způsobuje tlakovou ztrátu ventilátorů. Do vzduchotechnických jednotek jsou osazeny ventilátory o výkonových parametrech naměřených v laboratořích za ideálních okrajových podmínek na kruhové cloně. To v praxi způsobuje často těžce řešitelný problém, kdy nainstalované ventilátory v reálné ventilátorové skříni nedosahují projektovaných parametrů. Prvním krokem technického řešení bylo sestavit aerodynamickou trať, na které se následně měřily reálné ventilátorové charakteristiky a tlakové ztráty ve ventilátorové komoře, které vznikají v reálných vzduchotechnických aplikacích negativním vlivem víření a tření vzduchu.

Na základě teoretického přístupu a společného výzkumu mezi Ústavem technických zařízení budov a Ústavem pozemního stavitelství bylo cílem technických řešení představit série experimentálních měření, pomocí kterých se optimalizují tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem.

Díličí výsledky experimentálních měření nám ukázaly způsob, jakým směrem se ubírat ke zlepšení hydraulických vlastností ve ventilátorových jednotkách a naznačovaly trend možné budoucí syntézy dat za přehledně definovatelných okrajových podmínek s cílem omezení tlakových ztrát a environmentální aspekty.

9.2 ZÁVĚR K VÝSLEDKŮM SYNTÉZY DÍLČÍCH CÍLŮ

Syntéza dílčích výsledků hodnotila zlepšení hydraulických vlastností ventilátoru a to především prostřednictvím reálného měrného příkonu ventilátoru v reálném modelu vzduchotechnické jednotky a grafickém porovnání v podobě diagramu pro referenční běžná řešení a jejich inovativní protějšky.

Řešení dílčího cíle č. 1 popisovalo přínosy redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů umístěných do ventilátorové komory. Výsledky popisovaly zlepšení hydraulických vlastností vzduchotechnické jednotky. **Posuzovaný měrný příkon ventilátoru se při referenční frekvenci 74 Hz a porovnatelným dopravním tlaku snížil až o 5,9 %, přičemž nedošlo k navýšení součtové hladiny zvuku.**

Podstatou syntézy výsledků dílčího cíle č. 2 bylo zhodnocení přínosu zavedení volného oběžného kola založeného na spojení dvou řad zakřivených lopatek s konkávními a konvexními tvary. **Výsledky popisovaly zhoršení průměrných hydraulických a akustických vlastností vzduchotechnické**

jednotky pro dané okrajové podmínky měření. Z výsledků bylo patrné, že instalace inovativního oběžného kola nemá význam pro konkrétní měřené okrajové podmínky.

Podstatou syntézy výsledků dílčích cílů č. 3 a č. 4 bylo zhodnocení přínosu zavedení volného oběžného kola vyrobeno z moderního udržitelného materiálu s pomocí 3D tisku. Z prezentovaných výsledků můžeme prostřednictvím geometrických kopií volných oběžných kol vyrobených z lehčího materiálu potvrdit, že **došlo ke snížení průměrného měrného příkonu ventilátoru až o 4,4 %**, přičemž došlo ke snížení součtové hladiny zvuku.

Dílčí cíl č. 5, popisoval environmentální přínos vývoje volného oběžného kola lopatkového ventilátoru. Z prezentovaných výsledků se potvrdilo, že **došlo ke snížení uhlíkové stopy, přičemž snížení je více než desetinásobné.**

9.3 ZÁVĚR K VÝSLEDNÉ CHARAKTERISTICE POTRUBNÍ SÍTĚ A VENTILÁTORŮ

Dle naměřených hodnot a vztahů pro přepočtení vlastností ventilátorů, byla stanovena jednoznačně strukturovaná grafická znázornění **zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře** v podobě diagramu charakteristiky potrubní sítě pro inovativní redistributor vzduchu v podobě náběhových plechů a tlakové charakteristiky ventilátoru pro inovativní plastové geometrické kopie plastových oběžných kol.

9.4 VÝZNAM PRÁCE PRO VĚDNÍ OBOR

Práce využila několik vědeckých disciplín, které propojila v jeden souvislý celek. Skrze výsledky, které jsou podloženy daty z reálných experimentálních měření, jsou hlavním přínosem této práce nové poznatky, které rozšiřují znalosti ve vědních oborech zabývajících se transportem vzduchu. Dalším přínosem je vývoj originálních výzkumných projektů, které mohou přispět k rozvoji nových technických řešení anebo nových technologií v oblasti technických zařízení a lopatkových strojů. Výsledky nám ukazují, jakým směrem se ubírat ke zlepšení hydraulických a environmentálních vlastností vzduchotechnických jednotek a naznačují trend budoucího rozsáhlejšího výzkumu.

Vědní obor stavební inženýrství se zaměřením na vytápění, větrání a klimatizace (Civil Engineering and Heating, Ventilating, AirConditioning - HVAC) byl v práci uveden prostřednictvím teoretických a experimentálních přístupů skrze analýzu současného problému turbulentního proudění vzduchu ve výtlačné komoře vzduchotechnické jednotky, které způsobuje tlakovou ztrátu ventilátorů, teoretický vývoj inovativních technických řešení a experimentální měření za jasně daných specifických okrajových podmínek.

Vědní obor energetického inženýrství se zaměřením na energetickou účinnost (Energy Engineering and Energy Efficiency) byl v práci uveden prostřednictvím teoretických a experimentálních přístupů skrze analýzu aktuálního trendu významného snižování spotřeby energie, mimo jiné u zařízení zajišťujících transport vzduchu, teoretický vývoj technických řešení a experimentální měření za jasně daných specifických okrajových podmínek. Přínos spočívá ve zvýšení účinnosti systému, kterého bylo dosaženo skrze porovnávání měrný příkon ventilátoru SFP (specific fan power) vyjádřený v $[Ws/m^3]$ inovativních technických řešení a referenčních konfigurací.

Vědní obor materiálového inženýrství se zaměřením na recyklaci (Material Engineering and Recycling) byl v práci uveden prostřednictvím teoretických a experimentálních přístupů skrze analýzu budoucího zpracování Evropské směrnice EPBD4, která definuje certifikaci energetické náročnosti budov, kterou se rozumí: „*snížení potřeby těžby původních materiálů snižováním poptávky po nových materiálech, prostřednictvím oprav, opětovného použití, změnou účelu a recyklace použitých materiálů a prostřednictvím prodloužení životnosti výrobků*“ a společného výzkumu mezi Ústavem technických

zařízení budov a Ústavem pozemního stavitelství bylo cílem technických řešení představit série experimentálních měření, pomocí kterých se optimalizují referenční běžná volná oběžná kola s ohledem na environmentální aspekty.

9.5 VÝZNAM PRÁCE PRO PRAXI A PRŮMYSLOVOU VYUŽITELNOST

Zásadní potenciál mají inovativní řešení v provozech, které potřebují dopravní tlak a jsou v nepřetržitém provozu. Typickým příkladem takového provozu jsou čisté prostory (nemocnice, laboratoře), kde je vyšší tlaková ztráta způsobená filtry s vysokou odlučovací schopností pevných částic. Dále (zejména redistributor vzduchu) se dají použít u stávajících VZT sestav, kde je identifikován nedostatečný průtok vzduchu (kde ventilátor „nestíhá“) vzhledem k průtoku udávaný výrobcem vzduchotechnické jednotky při zachování velikosti, respektive průměru oběžného kola (zejména redistributor vzduchu).

Inovativní řešení při sériové výrobě představují levnou součást soustrojí ventilátoru po stránce materiálu, pracnosti montáže a údržby, které pasivně navyšují průtok vzduchu vzduchotechnickou jednotkou po celou dobu životnosti ventilátoru a které nenavyšují anebo výrazně nenavyšují energetickou náročnost.

9.6 MOŽNÁ LEPŠÍ APLIKACE

Instalovaný průměr oběžného kola ventilátoru je malý vůči rozměru ventilátorové komory. Nyní je ventilátor umístěn tak, že všechny čtyři náběhové plechy nejsou vystaveny rovnoměrně obtékajícímu vzduchu. Náběhové plechy v horních rozích jsou vystaveny přímému náporu vzduchu výrazně méně než spodní. Běžné ventilátorové komory mají stěny blíže k oběžnému kolu a zde se nabízí využití plného potenciálu náběhových plechů. Další směr vývoje by měl spočívat v nalezení nejlepšího aerodynamického tvaru náběhových plechů a povrchové úpravě plechů.

9.7 NÁROKY NA OCHRANU

RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Petr BLASINSKI, Pavel UHER a Štěpán JŮZA, 2020. Užité vzor č. CZ 33993. „Automatický redistributor vzduchu pro vzduchotechnické jednotky“. ČR. 2020-37187. Uděleno 29.01.2020. Zapsáno 19.05.2020.

RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Petr BLASINSKI, Pavel UHER a Štěpán JŮZA, 2021. Užité vzor č. CZ 35008. „Redistributor vzduchu pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem“. ČR. 2020-38399. Uděleno 22.12.2020. Zapsáno 20.04.2021.

RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Ondřej NESPĚŠNÝ, Jan VYSTRČIL, David BEČKOVSKÝ, Jan PĚNČÍK a Karel ŠUHAJDA, 2022. Užité vzor č. CZ 36043. „Oběžné kolo“. ČR. 2022-39672. Uděleno 15.02.2022. Zapsáno 26.05.2022.

9.8 MOŽNOSTI DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ VÝZKUMU

Vytvořit jasnou a účinnou metodiku pro aplikaci oběžného kola z udržitelného materiálu pomocí 3D tisku. Výzkum může být vytvořen ve spolupráci s Ústavem technických zařízení budov a Ústavem pozemního stavitelství.

Představit jasnou a účinnou metodiku pro aplikaci analytické rovnice pro výpočet přesného průtoku vzduchu ventilátorovou komorou.

$$V = K \cdot C_R \cdot \sqrt{\Delta p} \quad , \text{ kde} \quad (6)$$

V..... je objemový průtok vzduchu ventilátorovou komorou [m^3/h]

K..... je charakteristické číslo daného běžného kola udaného výrobcem [-]

Δp je rozdíl tlaku na ventilátoru s volným oběžným kolem [Pa]

C_R je redukční parametr odpovídající geometrii komory ventilátoru [-]

9.8.1 METODIKA MOŽNÉHO DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ BUDOUCÍHO VÝZKUMU

Teoretický přístup k výzkumu a vývoji může být prováděn s cílem reálného využití v nových i stávajících ventilátorových komorách vzduchotechnických a klimatizačních jednotek s cílem sériové výroby levných součástek po stránce materiálu, pracnosti montáže a údržby. Svou podstatou může být vývoj cílen, aby jednotlivé přístupy byly aplikovatelné do oblasti praktického využití v provozech, které potřebují dopravní tlak a jsou v nepřetržitém provozu.

Analýza předchozích přístupů a definování rozdílů mezi standardními oběžnými koly a inovativními udržitelnými koly.

Vytvoření několika případových studií pro ověření navržené metodologie analytického vzorce.

Přístupovat analytickými vztahy a experimentálně, tabulkovat srovnávací redukční parametr odpovídající geometrii ventilátorové komory C_R .

Vliv hrubosti 3D vytištěného povrchu volného oběžného kola na tlakové ztráty.

Uvedenými postupy a jejich synergickým působením lze pokračovat v tématu disertační práce a to: **Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem.**

10 SEZNAM ZDROJŮ

10.1 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- CAKL, Dominik. *Vzduchotechnické jednotky*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technického zařízení budov. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D., 2020.
- ANGELIS, Dr.-Ing. Walter a HOFMANN, Georg. *Vliv ventilátorové komory na vzduchový výkon a akustiku volně oběžných kol*. Online. Vliv ventilátorové komory na vzduchový výkon a akustiku volně oběžných kol. 2014. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/11332-vliv-ventilatorove-komory-na-vzduchovy-vykon-a-akustiku-volne-obeznych-kol>. [cit. 2023-12-25].
- RUBINA, Aleš; UHER, Pavel; SALAJKA, Radek; BAROŇ, Alexandr; ČAKL, Dominik et al. Energy and acoustic evaluation of classroom ventilation and its influence on the design of the air-conditioning system. *Energy*. 2024, roč. 2024, č. 130791, s. 1-67. ISSN ISSN 0360-5442.
- JELÍNEK, Ondřej; RUBINA, Aleš a BLASINSKI, Petr. *Akustika a protihluková opatření ve vzduchotechnice*. Online. Portál TZB-info. 2013. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/10319-akustika-a-protihlukova-opatreni-ve-vzduchotechnice#:~:text=Tvo%C5%99%C3%AD%20z%C3%A1kladn%C3%AD%20prvek%20%C3%BAtlumu%20hluku,proveden%C3%AD%2C%20p%C5%99%C3%ADpadn%C4%9B%20kombinacemi%20uveden%C3%A9ho..> [cit. 2024-03-19].
- JELÍNEK, Ondřej; RUBINA, Aleš a BLASINSKI, Petr. Ekvivalentní hladina akustického tlaku vnitřních prostorů v praxi. Online. In: . ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/9743-ekvivalentni-hladina-akustickeho-tlaku-vnitrnich-prostoru-v-praxi>. [cit. 2024-03-02].
- ZMRHAL, Vladimír. *Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 2. část Ventilátory*. Online. In: . Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/3769-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-2-cast#:~:text=CHARAKTERISTIKA%20POTRUBN%C3%8D%20S%C3%8DT%C4%9A,ztr%C3%A1t%20%C5%99en%C3%ADm%20a%20m%C3%ADstn%C3%ADmi%20odpory..> [cit. 2024-02-11].
- SCHILD, P.G. a MYSEN, M. *Doporučení pro měrný příkon ventilátoru (SFP) a účinnost vzduchotechnických systémů – IV*. Online. Portál TZB-info. 2014. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/11170-doporuceni-pro-merny-prikon-ventilatoru-sfp-a-ucinnost-vzduchotechnickych-systemu-iv#pozn14>. [cit. 2023-12-26].
- SCHILD, P.G. a MYSEN, M. *Doporučení pro měrný příkon ventilátoru (SFP) a účinnost vzduchotechnických systémů – III*. Online. Portál TZB-info. 2014. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/11170-doporuceni-pro-merny-prikon-ventilatoru-sfp-a-ucinnost-vzduchotechnickych-systemu-iv#pozn14>. [cit. 2023-12-25].
- ZIEHL-ABEGG SE. *ZAvblue2 - RH35D-6IK.BA.VR*. Online. In: . 2024. Dostupné z: <https://www.ziehl-abegg.com/en-gb/detail/ZAvblue2/RH35D-6IK.BA.VR/118824>. [cit. 2024-03-18].

- 10] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY, 2009/125/ES. *O stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie* [online]. 2009. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:cs:PDF>.
- 11] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, MPO. *Ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie*. Praha, 2016. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/dokument158127.html>.
- 12] ZIEHL-ABEGG S.R.O., Brno. Snížení spotřeby energie a tišší chod – nový ventilátor ZABluefin nejen pro vzduchotechnické jednotky. Online. In: . Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/16055-snizeni-spotreby-energie-a-tissi-chod-novy-ventilator-zabluefin-nejen-pro-vzduchotechnicke-jednotky>. [cit. 2024-03-02].
- 13] *Zelená dohoda pro Evropu*. Online. Consilium.europa. Brusel: consilium.europa, 2022. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>. [cit. 2022-11-11].
- 14] *Ministři odsouhlasili pravidla pro energeticky efektivnější budovy a posunuli diskuzi o opatřeních na snížení cen energií*. Online. Mpo. Praha: mpo, 2022. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/ministri-odsouhlasili-pravidla-pro-energeticky-efektivnejsi-budovy-a-posunuli-diskuzi-o-opatrenich-na-snizeni-cen-energiei---270580/>. [cit. 2022-11-11].
- 15] Vyhláška č. 78/2013 Sb. Vyhláška o energetické náročnosti budov. In: . 2013.
- 16] Vyhláška č. 264/2020 Sb. Vyhláška o energetické náročnosti budov. In: . 2020.
- 17] *Infografika – „Fit for 55“: jak se EU stane energeticky účinnější*. Online. Brusel: consilium.europa, 2022. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/general-secretariat/>. [cit. 2022-11-11].
- 18] EVROPSKÝ PARLAMENT: VÝBOR PRO PRŮMYSL, VÝZKUM A ENERGETIKU. *Návrh směrnice EPBD 4A; 9-0033/2023*. Online. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0033_CS.html. [cit. 2023-12-06].
- 19] AZEM, Abdul; MATHIS, Paul; STUTE, Frederik; HOFFMANN, Martin; MÜLLER, Dirk et al. Efficiency increase of free running centrifugal fans through a pressure regain unit used in an air handling unit. *Energy and Buildings*. 2018, roč. 2018, č. 165, s. 321-327. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.041>.
- 20] LOPES, José; JOÃO, Silva; TEIXEIRA, Senhorinha a TEIXEIRA, José. Numerical Modeling and Optimization of an Air Handling Unit. *Energies*. 2021, roč. 2021, č. 14, s. 1-16. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en14010068>.
- 21] ANDREARCZYK, Artur; BAGIŃSKI, Paweł a KLONOWICZ, Piotr. Numerical and experimental investigations of a turbocharger with a compressor wheel made of additively manufactured plastic. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020, roč. 2020, č. 178, s.

1-14. ISSN 0020-7403. Dostupné z:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105613>.

22] RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik ČAKL, Ondřej NESPĚŠNÝ, Jan VYSTRČIL, David BEČKOVSKÝ, Jan PĚNČÍK a Karel ŠUHAJDA, 2022. Užitený vzor č. CZ 36043. „Oběžné kolo“ . ČR. 2022-39672. Uděleno 15.02.2022. Zapsáno 26.05.2022.

23] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopatkové stroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-297-1.

24] *Nový akční plán pro oběžové hospodářství: SDĚLENÍ KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU, RADĚ, EVROPSKÉMU HOSPODÁŘSKÉMU A SOCIÁLNÍMU VÝBORU A VÝBORU REGIONŮ*. 2020. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.

25] ČAKL, Dominik; KOŘENKOVÁ, Veronika; PRCHALOVÁ, Nikol a RUBINA, Aleš. Development of airflow efficiency in air conditioning units. Online. In: . 020023-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0159047>. [cit. 2023-12-29].

26] *Envimat*. Online. Envimat.cz. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2022. Dostupné z: <http://www.envimat.cz/materialy/kovy/>. [cit. 2022-11-27].

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky

CO₂ – oxid uhličitý

Fit for 55 - balíček legislativních návrhů Evropské komise

VZT – vzduchotechnika

SFP – specific fan power

GWP – uhlíková stopa oceli [kg CO₂ ekv./kg]

PET – termoplast polyethylentereftalát

PLA – Polylaktidová vlákna

Fyzikální veličiny

V – Průtok vzduchu [m³/h]

Δp_s –Dopravní tlak [pa]

ΔP_{ex} – Tlaková ztráta externí [pa]

n – Otáčky ventilátoru [ot/min]

I – proud [A]

f – frekvenční pásmo [Hz]

P_N – Nom. příkon vent.

m – hmotnost [kg]

w – rychlost [m/s]

L_{wc} – součtová hladina akustického výkonu [dB]

L_p – hladina akustického tlaku [dB]

P –Příkon ventilátoru [W]

t – čas [s]

d – průměr [mm]

σ – směrodatná odchylka, celková standardní nejistota [-]

ρ – hustota [kg/m³]

p_{pólů} – počet pólů

s – skluz po rozběhu [%]

T – doba dozvuku v místnosti [s]

10.2 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Ventilátor s volným oběžným kolem instalovaný ve ventilátorové komoře. [2]	12
Obr. 1.2: Oběžné kolo s bionickým profilováním 3D díky inovativnímu designu ve tvaru speciálně zakřivené geometrie lopatek. [6].....	13
Obr. 1.3: Rozdíl výstupu proudění z oběžného kola při užití „rotujícího“ difuzoru oproti běžnému oběžnému kolu [11].	15
Obr. 1.4: Schéma hydrauliky potrubní sítě ve vzduchotechnice v režimu topení / chlazení / provětrávání čerstvým vzduchem / tlakové poměry. Proměnlivě nastavitelný výkon a regulace jednotlivých energeticky účinných komponent optimalizuje energetickou spotřebu systému. V rámci modernizace systému se zvažuje, v jakém stavu se zařízení nachází a zda není spíše lepší vyměnit celkový systém za nové vzduchotechnické zařízení, než jednotlivé komponenty v rámci retrofit.....	15
Obr. 1.5: Nová pravidla snížení spotřeby – nové cíle pro spotřebu primární a konečné spotřeby [16].	17
Obr. 1.6: Vlevo standardní ventilátor s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí a vpravo s jednotkou opětovného získání tlaku [18].	21
Obr. 1.7: Standardní ventilátor s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí a dole s jednotkou opětovného získání tlaku [18].....	21
Obr. 1.8: Vlevo rychlost proudění pro standardní ventilátor s volnoběžným kolem uvnitř obdélníkového potrubí a vpravo s jednotkami pro usměrnění proudu vzduchu, s cílem opětovného získání tlaku [19].	22
Obr. 1.9: Vlevo originální hliníkové kolo kompresoru a vpravo polymerové kolo [20].	23
Obr. 2.1: Vizualní prezentace sekvenčních vztahů v rámci dedukčního výzkumu.	26
Obr. 3.1: Diagram chronologického postupu optimalizujícího transport vzduchu ve ventilátorové komoře.	28
Obr. 4.1: Pohled na CFD model. Geometrie pravého úhlu neumožní plynulé víření vzduchu uvnitř ventilátorové komory a společně se sekundárními víry tvoří lokální tlakovou ztrátu. Inovativní přístup má za cíl změnit geometrii v rohách tak, aby pomohl proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření.	30
Obr. 4.2: Řez vzduchotechnickou jednotkou, do které se vloží náběhové plechy a následně dojde k příznivému posunutí pracovního bodu ventilátoru. (Zdroj charakteristiky ventilátoru: ZIEHL-ABEGG)	30
Obr. 4.3: Axonometrický pohled na CFD model a roviny řezu ventilátorovou komorou.	31
Obr. 4.4: CFD simulace rychlosti průtoku vzduchu ventilátorovou komorou. Vlevo je půdorysný pohled na CFD model s pravoúhloú geometrií ventilátorové komory a vpravo proudění vzduchu pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory prostřednictvím inovativního redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů, které pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření.	32
Obr. 4.5: CFD simulace stacionárního tlaku ve ventilátorové komoře. Vlevo je pohled na CFD model s pravoúhloú geometrií ventilátorové komory a vpravo stacionárního tlak vzduchu pomocí optimalizace geometrie ventilátorové komory prostřednictvím inovativního redistributoru vzduchu v podobě náběhových plechů, které pomáhají proudu vzduchu plynuleji změnit směr víření.	32
Obr. 4.6: Vznik menších vírů v rotující lopátkové mříži, které se lépe přizpůsobí směru rotace víření ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem [22].	33
Obr. 4.7: Řez jednotlivými řadami inovativním oběžným kolem radiálního ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek a obrázek celého volného oběžného kola.	33
Obr. 5.16: Technické řešení vyrobené z moderních udržitelných materiálů na bázi polymerů, pomocí 3D tisku.	34

Obr. 5.1, 5.2: Nákres rozměrů jednotky výrobce (nahore) a příslušné foto stávajícího stavu (dole).....	37
Obr. 5.3, 5.4: Nákres rozměrů řezu jednotky výrobce (vlevo) a příslušné foto stávajícího stavu (vpravo).	37
Obr. 5.5: Model CFD zohledňující orientaci přechodového potrubí v kombinaci s náběhovými plechy. Červená barva v místě nad 6 m/s.....	38
Obr. 5.6: Pohled na kompletní sestavu aerodynamické trati, na které se budou měřit reálné ventilátorové charakteristiky a tlakové ztráty ve ventilátorové komoře, které vznikají v reálných vzduchotechnických aplikacích.	38
Obr. 5.7, 5.8: Umístění anemometru a schéma bodů ventilátorové komory, u kterých byla měřena rychlost proudění vzduchu při konstantním průtoku a nastavené frekvenci frekvenčního měniče.....	40
Obr. 5.9: Schéma jednotlivých částí vzduchotechnické sestavy s inovativním řešením.	42
Obr. 5.10, 5.11: Ventilátorová komora před umístěním náběhových plechu a ventilátorová komora po instalaci náběhových plechů.....	43
Obr. 5.12, 5.13: Pohled do ventilátorové komory po instalaci náběhových plechů s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory, pohled na měření.	44
Obr. 5.14: Pohled do ventilátorové komory po instalaci inovativního oběžného kola.	49
Obr. 5.15: Fotografie inovativního oběžného kola v popředí. V pozadí standardně používané volně oběžné kolo.	50
Obr. 5.16: Obrázek standardně používaného ocelového volně oběžného kola. (vlevo) a jeho geometrické kopie - inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu PLA pomocí 3D tisku.	56
Obr. 5.17: Obrázek inovativního volného oběžného kola (vlevo) a jeho geometrická kopie - inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku (vpravo).	59
Obr. 5.18: Pohled do ventilátorové komory po instalaci inovativního oběžného kola.	59
Obr. 5.1: Závěrečný obrázek zlepšení systému pomocí inovativních řešení.....	75
Obr. 11.1: Pohled na výchozí jemnost výpočetní sítě, která je na okrajích komory zjemněna na 1 cm x 1 cm x 1 cm.....	94
Obr. 12. 2: Pohled na jednotku po namontování přechodového potrubí a těsné regulační klapky.	99
Obr. 12. 3, 4: Ventilátorová komora před umístěním náběhových plechu a ventilátorová komora po instalaci náběhových plechů.	99
Obr. 12. 5, 6: Pohled do ventilátorové komory po instalaci náběhových plechů s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory, pohled na měření.	99
Obr. 12. 7: Pohled na jednotku po namontování přechodového potrubí a těsné regulační klapky.	100
Obr. 12. 8: Pohled na jednotku a otevřenou klapku na sání.	100
Obr. 12. 9, 10: Pohled ventilátorovou komoru a inovativní dvouřadé kolo.	100
Obr. 12. 11, 12: Pohled na jednotku po namontování přechodového potrubí a těsné regulační klapky.	101
Obr. 12. 13, 14: Pohled na detail inovativního oběžného kola.	101
Obr. 12. 15, 16: Pohled na měření rychlostních poměrů a způsob regulace výkonu vent.. ...	101

10.3 SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: <i>Tabulka vývoje vyhlášky o energetické náročnosti budov, s ohledem EPBD4</i>	18
Tab. 5.2: <i>Tabulka kontroly těsnosti převzaté sestavy aerodynamické trati</i>	40
Tab. 5.3: Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu.....	45
Tab. 5.4: Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu.....	45
Tab. 5.5: Porovnání naměřených hodnot.	45
Tab. 5.6: Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu.....	46
Tab. 5.7: Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu.....	46
Tab. 5.8: Porovnání naměřených hodnot.	46
Tab. 5.9: Hladina akustického tlaku 1 m od vent. komory bez redistributoru vzduchu.	48
Tab. 5.10: Hladina akustického tlaku 1 m od vent. komory s redistributorem vzduchu.	48
Tab. 5.11: Porovnání naměřených hodnot.	48
Tab. 5.12: Orientační data pro standardní ocelové kolo.	50
Tab. 5.13: Orientační data pro inovativní ocelové dvouřadé kolo.....	50
Tab. 5.14: Porovnání naměřených hodnot.	50
Tab. 5.15: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.....	52
Tab. 5.16: Naměřené hodnoty pro ocelové kolo, dvouřadé.....	52
Tab. 5.17: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.....	53
Tab. 5.18: Naměřené hodnoty pro plechové kolo, dvouřadé.....	53
Tab. 5.19: Hodnocení dat pro plechové kolo dvouřadé.....	54
Tab. 5.20: Hodnocení dat pro plechové kolo dvouřadé.....	54
Tab. 5.21: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.....	57
Tab. 5.22: Naměřená data pro plastovou kopii běžného ocelového kola.	57
Tab. 5.23: Hodnocení dat pro plastovou kopii běžného ocelového kola.....	58
Tab. 5.24: Naměřené hodnoty pro plechové kolo, dvouřadé.....	60
Tab. 5.25: Naměřené hodnoty pro plastové kolo, dvouřadé.....	60
Tab. 5.26: Naměřené hodnoty pro plechové kolo, dvouřadé.....	61
Tab. 5.27: Naměřené hodnoty pro plastové kolo, dvouřadé.....	61
Tab. 5.28: Hodnocení výsledků dat pro plastové kolo dvouřadé.....	62
Tab. 5.29: Hodnocení výsledků dat pro plastové kolo dvouřadé.....	62
Tab. 6.1: Naměřené hodnoty bez redistributoru vzduchu.....	67
Tab. 6.2: Naměřené hodnoty s redistributorem vzduchu.....	67
Tab. 6.3: Hodnocení výsledků syntézy dat.	67
Tab. 6.4: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.....	68
Tab. 6.5: Naměřená data pro ocelové dvouřadé kolo.	68
Tab. 6.6: Hodnocení výsledků syntézy dat.	68
Tab. 6.7: Naměřené hodnoty pro běžné ocelové kolo.....	69
Tab. 6.8: Naměřená data pro plastovou kopii běžného ocelového kola.	69
Tab. 6.9: Hodnocení výsledků syntézy dat.....	69
Tab. 6.10: Naměřená data pro ocelové dvouřadé kolo.	70
Tab. 6.11: Naměřená data pro plastovou kopii ocelového dvouřadého kola.....	70
Tab. 6.12: Hodnocení výsledků syntézy dat.	70
Tab. 6.13: Naměřená data pro environmentální opatření.....	71
Tab. 6.14: Naměřená data pro environmentální opatření.....	71
Tab. 6.15: Výsledek dílčího cíle č. 1: Náběhové plechy.....	72
Tab. 6.16: Výsledek dílčího cíle č. 2: Oběžné kolo s konkávní a konvexní geometrií lopatek. .	72
Tab. 6.17: Výsledek dílčího cíle č. 3: Plastové kopie běžného oběžného kola.....	72
Tab. 6.18: Výsledek dílčího cíle č. 4: Plastové kopie dvouřadého oběžného kola.	72
Tab. 6.19: Výsledek dílčího cíle č. 5: Opatření pro snížení uhlíkové stopy.	72
Tab. 7.1: Vztahy pro přepočítání vlastností ventilátoru.....	76

10.4 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1.1, 1.2: Vlevo – obecná charakteristika ventilátoru a potrubní sítě, vpravo regulace ventilátoru změnou otáček ventilátoru [6].	13
Graf 1.3: Vliv rozměrů jednotky na výkonové křivky volného oběžného kola. [2]	14
Graf 4.4: Kompresní tlak vs. rychlost otáčení (experimentální výsledky kompresoru turbodmychadla) originální hliníkové kolo kompresoru vs. polymerové kolo [21].	23
Graf 5.5: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření s regulací regulační klapky na výtlaku.	47
Graf 5.6: Grafické porovnání měřeného průběhu hladiny akustického výkonu do 60 Hz pro sadu měření s regulací regulační klapky na výtlaku.	49
Graf 5.7: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření inovativního oběžného kola s regulací regulační klapky na výtlaku.	51
Graf 5.8: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření inovativního oběžného kola s regulací regulační klapky na výtlaku.	55
Graf 5.9: Naměřené experimentální výsledky běžného volného oběžného kola z oceli a jeho plastové kopie.	58
Graf 5.10: Naměřené experimentální výsledky volného dvouřadého oběžného kola z oceli a jeho plastové kopie.	63
Graf 5.11: Dopravní tlak vs. naměřené otáčky volného oběžného kola (experimentální výsledky měření volných oběžných kol). Referenční ocelové kolo vs. plastové kolo.	63
Graf 6.1: Naměřená charakteristická křivka ventilátoru s redistributorem vzduchu a bez redistributoru vzduchu.	73
Graf 6.2: Syntéza naměřených experimentálních výsledků měrných příkonů ventilátoru, pro referenční běžná ocelová kola a jejich inovativní plastové kopie. Okrajová podmínka 500 m ³ /hod.	74
Graf 6.3: Syntéza naměřených experimentálních výsledků zvukové součtové hladiny ventilátoru, pro referenční běžná ocelová kola a jejich inovativní plastové kopie. Okrajová podmínka 500 m ³ /hod.	74
Graf 7.1: Charakteristika potrubní sítě bez náběhových plechů a s náběhovými plechy.	76
Graf 7.2: Tlaková charakteristika ventilátoru s běžným volným ocelovým oběžným kolem a jeho plastovou geometrickou kopií.	77
Graf 7.3: Tlaková charakteristika ventilátoru s dvouřadým ocelovým volným oběžným kolem a jeho plastovou geometrickou kopií.	77
Graf 7.4: Směrodatná odchylka naměřených a přepočítaných otáček oběžného kola.	77
Graf 5.5: Dopravní tlak vs. naměřené otáčky volného oběžného kola (experimentální výsledky měření volných oběžných kol). Referenční ocelové kolo vs. plastové kolo.	79
Graf 4.6: Kompresní tlak vs. rychlost otáčení (experimentální výsledky kompresoru turbodmychadla) originální hliníkové kolo kompresoru vs. polymerové kolo [9].	79
Graf 14.7: Přesnost modelu CFD - Rezidua iterací.	95

11 VĚDECKÉ VÝSTUPY AUTORA

11.1 SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ AUTORA

Rok 2019

1. KOTEK, Petr; ANTONÍN, Jan; JURÁŇ, Matouš; CAKL, Dominik. Tepelně-vlhkostní problematika klimatizované historické budovy. 23. konference Klimatizace a větrání 2019 – sborník příspěvků. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019. s. 51-57.

Rok 2020

2. RUBINA, Aleš.; BLASINSKI, Petr; JŮZA, Štěpán; CAKL Dominik. Řízení ventilátoru podle koncentrace CO₂. Český instalatér, 2020, roč. 4, č. 2020, s. 24-26. ISSN: 1210-695X.

Rok 2021

3. KOTEK, Petr; ANTONÍN, Jan; JURÁŇ, Matouš; CAKL, Dominik. Tepelně-vlhkostní problematika klimatizované historické budovy. Vytápění, větrání, instalace. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2021(2), 94 - 97. ISSN 1210-1389.
4. Cakl, Dominik; Kotek, Petr. Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek. Juniorstav 2021 – sborník příspěvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021. s. 745-750 ISBN: 978-80-86433-73-8.

Rok 2022

5. CAKL, Dominik; NESPĚŠNÝ, Ondřej; VYSTRČIL, Jan. Energetická úspora jednoduchého podtlakového větrání s vyústěním do exteriéru před sání tepelného čerpadla – případová studie. Juniorstav 2022 – sborník příspěvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2022. s. 655-660. ISBN: 978-80-86433-76-9.
6. RUBINA, Aleš; BEČKOVSKÝ, David; CAKL, Dominik; NESPĚŠNÝ, Ondřej; VYSTRČIL, Jan. Inovací ventilátorů ke snižování energetické náročnosti při dopravě vzduchu. TZB-info, 2022, roč. 1, č. 2022, ISSN: 1801-4399.
7. NESPĚŠNÝ, Ondřej; VYSTRČIL, Jan; CAKL, Dominik. Experimentální testování prefabrikovaných schodišť z kompozitních materiálů na bázi cementu a organických vláken. Juniorstav 2022 – sborník příspěvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2022. s. 44-48. ISBN: 978-80-86433-76-9.
8. VYSTRČIL, Jan; NESPĚŠNÝ, Ondřej; CAKL, Dominik. Experimentální měření dynamických změn plošné hmotnosti systémů vegetačních stěn a fasád vlivem evapotranspirace. Juniorstav 2022 – sborník příspěvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2022. s. 39-43. ISBN: 978-80-86433-76-9.

Rok 2023

9. CAKL, Dominik; KORENKOVÁ, Veronika; PRCHALOVÁ, Nikol; RUBINA, Aleš. Development of airflow efficiency in air conditioning units. AIP Conference Proceedings, 2023, roč. 2887, č. 1, s. 1-7. <https://doi.org/10.1063/5.0159047>
10. PRCHALOVÁ, Nikol; BLASINSKI, Petr; KORENKOVÁ, Veronika; CAKL, Dominik. Optimization of pool hall air conditioning. AIP Conference Proceedings, 2023, roč. 2887, č. 1, s. 1-7. <https://doi.org/10.1063/5.0158907>
11. CAKL, Dominik. Současný stav snižování spotřeby energie u zařízení zajišťující transport vzduchu – rešerše. Juniorstav 2023 – Příspěvek na konferenci, sborník zatím nevydán.

12. KOTEK, Petr; ANTONÍN, Jan; JURÁŇ, Matouš a CAKL, Dominik, 2023. Tepelně vlhkostní problematika klimatizované historické budovy. HAUSTECHNIK. Roč. XVI., č. 3/2023, s. 28-31. ISSN 1803 4802.

Rok 2024

13. RUBINA, Aleš; UHER, Pavel; SALAJKA, Radek; BAROŇ, Alexandr; CAKL, Dominik et al., 2024. Energy and acoustic evaluation of classroom ventilation and its influence on the design of the air-conditioning system. Energy. Roč. 2024, č. 130791, s. 1-67. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130791> (IF = 9)
14. Recenzní řízení v IMP časopisu Thermal Science and Engineering Progress, článek s názvem „Monitoring of fresh water consumption and energy needs for hot tap water heating in residential buildings“ (IF = 4,56)

11.2 OCHRANNÉ ZNÁMKY AUTORA

Rok 2020

1. RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Petr BLASINSKI, Pavel UHER a Štěpán JŮZA, 2020. Užitný vzor č. CZ 33993. „Automatický redistributor vzduchu pro vzduchotechnické jednotky “. ČR. 2020-37187. Uděleno 29.01.2020. Zapsáno 19.05.2020.

Rok 2021

2. RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Petr BLASINSKI, Pavel UHER a Štěpán JŮZA, 2021. Užitný vzor č. CZ 35008. „Redistributor vzduchu pro optimalizaci tlakové ztráty ventilátorové komory s volným oběžným kolem “. ČR. 2020-38399. Uděleno 22.12.2020. Zapsáno 20.04.2021.

Rok 2023

3. RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Ondřej NESPĚŠNÝ, Jan VYSTRČIL, David BEČKOVSKÝ, Jan PĚNČÍK a Karel ŠUHAJDA, 2022. Užitný vzor č. CZ 36043. „Oběžné kolo “. ČR. 2022-39672. Uděleno 15.02.2022. Zapsáno 26.05.2022.

12 PŘÍLOHY

12.1 PŘÍLOHA - OKRAJOVÉ PODM. CFD SIMULACE

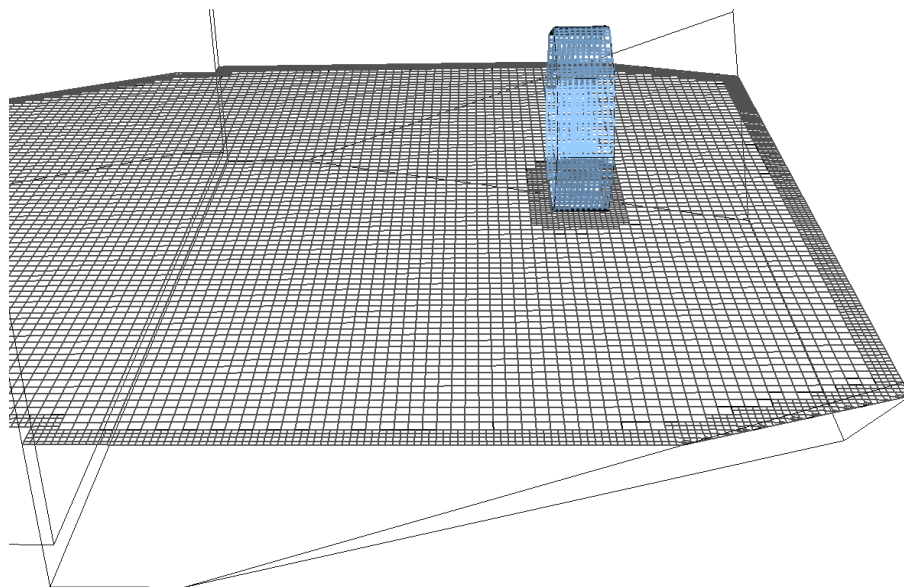
Na vstupu vzduchu do ventilátorové komory skrze stacionární volné oběžné kolo je průtok vzduchu 2000 m³/hod a na výstupu z jednotky nastaven po celém průřezu statická tlak 750 Pa.⁹

MESH DESCRIPTION

Global mesh resolution level: custom coarse.

Base mesh resolution: 0.02 m.

Points 2 418 642, faces 6 727 524, internal faces 6 416 303, cells 2 156 284, boundary 21.



Obr. 11.1: Pohled na výchozí jemnost výpočetní sítě, která je na okrajích komory zjemněna na 1 cm x 1 cm x 1 cm.

SOLVER AND TURBULENCE MODEL

Solver: for incompressible, turbulent, steady-state flow

Turbulence model: standard k-epsilon

FLUID PROPERTIES

Fluid properties setting time: 2023-12-30 18:29:00

Custom fluid properties:

⁹ Zbývající část okrajových podmínek je uvedena v samostatné příloze „okrajové podm. CFD simulace“

Altitude: 0 m

Temperature offset: 0 K

Pressure: 1.013E+05 Pa

Temperature: 288.1 K

Specific heat capacity: 1004 J/kg.K

Thermal conductivity: 0.02441 W/m.K

Density: 1.225 kg/m³

Dynamic viscosity: 1.79118e-05 Pa·s

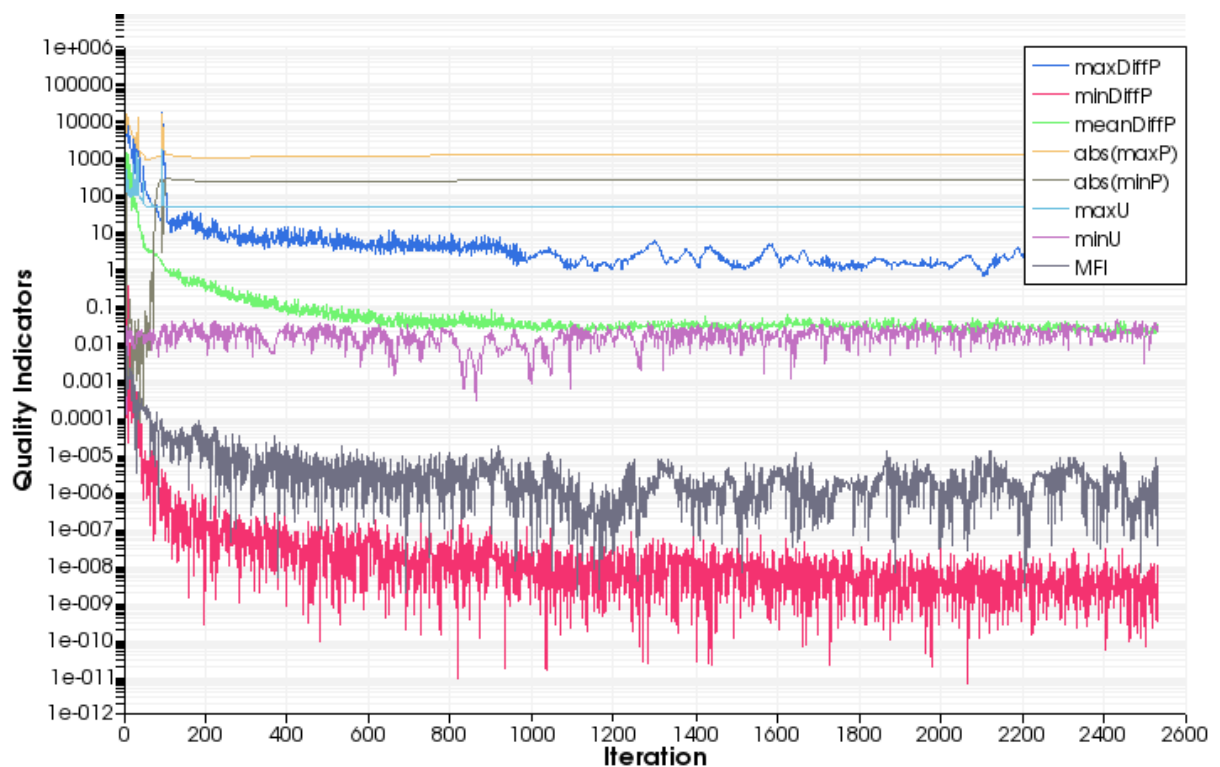
Molecular diffusivity: 2.88E-05 m²/s

Turbulent Schmidt number: 0.7

Gravity: (0, 0, -9.81) m/s²

Molecular diffusivity: 2.88e-05 m²/s

Turbulent Schmidt number: 0.9



Graf 14.7: Přesnost modelu CFD - Rezidua iterací.

12.2 PŘÍLOHA - CHARAKTERISTICKÉ VÝKONY VENTILÁTORU

Plug fan ER..C, ventilation unit GR..C
Size 225

04/2011

Plug fan, ventilation unit

ER22C, GR22C

Motor IE2

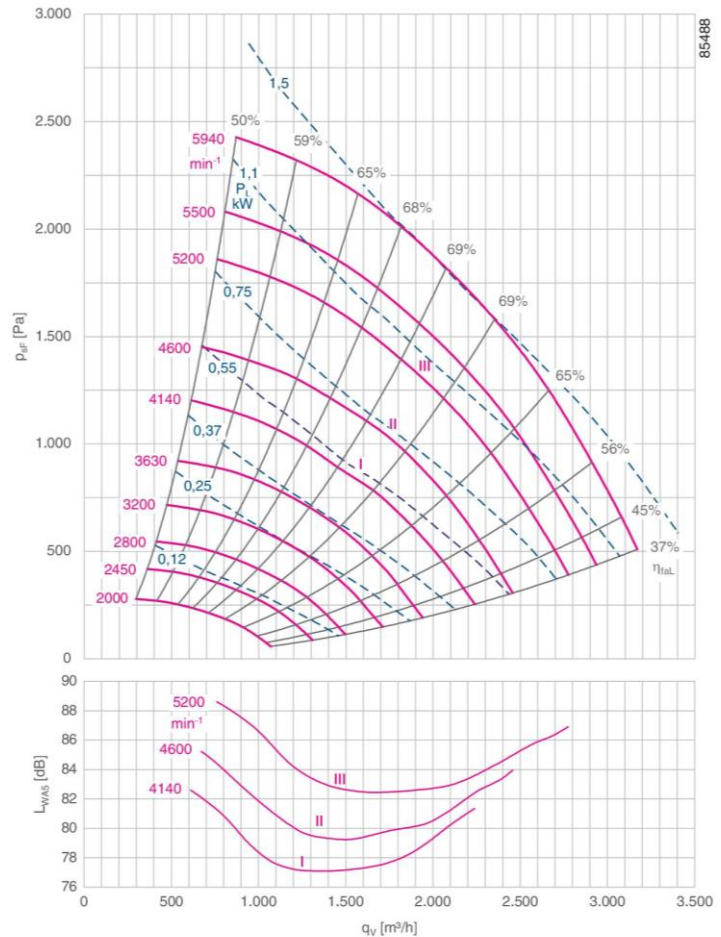


Description

- Number of blades: 7
- Max. permissible media temperature: 40 °C
- Min. permissible media temperature: -20 °C
- Motor protection: PTC thermistor (PTC)
- Impeller: Welded sheet steel coated / painted in RAL 5002 (ultramarine blue)
- ER-plug fan made as rugged bolted construction built with galvanised sheet steel
- Inlet ring for optimum impeller inflow with measurement device for determining flow rate

➤ Inlet guard	Page 109
➤ Rubber dampers	Page 109
➤ Spring vibration damper	Page 109
➤ Flexible air intakes	Page 110
➤ Frequency inverter Icontrol	Page 92
➤ Sensors	Page 96

Fan curve RH..C



Technical data

Rated power P_N kW	Type ER / GR*	Motor size	Fan curve no.	Rated speed n_N min ⁻¹	Rated current I_N A	Max. speed n_{max} min ⁻¹	Max. frequency f_{max} Hz
0.55	ER22C-2DN.A7.1R	71M	I	2800	1.31	4140	74
0.75	ER22C-2DN.B7.1R	80M	II	2825	1.62	4600	81
1.10	ER22C-2DN.B7.1R	80M	III	2825	2.28	5200	92

* Identical performance data for ER..C and GR..C

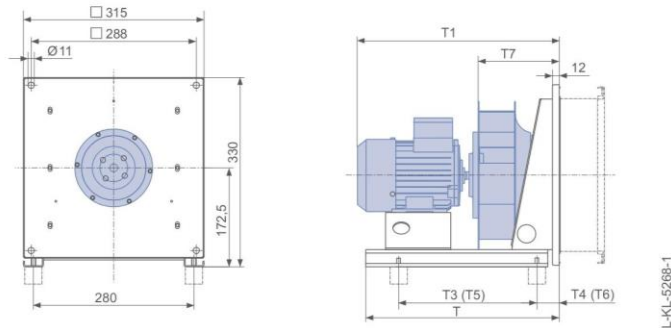
Basic version ER				Basic version GR			
Rated power				Installation position			
P_N kW	Type ER..C	Article no. ER..C	\bar{h} max.	Installation position H Article no. GR..C	Installation position Vu Article no. GR..C	Installation position Vo Article no. GR..C	\bar{h} max.
0.55	ER22C-2DN.A7.1R	130613/0F01	15	GR22C-2DN.B5.1R	113732/H01	113732/U01	113732/O01
0.75	ER22C-2DN.B7.1R	130614/0F01	20	GR22C-2DN.B5.1R	113732/H01	113733/U01	113733/O01
1.10	ER22C-2DN.B7.1R	130615/0F01	21	GR22C-2DN.B5.1R	113733/H01	113733/U01	113733/O01

04/2011

Plug fan ER..C, ventilation unit GR..C
Size 225

Dimensions in mm

Plug fan ER in installation position H

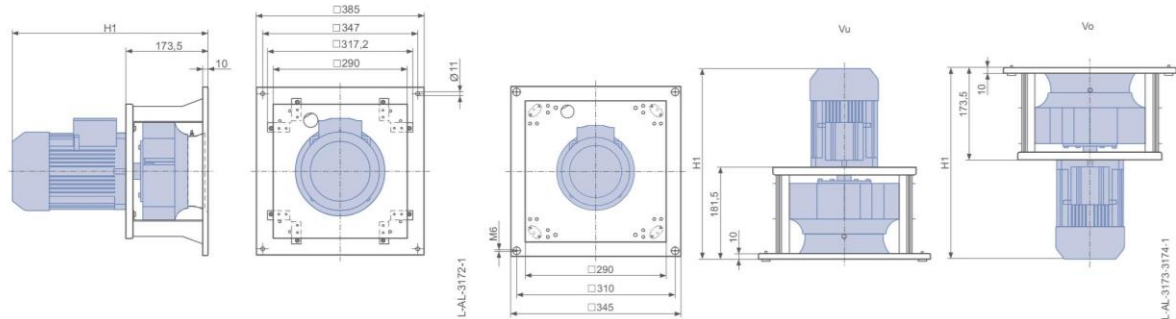


Rated power	Type	T	T1	T3	T4	T5	T6	T7	Spring vibration damper	Rubber dampers
P_N kW		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
0.55	ER22C-2DN.A7.1R	460	377	316	39	224	56	142	MSN 3	30x30 / 40
0.75	ER22C-2DN.B7.1R	460	422	348	52	266	69	142	MSN 4	30x30 / 55
1.10	ER22C-2DN.B7.1R	460	422	358	50	256	79	142	MSN 4	30x30 / 55

T5 and T6 apply to attachment of Ziehl-Abegg intake flanges.

Ventilation unit GR in installation position H

Ventilation unit GR in installation position Vu/Vo



Rated power	Type	Installation position H	Installation position Vu	Installation position Vo
P_N kW		H1 mm	H1 mm	H1 mm
0.75	GR22C-2DN.B5.1R	410	418	410
1.10	GR22C-2DN.B5.1R	410	418	410

12.3 PŘÍLOHA - ZKUŠEBNÍ METODA ZAŘÍZENÍ DLE ČSN EN 12599

Zkušební metoda k ověřování způsobilosti instalovaných zařízení pro účely přejímky dle ČSN EN 12599

Tabulka měření funkčnosti:

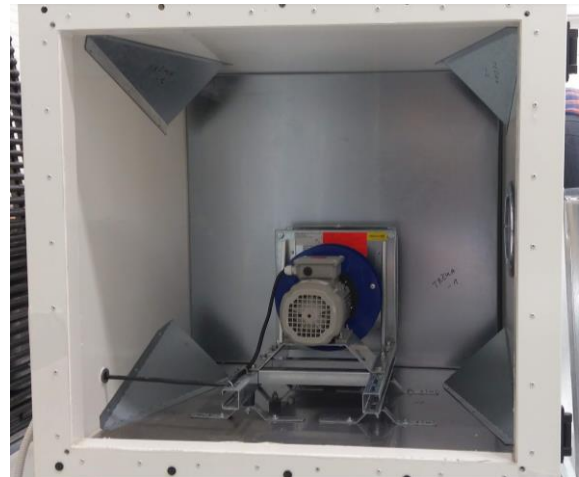
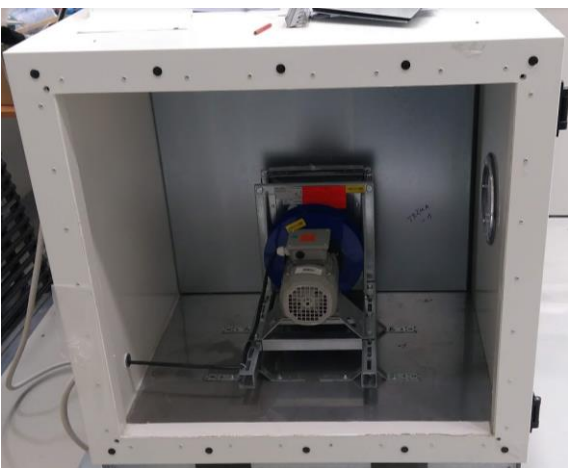
Rozsah měření:	celé zařízení	centrální systém / součást				vzduchovod	prostor							
		Proud motoru [D.6]	Průtok vzduchu * [D.1]	Teplota vzduchu * [D.3]	Tlakoví ztráta filtru [D.7]		Zkouška těsnosti vzduchovodu [D.8]	Průtok přiváděného vzduchu [D.1]	Průtok odváděného vzduchu [D.1]	Teplota přiváděného vzduchu ** a teplota vzduchu v protoru [D.3]	Vlhkost vzduchu [D.4]	Hladina akustického tlaku [D.5]	Rychlost vzduchu v prostoru [D.2]	
Parametry	Přídavná zkouška čistoty													
Větrací zařízení	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0		
*) Venkovní vzduch, přiváděný a odváděný vzduch **) V závislosti na principu regulace, pokud je to relevantní														
Legenda: 0 měření není zapotřebí 1 provést v každém případě 2 provést v případě dohody														
Označení 0 - 2 značí, zda musí být zkouška provedena ve fázi měření funkčnosti v průběhu předávání. Některé zkoušky byly ve skutečnosti provedeny dodavatelem před přejímkou, dokumentace musí být ověřena při kontrole kompletnosti														

12.4 PŘÍLOHA - FOTODOKUMENTACE EXPERIMENTÁLNÍCH SESTAV

PRO EXPERIMENT Č. 1:



Obr. 12. 2: Pohled na jednotku po namontování přechodového potrubí a těsné regulační klapky.

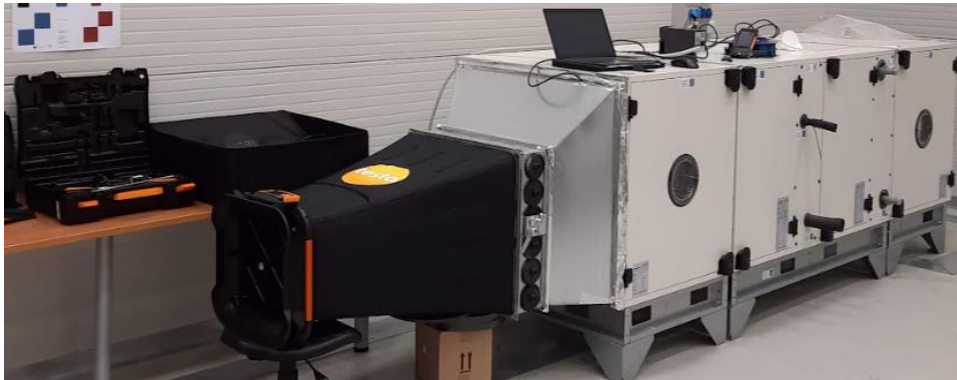


Obr. 12. 3, 4: Ventilátorová komora před umístěním náběhových plechu a ventilátorová komora po instalaci náběhových plechů.



Obr. 12. 5, 6: Pohled do ventilátorové komory po instalaci náběhových plechů s důkladným utěsněním a vyhlazením styku náběhového plechu a ventilátorové komory, pohled na měření.

PRO EXPERIMENT Č. 2:



Obr. 12. 7: Pohled na jednotku po namontování přechodového potrubí a těsné regulační klapky.

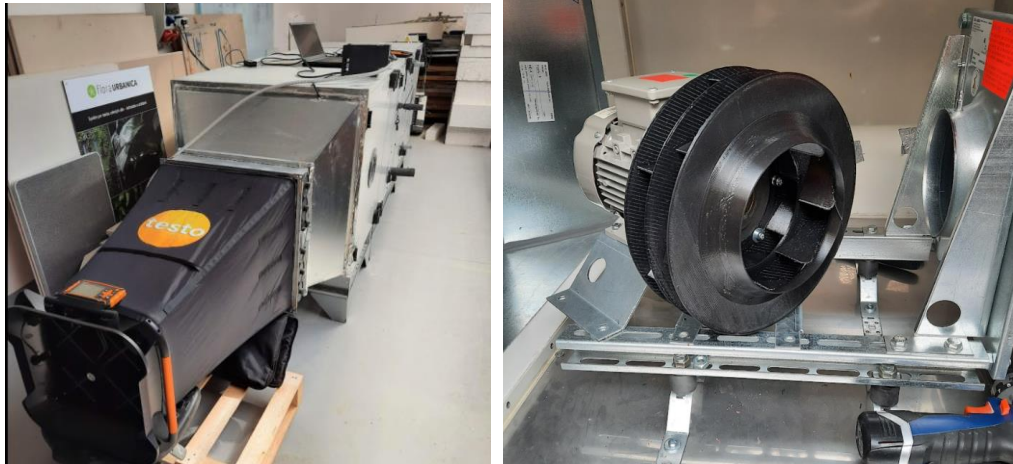


Obr. 12. 8: Pohled na jednotku a otevřenou klapku na sání.

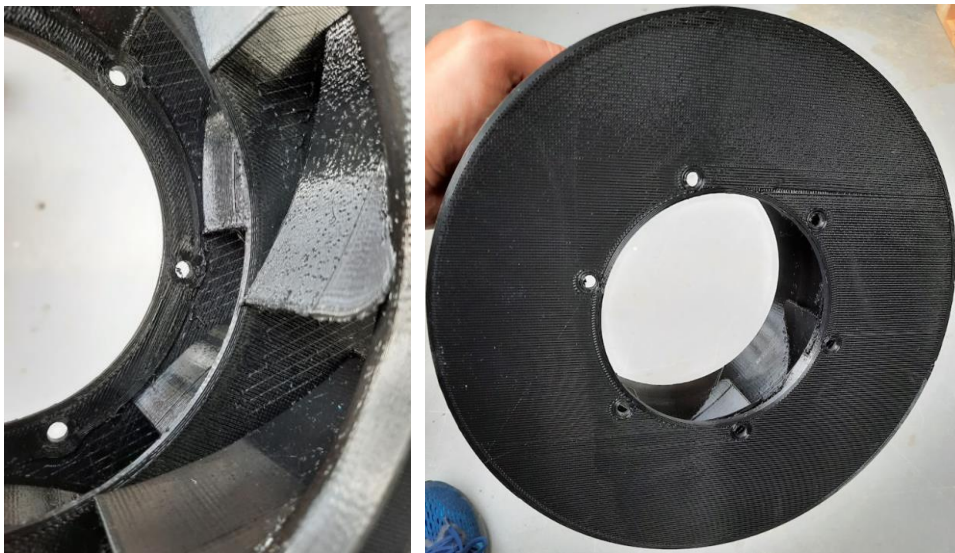


Obr. 12. 9, 10: Pohled ventilátorovou komoru a inovativní dvouřadé kolo.

PRO EXPERIMENT Č. 3:



Obr. 12. 11, 12: Pohled na jednotku po namontování přechodového potrubí a těsné regulační klapky.



Obr. 12. 13, 14: Pohled na detail inovativního oběžného kola.

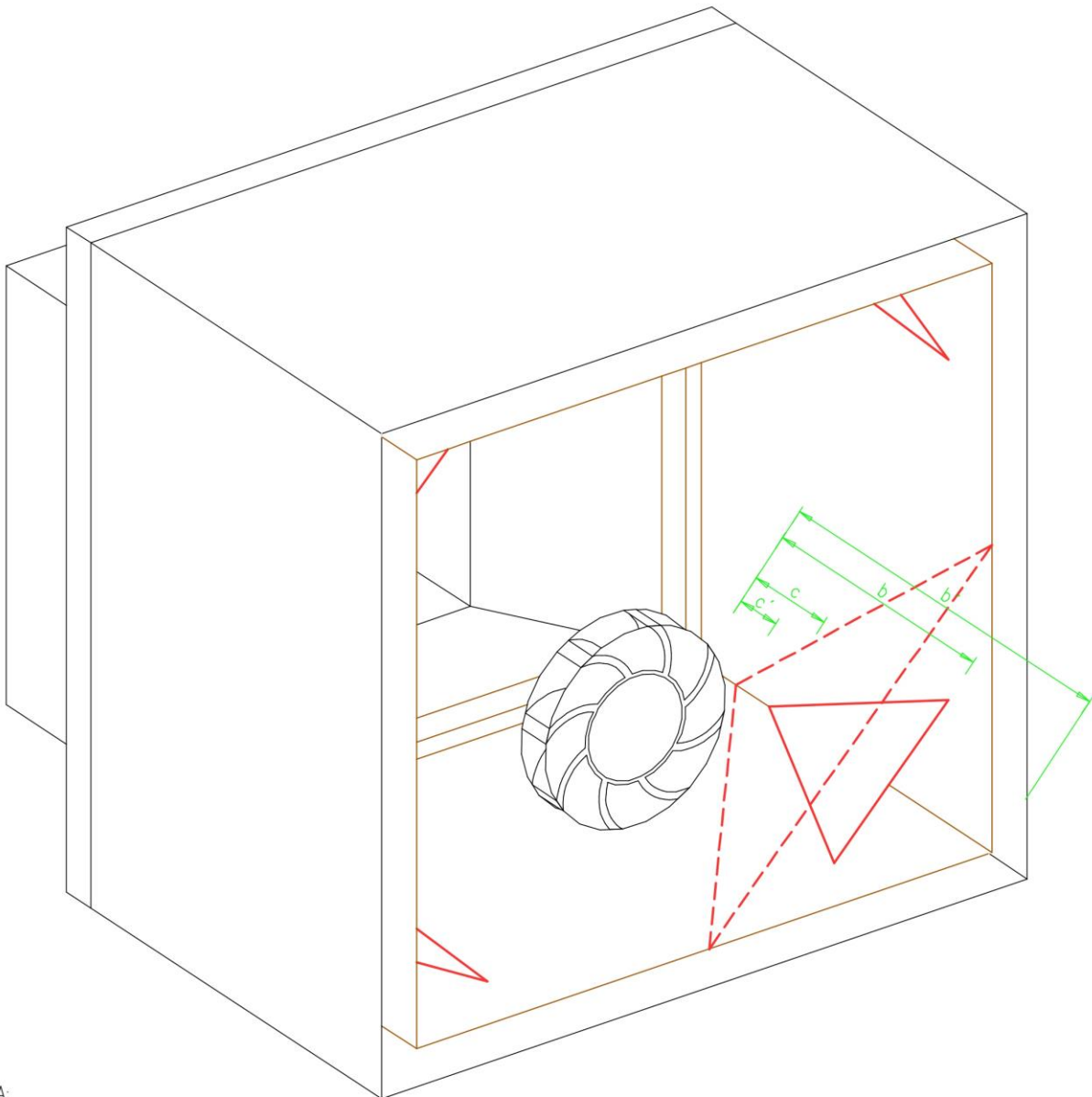


Obr. 12. 15, 16: Pohled na měření rychlostních poměrů a způsob regulace výkonu vent..

12.5 PŘÍLOHA - DOKUMENTACE ZAŘÍZENÍ REDISTRIBUTORU VZDUCHU

Redistributor vzduchu v podobě náběhových plechů.

ŘEZ VENT. KOMORY C-C – AXONOMETRIE



LEGENDA:

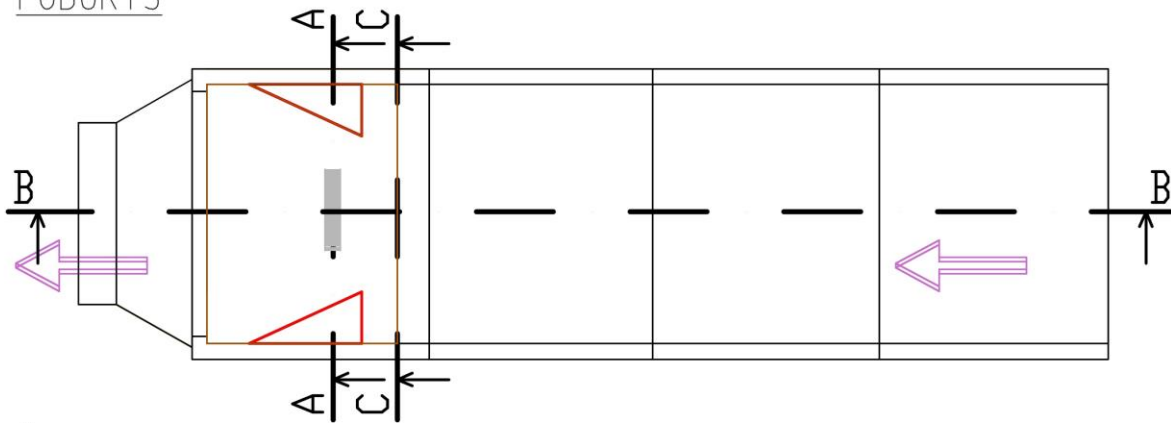
- ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM
- - - DALŠÍ MOŽNÉ PŘIZPŮSOBENÍ TVARU A VELIKOSTI ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM
- VNIŘNÍ ROZMĚR VENTILÁTOROVÉ KOMORY

POZNÁMKY:

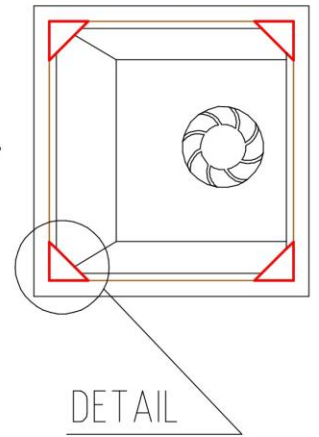
- PARAMETRY a , b , c JSOU PROMĚNNÉ ROZMĚRY TVARU A UMÍSTĚNÍ ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM.
- STYK NÁBĚHOVÝCH PLECHŮ A VENTILÁTOROVÉ KOMORY BUDE DŮKLADNĚ UTĚSNĚN A VYHLAZEN.

<p>Majitel: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Antonínská 548/1 Brno – střed 60190 IČO: 00216305 podíl 100%</p>	Druh práce:		ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM
	Obsah:	AXONOMETRIE VENT. KOMOROU	Č. výkresu: Příloha č. 2
	Vypracovat:	Ing. Dominik Cakl	Č. zakázky: -
	Vedoucí práce:	doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.	Část:
	Původce:	Rubina Aleš Doc. Ing. Ph.D., Brno, CZ, r.č. 7511283890 Trčka Michal Ing., Rožnov pod Radhoštěm, CZ, r.č. 630724/0665 Cakl Dominik Bc., Jablonec nad Nisou, CZ, r.č. 940203/2684 Blasinski Petr Ing. Ph.D., Český Těšín, CZ, r.č. 8705215684 Uher Pavel Ing. Ph.D., Rajhrad, CZ, r.č. 830319/4064 Jůza Štěpán Ing., Čebín, CZ, r.č. 920502/5225	Měřítko: -
Stupeň projektu:	PRO UDĚLENÍ OCHRANY		Datum: 11/2020

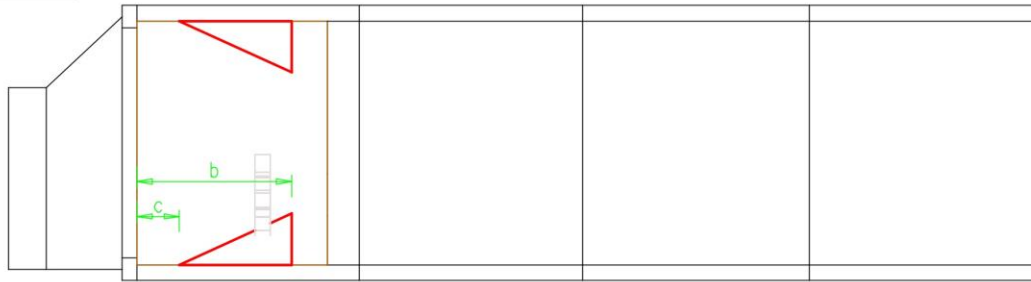
PŮDORYS



ŘEZ A-A



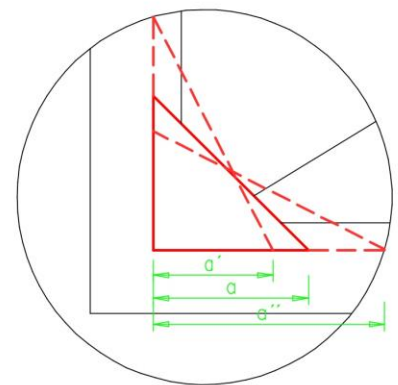
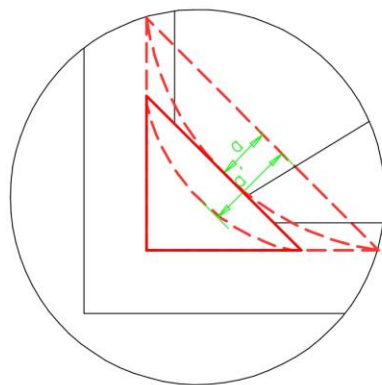
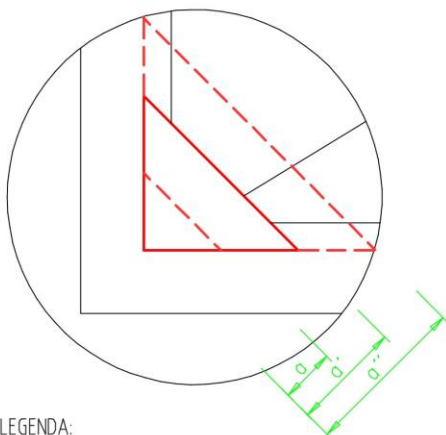
ŘEZ B-B



DETAIL MOŽNÉ VELIKOSTI

DETAIL MOŽNÉHO TVARU

DETAIL MOŽNÉHO NATOČENÍ



LEGENDA:

- ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM
- - - DALŠÍ MOŽNÉ PŘÍZPŮSOBNÉ TVARU A VELIKOSTI ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM
- VNIŘNÍ ROZMĚR VENTILÁTOROVÉ KOMORY

POZNÁMKY:


- PARAMETRY a , b , c JSOU PROMĚNNÉ ROZMĚRY TVARU A UMÍSTĚNÍ ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM.
- STYK NÁBĚHOVÝCH PLECHŮ A VENTILÁTOROVÉ KOMORY BUDE DŮKLADNĚ UTĚSNĚN A VYHLAZEN.

<p>Majitel: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Antonínská 548/1 Brno – střed 60190 IČO: 00216305 podíl 100%</p> <p>Stupeň projektu: PRO UDĚLENÍ OCHRANY</p>	Druh práce: ZAŘÍZENÍ PRO OPTIMALIZACI TLAKOVÉ ZTRÁTY VENTILÁTOROVÉ KOMORY S VOLNÝM OBĚŽNÝM KOLEM	
	Obsah: PŮDORYS, ŘEZY A DETAIL TVARU	Č. výkresu: Příloha č. 1
	Vypracoval: Ing. Dominik Čákl	Č. zakázky: -
	Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.	Část: -
	Původce: Rubina Aleš Doc. Ing. Ph.D., Brno, CZ, r.č. 7511283890 Trčka Michal Ing., Rožnov pod Radhoštěm, CZ, r.č. 630724/0665 Čákl Dominik Bc., Jablonec nad Nisou, CZ, r.č. 940203/2684 Blasinski Petr Ing. Ph.D., Český Těšín, CZ, r.č. 8705215684 Uher Pavel Ing. Ph.D., Rajhrad, CZ, r.č. 830319/4064 Jůza Štěpán Ing., Čebín, CZ, r.č. 920502/5225	Měřítko: - Datum: 11/2020

12.6 PŘÍLOHA - UŽITNÉ VZORY

- Užitný vzor č. CZ 33993,
- Užitný vzor č. CZ 35008,
- Užitný vzor č. CZ 36043

UŽITNÝ VZOR

<p>(19) ČESKÁ REPUBLIKA</p>  <p>ÚŘAD PRŮMYSLOVEHO VLASTNICTVÍ</p>	<p>(21) Číslo přihlášky: 2020-37187 (22) Přihlášeno: 29.01.2020 (47) Zapsáno: 19.05.2020</p>	<p>(11) Číslo dokumentu: 33 993 (13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: F24F 13/08 (2006.01)</p>
<p>(73) Majitel: Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veverčí, CZ</p> <p>(72) Původce: doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D., Brno, Trnitá, CZ Ing. Michal Trčka, Rožnov pod Radhoštěm, CZ Bc. Dominik Cakl, Jablonec nad Nisou, CZ Ing. Petr Blasinski, Ph.D., Český Těšín, Dolní Žukov, CZ Ing. Pavel Uher, Ph.D., Rajhrad, CZ Ing. Štěpán Jůza, Čebín, CZ</p> <p>(74) Zástupce: Kania, Sedlák, Smola, s.r.o., Mendlovo náměstí 907/1a, 603 00 Brno, Staré Brno</p>		
<p>(54) Název užitého vzoru Automatický redistributor vzduchu pro vzduchotechnické jednotky</p>		

CZ 33993 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitého vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

CZ 35008

UŽITNÝ VZOR


(11) Číslo dokumentu:

35 008

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

F24F 13/08 (2006.01)
F24F 11/72 (2018.01)

<p>(19) ČESKÁ REPUBLIKA</p>  <p>ÚŘAD PRŮMYSLového VLASTNICTVÍ</p>	<p>(21) Číslo přihlášky: 2020-38399 (22) Přihlášeno: 22.12.2020 (47) Zapsáno: 20.04.2021</p>
--	---

(73) Majitel:
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veverčí, CZ

(72) Původce:
doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D., Brno, Trnitá, CZ
Ing. Michal Trčka, Rožnov pod Radhoštěm, CZ
Bc. Dominik Cakl, Jablonec nad Nisou, CZ
Ing. Petr Blasinski, Ph.D., Český Těšín, Dolní Žukov, CZ
Ing. Pavel Uher, Ph.D., Rajhrad, CZ
Ing. Štěpán Jůza, Čebín, CZ

(74) Zástupce:
Kania, Sedlák, Smola, s.r.o., Mendlovo náměstí
907/1a, 603 00 Brno, Staré Brno

(54) Název užitého vzoru
**Redistributor vzduchu pro optimalizaci
tlakové ztráty ventilátorové komory s
volným oběžným kolem**

CZ 35008 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitého vzoru
splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.



UŽITNÝ VZOR


(11) Číslo dokumentu:

36 043

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

F04D 29/32 (2006.01)
F04D 29/34 (2006.01)
F04D 29/38 (2006.01)

<p>(19) ČESKÁ REPUBLIKA</p>  <p>ÚŘAD PRŮMYSLUVÉHO VLASTNICTVÍ</p>	<p>(21) Číslo přihlášky: 2022-39672 (22) Přihlášeno: 15.02.2022 (47) Zapsáno: 26.05.2022</p>
<p>(73) Majitel: Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veverčí, CZ</p> <p>(72) Původce: doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D., Brno, Trnitá, CZ Ing. Michal Trčka, Rožnov pod Radhoštěm, CZ Bc. Dominik Cakl, Jablonec nad Nisou, CZ Ing. Ondřej Nespěšný, Jihlava, CZ Ing. Jan Vystrčil, Polička, Horní Předměstí, CZ Ing. David Bečkovský, Ph.D., Jeseník, CZ doc. Ing. Jan Pěnčík, Ph.D., Brno, Staré Brno, CZ doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D., Bílovice nad Svitavou, CZ</p> <p>(74) Zástupce: Kania, Sedlák, Smola, s.r.o., Mendlovo náměstí 907/1a, 603 00 Brno, Staré Brno</p>	
<p>(54) Název užitného vzoru: Oběžné kolo</p>	

CZ 36043 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitného vzoru
splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.