



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

TEZE

THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Dominik Cakl

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 proudy vzduchu kinetickou energii. 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 výtlačné 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 proudy vzduchu eliminovat negativní dopady víření a ulehčit výtoku 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 proudu 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.

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.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690: 2022

CAKL, 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

CAKL, 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.

OBSAH

1	ÚVOD.....	5
2	REŠERŠNÍ ČÁST	6
3	VYMEZENÍ CÍLŮ A HYPOTÉZ DISERTAČNÍ PRÁCE	7
4	METODY ZPRACOVÁNÍ	9
5	TEORETICKÁ ANALÝZA	11
6	EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA A ZKOUŠKY	13
6.1	OPTIMALIZACE VÍŘENÍ VZDUCHU POMOCÍ REDISTRIBUTORU VZDUCHU	14
6.2	OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA POMOCÍ KONKÁVNÍ A KONVEXNÍ GEOMETRIE LOPATEK	15
6.3	OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ŽIVOTNÍ CYKLUS, RECYKLACI MATERIÁLŮ A RETROFIT.....	16
6.4	OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ŽIVOTNÍ CYKLUS, RECYKLACI MATERIÁLŮ A RETROFIT.....	17
7	SYNTÉZA VÝSLEDKŮ DÍLČÍCH CÍLŮ	18
8	VÝSLEDNÁ CHARAKTERISTIKA POTRUBNÍ SÍTĚ A VENTILÁTORU	21
9	DISKUSE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR	23
9.1	ZÁVĚRY DÍLČÍCH CÍLŮ	23
9.2	VYHODNOCENÍ HYPOTÉZ	23
9.3	VÝZNAM PRÁCE PRO VĚDNÍ OBOR.....	26
9.4	VÝZNAM PRÁCE PRO PRAXI A PRŮMYSLOVOU VYUŽITELNOST	27
9.5	MOŽNOSTI DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ VÝZKUMU	27
9.6	METODIKA MOŽNÉHO DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ BUDOUCÍHO VÝZKUMU	27
	SEZNAM PUBLIKOVANCH PRACÍ AUTORA	28
	OCHRANNÉ ZNÁMKY AUTORA	29
	SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ	30
	ŽIVOTOPIS AUTORA	32

1 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. Snížení 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. Výstupem této práce je dosažení jednoznačného snížení měrného příkonu ventilátoru a stanovení strukturovaného grafického znázornění zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře.

2 REŠERŠNÍ ČÁST

Ventilátorové komory s volným oběžným kolem přímo namontovaným na jednom rámu jsou nedílným prvkem většiny moderních vzduchotechnických sestav, které mají specifické potřeby za účelem energetických úspor a vyloučení nestability chování vzduchotechnického systému [1]. Hlavní příčina hluku ve vzduchotechnice je aerodynamického původu [2][3]. 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[4][5][6]. 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.

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 [7][8]. V souvislosti s modernizací systémů se zaměřením na ventilátorové komory se tato práce dále zabývá zvýšením aerodynamické efektivity u současných zařízení prostřednictvím originálních výrobků.

Autoři u rešeršního článku [9] přicházejí s numerickou a experimentální metodou měření s referenčním kolem dmyhadla z hliníku a z polymeru. Při škrcení hmotnostního toku na výstupu dmyhadla vychází porovnání kompresního tlaku téměř identicky, přičemž u hliníkového kola byl získán vyšší rozsah otáček. 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 [10].



Obr. 1: Vlevo originální hliníkové kolo kompresoru a vpravo polymerové kolo [9].

3 VYMEZENÍ CÍLŮ A HYPOTÉZ DISERTAČNÍ PRÁCE

CÍLE PRÁCE

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.

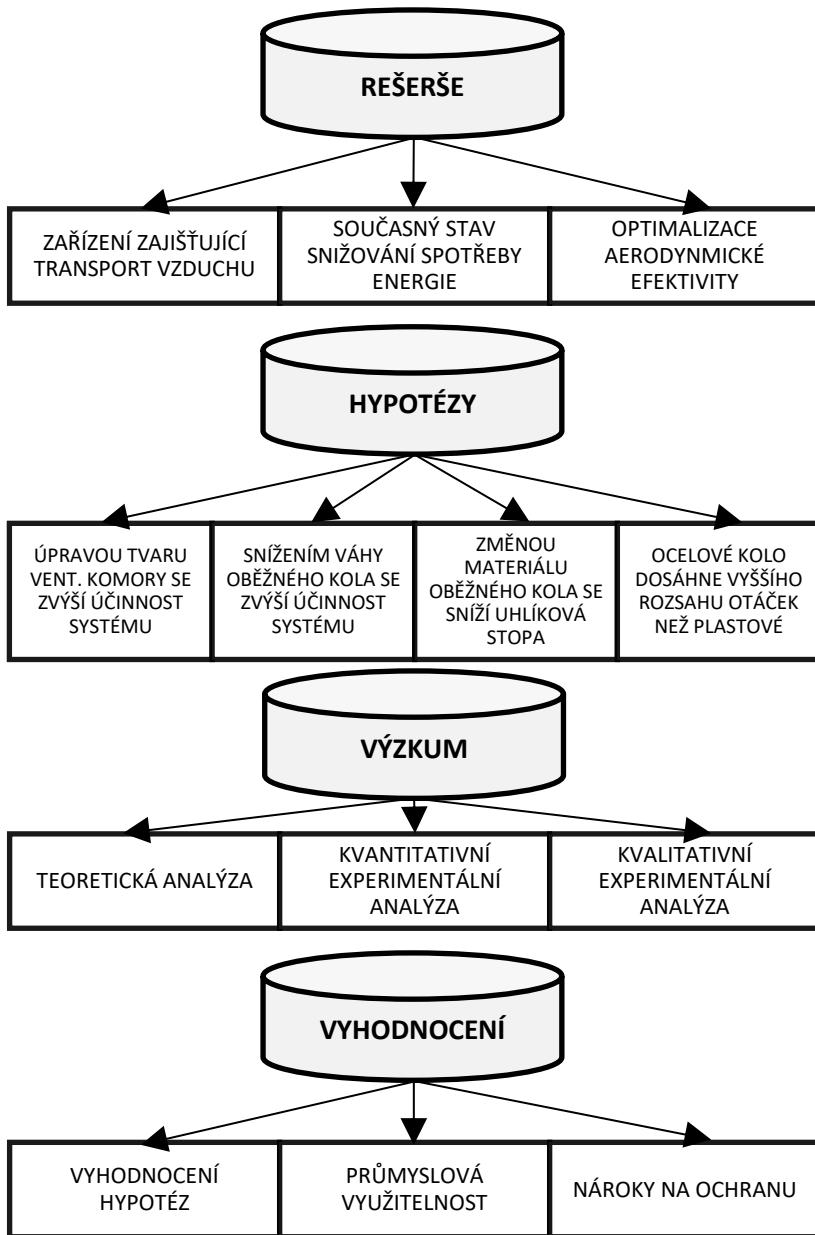
HLAVNÍ CÍL

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.



Obr. 2: Vizualizace sekvencí vztahů v rámci dedukčního výzkumu.

4 METODY ZPRACOVÁNÍ

REŠERŠE

- Uvedení současného poznání se zaměřením na ventilátorové komory s volným oběžným kolem přímo namontovaným na jednom rámu a faktory ovlivňující aerodynamickou účinnost systému.
- 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.
- Uvedení systematického sběru informací na téma Optimalizace transportu vzduchu ve ventilátorové komoře s volným oběžným kolem a souhrn aktuálních poznatků.

TEORETICKÁ ANALÝZA

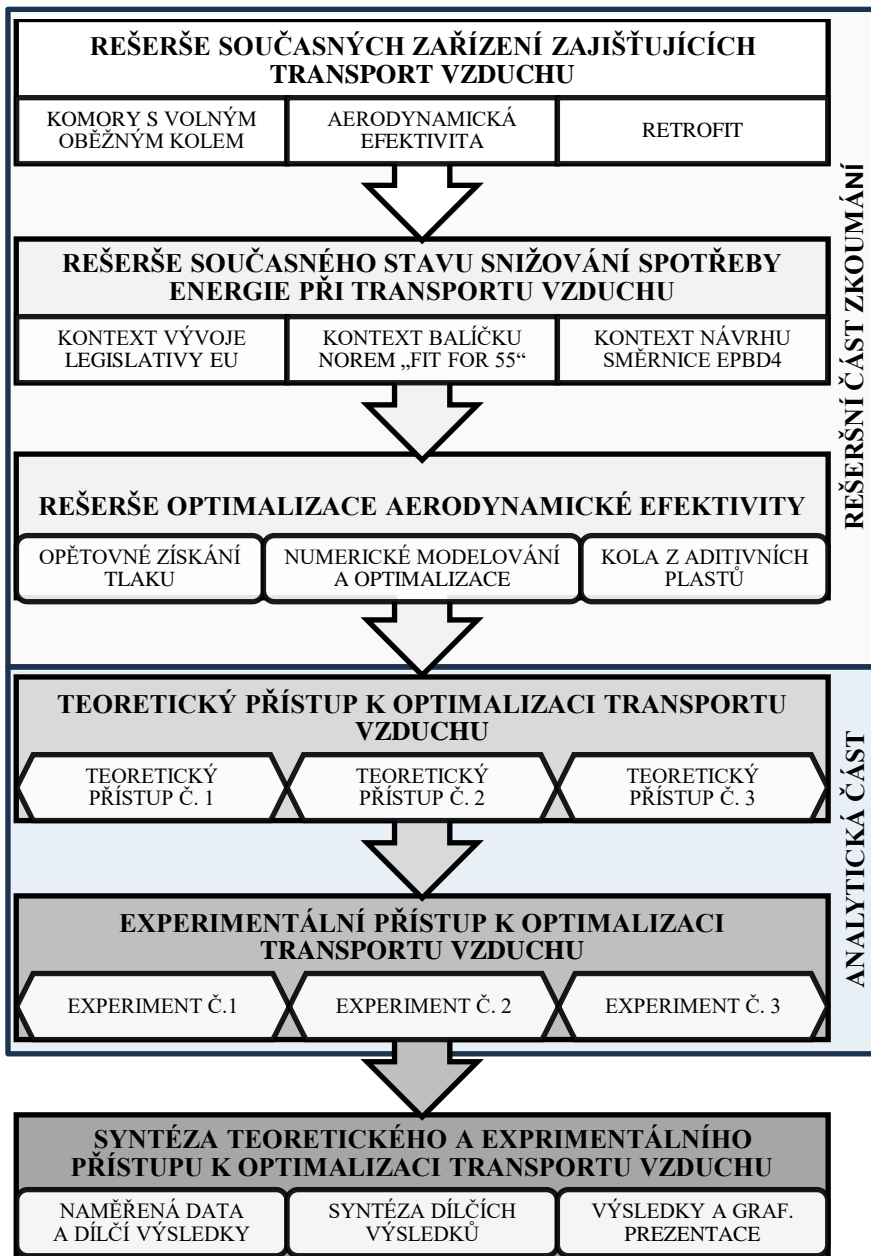
- Teoretický rozbor faktorů a okrajových podmínek, které mohou mít vliv na zvýšení účinnosti systému. Analýza zahrnuje vytvoření vědeckého přístupu, který bude následně testován pomocí experimentálních metod.

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

- **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 v oblasti mechaniky tekutin.



Obr. 3: Diagram chronologického postupu optimalizujícího transport vzduchu ve ventilátorové komoře.

5 TEORETICKÁ ANALÝZA

Inovativní přístupy se zabývají zvýšením efektivity proudění vzduchu v uzavřeném vnitřním prostoru hranatých ventilátorových komor, které jsou nedílnou součástí většiny vzduchotechnických jednotek.

OPTIMALIZACE VÍŘENÍ VZDUCHU POMOCÍ REDISTRIBUTORU VZDUCHU

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 [5]. Princip náběhových plechů je pomoci proudy vzduchu změnit směr víření a ulehčit výtok vzduchu z ventilátorové komory pomocí hladkého sklouznutí po šikmé ploše.

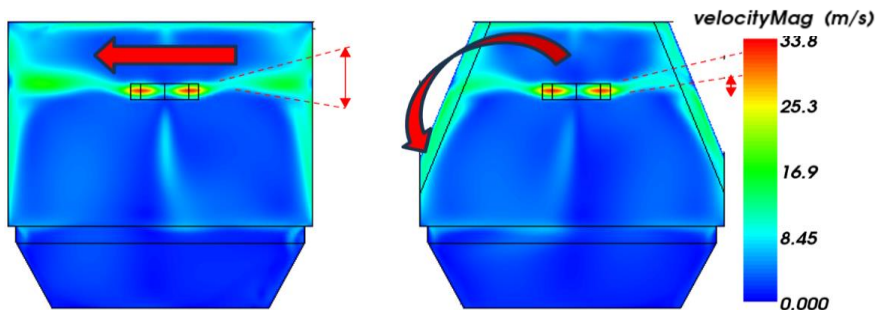
OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA POMOCÍ KONKÁVNÍ A KONVEXNÍ GEOMETRIE LOPATEK

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 proudy vzduchu plynuleji změnit směr víření ve ventilátorové komoře a následným homogennějším proděním vzduchu eliminují tlakové ztráty ventilátorové komory [11].

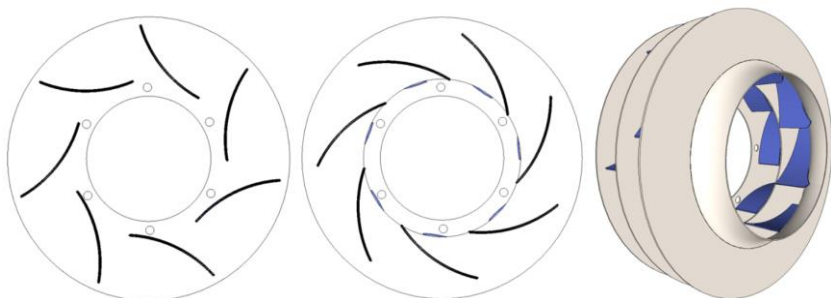
OPTIMALIZACE VOLNÉHO OBĚŽNÉHO KOLA S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ, ŽIVOTNÍ CYKLUS, RECYKLACI MATERIÁLŮ A RETROFIT

Princip inovativního přístupu je prostřednictvím 3D tisku představit volná oběžného kola pro ventilatory s volným oběžným kolem, která vlivem nižší hmotnosti volného oběžného kola a tím souvisejícími menšími třecími silami působícími na stator motoru ventilátoru sníží měrný příkon ventilátoru.

Dalším principem je opětovná použitelnost, možnost modernizace, zvýšení obsahu recyklovaných materiálů ve výrobcích, umožnění repasování, vysoce kvalitní recyklace, snížení uhlíkové a environmentální stopy a zároveň zajištění jejich výkonnosti a bezpečnosti [12].



Obr. 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.



Obr. 5: Řez jednotlivými řadami inovativním oběžným kolem radiálního ventilátoru s konkávní a konvexní geometrií lopatek a obrázek celého volného oběžného kola.

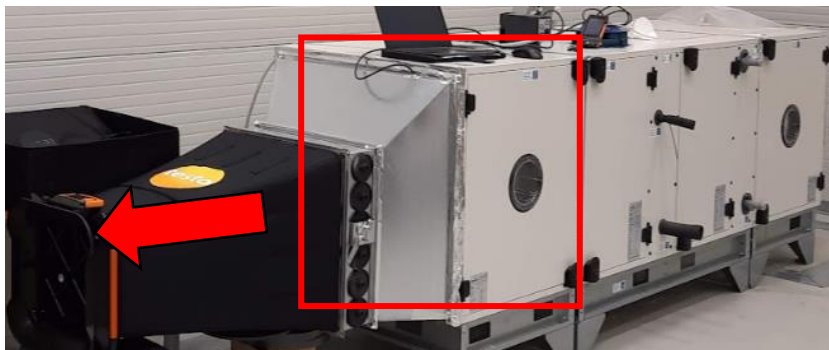


Obr. 6: Technické řešení vyrobené z moderních udržitelných materiálů na bázi polymerů pomocí 3D tisku. (Zdroj: Fotografie poskytnuta Ústavem pozemního stavitelství.)

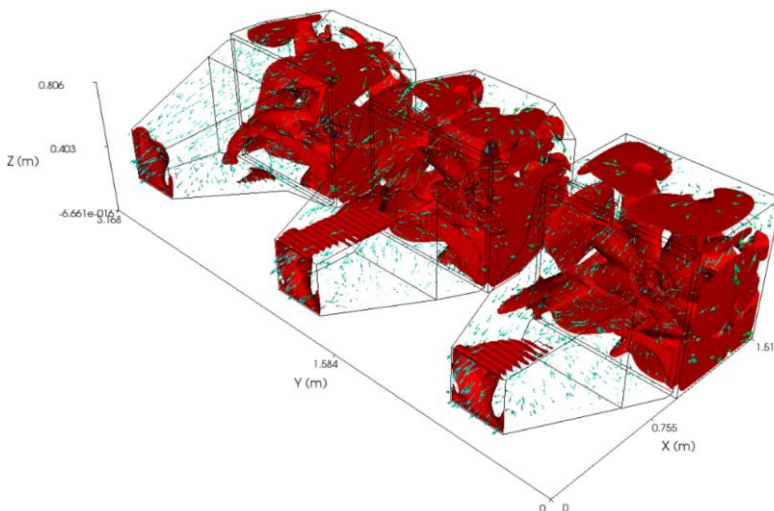
6 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA A ZKOUŠKY

NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK

Cílem technického řešení je představit 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.



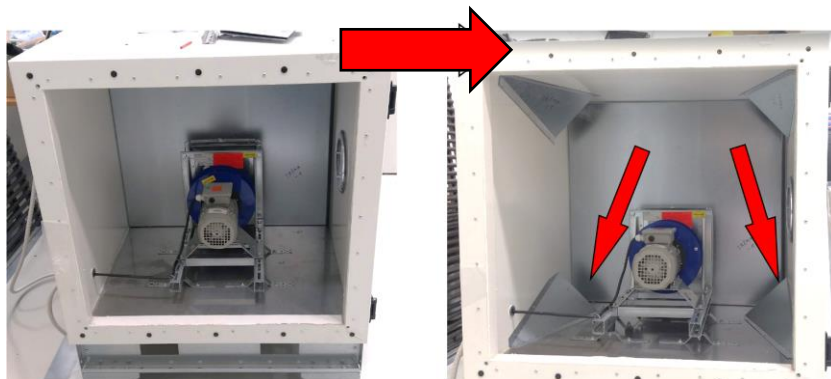
Obr. 7: Pohled na kompletní sestavu aerodynamické trati, na které se měřily reálné ventilátorové charakteristiky, zvýrazněná ventilátorová komora a směr výtlaku.



Obr. 8: Model CFD zohledňující orientaci přechodového potrubí v kombinaci s náběhovými plechy. Červená barva v místě nad 6 m/s.

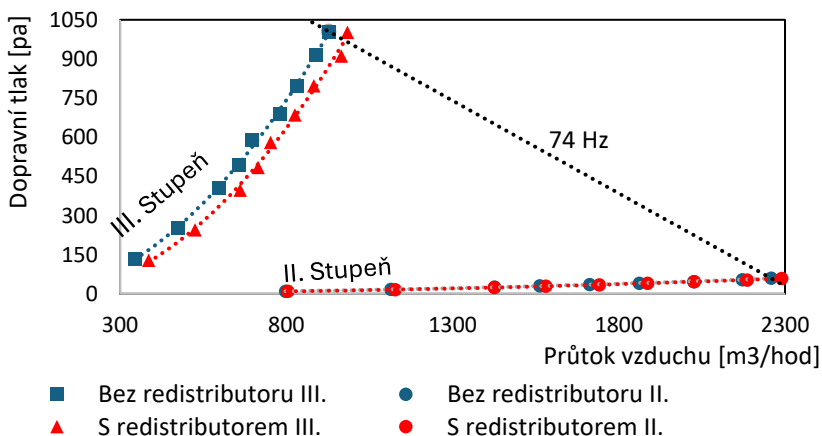
6.1 Optimalizace víření vzduchu pomocí redistributoru vzduchu

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



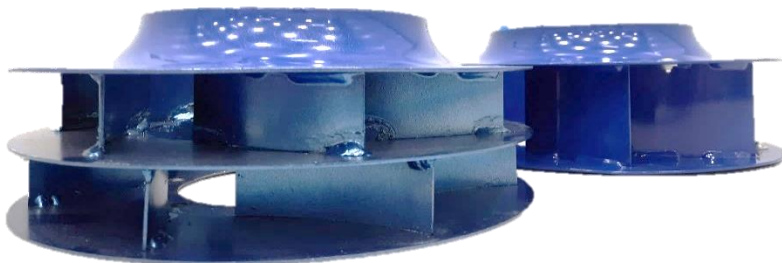
Obř. 9: Ventilátorová komora před umístěním náběhových plechů a ventilátorová komora po instalaci náběhových plechů.

Z grafu níže je patrné, že instalace náběhových plechů a regulace klapky na výtlaku 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 %.



Graf 1: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru pro sadu měření s regulací regulační klapky na výtlaku.

6.2 Optimalizace volného oběžného kola pomocí konkávní a konvexní geometrie lopatek

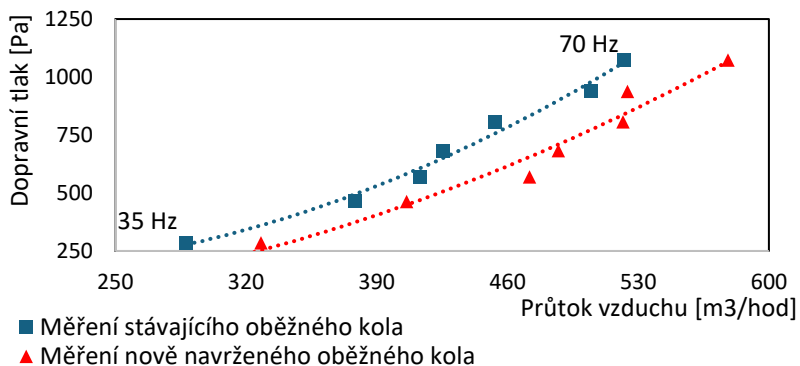


Obr. 10: Fotografie inovativního oběžného kola v popředí. V pozadí standardně používané volně oběžné kolo.

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 při konstantní frekvenci a dopravním tlaku.

Tab. 1: Porovnání naměřených hodnot.

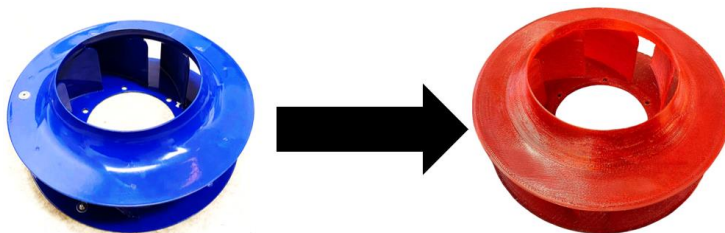
Druh měření		Porovnaná data
Navýšení průměrného průtoku vzduchu	%	10,1
Snížení prům. měrného příkonu vent.	%	-8,7



Graf 2: Grafické porovnání měřených charakteristik ventilátoru.

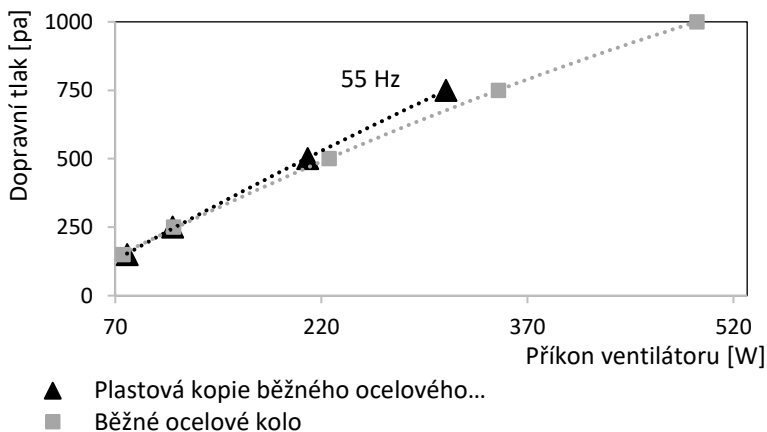
6.3 Optimalizace volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus, recyklaci materiálů a retrofit

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 [13].



Obr. 11: Obrázek standardně používaného ocelového volně oběžného kola. (vlevo) a jeho geometrické kopie - inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu PLA pomocí 3D tisku.

Z grafu níže je patrné, že instalace inovativního oběžného kola, při konstantním průtoku vzduchu 500 m³/hod, má příznivý význam napříč vyššími měřenými frekvencemi asynchronního motoru.



Graf 3: Naměřené výsledky běžného oběžného kola z oceli a jeho plastové kopie.

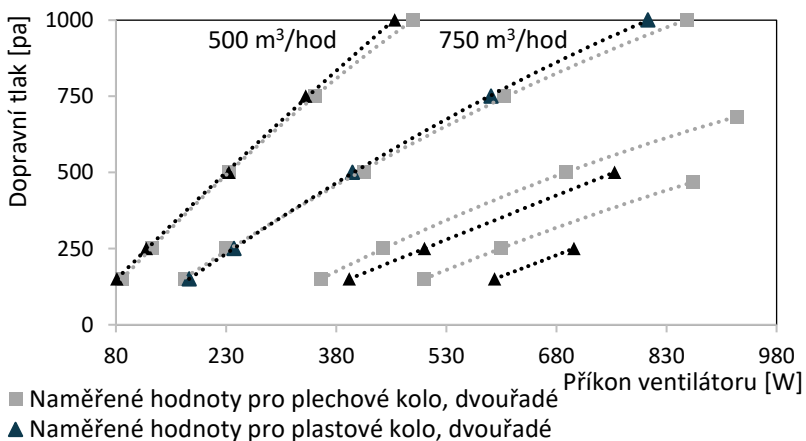
6.4 Optimalizace volného oběžného kola s ohledem na životní prostředí, životní cyklus, recyklaci materiálů a retrofit

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.



Obr. 12: Obrázek inovativního volného oběžného kola (vlevo) a jeho geometrická kopie – inovativní technické řešení vyrobené z moderního udržitelného materiálu pomocí 3D tisku (vpravo).

Z grafu níže je patrné, že instalace inovativního oběžného kola, při konstantním průtoku vzduchu 500; 750; 1000 a 1250 m³/hod, má příznivý význam napříč nižšími průtoky vzduchu.



Graf 4: Naměřené experimentální výsledky volného dvouřadého oběžného kola z oceli a jeho plastové kopie.

7 SYNTÉZA VÝSLEDKŮ DÍLČÍCH CÍLŮ

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.

Nejzajímavější naměřené charakteristiky jednotlivých originálních výzkumných projektů jsou syntezovány do následujících tabulek a výsledná data, která byla předmětem zkoumání, jsou barevně rozlišena. 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.

POROVNÁVACÍ PARAMETR VÝKONU – MĚRNÝ PŘÍKON SFP

SFP představuje elektrický příkon P [W] vydělený průtokem vzduchu ventilátorem podle návrhu [m³/s]. SFP_{int} vnitřní měrný příkon ventilátoru větracích součástí (specific fan power) vyjádřený v [Ws/m³] se rozumí poměr mezi vnitřní tlakovou ztrátou větracích součástí a účinností ventilátoru stanovenou pro referenční konfiguraci.

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

Kde:

ΣP je příkon ventilátor [kW]
 q_v celkové množství proudícího vzduchu [m³/s]

TAB 2. Výsledek dílčího cíle č. 1: Náběhové plechy

Druh měření			Redistributor	μ?
V	Průměrné navýšení průtok vzduchu	[%]	6,60	
SFP	Snížení měrného příkonu ventilátoru*	[Ws/m ³] [%]	119,43 5,90	✓
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny**	dB(A)	0,80	

TAB 3. Výsledek dílčího cíle č. 2: oběžné kolo dvouřadé

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

TAB 4. Výsledek dílčího cíle č. 3: plastové kopie běžného oběžného kola

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

TAB 5. Výsledek dílčího cíle č. 4: plastové kopie dvouřadého kola.

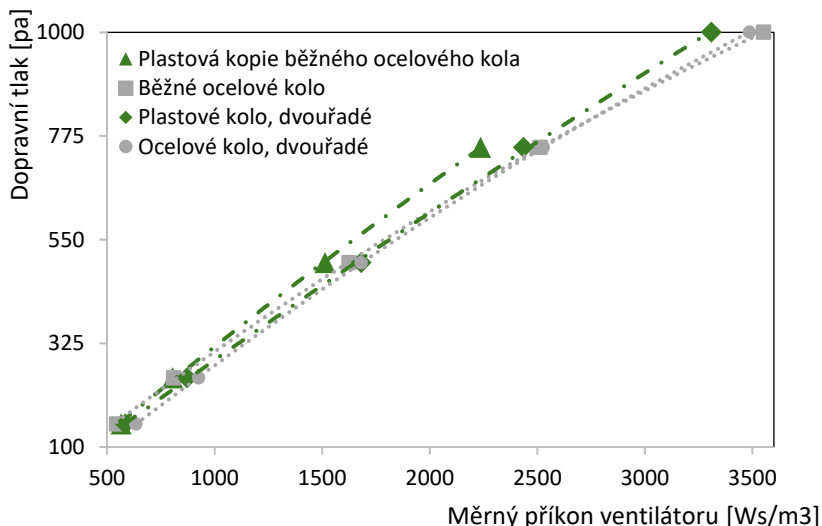
Druh měření			Plastová kopie dvouř. kola	μ?
SFP	Průměrné snížení měrného příkonu vent.	[Ws/m ³] [%]	73,73 4,40	✓
Lp	Snížení zvukové součtové hladiny	dB(A)	2,53	

TAB 6. Výsledek dílčího cíle č. 5: Environmentálního opatření

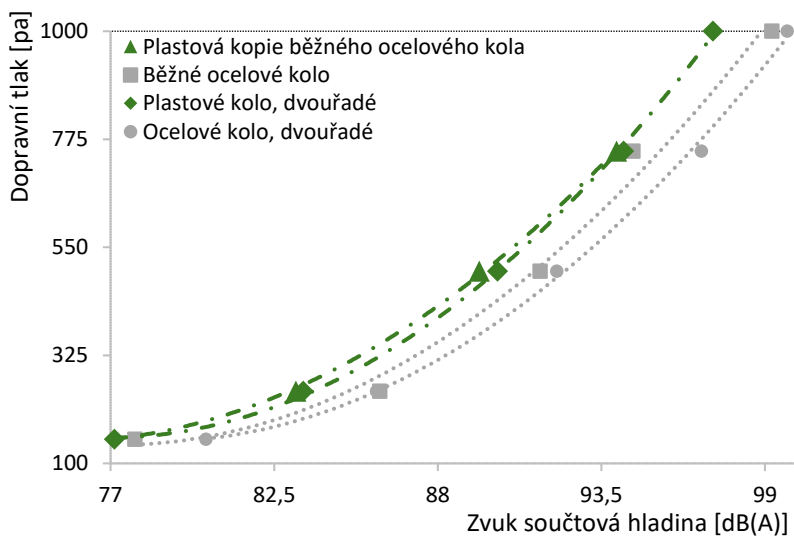
Druh měření			Plastová kopie	μ?
GWP	Přibližné snížení uhlíkové stopy běžného kola	[kg/CO ₂]	3,03	✓
GWP	Přibližné snížení uhlíkové stopy běžného kola	[kg/CO ₂]	3,42	

* Byla použita hodnota nominálního příkonu ventilátoru uváděnou výrobcem pro příslušnou frekvenci.

** Z důvodu omezeného rozsahu měření měřícího přístroje uvedeno pouze pro nastavenou frekvenci 60 Hz.



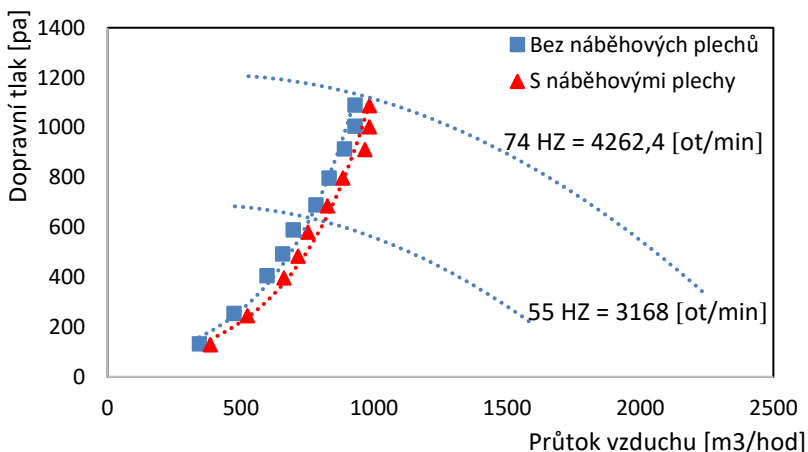
Graf 5: Syntéza naměřených experimentálních výsledků měrných příkonů ventilátoru, pro referenční běžná ocelová kola a jejich inovativní plastové kopie. Okrajová podmínka 500 m³/hod.



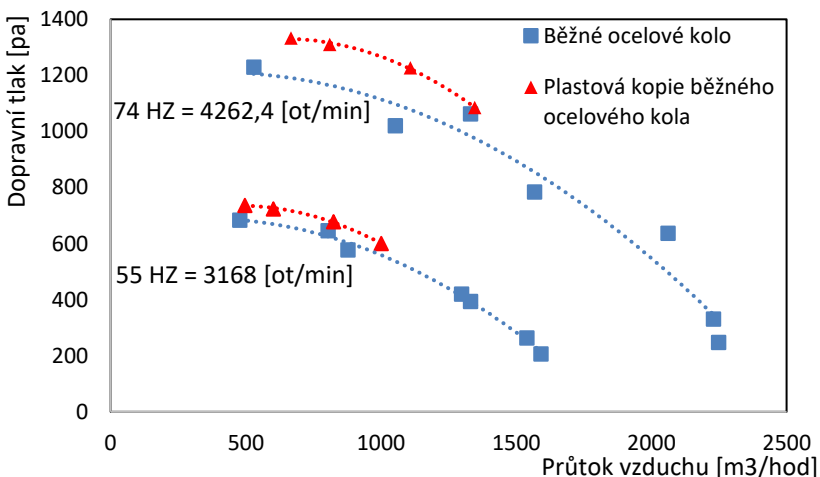
Graf 6: Syntéza naměřených experimentálních výsledků zvukové součtové hladiny ventilátoru, pro referenční běžná ocelová kola a jejich inovativní plastové kopie. Okrajová podmínka 500 m³/hod.

8 VÝSLEDNÁ CHARAKTERISTIKA POTRUBNÍ SÍŤE A VENTILÁTORU

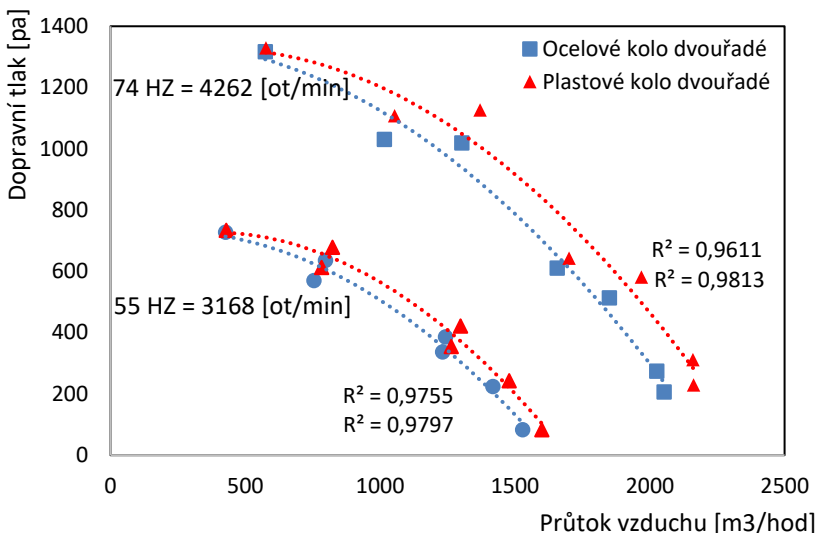
Dle naměřených hodnot v předchozích kapitolách, okrajových podmínek a vztahů pro přepočítání vlastností ventilátorů, jsou dále stanovena jednoznačně strukturovaná grafická znázornění zlepšení hydraulických vlastností transportu vzduchu ve ventilátorové komoře.



Graf 7: Charakteristika potrubní sítě bez náběhových plechů a s náběhovými plechy.

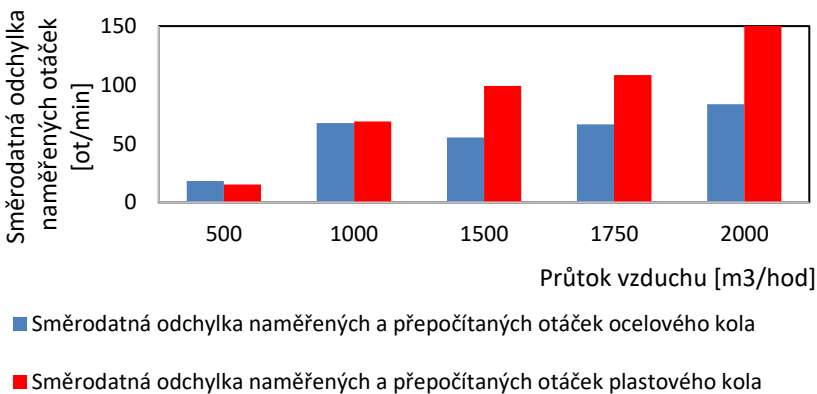


Graf 8: Tlaková charakteristika ventilátoru s běžným volným ocelovým oběžným kolem a jeho plastovou geometrickou kopií.



Graf 9: Tlaková charakteristika ventilátoru s dvouřadým ocelovým volným oběžným kolem a jeho plastovou, dvouřadou geometrickou kopií.

Sloupcový graf 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 10: Směrodatná odchylka naměřených a přepočítaných otáček oběžného dvouřadého kola.

9 DISKUSE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR

9.1 Závěry 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 lopátkového ventilátoru. Z prezentovaných výsledků se potvrdilo, že **došlo ke snížení uhlíkové stopy, přičemž snížení je více než desetinásobné.**

9.2 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 uvedeny v rámci dedukčního výzkumu.

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 výtok 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, změní 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. 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. Hypotéza byla potvrzena v rámci syntézy dat, jasně definovaných okrajových podmínek a průtoku vzduchu 500 m³/hod.

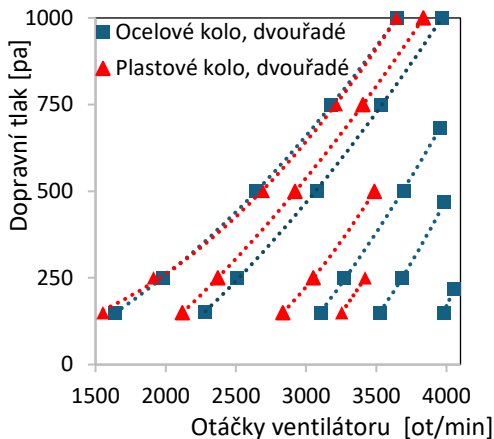
Hypotéza č. 3: Environmentální opatření pomocí inovativního oběžného kola z „udržitelných“ lehkých materiálů sníží uhlíkovou stopu oběžného kola.

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. Hypotéza byla jednoznačně potvrzena.

Hypotéza č. 4: Ocelové kolo dosáhne vyššího rozsahu otáček než plastové.

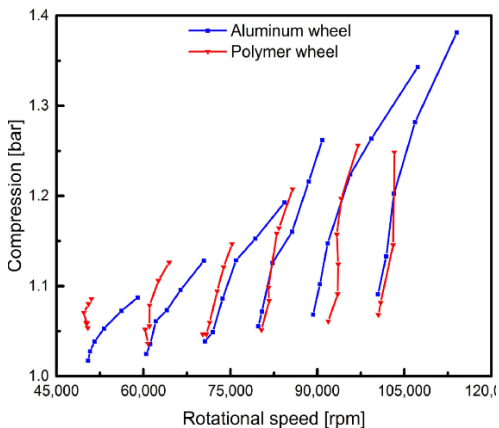
Odpověď na Hypotézu č. 4: Hypotéza byla zkoumána teoreticky a experimentálně na dvou ocelových kolech a jejich plastových geometrických kopiích. Z teoretické analýzy výzkumu rešeršního článku se dalo předpokládat, že ocelové kolo predikovatelně dosáhne vyššího

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 tuhosti jeho lopatek.



Graf 11: 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 rešeršního přístupu byly verifikovány rozsáhlým experimentálním měřením a hypotéza byla jednoznačně potvrzena. Niže je uveden graf rešeršního článku [9], který zkoumal provozní vlastnosti kompresoru turbodmychadla s komponenty vyrobených technologií 3D tisku a který posloužil k potvrzení pravdivosti hypotézy.



Graf 12: Kompresní tlak vs. rychlost otáčení (experimentální výsledky kompresoru turbodmychadla originální hliníkové kolo kompresoru vs. polymerové kolo [9]).

9.3 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 recyklace (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.

9.4 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.

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.

9.5 Možnosti dalšího pokračování výzkumu

Vytvořit jasnou a účinnou metodiku pro aplikaci oběžného kola z udržitelného materiálu pomocí 3D tisku a představit jasnou a účinnou metodiku pro aplikaci analytické rovnice pro výpočet přesného průtoku vzduchu ventilátorovou komorou:

$$V = K \cdot C_R \cdot \sqrt{\Delta p} \text{ , kde} \quad (2)$$

V..... je objemový průtok vzduchu ventilátorovou komorou [m³/h]

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

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

C_R je redukční parametr odpovídající geometrii komory ventilátoru [-]

9.6 Metodika možného dalšího pokračování budoucího výzkumu

Vytvoření několik 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 vtištěného 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.**

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)

OCHRANNÉ ZNÁMKY AUTORA

Rok 2020:

1. RUBINA, Aleš, Michal TRČKA, Dominik CAKL, Petr BLASINSKI, Pavel UHER a Štěpán JÚZA, 2020. Užitený 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 JÚZA, 2021. Užitený 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. Užitený vzor č. CZ 36043. „Oběžné kolo“. ČR. 2022-39672. Uděleno 15.02.2022. Zapsáno 26.05.2022.

SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 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].
- [2] RUBINA, Aleš; UHER, Pavel; SALAJKA, Radek; BAROŇ, Alexandr; CAKL, 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.
- [3] 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. 2024-03-22].
- [4] 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-vzduchotechnicky-systemu-iv#pozn14>. [cit. 2023-12-25].
- [5] 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-vzduchotechnicky-systemu-iv#pozn14>. [cit. 2023-12-26].
- [6] 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.

- [7] 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>.
- [8] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, MPO. *Ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie*. Praha, 2016. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/dokument158127.html>.
- [9] 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>.
- [10] 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].
- [11] 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] *Nový akční plán pro oběhové 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.
- [13] CAKL, 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].



ŽIVOTOPIS AUTORA

Ing. Dominik Cakl

Narozen: 1994, v Jablonci nad Nisou
Bydliště: Loukovec, Okres Mladá Boleslav

Vzdělání:

- 2000–2014 Střední průmyslová škola stavební Liberec; Pozemní stavby / Building construction
- 2014–2018 Vysoké učení technické v Brně; Bakalář (Bc.), Stavební inženýrství / Civil engineering
- 2018–2020 Vysoké učení technické v Brně; Inženýr (Ing.), Technické zařízení budov / Building services

Pedagogická činnost:

- 2020–2021 výuka v rámci doktorského programu: Doktorský seminář; výuka ve cvičení vytápění
- 2020–2021 Střední škola polytechnická Brno, Jílová; Výuka technického kreslení
- 2021–2022 výuka v rámci doktorského programu: Doktorský seminář; výuka ve cvičení vzduchotechnika

Funkce, členství ve spolcích:

- Asociace energetických specialistů, z.s.; přednášející
- Společnosti pro techniku prostředí; člen

Další odborná praxe a činnost

- 2000–2014 Stavební firma Petr Sudek; zednické práce, vedoucí pracovní čtyry
- 2014 - nyní EnergySim s.r.o.; pomocný projektent TZB, specialista pro energetiku, technik kontrol systémů vytápění, větrání a klimatizace

Ocenění:

- Výhra na mezinárodní vědecké konferenci Young Scientists 2022.