

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

ŠILUMOS SIURBLIŲ INTEGRAVIMO Į ORO Ruoštuvus ENERGINĖ ANALIZĖ

Kęstutis ČIUPRINSKAS*, Vilius ŠIPULSKIS

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2018 m. birželio 10 d.; priimta 2018 m. birželio 25 d.

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama, kiek šilumos siurbliai, integruoti į oro ruoštuvus, yra pranašesni už analogiškus išorinius šilumos siurblius. Nagrinėjami du realiomis sąlygomis veikiantys analogiški oro ruoštuvi – vienas su integruotu, o kitas su išoriniu šilumos siurbliu. Tyrimo metu išmatuotos šių įrenginių rodiklių vertės, lemiančios jų energinį naudingumą, tokios kaip oro temperatūra ir vartojama energija. Tam, kad galima būtų nustatyti sezoninį įrenginių efektyvumą (SCOP), šie rodikliai pagal LST EN14825:2016 buvo matuojami esant skirtingai aplinkos temperatūrai. Nustatyti išvestiniai efektyvumo rodikliai bei, remiantis standartu, apskaičiuotas abiejų įrenginių šilumos siurblių efektyvumas. Lyginant pradinių investicijų ir šildymo sezono energijos kaštų skirtumus, įvertintas oro ruoštuvų su integruotais šilumos siurbliais ekonominis naudingumas.

Reikšminiai žodžiai: oro ruoštuvas, integruotas šilumos siurblys, vėdinimas, šilumogrąža, energinis efektyvumas, realios sąlygos.

Įvadas

Energijos išteklių tausojimas yra visuotinai pripažįstamas šiuolaikinės visuomenės uždavinys, glaudžiai susijęs su tvariąja raida. Pastatai yra viena didžiausių energijos vartotojų grupių, todėl energijos taupymas juose – vienas iš svarbiausių prioritetų. Taupant energiją pastatuose per kelis dešimtmečius nemažai nuveikta ir ypač – atitvarų šiltinimo srityje. Pagal Lietuvoje galiojančius teisės aktų reikalavimus (STR 2.01.02:2016) (Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2016) naujai statomų pastatų atitvarų konstrukcijos turi būti beveik dešimt kartų šiltesnės, nei buvo leidžiama sovietiniais laikais. Tačiau atitvarų šiltinimas neišsprendžia kitos problemos – vėdinimo tikslais tiekiamam orui šildyti suvartojamos energijos sąnaudų. Ši problema sprendžiama taikant oro ruoštuvus su šilumogrąža, kuri sumažina vėdinimo šilumos nuostolių keletą kartų. Tačiau ir likusi vėdinimo šilumos nuostolių dalis yra reikšminga, todėl jai mažinti turi būti skirtas pakankamas dėmesys.

Sudėtinga pagerinti oro ruoštuvo su šilumogrąžiu efektyvumą tiek energiniu, tiek ekonominiu požiūriais (Wallin ir Claesson, 2014). Vienas iš būdų gerinti vėdinimo sistemos efektyvumą yra naudoti šilumos siurblius (ŠS).

Šilumos siurblio, kaip šilumos ar vėsos šaltinio, taikymas oro ruoštuvuose nėra naujas sprendimas, tačiau, jei taikomas išorinis (atskiras) šilumos siurblys, jis visada naudoja tik lauko oro šilumą ar vėšą. Tačiau iš patalpų šalinamas oras žiemą net ir po šilumogrąžos yra gerokai šiltesnis, o vasarą – vėsesnis nei lauko oras, todėl siekiant išnaudoti šį temperatūrinį potencialą, pradėti naudoti į oro ruoštuvus integruoti šilumos siurbliai.

Šio tyrimo tikslas buvo palyginti, kiek oro ruoštuvas su integruotu šilumos siurbliu yra energiškai efektyvesnis už įprastinį sprendimą, kai taikomas išorinis šilumos siurblys. Tyrime atliktas šių dviejų technologijų oro ruoštuvų, veikiančių realiomis sąlygomis, eksperimentinis tyrimas, nustatyti lyginamieji momentiniai bei sezoniniai efektyvumo rodikliai, palygintos eksperimentiškai gautos šių rodiklių vertės.

1. Tyrimo objektai

Abiejuose oro ruoštuvuose pagrindinis šilumos atgavimo elementas yra rotacinis šilumokaitis, kuris atgauna didžiausią dalį kartu su šalinamu oro pernešamos šilumos. Pirmajame įrenginyje integruotą oras-oras šilumos siurblių galima laikyti papildomu šilumogrąžos įrenginiu, nes jis

*Autorius susirašinėti. El. paštas kestutis.ciuprinskas@vgtu.lt

išnaudoja likusį šalinamo oro temperatūros potencialą ir perduoda jį tiekiamam orui. Šiuo atveju šilumos siurblys atlieka ir papildomo oro šildymo iki reikiamos temperatūros funkciją. Šis įrenginys naudojamas gamyklos, esančios Vilniaus rajone, administracinėms patalpoms vėdinti, todėl kiti įrenginio elementai yra standartiniai. Įrenginio projektinis debitas $+12\,944/-11\,964\text{ m}^3/\text{h}$, projektiniai slėgio nuostoliai – 350 Pa. 1 paveiksle pateikta vėdinimo įrenginio principinė schema.

Antrame tiriamajame įrenginyje (2 paveikslas) oras-oras šilumos siurblys (3 paveikslas) yra statomas atskirai ir iš šalinamo oro energijos neatgauna. Garintuvas yra sumontuotas išoriniame bloke ir vartoja lauko oro energiją. Kondensatorius yra sumontuotas tiekiamo oro trakte už rotacinio šilumokaičio ir pašildo orą iki reikiamos tiekiamo oro temperatūros. Įrenginys naudojamas Vilniaus centre, orą tiekia į administracines patalpas. Šio įrenginio dydis praktiškai toks pat kaip ir pirmojo. Jo projektinis oro debitas yra $+10\,000/-10\,000\text{ m}^3/\text{h}$, o projektiniai išorės slėgio nuostoliai 330 Pa. Įrenginio schema su komponentais pavaizduota 2 paveiksle.



3 paveikslas. Išorinis šilumos siurblys
Figure 3. External heat pump

Antrasis įrenginys vietoje integruoto šilumos siurblio sukomplektuotas su dviem išoriniais šilumos siurbliais, kurie toliau analizuojami bendrai ir laikomi vienu šilumos siurbliu. Kaip ir pirmasis įrenginys, šis įrenginys gali veikti dviem režimais – šildymo ir vėsinimo. 3 paveiksle pateikiama išorinio šilumos siurblio (vieno) išorinio bloko nuotrauka. Šiuose išoriniuose šilumos siurbliuose energiją vartoja ne tik kompresorius, bet ir ventiliatoriai, traukiančių orą per garintuvą.

2. Tyrimo metodika

Atliktas tyrimas susideda iš įrenginių faktinių duomenų matavimų, jų energinių rodiklių skaičiavimo ir energinės bei ekonominės analizės. Atliekant tyrimą buvo matuojama temperatūra būdinguose taškuose (1 lentelė) bei ventiliatorių, kompresoriaus ir kitų komponentų suvartojama elektros energija. Iš šių dydžių apskaičiuoti kiti lyginamieji rodikliai. Tyrime vėdinimo įrenginiai buvo skaidomi į sistemes, kurių efektyvumo rodikliai apskaičiuoti atskirai. Sistemos:

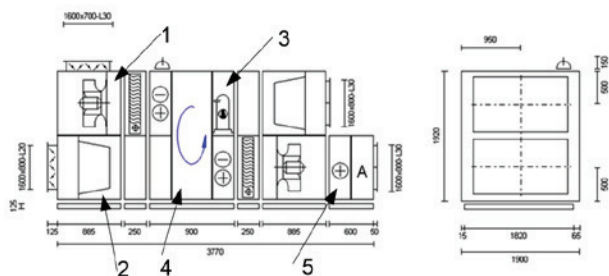
- ventiliatoriai;
- rotacinis šilumogražis;
- šilumos siurblys.

Pirmoji posistemė – oro ruoštuvų ventiliatoriai. Žinant transportuojamo oro srautą ir ventiliatoriaus vartojamą elektrinę galią, galima apskaičiuoti savitąją ventiliatoriaus galią (angl. SFP – *specific fan power*), kuri išreiškia ventiliatoriaus energijos sąnaudas oro kiekio vienetui transportuoti. SFP skaičiuojamas pagal (1) formulę:

$$SFP = \frac{P}{L}, \quad (1)$$

čia P – ventiliatoriaus vartojama elektros galia, kW; L – oro debitas, m^3/s .

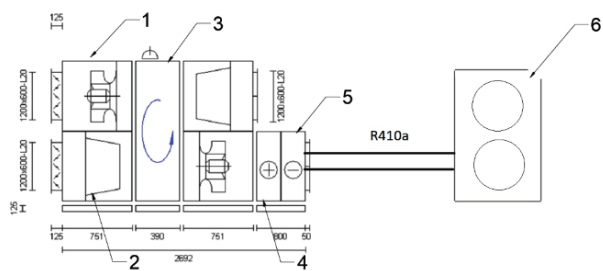
Antroji posistemė – rotacinis šilumokaitis, kuris grąžina didžiąją dalį šalinamo oro šilumos tiekiamam orui. Jis sukamas elektriniu varikliu, tačiau šilumokaičio apšukos nėra didelės (apie 10–15 kartų per min.), be to, abiejuose tiriamuosiuose oro ruoštuvuose jie praktiškai vienodi, todėl šilumokaičiui sukti suvartota elektra lyginant nereikšminga (Roulet, Heidt, Foradini ir Pibiri, 2011). Esminis lyginamasis rodiklis šiuo atveju yra šilumokaičio tempe-



1 paveikslas. Vėdinimo įrenginys su integruotu šilumos siurbliu (1 – ventiliatorius; 2 – kišeninis filtras; 3 – integruotas šilumos siurblys; 4 – rotacinis šilumogražis; 5 – vandeninis šildytuvas)

Figure 1. Air handling unit with integrated heat pump

(1 – fan; 2 – bag filter; 3 – integrated heat pump; 4 – rotary heat exchanger; 5 – hydronic heating coil)



2 paveikslas. Vėdinimo įrenginys su išoriniu šilumos siurbliu (1 – ventiliatorius; 2 – kišeninis filtras; 3 – rotacinis šilumogražis; 4 – vandeninis šildytuvas; 5 – reversinė šilumos siurblio šildymo ir vėsinimo sekcija; 6 – išorinis šilumos siurblys)

Figure 2. Air handling unit with external heat pump (1 – fan; 2 – bag filter; 3 – rotary heat exchanger; 4 – hydronic heating coil; 5 – reversible heating-cooling section of heat pump; 6 – external heat pump)

ratūrinis efektyvumas (ε_t), kuris apskaičiuojamas pagal (2) formulę:

$$\varepsilon_t = \frac{t_a - t_s}{t_a - t_p} \cdot 100\%, \quad (2)$$

čia t_a – lauko oro temperatūra, °C; t_s – temperatūra po šilumokaičio, °C; t_p – patalpos temperatūra, °C.

Trečioji posistemė yra šilumos siurblys (ŠS). Šilumos siurblyje elektrą vartoja kompresorius, taip pat antrajame įrenginyje energiją vartoja ir ŠS išorinio bloko ventiliatoriai. Ventiliatorių suvartojama energija, lyginant su kompresoriaus, yra sąlygiškai maža. Išmatavus elektros sąnaudas bei žinant, kiek energijos orui suteikia kondensatorius, apskaičiuotas lyginamasis rodiklis – šilumos siurblio sezoninis efektyvumas – SCOP (3).

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}}, \quad (3)$$

čia Q_H – šilumos siurblio per sezoną pagamintas šilumos kiekis, kWh; Q_{HE} – šilumos siurblio per sezoną suvartota elektra, kWh.

Siekiant nustatyti sezoninius įrenginių rodiklius, idealu būtų atlikti ilgalaikius, visą sezoną trunkančius matavimus. Tačiau šiam tikslui reikia disponuoti matavimo įranga su duomenų kaupimo galimybe. Kadangi tokios įrangos gauti visam šildymo sezonui nebuvo galimybės, pasirinkta reikiamus rodiklius matuoti momentiška, nuskaitant rodiklių vertes būdingomis lauko oro sąlygomis.

Abiejų tirtų įrenginių atskiri komponentai yra prijungti prie valdymo įrangos, turinčios matavimo funkciją, bet neturinčios duomenų kaupimo funkcijos. Duomenys buvo nuskaitomi rudenį ir žiemą nuotoliniu būdu tiesiai iš

valdymo bloko. Nuskaitymo momentai pasirinkti atsižvelgiant į lauko oro temperatūrą. Buvo siekiama išmatuoti įrenginių charakteristikas lauke esant tokioms temperatūros vertėms, kurios taikomos sezoninio efektyvumo skaičiavimams pagal standartą LST EN 14 825 :2016 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016): –10 °C, –7 °C, 2 °C, 7 °C, 12 °C.

3. Matavimų duomenys

Abiejuose įrenginiuose duomenų nuskaitymas atliktas tomis pačiomis dienomis, todėl išorės lauko temperatūra abiem atvejais vienoda. Būdinguose, analogiškuose abiem atvejais įrenginių taškuose buvo nuskaityta oro temperatūra, įgalinanti apskaičiuoti rotacinio šilumokaičio grąžinamą energiją ir temperatūrinį efektyvumą. Oro srautai įrenginiuose kai kuriais matavimų atvejais šiek tiek skiriasi, tačiau didžiausias skirtumas siekia tik 1 %, todėl didelės įtakos skaičiavimams neturi. 1 lentelėje pateikti abiejų įrenginių tyrimo metu nuskaityti duomenys.

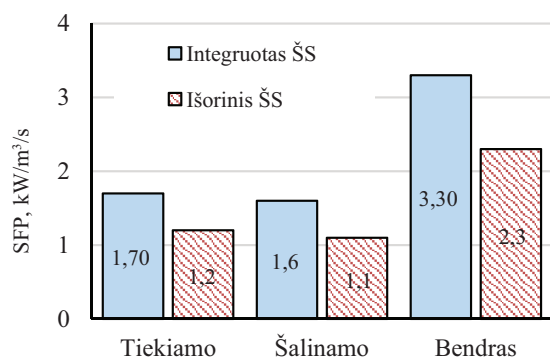
4. Energinė analizė

Atliekant energinę analizę pagal dydžius, išmatuotus eksperimento metu, buvo apskaičiuoti lyginamieji efektyvumo rodikliai pagal (1–3) formules. Abiejų įrenginių efektyvumo rodikliai pateikti grafikuose (4–7 paveikslai). 4 paveiksle grafike matyti, kad įrenginio su integruotu šilumos siurbliu bendra savitoji ventiliatorių galia yra 1 kW/m³/s didesnė nei įrenginio su išoriniu ŠS. Tai patvirtina, kad šio įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas yra didesnis. Tą lemia integruoti šilumokaičiai (kondensatorius ir garintuvas), kompresorius bei ŠS vamzdynas.

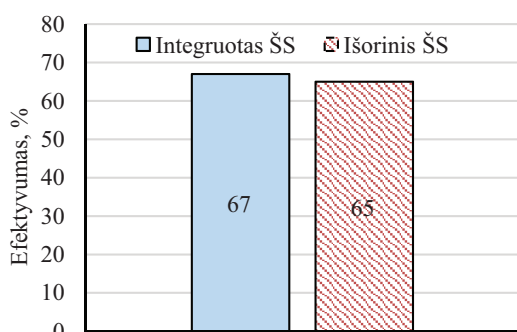
1 lentelė. Matavimų duomenys

Table 1. Measured data

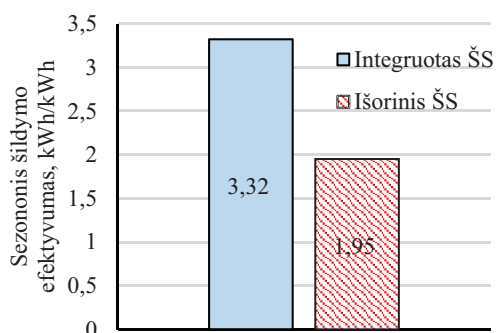
Rodiklis	2018-01-16 08:50		2018-01-15 10:00		2017-12-14 11:00		2017-12-12 12:12		2017-10-30 14:50	
	Integruotas ŠS	Atskiras ŠS	Integruotas ŠS	Atskiras ŠS	Integruotas ŠS	Atskiras ŠS	Integruotas ŠS	Atskiras ŠS	Integruotas ŠS	Atskiras ŠS
Lauko oro temperatūra, °C	–10	–10	–7	–7	2	2	7	7	12	12
Tiekiamo oro temperatūra po rotacinio šilumokaičio, °C	8,7	8,1	10,7	9,2	13,5	14,9	14,9	15,9	17	17,4
Temperatūra po kondensatoriaus, °C	14,3	16,9	18,2	18	24	23,9	24,9	26,8	28	22,4
Šalinamo oro temperatūra po rotacinio šilumokaičio, °C	–9,5	–2,8	–7,1	–1,3	0,3	8,9	1,3	10,3	4,4	11,6
Temperatūra po šildytuvo, °C	21,4	22	23,4	–	–	–	27	–	–	–
Šilumos siurblio elektrinė galia, kW	6,6	15,3	8,4	15	8,8	15	8,8	15	8,54	7,5



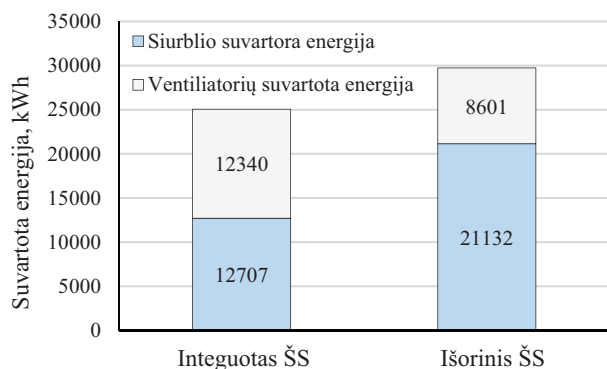
4 paveikslas. Savitoji ventiliatorių galia
Figure 4. Specific fan power



5 paveikslas. Rotacinių šilumogrąžių efektyvumas
Figure 5. Efficiency of rotary heat exchangers



6 paveikslas. Šilumos siurblių SCOP
Figure 6. SCOP of heat pumps



7 paveikslas. Oro ruoštuvų ventiliatorių ir ŠS elektros sąnaudos
Figure 7. Total electricity consumption of heat pumps and AHU's fans

5 paveiksle pateiktos abiejų įrenginių rotacinių šilumogrąžių efektyvumo vertės, apskaičiuotos pagal (2) formulę.

Matyti, kad 5 paveiksle vaizduojamas rotacinių šilumogrąžių efektyvumas abiem atvejais labai panašus. Tą lemia labai panašūs abiejų įrenginių oro debitai, toks pat rotorius bangos ilgis ir folijos storis bei toks pat sukimosi greitis.

6 paveiksle pateiktos reikšmingiausios šio tyrimo rodiklio – SCOP vertės. Jis apskaičiuotas remiantis metodika (LST EN 14 825 :2016) ir eksperimentinio tyrimo duomenimis.

SCOP skaičiavimuose įvertintos kiekvieno matavimo lauko oro temperatūros sąlygomis naudojamos šiluminės ir elektros galios (įvertinus garintuvo atšildymą), elektros sąnaudos budėjimo režimu bei išorinio bloko ventiliatoriaus elektros sąnaudos. Pirmame stulpelyje (6 paveikslas) vaizduojamas įrenginio su integruotu ŠS apskaičiuotas sezoninis efektyvumas (3,32 kWh/kWh), o antrame – įrenginio su išoriniu ŠS (1,95 kWh/kWh). Matyti, kad integruoto ŠS atveju SCOP yra aukštesnis 1,7 karto. Toks skirtumas yra tikrai didelis, nes tiesiogiai išreiškia galimas energijos santaupas. Tačiau oro ruoštuvo su integruotu ŠS atveju ventiliatoriams reikia įveikti didesnę aerodinaminę pasipriešinimą, todėl jie suvartoja daugiau elektros energijos. 7 paveiksle lyginamos bendros įrenginių elektros sąnaudos per nagrinėjamą laikotarpį. Į bendrąsias sąnaudas įtrauktos tik ventiliatorių ir ŠS komponentų elektros sąnaudos, o automatikos ir rotorius variklio elektros sąnaudos abiejuose įrenginiuose laikomos lygios. Matyti, kad įrenginio su išoriniu ŠS bendrosios elektros sąnaudos per šildymo sezoną yra 29 732 kWh, o įrenginio su integruotu ŠS – 25 047 kWh. Skirtumas sudaro 4685 kWh arba 15,8 %.

5. Ekonominė analizė

Abiejų nagrinėjamų įrenginių atvejais šilumos siurblys yra būtinas elementas, skirtas orui pašildyti iki reikiamos tiekti į patalpą oro temperatūros, todėl ekonominis vertinimas atliekamas lyginant įrenginių pradinę investicijų ir šildymo sezono energijos sąnaudų skirtumus. Skaičiuojant laikoma, kad diskonto norma yra 2 %, elektros energijos kaina 0,114 €/kWh. Metinės priežiūros kaštai laikomi vienodi. Vėdinimo sistemos abiem atvejais yra pastovaus oro srauto, veikia 50 val. per savaitę.

Įrenginio su integruotu ŠS pradinės įrengimo investicijos yra 25 252 Eur, o šildymo sezono išlaidos elektros energijai – 2941 Eur. Įrenginio su išoriniu ŠS – atitinkamai 20 431 Eur ir 3475 Eur. Pirmasis įrenginys brangesnis 4821 Eur, tačiau per metus jo išlaidos elektrai mažesnės 534 Eur. Paprastasis atsipirkimo laikas šiuo atveju 9 metai, o tikrasis 10 metų. Atsižvelgiant į tai, kad oro ruoštuvų ir šilumos siurblių tipinis tarnavimo laikas yra apie 15 metų, galima teigti, kad oro ruoštuvai su integruotais šilumos siurbliais yra ekonomiškai naudingi.

Išvados

Natūrinio tyrimo metu surinktų duomenų pagrindu apskaičiuotas į oro ruoštuvą integruoto šilumos siurblio (ŠS) sezoninis efektyvumo koeficientas (SCOP) yra 3,32, o analogiško išorinio šilumos siurblio – 1,9. Integruoto šilumos siurblio atveju SCOP didesnis 1,7 karto.

Tyrimo metu nustatyta oro ruoštuvo su integruotu ŠS savitoji ventiliatorių galia (SFP) yra 3,3 kW/m³/s, o įrenginio su išoriniu oro ruoštuvu – 2,3 kW/m³/s. Integruoto ŠS atveju oro ruoštuvo SPF didesnė 1,4 karto.

Tyrimo metu apskaičiuotos oro ruoštuvo su išoriniu šilumos siurbliu šildymo sezono ventiliatorių ir šilumos siurblio elektros energijos sąnaudos sudarė 29 732 kWh, o įrenginio su integruotu šilumos siurbliu – 25 047 kWh. Skirtumas sudaro 4685 kWh arba 15,8 %.

Oro ruoštuvo su integruotu šilumos siurbliu pradinės investicijos yra didesnės, tačiau atsižvelgiant į kasmetines energijos kaštų santaupas, jis atsiperka per maždaug 2/3 įrenginio tarnavimo laiko. Apskaičiuotas paprastasis atsipirkimo laikas 9 metai, o tikrasis (vertinant diskonto faktorių) – 10 metų.

Padėkos

Dėkojame įmonei UAB „Komfovent“ už suteiktą galimybę naudotis jų įranga bei tirti jų vėdinimo įrenginius.

Literatūra

Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2016). *Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas* (STR 2.01.02:2016).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2016). *Oro kondicionieriai, skysčio aušinimo įrenginiai ir šilumos siurbliai su elektriniais kompresoriais patalpoms šildyti ir vėsinti* (LST EN 14 825:2016).

Roulet, C. A., Heidt, F. D., Foradini, F., & Pibiri, M. C. (2001). Real heat recovery with air handling unit. *Energy and Buildings*, 33(5), 495-502.

[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00104-3)

Wallin, J., & Claesson, J. (2014). Improving heat recovery using retrofitted heat pump in air handling unit with energy wheel. *Applied Thermal Engineering*, 62, 823-829.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.059>

ENERGY EFFICIENCY GAIN OF HEAT PUMP INTEGRATION IN AIR HANDLING UNITS

K. Čiuprinskas, V. Šipulskis

Abstract

This article describes how heat pumps (HP) integrated in air handling units (AHU) proved against the analogous AHU with external heat pumps. Two almost identical (except heat pump position) air handling units were analysed. During the experimental study supply and return air temperatures and AHU's fans power were measured. Efficiency indicators and consumed energy were calculated based on measured data. Seasonal performance factor (SCOP) and total annual energy use was evaluated for both units. During the economical evaluation was found, that AHU with integrated HP can payback within 10 years compared with AHU combined with external heat pump.

Keywords: air handling unit (AHU), integrated heat pump, ventilation, heat recovery, energy efficiency, real conditions.