



EXPERIMENTÁLNE MERANIA TEPELNÉHO ČERPADLA V SPOJITOSTI S NÍZKOTEPLNÝMI SÁLAVÝMI SYSTÉMAMI

Ing. Martin Šimko, PhD.
prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.
Mgr. Daniel Szabó
Ing. Lukáš Živner, PhD.
prof. Ing. Ján Takács, PhD.
Stavebná fakulta STU Bratislava
Katedra TZB
Radlinského 11, 810 05 Bratislava
e-mail: martin.simko@stuba.sk

Abstrakt

Príspevok sa zaoberá experimentálnym meraním prevádzky tepelného čerpadla vzduch/voda v spojitosti s tromi veľkoplošnými sálavými systémami v režime vykurovania v reálnych priestoroch laboratória v budove STU SvF na Trnávke v Bratislave. Meranie bolo uskutočnené pre overenie teoretických tvrdení o účinnosti, ktoré udáva výrobca na základe hodnoty COP a SCOP podľa normy STN EN 14 511 a STN EN 14 825. Pre meranie bolo vytipované obdobie od 5.1. do 15.1.2024. Cieľom meraní je vyhodnotenie reálneho čísla efektívnosti SPF po jednotlivých dňoch a vyhodnotenie účinnosti tepelného čerpadla.

1. ÚVOD

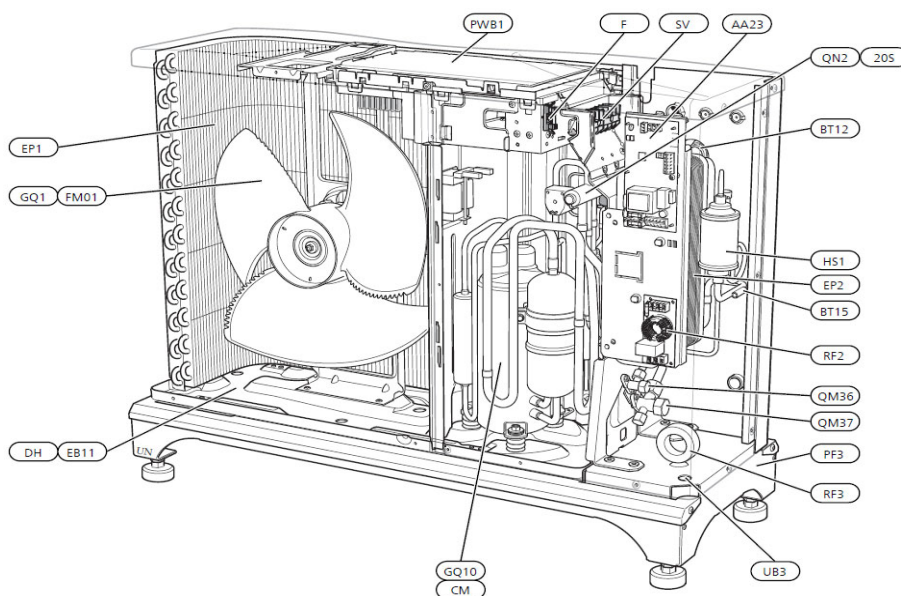
V súčasnej dobe kedy dochádza k navyšovaniu cien energií a zároveň sa kladie dôraz na znižovanie závislosti na spotrebe primárnych zdrojov energií (napr. zemný plyn), môže byť tepelné čerpadlo vhodnou alternatívou zdroja tepla/chladu, využívajúci energiu okolitého prostredia (Obnoviteľný zdroj energie - OZE). Aj vzhľadom na túto skutočnosť je tento príspevok zameraný na vyhodnotenie efektívnosti tepelného čerpadla spolu s nízokoteplotnými veľkoplošnými sálavými systémami v režime vykurovania a to tzv. výkonnostným faktorom (SPF – Seasonal Performance Factor). Experimentálne meranie bolo teda postavené na veľkoplošných nízokoteplotných veľkoplošných sálavých odovzdávacích systémoch v spojitosti so tepelným čerpadlom, ktoré predstavovalo zdroj tepla/chladu. Využili sa 3 samostatné miestnosti, kde v prvej miestnosti bolo podlahové vykurovanie, v druhej miestnosti stropné vykurovanie a v tretej miestnosti stenové vykurovanie. Tieto systémy sú súčasťou laboratória, ktoré sa nachádza v priestoroch STU SvF na Trnávke v Bratislave. Systémy vo všetkých priestoroch sú na báze takzvaného suchého systému, kde roznášaciu sálavú plochu pri sálavom podlahovom systéme tvoria tzv. BRIO dosky a pri stropnom a stenovom sálavom systéme tvoria sadrokartónové dosky. Každý systém mal svoj merač tepla osadený pri rozdeľovačoch každého systému. Zber dát, regulácia tepelného čerpadla, rozvodná podružná skriňa elektrického rozvádzača boli osadené v samostatnej miestnosti – technická miestnosť. Tepelné čerpadlo sa zvolilo typu vzduch/voda s menovitým výkonom 6 kW, ktoré bolo umiestnené na streche objektu, cca 5 m od technickej miestnosti. Pre meranie spotreby elektrickej energie bol zapojený



k tepelnému čerpadlu certifikovaný impulzný typ elektromeru LE-01d MID od firmy Firn elektro s. r. o. Pre merané obdobie sa zvolil automatický režim regulácie tepelného čerpadla, ktorý využíval ekvitermickú krivku pre výpočet požadovanej prívodnej teploty teplotnosnej pracovnej látky. Treba podotknúť, že objekt, v ktorom sa uskutočnili merania nebol zateplený a v okolitých vnútorných priestoroch nebolo aktívne vykurovanie a teplota vzduchu v týchto priestoroch sa v danom období pohybovala okolo 7 až 9 °C, tým boli zvýšené nároky na výkon veľkoplošných nízko teplotných veľkoplošných sálavých systémov.

2. TEPELNÉ ČERPADLO

Tepelné čerpadlo, ktoré je súčasťou systému so sálavými systémami bolo pre experimentálne merania navrhnuté typu vzduch/voda od firmy NIBE (tepelné čerpadlo typ F2040-6 ďalej len TČ). Jedná sa o inverterovo riadenú jednotku. Pracovný rozsah TČ je od -20 do 43 °C s maximálnou výstupnou teplotou teplotnosnej pracovnej látky 58 °C. V letných mesiacoch je TČ možné využiť aj na chladenie pomocou reverzného chodu TČ. Na obr. 1 je možné vidieť TČ od firmy NIBE typ F2040-6 s jednotlivými komponentami ako sú: **EP 1** - výparník, **CM** - kompresor, **EP2** - kondenzátor...



Obr. 1 Tepelné čerpadlo NIBE F2040-6 [6]

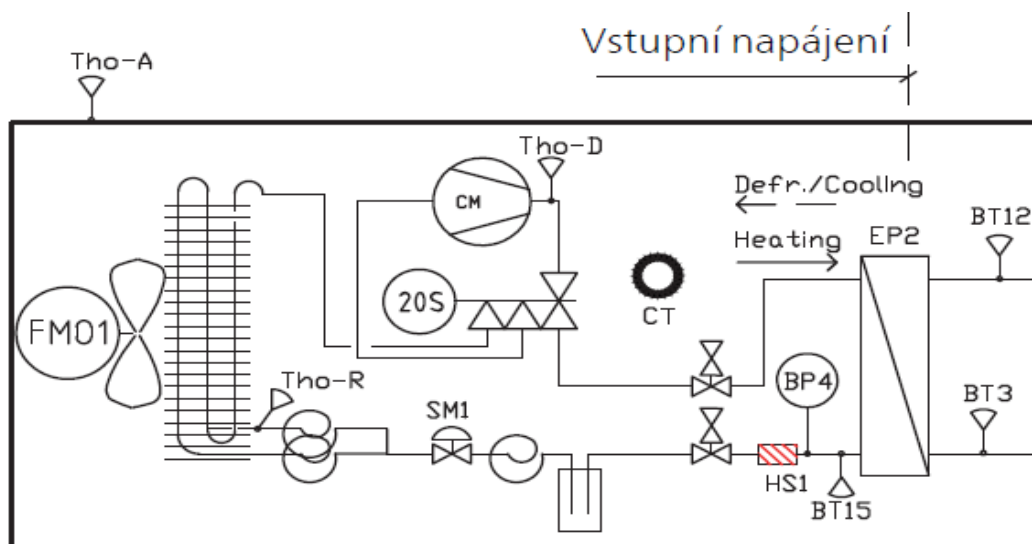
V tab. 1 sú technické údaje o tepelnom čerpadle F2040-6 od firmy NIBE ako rozsah výkonu, prevádzkové napätie, maximálny chladiaci výkon atď.

Tab. 1 Technické údaje NIBE F2040-6 [6]

Rozsah výkonu A7/W35 [kW] podľa EN 14511	1,5 - 7
Rozsah výkonu A7/W45 [kW] podľa EN 14511	1,2 - 4,6
SCOP priemerné klimatické pásmo 35/55 °C podľa EN 14825	4,8 / 3,46
Max. chladiaci výkon pri A27/W7 [kW]	5,87
Max. chladiaci výkon pri A27/W18 [kW]	7,98
Max. chladiaci výkon pri A35/W7 [kW]	4,86
Max. chladiaci výkon pri A35/W18 [kW]	7,03
Prevádzkové napätie	230 V / 50 Hz
Kompresor	Dvojité rotačný



Na obr. 2 je znázornená schéma vonkajšieho modulu TČ F2040-6 s jednotlivými snímačmi – ako vonkajší snímač teploty vzduchu, snímač teploty na výtlaku kompresora, snímač teploty na výparníku, snímač teploty prívodnej teploty teplotnosnej pracovnej látky za kondenzátorom, snímač teploty na vratnom potrubí, snímač teploty za kondenzátorom, vysokotlakový snímač.



Obr. 2 Schéma vonkajšieho modulu F2040-6 [6]

Vysvetlivky:

BT 28 (Tho-A) – vonkajší snímač teploty vzduchu, **BT 14 (Tho-D)** – snímač teploty na výtlaku kompresora, **BT 16 (Tho-R)** – snímač teploty na výparníku, **BT 12** – snímač teploty prívodnej teploty teplotnosnej pracovnej látky za kondenzátorom, **BT 3** – snímač teploty teplotnosnej pracovnej látky na vratnom potrubí, **BT 15** – snímač teploty za kondenzátorom, **BP 4** – vysokotlakový snímač, **CM** – kompresor, **EP2** – Kondenzátor, **EP 1** – Výparník, **QN 3 (SM1)** – expanzný ventil, **QN 2 (20S)** – štvorcestný ventil, **HS 1** – filter dehydrátor

3. EXPERIMENTÁLNE MERANIE PREVÁDZKY TEPELNÉHO ČERPADLA SO SÁLAVÝMI SYSTÉMAMI VO VYKUROVACOM REŽIME

Experimentálne meranie prebiehalo v laboratórnych podmienkach stavebnej fakulty STU v Bratislave na Trnávke. Meranie prebehlo v období od 05.01.2024 do 15.01.2024. Predmetnom experimentálneho merania bolo skúmať efektívnosť tepelného čerpadla s nízko teplotnými veľkoplošnými sálavými systémami v režime vykurovania. Meraná bola spotreba elektrickej energie tepelným čerpadlom impulzným elektromerom LE-01d MID od firmy Firn elektro s.r.o. a spotreba tepelnej energie dodanej do nízko teplotných veľkoplošných sálavých systémov. Spotrebovaná tepelná energia bola jednotlivo meraná pre každý nízko teplotný veľkoplošný sálavý systém zvlášť a to ultrazvukovými meračmi tepla ULTRTAHEAT/ULTRACOLD T330. Meraná bola i teplota vonkajšieho vzduchu a to snímačom teploty umiestneným na tepelnom čerpadle (vid'. obr. 2 a obr. 1 - vonkajší snímač teploty - BT 28 (Tho-A)). Následne bola vypočítaná hodnota SPF - Seasonal performance factor, ktorá pojednáva o efektívnosti tepelného čerpadla. Táto vypočítaná hodnota bola porovnaná s hodnotou COP, ktorú udáva výrobca.

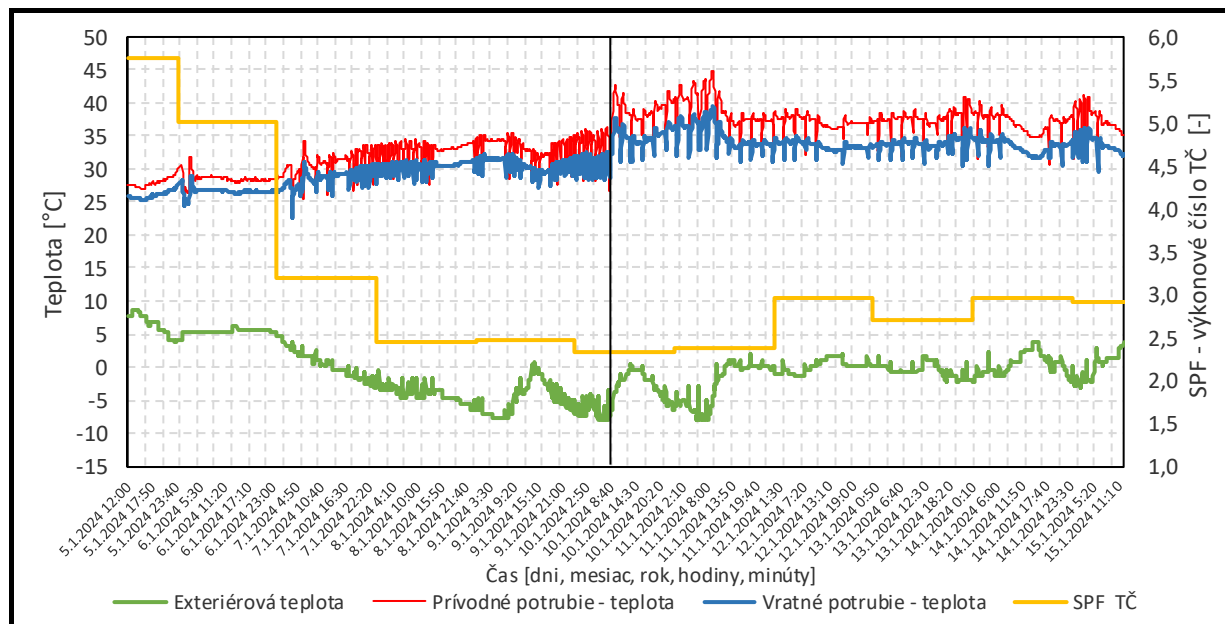


3.1 Sálavé vykurovacie systémy v spojitosti s tepelným čerpadlom

Meraná bola prevádzka sálavých systémov v spojitosti s tepelným čerpadlom v režime vykurovania. Meraná bola spotreba tepelnej energie sálavých systémov (podlahový, stropný a stenový), z ktorých každý bol navrhnutý do samostatnej miestnosti. Každá miestnosť mala rovnaké dispozičné riešenie a rovnakú podlahovú plochu. Orientácia miestností je východná. V prvej kancelárskej miestnosti bol inštalovaný suchý veľkoplošný sálavý podlahový systém Siccus v dvoch okruhoch s rozstupom rúrok 150 mm, s rúrkami Comfort Pipe PLUS Φ 14 x 2,0 mm, so sálavou plochou 15 m². V druhej miestnosti bol nainštalovaný systém veľkoplošného suchého sálavého stropu Uponor Renovis s rúrkou Uponor PE-Xa Φ 9,9 x 1,1 mm s 8 panelmi Uponor Renovis 2000 x 625 mm so sálavou plochou 10 m². V tretej miestnosti bol nainštalovaný veľkoplošný stenový sálavý systém Uponor Renovis s rúrkou Uponor PE-Xa Φ 9,9 x 1,1 mm s 8 panelmi Uponor Renovis 2000 x 625 mm a sálavou plochou 10 m² obr. 2.

3.2 Priebeh teploty vody v prívodnom a vratnom potrubí a exteriérovej teploty

Experimentálne meranie bolo spustené 05.01.2024 o 12:00 hod a cez riadiacu jednotku tepelného čerpadla SMO S40 bola nastavená ekvitermická krivka číslo 5, pri ktorej tepelné čerpadlo malo zabezpečiť pri vonkajšej teplote – 11 °C teplotu teplonosnej pracovnej látky do prívodného potrubia o teplote 38 °C. Počiatočný návrhový teplotný spád predstavoval 38/33 °C. V stredu 10.01.2024 o 9:00 hod bola nastavená krivka č. 7, pri ktorej tepelné čerpadlo malo zabezpečiť pri vonkajšej teplote – 11 °C, teplotu teplonosnej pracovnej látky do prívodného potrubia o 45 °C. Návrhový teplotný spád od tohto momentu predstavoval 45/40 °C vid' obr. 3.



Obr. 3 Priebeh teploty teplonosnej pracovnej látky v prívodnom a vratnom potrubí a exter. Teploty

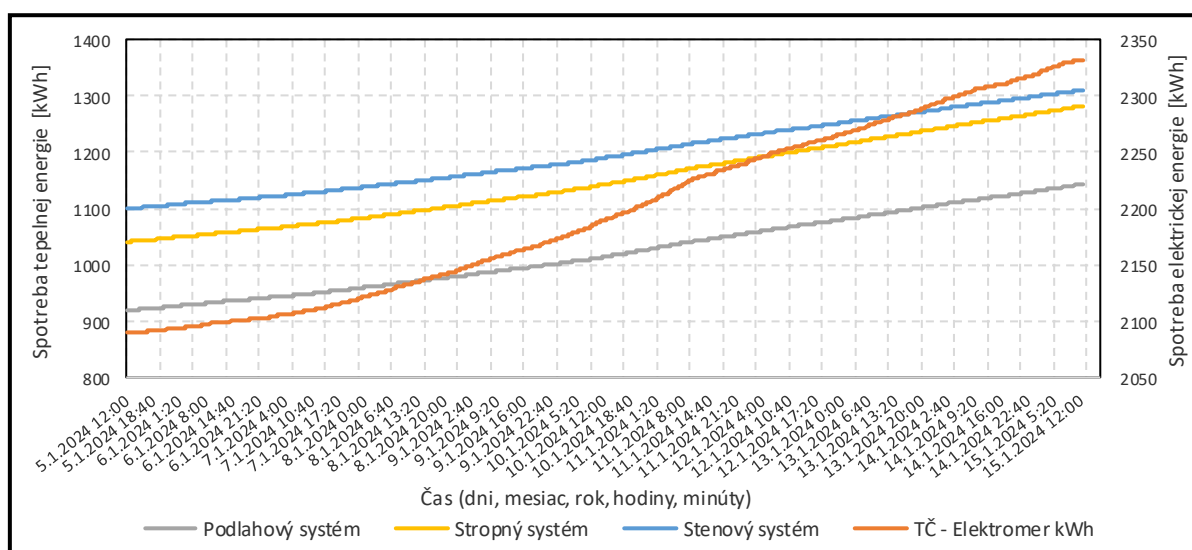
Na obr. 3 vidieť na grafe na primárnej osi priebeh exteriérovej teploty. Priemerná teplota vonkajšieho vzduchu počas meraného obdobia predstavovala hodnotu – 0,67 °C. Zároveň na obr. 3 na grafe taktiež na primárnej osi vidieť priebeh teploty teplonosnej pracovnej látky v prívodnom



a vratnom potrubí. Je vidieť že ekvitermická regulácia pekne reagovala na zmenu vonkajšej teploty, kedy pri poklese teploty vonkajšieho vzduchu tepelné čerpadlo v spolupráci s riadiacou jednotkou SMO 20 zvýšilo teplotu teplotnosnej pracovnej látky do prírodného potrubia a zároveň pri poklese teploty vonkajšieho vzduchu znížila teplotu teplotnosnej pracovnej látky do prírodného potrubia. Na obr. 3 vidieť zvislou čiarou predelený graf, ktorá oddeľuje obdobie od 05.01.2024 od 12:00 hod do 10.01.2024 do 9:00 hod kedy bola v riadiacej jednotke SMO 20 tepelného čerpadla nastavená ekvitermická krivka na č. 5. Priemerná teplota teplotnosnej pracovnej látky v tomto období predstavovala hodnotu 31,27 °C. Od 10.01.2024 o 9:00 hod do konca merania 15.01.2024 12:00 hod bola nastavená krivka č. 7 a priemerná teplota teplotnosnej pracovnej látky v tomto období predstavovala hodnotu 37,77 °C. Za celé merané obdobie priemerná teplota teplotnosnej pracovnej látky predstavovala hodnotu 34,61 °C. Zároveň na obr. 3 na grafe na sekundárnej osi vidieť priebeh vypočítaného výkonového čísla SPF tepelného čerpadla. Vidieť, že keď teplota vonkajšieho vzduchu predstavovala kladné hodnoty, toto výkonové číslo bolo vyššie, zároveň keď sa teplota vonkajšieho vzduchu dostávala na záporné hodnoty toto výkonové číslo klesalo.

3.3 Priebeh spotreby elektrickej energie tepelným čerpadlom a spotreba tepelnej energie sálavými systémami v režime vykurovania

Z výsledkov experimentálnych meraní v sledovanom období od 05.01.2024 do 15.01.2024 boli vyhotovené grafické výstupy zobrazené na obr. 4. Na obr. 4 vidieť na grafe na primárnej osi priebeh spotreby tepelnej energie tromi nízkoteplotnými veľkoplošnými sálavými systémami (sálavá podlaha, strop, stena), kde modrá krivka predstavuje priebeh spotreby tepelnej energie stenovým sálavým systémom, oranžová krivka predstavuje priebeh spotreby tepelnej energie stropným sálavým systémom a sivá krivka predstavuje priebeh spotreby tepelnej energie podlahovým sálavým systémom. Na obr. 4 vidieť na grafe na sekundárnej osi priebeh spotreby elektrickej energie tepelným čerpadlom počas meraného obdobia. Za celé merané obdobie sálavý stenový systém spotreboval 211 kWh, stropný sálavý systém 240 kWh a podlahový sálavý systém 223 kWh, spolu nízkoteplotné veľkoplošné sálavé systémy spotreboval 674 kWh tepelnej energie.



Za celé merané obdobie tepelné čerpadlo spotrebovalo 243 kWh elektrickej energie.

Obr. 4 Priebeh spotreby tepelnej energie nízkoteplotných veľkoplošných sálavých systémov v režime vykurovania a spotreba elektrickej energie tepelného čerpadla



Na obr. 4 je taktiež vidieť zmeny v priebehoch spotreby elektrickej energie tepelného čerpadla počas meraného obdobia. Tieto zmeny nastali v dôsledku ekvitermickej regulácie teploty teplonosnej pracovnej látky do prívodného potrubia, ktorá reagovala na zmeny teploty vonkajšieho vzduchu. Pri poklese vonkajšej teploty vzduchu bola krivka priebehu spotreby elektrickej energie strmšia. Je vidieť zmeny priebehu spotreby elektrickej energie aj v dôsledku zmeny v nastavení ekvitermickej krivky z č. 5 na č. 7, táto zmena nastala 10.01.2024 o 9:00.

3.4 Výpočet výkonového čísla SPF (Seasonal Performance Factor) a výkonové číslo COP (Coefficient of performance) tepelného čerpadla so sálavými systémami v režime vykurovania

Na stanovenie efektívnosti tepelného čerpadla bolo potrebné poznať jednak údaj o spotrebovanej tepelnej energii troma veľkoplošnými sálavými systémami a údaj o spotrebovanej elektrickej energii tepelným čerpadlom (viď podkapitolu 3.3).

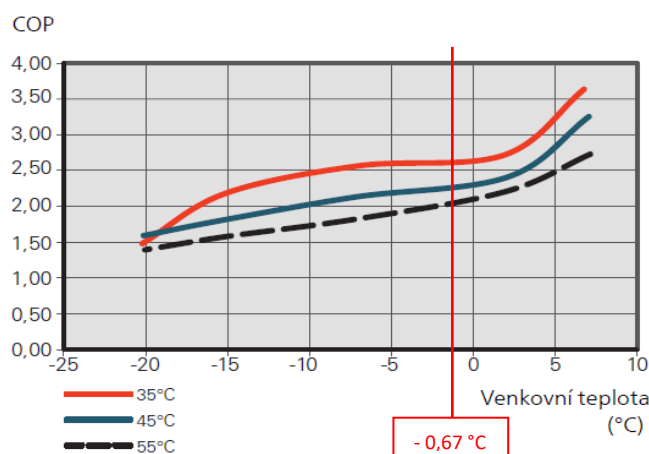
Výkonnosť tepelného čerpadla počas celej doby prevádzky v roku je nazývaná ako sezónne výkonnostný faktor (*SPF* – Seasonal Performance Factor), je definovaný ako pomer množstva dodaného tepla tepelným čerpadlom počas celej doby prevádzky v kalendárnom roku a celkového množstva spotrebovanej pohonnej energie kompresora a ďalších prídavných zariadení obehu [5]. Je definovaný vzťahom:

$$SPF = \frac{\text{súčet vyrobeného tepla tepelným čerpadlom}}{\text{súčet spotrebovanej energie}} = \frac{\sum \Phi_k}{\sum P_k} \quad (-) \quad (3.1)$$

Energetická efektívnosť systémov pracujúcich na báze termodynamického chladiaceho obehu (chladiace a klimatizačné zariadenia a tepelné čerpadlá) hodnotená tzv. výkonovým číslom (*COP* – z anglického Coefficient of Performance), je možné pre kompresorové tepelné čerpadlo vyjadriť nasledovne [5]:

$$COP_{TČ} = \frac{\Phi_K}{P_K} \quad (-) \quad (3.2)$$

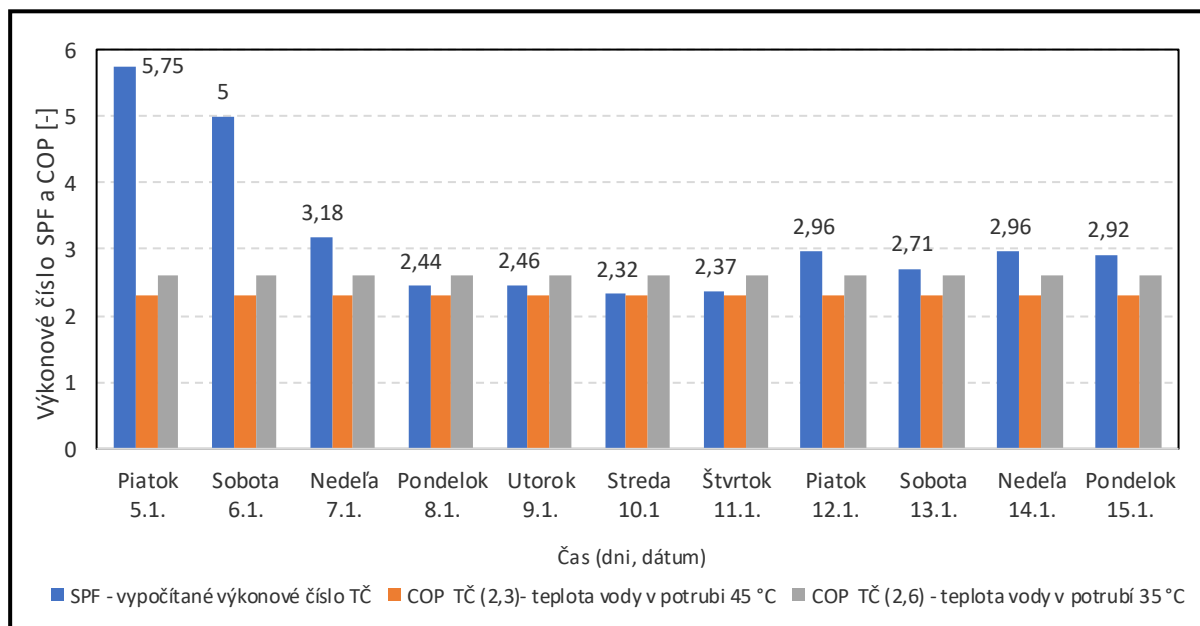
Z obr.5 je možné odčítať hodnotu tohto výkonového čísla COP deklarované výrobcom NIBE s. r. o.



Obr. 5 Výkonové číslo TČ F2040-6 pri rôznych výstupných teplotách teplonosnej pracovnej látky [3]



Túto hodnotu je možné odčítať z obr. 5 ako priesečník príslušnej teploty vonkajšieho vzduchu a príslušnej krivky zodpovedajúcej teplote teplotnosnej pracovnej látky v prívodnom potrubí. Počas meraného obdobia priemerná vonkajšia teplota vzduchu predstavovala hodnotu - 0,67 °C. Priemerná teplota teplotnosnej pracovnej látky počas meraného obdobia predstavovala hodnotu 34,61 °C. Na základe vyššie uvedeného z obr. 4 je možné z krivky pre 35 °C teplotu teplotnosnej látky odčítať hodnotu 2,6 COP.



Obr. 5 Priebeh výkonových čísel SPF a COP tepelného čerpadla pri výstupných teplotách teplotnosnej pracovnej látky 45 °C a 35 °C

Na základe vyššie uvedeného vzťahu (3.1) sme vypočítali výkonové číslo SPF pre každý deň meraného obdobia samostatne. Vypočítali sme výkonové číslo SPF tepelného čerpadla v období od piatka 05.01.2024 12:00 hod do stredy 10.01.2024 do 9:00 hod, kedy bola ekvitermická krivka nastavená na č. 5, táto hodnota SPF predstavovala 2,89. Od stredy 10.01.2024 od 9:00 hod do pondelka 15.01.2024 do 12:00, kedy bola ekvitermická krivka nastavená na č. 7 hodnota SPF predstavovala 2,7. Za celé merané obdobia hodnota SPF predstavovala 2,77. Z uvedeného sa dá konštatovať, že hodnota COP 2,6 deklarovaná výrobcom zodpovedá vypočítanej hodnote SPF 2,77, dokonca ju mierne prevyšuje. Vypočítané hodnoty SPF sú znázornené modrými stĺpcami na obr. 5. Na grafe na obr. 5 je znázornená hodnota COP 2,3, ktorá je viditeľná oranžovými stĺpcami a ktorá zodpovedá teplote teplotnosnej látky 45 °C pri teplote vonkajšieho vzduchu - 0,67 °C. Na obr. č. 5 je taktiež vidieť hodnotu COP (2,3), ktorá je znázornená oranžovými stĺpcami a ktorá zodpovedá teplote teplotnosnej látky 45 °C pri teplote vonkajšieho vzduchu - 0,67 °C. Hodnota COP (2,6), ktorá je znázornená sivými stĺpcami a ktorá zodpovedá teplote teplotnosnej látky 35 °C pri teplote vonkajšieho vzduchu - 0,67 °C je taktiež vidieť na obr. 5.



4. ZÁVER

Využívanie obnoviteľných zdrojov energie v našom prípade vonkajšieho vzduchu prostredníctvom tepelného čerpadla a aplikácia veľkoplošných nízkotepelných veľkoplošných sálavých odovzdávacích systémoch je cesta k náhrade tradičných fosílnych energetických zdrojov ako je napr. zemný plyn. Súčasne sa zníži tvorba skleníkových plynov a využívajú sa OZE na zabezpečenie tepelnej pohody vo vnútornom životnom prostredí.

Záverom tohto príspevku by sa dalo konštatovať, že tepelné čerpadlo ako zdroj tepla i chladu je vhodné kombinovať s nízkotepelnými veľkoplošnými sálavými systémami, vzhľadom na vypočítané hodnoty SPF, ktoré sú veľmi podobné s deklarovými hodnotami COP výrobcom. Ďalším pozitívnym zistením je, že nízkotepelné veľkoplošné sálavé systémy sú prevádzkované vo vykurovacom režime spoľahlivo čoho dôkazom je fakt, že tepelné čerpadlo v spolupráci s ekvitermickou reguláciou riadiacej jednotky SMO 20 pomerne pružne reaguje na zmenu vonkajšej teploty a dodáva požadovanú teplotu teplotonosnej pracovnej látky do prívodného potrubia systému. Záverom tohto príspevku na základe nameraných údajov s potrebe elektrickej energie tepelným čerpadlom a vypočítaných hodnôt SPF je možné konštatovať, že tepelné čerpadlo predstavuje vhodnú alternatívu zdroja tepla/chladu, využívajúci energiu okolitého prostredia (OZE) a je vhodné ho kombinovať s využitím nízkotepelných veľkoplošných sálavých systémov.

V budúcnosti by bolo vhodné toto meranie zopakovať pre dlhšie časové obdobie ale nielen v režime vykurovania ale i chladenia. Zaujímavé by bolo zistiť či hodnoty SPF budú také priaznivé i v letnom období.

Podakovanie

Tento výskum podporila Slovenská agentúra pre výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-21-0144. Ďakujeme spoločnostiam NIBE s. r. o., UPONOR, s.r.o., PAVJAN, s.r.o., EPITREND, s.r.o., SAMDO, s.r.o. a spoločnosti FLEXIM, s.r.o. za podporu.

Literatúra

- [1] STN EN 15316 4-2 Vykurovacie sústavy v budovách. Metóda výpočtu energetických požiadaviek systému a účinnosti systému. Časť 4-2: Priestorové systémy výroby tepla, systémy tepelného čerpadla. 2017.
- [2] STN EN 378-1 Chladiace systémy a tepelné čerpadlá. Požiadavky na bezpečnosť a ochranu životného prostredia. Časť 1: Základné požiadavky, definície, klasifikácia a kritériá výberu. 2019.
- [3] STN EN 14825 Klimatizačné jednotky, jednotky na chladenie kvapalín a tepelné čerpadlá s elektricky poháňanými kompresormi na vykurovanie a chladenie. Skúšanie a hodnotenie pri podmienkach čiastočnej záťaže a výpočet sezónnej účinnosti, 2014.
- [4] STN EN 15450 Vykurovacie systémy v budovách. Navrhovanie vykurovacích systémov s tepelnými čerpadlami, 2007.
- [5] PETRÁŠ D. A KOLEKTÍV, *Obnoviteľné zdroje energie pre nízkotepelné systémy*, 1.vyd. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2009. ISBN 978-80-8076-075-5.
- [6] Podklady firmy NIBE – zdroj www.nibe.sk