

PRLJANJE VAZDUŠNIH KONDENZATORA

U radu se daje pregled mehanizma prljanja i efekata na rad izmennivača toplote cev-saće u HVAC sistemima. Prljanje degradira performanse izmenjivača tako što smanjuje koeficijent prenosa toplote i povećava pad pritiska sa vazdušne strane izmenjivača. Prljanje sa vazdušne strane zavisi od niza faktora: koncentracije materije koja prlja, veličine delove u njoj i brzine vazduha. Pored toga zavisi i od izgleda izmenjivača tj geometrije tela i saća i razmaka rebara saća. Mnoge studije potvrđuju da je efekat prljanja na pad pritiska veći od degradacije koeficijenta prenosa toplote. Radovi takođe ukazuju da stvarni efekti prljanja izmenjivača na efikasnost sistema dodatno zavise od toga koji se freon koristi.

HVAC sistemi se mnogo koriste u raznim oblastima. Zbog prasta tražnje za vodom i u kući i industriji raste zanimanje za sisteme hlađene vazduhom kao alternativa vodenom hlađenju. Takođe, na mestima gde se ne može obezbediti voda za hlađenje kondenzatora vazdušni sistem ostaje jedina opcija. Zbog toga je važno analizirati fenomen prljanja ovih sistema.

Prljanje se može definisati kao nagomilavanje i rast čestica na površini izmenjivača koji vodi smanjenju njegovih performansi u uslovima u kojima je projektovan da radi. Prljanje znači smanjenje prenosa toplote jer je tetmička provodnost prljavština obično manja u poređenju sa materijalom površine izmenjivača (Cu ili Al). Zbog toga se taj sloj ponaša kao otpor prenosu toplote što znači degradaciju performansi izmenjivača. Prljavština na površini pored toga je i prepreka kretanju vazduha što vodi rastu pritiska, manjem protoku vazduha, tj indirektno se obara prenos toplote. Uz to, veći pad pritiska povećava snagu ventilatora, čime se dodatno smanjuje energetska efikasnost celog sistema.

Awad (2011) generalno proučavao prljanje površina koje prenose toplotu. Pronašao je da u prljavštini može da bude neorganskih materijala kao što su prašina iz vazduha, pesak i kamen, kao i organskih materijala sa biološkim substancama i elementarnim ugljenikom. Prljanje zavisi i od projekta i procesa u kome se izmenjivač koristi.

Sprovedeni su brojni projekti po pitanju uticaja prljanja na performanse izmenjivača u različitim aplikacijama. *Haghighi-Khoshkhoo & McCluskey* (2007) proučavali su prljanje izmenjivača sa vazdušne strane kod industrijskih vozila. *Marner* (1990) je posmatrao gasnu stranu u vezi prljanja izmenjivača uzrokovanu nečistim strujanjem fluida u primenama povrata energije i kotlova. *Cremaschi et al.* (2012) su proučavali uticaj prljanja sa vodene strane na performanse pločastih izmenjivača u erkondišn primenama.

Prljanje se dešava i na kondenzatoru i na isparivaču kod sistema vazduh-vazduh. U svojoj prirodi varira od tekstilnih vlakana i gljivičnih jedinjenja do prašine iz vazduha čestičastih materijala (*Qureshi & Zubair*, 2012). Mnoge studije prljanja tiču se HVAC aplikacija, i odnose se na kondenzator, na isparivač ili na oba. *Ali & Ismail* (2008) proučavali su isparivačku a *Pak et al.* (2005) su analizirali prljanje kondenzatorske strane. *Qureshi & Zubair* (2011) su proučavali performanse sistema u tri slučajas: prljanje samo isparivača, prljanje samo kondenzatora i kombinovano prljanje oba izmenjivača toplote.

U literaturi su korišćene različite materije da bi se ispitali efekti prljanja na HVAC sisteme na kućne, poslovne i industrijske primene.

Fenomen prljanja

U struji gasa mogu se desiti različiti fenomeni prljanja što zavisi od same materije koja prlja ali i od geometrije izmenjivača. Po Awad (2011), fenomeni se mogu podeliti na:

- *Prljanje česticama*, dešava se zbog akumulacije čestica koje postoje u struji fluida na izmenjivaču. Po Ahn et al. (2003) ovo prljanje se može podeliti dalje na turbulentnu difuziju, Brownovu difuziju, gravitaciono sleganje, inercijalni udar, termoforezu i elektroforezu.
- *Prljanje sleganjem čestica iz rastvora (precipitate fouling)*, dešava se zbog rastvorenih soli u zasićenom rastvoru. Kristalizacija ovih zasićenih soli zbog promene temperature dovodi do ovog prljanja.
- *Prljanje zbog hemijske reakcije*, čestica koje postoje u struji vazduha. Površina izmenjivača radi kao katalizator.
- *Koroziono prljanje*, nastaje elektrohemijskom reakcijom između površine izmenjivača i struje vazduha (fluida). Za razliku od drugih vrsta prljanja korozija će dovesti do trajnog oštećenja izmenjivača.
- *Biloško prljanje*, dešava se zbog prisustva biloške materije u struji vazduha koja se lepi na površinu izmenjivača i omogućava mikroorganizmima da rastu.
- *Zamrzavanje*, je prljanje zbog stvaranja čvrstog sloja na površini izmenjivača u obliku leda.

Kod vazduhom hlađenih izmenjivača u HVAC aplikacijama. Glavna prljanja su od strane čestica, biloško prljanje i zamrzavanje (Siegel & Nazaroff, 2003). Generalno je prljanje proizvod dva fenomena koji se dešavaju u isto vreme, Slika 1: proces sleganja i proces uklanjanja, čiji neto efekat opisuje faktor prljanja, koji je razlika $\Phi_d - \Phi_r$ (Awad, 2011).

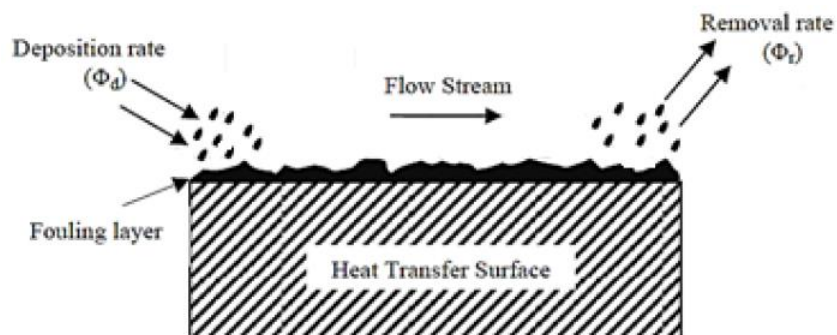


Figure 1: Fouling Process (Awad, 2011)

Siegel & Nazaroff (2003) razvili su model po kome se čestice slažu na površini izmenjivača. Oni su analizirali tri glavne promenljive: veličinu čestice, brzinu vazduha i razmak rebara na saću. Uveli su termin delimično sleganje (*deposition fraction*) koji predstavlja verovatnoću da će se čestica složiti na površinu izmenjivača. Analizirali su razmak rebara saća, prečnik cevi i broj redova cevi. Pošto je prljanje česticama funkcija veličine materije čestice, un eksperimentu su korišćene monodisperzovane uljne čestice različitih veličina. Prethodna istraživanja su se bavila uglavnom česticama veličine od 10 do 100 μm . Međutim, oni su opazili da se male čestice (0.01-

1 μm) pojavljuju u većim koncentracijama u unutrašnjem vazduhu, a veće čestice (10-100 μm) u unutrašnjoj prašini. Zaključili su da se stvaranje naslaga dešava uglavnom na udarnim krajevima daća i cevi, gravitaciono sleganje na korugacijama saća, a na zidovima saća zbog turbulentnog kretanja i naslaga zbog Brownovog kretanja. Različiti mehanizmi sleganja se kombinuju, i uz pretpostavke da nema međuzavisnosti, dobija se ukupno delimično sleganje η :

$$\eta = 1 - P_{\text{fin}} \cdot P_{\text{tube}} \cdot P_{\text{G}} \cdot P_{\text{T}} \cdot P_{\text{D}},$$

P_{fin} = Frakcija od čestica, gubici zbog udara na krajeve saća,

P_{tube} = Frakcija čestica, gubici zbog naslage na površini cevi,

P_{G} = Penetraciona frakcija predstavlja gubitke zbog gravitacionog sleganja,

P_{T} = Penetraciona frakcija odgovorna za gubitke zbog naslaga usled turbulencije, i

P_{D} = Frakcija čestica koje predstavljaju gubitke zbog Brownovog kretanja.

Pretpostavka da su mehanizmi nezavisni jedan od drugog opravdana je time što se različite veličine čestica ne nimalo ne preklapaju. Nalazi govore da je sleganje čestica jako zavisno od njihove veličine a slabo zavisno od brzine vazduha i razmaka u saću. Najmanje čestice (0.01-1 μm) najviše se slažu Braunovom difuzijom. Čestice 1-10 μm se slažu udarom na ivice saća a one veće od 10 μm se slažu turbulencijom vazduha, udarom od cevi i gravitaciono. Za dati razmak na saću, pri većim brzinama, udar u cevi je dominantan fenomen a za manje brzine to je sleganje na površini saća. Između veličine čestica i ukupne složene mase postoji direktna srazmera. Takođe sa rastom brzine vazduha raste inerciona depozicija dok opada Brownova difuzija i gravitaciono sleganje. Kada je razmak u saću u pitanju, opaženo je da veći razmak vodi povećanju naslaga po svim mehanizmima osim odarom u cevi.

Bioprljanje

Ovde se nalaze dve vrste istraživanja: sleganje prašine iz vazduha i bioprljanje. Biološko prljanje dešava se zbog prisustva materija biološkog porekla u vazduhu i mikroorganizama koji rastu na složenom materijalu u dugotrajnom prisustvu vode na površini izmenjivača.

Ove efekte proučavao je *Pu et al.* (2009). Analizirali su izmenjivače sa Al saćem u obliku krljušti haringe sa hidrofiličnim premazom i bakarnim cevima. Gljiva (*Aspergillus niger*) je bio materijal koji raste na površi izmenjivača toplote. Ona je izabrana jer brzo raste u tim uslovima. Slika 2 pokazuje izmenjivače sa raznim veličinama bioprljanja.

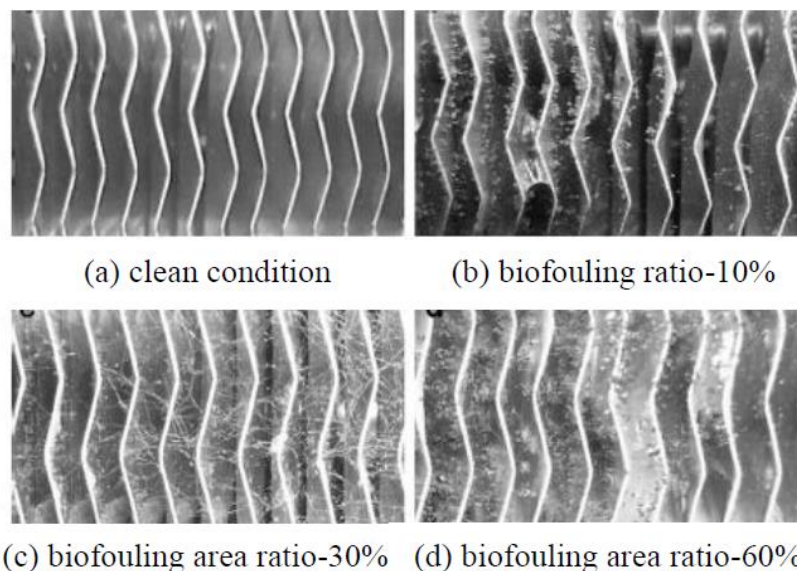


Figure 2: Heat exchangers during biofouling test with *Aspergillus niger* (Pu *et al.* 2009)

Pu *et al.* (2009) su utvrdili da bioprljanje od 60% (odnos gljiva/bočna strana saća) povećava pad pritiska sa vazdušne strane za 21.8 % i 43.1 % respektivno za brzine vazduha 0.5 m/s i 2 m/s. Za brzinu vazduha od 2 m/s, koeficijent prenosa toplote opada 7.2% i 15.9 % za bio zaprljanu zonu od 10% i 60 % respektivno. Zbog turbulencije vazduha, prenos toplote je bio povećan za niska bioprljanja. Bioprljanje uzrokuje propadanje hidrofilične presvlake na izmenjivaču. Kao rezultat toga, kondenzovana voda ostaje na površini izmenjivača, što pospešuje rast gljiva.

Prljanje naslagama prašine iz vazduha

Razni istraživači bavili su se prljanjem zbog prašine za razne vrste izmenjivača sa različitim geometrijama, brzinama strujanja vazduha i količinom prašine, Tabela 1.

Table 1: Heat exchanger type and dust used by different researchers

| Source | Heat exchanger type | Dust type | Amount of injected dust | Heat exchanger face area |
|---------------------------|--------------------------|---|--|--------------------------|
| Ali & Ismail (2008) | Plate fin-and-tube | From used field installed evaporators | 300 g | 0.048 m ² |
| Ahn <i>et al.</i> (2003) | Fin and tube | Heat exchanger samples from field | Not applicable since field units were tested | No information given |
| Bell & Groll (2010) | Microchannel & Plate fin | ASHRAE standard dust & Arizona road test dust | 300 g | 0.2 m ² |
| Yang <i>et al.</i> (2007) | Wavy fin and Lanced fin | No dust (Strip of paper to simulate fouling) | Not Applicable | 0.372 m ² |
| Pak <i>et al.</i> (2003) | Plate fin and Spine fin | ASHRAE standard dust | 300 g | No information given |
| Qureshi & Zubair (2011) | Plate fin | Not applicable (model developed using EES) | Not applicable | No information given |

Prljanje izmenjivača sa vazdušne strane zavisi od dosta faktora i od samog izmenjivača i od vazduha. U HVAC sistemima, saće i cev i cevni izmenjivači se mnogo upotrebljavaju u svim

primenama. Zbog toga se ovaj rad fokusira uglavnom na izmenjivače tipa saće-cev, kod kojih prljanje zavisi od sledećih faktora:

- i. Vrste saća,
- ii. Broja redova cevi,
- iii. Vrste izmenjivača toplote,
- iv. Razmaka u saću,
- v. Vrste freona, i
- vi. Filtera, ako postoje.

Cowell & Cross (1980) su ispitujući industrijska vozila ustanovili da se prašina skuplja na frontalnoj strani izmenjivača, i da je mnogo ozbiljnije prljanje tu nego sa leđa. Isto se dobija i kod HVAC sistema, e.g. by *Pak et al.* (2005) i *Ali & Ismail* (2008). Kod lica prašina se akumulira na udarnim ivicama saća, Slika 3.

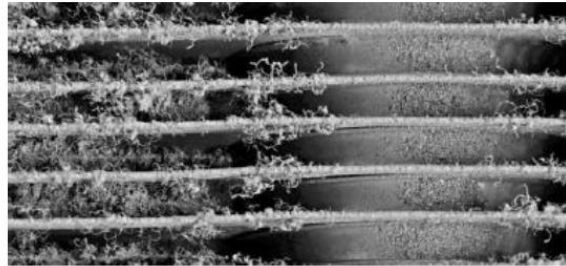


Figure 3: Front face of coil fouled with 600g of injected dust. (*Bell et al.*, 2011)

Pak et al. (2005) su istraživali performanse izmenjivača na bazi broja cevi. Njihov nalaz je da se od ukupno ubačene prašine na jednoređnim izmenjivačima akumulira 30-50%, a kod dvoređnih bilo je 60-67%. Međutim, opazili su da je pad pritiska bio skoro isti za jednorede i dvorede sisteme jer se prljavština skuplja na udarnim ivicama pa je blokiranje slično u obe varijante. Međutim, prenos toplote pre i posle prljanja bio je bolji kod dvoređog kondenzatora jer on ima veću dubinu nego jednoređi.

Bell & Groll (2010) su proučavali izmenjivače tipa saće-cev i mikrokanalne. U istim uslovima prljanja eksperimenti su pokazali da mnogo više trpe performanse mikrokanalnih izmenjivača.

Qureshi & Zubair (2011) su koristili simulaciju da utvrde uticaj prljanja na efikasnost sistema za razne vrste freona. Posmatrali su freone R134a, R407C, i R410A u jednoj grupi (temperatura isparavanja 0°C), i R717, R404A, i R290 (temperatura isparavanja -25°C). Simulacije su brađene za tri varijante: Prlja se samo kondenzator, prlja se samo isparivač i prljaju se oba u isto vreme. COP je bio niži kada se prlja samo kondenzator nego kada se prlja samo isparivač. Razlog je veća snaga kompresora u toj varijanti. Kad se prlja samo isparivač, kapacitet rashlade opada ali se smanjuje i zahtev snage za kompresor što vodi ka manjem opadanju za COP1. U kombinovanoj varijanti, snaga kompresora je između prve dve varijante prljanja. Međutim, COP je bio niži nego u prvih dva slučaja zbog efekta prljanja i kondenzatora i isparivača i pada kapaciteta. U prvoj grupi freona, po analizi prvog zakona, najbolji je bio R134a osim u varijanti kad se prlja samo isparivač, dok je po drugom zakonu radne tačke najbolji R134a u svim slučajevima. Slično ponašanje u drugoj grupi pokazuje freon R717.

Yang et al. (2007) analizirao je efikasnost hlađenja kompaktne jedinice erkondišna sa filterima ali raznim efikasnostima, e.g. minimalna je bila (MERV) 4 do MERV 14. Zaključak je bio da EER sistema i u čistom i u prljavom stanju ima znatno manju efikasnost zbog visoko efikasnih filtera koji povećavaju pad pritiska na vazdušnoj strani. Pad EER je zbog filtera veći kod većih jedinica. Međutim, dobija se bolji kvalitet vazduha ako se koristi filter. Oličina prašine koja prolazi kroz sistem sa filterom MERV 4 je 30 puta veća nego kroz filter MERV 14.

Siegel et al. (2002) proučavali su kućne isparivače pomoću modela prljanja za izmenjivače saće-
cev. Vreme prljanja bilo je funkcija efikasnosti filtera i koncentracija unutar prostora. Oni su izračunali funkciju raspodelu koncentracije mase m_c , koja opisuje količinu prljavštine koja se nasloži na površi izmenjivača u funkciji prečnika čestice. To se može računati kao deo materijala prljanja koji se uklanja filterom i količine nataložene u povratnom kanalu, kao:

$$m_c = P_d (1 - \eta_f + \eta_f b_f) \cdot \eta_c \cdot (1 - b_c) \cdot m_{in}$$

Gde se P_d , deo čestica koji se ne uklanja taloženjem u kanalu sračunat po Sippola & Nazaroff (2002), η_f je efikasnost filtera po ASHRAE standardu 52.2, b_f je filterski bypass koji se računa po osećaju i analizi prljanja, η_c je deo naslaga na izmenjivaču i računa se po Siegel & Nazaroff (2002), i m_{in} , funkcija raspodele unutrašnjih čestica koka se računa upotrebom funkcije Riley et al. (2002), Schneider (1986), i Thatcher & Layton (1995).

Vreme prljanja, τ_{foul} je vreme potrebno da se udupla pad pritiska na izmenjivaču toplote za dati protok vazduha, i računa se kao:

$$\tau_{foul} = \frac{M_{foul}}{Q M_c DC}$$

Gde je M_{foul} nataožena masa koja uzrokuje dupli pad pritiska i određuje se merenjem, Q je protok vazduha kroz sistem, DC je vrsta rada (*duty cycle*) ventilatora za obradu vazduha, a M_c je ukupna raspodela mase koja se taloži na izmenjivaču i računa se kao:

$$M_c = \int_{d_p} m_c dd_p,$$

d_p je prečnik čestice i ide 0.01-100 μm . Tabela 2 daje procenjene odnose vremena prljanja za konkretan slučaj u odnosu na bazni slučaj. U Tabeli 2, GM je geometrijska sredina a GSD je geometrijska standardna devijacija.

Siegel et al. (2002) su otkrili da je vreme prljanja za bazni slučaj 7.6 godina. To se može posmatrati iz te tabele kroz promene filtera od MERV 2 do MERV 12 gde se vreme prljanja produžava 7 puta. Međutim, otkriveno je da to vreme zavisi od interakcije filterske efikasnosti i filterskog bypassa zbog lošeg dizajna filterskog kućišta. Upotrebom visoko efikasnog filtera sa povećanim by-passom vodi ka taloženju čestica na izmenjivačima koje je veće nego što bi trebalo biti po MERV normama.

Table 2: Fouling time ratios (Siegel *et al.* 2002)

| Variable | Base Case | Going to | Fouling Time Ratio | | |
|----------------------|------------|------------|--------------------|------|------|
| | | | Median | GM | GSD |
| Filter Efficiency | MERV 2 | MERV 6 | 1.39 | 1.39 | 1.08 |
| | | MERV 12 | 10.04 | 6.89 | 2.79 |
| Indoor Concentration | Urban | Rural | 0.43 | 0.45 | 1.23 |
| | Cycling | CA | 0.31 | 0.30 | 1.09 |
| | Dirty | Clean | 1.85 | 1.70 | 1.45 |
| Coil Efficiency | 4.7 fin/cm | 2.4 fin/cm | 1.82 | 1.90 | 1.11 |
| | | 7.1 fin/cm | 0.71 | 0.70 | 1.05 |
| Filter Bypass | 10% | None | 1.81 | 1.12 | 2.26 |
| | | 25% | 0.73 | 0.86 | 1.38 |
| Duct Penetration | Typical | Simple | 0.99 | 0.99 | 1.01 |
| | | Complex | 1.02 | 1.02 | 1.01 |

Sa strane vazduha, prljanje prašinom zvisi od:

- (1) Vrste prašine ili materijala za prljanje koji se koriste
- (2) Protoka vazduha

Bell & Groll (2010) ispitivali su performanse izmenjivača tipa saće-cevi mikrokanalnog koristeći dve vrste prašine: standardnu ASHRAE prašinu i A2 Arizona drumski test prašine. ASHRAE standard za prašinu rađen je po ASHRAE standardu 52.1, koji u masi sadrži 72 % A2 fine Arizona test prašine, 23% crnog ugljeničnog praha i 5% pamučnih vlakana. A2 Arizona drumski test prašine koristio se da se shvati prljanje u uslovima sa malo vlajnostog materijala.

Iz Slike 4, može se videti da standardni test prašine po ASHRAE pokriva lice izmenjivača. Ovo je zbog vlakana u testu. Međutim, u Arizona drumskom testu prašine, naslaga je po potpunom izmenjivaču i lice nije blokirano. Rezultat je veći pad pritiska u ASHRAE standardnom testu. Međutim, u Arizona testu prenos toplote je više smanjen zbog niske termičke provodnosti – pokriven je veći deo površine saća. Takođe, ASHRAE test prašine ima i 23 % ugljenika koji je bolji provodnik toplote u poređenju sa silicijum oksidom koji čini Arizona drumsku prašinu. Zbog toga je prenos toplote u ASHRAE testu bolji.

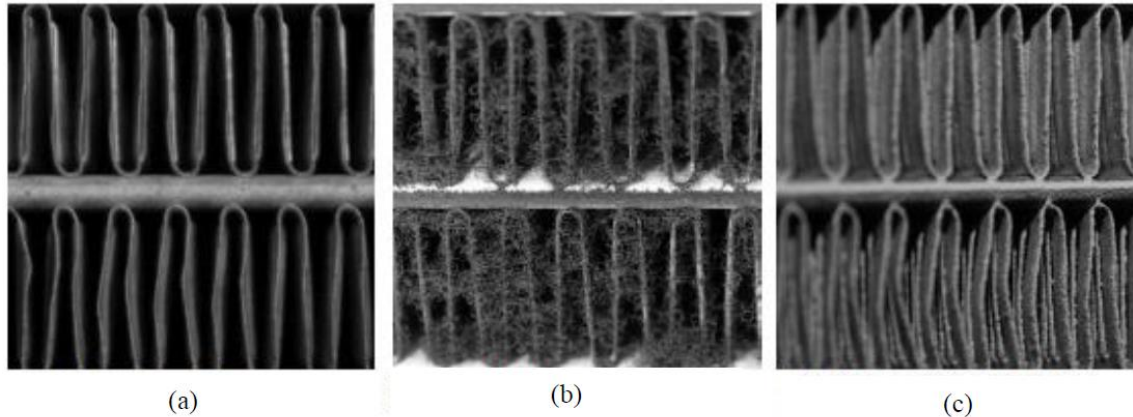


Figure 4: Heat exchanger (a) clean condition (b) fouled with 135g of ASHRAE test dust (c) fouled with 500g of Arizona Road test dust (Bell & Groll, 2010)

Ali & Ismail (2008) iskoristili su prljavštinu sakupljenu sa kondenzatora i stavili je u aplikaciju. Koristili su analizu sitom da odrede da čestice imaju veličinu od 0.01 do 200 μm . Posle upotrebe ovog materijala za test prljanje, ustanovili su da vlaknasti i ne-prašinski materijali bivaju privučeni na saćau prednjem delu zbog prisustva kondenzovane vode. Posle ubacivanja 100 g materijala za prljanje, COP se smanjio na 67%, posle 200 g na 63.4%, i posle 300 g na 43.6%. Brzina vazduha bila je ista 1.53 m/s.

Brzina prljanja jako zavisi od brzine vazduha. Rast brzine vazduha povećava termičke performanse izmenjivača i smanjuje brzinu prljanja. *Ali & Ismail (2008)* su analizirali COP u funkciji brzine u čistim i prljavim uslovima. COP je rastao kako raste brzina vazduha u obe varijante zbog rasta koeficijenta prenosa toplote. Međutim, u slučaju zaprljanog izmenjivača funkcija COP je manje zavisila od promene brzine.

Burmeister & Bortone (1995) otkrili su da je osetljivost pada pritiska na brzinu vazduha veća kod zaprljanih nego čistih izmenjivača toplote.

ZAKLJUČAK

U radu se daje pregled prljanja izmenjivača sa fokusom na erkondišn primene. Objasnjava se da prljanje izmenjivača zavisi od mnogo faktora i sa strane sistema i sa strane vazduha. Krajnji uticaj je umanjenje performansi izmenjivača toplote. Ovde se uključuje i degradacija prenosa toplote zbog taloženja na površi izmenjivača kao i zbog pada pritiska. Brojne studije ukazale su na razne vrste materijala koji prljaju, kao i da je prljanje ozbiljnije sa udarne-čone strane u poređenju sa izlaznom stranom. Uticaj prljanja preko pada pritiska za stalan protok vazduha veći je od pada prenosa toplote posebno u početnim fazama prljanja, i ako u vazduhu ima vlaknastih materijala. Upotrebom visokoeffikasnih filterapre isparivača daje porast vremena prljanja ali pada EER sistema zbog rasta ukupnog pada pritiska sa vazdušne cstrane. Porast brzine strujanja vazduha povećava COP sistema i u slučaju čistog i u slučaju prljavog izmenjivača, međutim, rast COP sa rastom brzine vazduha nije toliko značajan u slučaju prljavog koliko čistog izmenjivača.