

## PERFORMANSI ALAT PENUKAR KALOR UDARA-TANAH YANG MENGGUNAKAN SIKLUS TERBUKA DI KOTA MEDAN

**Terang U.H.S. Ginting Manik**

Lektor  
Universitas Sumatera Utara  
Departemen Teknik Mesin  
terang1@usu.ac.id

**Tulus B. Sitorus**

Lektor Kepala  
Universitas Sumatera Utara  
Departemen Teknik Mesin  
PUI Energi Berkelanjutan dan  
Biomaterial USU

*The purpose of this study was to obtain the performance of an EAHE (earth air heat exchanger) with weather conditions in the Medan city. The research method carried out was experimental in the field for several days with varying weather conditions. The air conditioning system using an Air-Earth Heat exchanger has tested its performance by comparing the experimental results with the model of equations that have been developed by the previous researchers. The incoming air velocity 2 m/s is obtained by the output temperature on average for the results experiment with 27.1°C and for theoretical results of 26.5°C with an average air temperature of 32.1°C. As for the incoming air velocity 3 m/s, the resulting output temperature averages for the experimental results of 27.3°C and for theoretical results of 26.9 °C with an average air temperature that is 33.8°C. The higher the air intake velocity, the higher the output temperature in the Air-Earth heat exchanger. At 2 m/s air velocity, the output temperature is 27.1°C and then rises to 27.3°C at air velocity enter 3 m/s. The effectiveness of the earth heat exchanger at the incoming air velocity 2 m/s for the experimental results was 0.84 while the theoretical calculation was 0.97. From the results of multiple regression analysis, it is found that the NTU and inlet air temperature values have a very strong relationship to the COP value. The correlation coefficient is 0.916 at a speed of 2 m/s and 0.959 at a speed of 3 m/s. The results show great potential for the development of ground-air heat exchangers as a passive cooling system building solution.*

**Keywords:** Earth - Air Heat Exchanger, Performance, Medan City.

### 1. PENDAHULUAN

Saat ini, konsumsi energi untuk bangunan mencapai 25-40% dari total konsumsi energi dunia, dimana sebagian besar energi dihabiskan untuk memanaskan ataupun mengkondisikan udara dan berasal dari bahan bakar fosil seperti batubara, minyak dan gas bumi [1]. Kebutuhan untuk pengembangan yang berkelanjutan mendorong manusia untuk mencari alternatif, energi terbarukan untuk mengkondisikan lingkungan dalam sebuah bangunan. Sekarang akibat meningkatnya kebutuhan terhadap udara yang nyaman, meningkatnya harga energi dan masalah lingkungan maka para peneliti berusaha untuk menemukan sebuah sistem berbasis energi terbarukan yang mampu menjawab tantangan tersebut [2, 3]. Salah satu solusi yang dapat dikembangkan adalah memanfaatkan energi yang tersimpan di dalam tanah (*earth energy*). Energi ini dapat dimanfaatkan sebagai ventilasi maupun sistem pengkondisian udara dengan menggunakan alat yang disebut penukar kalor antara udara-tanah atau EAHE (*earth-air heat exchanger*). Sebuah alat penukar kalor udara-tanah terdiri dari satu atau lebih pipa yang diletakkan dibawah tanah untuk mensuplai pengkondisian udara pada bangunan [4, 5]. Fenomena yang terjadi cukup simpel dan bergantung pada perbedaan temperatur antara tanah dengan udara lingkungan. Udara lingkungan dialirkan ke dalam pipa yang ditanam di bawah tanah menggunakan blower dan mengalami perpindahan panas langsung dengan tanah. Upaya pengembangan metode sistem perpindahan panas pada lapisan tanah ini selain untuk pendinginan ruangan yang berbiaya murah juga diharapkan dapat memperbaiki lingkungan dengan mengurangi kadar CFC (*Chloro-Fluoro-Carbon*) dalam udara yang banyak digunakan mesin-mesin pendingin ruangan [6, 7].

Menurut [8] bahwa tanah dengan konduktivitas termal tinggi, massa jenis tinggi dan kapasitas kalor yang tinggi sesuai digunakan pada sistem penukar kalor udara-tanah. Tanah yang basah memiliki transfer panas yang lebih baik dibandingkan tanah kering. Kecepatan aliran udara yang tinggi juga akan menurunkan performansi dari sistem. Ketika kecepatan meningkat maka temperatur keluaran dari sistem akan semakin meningkat. Peningkatan laju aliran akan meningkatkan penurunan tekanan udara dan kebutuhan energi yang besar pada kipas/blower. Laju aliran yang tinggi lebih cocok digunakan pada sistem siklus tertutup. Sedangkan untuk sistem terbuka maka perlu terlebih dahulu harus dipertimbangkan kapasitas pendinginan total. Material pipa harus dipilih berdasarkan pertimbangan harga, kekuatan, ketahanan terhadap korosi dan durabilitas. Namun, perbedaan material pipa tidak terlalu berpengaruh pada performansi sebuah sistem penukar kalor udara-tanah [9]. Jarak antara pipa harus diatur cukup agar masing-masing pipa tidak saling mempengaruhi. Lokasi dengan cuaca yang panas dan kering sangat cocok dalam pengaplikasian sistem penukar kalor udara-tanah. Tingkat kedalaman tanah akan mempengaruhi gradien temperatur dan juga laju perpindahan panas. Untuk berbagai aplikasi, kedalaman 2 m hingga 3 m di bawah permukaan tanah dianggap cukup sesuai untuk pipa paralel. Sistem ini dapat menggunakan konfigurasi satu pipa maupun menggunakan konfigurasi pipa paralel. Sistem konfigurasi pipa tunggal tidak akan memenuhi standar pendinginan sebuah gedung karena akan membutuhkan pipa dengan diameter yang cukup besar. Sistem pipa paralel merupakan pilihan desain yang lebih sesuai dan menurunkan nilai *pressure drop* serta meningkatkan performansi alat penukar kalor. Pada alat penukar kalor udara-tanah, medium yang digunakan untuk memindahkan panas adalah udara. Panas yang dilepaskan oleh aliran udara dan diserap ke dinding pipa secara konveksi dan dari dinding pipa ke massa tanah maupun sebaliknya secara konduksi. Bila kontak antara dinding pipa dengan tanah diasumsikan sempurna dan konduktivitas dari tanah cukup tinggi dibandingkan dengan resistansi permukaan maka temperatur dinding bagian dalam pipa dapat diasumsikan konstan. Nilai NTU bergantung pada konfigurasi jenis aliran dari sistem alat penukar kalor udara-tanah yang digunakan [10, 11]. Pada penelitian ini, tipe aliran yang digunakan adalah *single stream*. Besarnya nilai perpindahan panas dari alat penukar kalor udara-tanah dapat ditentukan dari persamaan:

$$Q_h = h A \Delta T_{lm} \tag{1}$$

dimana  $h$  adalah koefisien perpindahan panas ( $Wm^2/K$ ),  $A$  adalah luas permukaan dinding pipa bagian dalam ( $m^2$ ) dan  $\Delta T_{lm}$  adalah perbedaan temperatur logaritmik rata-rata.

Nilai dari NTU alat penukar kalor udara-tanah dapat ditentukan dari persamaan [5]:

$$NTU = \frac{h A}{\dot{m} c_p} \tag{2}$$

dimana  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa ( $kg/s$ ) dan  $c_p$  adalah nilai panas spesifik dari udara ( $J/kg-k$ ). Nilai efektivitas alat penukar kalor udara-tanah teoritis didapat dari fungsi hubungan [5]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \tag{3}$$

Untuk menentukan efektivitas alat penukar kalor hasil eksperimental diperoleh dari persamaan [5]:

$$\varepsilon = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{soil}} \tag{4}$$

dengan mensubstitusikan nilai untuk temperatur udara masuk dan temperatur udara keluar eksperimental serta temperatur tanah.

Nilai dari koefisien performansi dari alat penukar kalor udara-tanah dapat ditentukan dari persamaan [12]:

$$COP = \frac{Q_c}{P_f} \tag{5}$$

dimana  $P_f$  adalah energi yang diperlukan untuk menggerakkan *blower* pada penukar panas udara-tanah. Besarnya kapasitas pendinginan yang terjadi diperoleh dari persamaan:

$$Q_c = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \tag{6}$$

## 2. METODE DAN BAHAN

### 2.1. Metode

Alat penukar kalor udara-tanah yang dirakit menggunakan pipa PVC dengan diameter 10,16 mm dan

ketebalan 3 mm. Untuk mensirkulasikan udara digunakan *blower* yang diatur putarannya menggunakan inverter. Termokopel tipe K dengan akurasi  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  diletakkan pada sisi masuk dan sisi keluar serta pada beberapa titik sepanjang alat penukar kalor. Disamping itu termokopel diletakkan juga pada kedalaman 2 m di bawah permukaan tanah. Objek penelitian adalah udara lingkungan yang disirkulasikan ke dalam alat penukar kalor udara-tanah untuk didinginkan.

## 2.2. Skema Eksperimental

Proses pengujian dilakukan mulai dari pukul 10.00 WIB pagi dimana *blower* mulai mensirkulasikan udara ke dalam alat penukar kalor udara-tanah. Data akuisisi yang terhubung ke termokopel merekam temperatur pada sisi masuk dan sisi keluar sepanjang pipa alat penukar kalor udara-tanah serta temperatur tanah setiap menit. Untuk menghasilkan kecepatan udara masuk yang sesuai digunakan inverter motor listrik tiga fasa. Proses pengujian diakhiri pada pukul 18.00 WIB. Kemudian pengujian dilakukan keesokan harinya dengan prosedur yang sama. Pengujian dilakukan pada bulan Mei 2018 di kota Medan. Tabel 1 menampilkan spesifikasi dari sistem alat penukar kalor udara-tanah yang diuji.

**Tabel 1:** Spesifikasi alat penukar kalor udara-tanah

No	Data	Keterangan
1	Diameter pipa EAHE	$d = 0,1016 \text{ m}$
2	Panjang pipa EAHE	$L = 26,5 \text{ m}$
3	Kedalaman tanah	$Z = 2 \text{ m}$
4	Media yang didinginkan	udara
5	Jumlah blower	1 buah @ 2850 rpm



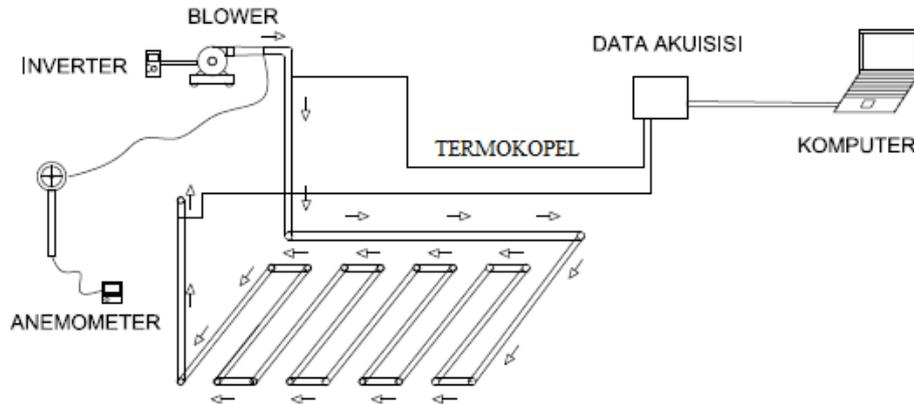
(a)



(b)

**Gambar 1:** (a) Lokasi dan (b) alat penukar kalor udara-tanah yang dirakit

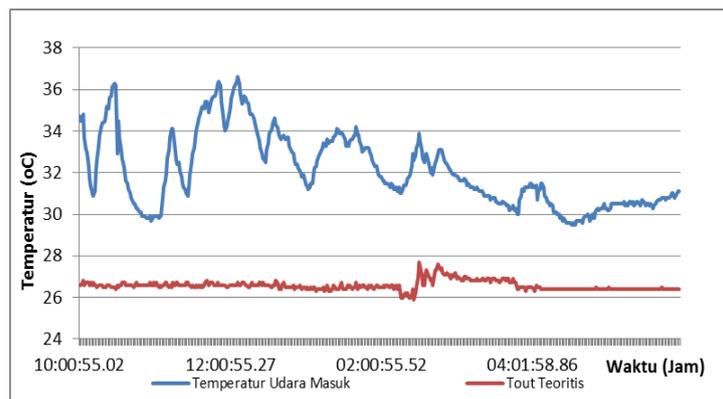
Gambar 1 menampilkan lokasi dan alat penukar kalor udara-tanah yang dirakit. Sedangkan gambar 2 menunjukkan skema eksperimental saat pengujian. Udara dialirkan ke dalam pipa menggunakan *blower* dengan kecepatan aliran udara masuk 2 m/s dan 3 m/s. Blower dihubungkan dengan inverter sehingga dapat diatur frekuensi putaran *blower* untuk menghasilkan kecepatan aliran udara yang diinginkan. Untuk mengetahui kecepatan udara yang dihasilkan maka digunakan alat ukur anemometer.



**Gambar 2:** Skema eksperimental

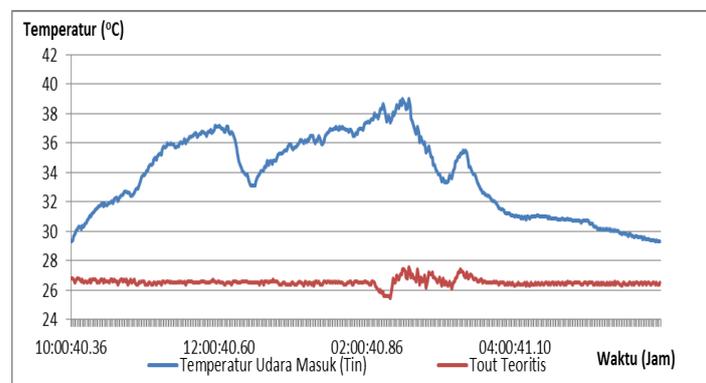
### 3. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 3 menampilkan kondisi temperatur keluaran udara teoritis untuk kecepatan udara 2 m/s pada pengujian hari pertama. Diperoleh temperatur masukan rata-rata sebesar 32,1°C dan temperatur keluaran rata-rata sebesar 26,6°C. Berdasarkan data hasil pengukuran diperoleh bahwa alat penukar kalor udara-tanah mampu menurunkan temperatur udara rata-rata sebesar 5,5°C.



**Gambar 3:** Temperatur keluaran teoritis untuk kecepatan udara 2 m/s

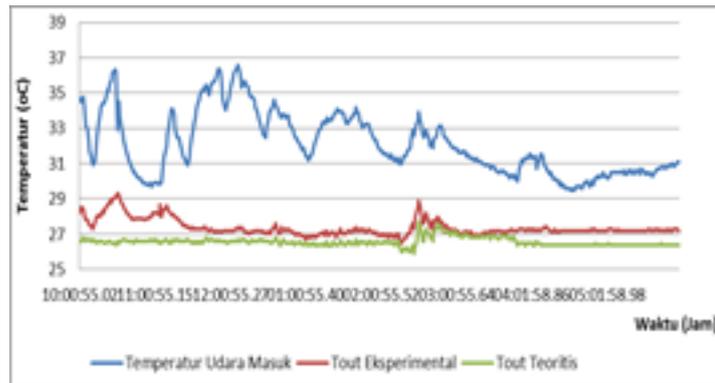
Gambar 4 menampilkan temperatur keluaran teoritis untuk kecepatan udara 3 m/s yang dilakukan pada pengujian hari kedua.



**Gambar 4:** Temperatur keluaran teoritis untuk kecepatan udara 3 m/s

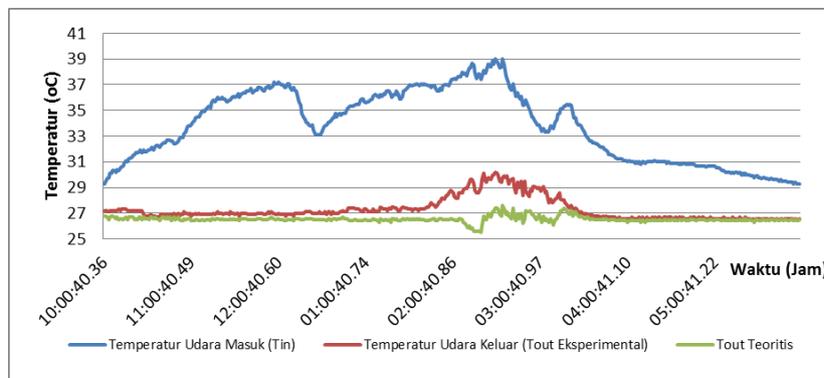
Sedangkan gambar 5 menampilkan perbandingan temperatur keluaran udara secara eksperimental dan teoritis untuk kecepatan udara 2 m/s. Selain itu ditampilkan juga grafik temperatur udara masuk alat penukar kalor

udara-tanah. Hal ini dimaksudkan untuk menampilkan kinerja dari alat penukar kalor udara-tanah yang diuji.



**Gambar 5:** Temperatur udara keluar eksperimental dan teoritis pada kecepatan udara 2 m/s

Gambar 6 menampilkan perbandingan temperatur keluaran udara teoritis dan eksperimental untuk kecepatan udara 3 m/s.



**Gambar 6:** Temperatur udara keluar eksperimental dengan teoritis untuk kecepatan udara 3 m/s

Dari gambar 5 dan 6 dapat diketahui nilai rata-rata temperatur keluaran baik untuk hasil teoritis maupun eksperimental seperti ditampilkan pada tabel 2.

**Tabel 2:** Perbandingan temperatur keluaran eksperimen dan teoritis

Kondisi	Kecepatan udara (m/s)	Tempertur udara masuk (°C)	Temperatur udara keluar (°C)		Galat (%)
			Eksperimental	Teoritis	
Rata-rata	2	32,1	27,1	26,5	1,86
Rata-rata	3	33,8	27,3	26,9	2,73

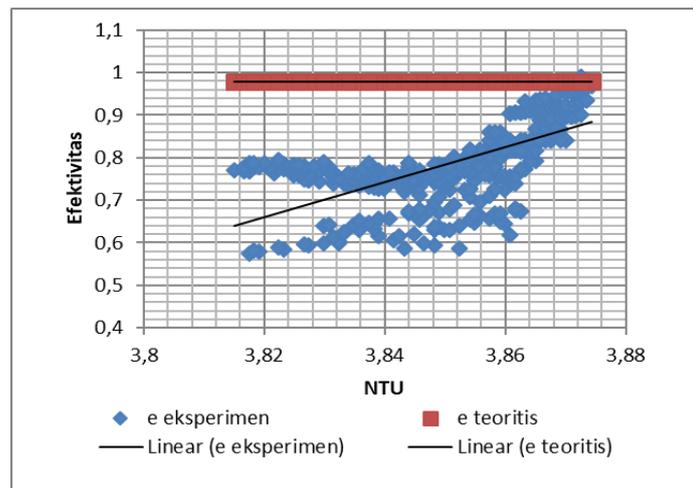
Dari tabel 2 diperoleh bahwa nilai galat temperatur keluaran rata-rata untuk pengujian eksperimental terhadap kondisi teoritis adalah 1,86% dan 2,73%. Temperatur udara keluaran rata-rata dari alat penukar kalor semakin meningkat seiring dengan semakin bertambahnya kecepatan udara masuk alat penukar kalor udara-tanah. Rata-rata temperatur keluaran secara eksperimental lebih tinggi dibandingkan rata-rata temperatur keluaran teoritis. Hal ini disebabkan nilai koefisien konveksi teoritis ternyata lebih besar dibandingkan dengan koefisien konveksi yang sebenarnya terjadi.

### 3.1. Efektivitas alat penukar kalor

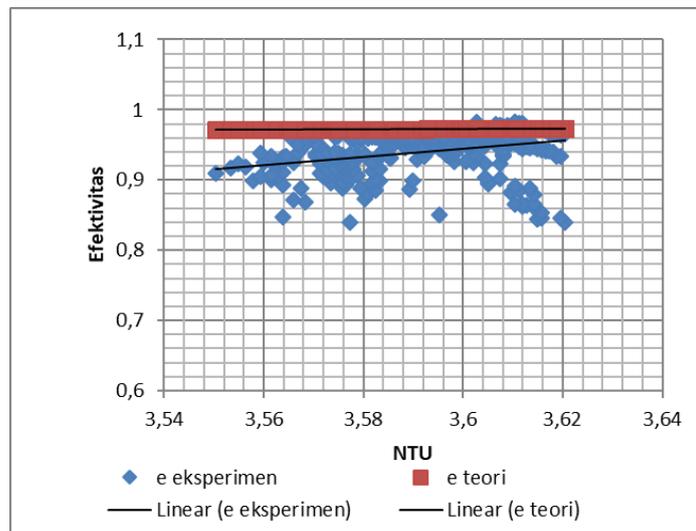
Gambar 7 dan 8 menampilkan perbandingan antara efektivitas alat penukar kalor yang diperoleh secara teoritis dan eksperimental. Efektivitas alat penukar kalor secara teoritis diperoleh dengan menggunakan data persamaan teoritis atau simulasi sedangkan efektivitas alat penukar kalor eksperimen diperoleh dari data-data hasil pengujian di lapangan. Hal inilah yang menyebabkan hasil yang diperoleh berbeda karena perhitungan teoritis umumnya menggunakan data asumsi.

Dari gambar 7 dan 8 dapat dikatakan bahwa nilai efektivitas alat penukar kalor teoritis akan semakin

meningkat seiring dengan semakin besarnya nilai NTU meskipun dengan gradien yang sangat kecil. Begitu juga dengan nilai efektivitas alat penukar kalor eksperimen yang menunjukkan kecenderungan semakin besar dengan bertambahnya nilai NTU. Hal ini disebabkan karena semakin besarnya nilai koefisien konveksi sehingga mempengaruhi nilai NTU. Terjadinya perbedaan yang lebih besar antara efektivitas teoritis dengan eksperimen pada bilangan NTU yang mendekati nol disebabkan pada saat temperatur udara masuk cukup tinggi maka temperatur udara keluaran eksperimental menjadi lebih rendah dibandingkan dengan temperatur keluaran teoritis. Hal ini disebabkan koefisien perpindahan panas yang terjadi sebenarnya jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan secara teoritis. Berdasarkan data hasil pengujian diperoleh bahwa besarnya efektivitas alat penukar kalor udara-tanah pada kecepatan udara masuk 2 m/s untuk hasil eksperimen adalah 0,84 dan efektivitas untuk perhitungan teoritis sebesar 0,97.



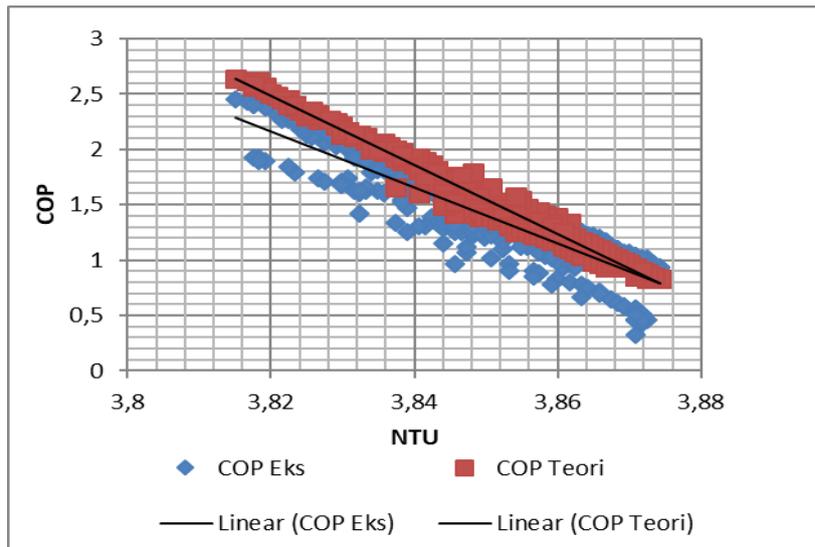
**Gambar 7:** Perbandingan efektivitas teoritis dan eksperimental untuk kecepatan 2 m/s



**Gambar 8:** Perbandingan efektivitas teoritis dengan eksperimental untuk kecepatan 3 m/s

Sebagai perbandingan performa dari alat penukar kalor yang diuji, bila dibandingkan dengan peneliti lain dengan kondisi cuaca yang tidak jauh berbeda maka tampak hasil pengujian yang dihasilkan tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Peneliti [1] mendapatkan temperatur keluaran rata-rata dari alat penukar kalor berkisar 26,4°C sedangkan hasil pengujian yang diperoleh berkisar 27,2°C. Nilai efektivitas rata-rata alat penukar kalor yang dihasilkan oleh peneliti [1] berkisar 0,8 sedangkan dari hasil pengujian diperoleh berkisar 0,78.

### 3.2 Koefisien Performansi

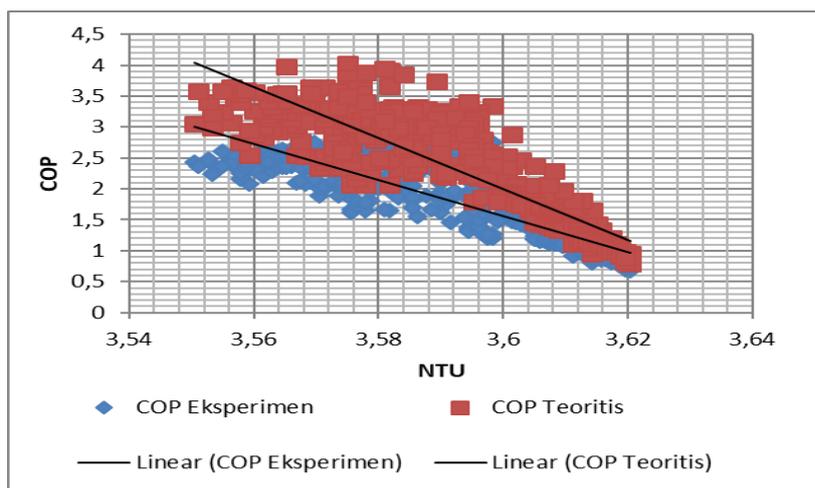


**Gambar 9:** Grafik NTU versus COP untuk kecepatan udara 2 m/s

Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa koefisien performansi atau COP dari alat penukar kalor-udara tanah semakin menurun bila bilangan NTU aliran udara dalam pipa semakin besar. Penurunan nilai COP disebabkan rendahnya temperatur udara masuk ke dalam alat penukar kalor. Bila temperatur udara semakin rendah, kapasitas kalor spesifik juga akan semakin kecil. Hal ini turut berpengaruh pada turunnya nilai kapasitas pendingin (*cooling capacity*) dari alat penukar kalor tersebut. Konsumsi daya yang digunakan semakin meningkat seiring peningkatan beban blower untuk menghasilkan kecepatan udara.

Hal ini harus dipahami bahwa nilai konsumsi daya yang digunakan setidaknya harus lebih kecil dari kapasitas pendingin yang dimiliki alat penukar kalor udara-tanah. Dari hasil kajian analisis regresi linier berganda mengenai hubungan variabel NTU dan temperatur udara masuk terhadap COP diperoleh bahwa pada kecepatan udara masuk 2 m/s diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,916. Menurut kondisi ini menunjukkan hubungan yang kuat antara NTU dan temperatur udara masuk terhadap nilai COP.

Sementara hubungan antara NTU dan temperatur udara masuk terhadap COP untuk kecepatan udara masuk 3 m/s diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,959. Berdasarkan analisa regresi dapat disimpulkan bahwa nilai NTU dan temperatur udara masuk memiliki pengaruh yang kuat terhadap nilai COP yang diperoleh.



**Gambar 10:** Grafik NTU versus COP untuk kecepatan udara 3 m/s

#### 4. KESIMPULAN

Alat penukar kalor udara-tanah siklus terbuka telah berhasil dirakit dan diuji kinerjanya. Berdasarkan hasil pengujian, kecepatan udara masuk 2 m/s diperoleh hasil temperatur keluaran sebesar 27,1°C dan untuk hasil teoritis sebesar 26,5°C untuk temperatur udara masuk rata-rata 32,1°C. Sementara untuk kecepatan udara

masuk 3 m/s diperoleh hasil temperatur keluaran rata-rata sebesar 27,3°C dan untuk teoritis adalah 26,9°C dengan temperatur udara masuk rata-rata 33,8°C. Semakin tinggi kecepatan udara masuk maka temperatur keluaran pada alat penukar kalor udara-tanah akan semakin tinggi pula. Untuk kecepatan udara masuk 2 m/s, temperatur keluaran bernilai 27,1°C kemudian naik menjadi 27,3°C pada kecepatan udara masuk 3 m/s. Efektivitas alat penukar kalor udara-tanah pada kecepatan udara masuk 2 m/s untuk hasil eksperimen diperoleh 0,84 sementara dari perhitungan teoritis sebesar 0,97. Korelasi secara analisis regresi berganda menunjukkan potensi yang besar untuk pengembangan alat penukar kalor udara-tanah sebagai suatu solusi sistem pendinginan pasif bangunan di kota Medan.

## 5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada DRPM DIKTI atas bantuan dana yang diberikan melalui proyek penelitian terapan unggulan perguruan tinggi (PTUPT) tahun 2018.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BULUT H. et al., "Experimental analysis of an earth tube ventilation system under hot and dry climatic conditions. *Proceedings of the 12nd National Sanitary Engineering Congress*. vol 2. 1789-1804, 2014.
- [2] BEN J. D. et al., "Investigation of the ground thermal potential in Tunisia focused towards heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*. vol. 30. 10991-1100, 2010.
- [3] BISINIYA T.S., "Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*. vol 3. 18-28, 2015.
- [4] BELATRACHE D. et al., "Numerical analysis of earth air heat exchanger at operating conditions in arid climates. *International Journal of Hydrogen Energy*. 30. 1-7, 2016.
- [5] DE PAEPE. Et al., "Thermo-hydraulic design of earth air heat exchanger. *Energy Bulid*. vol. 35. 389-397, 2003.
- [6] INCROPERA F.P., "Introduction to Heat Transfer. Edisi ke 7. 2011. John Wiley & Sons. New York.
- [7] PFAFFEROTT J. "Evaluation of earth to air heat exchanger with a standarised method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*. Vol 35. 971-983, 2003.
- [8] SERAGELDIN A.A. et al., "Earth-air heat exchanger results, mathematical model and computational fluid dynamics simulation. *Energy Conversion and Management*. vol. 122. 25-38, 2016.
- [9] SITORUS T. B. et al. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 309, 012089, 2018.
- [10] VAZ J. et al., "An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchanger. *Energy and Buildings*. *Energy and Buildings*. vol 72. 122-131 2014.
- [11] YANG D., et al., "Evaluation of the termal performance of an earth to air heat exchanger in a harmonic thermal enviroentment. *Energy Conversion and Management*. Vol 109. 184-194, 2015.
- [12] ZHANG J. "Investigation of airflow and heat transfer in earth to air heat exchanger. Ph.D thesis. Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2009.