

STUDI LITERATUR TENTANG SISTEM PENDINGIN DENGAN PERTUKARAN LANGSUNG (*DIRECT EXCHANGE*) GEOTERMAL DAN AIR SEBAGAI REFRIGERAN

Widiyatmoko¹⁾

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Sekayu
Jln. Kolonel Wahid Udin, Lk.1, Kayuara, Sekayu, Kabupaten Musi Banyuasin, Sumsel
Telp/Fax (0714) 321099

Abstrak

Sistem HVAC adalah salah satu komponen terbesar dalam konsumsi energi di sebuah gedung. Untuk rumah pribadi dapat mengkonsumsi energi hingga 42%. Terdapat pilihan sistem tata udara dengan efisiensi tinggi yaitu sistem geotermal. Pada tulisan ini, penulis melakukan kajian literatur terhadap teknik tata udara memanfaatkan geotermal dengan sistem Direct Exchange (Pertukaran langsung) dengan menggunakan air sebagai refrigerannya. Sistem pertukaran langsung (direct exchange) adalah sistem tipe pendingin dan pemanas geotermal tertutup pada pipa tembaga dimana refrigeran bersirkulasi. Pipa tembaga dipasang pada jalur yang dipasang secara vertical atau horizontal. Simulasi pemodelan sistem tata udara dengan sistem pompa kalor geotermal untuk gedung tempat tinggal menunjukkan bahwa periode 5 tahun merupakan hasil terbaik sebagai penukar kalor adalah 14 penukar kalor disusun seri dengan jarak 10 meter dan panjang 100 m. Sistem geotermal dengan sistem pertukaran langsung (direct exchange), tanpa adanya secondary refrigeran berhasil menurunkan suhu ruangan. Gaffar menggunakan air sebagai refrigeran pada sistemnya, dengan penambahan koil penguap sebagai elemen penunjang. Air yang mengalir pada pipa tembaga mampu mentransfer kalor dari dingin (air tanah) ke panas (lingkungan) dengan karakteristik panjang pipa, diameter pipa yang bervariasi, dan kecepatan alir yang bervariasi akan memiliki kemampuan pemindahan kalor yang bervariasi pula. Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa sistem pertukaran langsung (Direct Exchange) geotermal dapat dilakukan dengan menggunakan air sebagai refrigeran, laju perpindahan kalor pada pipa dengan fluida air dipengaruhi oleh dimensi pipa dan suhu air tanah, dan dalam perencanaan dan penerapan teknik khususnya sistem pertukaran langsung geotermal dapat didekati dengan rumus-rumus empiris.

Kata kunci : geotermal, pertukaran langsung (direct exchange), air, rumus empiris

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini, penelitian banyak dikembangkan dalam peningkatan penyerapan sistem refrigerasi. Pendingin kompresi gas mekanis memerlukan energi yang besar.⁽¹²⁾

Sistem HVAC adalah salah satu komponen terbesar dalam konsumsi energi di sebuah gedung. Untuk rumah pribadi dapat mengkonsumsi energi hingga 42%. Terdapat pilihan dengan efisiensi tinggi tersedia seperti pompa kalor geotermal. Pompa kalor geotermal memiliki efisiensi tertinggi dengan konsumsi energi tahunan hingga separuh dari sistem yang biasanya.⁽²⁾

Berdasar organisasi pengamat dunia, gedung-gedung mengkonsumsi sekitar 40% produksi energy.⁽¹¹⁾ Menurut Sadowska dan Kazowski tabung bumi adalah solusi penyimpanan energi. Mereka telah sukses

telah menurunkan suhu gedung sekitar 2 sampai dengan 3 derajat.⁽¹¹⁾

Menurut Calabro dan Fazio, perubahan iklim dan dampak lingkungan lain yang negatif, dikombinasikan dengan ketergantungan energi bahan bakar fosil yang biayanya terus naik terhadap kebutuhan energi, menunjukkan kebutuhan untuk mencari sumber terbarukan yang bahkan tersedia secara lokal. Hal ini menjadi alasan mengapa banyak hal menarik berkaitan dengan geotermal.⁽²⁾

Geotermal merupakan teknologi yang memanfaatkan suhu bumi. Terdapat dua jenis geotermal, yaitu high grade geothermal dan low grade geothermal. High grade geothermal adalah panas dan tekanan bumi yang merubah air menjadi uap. Low grade geothermal adalah energi kalor pada permukaan bumi. Pada kesempatan

berikutnya, low grade geothermal disebut dengan geothermal.

Banyaknya penerapan maupun penelitian tentang geothermal di eropa maupun amerika khususnya sebagai pompa kalor (pengahat ruangan) maupun pendingin ruangan, meningkatkan rasa ingin tahu penulis tentang penerapan maupun penelitian geothermal di asia, khususnya di Indonesia.

Pada tulisan ini, penulis melakukan kajian literatur terhadap teknik tata udara dengan memanfaatkan geothermal dengan sistem Direct Exchange (Pertukaran langsung).

2. PERUMUSAN MASALAH

Rendahnya efisiensi energy dalam system tata udara, sedangkan kebutuhan energy listrik pada sistem tata udara dalam rangka mencapai suhu kenyamanan termal sangat tinggi, sehingga dibutuhkan solusi untuk permasalahan ini. Agar permasalahan diatas dapat diatasi, maka dirumuskan masalah yang akan dibahas, yaitu

- Bagaimana sistem geothermal pertukaran langsung menggunakan air sebagai refrigerant?
- Apakah system geothermal sederhana dapat mencapai suhu kenyamanan manusia?.
- Hal apa yang mempengaruhi desain system pertukaran langsung geothermal?.

3. TUJUAN DAN MANFAAT

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk menunjukkan bahwa teknologi geothermal Direct Exchange dapat diterapkan dimanapun dengan menggunakan air sebagai zat alirnya, dan untuk mengetahui pendekatan rancang bangun system geothermal. Kemudian diharapkan dari tulisan ini dapat menjadi salah satu literature maupun inspirasi bagi peneliti maupun praktisi yang memiliki minat terhadap teknologi geothermal.

4. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

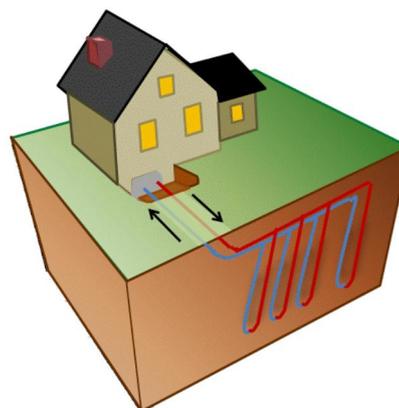
Teknologi geothermal merupakan proses untuk menyalurkan panas ataupun dingin ke dalam gedung. Sistem pemanasan dan pendinginan geothermal mentransfer energi kalor dari bumi, termasuk air bawah tanah dan pompa kalor atau penukar kalor, untuk memanaskan atau mendinginkan gedung.

Dibawah 10 kaki, suhu atau air tanah bervariasi dari 50⁰-55⁰F (10⁰-13⁰C) sepanjang tahun. Terdapat dua desain yang digunakan dalam industri, pompa kalor geothermal menggunakan pompa kalor *secondary ground loop* (loop bawah tanah sekunder) dan *Direct Exchange* (DX) (pertukaran langsung) bawah tanah (Gambar 1 dan 2).

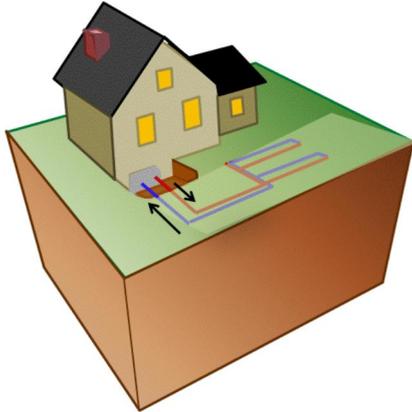
Pompa kalor geothermal atau pompa kalor sumber tanah / *Geothermal Source Heat Pump* (GHSP) adalah sistem pemanasan dan/atau pendinginan yang memompa kalor dari atau menuju tanah. GHSP menggunakan bumi sebagai sumber kalor (selama musim dingin) atau sebagai penyerap kalor (selama musim panas). Desain ini mengambil keuntungan dari suhu konstan yang ada di tanah untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya operasional dari sistem pemanasan dan pendinginan.

Keuntungan terbesar dari GSHP yaitu adalah performa yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tradisional karena teknologi ini mengambil keuntungan dari temperatur yang lebih stabil sepanjang tahun, sehingga coefficient of performance (COP) meningkat, sedangkan biaya operasional dari pemanasan dan pendinginan, berkurang.⁽⁵⁾ Sistem GSHP diklasifikasikan sebagai berikut :

- Sistem Terbuka : air tanah sebagai penukar kalor
- Sistem Tertutup : Jika terdapat penukar kalor bawah tanah, dan air tanah tidak sebagai penukar kalor.



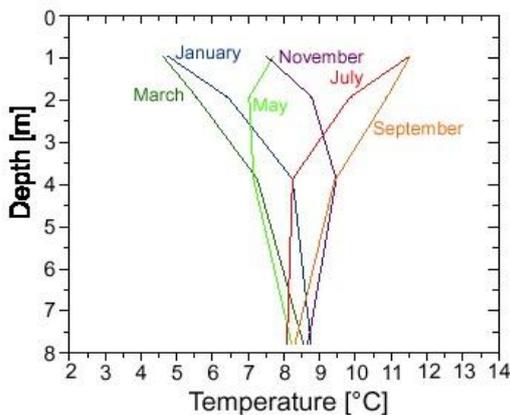
Gambar 1. Sistem pertukaran kalor *Direct Exchange* pipa terpasang vertical⁽⁶⁾



Gambar 2. Sistem pertukaran kalor *Direct Exchange* pipa terpasang horisontal⁽⁸⁾

Sistem pertukaran langsung (*direct exchange*) adalah sistem tipe pendingin dan pemanas geothermal tertutup pada pipa tembaga dimana refrigeran bersirkulasi. Pipa tembaga dipasang pada jalur yang dipasang secara vertical atau horizontal (Gambar 1 dan 2).⁽⁸⁾

Pada tahun 1838, pengukuran suhu dilakukan di tanah yang dimulai di Observatorium Royal Edinburg. Penemuan menunjukkan suhu bervariasi pada kedalaman 3 meter menjadi sekitar 1/20 pada suhu permukaan, dan pada kedalaman 8 meter temperature bervariasi 1/400 dari suhu permukaan (Gambar 3).⁽¹⁷⁾



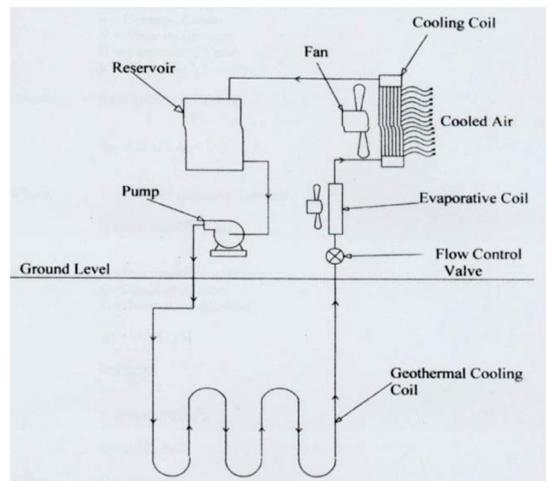
Gambar 3. Hubungan antara kedalaman dan temperature⁽¹⁷⁾

Simulasi pemodelan sistem tata udara dengan sistem pompa kalor geothermal untuk gedung tempat tinggal telah dilakukan oleh Silvia Cocchi, Sonia Castellucci dan Andrea Tucci. Simulasi sistem menunjukkan bahwa periode 5 tahun merupakan hasil terbaik sebagai penukar kalor adalah 14 penukar kalor disusun seri dengan jarak 10 meter dan panjang 100 m. Hasilnya menunjukkan bahwa

sistem bekerja dengan baik karena :

- (1) Temperature di dalam apartemen dipastikan kondisi nyaman
- (2) Tanah tidak menjadi subjek over eksploitasi
- (3) Efisiensi pompa kalor tinggi (Cocci, S., et al, 2013)

Gaffar G.Momin (2013) telah melakukan penyelidikan secara eksperimental tentang sistem tata udara dengan geothermal. Pada eksperimen ini diatur dengan sistem tertutup. Sehingga harus ada supply refrigerant (air) secara terus menerus. Untuk tujuan ini digunakan penampungan, dalam demonstrasi peneliti menggunakan ember dengan keluaran pada bagian bawah. Keluaran ini terhubung dengan pompa mono-block. Pompa mensirkulasi air pada koil geothermal, dimana kalor ditukar antara air dan bumi.⁽¹⁴⁾ Secara lengkap, blok diagram pendinginan geothermal dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram penukar kalor langsung⁽¹⁴⁾

Refrigeran yang digunakan pada eksperimen ini adalah air. Berikut ini adalah sifat termal air (Tabel 1):

Tabel 1. Sifat termal air⁽¹⁴⁾

Maximum density at 4°C	1000 Kg/m ³
Freezing temperature	0°C
Boiling temperature	100°C
Latent heat of melting	334 KJ/Kg
Latent heat of evaporation	2270 KJ/Kg
Critical temperature	380-386 °C
Critical pressure	221.2bar (22.1 MPa)
Specific heat capacity of water	4.187 KJ/KgK
Specific heat capacity of Ice	2.108 KJ/KgK
Specific heat capacity of water vapour	2.108 KJ/KgK
Thermal expansion from 4°C to 100°C	4.2 X 10 ⁻²
Bulk modulus of elasticity	2.15 X 10 ⁹ Pa

Tabel 2. Hasil pendinginan geotermal tanpa koil penguap⁽¹⁴⁾

Time hr.	T ₀ ^{amb.} C	T ₀ ^{gin.} C	T ₀ ^{gout.} C	T ₀ ^{air.} C	COP
10.00	32.2	31.9	26.7	27.2	1.9169
11.00	35.6	32.2	26.9	27.8	1.9537
12.00	38.9	33.1	27.4	28.2	2.1012
13.00	40.3	33.8	27.6	28.8	2.2855
14.00	39.3	33.6	27.3	28.5	2.3224
15.00	38.2	33.1	26.9	28.1	2.2855
16.00	36.8	32.7	26.8	27.6	2.1749
17.00	33.9	31.8	26.7	27.8	1.8800

Dari penyelidikan tersebut dilakukan variasi menggunakan koil penguap dan tidak menggunakan koil penguap. Sehingga didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2 dan Tabel 3.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pengkondisi udara geotermal memberikan suhu keluaran relatif konstan mendekati 25°C, dimana suhu ini adalah suhu nyaman tubuh manusia. Dengan menambahkan koil penguap pada sistem, COP sistem hampir dua kali lebih efektif. ⁽¹⁴⁾

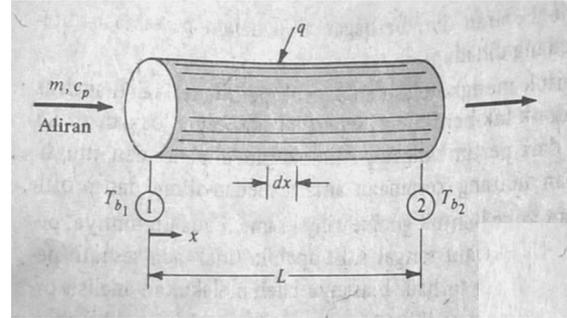
Tabel 3. Hasil pendinginan geotermal dengan koil penguap⁽¹⁴⁾

Time hr.	T ₀ ^{amb.} C	T ₀ ^{gin.} C	T ₀ ^{gout.} C	T ₀ ^{gout.} C	T ₀ ^{air.} C	COP
10.00	33.1	32.2	26.8	22.9	24.6	3.4283
11.00	35.8	33.2	27.1	22.8	24.2	3.8338
12.00	38.4	33.5	27.2	21.5	23.2	4.4236
13.00	40.5	34.0	27.7	21.3	23.0	4.6817
14.00	39.2	33.6	27.3	21.4	23.3	4.4973
15.00	38.5	33.1	27.1	21.6	23.6	4.2393
16.00	37.1	32.6	26.5	22.1	23.1	3.8706
17.00	35.4	32.1	26.8	22.3	24.3	3.6126

Untuk perencanaan dan penerapan teknik, korelasi empiris sangat banyak manfaat praktisnya. Berikut adalah rumus-rumus empiris yang penting dan berguna, sambil menunjukkan batasan-batasannya.

Konsep suhu limbak (*bulk temperature*) sangat penting dalam perpindahan kalor yang melibatkan aliran dalam saluran tertutup (pipa). Untuk aliran dalam pipa (Gambar 3), energi total dapat dinyatakan dengan syarat c_p sepanjang aliran itu tetap.

$$q = \dot{m}c_p(T_{b2} - T_{b1}) \quad (1)$$



Gambar 3. Perpindahan kalor menyeluruh⁽⁶⁾

Kalor dq yang ditambahkan dalam panjang diferensial dx dapat dinatakan dengan beda suhu-limbak atau dengan koefisien perpindahan kalor ⁽⁶⁾

$$dq = \dot{m}c_p dT_b = h(2\pi r)dx(T_w - T_b) \quad (2)$$

T_w adalah suhu dinding dan T_b adalah suhu limbak pada posisi x . Sehingga perpindahan kalor total adalah

$$q = hA(T_w - T_b)_{ave} \quad (3)$$

A adalah luas penampang perpindahan kalor. Oleh karena T_w dan T_b dapat berubah, maka digunakan suhu rata-rata ($ave = average$).

Untuk aliran turbulen berkembang penuh (*fully developed turbulent flow*) dalam tabung licin, disarankan Diffus dan Boelter menggunakan rumus :

$$Nu_d = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^n \quad (4)$$

Dengan $n = 0,4$ (untuk pemanasan), dan $n =$ (untuk pendinginan. Dengan memperhatikan perubahan viskositas zat gas maupun viskositas zat cair, disarankan Sieder dan Tate menggunakan rumus :

$$Nu_d = 0,027 Re_d^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (5)$$

Semua sifat ditentukan pada suhu limbak, kecuali μ_w ditentukan pada suhu dinding. Persamaan (4) dan (5) berlaku untuk aliran yang sepenuhnya turbulen di dalam tabung. Pada bagian *inlet* dimana aliran belum berkembang penuh, Nusselt menyarankan rumus :

$$Nu_d = 0,036 Re_d^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{d}{L}\right)^{0,055} \quad (6)$$

untuk $10 < \left(\frac{d}{L}\right) < 400$

Persamaan (4), (5), (6) memungkinkan perhitungan sederhana, tetapi tidak jarang memiliki kesalahan ± 25%. Pethukhov mengembangkan persamaan lebih teliti untuk aliran yang sepenuhnya turbulen dalam tabung licin :

$$Nu_d = \frac{(f/8)Re_dPr}{1,07+12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^n \quad (7)$$

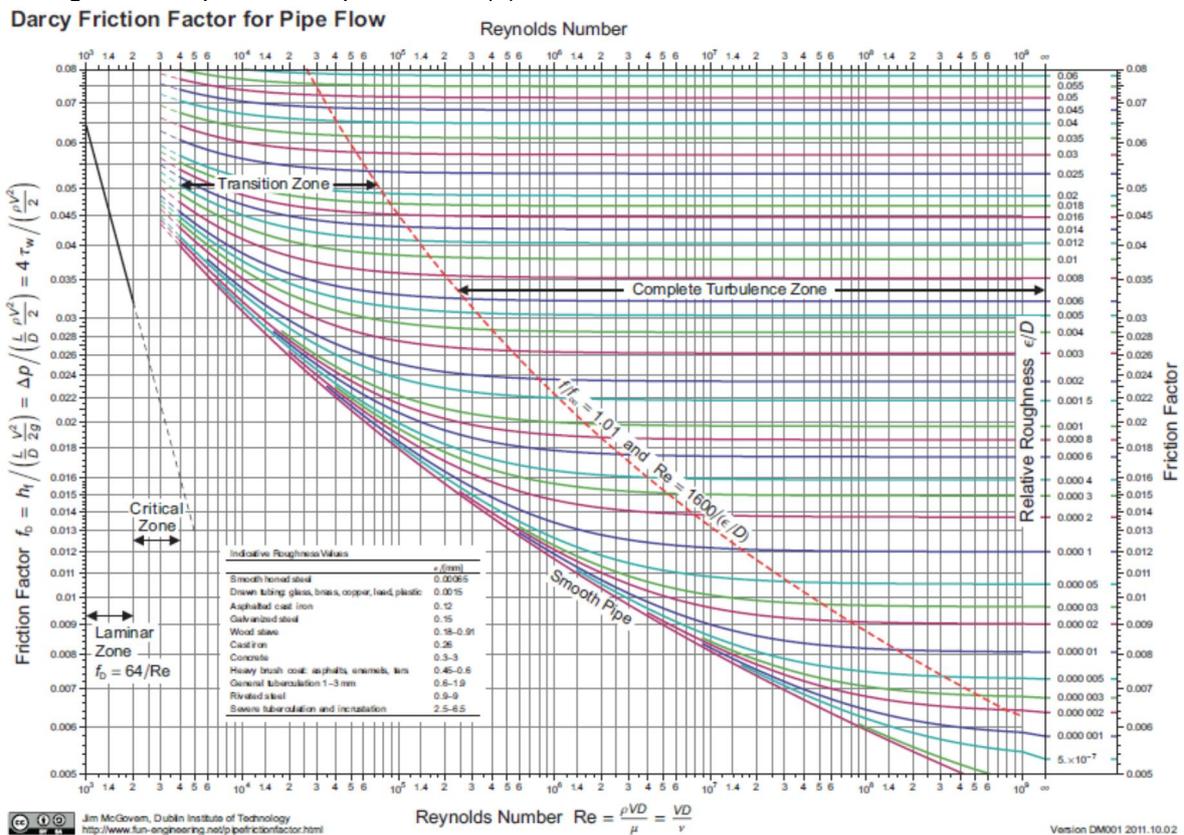
Dimana n = 0,11 untuk $T_w > T_b$, n = 0,25 untuk $T_w < T_b$ dan n = 0 untuk fluks kalor tetap dan untuk gas. Semua sifat ditentukan pada $T_f = (T_w + T_b)/2$, kecuali untuk μ_w dan μ_b . Faktor gesek (*friction factor*) didapat dari Diagram Moody (Gambar 4), atau untuk tabung licin, didapatkan dari persamaan (8)

$$f = (1,82 \log Re_d - 1,64)^{-2} \quad (8)$$

Persamaan (7) berlaku untuk rentang :
 0,5 < Pr < 200 dengan ketelitian 6%
 200 < Pr < 2000 dengan ketelitian 10%
 $10^4 < Re_d < 5 \times 10^6$
 $0 < \mu_b/\mu_w < 40$

Untuk aliran laminar berkembang penuh dalam tabung, pada suhu tetap, Hausen memberikan rumus empiris :

$$Nu_d = 3,66 + \frac{0,668(d/L)Re_dPr}{1+0,04[(d/L)Re_dPr]^{2/3}} \quad (9)$$



Gambar 4. Diagram Moody⁽¹³⁾

Untuk perpindahan kalor aliran laminar dalam tabung, disarankan Sieder dan Tate menggunakan rumus⁽⁶⁾:

$$Nu_d = 1,86 (Re_dPr)^{1/3} \left(\frac{d}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (10)$$

Persamaan (10) berlaku apabila $Re_dPr \frac{d}{L} > 10$. Perkalian antara angka Reynolds dan angka Prandtl yang terdapat dalam koreksi untuk aliran laminar disebut dengan angka Peclet,

$$Pe = \frac{d u \rho c_p}{k} = Re_d Pr \quad (11)$$

5. PEMBAHASAN

Teknologi geotermal merupakan proses untuk menyalurkan panas ataupun dingin ke dalam gedung. Pompa kalor geotermal atau pompa kalor sumber tanah / *Geothermal Source Heat Pump* (GHSP) adalah sistem pemanasan dan/atau pendinginan yang memompa kalor dari atau menuju tanah maupun air tanah. Selain COP dari sistem geotermal lebih besar daripada sistem HVAC

dengan media udara, keuntungan lainnya adalah biaya operasional lebih kecil.

Berdasar pengukuran suhu di Observatorium Royal Edinburg yang terlihat dari Gambar 3, diketahui bahwa pada kedalaman 3 meter, rentang suhu sudah mulai mengerucut (lebih kecil), kemudian lebih stabil lagi ketika lebih dalam dari 9 meter.

Sistem geotermal dengan sistem pertukaran langsung (*direct exchange*), tanpa adanya *secondary refrigerant* seperti yang telah dicontohkan oleh Gaffar G.Momin (Gambar 4), berhasil menurunkan suhu ruangan yang hasilnya dapat ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Gaffar menggunakan air sebagai refrigeran pada sistemnya, dengan penambahan koil penguap sebagai elemen penunjang. Air sebagai refrigeran yang bekerja dengan suhu dari 0°C s.d. 100°C, bisa menjadi refrigeran yang sangat baik karena memiliki sifat termal air seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Dalam perencanaan dan penerapan teknik, khususnya sistem pertukaran langsung geotermal, dapat dilakukan dengan pendekatan rumus-rumus empiris yang telah tersedia. Sehingga laju perpindahan kalor dengan syarat pipa memiliki diameter yang sama dari ujung awal sampai ujung akhir, suhu lingkungan keadaan tetap, maka laju perpindahan kalor dapat diketahui dengan persamaan (2) dan persamaan (3).

Air yang mengalir pada pipa tembaga mampu mentransfer kalor dari dingin (air tanah) ke panas (lingkungan) dengan karakteristik panjang pipa, diameter pipa yang bervariasi, dan kecepatan alir yang bervariasi akan memiliki kemampuan pemindahan kalor yang bervariasi pula. Hal ini dapat diketahui dari persamaan (4), s.d. (11).

6. KESIMPULAN

Setelah semua studi literature yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan:

- 1) Sistem pertukaran langsung (*Direct Exchange*) geotermal dapat dilakukan dengan menggunakan air sebagai refrigeran.
- 2) Laju perpindahan kalor pada pipa dengan fluida air, dipengaruhi oleh dimensi pipa dan suhu air tanah.
- 3) Dalam perencanaan dan penerapan teknik, khususnya sistem pertukaran langsung geotermal, dapat didekati dengan rumus-rumus empiris.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bu, X., Wang, L., dan Li, H, 2013, "Performance Analysis and Working Fluid Selection for Energy-Powered Organic Rankine-vapor Compression Air Conditioning", A Springer Open Journal, Vol.01, No.2, pp 1-14
2. Calabro, G., dan Fazio, A, 2012, "The Role of Geothermal Energy in Cooling and Heating Systems", International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences, Vol.02, Issue 1, pp 224-232
3. Choudhyry, A, 2013, "HVAC vs Geothermal Heat Pump-Myth and Truth", Open Journal of Energy Efficiency, Vol.02, 2013, pp 42-45
4. Clement, R., et al, 2012, "Modelling and Analyse of a Direct Expansion Geothermal Heat Pump (DX) : part 1 Modelling of Ground Heat Exchanger", Notre-Dame Qouset Montreal (Quebec) : Canada
5. Cocchi, S., Castellucci, S., dan Tucci, 2013, "Modelling of an Air Conditioning System With Geothermal Heat Pump for a Residential Building", Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problem in Engineering, Vol.2013, Article ID 781231, pp
6. Holman, J.1994. Perpindahan Kalor, alih bahasa oleh Jasjfi, Edisi keenam. Penerbit Erlangga : Jakarta
7. Jindal T.K, 2012, "Analysis of Heat Transfer Through A Duct Of Geothermal Cooling and Heating System", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2, Issue 10, Oct. 2012, pp 284-287
8. Kasich, J.R. dan Taylor, M, 2012, "Recommendations for Geothermal Heating and Cooling Systems" Ohio Water Resource Council : Ohio
9. Kelly, J. 2009. *Direct Exchange : What Is It? What its Relation To Ground Water?, Water/Energy Sustainability Symposium At The GWPC Annual Forum*. Geo Exchange.
10. Kunkel, T, 2012, "Geothermal Energy As An Indigenous Alternative Energy Source In British Columbia" Journal of Ecosystems & Management, Vol.13, No 2, pp 1-16
11. Mali, S.N., More, A.B., Patil, D.S, 2014, "Application of Geothermal Cooling Tchniques to Improve Thermal Condition of Residential Building" International Journal of Civil and Structural

- Engineering Research, Vol.2, Issue 1, April-September 2014, pp 158-161
12. Masheiti, S., dan Agnew, B, 2010, "Thermodynamic Simulation Modelling of Low Temperatur Geothermal Source Located in Arid-Zone Area North Africa", Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol.4, No.1, Jan. 2010, pp 61-68
 13. McGovern, J, 2011, "Technical Note : Friction Factor Diagrams for Pipe Flow", Dublin Institute of Technology
 14. Momin, G.G, 2013, "Experimental Investigation of Geothermal Air Conditioning", American Journal of Engineering Research (AJER) Vol.02, Issue 12, pp 157-170
 15. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2011, "Policymakers Guidebook for Geothermal Heating and Cooling", NREL/BR-6A20-49477 Revised February 2011
 16. Thomas H., et al. 2007. *Geothermal Central System. ASHRAE Journal*
 17. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/archiv/englisch/description-of-ground-source-types-for-the-heat-pump.html> (diakses tanggal 20 maret 2015)

