

TUGAS AKHIR
**STUDI EKSPERIMENTAL POTENSI *EARTH COOLING TUBE HEAT EXCHANGER* (ECT-HE) SEBAGAI *GREEN AIR CONDITIONING* (GAC)
(STUDI KASUS PADA TANAH REGOSOL)**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Disusun Oleh
LA ODE RAJEN TOINDA
NIM 20190130138

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
YOGYAKARTA

2024



LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**STUDI EKSPERIMENTAL POTENSI *EARTH COOLING TUBE HEAT EXCHANGER*
(ECT-HE) SEBAGAI *GREEN AIR CONDITIONING* (GAC)
(STUDI KASUS PADA TANAH REGOSOL)**

***EXPERIMENTAL STUDY OF THE POTENTIAL OF EARTH COOLING TUBE HEAT
EXCHANGER (ECT-HE) AS GREEN AIR CONDITIONING (GAC)
(CASE STUDY ON REGOSOL SOIL)***

Dipersiapkan dan disusun oleh:

La Ode Rajen Toinda

20190130138

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada Jum'at, 21 Juni 2024

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Novi Caroko, S.T., M.Eng.
NIP. 197911132005011001

Dr. Muhammad Nadjib, S.T., M.Eng.
NIK. 19660616199702 123 033

Dosen Penguji

Dr. Ir. Wahyudi, S.T., M.T.
NIK. 19700823 199702 123032

**Tugas akhir ini telah dinyatakan sah sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

Tanggal 21 Juni 2024

Mengetahui,

Ketua Program Studi S-1 Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta



Ir. Berli Paripurna Kamiel S.T., M.Eng.Sc., Ph.D.
NIK. 19740302 200104 123049

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa tugas akhir ini adalah asli karya saya dan di dalamnya tidak terdapat karya (tulisan) yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain sebelumnya. Selain itu, karya ilmiah ini juga tidak berisi pendapat atau hasil penelitian yang sudah dipublikasikan oleh orang lain selain referensi yang ditulis dengan menyebutkan sumbernya di dalam naskah dan daftar pustaka.

Yogyakarta, 21 Juni 2024

Penulis,



La Ode Rajen Toinda

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur atas kehadiran Allah سبحانه و تعالی yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah tugas akhir berjudul “Studi Eksperimental Potensi *Earth Cooling Tube Heat Exchanger* (ECT-HE) sebagai *Green Air Conditioning* (GAC) (studi kasus pada tanah regosol)”. Karya ini berisi tentang studi potensi dari rancangan sistem pendinginan udara ruangan dengan konsep *green technology* menggunakan unit penukar kalor ECT-HE sebagai *green air conditioning* yang dilakukan secara eksperimen. Penipisan lapisan ozon dan peningkatan temperatur global akibat penggunaan *air conditioning* (AC) konvensional menjadi latar belakang utama penyusunan karya ini. Maka, penulis menyusun kajian yang telah selesai dilakukan sebagai solusi dari masalah latar belakang tersebut menggunakan unit ECT-HE.

Penulis sadar bahwa masih banyak terdapat kekurangan dalam penyusunan karya ini, sehingga penulis dengan luas hati menerima masukan, kritik, dan saran yang membangun guna didapatkan tulisan ilmiah yang lebih baik lagi di masa yang akan datang. Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat kepada semua pihak dan berkontribusi dalam pengembangan teknologi sistem pendinginan udara ruangan dengan metode *green technology* agar pencapaian *Sustainable Development Goals* dapat dipercepat yang targetnya pada tahun 2045.

Penyusunan karya ilmiah ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak yang telah membantu dan menjadi motivasi bagi penulis untuk menyelesaikannya. Maka, ucapan terima kasih penulis sampaikan dan berikan kepada:

1. Kepala Program Studi S-1 Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang telah menerima penulis untuk melaksanakan dan menyelesaikan studi S-1 Teknik Mesin,
2. Dosen pembimbing utama Bapak Dr. Ir. Novi Caroko, S.T., M.Eng. dan dosen pembimbing pendamping Bapak Dr. Muhammad Nadjib, S.T., M.Eng. yang telah membimbing penulis untuk menyelesaikan karya ini,
3. Orang tua penulis, Bapak La Ode Muhammad Askar Masiala dan Ibu Wa Ode Persianti berkat dukungan, doa, dan motivasi bagi penulis untuk menyelesaikan studi,

4. Saudara dan saudari penulis, Wa Ode Anastasia Septiana, La Ode Suitnuh Kohadja, dan Wa Ode Ratu Santila yang telah menjadi motivasi bagi penulis,
5. ECTeam, Ahmad Habib dan Alfian Akmal yang sama-sama berjuang melaksanakan proyek ini,
6. Organisasi-organisasi yang penulis ikuti, UKM KPM UMY, HMM UMY, dan Aerogear UMY sebagai wadah penulis untuk mengembangkan diri,
7. Tim-tim lomba penulis, PCI Team, Alramm Aero Team, E-Mecha Team, ECTeam, AHK Team, dan PHP2D UKM KPM Team yang telah kebersamai penulis dalam mengikuti berbagai kompetisi,
8. CSIC UMY yang telah mendanai pelaksanaan proyek ini, dan
9. Seluruh sahabat dan teman-teman penulis yang tidak bisa penulis sebutkan satu-satu yang telah memberikan banyak kontribusi, dorongan, dan semangat.

Yogyakarta, 21 Juni 2024

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
INTISARI	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan dan Asumsi Penelitian.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	5
2.1. Tinjauan Pustaka.....	5
2.2. Landasan Teori	12
2.2.1. Perpindahan kalor (<i>heat transfer</i>).....	12
2.2.2. Perpindahan kalor ke bumi (<i>geothermal heat transfer</i>).....	12
2.2.3. Perpindahan kalor konveksi (<i>convection heat transfer</i>)	13
2.2.4. Alat penukar kalor (<i>heat exchanger</i>)	15
2.2.5. <i>Earth-air heat exchanger</i> (EAHE) dan <i>earth cooling tube</i> (ECT).....	15
2.2.6. Metode <i>logarithmic mean temperature differential</i> (LMTD).....	17
2.2.7. Metode <i>effectiveness number of transfer unit</i> (ϵ -NTU)	18
2.2.8. Laju perpindahan kalor	19
2.2.9. Laju pendinginan ruangan dan kebutuhan energi pendinginan	20
2.10. Tanah regosol.....	20
BAB 3 METODE PENELITIAN	21

3.1. Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.3. Instrumen (alat dan bahan) Penelitian.....	23
3.4. Parameter dan Variabel Penelitian.....	23
3.5. Prosedur Penelitian.....	24
3.5.1 Pengukuran temperatur tanah.....	24
3.5.2. Perhitungan, pemodelan, dan pembuatan unit ECT-HE dan ruang ujicoba.....	25
3.5.3. Pengujian dan pengambilan data pengujian unit ECT-HE.....	26
3.6. Analisis Kinerja.....	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1. Hasil Perancangan Unit ECT-HE.....	27
4.1.1. Pengukuran parameter temperatur tanah (T_{soil}).....	27
4.1.2. Perhitungan parameter <i>overall convection coefficient</i> (U) ECT-HE.....	27
4.1.3. Perhitungan rancangan unit ECT-HE menggunakan metode LMTD.....	32
4.2. Hasil Pemodelan Rancangan Unit ECT-HE.....	34
4.2.1. Konfigurasi dan jenis desain unit ECT-HE.....	34
4.2.2. Model 3-D unit ECT-HE.....	35
4.3. Hasil Pembuatan Unit ECT-HE.....	36
4.3.1. Penggalian lokasi benam jaringan pipa unit ECT-HE.....	36
4.3.2. Pembuatan jaringan pipa unit ECT-HE.....	38
4.3.1. Pembuatan ruang ujicoba unit ECT-HE.....	38
4.3.2. Pemasangan instrumen alat ukur unit ECT-HE.....	41
4.4. Hasil Pengujian Unit ECT-HE.....	44
4.4.1. Pola penurunan, perubahan, dan beda temperatur tiap waktu.....	50
4.4.2. <i>Effectiveness</i> -NTU unit ECT-HE.....	56
4.4.3. Laju transfer kalor, COP, dan laju pendinginan ruangan unit ECT-HE.....	60
BAB 5 PENUTUP.....	71
5.1. Kesimpulan.....	71
5.2. Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2 1. Koefisien perpindahan kalor konveksi vs kecepatan aliran udara.....	5
Gambar 2 2. (a) Grafik Pendinginan; (b) Grafik Pemanasan	7
Gambar 2 3. (a) Variasi Temperatur luaran sistem sebagai fungsi dari variasi kecepatan aliran udara; (b) Evolusi dari rata-rata efisiensi terhadap COP sebagai fungsi dari variasi kecepatan aliran udara	10
Gambar 2 4. Skema <i>geothermal heat transfer</i>	13
Gambar 2 5. Perpindahan kalor konveksi di atas permukaan.....	14
Gambar 2 6. Jenis desain sistem EAHE dengan konfigurasi pipa horizontal, (a) <i>Open loop sistem</i> ; (b) <i>Closed loop sistem</i>	17
Gambar 2 7. Kondisi spesial HE; (a) Kondensasi uap; (b) Evaporasi cairan.....	18
Gambar 2 8. Tanah regosol.....	20
Gambar 3 1. Diagram alir kegiatan	21
Gambar 3 2. Lokasi kegiatan.....	23
Gambar 3 3. Alat ukur temperatur tanah	24
Gambar 3 4. Model alat ukur temperatur tanah.....	25
Gambar 3 5. Alur perhitungan, pemodelan, dan pembuatan unit.....	25
Gambar 3 6. Skema pengujian ECT-HE.....	26
Gambar 4 1. Proses pengukuran temperatur tanah.....	28
Gambar 4 2. Hasil pengukuran temperatur tanah.....	28
Gambar 4 3. Peningkatan komposisi perhitungan terhadap kecepatan aliran fluida.....	30
Gambar 4 4. Model konfigurasi E-Horizontal.....	35
Gambar 4 5. Model unit ECT-HE.....	35
Gambar 4 6. Unit ECT-HE secara keseluruhan.....	36
Gambar 4 7. Potensial pendinginan unit <i>horizontal earth tube system</i> terhadap kedalaman tanah.....	36
Gambar 4 8. Detail ukuran galian (satuan meter).....	37
Gambar 4 9. Galian benam jaringan pipa unit ECT-HE.....	37
Gambar 4 10. Sambungan pipa, (a) Seal pita perekat; (b) Seal PVC dan fitting L PVC; dan (c) Resin + aerosol	38
Gambar 4 11. Hasil pembuatan jaringan pipa unit ECT-HE	38
Gambar 4 12. Penguburan jaringan pipa ECT-HE	39
Gambar 4 13. (a) Pemotongan triplek; (b) Perakitan struktur dan triplek.....	39
Gambar 4 14. (a) Ruang tampak dalam; (b) Ruang tampak luar	40
Gambar 4 15. Instalansi jaringan pipa dan ruang ujicoba	40
Gambar 4 16. Instrumen alat ukur ECT-HE	41
Gambar 4 17. (a) Alat ukur temperatur lingkungan; (b) Alat ukur temperature ruangan....	41
Gambar 4 18. (a) Alat ukur temperatur <i>input</i> ; (b) Alat ukur temperatur <i>output</i>	42
Gambar 4 19. <i>Watt meter</i> dan <i>power control (dimmer)</i>	42
Gambar 4 20. Anemometer.....	43
Gambar 4 21. (a) Thermocouple dalam tabung; (b) Media pengukuran temperatur tanah; dan (c) <i>Probe thermocouple</i>	43
Gambar 4 22. <i>Probe thermocouple</i> di lima titik jaringan pipa unit ECT-HE, (a) T ₁ ; (b) T ₂ ; (c) T ₃ ; (d) T ₄ ; (e) T ₅	43

Gambar 4 23. Pola penurunan temperatur kerja unit ECT-HE, (a) Variasi 2 m/detik; (b) Variasi 3 m/detik; (c) Variasi 4 m/detik	51
Gambar 4 24. Penurunan temperatur di sepanjang pipa ETAHE	51
Gambar 4 25. Perubahan temperatur udara tiap waktu, (a) Variasi 2 m/detik; (b) Variasi 3 m/detik; (c) Variasi 4 m/detik	53
Gambar 4 26. Temperatur tereduksi $\Delta T_{Tin-Tout}$	54
Gambar 4 27. Rata-rata temperatur tereduksi selama 24 jam.....	55
Gambar 4 28. Selisih perubahan temperatur udara dalam ruangan.....	56
Gambar 4 29. Kondisi pemanasan dan pendinginan terhadap waktu unit <i>horizontal earth tube system</i>	56
Gambar 4 30. <i>Effectiveness</i> -NTU unit ECT-HE tiap waktu, (a) Variasi 2 m/detik; (b) Variasi 3 m/detik; (c) Variasi 4 m/detik	58
Gambar 4 31. Rata-rata <i>Effectivebess</i> -NTU terhadap peningkatan kecepatan aliran fluida	59
Gambar 4 32. Laju transfer kalor unit ECT-HE	61
Gambar 4 33. COP unit ECT-HE.....	62
Gambar 4 34. Evolusi COP terhadap peningkatan kecepatan aliran fluida.....	62
Gambar 4 35. Presentase kesesuaian laju transfer kalor dari perhitungan rancangan dengan pengujian.....	63
Gambar 4 36. Hubungan efektivitas dan laju transfer kalor unit ECT-HE.....	64
Gambar 4 37. Laju pendinginan ruangan	65
Gambar 4 38. Evolusi kemampuan pendinginan ruangan terhadap peningkatan kecepatan aliran fluida	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2 1. Ringkasan kemampuan material pipa mereduksi temperatur	11
Tabel 4 1. Hasil perhitungan rancangan ECT-HE	27
Tabel 4 2. Data pipa ECT-HE	29
Tabel 4 3. Propertis fluida kerja pada $T_f = 300K$ dan k_{soil}	29
Tabel 4 4. Komposisi perancangan ECT-HE	30
Tabel 4 5. Resistensi total $R_{total} L$	31
Tabel 4 6. Hasil perhitungan parameter U Unit ECT-HE	32
Tabel 4 7. Temperatur kerja	32
Tabel 4 8. Peritungan laju aliran massa dan laju perpindahan kalor sistem ECT-HE	33
Tabel 4 9. Hasil perhitungan panjang jaringan pipa ECT-HE	34
Tabel 4 10. Data pengujian variabel kecepatan aliran udara 2 m/detik	44
Tabel 4 11. Data pengujian variabel kecepatan aliran udara 3 m/detik	46
Tabel 4 12. Data pengujian variabel kecepatan aliran udara 4 m/detik	48
Tabel 4 13. <i>effectiveness</i> -NTU unit ECT-HE	59
Tabel 4 14. Hasil perhitungan laju transfer kalor, COP, dan laju pendinginan ruangan unit ECT-HE kecepatan 2 m/detik	66
Tabel 4 15. Hasil perhitungan laju transfer kalor, COP, dan laju pendinginan ruangan unit ECT-HE kecepatan 3 m/detik	67
Tabel 4 16. Hasil perhitungan laju transfer kalor, COP, dan laju pendinginan ruangan unit ECT-HE kecepatan 4 m/detik	68

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Notasi	Keterangan	Satuan	Dimensi
T_{soil}	Temperatur tanah	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
T_f	Temperatur rata-rata T_{in} dan T_w	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
dT	Beda temperature T_{in} dan T_{out}	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
ΔT_{lm}	LMTD	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
ΔT	Selisih temperatur awal dan akhir	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
T_w	Temperatur dinding	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
T_{∞}	Temperatur fluida	$^{\circ}\text{C}$	$[\theta]$
Δt	Selisih waktu akhir dan awal	<i>detik; s</i>	$[T]$
R_{total}	Resistensi material yang terlibat dalam perancangan <i>heat exchanger</i>	$^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$	$[\text{M}]^{-1}[\text{L}]^{-2}[\text{T}]^3[\theta]$
R_{soil}	Resistensi tanah	$^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$	$[\text{M}]^{-1}[\text{L}]^{-2}[\text{T}]^3[\theta]$
R_{pipe}	Resistensi pipa	$^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$	$[\text{M}]^{-1}[\text{L}]^{-2}[\text{T}]^3[\theta]$
R_{conv}	Resistensi konveksi	$^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$	$[\text{M}]^{-1}[\text{L}]^{-2}[\text{T}]^3[\theta]$
R_{totalL}	Resistensi total terhadap panjang pipa	$\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$	$[\text{M}]^{-1}[\text{L}]^{-1}[\text{T}]^3[\theta]$
U	<i>Overall convection coefficient</i>	$\text{Watt}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
h	Koefisien perpindahan kalor konveksi	$\text{Watt}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
\dot{m}	Laju aliran massa fluida	kg/s	$[\text{M}][\text{T}]^{-1}$
ρ	Massa jenis fluida kerja	kg/m^3	$[\text{M}][\text{L}]^{-3}$
C_{min}	<i>Heat capacity rate</i> minimum	$\text{Watt}/^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
C_h	<i>Heat capacity rate</i> fluida panas	$\text{Watt}/^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
C_c	<i>Heat capacity rate</i> fluida dingin	$\text{Watt}/^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
C	<i>Heat capacity rate</i>	$\text{Watt}/^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
q	Laju perpindahan panas	Watt	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}$
qr	Laju pendinginan ruangan	Watt	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}$
P	Daya listrik	Watt	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-3}$
BTU	<i>British Thermal Unit</i>	BTU	$[\text{M}][\text{L}]^2[\text{T}]^{-2}$
P	Tekanan udara dalam 1 atm	kPa	$[\text{M}][\text{L}]^{-1}[\text{T}]^{-2}$
μ	Viskositas dinamis fluida kerja	$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$	$[\text{M}][\text{L}]^{-1}[\text{T}]^{-1}$
k_{soil}	Konduktivitas termal tanah	$\text{Watt}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
k_{pipe}	Konduktivitas termal pipa	$\text{Watt}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
k_f	Konduktivitas termal fluida	$\text{Watt}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^{-3}[\theta]^{-1}$
V	Volume ruangan yang didinginkan	m^3	$[\text{L}]^3$
R	Konstanta gas ideal	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	$[\text{L}]^2[\text{T}]^{-2}[\theta]^{-1}$
c_p	Kalor spesifik fluida	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$[\text{L}]^2[\text{T}]^{-2}[\theta]^{-1}$
A_o	Luas profil pipa bagian luar	m^2	$[\text{L}]^2$
A_i	Luas profil pipa bagian dalam	m^2	$[\text{L}]^2$
A	Luas permukaan yang dilewati fluida	m^2	$[\text{L}]^2$
v	Kecepatan output aliran fluida kerja	m/s	$[\text{L}][\text{T}]^{-1}$
L	Panjang pipa <i>heat exchanger</i>	m	$[\text{L}]$

r_s	Kedalaman benam pipa di dalam tanah	m	[L]
r_o	Jari-jari luar pipa	m	[L]
r_i	Jari-jari dalam pipa	m	[L]
d_i	Diameter dalam pipa	m	[L]
d_o	Diameter luar pipa	m	[L]
COP	<i>Coefficient of Performance</i>	-	-
Re	Bilangan Reynolds	-	-
Pr	Bilangan Prandtl	-	-
Nu	Angka Nusselt	-	-
NTU	<i>Number of Transfer Unit</i>	-	-
f	Faktor koreksi	-	-
ϵ	<i>Effectiveness heat exchanger</i>	-	-
ECT-HE	<i>Earth Cooling Tube-Heat Exchanger</i>	-	-
HE	<i>Heat Exchanger</i>	-	-
LMTD	<i>logarithmic mean temperature differential</i>	-	-

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Formulir pengambilan data pengujian unit ECT-HE.....	76
LAMPIRAN 2. Data mentah pengujian unit ECT-HE	83
LAMPIRAN 3. Propertis fluida Appendix A-5	89
LAMPIRAN 4. Formulir pengukuran temperatur tanah tanggal 3-5 September 2023	90
LAMPIRAN 5. Data mentah dan kalibrasi pengukuran temperatur tanah tanggal 3-5 September 2023	91
LAMPIRAN 6. Persamaan regresi data kalibrasi termokopel	92
LAMPIRAN 7. Gambar-gambar unit ECT-HE	93
LAMPIRAN 8. Gambar mesin unit ECT-HE.....	96