SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PADA SISTEM PEMANAS KOLAM MENGGUNAKAN PENUKAR KALOR PIPA GANDA

Putra Andi Kolala[a*], Ridho Agustian[a], Muhammad Syaukani[a], Ilham Dwi Arrohman[b], Rico Aditia Prahmana[a], Devia Gahana Cindi Aprilian[a], Munawar Alfansury Siregar[c]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera Lampung Selatan 35365, Indonesia*
[b]*Program Studi Teknik Sistem Energi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera Lampung Selatan 35365, Indonesia*
[c]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan 20238, Indonesia.*

**Penulis korespondensi: putra.kolala@ms.itera.ac.id; putrakolala@gmail.com, (P.A. Kolala), Tel.: +6285156476591*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 05 September 2026
Direvisi pada 06 Oktober 2026
Disetujui: 17 Oktober 2026
Tersedia daring: 06 November 2026

Kata kunci:
Penukar kalor pipa ganda; aliran berlawanan arah; pemanasan kolam; temperatur sumber panas; debit fluida

Keywords:
Double-pipe heat exchanger; counterflow; pond heating; heat-source temperature; flow rate

ABSTRAK

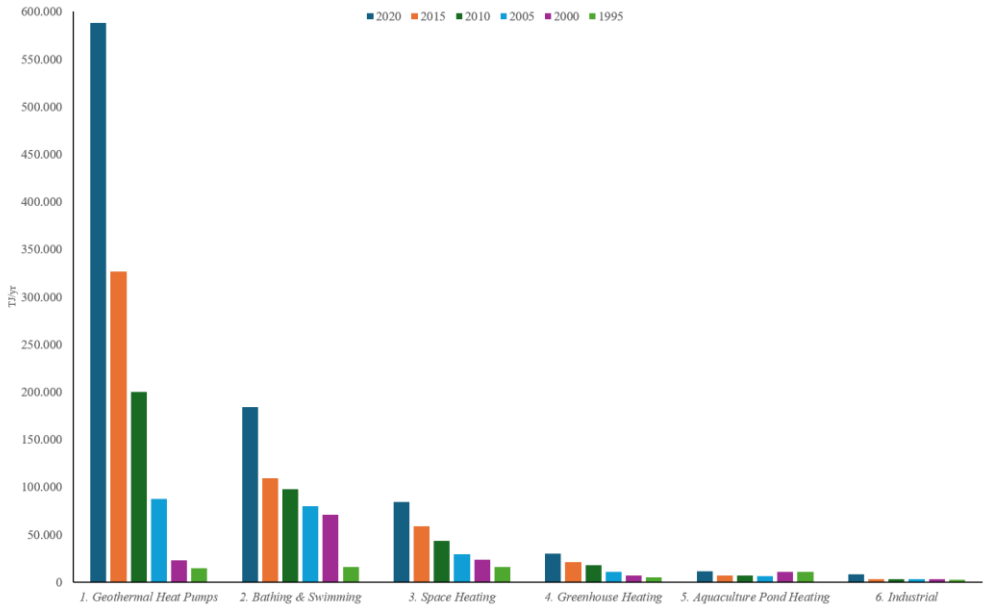
Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung (*direct use*) berpotensi diterapkan pada sektor akuakultur untuk meningkatkan efisiensi pengendalian temperatur kolam budidaya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur sumber panas dan debit aliran fluida panas terhadap waktu pencapaian temperatur optimum kolam ikan Mas (*Cyprinus carpio*), dengan sumber panas bumi disimulasikan menggunakan air panas pada sistem kolam non-resirkulasi berbasis *double pipe heat exchanger* (DPHE) beraliran *counter flow*. Variasi temperatur sumber panas yang digunakan adalah 40 °C, 50 °C, dan 60 °C, sedangkan variasi debit fluida panas diatur melalui perubahan tegangan pompa sebesar 3,5 V, 7 V, 10,5 V, dan 14 V, untuk mencapai temperatur optimum kolam sebesar 28 °C. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sumber panas dan debit fluida panas mempercepat pencapaian temperatur optimum (temperatur sumber panas berpengaruh dominan, ANOVA $p < 0{,}001$, sedangkan pengaruh debit belum signifikan secara statistik, $p = 0{,}057$), dengan durasi tercepat 18 menit pada kombinasi debit 14 V dan *heat source* 60°C, dan durasi terlama 2 jam 40 menit pada kombinasi debit 3,5 V dan *heat source* 40°C.

ABSTRACT

Direct utilization of geothermal energy has the potential to be applied in the aquaculture sector to improve the efficiency of temperature control in cultivation ponds. This study aims to analyze the effect of heat source temperature variations and hot fluid flow rates on the time required to achieve the optimum temperature of a common carp (Cyprinus carpio) pond, with the geothermal heat source simulated using hot water in a non-recirculating pond system based on a counterflow double pipe heat exchanger (DPHE). The heat source temperatures were varied at 40 °C, 50 °C, and 60 °C, while the hot fluid flow rates were controlled by adjusting the pump voltage to 3.5 V, 7 V, 10.5 V, and 14 V, to reach the pond's optimum temperature of 28°C. The experimental results indicate that increasing the heat source temperature and hot fluid flow rate shortened the time to reach the optimum temperature (heat source temperature was the dominant factor, ANOVA $p < 0.001$, whereas the effect of flow rate was not statistically significant, $p = 0.057$), with the fastest duration of 18 minutes achieved at a 14 V flow rate and 60°C heat source, and the longest duration of 2 hours 40 minutes at a 3.5 V flow rate and 40°C heat source.

1. PENGANTAR

Pemanfaatan langsung energi panas bumi menawarkan peluang penyediaan panas untuk berbagai kegiatan, termasuk akuakultur, tanpa terlebih dahulu mengubahnya menjadi listrik. Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi yang besar, tetapi pemanfaatannya masih lebih banyak diarahkan pada pembangkitan listrik (Darma dkk., 2020; Salhein dkk., 2022; Yudha dkk., 2022). Salah satu aplikasi pemanfaatan energi panas bumi secara langsung adalah pengendalian temperatur air kolam budidaya dengan menggunakan penukar kalor. Pemanfaatan panas bumi bertemperatur relatif rendah untuk keperluan langsung telah dibahas oleh Thain dkk. (2006), sedangkan perkembangan pemanfaatannya secara global ditunjukkan pada Gambar 1 (Lund & Toth, 2021).



Gambar 1: Pemanfaatan langsung energi panas bumi di seluruh dunia dari tahun 1995-2020 (Lund & Toth, 2021)

Gambar 1 memperlihatkan perkembangan pemanfaatan panas bumi secara langsung di beberapa sektor pada 1995–2020. Dalam akuakultur, pengendalian temperatur penting karena perubahan kondisi termal dapat memengaruhi proses biologis ikan dan kualitas lingkungan budidaya (Siddique dkk., 2024). Kinerja sistem pemanas kolam karena itu perlu dinilai bukan hanya dari kemampuan mencapai temperatur tertentu, tetapi juga dari waktu yang diperlukan dan kondisi operasi yang digunakan.

Sebagai hewan poikiloterm, ikan dipengaruhi oleh temperatur air tempat hidupnya. Perubahan temperatur yang tajam dapat menimbulkan tekanan fisiologis, sedangkan temperatur yang tidak sesuai juga dapat memengaruhi kandungan oksigen terlarut dan proses metabolisme. Pengaturan temperatur dalam rentang yang sesuai dapat membantu menciptakan kondisi budidaya yang lebih stabil (Ridwantara dkk., 2019; Siddique dkk., 2024).

Ikan mas (*Cyprinus carpio*) merupakan salah satu komoditas akuakultur air tawar di Indonesia. Penelitian terdahulu mengaitkan pengendalian temperatur dengan pertumbuhan serta perkembangan ikan mas (Ridwantara dkk., 2019; Li dkk., 2024). Dalam penelitian ini, temperatur air 28 °C dipilih sebagai nilai sasaran (*setpoint*) untuk mengevaluasi sistem pemanas. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan teknis percobaan, bukan sebagai bukti bahwa perangkat telah diuji pada kolam yang berisi ikan hidup.

Penukar kalor pipa ganda (*double-pipe heat exchanger*, DPHE) merupakan salah satu pilihan untuk memindahkan panas dari fluida sumber ke aliran air kolam tanpa mencampurkan kedua fluida. Penelitian sebelumnya banyak membahas peningkatan perpindahan panas melalui pita terpuntir, perubahan geometri pipa, dan modifikasi fluida kerja (Kola dkk., 2021; Dandoutiya & Kumar, 2022; Al-Zahrani, 2023; Gabir dkk., 2024). Untuk aplikasi kolam, Romadhona (2022) meneliti simulasi dan kendali DPHE pada sistem nonresirkulasi. Namun, data eksperimen mengenai perubahan durasi pemanasan akibat kombinasi temperatur sumber panas dan debit fluida pada rancangan semacam ini masih perlu diperkuat.

Penelitian ini mengevaluasi secara eksperimental 12 kombinasi kondisi operasi, yaitu tiga temperatur sumber panas (40, 50, dan 60 °C) dan empat pengaturan tegangan pompa (3,5; 7; 10,5; dan 14 V). Pengaturan tersebut menghasilkan variasi debit fluida panas yang kemudian dihubungkan dengan durasi pemanasan air kolam dari 25 hingga 28 °C. Kontribusi penelitian terletak pada penyajian data komparatif durasi pemanasan sistem DPHE nonresirkulasi beserta hubungan empiris antara tegangan pompa dan debit dalam rentang pengujian.

Tujuan penelitian adalah menganalisis hubungan temperatur sumber panas dan debit fluida panas dengan waktu pencapaian setpoint 28 °C pada model kolam ikan mas. Sumber panas berasal dari air yang dipanaskan secara elektrik untuk merepresentasikan kondisi termal sumber panas bumi; tidak digunakan fluida panas bumi yang diambil langsung dari lapangan. Pengujian dilakukan tanpa ikan hidup, sehingga hasilnya dibatasi pada respons temperatur air dan kinerja fungsional instalasi.

2. METODE

Penelitian menggunakan metode eksperimen pada sistem pemanas kolam skala laboratorium di Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan. Rangkaian terdiri atas penampung air panas dengan pemanas listrik, pompa, DPHE beraliran berlawanan arah, saluran air dingin, dan kolam terpal. Variabel bebas adalah temperatur air panas masuk dan pengaturan tegangan pompa; respons utama ialah durasi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur air kolam dari 25 menjadi 28 °C.

Temperatur air panas diatur pada 40, 50, dan 60 °C. Tegangan pompa divariasikan pada 3,5; 7; 10,5; dan 14 V, kemudian debit aktual diukur untuk setiap pengaturan. Dengan menggabungkan kedua faktor tersebut diperoleh 12 kombinasi pengujian. Temperatur yang dipilih mengacu pada rentang kondisi yang dibahas dalam literatur panas bumi lokal (Suharno dkk., 2014), sedangkan penggunaannya di sini merupakan simulasi termal dengan air panas.

Kolam pengujian berupa kolam terpal berukuran panjang 2 m, lebar 1 m, dan tinggi 1 m (Gambar 2). Sebanyak sembilan termokopel ditempatkan pada beberapa titik pengukuran untuk memantau sebaran temperatur air. Batas penyimpangan temperatur yang ditargetkan adalah ±0,5 °C terhadap temperatur sasaran 28 °C.



Gambar 2: Kolam pengujian skala laboratorium

Pemindahan panas dilakukan menggunakan DPHE tiga lintasan (*pass*) dengan panjang lintasan 0,7 m sehingga panjang nominal keseluruhan mencapai 2,1 m. Fluida panas mengalir di pipa tembaga bagian dalam, sedangkan air yang akan dialirkan menuju kolam melewati anulus pipa PVC dengan arah aliran berlawanan (*counterflow*). Pengaturan ini dipilih berdasarkan prinsip perbedaan temperatur antardua fluida yang mendukung perpindahan panas (Bergman dkk., 2019). Rancangan alat ditampilkan pada Gambar 3 dan data dimensinya pada Tabel 1.



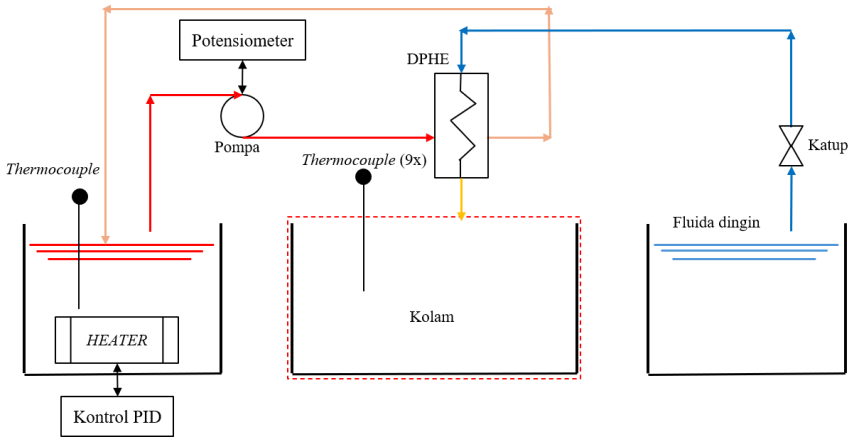
Gambar 3: *Double-pipe heat exchanger*

Tabel 1: Spesifikasi penukar kalor pipa ganda

Komponen	Pipa Dalam	Pipa Luar
Jenis Penukar kalor	*Double-Pipe Heat Exchanger*	
Konfigurasi Aliran	*Counterflow*	
Jumlah Lintasan	3 (2,1 m)	
Panjang Haluan (m)	0,7	
Material Pipa	Tembaga	PVC
Diameter dalam (mm)	6,35	15,8
Diameter luar (mm)	6,88	18,8
Ketebalan pipa (mm)	0,5	3
Fluida Kerja	Panas	Dingin

Pada sisi panas, dua pemanas listrik berdaya nominal masing-masing 2.000 W memanaskan air di dalam bak penampung. Pengendali temperatur PID REX-C100 dengan penggerak SSR digunakan untuk menjaga nilai temperatur yang ditetapkan. Setelah temperatur bak tercapai, pompa DC mengalirkan air panas menuju pipa dalam DPHE. Tegangan pompa diatur menggunakan potensiometer untuk menghasilkan beberapa tingkat debit. Air yang telah melepaskan panas kemudian dikembalikan ke bak penampung dan dipanaskan kembali. Dengan demikian, sirkuit air panas bersifat resirkulasi, sedangkan aliran menuju kolam dari sisi dingin dirancang nonresirkulasi.

Pada sisi dingin, air dari jaringan suplai dialirkan melalui katup menuju anulus DPHE, berlawanan arah dengan aliran air panas. Air yang keluar dari DPHE kemudian masuk ke kolam. Temperatur air kolam diamati menggunakan termokopel dan durasi pemanasan dicatat dengan stopwatch. Pengujian diakhiri ketika nilai sasaran 28 °C tercapai menurut prosedur pengamatan yang digunakan. Susunan sistem diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4: Skema instalasi dan sistem pengujian

Pengujian dilaksanakan pada Oktober 2025 di ruang semi-terbuka Institut Teknologi Sumatera, pada rentang pukul 10.00–18.00 WIB. Air dingin berasal dari jaringan air gedung dan debitnya diatur dengan posisi bukaan katup yang sama.

Debit volumetrik fluida ditentukan dengan mengukur volume air yang terkumpul selama selang waktu tertentu. Perhitungannya menggunakan Persamaan (1), yaitu rasio volume terhadap waktu pengisian. Prosedur yang sama diterapkan pada sisi panas dan dingin.$(L/min)(menit)(Liter)$

$$Q = \frac{V}{t} \tag{1}$$

Besaran debit pada Persamaan (1) dinyatakan dalam L/menit setelah satuan volume dan waktu disesuaikan. Pengukuran ini digunakan untuk menghubungkan pengaturan tegangan pompa dengan debit aktual, bukan untuk menyamakan kedua besaran tersebut (Bergman dkk., 2019).

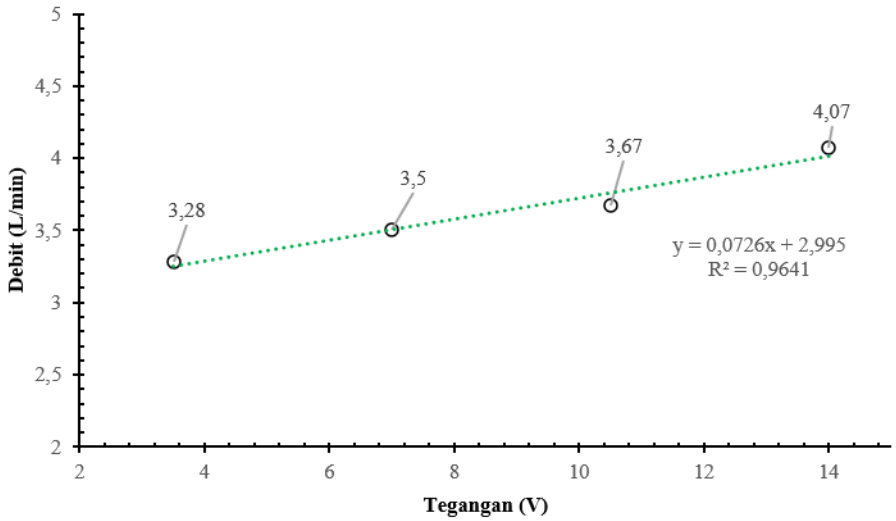
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Seluruh 12 kombinasi temperatur sumber panas dan pengaturan tegangan pompa telah diuji. Pada sisi dingin, temperatur awal yang dilaporkan adalah 25 °C dengan debit sekitar 5,41 L/menit. Debit pada sisi panas meningkat seiring kenaikan tegangan pompa, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Kondisi ini menjadi dasar untuk membandingkan durasi pemanasan pada Tabel 3.

Tabel 2: Hubungan tegangan pompa dengan debit fluida panas

Tegangan pompa (V)	Debit fluida panas (L/menit)
3,5	3,28
7	3,5
10,5	3,67
14	4,07

Hubungan antara tegangan pompa dan debit fluida panas ditampilkan pada Gambar 5. Grafik tersebut digunakan untuk menjelaskan perubahan debit dalam rentang tegangan yang diuji, tanpa memperluas persamaan ke kondisi di luar rentang pengamatan.



Gambar 5: Hubungan antara tegangan pompa dan debit fluida panas

Berdasarkan Tabel 2, debit fluida panas meningkat dari 3,28 L/menit pada 3,5 V menjadi 4,07 L/menit pada 14 V. Nilai antara keduanya adalah 3,50 L/menit pada 7 V dan 3,67 L/menit pada 10,5 V. Hubungan linier empiris yang diperoleh adalah Q = 0,0726V + 2,995, dengan Q dalam L/menit dan V dalam volt, serta koefisien determinasi $R^2 = 0{,}9641$. Hubungan ini menggambarkan kecenderungan data pada empat titik pengukuran; intersep tidak boleh ditafsirkan sebagai debit pompa saat tegangan nol karena pengoperasian pada 0 V

tidak diuji. Nilai R^2 juga tidak membuktikan hubungan sebab-akibat ataupun ketelitian model di luar data kalibrasi.$y = 0{,}0726x + 2{,}995$.

Durasi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur air kolam dari 25 menjadi 28 °C disajikan pada Tabel 3. Waktu total dihitung sebagai penjumlahan durasi tiga interval kenaikan temperatur, yakni 25–26, 26–27, dan 27–28 °C.

Tabel 3: Hasil eksperimen temperatur sumber panas, tegangan pompa, dan durasi pemanasan

Temperatur sumber panas (°C)	Tegangan Pompa (V)	Durasi kenaikan 1 °C (menit)			Total Durasi (menit)	Rerata Kenaikan 1 °C (menit)
		25 °C → 26 °C	26 °C → 27 °C	27 °C → 28 °C		
40	3,5	20	52	88	160	53,33
40	7	11	37	83	131	43,67
40	10,5	10	32	59	101	33,67
40	14	7	39	43	89	29,67
50	3,5	10	18	27	55	18,33
50	7	8	12	22	42	14
50	10,5	7	12	20	39	13
50	14	5	6	21	32	10,67
60	3,5	9	7	20	36	12
60	7	7	8	11	26	8,67
60	10,5	5	7	8	20	6,67
60	14	4	6	8	18	6

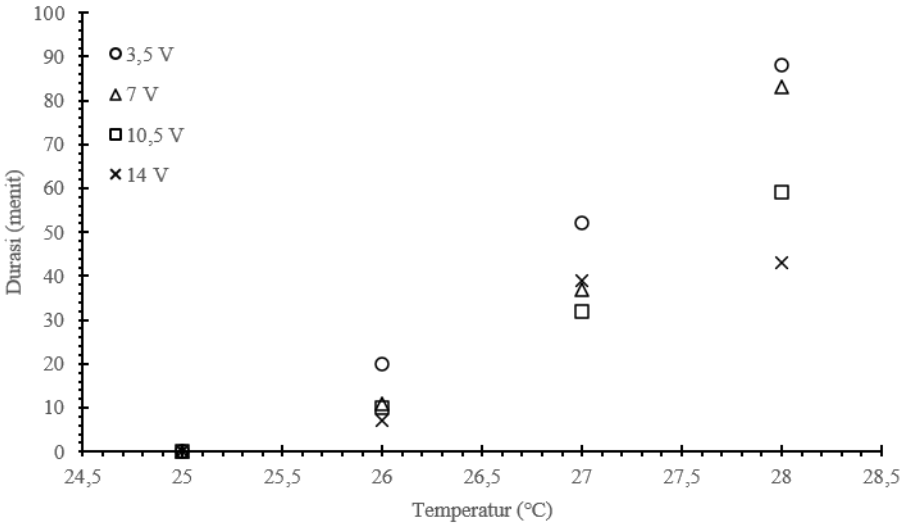
Catatan: temperatur awal pengamatan 25 °C; temperatur sasaran (setpoint) 28 °C. Setiap kombinasi kondisi operasi dilaporkan dari satu percobaan.

Tabel 3 menunjukkan bahwa durasi pemanasan secara umum berkurang ketika temperatur sumber panas dinaikkan. Pada setiap temperatur sumber panas yang sama, peningkatan debit melalui pengaturan tegangan pompa juga berasosiasi dengan penurunan durasi pemanasan total. Kecenderungan ini dianalisis lebih lanjut menurut kondisi sumber panas.

Durasi pemanasan total berkisar antara 18 menit pada 60 °C dan 14 V serta 160 menit pada 40 °C dan 3,5 V, setara dengan rasio durasi sekitar 8,9 kali. Secara umum, kenaikan temperatur dari 27 ke 28 °C memerlukan waktu lebih lama daripada interval awal pada kondisi sumber panas rendah. Pola ini sesuai dengan berkurangnya beda temperatur sebagai gaya pendorong perpindahan panas selama air kolam menghangat, tetapi pengaruh kehilangan panas dan fluktuasi temperatur lingkungan tidak diukur secara terpisah.

3.1 Pengaruh Temperatur Sumber Panas 40 °C terhadap Durasi Pemanasan

Pada sumber panas 40 °C, durasi pemanasan cenderung paling lama dibandingkan dua temperatur sumber panas lainnya. Perbedaan temperatur antara fluida panas dan air kolam yang lebih kecil membatasi besarnya gaya pendorong perpindahan panas. Data tiap interval temperatur pada kondisi ini diperlihatkan pada Gambar 6.

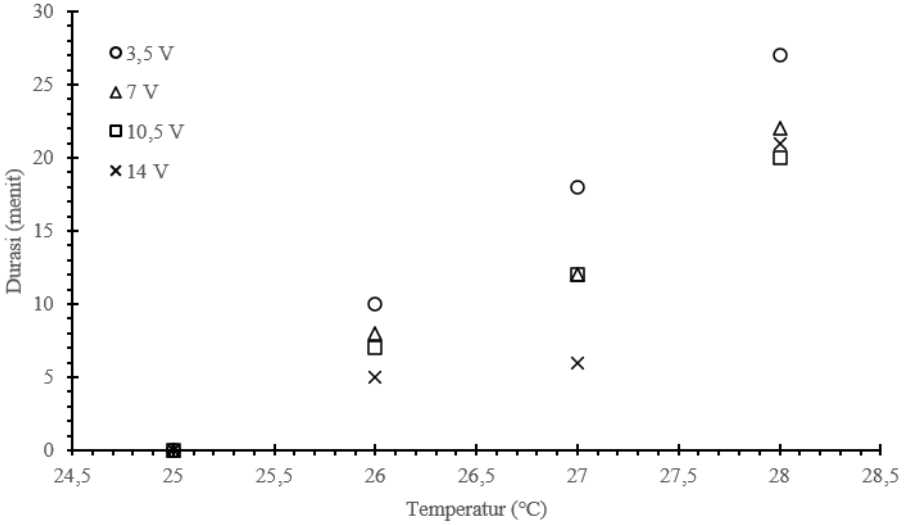


Gambar 6: Durasi kenaikan temperatur setiap 1 °C pada sumber panas 40 °C

Pada sumber panas 40 °C, durasi pemanasan total turun dari 160 menit pada tegangan pompa 3,5 V menjadi 89 menit pada 14 V. Penurunan durasi tersebut sebesar sekitar 44,4 %. Rincian interval menunjukkan bahwa pada 3,5 V diperlukan 20, 52, dan 88 menit untuk tiga kenaikan temperatur berturut-turut, sedangkan pada 14 V diperlukan 7, 39, dan 43 menit. Walaupun debit yang lebih tinggi memperpendek durasi pemanasan, durasi pada sumber panas 40 °C tetap lebih lama daripada pada 50 dan 60 °C.

3.2 Pengaruh Temperatur Sumber Panas 50 °C terhadap Durasi Pemanasan

Pada temperatur sumber panas 50 °C, pemanasan berlangsung lebih cepat daripada pada 40 °C. Beda temperatur yang lebih besar meningkatkan potensi aliran panas dari fluida di pipa dalam ke air pada anulus DPHE. Perubahan waktu tiap interval pada kondisi ini disajikan pada Gambar 7.

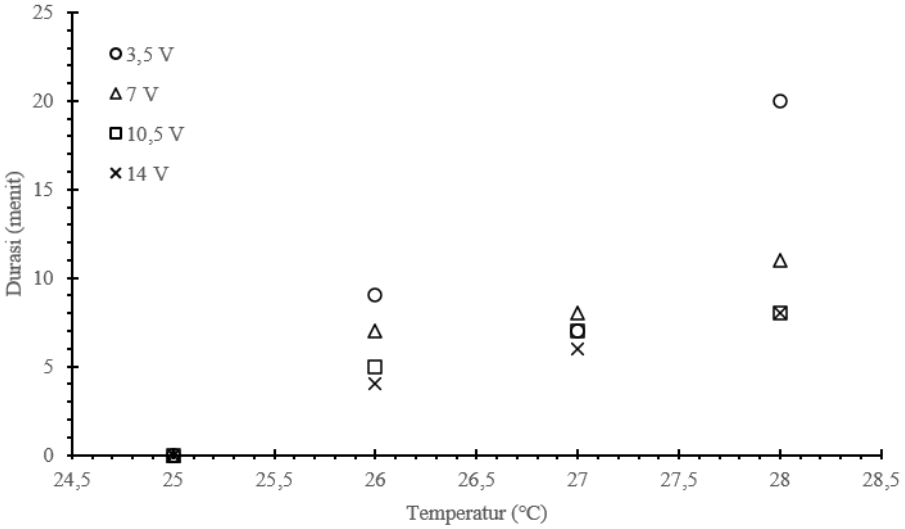


Gambar 7: Durasi kenaikan temperatur setiap 1 °C pada sumber panas 50 °C

Berdasarkan Tabel 3, pada sumber panas 50 °C dan tegangan 3,5 V, waktu untuk menaikkan temperatur berturut-turut sebesar 10, 18, dan 27 menit. Ketika tegangan dinaikkan menjadi 14 V, interval tersebut menjadi 5, 6, dan 21 menit. Akibatnya, waktu total turun dari 55 menjadi 32 menit, atau berkurang sekitar 41,8 %. Nilai ini menunjukkan kecenderungan penurunan durasi pemanasan pada debit yang lebih besar, tetapi pengaruhnya belum dapat dipisahkan sepenuhnya dari kondisi eksperimen lain karena tidak tersedia ulangan independen.

3.3 Pengaruh Temperatur Sumber Panas 60 °C terhadap Durasi Pemanasan

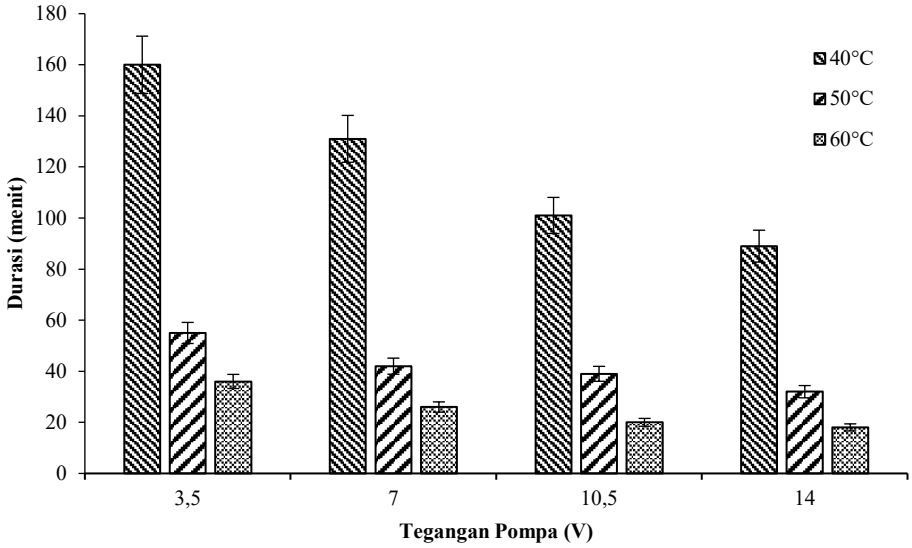
Temperatur sumber panas 60 °C menghasilkan durasi pemanasan terpendek di antara ketiga tingkat temperatur yang diuji. Pada kondisi tersebut, beda temperatur fluida panas dan air kolam lebih besar sejak awal pengujian. Rincian perubahan waktu setiap kenaikan 1 °C diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8: Durasi kenaikan temperatur setiap 1 °C pada sumber panas 60 °C

Pada 60 °C, durasi pemanasan total berkisar antara 36 menit pada 3,5 V dan 18 menit pada 14 V. Artinya, peningkatan debit dalam rentang pengujian diikuti oleh pengurangan waktu total sebesar 50 %. Namun, selisih absolutnya hanya 18 menit, lebih kecil daripada selisih 71 menit pada sumber panas 40 °C. Perbandingan absolut dan relatif ini perlu dibaca bersama karena nilai awal durasi berbeda pada setiap temperatur sumber panas.

Secara deskriptif, kombinasi sumber panas dengan temperatur lebih tinggi dan debit air panas lebih besar menghasilkan pemanasan air kolam yang lebih cepat. Namun, rancangan tanpa pengulangan tidak memungkinkan pemisahan galat acak dari kemungkinan interaksi antarvariabel. Oleh sebab itu, pola kombinasi faktor disajikan sebagai hasil pengamatan, bukan bukti kuantitatif pengaruh interaksi yang telah diuji.



Gambar 9: Hubungan temperatur sumber panas dan tegangan pompa dengan durasi pemanasan

Gambar 9 merangkum penurunan durasi pemanasan pada seluruh kombinasi. Pada tegangan pompa 3,5 V, kenaikan temperatur sumber panas dari 40 menjadi 60 °C mengurangi waktu dari 160 menjadi 36 menit (77,5 %). Pada tegangan 14 V, waktu turun dari 89 menjadi 18 menit (79,8 %). Sebaliknya, pada masing-masing temperatur sumber panas, peningkatan tegangan pompa dari 3,5 ke 14 V menghasilkan pengurangan waktu sekitar 41,8–50,0 %. Dalam rentang kondisi yang diamati, perubahan temperatur sumber panas berkaitan dengan perbedaan durasi pemanasan yang lebih besar daripada perubahan debit.

Ketidakpastian durasi pemanasan pada Gambar 9 dihitung dengan metode Kline–McClintock (Kline & McClintock, 1953) dari resolusi pencatatan waktu (±0,5 menit per interval) dan resolusi termokopel (0,1 °C). Ketidakpastian durasi total berkisar ±1,38 hingga ±10,45 menit (Tabel 4).

Tabel 4: Durasi pemanasan total beserta ketidakpastian pengukuran

Tegangan pompa (V)	40 °C	50 °C	60 °C
3,5	160 ± 10,45 (6,5 %)	55 ± 3,50 (6,4 %)	36 ± 2,46 (6,8 %)
7	131 ± 9,19 (7,0 %)	42 ± 2,77 (6,6 %)	26 ± 1,76 (6,8 %)
10,5	101 ± 6,84 (6,8 %)	39 ± 2,58 (6,6 %)	20 ± 1,46 (7,3 %)
14	89 ± 5,91 (6,6 %)	32 ± 2,40 (7,5 %)	18 ± 1,38 (7,7 %)

Batang galat pada Gambar 9 menunjukkan bahwa ketidakpastian durasi relatif kecil dibandingkan selisih antar temperatur sumber panas. Pada 3,5 V, misalnya, durasi 160, 55, dan 36 menit untuk 40, 50, dan 60 °C berbeda jauh melampaui ketidakpastiannya, sehingga pola penurunan durasi akibat kenaikan temperatur sumber panas tidak berubah oleh galat pengukuran. Sebaliknya, pada 60 °C selisih durasi 20 menit (10,5 V) dan 18 menit (14 V) setara dengan ketidakpastian gabungannya (±2,0 menit), sehingga kedua kondisi tersebut belum dapat dibedakan secara tegas. Ketidakpastian ini belum mencakup waktu reaksi operator dan variasi antarulangan.

Analisis ragam dua arah tanpa pengulangan pada Tabel 3 menghasilkan $F(2,6) = 56{,}69$ dan $p < 0{,}001$ untuk faktor temperatur sumber panas, sedangkan faktor tegangan pompa menghasilkan $F(3,6) = 4{,}44$ dan $p = 0{,}057$. Hasil tersebut menunjukkan perbedaan yang lebih jelas antarlevel temperatur sumber panas dalam model aditif yang digunakan. Namun, karena setiap kombinasi faktor hanya diukur sekali, komponen interaksi tidak dapat dipisahkan dari galat dan asumsi model tidak dapat diuji secara memadai. Nilai p harus diperlakukan sebagai analisis eksploratif, bukan konfirmasi inferensial yang kuat. Variabel debit aktual juga berbeda dari variabel tegangan pompa yang digunakan dalam ANOVA.

Keterbatasan penelitian meliputi tidak adanya ulangan independen pada 12 kombinasi pengujian, pencatatan durasi dengan stopwatch, dan penggunaan empat titik untuk membangun regresi debit terhadap tegangan. Pengujian dilaksanakan dalam ruang semi-terbuka dengan temperatur lingkungan yang dapat mendekati atau melebihi setpoint, tetapi kehilangan atau perolehan panas dari lingkungan belum dihitung. Sumber panas juga berasal dari air yang dipanaskan elektrik, bukan fluida panas bumi lapangan. Selain itu, percobaan dilakukan tanpa ikan hidup, sehingga hasilnya tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan kinerja biologis atau keselamatan budidaya. Evaluasi tahap berikutnya perlu memasukkan ulangan terkontrol, pemantauan temperatur di setiap titik kolam, neraca energi, serta pengujian dengan kondisi lapangan yang lebih representatif.

4. KESIMPULAN

Sistem penukar kalor pipa ganda beraliran berlawanan arah mampu menaikkan temperatur air kolam dari 25 hingga 28 °C pada seluruh kombinasi yang diuji. Durasi pemanasan terpendek adalah 18 menit pada sumber panas 60 °C dengan tegangan pompa 14 V (debit 4,07 L/menit), sedangkan waktu terpanjang adalah 160 menit pada 40 °C dan 3,5 V (debit 3,28 L/menit). Dalam rentang pengujian, temperatur sumber panas yang lebih tinggi dan debit yang lebih besar berkaitan dengan durasi lebih singkat. Analisis ragam eksploratif menunjukkan perbedaan yang lebih jelas antarlevel temperatur sumber panas ($p < 0{,}001$) dibandingkan antarlevel tegangan pompa ($p = 0{,}057$).

Hasil penelitian ini memberikan karakterisasi awal terhadap kinerja sistem pemanas kolam nonresirkulasi dengan menggunakan sumber panas yang disimulasikan melalui pemanasan air secara elektrik. Tidak adanya pengulangan, belum tersedianya analisis neraca panas, dan belum terdokumentasinya stabilitas sebaran temperatur membatasi generalisasi hasil. Validasi lanjutan diperlukan melalui pengujian berulang, pengukuran ketidakpastian, verifikasi keseragaman temperatur kolam, serta pengujian dengan kondisi sumber panas bumi dan lingkungan operasi yang sesungguhnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi melalui Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat atas dukungan pendanaan Skema Penelitian Dosen Pemula Tahun Anggaran 2025 melalui sistem BIMA (Kontrak Utama No. 018/C3/DT.05.00/PL/2025 dan Kontrak Turunan No. 1483cn/IT9.2.1/PT.01.03/2025). Apresiasi juga disampaikan kepada LPPM Institut Teknologi Sumatera atas dukungan fasilitas dan pelaksanaan penelitian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan finansial atau hubungan pribadi yang berpotensi memengaruhi pelaksanaan maupun pelaporan penelitian.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan naskah, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Putra Andi Kolala : Konseptualisasi, Metodologi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penyediaan Sumber Daya – Tinjauan dan Penyuntingan, Perolehan Pendanaan.
Ridho Agustian : Metodologi, Investigasi, Analisis Formal, Penulisan – Draf awal
Muhammad Syaukani : Supervisi, Validasi, Analisis Formal - Draf awal, Tinjauan dan Penyuntingan
Ilham Dwi Arrohman : Supervisi, Validasi, Analisis Formal - Tinjauan dan Penyuntingan
Rico Aditia Prahmana : Penulisan, Administrasi Proyek - Tinjauan dan Penyuntingan
Devia Gahana Cindi Aprilian : Validasi, Visualisasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan
Munawar Alfansury Siregar : Validasi, Visualisasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan
Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Zahrani, S. (2023). Heat Transfer Characteristics of Innovative Configurations of Double-Pipe Heat Exchanger. Heat and Mass Transfer, 59(9), 1661–1675.

Bergman, T. L. ., Lavine, Adrienne., & Incropera, F. P. . (2019). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

Dandoutiya, B. K., & Kumar, A. (2022). W-cut twisted tape's effect on the thermal performance of a double-pipe heat exchanger: A numerical study. Case Studies in Thermal Engineering, 34, 1-11.

Darma, S., Imani, Y. L., Shidqi, M. N. A., Riyanto, T. D., & Daud, M. Y. (2020). Country Update: The Fast Growth of Geothermal Energy Development in Indonesia. Proceedings World Geothermal Congress.

Gabir, M. M., Albayati, I. M., Hatami, M., & Alkhafaji, D. (2024). An experimental investigation of the convective heat transfer augmentation in U-bend double-pipe heat exchanger using water-MgO-Cmc fluid. Scientific Reports, 14(1), 1-13.

Kola, P. V. K. V., Pisipaty, S. K., Mendu, S. S., & Ghosh, R. (2021). Optimization of performance parameters of a double-pipe heat exchanger with cut twisted tapes using CFD and RSM. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 163, 1-14.

Li, H., Cui, Z., Cui, H., Bai, Y., Yin, Z., & Qu, K. (2023). A Review of Influencing Factors on A Recirculating Aquaculture System: Environmental Conditions, Feeding Strategies, and Disinfection Methods. Journal of the World Aquaculture Society, 54(3), 566–602.

Li, Y., Chen, K., Gui, B., Yang, C., He, L., Liao, L., Zhu, Z., Wang, Y., & Huang, R. (2024). Effect of Long-Term Temperature-Controlled Rearing on Growth Traits and Sexual Maturity of Common Carp (Cyprinus carpio). Aquaculture, 593, 1-8.

Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Geothermics, 90, 1-31.

Ridwantara, D., Buwono, I. D., Suryana, A. A. H., Lili, W., & Bangkit, I. (2019). Uji Kelangsungan Hidup dan Pertumbuhan Benih Ikan Mas Mantap (Cyprinus carpio) pada Rentang Suhu yang Berbeda. Jurnal Perikanan dan Kelautan, X(1), 46–54.

Romadhona, M. (2022). Simulasi Kontrol dan Eksperimen Pada Kolam Ikan Nila Menggunakan Double-Pipe Heat Exchanger Non Sirkulasi dengan Disturbance Temperatur Panas Bumi dan Udara. Institut Teknologi Bandung.

Salhein, K., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2022). Forecasting Installation Capacity for the Top 10 Countries Utilizing Geothermal Energy by 2030. Thermo, 2(4), 334–351.

Siddique, M. A. B., Mahalder, B., Haque, M. M., & Ahammad, A. K. S. (2024). Impact of climatic factors on water quality parameters in tilapia broodfish ponds and predictive modeling of pond water temperature with ARIMAX. *Heliyon*, *10*(18), 1-19.

Suharno, Amukti, R., Hidayatika, A., & Putri, M. K. (2014). Lapangan Panasbumi Natar Lampung, Indonesia. Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2014.

Thain, I., Reyes, A. G., & Hunt, T. (2006). A Practical Guide to Exploiting Low Temperature Geothermal Resources. GNS Science Taupo.

Yudha, S., Tjahjono, B., & Longhurst, P. (2022). Unearthing the Dynamics of Indonesia's Geothermal Energy Development. Energies, 15(14), 1-18.