



Sistem Pengontrol Suhu CNC Laser Cutting 40W dengan Modul TEC1-12706

Abidin Rohmatulloh *, Muhammad Kusban

Program Studi Teknik Elektro – Universitas Muhammadiyah Surakarta
Surakarta, Indonesia

*d400170035@student.ums.ac.id

Abstract – Effective temperature management is critical for maintaining the operational integrity of laser tubes, which emit energy in the form of light and heat. Uncontrolled heat can cause significant damage to the laser tube. In this context, the implementation of a temperature control system using the TEC1-12706 thermoelectric module proves to be invaluable. Thermoelectric modules like the TEC1-12706 convert electrical energy into thermal energy, which can be utilized to either heat or cool the environment. This technology is environmentally friendly, as it operates without the use of Freon. The system functions by circulating water from the laser tube to the Peltier module, which is cooled before being recirculated to the tube. The control system is equipped with two sensors: a temperature sensor and a water flow sensor. The operational parameters are set such that the temperature must remain between 25°C and 35°C, and the flow rate of the water should not drop below 20 liters per minute. Experimental results indicate that the TEC1-12706 module effectively reduces the temperature of the laser system by enhancing the air circulation within the tube.

Abstrak – Pengelolaan suhu yang efektif sangat penting untuk menjaga integritas operasional tabung laser, yang memancarkan energi dalam bentuk cahaya dan panas. Panas yang tidak terkontrol dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada tabung laser. Dalam konteks ini, implementasi sistem kontrol suhu menggunakan modul termoelektrik TEC1-12706 terbukti sangat berharga. Modul termoelektrik seperti TEC1-12706 mengubah energi listrik menjadi energi termal, yang dapat digunakan untuk memanaskan atau mendinginkan lingkungan. Teknologi ini ramah lingkungan, karena beroperasi tanpa menggunakan Freon. Sistem ini berfungsi dengan mengalirkan air dari tabung laser ke modul Peltier, yang didinginkan sebelum disirkulasikan kembali ke tabung. Sistem kontrol dilengkapi dengan dua sensor: sensor suhu dan sensor aliran air. Parameter operasional ditetapkan sedemikian rupa sehingga suhu harus tetap antara 25°C dan 35°C, dan laju aliran air tidak boleh turun di bawah 20 liter per menit. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa modul TEC1-12706 secara efektif mengurangi suhu sistem laser dengan meningkatkan sirkulasi udara di dalam tabung.

Kata Kunci – Pengelolaan suhu laser; modul TEC1-12706; sensor suhu; teknologi ramah lingkungan; sirkulasi udara tabung laser.

I. PENDAHULUAN

PENGENDALIAN suhu merupakan komponen kritis dalam industri, terutama dalam industri yang memanfaatkan teknologi laser cutting. Stabilitas suhu yang optimal diperlukan untuk memastikan efisiensi dan keakuratan dalam proses pemotongan dengan laser. Dalam konteks ini, laser seperti CO₂, Dioda, dan Fiber membutuhkan sistem pendinginan yang andal untuk menjaga kinerja komponen seperti resonator, optik, dan kepala laser. Secara tradisional, sistem pendinginan ini menggunakan sirkulasi fluida cair, seperti air, campuran glikol, atau air deionisasi untuk mengeluarkan panas dari tabung laser. Fluida tersebut berperan pen-

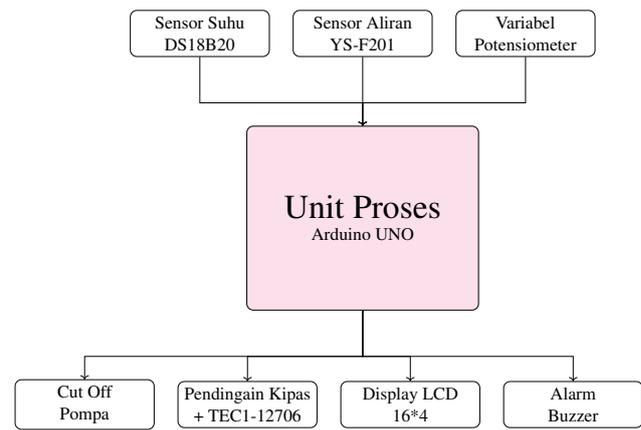
ting dalam mencegah overheating yang dapat merusak komponen laser dan mempengaruhi hasil pemotongan. Berbagai studi telah mengeksplorasi penggunaan sistem pendinginan yang berbeda untuk laser. Ulitenko [1] mengusulkan sistem pendinginan cairan terintegrasi untuk laser CO₂, sementara Callenas [2] menekankan pentingnya stabilitas termal dalam desain laser CO₂ waveguide yang dieksitasi RF. Jebali [3] dan Naeem [4] keduanya berfokus pada stabilisasi laser CO₂, dengan Jebali mengembangkan sistem kontrol umpan balik optikal dan Naeem merancang sistem laser CO₂ medium power dengan tabung tertutup dan sistem pendinginan prototipe. Dabulytè [5] mengoptimalkan rezim suhu dalam laser padat yang dipompa dioda menggunakan pendinginan air, dan Karni [6] memperkenalkan solusi pendinginan aktif untuk tumpukan dioda laser berdaya tinggi, termasuk paket berbasis pendingin mikrokanal

Naskah diterima 02-09-2023, revisi 10-01-2024, terbit online 29-03-2024. Emitor merupakan Jurnal Teknik Elektro – Universitas Muhammadiyah Surakarta yang terakreditasi dengan Sinta 3 beralamat di <https://journals2.ums.ac.id/index.php/emitor/index>.

dan tumpukan dioda laser berdaya tinggi yang tahan terhadap korosi.

Namun, penggunaan refrigeran konvensional dalam sistem pendinginan ini menimbulkan masalah lingkungan. Refrigeran seperti CFC dan HCFC dikenal memiliki potensi merusak lapisan ozon. Di sisi lain, peningkatan kesadaran lingkungan dan regulasi yang ketat mengharuskan industri untuk mencari alternatif yang lebih berkelanjutan. Penggunaan refrigeran konvensional dalam sistem pendinginan, seperti CFC dan HCFC, telah menimbulkan kekhawatiran lingkungan karena potensinya merusak lapisan ozon [7]. Akibatnya, terdapat minat yang meningkat dalam pengembangan dan implementasi refrigeran ramah lingkungan dengan potensi pemanasan global yang minimal dan tanpa potensi merusak ozon [8]. Refrigeran alami seperti NH₃, CO₂, dan hidrokarbon, serta hidrofluoroolefin (HFO) dan hidrofluorokarbon (HFC) dengan GWP yang sangat rendah, sedang diteliti sebagai pengganti potensial [7]. Transisi ke alternatif ini sangat penting untuk mencapai sistem pendinginan dan pengkondisian udara yang berkelanjutan [7]. Namun, implikasi keselamatan dari refrigeran alternatif ini, khususnya pada sistem baru, perlu dievaluasi dengan cermat [9]. Industri juga sedang mengeksplorasi sistem refrigeran berbasis karbon dioksida sebagai alternatif yang menjanjikan [10]. Penggunaan refrigeran ramah lingkungan, seperti hidrokarbon, didorong untuk mematuhi regulasi lingkungan global [11]. Protokol Montreal secara efektif mengontrol penggunaan refrigeran yang merusak ozon, dan upaya sedang dilakukan untuk mengembangkan teknologi refrigerasi yang lebih ramah lingkungan [12–14].

Dalam hal ini, teknologi Peltier dengan modul TEC1-12706 menawarkan solusi yang menjanjikan. Modul Peltier memungkinkan konversi langsung dari energi listrik menjadi panas atau dingin tanpa memerlukan bahan kimia berbahaya. Efek Peltier, yang melibatkan semikonduktor tipe-n dan tipe-p, menyediakan pendinginan efektif dengan mengatur sisi yang satu menjadi dingin dan yang lain menjadi panas, sesuai dengan kebutuhan operasional. Selanjutnya, penggunaan modul ini tidak hanya mengurangi risiko kerusakan lingkungan, tetapi juga menawarkan kontrol suhu yang lebih presisi dan adaptif, yang sangat diperlukan dalam aplikasi CNC laser cutting. Teknologi Peltier, khususnya dengan modul TEC1-12706, menawarkan solusi yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi. Potensi sistem pendinginan Peltier dalam aplikasi laser dan kemampuan mereka untuk menyediakan kontrol suhu yang presisi telah dihighlight dalam penelitian [15, 16]. Penggunaan perangkat Peltier untuk termostat peralatan elektronik dan pendinginan on-chip juga telah dibahas, menunjukkan keberagaman mereka dalam aplikasi



Gambar 1: Diagram blok penelitian

si [17, 18], kemampuan kontrol suhu dari sel Peltier dan pengusulan solusi inovatif menggunakan saluran pendingin tertanam [19, 20]. Metode untuk meningkatkan kinerja perangkat Peltier, termasuk penggunaan bahan perubahan fase dan fabrikasi perangkat pendinginan on-chip [21, 22].

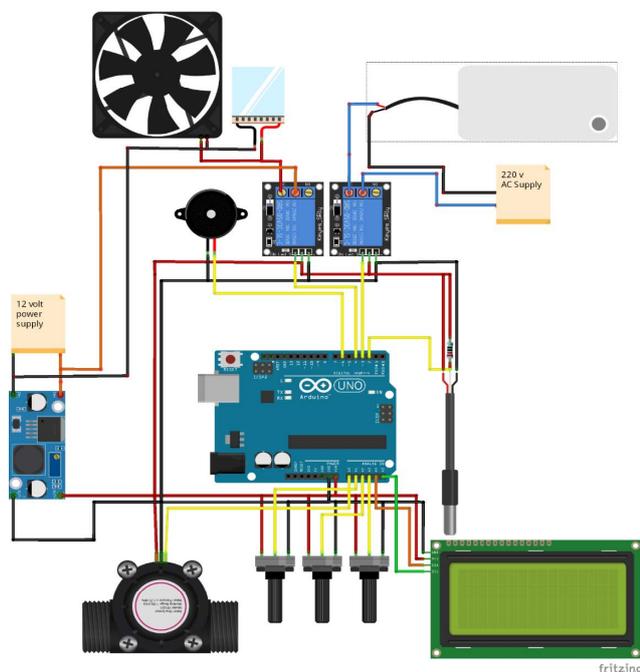
Mengingat pentingnya efisiensi energi dan minimisasi dampak lingkungan, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pengontrol suhu yang menggunakan modul Peltier TEC1-12706. Tujuan utamanya adalah untuk menciptakan sistem pendinginan otomatis yang dapat menjaga suhu operasional dalam batas yang aman dan efektif, serta menggantikan penggunaan refrigeran kimia dengan solusi yang lebih ramah lingkungan. Diharapkan, penggunaan teknologi ini dapat meningkatkan keberlanjutan industri pemotongan laser serta menghasilkan operasi yang lebih bersih dan efisien.

II. METODE PENELITIAN

Tabung laser CO₂ menggunakan pendingin eksternal berupa cairan yang dialirkan dari luar tabung ke dalam tabung untuk membawa panas keluar dari tabung laser. Perancangan alat ini yaitu dengan mensirkulasikan air untuk membawa panas dari tabung laser menuju pendingin. Air disirkulasikan dari reservoir menuju Tabung laser menggunakan selang. Di dalam tabung laser, air berfungsi sebagai carier atau pembawa panas dari tabung laser. Air yang membawa panas kemudian akan masuk ke dalam Water Block yang sudah terhubung dengan peltier TEC1-12706.

TEC1-12706 adalah modul thermoelectric yang mempunyai efek peltier. Saat modul teraliri arus DC 12 V, satu sisi akan terasa panas dan sisi lainnya akan terasa dingin. Bagian sisi yang panas diberi heatsink dan kipas untuk mentransfer energi panas menuju sirip dan membuangnya ke udara. Semakin cepat aliran udara pada kipas, akan semakin berkurang juga temperatur

pada sisi panas dan sisi dingin dikarenakan selisih suhu bagian panas berbanding lurus dengan suhu sisi dingin. Bagian sisi yang dingin akan digabungkan dengan water Block untuk mengurangi energi panas yang dibawa oleh air secara konduksi. Sehingga air yang keluar dari water block mempunyai suhu lebih rendah daripada sebelum masuk water block. Jika suhu air lebih rendah dari suhu minimal, peltier akan mati dan suhu akan naik disebabkan sirkulasi pada tabung laser. Proses ini akan berlangsung terus menerus hingga suhu air turun pada batas minimal suhu yang ditentukan. Debit air yang mengalir juga diukur untuk menjaga kinerja tabung laser. Terdapat sensor flow meter untuk mengukur laju air. Air yang tidak tersirkulasi dapat menyebabkan panas berkumpul pada tabung dan menyebabkan tabung pecah.



Gambar 2: Skema Pengkabelan Hardware

i. Perancangan Perangkat Keras

Secara garis besar, pendingin ini tersusun dari bagian input, mikrokontroler, dan output. Bagian input terdiri dari sensor suhu dan flowmeter. Sensor suhu difungsikan untuk membaca suhu air dari outlet tabung laser. Sedangkan sensor flowmeter untuk membaca kelajuan air yang mengalir pada tabung. Sensor suhu yang digunakan adalah DS18B20. Sensor DS18B20 dipilih karena memiliki fitur waterproof dan data output berupa data digital. Untuk sensor flowmeter yang digunakan adalah tipe YF-S201. Tipe ini paling mudah ditemukan di pasaran dan dapat mengukur aliran air hingga 30 liter/menit. pada bagian kontroler digunakan arduino uno sebagai pengontrolnya. Untuk bagian ou-

put terdiri dari peltier TEC1-12706, kipas DC, buzzer, relay laser, dan relay kipas. Modul TEC1-12706 menjadi pendingin utama. Modul TEC1-12706 memiliki dua sisi yaitu panas dan dingin. Kipas dc dan heatsink akan dipasang pada bagian panas peltier. Kipas DC berfungsi untuk menekan suhu pada sisi panas peltier agar suhu pada sisi dingin juga ikut turun. Kipas ini dikendalikan melalui relay karena pengaturan diatur oleh mikrokontroler. Kemudian relay pada laser berfungsi sebagai cut off atau pemutus suplai daya menuju mesin CNC laser agar pekerjaan diberhentikan sementara sampai suhu kembali normal. Keadaan suhu dapat dimonitor oleh operator melalui layar lcd. Selain itu, mesin dilengkapi dengan buzzer jika suhu telah melewati ambang batas maksimal. Perlengkapan lain yang digunakan yaitu selang plastik, water Block, Heat sink, kabel jumper, power supply 12V, Reservoir, dan pompa air. Bahan-bahan tersebut digunakan untuk melengkapi proses perakitan.

Komponen input nilai berupa potensiometer dan sensor YF-S201 terhubung dengan pin analog Arduino. Untuk sensor suhu DS18B20 menggunakan data digital dan dihubungkan dengan pin digital nomor dua. komponen output berupa relay sebagai saklar elektronik untuk mengontrol nyala kipas, peltier, dan daya laser. Komponen output lain yaitu lcd dan buzzer. Lcd dan buzzer berfungsi sebagai display data terukur secara real time dan peringatan jika kondisi yang berjalan tidak sesuai kriteria. Dalam perancangan hardware untuk sistem pengontrol suhu pada CNC Laser Cutting 40W dengan Modul TEC1-12706, ada beberapa langkah kritis yang perlu diikuti untuk menjamin fungsi sistem secara optimal dan efisien.

Langkah pertama dalam proses ini adalah memastikan bahwa semua komponen yang akan digunakan berfungsi dengan baik dan tidak ada kendala yang muncul. Proses ini melibatkan pengujian awal dari setiap komponen, seperti modul TEC1-12706, sensor flow meter, aktuator kipas, dan mesin laser itu sendiri. Memverifikasi bahwa tiap komponen dalam keadaan baik sangat penting untuk menghindari masalah yang mungkin muncul selama pemasangan atau operasi.

Setelah memastikan bahwa semua komponen dalam kondisi prima, langkah kedua adalah menghubungkan catu daya ke masing-masing komponen. Ini memastikan bahwa setiap bagian dari sistem memiliki sumber energi yang stabil dan dapat beroperasi dengan efektif.

Langkah ketiga adalah menghubungkan konektor input, yang meliputi sensor flow meter dan modul TEC1-12706. Sensor flow meter berperan penting dalam memantau dan mengatur aliran air yang digunakan untuk mendinginkan sistem laser, sedangkan modul

TEC1-12706 digunakan untuk mengatur suhu menggunakan efek peltier. Menghubungkan komponen-komponen ini dengan benar ke sistem kontrol utama adalah krusial karena akan mempengaruhi akurasi dari sistem pengontrol suhu secara keseluruhan.

Selanjutnya, langkah keempat melibatkan penghubungan konektor output, yang mencakup aktuator kipas dan mesin laser. Aktuator kipas digunakan untuk membantu proses pendinginan, sedangkan mesin laser adalah inti dari operasi pemotongan.

Langkah kelima adalah menetapkan variabel untuk batas maksimal dan minimal suhu serta debit air yang diperlukan, yang penting untuk menjaga operasi laser tetap stabil dan aman. Membuat parameter ini memungkinkan sistem untuk secara otomatis menyesuaikan operasi berdasarkan kondisi yang ada.

Langkah keenam dan terakhir adalah melakukan pengecekan fungsi dari masing-masing komponen setelah terpasang untuk memastikan semua beroperasi dengan benar. Tes ini mencakup memeriksa kesesuaian instalasi dan keakuratan respons sistem terhadap input yang diberikan. Pengecekan ini memungkinkan adanya koreksi terakhir sebelum sistem dioperasikan secara penuh, memastikan semua komponen bekerja sesuai harapan untuk mendukung operasi pemotongan laser yang efisien.

ii. Perancangan Perangkat Lunak

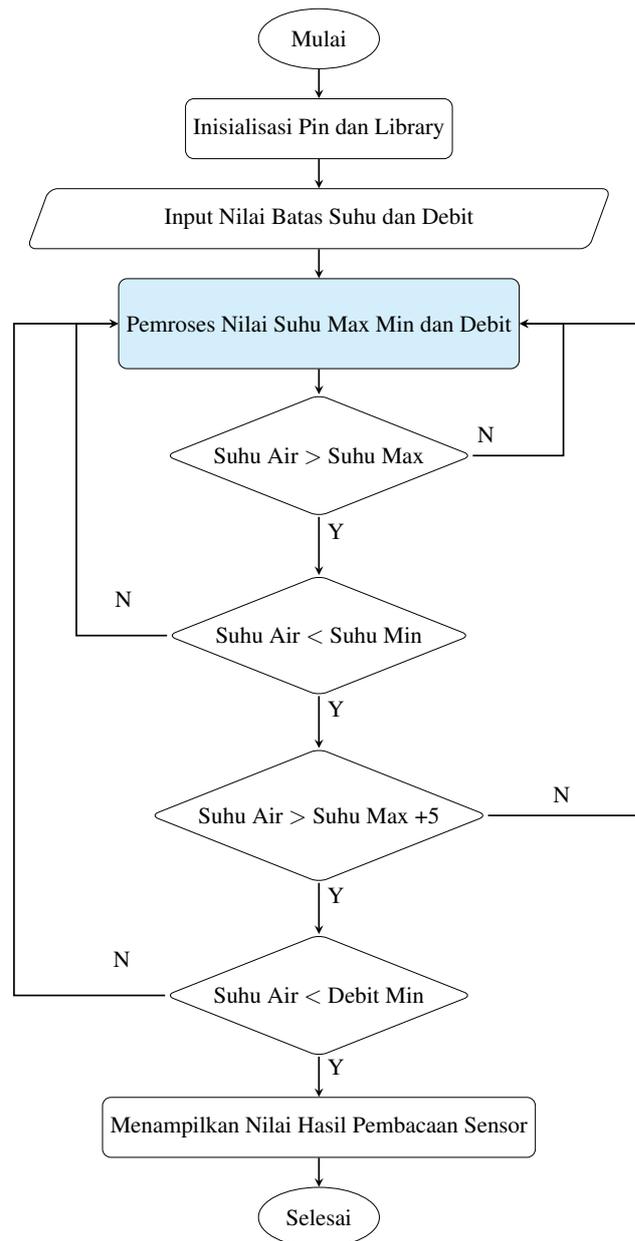
Dalam pengembangan Sistem Pengontrol Suhu CNC Laser Cutting 40W dengan Modul TEC1-12706, alat pembuatan perangkat lunak yang digunakan adalah sistem operasi Windows 10 Pro 64-bit dan Arduino IDE. Pemilihan Windows 10 Pro menyediakan platform yang stabil dan kompatibel untuk pengembangan, sementara Arduino IDE adalah lingkungan pengembangan terpadu yang mendukung penulisan, pengujian, dan pemuatan kode ke papan Arduino, yang merupakan bagian kunci dari sistem kontrol.

Proses perancangan sistem dimulai dengan memastikan semua komponen yang diperlukan terhubung dengan benar. Ini termasuk modul TEC1-12706, sensor suhu, dan aktuator yang relevan. Setelah semua komponen fisik terkonfirmasi terhubung, langkah selanjutnya adalah menambahkan library yang relevan pada software Arduino IDE untuk memastikan semua fungsi dan perintah yang diperlukan tersedia untuk pengembangan lebih lanjut.

Setelah library diperbarui, penulisan script dilakukan. Script ini mengatur cara interaksi komponen-komponen tersebut berdasarkan input dari sensor dan mengatur output ke aktuator. Script ini adalah inti dari fungsi pengontrol suhu, memastikan bahwa semua operasi dapat dijalankan sesuai dengan parameter yang

ditetapkan.

Kemudian, script yang telah ditulis diuji untuk memastikan bahwa nilai-nilai input yang diberikan melalui serial monitor Arduino diterima dan diproses dengan benar. Pengujian ini vital untuk memastikan bahwa data dari sensor diinterpretasikan dengan benar oleh sistem. Setelah itu, output dari sistem diuji pada alat simulasi untuk memverifikasi respons sistem terhadap input yang diberikan. Ini membantu menemukan dan memperbaiki bugs atau masalah dalam pemrograman.



Gambar 3: Diagram Alir

Setelah sistem terverifikasi berfungsi dengan lancar dalam simulasi, langkah berikutnya adalah mensimulasikan dengan prototipe aslinya. Prototipe asli memberikan wawasan lebih lanjut tentang bagaimana sistem akan beroperasi dalam kondisi nyata. Simulasi ini penting untuk melihat interaksi antara perangkat ke-

ras dan perangkat lunak dalam lingkungan operasional yang sebenarnya.

Terakhir, penting untuk memastikan bahwa program berjalan dengan baik pada prototipe asli. Pengecekan akhir ini memastikan bahwa semua elemen dari Sistem Pengontrol Suhu CNC Laser Cutting bekerja secara harmonis dan sesuai dengan spesifikasi desain. Pengujian komprehensif ini menjamin bahwa sistem siap untuk diimplementasikan dalam setting produksi, menawarkan kontrol suhu yang efektif dan efisien untuk operasi pemotongan laser.



Gambar 4: Alat perpasang pada mesin laser

Gambar 3 merupakan diagram alir Sistem Pengontrol Suhu CNC Laser Cutting 40W dengan Modul TEC1-12706. Dimulai dengan inisialisasi pin input dan output kemudian pengunggahan program. Program diatur untuk membaca nilai pada sensor suhu DS18B20. Jika didapat nilai suhu air melebihi batas maksimal maka peltier akan dinyalakan hingga suhu turun mencapai batas minimal. Jika suhu air mencapai batas minimal maka peltier akan dimatikan hingga suhu kembali mencapai batas maksimal. Pada beberapa kasus, nilai air akan tidak akan bisa turun karena faktor eksternal. Oleh sebab itu ditambahkan pengaman jika suhu air melebihi 5 derajat celcius dari batas maksimal. Sistem akan menghentikan semua laser secara paksa jika suhu air melebihi 5 derajat celcius dari batas suhu maksimal yang diizinkan. Kemudian debit air juga dipastikan untuk selalu mengalir dengan debit tertentu. Jika air tidak mengalir atau

aliran terlalu kecil maka laser tidak akan menyala dan harus dilakukan perbaikan sirkulasi air. Semua data akan ditampilkan melalui LCD secara real time.

Gambar 4, laser dihubungkan dengan pendingin melalui selang inlet dan outlet. Selang outlet masuk ke dalam tabung reservoir untuk diukur suhu terkini

dan didinginkan jika perlu. Setelah itu air dipompa Kembali menuju tabung laser melalui selang inlet.



Gambar 5: Ketika overheating

Gambar 5 menunjukkan kondisi suhu melebihi 5 derajat Celcius dari batas maksimal. Kondisi ini akan memunculkan peringatan "OVERHEAT" dan buzzer yang menyala.



Gambar 6: Ketika debit kurang

Gambar 6 menunjukkan kondisi suhu melebihi 5 derajat Celcius dari batas maksimal. Kondisi ini akan memunculkan peringatan "debit air kurang" dan relay laser mati.

Gambar 7 menunjukkan keadaan laser running dengan normal. Kondisi suhu berada pada keadaan normal dan tidak ada peringatan yang muncul.

III. HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

Pada pengambilan data ini ditentukan untuk batasan nilai suhu maksimal yaitu 30°C, batas minimal suhu 25°C, suhu overheating 35°C, dan debit air 25 l/jam.

Dalam penelitian ini, pengamatan kinerja sistem pengontrol suhu untuk CNC Laser Cutting 40W de-



Gambar 7: Alat hasil penelitian yang sudah siap digunakan

Tabel 1: Suhu Peltier pada sisi dingin tanpa beban air

NO	Waktu (menit)	Suhu (°C)
1	0	28.81
2	1	26.37
3	2	24.31
4	3	22.94
5	4	22.12
6	5	21.62
7	6	18.75
8	7	17.50
9	8	17.44
10	9	17.25
11	10	17.31

ngan Modul TEC1-12706 dilakukan melalui eksperimen yang mencatat perubahan suhu selama periode 10 menit. Data yang diperoleh disajikan dalam Tabel 1, menunjukkan perubahan suhu dari awal pengukuran hingga akhir periode waktu.

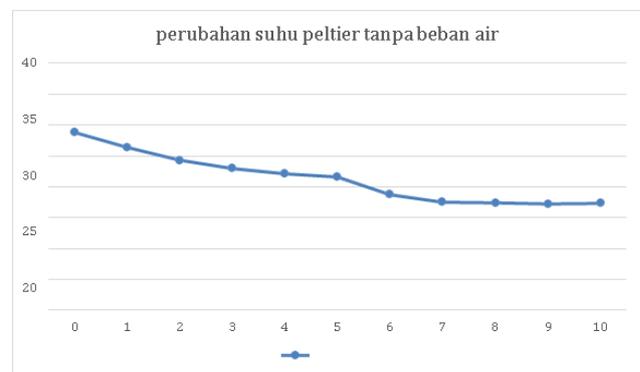
Pada awal pengukuran, suhu tercatat sebesar 28.81°C. Dalam satu menit pertama, terjadi penurunan suhu yang signifikan hingga mencapai 26.37°C, menunjukkan respons awal sistem yang cepat dalam mengurangi suhu. Penurunan suhu terus berlanjut, dengan suhu yang tercatat pada menit kedua adalah 24.31°C dan menit ketiga 22.94°C. Ini menunjukkan efisiensi awal dari sistem pendinginan yang dirancang untuk membawa suhu turun dengan cepat.

Selama empat menit berikutnya, penurunan suhu mulai stabilisasi dengan nilai yang lebih lambat dalam penurunan suhu, yang terlihat dari data yang menunjukkan suhu 22.12°C pada menit keempat dan berangsur turun ke 21.62°C pada menit kelima. Pengamatan ini mengindikasikan bahwa sistem mencapai titik stabilisasi suhu yang lebih efisien, di mana perubahan suhu menjadi lebih halus dan terkendali.

Penurunan suhu yang lebih tajam terlihat lagi antara menit keenam hingga ketujuh, dari 21.62°C turun

menjadi 17.50°C. Ini mungkin menunjukkan aktivasi fitur kontrol suhu tambahan atau respons sistem terhadap kondisi eksternal yang berubah. Dari menit ketujuh hingga kesepuluh, suhu tercatat stabil di sekitar 17°C, dengan fluktuasi minimal, menunjukkan bahwa sistem berhasil mempertahankan suhu target yang ditetapkan dengan efektif.

Pengamatan yang stabil pada akhir periode eksperimental menandakan bahwa sistem pengontrol suhu bekerja sesuai dengan desain dan mampu menjaga kondisi operasional yang optimal untuk proses laser cutting. Efektivitas sistem kontrol suhu ini penting dalam aplikasi industri, di mana kontrol suhu yang tepat dan konsisten diperlukan untuk menghasilkan hasil pemotongan yang berkualitas dan mengurangi risiko kerusakan pada peralatan akibat suhu yang tidak terkontrol.



Gambar 8: Grafik Suhu Peltier

Gambar 8 Grafik perubahan suhu tanpa beban

Tabel 2: Suhu ketika pendingin menyala (tanpa Beban) dengan Volume air 4 Liter

NO	t	Power	Suhu (°C)	Debit (l/m)	Kipas ON	Laser ON
1	0	0%	30,41	2,12	Ya	Tidak
2	10	0%	26,62	2,12	Ya	Tidak
3	20	0%	25,94	2,12	Ya	Tidak
4	30	0%	25,56	2,11	Ya	Tidak
5	40	0%	25,25	2,11	Ya	Tidak
6	50	0%	25,06	2,11	Ya	Tidak
7	60	0%	24,92	2,10	tidak	Tidak

Dalam eksperimen terkait dengan sistem pengontrol suhu CNC Laser Cutting 40W menggunakan Modul TEC1-12706, dilakukan pengukuran yang detail mengenai pengaruh keberadaan kipas pendingin terhadap suhu operasional mesin, sambil memantau kondisi operasi lainnya seperti power, debit air, serta status operasi kipas dan laser. Data yang diperoleh telah disusun dalam Tabel 2, yang memberikan gambaran tentang respon sistem selama interval waktu yang ditentukan.

Data menunjukkan bahwa selama periode 60 menit pertama, power yang disuplai ke sistem tetap pada 0%, dimana tidak ada penggunaan laser selama waktu

tersebut. Ini mengindikasikan bahwa eksperimen ini fokus pada pengujian kinerja sistem pendinginan tanpa beban operasional dari pemotongan laser.

Dari awal hingga menit ke-60, tercatat penurunan suhu secara konsisten dari 30,41°C menjadi 24,92°C. Penurunan ini terjadi meskipun power yang diberikan ke sistem adalah 0%, yang menunjukkan efektivitas dari kipas pendingin yang diaktifkan selama periode ini. Kipas tetap aktif dari menit ke-0 hingga ke-50, dengan kondisi "Ya" yang menunjukkan kipas sedang beroperasi dan membantu menurunkan suhu mesin.

Secara khusus, pada menit ke-60, status kipas berubah menjadi "tidak", menunjukkan bahwa kipas dimatikan. Hal ini memungkinkan pengujian pengaruh non-aktifnya kipas terhadap suhu mesin. Meskipun demikian, suhu masih menunjukkan penurunan yang stabil, meskipun tidak secepat ketika kipas diaktifkan. Ini bisa diindikasikan bahwa mesin mampu mempertahankan suhu yang relatif stabil bahkan tanpa bantuan kipas, meskipun efektivitas pendinginan lebih baik dengan kipas.

Debit air yang digunakan untuk mendinginkan sistem secara konsisten berada di sekitar 2,12 liter per menit, dengan sedikit penurunan menjadi 2,10 liter per menit pada menit ke-60. Keberlanjutan pasokan air yang stabil ini juga berkontribusi terhadap efektivitas kontrol suhu sistem. Dalam eksperimen terkait sis-

Tabel 3: Suhu laser menyala (tanpa beban) dengan Volume air 4 Liter

NO	t	Power	Suhu (°C)	Debit (l/m)	Kipas ON	Laser ON
1	0	15%	25,12	2,13	Tidak	Ya
2	10	15%	26,36	2,12	Tidak	Ya
3	20	15%	27,51	2,12	Tidak	Ya
4	30	15%	28,17	2,11	Tidak	Ya
5	40	15%	28,61	2,11	Tidak	Ya
6	50	15%	29,41	2,11	Tidak	Ya
7	60	15%	30,25	2,11	Ya	Ya

tem pengontrol suhu CNC Laser Cutting 40W dengan Modul TEC1-12706, telah dilakukan pengujian untuk menilai performa sistem dalam mengatur suhu ketika laser dioperasikan. Data hasil pengujian ini disajikan dalam Tabel 3, yang mendokumentasikan perubahan suhu, debit air, dan status penggunaan kipas serta laser selama periode pengujian selama 60 menit.

Pada awal pengujian (t=0 menit), laser diaktifkan dengan power sebesar 15% dan kondisi kipas dalam keadaan tidak aktif. Suhu awal yang tercatat adalah 25,12°C, dan debit air yang digunakan untuk pendinginan adalah 2,13 liter per menit. Sejak laser dinyalakan, terjadi peningkatan suhu secara bertahap. Pada menit ke-10, suhu telah naik menjadi 26,36°C. Ini menunjukkan bahwa, meskipun tanpa dukungan kipas, laser yang aktif berkontribusi pada peningkatan suhu perangkat.

Selama 60 menit berikutnya, suhu terus meningkat secara konsisten. Pada menit ke-20 suhu mencapai 27,51°C, pada menit ke-30 menjadi 28,17°C, dan pada menit ke-40 naik lagi menjadi 28,61°C. Ini menunjukkan bahwa tanpa intervensi pendinginan aktif dari kipas, panas yang dihasilkan oleh laser cukup untuk meningkatkan suhu mesin secara bertahap.

Kenaikan suhu terus berlanjut hingga mencapai 29,41°C pada menit ke-50. Pada akhir periode pengujian, pada menit ke-60, suhu telah mencapai 30,25°C. Menariknya, pada titik ini kipas diaktifkan, yang menandakan perubahan dalam strategi pengelolaan suhu. Aktivasi kipas pada akhir periode eksperimen ini mungkin dilakukan sebagai respons terhadap suhu yang terus meningkat, meskipun data selanjutnya diperlukan untuk menilai efektivitas langkah ini dalam menurunkan atau menstabilkan suhu.

Debit air selama pengujian tetap hampir konstan di sekitar 2,11 liter per menit, menunjukkan bahwa suplai pendinginan air tetap stabil selama operasi laser. Hal ini penting untuk memastikan bahwa ada cukup pendinginan untuk mencegah overheating lebih lanjut, terutama di tengah kondisi tanpa dukungan kipas.

Tabel 4: Suhu reservoir pendingin dan laser menyala dengan Volume air 4 Liter

NO	t	Power	Suhu (°C)	Debit (l/m)	Kipas ON	Laser ON
1	0	15%	35,38	2,12	Ya	Tidak
2	10	15%	31,06	2,12	Ya	Ya
3	20	15%	28,87	2,12	Ya	Ya
4	30	15%	26,25	2,11	Ya	Ya
5	40	15%	26,16	2,11	Ya	Ya
6	50	15%	25,87	2,11	Ya	Ya
7	60	15%	25,00	2,10	Tidak	Ya

Eksperimen terbaru yang dilakukan untuk menilai efektivitas sistem pengontrol suhu pada CNC Laser Cutting 40W dengan Modul TEC1-12706 menunjukkan hasil signifikan yang memperlihatkan kemampuan sistem dalam menjaga suhu operasional yang stabil selama penggunaan laser. Hasil pengujian ini didokumentasikan dalam Tabel 4, yang menggambarkan dinamika suhu, debit air, serta penggunaan kipas dan laser selama periode 60 menit.

Pada awal pengujian, dengan laser dalam keadaan tidak aktif namun kipas diaktifkan, suhu awal yang tercatat adalah 35,38°C. Ini mengindikasikan kondisi awal yang lebih hangat, mungkin karena kondisi lingkungan atau pemanasan sebelumnya dari perangkat. Dengan power tetap pada 15% dan kipas yang sudah menyala, suhu menurun cukup dramatis ke 31,06°C dalam sepuluh menit pertama setelah laser dinyalakan.

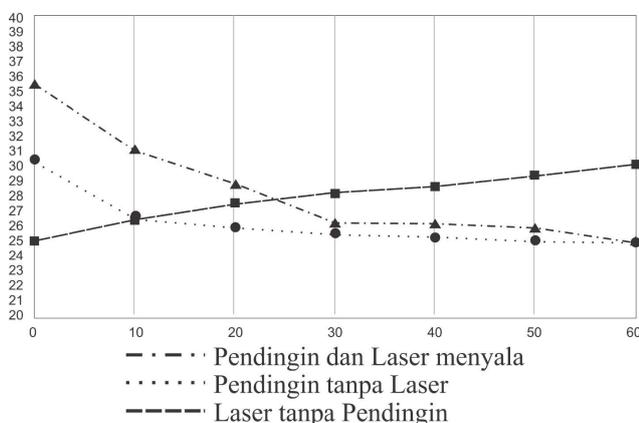
Selanjutnya, penurunan suhu terus berlanjut menjadi 28,87°C pada menit ke-20 dan mencapai 26,25°C pada menit ke-30, menunjukkan efisiensi sistem pendinginan.

nginan dalam menghadapi panas yang dihasilkan oleh laser yang beroperasi. Stabilitas lebih lanjut dalam pengendalian suhu terlihat saat suhu sedikit berkurang lagi menjadi 26,16°C pada menit ke-40 dan 25,87°C pada menit ke-50. Penurunan ini menunjukkan bahwa sistem pendinginan, yang didukung oleh kipas, mampu menangani panas tambahan dari laser secara efektif.

Menariknya, pada menit ke-60, pengujian mengalami perubahan kebijakan dengan mematikan kipas sementara laser masih beroperasi. Meskipun demikian, suhu berhasil turun ke 25,00°C. Penurunan ini dapat menunjukkan bahwa sistem telah mencapai tingkat efisiensi termal yang tinggi, di mana keberadaan kipas mungkin tidak lagi esensial untuk menjaga suhu pada level yang aman, atau mungkin mengindikasikan kecukupan debit air pendingin yang stabil yang telah memadai untuk kompensasi panas yang dihasilkan oleh laser.

Debit air yang digunakan selama pengujian tetap hampir konstan, berkisar antara 2,12 hingga 2,10 liter per menit, yang menunjukkan suplai yang konsisten dan adekuat untuk mendukung sistem pendinginan. Stabilitas ini penting untuk memastikan bahwa tidak ada fluktuasi yang signifikan yang bisa mempengaruhi kinerja sistem pengontrol suhu.

GRAFIK PERUBAHAN SUHU



Gambar 9: Grafik perubahan suhu dalam tiga kondisi percobaan

Dari hasil pengambilan data diatas, selisih suhu (Δt) pada saat pendingin menyala tanpa beban selama satu jam yaitu 5,49°C dengan penurunan paling signifikan pada suhu 30-26°C dan setelahnya mulai melambat hingga suhu 25°C. pada percobaan laser Running tanpa beban diperoleh hasil yaitu selisih suhu (Δt) dalam satu jam yaitu 5,13°C dengan kenaikan terjadi secara konstan. Sedangkan pada saat laser running dan pendingin menyala penurunan suhu paling signifikan terjadi pada rentang suhu 35-31°C. kemudian kecepatan penurunan mulai menurun pada suhu 31-26°C dan sangat melambat ketika suhu air berada pada rentang 26- 25°C.

IV. KESIMPULAN

Tabung laser yang sedang bekerja akan menghasilkan panas yang dapat merusak tabung laser jika suhunya terlalu tinggi. Dengan adanya sistem pendingin, suhu tabung laser dapat dikurangi hingga sesuai batas aman dengan mensirkulasikan air pendingin. Sistem pendingin yang menggunakan peltier lebih ramah lingkungan di banding Freon karena tidak beresiko bocor dan merusak lingkungan. Hasil percobaan pada rancangan pendingin menunjukkan bahwa pendingin dengan modul TEC1-12706 mampu menurunkan suhu saat laser sedang running dengan cara mendinginkan air sirkulasi pada tabung laser. penurunan terjadi secara cepat pada saat suhu tinggi. Dan pada saat suhu rendah pendinginan mulai melambat.

Disarankan penggunaan peltier sebagai pendingin alternative memang dapat memberi manfaat seperti halnya refrigerant lain. Namun penggunaan Freon dinilai tetap lebih efektif mengingat Freon dapat mendinginkan suhu secara instan. Oleh karena itu, rancangan sistem ini masih perlu dikembangkan untuk mendapat pendinginan yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. I. Ulitenko, V. V. Praded, and V. A. Pushkin, *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 46, no. 4, pp. 567–568, 2003.
- [2] A. Callenäs and I. Renhom, “Rf Excited Waveguide CO₂ Laser with Low Thermal Drift,” in *Coherent Laser Radar: Technology and Applications*. Optica Publishing Group, 1991.
- [3] M. A. Jebali, “Polarization and wavelength insensitive optical feedback control systems for stabilizing CO₂ lasers,” in *Components and Packaging for Laser Systems II*, A. L. Glebov and P. O. Leisher, Eds. SPIE, apr 22 2016.
- [4] M. Naeem, T. Imran, M. Hussain, and A. S. Bhatti, “Design, Construction and Characterization of Sealed Tube Medium Power CO₂ Laser System,” *Instruments*, vol. 6, no. 4, p. 72, nov 2 2022.
- [5] J. Dabulytė and F. Ivanauskas, “The optimization of temperature regime in diode-pumped solid-state laser when applying cooling by water,” *Lietuvos matematikos rinkinys*, vol. 42, pp. 306–311, dec 20 2002.
- [6] Y. Karni, G. Klumel, M. Levy, Y. Berk, Y. Openhaim, Y. Gridish, A. Elgali, M. Avisar, M. Blonder, H. Sagy, and A. Gertsenshtein, “Active cooling solutions for high power laser diodes stacks,” in *SPIE Proceedings*, M. S. Zediker, Ed. SPIE, feb 7 2008.
- [7] S. S. Bhatti, A. Kumar, R. R. and R. Singh, “Environment-Friendly Refrigerants for Sustainable Refrigeration and Air Conditioning: A Review,” *Current World Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 933–947, jan 10 2024.
- [8] H. Kruse, “Refrigerant use in Europe,” 2000.
- [9] Unep Dtie and D. Colbourne, “Safe use of HCFC alternatives in refrigeration and air-conditioning.” 2015.
- [10] Charles R. Taylor, “Carbon dioxide-based refrigerant systems,” 2002.

- [11] D. Jung, "Editorial: Energy and Environmental Crisis: Let's Solve it Naturally in Refrigeration and Air Conditioning," *HVAC and amp; R Research*, vol. 14, no. 5, pp. 631–634, 9 2008.
- [12] Giz Proklima, "Environmental impact of the refrigeration and air conditioning sectors," 2014.
- [13] S. S. Verma, "Eco-friendly alternative refrigeration systems," *Resonance*, vol. 6, no. 10, pp. 57–67, 10 2001.
- [14] F. Yılmaz, R. Selbaş, A. E. Özgür, and M. T. Balta, *Performance Analyses of CO₂-N₂O Cascade System for Cooling*. Springer International Publishing, 2016, pp. 499–512.
- [15] F. R. Pratama and V. Saraswati, "Design of Thermoelectric Peltier Effect Demonstrator using Modul TEC-12706 and TEG-SP1848," *Physics Education Research Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, feb 28 2023.
- [16] D. Mueller, S. Hildebrandt, F. Reifegerste, and T. Zerna, "Dimensioning of peltier cooling system for laser applications in an electric cabinet," in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. IEEE, 5 2015.
- [17] E. Armi and C. Kirkpatrick, "Temperature Control by Means of the Peltier Effect," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 12–14, jan 1 1961.
- [18] M. P. Gupta, M.-h. S. Sayer, S. Mukhopadhyay, and S. Kumar, "On-chip Peltier cooling using current pulse," in *2010 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. IEEE, 6 2010.
- [19] G. A. Mannella, V. La Carrubba, and V. Brucato, "Peltier cells as temperature control elements: Experimental characterization and modeling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 234–245, 2 2014.
- [20] Y. David-Shiloah, O. Raz, M. Laufer, V. Menaker, and M. Ahmad, "Auxilliary embedded coolant channels for peltier based liquid cooling solution for high power components," in *2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. IEEE, 5 2017.
- [21] X. Wang, J. Xu, F. Zhang, and S. Du, "Phase change materials at the cold/hot sides of thermoelectric cooler for temperature control," in *SPIE Proceedings*. SPIE, jul 18 2007.
- [22] Jr Ching Lin, H. Chen, I Yu Huang, and S. Huang, "A poly-Si thermoelectric cooling device fabricated by surface micromachining technology," in *TRANSDUCERS '03. 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers (Cat. No.03TH8664)*. IEEE.