



Pengaruh Kecepatan Sirkulasi Udara terhadap Temperatur dan Kelembapan pada Oven Pengecatan Bodi Kendaraan

Effect of Air Circulation Speed on Temperature and Humidity in an Automotive Body Painting Oven

Aditya Asadifa Saputra^{1*}, Hasan Maksum¹, Donny Fernandez¹, Iffarial nanda¹

Abstrak

Kualitas pengecatan bodi kendaraan sangat ditentukan oleh proses *curing* di dalam oven, yang bergantung pada kestabilan temperatur dan kelembapan udara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kecepatan sirkulasi udara terhadap temperatur dan kelembapan relatif di oven pengecatan dengan metode eksperimen kuantitatif. Pengukuran kecepatan udara, temperatur, dan kelembapan dilakukan menggunakan anemometer, sensor temperatur digital, dan sensor kelembapan pada tiga variasi kecepatan kipas (0,91; 2,67; 3,89 m/s) selama 20 menit. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan sirkulasi dari 0,91 menjadi 3,89 m/s meningkatkan temperatur rata-rata oven dari 52,5 °C menjadi 59,5 °C dan menurunkan kelembapan relatif dari 38,0% menjadi 33,5%. Analisis keseragaman pada tiga titik ukur menghasilkan koefisien variasi < 5%, menandakan distribusi udara yang sangat seragam. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan sistem ventilasi dan sirkulasi udara yang tepat mampu meningkatkan perpindahan panas konveksi, efisiensi *curing*, dan kualitas pengecatan bodi kendaraan.

Kata Kunci

sirkulasi udara; oven pengecatan; temperatur; kelembapan relatif; sistem ventilasi; perpindahan panas konveksi.

Abstract

The quality of vehicle body painting is strongly determined by the curing process in the oven, which depends on stable air temperature and humidity. This study analyzes the effect of air circulation speed on oven temperature and relative humidity using a quantitative experimental method. Air velocity, temperature, and humidity were measured with an anemometer, digital temperature sensor, and humidity sensor at three fan-speed settings (0.91, 2.67, and 3.89 m/s) during 20-minute curing cycles. The results show that increasing air-circulation speed from 0.91 to 3.89 m/s raises the average oven temperature from 52.5 °C to 59.5 °C and reduces relative humidity from 38.0% to 33.5%. Uniformity analysis at three measurement points yields coefficients of variation below 5%, indicating highly uniform airflow distribution. These findings demonstrate that properly designed ventilation and air-circulation systems can enhance convective heat transfer, improve curing efficiency, and increase the consistency of automotive body-paint quality.

Keywords

air circulation; painting oven; vehicle body painting; temperature; relative humidity; ventilation system; convective heat transfer.

¹ Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar, Padang Sumatera Barat, Indonesia

*adityasadiva92@gmail.com

Dikirimkan: 25 Oktober 2025. Diterima: 17 November 2025. Diterbitkan: 30 November 2025.



PENDAHULUAN

Proses pengecatan *body part* kendaraan merupakan tahapan kritis dalam industri otomotif yang tidak hanya berfungsi memberikan estetika visual, tetapi juga melindungi permukaan logam dari korosi, abrasi, dan kerusakan akibat paparan lingkungan ekstrem seperti radiasi ultraviolet, kelembapan tinggi, dan bahan kimia agresif. Menurut data industri otomotif global, sekitar 15-20% cacat produk pengecatan disebabkan oleh ketidakstabilan parameter pengeringan, yang mengakibatkan kerugian ekonomi mencapai USD 2–3 juta per tahun untuk pabrik skala menengah [1]. Di Indonesia, bengkel pengecatan kendaraan masih didominasi oleh usaha mikro dan kecil dengan tingkat *reject* produk mencapai 18-25% akibat penggunaan oven konvensional tanpa kontrol ventilasi yang memadai [2]. Dalam konteks ini, oven pengecatan menjadi komponen esensial yang menentukan keberhasilan proses *curing* melalui pengeringan terkontrol, di mana elemen pemanas dan sistem sirkulasi udara harus bekerja sinergis untuk menghasilkan distribusi panas yang homogen dan kondisi kelembapan optimal di seluruh ruang pengering.

Praktik di lapangan menunjukkan bahwa mayoritas oven pengecatan konvensional menghadapi masalah ketidakseragaman distribusi temperatur dan akumulasi kelembapan berlebih di dalam ruang tertutup. Fluktuasi suhu dapat mencapai $\pm 5-8$ °C antartitik pengukuran pada oven tanpa sistem ventilasi yang memadai, sehingga menimbulkan cacat pengecatan seperti *orange peel*, *cracking*, dan *blistering* pada sekitar 23% sampel uji dengan estimasi biaya *rework* Rp 500.000-1.500.000 per unit kendaraan [2]. Kondisi ini diperparah oleh sistem sirkulasi tertutup yang menyebabkan udara panas bersirkulasi secara stagnan tanpa pembaruan, sehingga uap pelarut cat terakumulasi dan meningkatkan kelembapan relatif hingga 60–70% RH jauh melebihi kisaran ideal 40-50% RH untuk proses *curing* yang optimal [3]. Kelembapan yang tinggi memperlambat penguapan pelarut, mengakibatkan cat tidak mengering sempurna, memicu cacat seperti gelembung (*blistering*), permukaan lengket, hingga kegagalan adhesi [4]. Kondisi kelembapan berlebih ini dilaporkan dapat memperpanjang waktu pengeringan hingga 35-40% dan menurunkan daya rekat antarlapisan cat terhadap substrat logam [5].

Oven pengecatan pada dasarnya merupakan ruang tertutup yang dilengkapi sistem pemanas dan sirkulasi udara untuk mempercepat pengeringan cat serta meminimalkan kontaminasi debu pada permukaan *body part*, sehingga dihasilkan lapisan cat yang lebih halus [6]. Sistem ini bekerja dengan prinsip perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi, di mana udara panas disirkulasikan oleh kipas untuk menjaga suhu merata di seluruh ruang [7], sementara sensor temperatur ditempatkan pada titik strategis untuk memantau distribusi dan kestabilan suhu selama proses *curing* [5]. Sensor termal seperti *thermocouple* mendeteksi perubahan suhu melalui perbedaan tegangan listrik akibat efek termolistrik, yang kemudian dikonversi menjadi nilai temperatur [8]. Termostat digital berperan sebagai pengendali otomatis dengan memanfaatkan sensor internal untuk mendeteksi perubahan suhu dan mengirimkan sinyal ke mikrokontroler guna mengatur arus listrik ke elemen pemanas, sehingga suhu oven dapat dikendalikan dan ditampilkan secara *real-time* [2].

Untuk menjamin kondisi pengeringan yang stabil, oven pengecatan memerlukan sistem ventilasi yang dirancang secara matang. Integrasi sistem ventilasi mekanis berbasis *intake-exhaust* menawarkan solusi teknis melalui mekanisme pertukaran udara terkontrol, di mana udara segar dengan kelembapan relatif lebih rendah dialirkan ke dalam oven sementara udara jenuh uap pelarut dievakuasi keluar [9]. Ventilasi yang efektif mampu mengurangi kelembapan internal, menjaga suhu lebih stabil, dan mencegah udara lembap terperangkap di ruang pengering [5][10]. Efektivitas sistem ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara (*air velocity*), posisi geometris saluran *intake-exhaust*, serta rasio laju pertukaran udara (*air change rate*) yang perlu diverifikasi melalui pengukuran empiris menggunakan instrumentasi presisi

[5]. Selain aspek teknis, perancangan ventilasi oven juga harus mempertimbangkan keselamatan dan kesehatan kerja operator, terutama terkait paparan udara panas dan bahan kimia cat [11].

Kelembapan udara sendiri merepresentasikan jumlah uap air yang terkandung dalam udara [12]. Kelembapan relatif (RH) menyatakan kedekatan kondisi udara terhadap kejenuhan uap air pada suhu tertentu, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara massa uap air aktual dan kapasitas maksimum udara menahan uap air pada suhu tersebut, dinyatakan dalam persen [13]. Nilai RH sangat dipengaruhi oleh suhu; ketika suhu meningkat, kemampuan udara menahan uap air bertambah sehingga RH cenderung menurun, dan sebaliknya [12]. Dalam ruang oven tertutup, kisaran RH ideal untuk pengeringan cat berada pada 40-50% [3]. Oleh karena itu, pemantauan kelembapan menggunakan sensor digital menjadi penting untuk memastikan kondisi pengeringan berada dalam rentang yang diinginkan. Sensor kelembapan digital memanfaatkan material higroskopis atau kapasitif yang resistansi atau kapasitansinya berubah akibat serapan uap air; perubahan ini kemudian dikonversi oleh mikrokontroler menjadi nilai kelembapan dalam satuan persen RH [14].

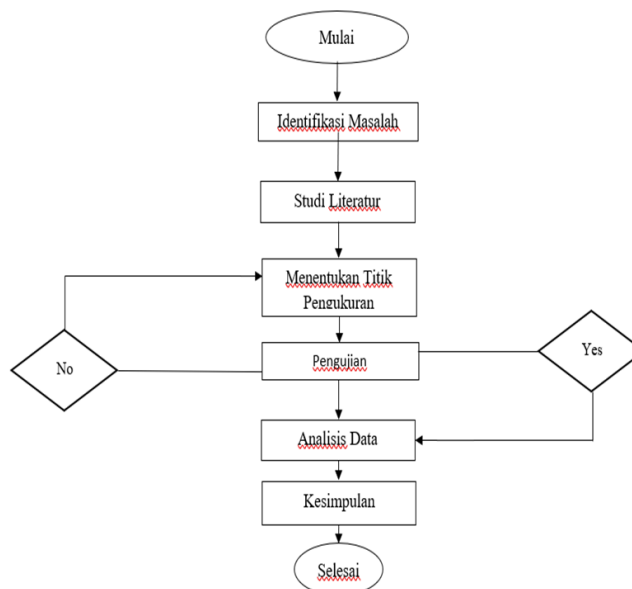
Selain temperatur dan kelembapan, karakteristik sirkulasi udara di dalam oven perlu dikaji secara kuantitatif. Sirkulasi udara menggambarkan proses distribusi panas di ruang tertutup melalui pergerakan udara yang dipengaruhi desain ruang, posisi dan kecepatan kipas, serta tingkat kelembapan [7]. Ketidakseimbangan desain dapat menimbulkan distribusi suhu yang tidak merata sehingga menurunkan kualitas hasil pengeringan. Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara di beberapa titik di dalam oven untuk mengetahui keseragaman sirkulasi udara dan memastikan udara panas terdistribusi secara merata [15]. Pada anemometer baling-baling, aliran udara memutar baling-baling dan kecepatan rotasinya dikonversi menjadi nilai kecepatan, sedangkan anemometer kawat panas bekerja berdasarkan perubahan resistansi kawat yang mendingin akibat aliran udara, yang kemudian diubah menjadi sinyal listrik [9].

Meskipun sejumlah penelitian telah membahas sistem oven dan ventilasi secara umum, kajian yang secara spesifik mengkuantifikasi hubungan antara kecepatan sirkulasi udara dengan distribusi temperatur dan kelembapan pada konfigurasi *dual intake-single exhaust* untuk oven pengecatan skala laboratorium masih terbatas. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menganalisis pengaruh variasi kecepatan sirkulasi udara terhadap temperatur dan kelembapan udara di dalam oven pengecatan, sekaligus mengevaluasi keseragaman distribusi kecepatan udara sebagai dasar perancangan dan pengoperasian sistem ventilasi oven yang lebih andal di lingkungan pendidikan vokasi otomotif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Pendekatan kuantitatif berlandaskan filsafat positivisme dan digunakan untuk meneliti populasi atau sampel tertentu dengan teknik pengambilan data terstruktur serta analisis data yang bersifat kuantitatif/statistik untuk menguji hipotesis yang telah ditetapkan [16]. Metode eksperimen dipilih karena bertujuan mengungkap hubungan sebab-akibat melalui pemberian perlakuan tertentu terhadap objek penelitian, yaitu oven pengecatan *body part* kendaraan [17]. Dalam penelitian ini, variabel bebas adalah kecepatan sirkulasi udara di dalam oven, sedangkan variabel terikat adalah temperatur dan kelembapan relatif udara di ruang oven.

Gambar 1 menyajikan kerangka konseptual alur penelitian. Kegiatan dimulai dari identifikasi masalah ketidakstabilan temperatur dan kelembapan pada proses pengeringan cat di oven pengecatan, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur mengenai oven pengecatan, ventilasi, sirkulasi udara, perpindahan panas, kelembapan udara, dan instrumen pengukuran. Berdasarkan hasil kajian tersebut, ditentukan titik-titik pengukuran di dalam oven pada area *intake* kiri, *intake* kanan, dan *exhaust* yang merepresentasikan pola aliran udara di ruang pengering. Tahap berikutnya adalah pengujian eksperimental pada masing-masing variasi kecepatan sirkulasi udara. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan sirkulasi udara terhadap temperatur dan kelembapan, serta menilai keseragaman distribusi kecepatan udara sebelum ditarik kesimpulan penelitian.



Gambar 1. Kerangka konseptual

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi anemometer untuk mengukur kecepatan aliran udara di dalam oven, sensor temperatur digital untuk memantau perubahan suhu, dan sensor kelembapan digital untuk mengukur kelembapan relatif udara. Metode eksperimen dilakukan dengan memanipulasi kecepatan sirkulasi udara sebagai variabel bebas melalui pengaturan kecepatan kipas, kemudian mengamati perubahan temperatur dan kelembapan udara sebagai variabel terikat. Pengukuran dilakukan secara langsung (*direct measurement*) pada tiga variasi kecepatan sirkulasi udara yang merepresentasikan kecepatan rendah, sedang, dan tinggi, di setiap titik pengukuran (*intake* kiri, *intake* kanan, dan *exhaust*).

Pengambilan data menggunakan metode *repeated measures* untuk meningkatkan reliabilitas hasil. Setiap kombinasi kecepatan sirkulasi udara dan titik ukur diulang sebanyak tiga kali sehingga total diperoleh $3 \text{ kecepatan} \times 3 \text{ titik} \times 3 \text{ pengulangan} = 27$ data kecepatan sirkulasi udara, disertai pencatatan temperatur dan kelembapan pada setiap kondisi pengujian. Seluruh data numerik dianalisis secara statistik deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi. Analisis hubungan kecepatan sirkulasi udara dengan temperatur oven dan kelembapan relatif dilakukan melalui penyajian tabel dan grafik, sedangkan keseragaman distribusi kecepatan udara dievaluasi berdasarkan besarnya koefisien variasi di tiga titik pengukuran. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai efektivitas sistem ventilasi oven pengecatan dalam menghasilkan distribusi temperatur dan kelembapan yang stabil dan seragam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bodi dan Pengecatan, Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang. Pengujian dilakukan untuk menganalisis pengaruh kecepatan sirkulasi udara terhadap distribusi temperatur dan kelembapan relatif di dalam oven pengecatan. Pengukuran dilakukan pada tiga variasi kecepatan kipas (rendah, sedang, dan tinggi) selama 20 menit untuk setiap kondisi. Data kecepatan udara dikumpulkan menggunakan anemometer Lutron AM-4206, sedangkan temperatur dan kelembapan relatif diukur dengan sensor termostat digital XH-W1411 dan sensor humidistat XH-W3005.

Hasil

Tabel 1 menyajikan data hasil pengukuran kecepatan udara pada tiga titik pengukuran (*intake* kiri, *intake* kanan, dan *exhaust*) untuk setiap variasi kecepatan kipas, beserta suhu dan kelembapan rata-rata pada masing-masing kondisi pengujian.

Tabel 1. Data hasil pengukuran kecepatan udara, temperatur, dan kelembapan

Variasi Kecepatan	Titik Pengukuran	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Rata-rata	Suhu (°C)	RH (%)
Kecepatan Rendah	<i>Intake</i> Kiri	0,88 m/s	1,57 m/s	1,79 m/s	1,41 m/s	52,5 °C	38 %
	<i>Intake</i> Kanan	0,86 m/s	1,50 m/s	1,84 m/s	1,40 m/s		
	<i>Exhaust</i>	0,90 m/s	1,54 m/s	1,77 m/s	1,40 m/s		
	Rata-rata Total	0,91 m/s					
Kecepatan Sedang	<i>Intake</i> Kiri	2,24 m/s	2,78 m/s	3,17 m/s	2,73 m/s	56,5 °C	35,5 %
	<i>Intake</i> Kanan	2,37 m/s	2,74 m/s	3,20 m/s	2,77 m/s		
	<i>Exhaust</i>	2,55 m/s	2,83 m/s	3,33 m/s	2,90 m/s		
	Rata-rata Total	2,67 m/s					
Kecepatan Tinggi	<i>Intake</i> Kiri	3,40 m/s	3,88 m/s	4,29 m/s	3,86 m/s	59,5 °C	33,5 %
	<i>Intake</i> Kanan	3,41 m/s	3,90 m/s	4,31 m/s	3,87 m/s		
	<i>Exhaust</i>	3,44 m/s	3,82 m/s	4,40 m/s	3,89 m/s		
	Rata-rata Total	3,89 m/s					

Berdasarkan **Tabel 1**, kecepatan udara pada tiga titik pengukuran menunjukkan konsistensi yang baik pada setiap pengulangan dengan selisih antartitik hanya sekitar 0,02–0,17 m/s. Rata-rata kecepatan udara meningkat dari 0,91 m/s pada kecepatan rendah menjadi 2,67 m/s pada kecepatan sedang dan 3,89 m/s pada kecepatan tinggi. Pada saat yang sama, suhu rata-rata di dalam oven meningkat dari 52,5 °C menjadi 56,5 °C dan 59,5 °C, sedangkan kelembapan relatif menurun dari 38,0 % menjadi 35,5 % dan 33,5 %. Hal ini menunjukkan

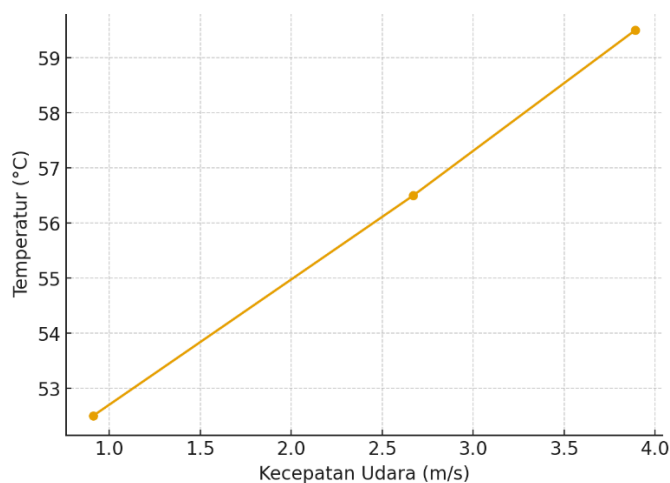
bahwa perubahan kecepatan sirkulasi udara berkorelasi dengan perubahan temperatur dan kelembapan ruang oven.

Untuk menggambarkan hubungan tersebut secara ringkas, data pada [Tabel 1](#) direkapitulasi dalam [Tabel 2](#), yang memuat nilai temperatur dan kelembapan rata-rata pada setiap variasi kecepatan sirkulasi udara beserta perubahan relatif terhadap kondisi kecepatan rendah (*baseline*).

Tabel 2. Rekapitulasi hubungan kecepatan udara dengan temperatur dan kelembapan

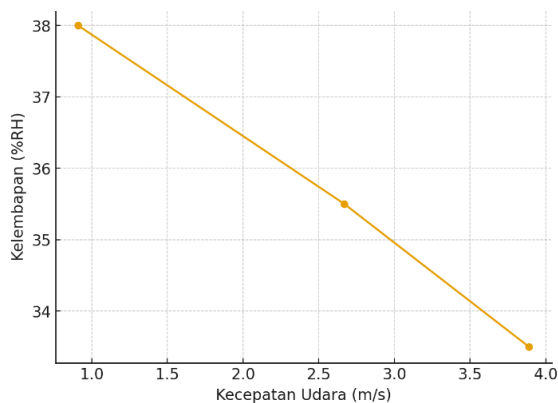
Parameter	Kecepatan Rendah (0,91 m/s)	Kecepatan Sedang (2,67 m/s)	Kecepatan Tinggi (3,89 m/s)
Temperatur (°C)	52,5m/s	56,5 m/s	59,5 m/s
Kelembapan (%RH)	38,0%	35,5%	33,5%
Peningkatan Suhu dari <i>baseline</i>	-	+4,0°C (+7,6%)	+7,0°C (+13,3%)
Penurunan RH dari <i>baseline</i>	-	-2,5% (-6,6%)	-4,5% (-11,8%)

Hubungan antara kecepatan sirkulasi udara dan temperatur oven divisualisasikan pada [Gambar 2](#). Grafik tersebut menunjukkan tren hampir linier positif: peningkatan kecepatan rata-rata dari 0,91 m/s menjadi 2,67 m/s menaikkan temperatur oven dari 52,5 °C menjadi 56,5 °C (kenaikan 4,0 °C atau 7,6 %), sedangkan peningkatan lebih lanjut ke 3,89 m/s menghasilkan temperatur 59,5 °C (kenaikan total 7,0 °C atau 13,3 % dibandingkan *baseline*).



Gambar 2. Hubungan Kecepatan Sirkulasi Udara terhadap Temperatur Oven

Sebaliknya, [Gambar 3](#) menampilkan hubungan kecepatan udara dengan kelembapan relatif. Grafik menunjukkan tren linier negatif, di mana peningkatan kecepatan sirkulasi udara menyebabkan penurunan RH. Dari 0,91 m/s ke 2,67 m/s, kelembapan turun dari 38,0 % menjadi 35,5 % (penurunan 2,5 poin atau 6,6 %), dan pada kecepatan 3,89 m/s RH turun lebih lanjut menjadi 33,5 % (penurunan total 4,5 poin atau 11,8 % dari *baseline*). Hasil ini mengindikasikan bahwa laju ventilasi yang lebih tinggi mempercepat pelepasan uap air dari ruang oven.



Gambar 3. Hubungan Kecepatan Sirkulasi Udara terhadap Kelembapan Relatif

Keseragaman distribusi kecepatan udara pada tiga titik pengukuran dianalisis menggunakan standar deviasi dan koefisien variasi, sebagaimana ditampilkan pada [Tabel 3](#).

Tabel 3. Analisis keseragaman distribusi kecepatan udara

Variasi Kecepatan	Rata-rata (m/s)	Standar Deviasi	Koefisien Variasi (%)	Kategori
Kecepatan rendah	0,91 m/s	0,015	1,65 %	Sangat seragam
Kecepatan sedang	2,67 m/s	0,086	3,22 %	Sangat seragam
Kecepatan Tinggi	3,89 m/s	0,021	0,54 %	Sangat seragam

[Tabel 3](#) menunjukkan bahwa seluruh nilai koefisien variasi berada di bawah 5 %, sehingga distribusi kecepatan udara pada masing-masing variasi dapat dikategorikan “sangat seragam”. Nilai standar deviasi yang rendah (0,015–0,086 m/s) mengonfirmasi bahwa sistem ventilasi mampu mendistribusikan udara panas secara merata pada tiga titik pengukuran di dalam oven, tanpa adanya perbedaan kecepatan yang signifikan antarlokasi.

Pembahasan

Hasil pengukuran pada [Tabel 1](#) dan rekapitulasi pada [Tabel 2](#) serta [Gambar 2](#) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan sirkulasi udara di dalam oven dari 0,91 m/s menjadi 3,89 m/s diikuti kenaikan temperatur ruang pengering dari 52,5 °C menjadi 59,5 °C. Secara prinsip, fenomena ini sejalan dengan teori perpindahan panas konveksi, di mana peningkatan kecepatan aliran udara akan menaikkan koefisien perpindahan panas sehingga udara lebih efektif menyerap dan mengangkut kalor ke seluruh volume ruang [8]. Dengan kata lain, aliran udara yang lebih cepat menipiskan *boundary layer* termal di sekitar benda kerja sehingga gradien temperatur antara permukaan cat dan udara pengering meningkat, yang pada gilirannya mempercepat laju *curing*. Pola serupa juga dilaporkan oleh Karnowo yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan sirkulasi udara di dapur pengering kayu secara signifikan memperpendek waktu pengeringan dan meningkatkan keseragaman kadar air kayu [10][18]. Temuan penelitian ini mengonfirmasi bahwa pengaturan kecepatan sirkulasi udara merupakan parameter kunci dalam desain oven konveksi, bukan hanya untuk material kayu, tetapi juga untuk proses pengecatan bodi kendaraan.

Hubungan negatif antara kecepatan udara dan kelembapan relatif yang ditunjukkan pada [Tabel 2](#) dan [Gambar 3](#) mengindikasikan bahwa sistem ventilasi mekanis dual *intake*-*single exhaust* bekerja efektif sebagai mekanisme pengendalian RH. Peningkatan kecepatan dari 0,91 m/s menjadi 3,89 m/s menurunkan kelembapan dari 38,0% menjadi 33,5% RH, yang dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama. Pertama, laju pertukaran udara melalui *exhaust*

meningkat sehingga uap pelarut cat dan uap air lebih cepat dikeluarkan dari ruang oven, serupa dengan temuan Karnowo bahwa peningkatan kecepatan aliran udara memperbesar laju evaporasi dan pengeringan material higroskopis [10]. Kedua, kenaikan temperatur akibat peningkatan sirkulasi udara memperbesar kapasitas udara dalam menampung uap air sehingga kelembapan relatif menurun, sebagaimana ditunjukkan oleh Umar dkk. yang mengontrol suhu dan kelembapan pada kotak penyimpanan produk kulit: ketika suhu dinaikkan secara terkontrol, RH dapat dijaga dalam rentang yang diinginkan tanpa kondensasi berlebih [12]. Rentang kelembapan 33,5–38,0% RH yang diperoleh dalam penelitian ini berada sedikit di bawah batas bawah rekomendasi 40–50% RH untuk proses pengecatan otomotif [3][4], tetapi masih berada pada zona aman untuk meminimalkan risiko *blistering*, *blushing*, dan kegagalan adhesi lapisan cat yang umumnya meningkat pada kelembapan tinggi.

Analisis keseragaman distribusi kecepatan udara pada Tabel 3 menunjukkan koefisien variasi di bawah 5% untuk seluruh variasi kecepatan, yang mengindikasikan bahwa desain ventilasi dual *intake* dan satu *exhaust* menghasilkan pola aliran yang sangat seragam di seluruh ruang oven. Keseragaman ini penting karena fluktuasi lokal pada kecepatan udara akan berakibat pada gradien temperatur dan kelembapan yang besar sehingga menimbulkan perbedaan tingkat *curing* pada berbagai bagian bodi kendaraan. Hasil ini sejalan dengan studi Şahin yang melakukan optimasi desain oven industri berbasis *computational fluid dynamics* (CFD) dan menunjukkan bahwa distribusi kecepatan dan temperatur yang lebih seragam secara langsung meningkatkan kualitas produk dan mengurangi *reject* produksi [19]. Demikian pula, Pandiangan dkk. menemukan bahwa perancangan ulang sistem ventilasi pada ruangan formulasi PT XYZ yang meningkatkan kecepatan aliran udara dari 0,13 m/s menuju rentang standar secara signifikan memperbaiki kondisi termal dan kenyamanan kerja [20]. Dengan demikian, nilai koefisien variasi 0,54–3,22% pada Tabel 3 menegaskan bahwa konfigurasi ventilasi dalam penelitian ini sudah berada pada kategori sangat seragam dan layak dijadikan acuan desain oven pengecatan skala laboratorium maupun *small workshop*.

Secara praktis, kombinasi kecepatan sirkulasi udara 2,67–3,89 m/s dengan temperatur 56,5–59,5 °C dan kelembapan 33,5–35,5% RH (Tabel 2; Gambar 2 dan 3) dapat direkomendasikan sebagai rentang operasi optimal untuk oven pengecatan yang diteliti. Kondisi ini memungkinkan perpindahan panas konveksi yang intensif, mempercepat penguapan pelarut, sekaligus menjaga kelembapan pada tingkat yang rendah namun masih aman bagi lapisan cat. Hasil tersebut konsisten dengan Tyagita dkk. yang melaporkan bahwa kombinasi temperatur pengeringan yang cukup tinggi dan pengaturan komposisi *thinner* yang tepat meningkatkan kekerasan, kilap, dan daya lekat cat ABS secara signifikan [4]. Implikasinya, pengaturan kecepatan sirkulasi udara tidak dapat dipisahkan dari parameter proses lain seperti temperatur setpoint dan formulasi cat; ketiganya harus dioptimasi bersama untuk mencapai kualitas pengecatan kendaraan yang konsisten dan berulang.

Dari sisi pengembangan teknologi, hasil penelitian ini juga memperkuat urgensi integrasi sistem pemantauan dan kontrol otomatis. Pola hubungan kuantitatif antara kecepatan sirkulasi udara, temperatur, dan kelembapan yang diperoleh dari Tabel 2 dan Tabel 3 dapat dijadikan dasar perancangan *feedback control* berbasis sensor untuk menjaga kondisi oven pada zona operasi ideal secara real-time. Hal ini selaras dengan penelitian Riyadi dkk. yang mengembangkan sistem pemantauan jarak jauh terintegrasi yang menggabungkan anemometer, higrometer, dan termometer untuk memonitor kondisi lingkungan secara kontinu [21]. Implementasi konsep serupa pada oven pengecatan seperti misalnya melalui integrasi sensor kecepatan udara, suhu, dan kelembapan dengan *controller* digital berpotensi meningkatkan konsistensi mutu pengecatan, mengurangi *rework*, dan sekaligus memperbaiki aspek keselamatan serta kesehatan kerja operator yang terpapar udara panas dan uap pelarut selama proses *curing*.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem sirkulasi udara dengan konfigurasi kipas *intake-exhaust* berpengaruh signifikan terhadap kestabilan temperatur dan kelembapan udara di dalam oven pengecatan bodi kendaraan. Peningkatan kecepatan sirkulasi udara dari 0,91 m/s menjadi 3,89 m/s menaikkan suhu rata-rata oven dari 52,5 °C menjadi 59,5 °C (kenaikan 13,3%) sekaligus menurunkan kelembapan relatif dari 38,0% menjadi 33,5% RH (penurunan 11,8%), yang menunjukkan semakin tingginya efisiensi perpindahan panas konveksi dan laju pembuangan uap air melalui *exhaust*. Analisis keseragaman pada Tabel 3 menunjukkan koefisien variasi kecepatan udara < 5% di seluruh variasi pengujian dengan selisih kecepatan antartitik hanya 0,02–0,17 m/s, sehingga tidak teridentifikasi *dead zone* di dalam oven. Secara keseluruhan, durasi pengeringan 20 menit pada rentang kecepatan 2,67–3,89 m/s menghasilkan kondisi operasi yang dinilai optimal, yaitu temperatur 56,5–59,5 °C dan kelembapan 33,5–35,5% RH, yang mendukung proses *curing* cat kendaraan secara lebih stabil, seragam, dan terkendali.

Saran

Pengoperasian oven pengecatan disarankan menggunakan kecepatan sirkulasi udara dalam rentang 2,67–3,89 m/s untuk mempertahankan kondisi termal dan kelembapan yang mendekati parameter optimal, disertai kalibrasi berkala sensor suhu dan kelembapan guna menjamin akurasi pengukuran. Penerapan sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler atau PLC yang mengintegrasikan sensor kecepatan udara, temperatur, dan kelembapan sangat direkomendasikan agar kecepatan kipas dapat diatur secara dinamis berdasarkan data *real-time*, sehingga konsistensi kualitas pengeringan meningkat dan ketergantungan pada pengaturan manual berkurang. Dari sisi operasional, perlu dijadwalkan pemeriksaan rutin kebersihan filter *intake*, perawatan kipas dan elemen pemanas sekurang-kurangnya sekali sebulan untuk menjaga performa sistem ventilasi. Penelitian lanjutan sebaiknya melibatkan pengujian dengan *body part* aktual, berbagai jenis cat (*water-based*, *solvent-based*, *UV-cured*), dan variasi durasi pengeringan, serta menambahkan pengukuran konsumsi energi dan uji kualitas lapisan cat (ketebalan, daya lekat, dan kilap) guna memetakan hubungan langsung antara parameter proses, efisiensi energi, dan mutu hasil pengecatan.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] E. Haryanto and B. P. Ichtiarto, "Analisa penurunan cacat (defect) cat bintik debu dengan metodologi six sigma pada proses painting produk fuel tank di PT. SSO Tangerang," *J. PASTI*, vol. 13, no. 3, pp. 326–337, 2019, doi: 10.22441/pasti.2019.v13i3.009.
- [2] Sutrisno, "Pengaruh Suhu Pemanasan terhadap Kualitas Lapisan Cat pada Proses Finishing Logam," *Jurnal Teknik Industri dan Otomotif*, vol. 5, no. 2, pp. 33–39, 2020.
- [3] E. Chilton, "Effect of Temperature and Humidity on Paint," Arizona Painting Company, [Online]. Available: <https://arizonapaintingcompany.com/affect-of-temperature-and-humidity-on-paint/>
- [4] D. A. Tyagita, A. W. Pratama, and D. B. Aprianto, "Variation of tinner level and drying temperature on quality of ABS vehicle bodies painting," *J-Proteksion*, vol. 4, no. 1, pp. 11–15, 2019, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/288194768.pdf>
- [5] R. Siregar and T. Abidin, "Pengaruh besar temperatur dan lama pemanasan terhadap daya lekat cat pada oven portable dalam pengecatan bodi mobil," *Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik Universitas Darma Persada*, vol. 10, no. 1, 2020, [Online]. Available: <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/4578917>.

-
- [6] K. Brahmaseta Hermianto and F. Yasa Utama, "Pengaruh drying process terhadap finishing top coat pada pengecatan komponen bodi kendaraan bermotor," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 3, pp. 215–224, 2018.
- [7] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [8] M. Mobedi and G. Gediz Ilis, *Fundamentals of Heat Transfer: An Interdisciplinary Analytical Approach*. Singapore: Springer, 2023, doi: 10.1007/978-981-99-0957-5.
- [9] J. P. Liawan, H. Tanujaya, and S. Darmawan, "Analisis aliran udara dan kenyamanan termal di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa menggunakan metode computational fluid dynamics (CFD)," *J. Asimetri: J. Ilm. Rekayasa & Inov.*, vol. 5, no. 1, pp. 123–134, 2023, doi: 10.35814/asiimetrik.v5i1.3122
- [10] Karnowo, "Pengaruh variasi kecepatan sirkulasi udara terhadap laju pengeringan kayu pada dapur pengering kayu," *Inov. Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 29–34, 2021, doi: 10.15294/jim.v3i2.52797.
- [11] A. D. Dwi Aksa, D. Fernandez, T. Sugiarto, and I. Nanda, "Implementasi sistem manajemen kesehatan dan keselamatan kerja di jurusan teknik kendaraan ringan SMK AL-Anhar Bayang," *JTPVI: J. Teknol. dan Pendidik. Vokasi Indonesia*, vol. 3, no. 2, pp. 679–688, 2025, doi: 10.24036/jtpvi.v3i2.292.
- [12] M. S. Umar, D. Y. Tadeus, M. Fakhrudin, and A. B. Putranto, "Rancang bangun sistem pengendalian suhu dan kelembaban pada box penyimpanan produk berbahan kulit berbasis mikrokontroler Arduino Uno," *Berk. Fis.*, vol. 25, no. 1, pp. 27–35, 2022.
- [13] S. Muhammad Makruf et al., "Analisis kelembaban udara terhadap tingginya suhu di Sekaran Semarang," 2025, [Online]. Available: <http://jurnalilmiah.org/journal/index.php/Analisis>
- [14] H. Suryantoro, "Prototipe dehumidifier untuk monitoring kelembaban laboratorium biomedis menggunakan sensor DHT22 dan peltier TEC1-12706 berbasis Arduino," *Indones. J. Lab.*, no. 3, p. 79, 2023, doi: 10.22146/ijl.v0i3.88033.
- [15] H. Purwanto, S. R. Andary, and M. Andrianto, "Rekayasa kecepatan angin wind tunnel dan gerak wings pada aerodinamika berbasis alat ukur anemometer," *J. Pengemb. Potensi Lab.*, vol. 1, no. 2, pp. 61–66, 2022, doi: 10.25047/plp.v1i2.3018.
- [16] A. Rachman, *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif dan R&D*, 2024.
- [17] R. Panjaitan, *Metodologi Penelitian*. Kupang, Indonesia: Jusuf Aryani Learning, 2017.
- [18] F. Dewi Utami Gayuh, "Pengaruh kecepatan dan arah aliran udara terhadap kondisi udara dalam ruangan pada sistem ventilasi alamiah," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 299–304, 2012.
- [19] S. Şahin, "A systematic approach to numerical analysis and validation for industrial oven design and optimization – A case study," *Isi Bilim. ve Tek. Derg.*, vol. 45, no. 1, pp. 36–46, 2025, doi: 10.47480/isibted.1505298.
- [20] K. C. Pandiangan, L. Nurul Huda, A. Jabbar, and M. Rambe, "Analisis perancangan sistem ventilasi dalam meningkatkan kenyamanan termal pekerja di ruangan formulasi PT XYZ," *J. Tek. Ind. FT USU*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [21] D. S. Riyadi, A. Ramadhan, and R. A. Firmansyah, "Sistem pemantauan jarak jauh yang mengintegrasikan anemometer, higrometer, dan termometer," in *Proc. Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan X*, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2022, pp. 1–7.