RANCANG BANGUN ALAT POWDER COATING: BOOTH PENYEMPROTAN DAN OVEN CURING

Muh Asrul Aziz [1], Atjuan Gunawan Selang [2], Muh Resa Satrian [3], Muhammad Yahya [4], Wabdillah [5], Mansyur [6], Muhammad Iskandar Musa [7], Ismail Rahim [8], Muhammad Farid [9]

[1-9] Program Studi Mesin Otomotif Terapan, Jurusan Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar [1]

[1] muhasrulaziz@gmail.com, [2] btian5055@gmail.com,

[3] muhresasatrianreza@gmail.com,

ABSTRACT

This study integrates the design and construction of a powder coating spray booth and a curing oven into a practical coating system for an automotive education laboratory. The booth was designed as a spraying area equipped with a 10-inch exhaust blower and powder collection arrangements, while the curing oven uses an infrared ceramic burner, a thermocouple, a REX-C100 PID controller, and an automatic timer. The study used an experimental approach with observation, functional testing, documentation, and descriptive analysis. Booth and spray gun tests showed that powder could be sprayed and partially extracted and collected; however, fine powder could still escape because the exhaust system did not use a filter. At 40 kV and 40 psi, visual spraying results at distances of 5, 10, and 15 cm differed, with the 10 cm distance producing a relatively uniform coating. Oven temperature tests showed actual temperatures of 147°C and 178°C at set points of 150°C and 180°C, respectively. The timer matched the selected durations of 10, 15, and 20 minutes. At 180°C, visual curing observations at 5, 10, and 15 minutes indicated progressively more integrated coating, although the optimum curing condition cannot be established from visual assessment alone. The integrated equipment can support practical powder coating activities, with further testing needed for extraction efficiency, temperature stability, adhesion, and coating thickness.

Keywords: *powder coating; spray booth; curing oven; infrared ceramic burner; temperature control*

ABSTRAK

Penelitian ini mengintegrasikan rancang bangun booth penyemprotan dan oven curing powder coating sebagai satu sistem pelapisan untuk mendukung kegiatan praktik di laboratorium pendidikan otomotif. Booth dirancang sebagai ruang penyemprotan yang dilengkapi blower penghisap berukuran 10 inci dan sarana penampungan serbuk, sedangkan oven curing menggunakan infrared ceramic burner, thermocouple, PID controller REX-C100, dan timer otomatis. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen melalui observasi, pengujian fungsi, dokumentasi, dan analisis deskriptif. Pengujian booth dan spray gun menunjukkan bahwa serbuk dapat disemprotkan, sebagian terhisap, dan tertampung; tetapi serbuk halus masih berpotensi keluar karena sistem penghisap belum menggunakan filter. Pada tegangan 40 kV dan tekanan 40 psi, hasil penyemprotan pada jarak 5, 10, dan 15 cm

menunjukkan perbedaan visual, dengan jarak 10 cm menghasilkan lapisan relatif merata. Pengujian oven menunjukkan suhu aktual 147°C dan 178°C pada pengaturan 150°C dan 180°C. Timer sesuai dengan pengaturan 10, 15, dan 20 menit. Pada suhu 180°C, pengamatan curing selama 5, 10, dan 15 menit menunjukkan lapisan yang semakin menyatu, tetapi kondisi curing optimum belum dapat ditentukan hanya melalui pengamatan visual. Sistem terpadu ini dapat mendukung praktik powder coating, dengan kebutuhan pengujian lanjutan terhadap efektivitas penghisapan, kestabilan suhu, daya lekat, dan ketebalan lapisan.

Kata Kunci: powder coating; booth penyemprotan; oven curing; infrared ceramic burner; pengaturan suhu

A. Pendahuluan

Perkembangan industri otomotif mendorong peningkatan tuntutan terhadap kualitas proses finishing komponen kendaraan. Pengecatan tidak hanya berfungsi memberikan warna dan tampilan, tetapi juga menjadi bagian dari perlindungan permukaan logam. Salah satu teknologi pelapisan yang digunakan adalah powder coating, yaitu proses pelapisan menggunakan serbuk polimer kering yang diberi muatan elektrostatik, diarahkan ke permukaan benda kerja, kemudian dipanaskan agar meleleh, mengalir, dan membentuk lapisan yang menyatu. Dibandingkan cat cair berbasis pelarut, proses ini tidak menggunakan pelarut cair dalam aplikasi sehingga dapat mengurangi emisi senyawa organik volatil (Karde et al., 2025).

Pelaksanaan powder coating memerlukan dua tahapan utama yang saling berhubungan, yaitu aplikasi serbuk dan curing. Tahap aplikasi membutuhkan ruang kerja yang dapat membatasi penyebaran serbuk serta membantu mengarahkan partikel yang tidak menempel (overspray). Booth powder coating berfungsi sebagai area khusus penyemprotan. Sistem ventilasi atau penghisap dapat membantu mengarahkan udara dan serbuk menuju saluran pembuangan atau tempat penampungan. Desain booth industri tertentu menggunakan filter atau sistem pemulihan serbuk untuk meningkatkan kebersihan dan efisiensi material (Nordson Corporation, 2010; Powder Coating Institute, 2021).

Booth yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan konstruksi sederhana dengan rangka besi hollow, dinding tripleks melamin, blower 10 inci, saluran pembuangan, wadah penampung, serta laci pada

bagian bawah. Sistem penghisap yang digunakan belum dilengkapi filter. Karena itu, penampungan yang tersedia hanya mengumpulkan serbuk yang masuk ke wadah dan tidak dapat dianggap sebagai sistem filtrasi. Sebagian partikel halus masih berpotensi terbawa aliran udara keluar dari saluran pembuangan. Batasan tersebut penting dijelaskan ketika mengevaluasi kinerja booth.

Setelah serbuk diaplikasikan, benda kerja perlu menjalani proses curing. Oven curing menyediakan energi panas pada temperatur dan durasi tertentu agar partikel serbuk meleleh, mengalir, dan—pada serbuk termoset—mengalami reaksi pematangan. Tahapan pembentukan lapisan meliputi melting, flow, gel point, dan curing completion (Bobalek et al., 2001). Pemanasan yang tidak mencukupi dapat menyebabkan lapisan belum matang, sedangkan pemanasan berlebihan dapat memengaruhi warna, kilap, atau sifat lapisan. Penggunaan pemanas inframerah berbahan bakar gas juga memerlukan perhatian terhadap perpindahan energi dan efisiensi termal (Deans & Kögl, 2000).

Oven yang dirancang menggunakan infrared ceramic burner, sensor thermocouple, PID controller REX-C100, dan timer switch. Sistem tersebut ditujukan untuk membantu operator mengatur dan memantau temperatur serta durasi pemanasan. Kinerja pengendalian perlu dilihat dari kesesuaian suhu aktual terhadap nilai pengaturan dan ketepatan waktu timer. Selain itu, hasil curing pada benda kerja perlu diamati untuk mengetahui kondisi visual lapisan setelah pemanasan.

Rancang bangun booth dan oven dalam dua penelitian tugas akhir ini memiliki fungsi yang saling melengkapi. Booth mendukung aplikasi serbuk, sedangkan oven mendukung pematangan lapisan. Oleh sebab itu, artikel ini menyatukan hasil perancangan, perakitan, dan pengujian kedua perangkat untuk memberikan gambaran sistem powder coating terpadu di Laboratorium Pendidikan Teknik Otomotif Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar. Fokus kajian meliputi konstruksi booth, kinerja booth dan spray gun, hasil penyemprotan, konstruksi oven, kinerja pengaturan suhu dan timer, serta hasil curing pada benda kerja.

B. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen yang berorientasi pada perancangan, pembuatan, perakitan, dan pengujian alat. Objek penelitian terdiri atas booth powder coating beserta spray gun dan oven curing powder coating. Pengujian dilakukan pada perangkat hasil rancang bangun dengan mengamati fungsi komponen, membandingkan nilai pengaturan dengan hasil aktual, serta mengamati kondisi visual lapisan pada benda kerja.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi, pengujian, dan dokumentasi. Observasi digunakan untuk melihat fungsi blower, aliran serbuk dari spray gun, kondisi penampungan, pembacaan temperatur oven, serta kondisi lapisan setelah curing. Pengujian dilakukan pada variasi jarak penyemprotan, tegangan, tekanan udara, suhu oven, dan durasi pemanasan sebagaimana tercantum pada hasil pengujian. Dokumentasi berupa foto proses perancangan, perakitan, pengujian, dan hasil pelapisan digunakan sebagai data pendukung.

Data dianalisis secara deskriptif dengan menjelaskan konstruksi dan fungsi setiap komponen. Analisis komparatif digunakan untuk membandingkan jarak penyemprotan dan kondisi lapisan, serta membandingkan suhu dan waktu aktual terhadap nilai yang ditetapkan. Penilaian kualitas lapisan dalam kedua pengujian terutama didasarkan pada pengamatan visual. Dengan demikian, hasil visual tidak diperlakukan sebagai pengukuran kuantitatif ketebalan, daya lekat, atau tingkat pematangan lapisan.

Pada tahap penyemprotan, variasi jarak spray gun terhadap benda kerja adalah 5 cm, 10 cm, dan 15 cm, dengan tegangan mesin powder coating 40 kV dan tekanan kompresor 40 psi. Pada tahap pengujian oven, suhu yang ditetapkan adalah 150°C dan 180°C. Timer diuji pada durasi 10, 15, dan 20 menit. Pengujian hasil curing dilakukan pada suhu 180°C dengan variasi waktu 5, 10, dan 15 menit.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Hasil Perancangan dan Perakitan Booth Powder Coating

Booth dibuat menggunakan rangka besi hollow berukuran 3 × 3 cm dengan ketebalan 1,1 mm. Rangka menggunakan besi hollow dengan panjang 6 m sebanyak 12 batang. Dinding booth menggunakan tripleks

melamin berukuran panjang 122 cm, lebar 244 cm, dan tebal 3 mm. Sistem penghisap menggunakan blower berukuran 10 inci. Pada bagian keluaran blower disediakan wadah penampung, sedangkan pada bagian bawah booth terdapat laci untuk menampung serbuk yang jatuh atau terkumpul.

Rancangan tersebut menyediakan ruang kerja untuk melakukan penyemprotan dan membantu mengarahkan sebagian serbuk yang tidak menempel menuju saluran pembuangan. Sistem ini tidak menggunakan filter. Oleh karena itu, wadah penampung bukan media penyaring dan tidak menjamin seluruh partikel halus tertahan. Secara fungsional, booth merupakan ruang penyemprotan dengan sistem penghisap dan penampungan sederhana.

2. Pengujian Kinerja Booth dan Spray Gun

Pengujian awal dilakukan untuk memastikan blower dan spray gun dapat berfungsi. Hasil pengamatan menunjukkan blower dapat dihidupkan dan menarik udara menuju saluran pembuangan. Sebagian serbuk terhisap menuju saluran, kemudian serbuk yang keluar melalui saluran masuk ke wadah penampung. Serbuk juga terlihat menempel dan terkumpul pada laci di bagian bawah booth. Namun, serbuk halus masih berpotensi menyebar ke luar karena sistem belum menggunakan filter.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kinerja Booth dan Spray Gun

Komponen	Aspek yang diamati	Hasil pengamatan	Keterangan
Booth	Fungsi blower	Blower hidup dan menarik udara menuju saluran pembuangan	Berfungsi
Booth	Penghisapan serbuk	Sebagian serbuk terhisap menuju saluran pembuangan	Baik
Booth	Penampungan di pembuangan	Serbuk dari saluran masuk ke wadah penampung	Tertampung
Booth	Penampungan laci bawah	Serbuk menempel dan terkumpul pada permukaan laci	Tertampung
Booth	Penyebaran di luar booth	Serbuk halus masih berpotensi keluar karena tidak ada filter	Belum terkendali sepenuhnya

Spray gun	Keluaran nozzle dan aliran	Serbuk keluar secara berkelanjutan saat pengujian	Keluar dan lancar
Spray gun	Arah semprotan	Serbuk dapat diarahkan ke permukaan benda kerja	Sesuai
Spray gun	Penempelan serbuk	Serbuk terlihat menempel pada benda kerja	Menempel

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa fungsi dasar sistem telah berjalan: spray gun mengeluarkan serbuk dengan bantuan udara bertekanan dan booth menjadi area pelaksanaan penyemprotan. Akan tetapi, keberhasilan uji fungsi awal tidak sama dengan bukti bahwa seluruh overspray telah tertangkap. Efektivitas penghisapan, kapasitas penampungan, dan potensi keluarnya partikel halus masih perlu diuji lebih lanjut.

3. Hasil Penyemprotan

Pengujian penyemprotan dilakukan pada tegangan 40 kV dan tekanan kompresor 40 psi dengan variasi jarak 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Serbuk dapat diarahkan ke permukaan benda kerja pada ketiga variasi jarak. Perbedaan terlihat pada tampilan tekstur dan pemerataan serbuk.

Tabel 2. Hasil Penyemprotan pada Variasi Jarak

Tegangan	Jarak	Hasil pengamatan	Kualitas visual
40 kV	5 cm	Serbuk menempel, tetapi tekstur bervariasi pada beberapa area	Kurang baik; belum seragam
40 kV	10 cm	Lapisan terbentuk dengan tekstur relatif seragam	Baik; relatif merata
40 kV	15 cm	Permukaan tertutup dengan pola penyebaran cukup merata	Baik; cukup seragam

Pengamatan visual menunjukkan jarak 10 cm memberikan tampilan yang relatif merata. Jarak 15 cm juga menunjukkan penyebaran yang cukup seragam, sedangkan pada jarak 5 cm tampak variasi tekstur. Dalam uraian pembahasan sumber, jarak 10 cm dan tegangan 40 kV disebut sebagai hasil yang relatif lebih baik. Namun, kesimpulan penelitian booth juga mencatat bahwa pada jarak 15 cm lapisan

terlihat menumpuk dan terdapat bagian tebal serta tidak merata, sedangkan pada jarak 5 cm lapisan lebih menipis dan kurang merata pada bagian tepi. Dengan demikian, hasil penilaian visual jarak 15 cm tidak sepenuhnya konsisten antarbagian laporan. Artikel ini mempertahankan data tabel dan catatan kesimpulan tersebut tanpa menetapkan jarak 15 cm sebagai kondisi terbaik. Jarak 10 cm dapat digunakan sebagai acuan awal untuk pengujian lanjutan, bukan sebagai parameter optimum yang telah tervalidasi.

4. Hasil Perancangan dan Perakitan Oven Curing

Oven curing dirancang sebagai ruang pemanas tertutup dengan rangka besi hollow berukuran 3 × 3 cm dan ketebalan 1,1 mm. Rangka menggunakan besi hollow panjang 6 m sebanyak 12 batang. Dinding oven menggunakan besi plat dengan ukuran panjang 240 cm, lebar 140 cm, dan ketebalan 1,2 mm. Bagian dalam diberi isolasi glasswool dan dilapisi seng. Sumber panas menggunakan infrared ceramic burner berukuran 40 × 5 cm. Oven dilengkapi panel kontrol, thermocouple, PID controller REX-C100, timer switch, serta komponen pendukung sistem gas.

Thermocouple digunakan untuk membaca temperatur ruang oven melalui panel kontrol. PID controller REX-C100 berfungsi mengatur dan memantau suhu sesuai nilai yang ditetapkan, sedangkan timer switch digunakan untuk mengatur durasi pemanasan. Konstruksi dan komponen tersebut dimaksudkan untuk membantu pelaksanaan curing dengan temperatur dan waktu yang dapat diatur.

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Perancangan dan Perakitan Oven

Aspek	Kriteria pengamatan	Hasil pengamatan
Konstruksi oven	Kesesuaian konstruksi	Rangka besi hollow dan ruang oven berbahan plat dengan isolasi glasswool
Infrared ceramic burner	Pemasangan dan fungsi pemanas	Dipasang sebagai sumber panas untuk curing
Sensor suhu	Pembacaan temperatur	Thermocouple membaca temperatur oven melalui panel kontrol
Sistem pengaturan suhu	Fungsi pengaturan	PID controller REX-C100 mengatur dan

		memantau suhu
Timer otomatis	Pengaturan waktu	Timer switch dipasang sebagai pengatur durasi pemanasan

5. Kinerja Pengaturan Suhu dan Timer Otomatis

Kinerja pengaturan suhu diuji dengan menetapkan suhu 150°C dan 180°C, kemudian membandingkannya dengan suhu aktual yang terbaca. Pada pengaturan 150°C, suhu aktual mencapai 147°C sehingga selisihnya 3°C. Pada pengaturan 180°C, suhu aktual mencapai 178°C dengan selisih 2°C. Hasil tersebut menunjukkan suhu aktual mendekati nilai pengaturan pada dua titik pengujian.

Tabel 4. Hasil Kinerja Pengaturan Suhu

Suhu ditetapkan (°C)	Suhu aktual (°C)	Selisih (°C)	Keterangan
150	147	3	Mendekati pengaturan
180	178	2	Mendekati pengaturan

Pengujian timer dilakukan pada pengaturan 10, 15, dan 20 menit. Waktu aktual pada setiap pengujian sama dengan waktu yang ditetapkan, sehingga selisih waktu adalah 0 menit.

Tabel 5. Hasil Kinerja Timer Otomatis

Waktu ditetapkan (menit)	Waktu aktual (menit)	Selisih (menit)	Keterangan
10	10	0	Sesuai pengaturan
15	15	0	Sesuai pengaturan
20	20	0	Sesuai pengaturan

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa timer bekerja sesuai durasi yang dipilih dan sistem pengaturan suhu dapat mencapai temperatur yang mendekati nilai target. Meski demikian, data dua titik suhu tersebut belum cukup untuk menyimpulkan kestabilan temperatur dalam seluruh ruang oven atau selama siklus curing. Laporan sumber juga merekomendasikan pengujian lanjutan untuk memastikan timer mulai menghitung setelah suhu target tercapai. Hubungan antara waktu pemanasan dan temperatur benda kerja perlu diperhatikan karena waktu curing pada spesifikasi serbuk umumnya berkaitan dengan temperatur benda kerja, bukan hanya waktu sejak oven dinyalakan.

6. Hasil Proses Curing pada Benda Kerja

Pengujian curing dilakukan pada suhu oven 180°C dengan variasi waktu 5, 10, dan 15 menit. Pengamatan difokuskan pada kondisi visual lapisan, meliputi penyatuan serbuk, pemerataan, dan kehalusan permukaan. Hasil pengamatan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Curing pada Benda Kerja

Suhu (°C)	Waktu (menit)	Pengamatan lapisan	Kualitas visual
180	5	Serbuk mulai meleleh, tetapi beberapa bagian masih kurang merata	Kurang baik; kemungkinan pemanasan belum cukup
180	10	Lapisan lebih menyatu dan relatif merata	Cukup baik secara visual; perlu pengujian lanjutan
180	15	Lapisan menyatu dan relatif halus; perlu pemeriksaan perubahan warna atau pemanasan berlebih	Baik secara visual pada contoh; belum membuktikan mutu curing

Variasi waktu menghasilkan perbedaan kondisi visual. Pemanasan 5 menit masih memperlihatkan lapisan kurang merata, sedangkan 10 dan 15 menit menghasilkan lapisan yang lebih menyatu. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu pemanasan yang lebih lama pada variasi yang diuji memberikan kondisi visual yang lebih baik. Namun, waktu curing paling optimal belum dapat ditetapkan hanya dari pengamatan visual. Penetapannya perlu mempertimbangkan jenis serbuk, spesifikasi produsen, temperatur aktual benda kerja, serta pengujian daya lekat, kekerasan, dan ketahanan lapisan.

7. Pembahasan Sistem Powder Coating Terpadu

Penggabungan booth dan oven memperlihatkan alur kerja powder coating dari aplikasi serbuk hingga pematangan lapisan. Booth menyediakan ruang untuk penyemprotan, sedangkan oven menyediakan kondisi panas untuk proses curing. Keduanya memiliki fungsi berbeda tetapi saling melengkapi. Keberadaan perangkat ini dapat menjadi media pembelajaran aplikatif bagi mahasiswa untuk memahami aspek mekanika, aliran udara, kelistrikan, pengendalian suhu, dan perpindahan panas dalam satu rangkaian proses.

Dari sisi booth, blower membantu menarik udara dan sebagian over-spray menuju saluran pembuangan. Serbuk yang masuk ke wadah dan laci menunjukkan bahwa mekanisme penampungan bekerja pada bagian tertentu. Akan tetapi, tanpa filter, sistem belum dapat mengendalikan seluruh partikel halus. Karena itu, penggunaan booth tetap perlu disertai pengendalian area kerja, pembersihan, dan alat pelindung diri yang sesuai. Pengembangan berikutnya dapat mempertimbangkan filter atau pemisah serbuk, serta pengukuran aliran udara untuk mengevaluasi kemampuan penghisapan.

Dari sisi oven, selisih suhu sebesar 2–3°C pada dua nilai pengaturan dan kesesuaian timer pada tiga variasi waktu merupakan hasil awal yang mendukung fungsi sistem kontrol. Namun, hasil tersebut tidak menggambarkan distribusi temperatur di seluruh ruang oven. Pengujian lanjutan perlu menggunakan beberapa titik pengukuran dan pencatatan suhu terhadap waktu. Pengujian juga perlu memastikan keterkaitan timer dengan tercapainya temperatur target, serta memeriksa temperatur benda kerja selama curing.

Penilaian kualitas hasil pelapisan dalam kedua pengujian masih bersifat visual. Hasil penyemprotan belum membuktikan ketebalan dan daya lekat, sedangkan hasil curing belum membuktikan tingkat pematangan secara objektif. Oleh karena itu, pengujian lanjutan perlu mencakup pengukuran ketebalan lapisan, uji daya lekat, kekerasan, dan ketahanan permukaan. Untuk hasil curing, parameter suhu dan waktu harus disesuaikan dengan lembar data teknis serbuk yang digunakan. Dengan batasan tersebut, perangkat yang dibangun dapat dinilai berhasil menjalankan fungsi dasar, tetapi belum dapat diklaim menghasilkan parameter proses optimum untuk semua jenis powder coating.

D. Kesimpulan

Rancang bangun booth powder coating berhasil direalisasikan menggunakan rangka besi hollow 3 × 3 cm, dinding tripleks melamin, dan blower 10 inci. Blower dapat menarik udara dan sebagian serbuk menuju saluran pembuangan, sementara serbuk juga terkumpul pada wadah dan laci bawah. Namun, karena belum menggunakan filter, partikel halus

masih berpotensi menyebar ke luar booth.

Spray gun dapat mengeluarkan serbuk dengan bantuan udara bertekanan dan mengarahkannya ke benda kerja. Pada pengujian 40 kV dan 40 psi dengan jarak 5, 10, dan 15 cm, hasil visual menunjukkan perbedaan pemerataan. Jarak 10 cm memberikan tampilan relatif merata dan dapat dijadikan acuan awal, tetapi parameter optimum belum dapat dipastikan melalui pengamatan visual saja.

Oven curing berhasil dibangun menggunakan rangka besi hollow, dinding besi plat, isolasi glasswool berlapis seng, infrared ceramic burner, thermocouple, PID controller REX-C100, dan timer otomatis. Sistem pengaturan suhu menghasilkan suhu aktual 147°C pada setelan 150°C dan 178°C pada setelan 180°C, dengan selisih masing-masing 3°C dan 2°C. Timer menunjukkan waktu aktual sesuai pengaturan 10, 15, dan 20 menit.

Pada suhu 180°C, curing selama 5 menit menghasilkan lapisan yang masih kurang merata, sedangkan 10 dan 15 menit menghasilkan lapisan yang lebih menyatu dan relatif halus. Waktu curing optimum belum dapat ditetapkan hanya berdasarkan pengamatan visual. Secara keseluruhan, booth dan oven dapat mendukung fungsi dasar proses powder coating sebagai perangkat pembelajaran, dengan sejumlah keterbatasan yang perlu diuji dan disempurnakan.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar Pustaka ditulis mengacu kepada standar APA 6th dengan panduan sebagai berikut :

Buku :

Nordson Corporation. (2010). ColorMax Powder Coating Booth: Installation Manual (Part No. 1099290A). Nordson Corporation.

Powder Coating Institute. (2021). Powder Coating: The Complete Finisher's Handbook (5th ed.). Powder Coating Institute.

Smith, J. (2017). Teknologi manufaktur otomotif: Inovasi, desain, dan produksi. McGraw-Hill Education.

Sugiyono. (2019). Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D. Alfabeta.

Widodo, S. (2018). Teknologi pengecatan industri: Proses, material, dan pengendalian mutu. Andi Offset.

Jurnal :

Abdullah, A., & Suryana, D. (2023). Prototype design of portable powder coating equipment for workshop applications. International Journal

of Mechanical Engineering Research, 15(4), 511–520.

Bobalek, E. G., et al. (2001). [Rujukan karakterisasi proses curing powder coating sebagaimana dikutip dalam sumber penelitian]. Progress in Organic Coatings.

Chen, Y., et al. (2023). Effect of substrate pretreatment on the adhesion of powder coating layers. Coatings, 13(2), 245.

Deans, J., & Kögl, M. (2000). The curing of powder coatings using gaseous infrared heaters: An analytical model to assess the process thermal efficiency. International Journal of Thermal Sciences, 39(7), 762–769.

Hosseini, M., & Khalili, H. (2021). Influence of surface roughness on powder coating adhesion. Applied Surface Science, 537, 147156.

Misev, T. V., & Van der Linde, R. (1998). Powder coatings technology: New developments at the turn of the century. Progress in Organic Coatings, 34(1–4), 160–168.

Singh, R., et al. (2024). Development of an automated powder coating system for SMEs. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102, 212–225.