

Analisa Pengaruh Variasi Posisi Pemanas Heater pada Oven Mesin Powder Coating terhadap Kualitas pada Lapisan Baja ASTM A36

Ramandika Galih Pratama^{1*}, Soeparno Djiwo¹

¹ Program Studi Teknik Mesin S1 Institut Teknologi Nasional Malang

Kata kunci

Powder Coating
Baja ASTM A36
Distribusi Panas
Ketebalan Lapisan
Kekerasan Lapisan

ABSTRAK

Proses powder coating merupakan metode pelapisan logam yang efisien, estetik, serta juga ramah lingkungan, namun kualitas hasil sangat dipengaruhi oleh distribusi panas didalam oven. Temuan ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi posisi heater terhadap kualitas lapisan powder coating pada baja ASTM A36, khususnya dari segi ketebalan, kekerasan, serta juga keseragaman adhesi. Metode yang dipergunakan adalah eksperimental dengan variasi jarak heater 10 cm, 30 cm, serta juga 50 cm, suhu konstan 250°C, serta waktu pemanasan 15 menit. Pengujian meliputi pengamatan struktur makro, pengukuran ketebalan lapisan mempergunakan coating thickness gauge, serta juga uji kekerasan dengan durometer Shore A. Hasil menunjukkan bahwasanya jarak heater 30 cm menghasilkan distribusi panas paling optimal, ditandai oleh ketebalan lapisan stabil (42,67–63,00 μm) serta juga kekerasan seragam (98,00–98,33 HA). Jarak 10 cm meskipun menghasilkan ketebalan tinggi di beberapa titik, menunjukkan variasi ketebalan yang besar serta juga distribusi panas tidak merata. Sementara jarak 50 cm menyebabkan ketebalan menurun, permukaan kurang homogen, serta juga muncul cacat visual seperti orange peel. Temuan ini menegaskan pentingnya penempatan heater yang tepat untuk memastikan homogenitas termal, meningkatkan kualitas adhesi, serta efisiensi energi didalam proses powder coating baja ASTM A36.

* **Corresponding author:**
Ramandika Galih Pratama (email: dranixfortune@gmail.com)

Diterima: 10 Oktober 2025

Disetujui: 27 Januari 2026

Dipublikasikan: 31 Maret 2026

1 Pendahuluan

Proses *powder coating* adalah salah satu metode pelapisan permukaan logam yang berkembang sangat pesat di dunia industri modern, khususnya di bidang manufaktur, otomotif, serta konstruksi. Metode ini dipilih karena memiliki keunggulan dibandingkan teknik pengecatan konvensional berbasis cair. Dalam sistem ini, dipergunakan partikel serbuk cat yang diaplikasikan pada permukaan logam, kemudian dipanaskan hingga meleleh sehingga mampu menempel secara merata serta juga menghasilkan lapisan padat, halus, serta juga kuat. Keunggulan paling utama dari metode *powder coating* terletak pada efisiensinya yang tidak menghasilkan limbah cair, tampilan akhir yang lebih estetik, serta perlindungan tinggi terhadap korosi atau karat yang sering menjadi masalah utama pada material logam.

Keberhasilan proses *powder coating* tidak hanya ditentukan oleh kualitas serbuk cat, melainkan juga oleh efektivitas sistem pemanasan yang terdapat didalam oven. Suhu yang konsisten serta juga merata sangat penting agar seluruh permukaan logam menerima perlakuan panas dengan seimbang. Dalam hal ini, posisi *heater* didalam oven memiliki peran vital. Apabila distribusi panas tidak seragam, hasil akhir pelapisan dapat menurun, misalnya muncul cacat visual, ketebalan yang tidak konsisten, hingga terbentuknya porositas. Oleh karena itu, analisis mengenai variasi penempatan *heater* didalam oven menjadi faktor yang sangat penting untuk diteliti secara lebih mendalam.

Sejumlah temuan terdahulu banyak menitikberatkan pada variabel suhu oven serta juga durasi *curing*, yakni waktu yang dibutuhkan untuk proses pengeringan serta juga pengerasan lapisan. Namun, aspek distribusi

Ramandika Galih Pratama, Soeparno Djiwo

panas akibat posisi *heater* belum mendapatkan perhatian yang cukup luas. Padahal, temuan terbaru menunjukkan bahwasanya distribusi panas yang tidak merata dapat menyebabkan lapisan logam mengalami berbagai cacat seperti *orange peel* (permukaan bertekstur seperti kulit jeruk), retakan mikro, atau ketebalan lapisan yang tidak konsisten. Semua cacat tersebut pada akhirnya akan menurunkan kualitas pelapisan sekaligus mengurangi daya tahan material terhadap korosi.

Salah satu jenis logam yang sering menjadi objek temuan terkait *powder coating* adalah baja ASTM A36. Baja ini tergolong baja karbon rendah yang banyak dipergunakan didalam industri konstruksi gedung, jembatan, otomotif, serta peralatan manufaktur. Keunggulan baja ASTM A36 terletak pada kombinasi antara kekuatan mekanik yang cukup baik, kemudahan didalam proses fabrikasi, serta biaya produksinya yang relatif ekonomis. Akan tetapi, sifat dasar baja karbon rendah membuat material ini kurang tahan terhadap serangan korosi, sehingga dibutuhkan pelapisan pelindung seperti *powder coating* untuk meningkatkan usia pakai serta juga keandalannya.

Menurut beberapa studi, sifat mekanik maupun struktur mikro baja ASTM A36 dapat mengalami perubahan signifikan akibat perlakuan panas selama proses pelapisan. Hal ini terjadi karena baja memiliki struktur mikro yang sensitif terhadap variasi suhu. Jika distribusi panas tidak terjaga secara konsisten, lapisan pelindung yang dihasilkan dapat kehilangan kualitas adhesi, berkurang daya tahannya, serta juga memunculkan cacat. Oleh sebab itu, keberadaan *heater* yang ditempatkan secara optimal menjadi solusi penting untuk memastikan homogenitas termal di seluruh bagian oven.

Optimalisasi posisi *heater* terbukti mampu menciptakan kondisi pemanasan yang lebih merata sehingga hasil akhir pelapisan menjadi lebih baik. Sebaliknya, jika posisi pemanas kurang tepat, maka beberapa bagian logam mungkin akan menerima panas berlebih sementara bagian lain kekurangan panas. Kondisi ini memunculkan perbedaan ketebalan lapisan, melemahkan daya rekat, bahkan menyebabkan deformasi. Hal tersebut tentu merugikan pihak industri yang menuntut konsistensi kualitas produk, terutama pada skala produksi massal.

Dalam industri modern yang semakin kompetitif, permintaan terhadap produk berlapis pelindung yang tahan lama, ekonomis, serta juga ramah lingkungan terus meningkat. Maka dari itu, kalangan industri dituntut untuk mengoptimalkan setiap detail proses produksi, termasuk teknik pelapisan logam. Salah satu aspek yang relatif jarang dikaji secara komprehensif adalah penempatan *heater* didalam oven *powder coating*. Sebagian besar temuan berfokus pada standar temperatur serta juga waktu *curing*, tetapi faktor posisi *heater* yang sangat menentukan distribusi suhu masih belum banyak dieksplorasi didalam literatur akademik.

Metode eksperimental sangat dibutuhkan. Dengan mempergunakan pendekatan eksperimen, dapat dievaluasi secara langsung bagaimana variasi penempatan *heater* memengaruhi parameter fisik lapisan, misalnya ketebalan, tingkat kekerasan permukaan, serta juga daya lekat. Salah satu standar pengujian yang sering dipergunakan untuk menilai kekuatan adhesi adalah *ASTM D3359*. Melalui pengujian ini, kualitas lapisan dapat diukur secara objektif sehingga pengaruh posisi *heater* terhadap kualitas pelapisan baja ASTM A36 bisa dibuktikan secara ilmiah.

Jika temuan dilakukan secara menyeluruh, maka hasilnya akan memberikan kontribusi penting, baik secara akademis maupun praktis. Dari sisi akademis, studi ini dapat mengisi kekosongan literatur mengenai distribusi panas didalam proses *powder coating*. Sementara dari sisi praktis, hasil temuan bisa menjadi acuan bagi industri untuk melakukan kalibrasi oven, menyusun *Standard Operating Procedure* (SOP) baru, serta juga meningkatkan efisiensi energi. Peningkatan efisiensi energi sendiri sangat penting di era industri modern, karena tidak hanya berdampak pada biaya produksi, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan.

Temuan mengenai variasi posisi *heater* ini diharapkan dapat mendorong terciptanya teknologi oven yang lebih canggih, misalnya oven dengan sistem pemanas adaptif yang mampu menyesuaikan distribusi panas secara otomatis sesuai bentuk serta juga ukuran material logam. Hal ini akan menjawab tantangan industri yang menuntut kualitas tinggi, kecepatan produksi, serta penghematan energi.

Temuan tentang pengaruh posisi *heater* pada oven *powder coating* untuk baja ASTM A36 bukan hanya penting bagi peningkatan kualitas produk, tetapi juga menjadi langkah strategis didalam pengembangan inovasi di bidang manufaktur. Dengan adanya penguasaan teknologi yang lebih detail, industri dapat menghasilkan produk logam yang memiliki daya saing tinggi, baik di pasar domestik maupun internasional. Dari uraian tersebut dapat disimpulkan bahwasanya analisis mendalam terhadap variasi posisi pemanas didalam oven sangat diperlukan. Tujuan utamanya adalah untuk mengetahui bagaimana distribusi panas memengaruhi kualitas lapisan pelindung, terutama didalam hal kekuatan adhesi, ketebalan, serta juga resistansi terhadap cacat permukaan.

2 Metode Penelitian

Temuan ini mempergunakan pendekatan eksperimental di mana alur kegiatan ditunjukkan melalui *flowchart* atau diagram alir yang berfungsi untuk merepresentasikan algoritma, prosedur, maupun tahapan proses didalam bentuk simbol grafis yang dihubungkan dengan panah sehingga dapat memberikan gambaran runtutan langkah temuan secara sistematis; diagram semacam ini tidak hanya berguna untuk memecahkan masalah, tetapi juga bermanfaat didalam menganalisis, merancang, mendokumentasikan, sekaligus mengelola jalannya temuan serta membantu mengidentifikasi aspek yang kurang jelas atau fitur yang belum lengkap didalam prosedur, kemudian tahap awal dimulai dengan *studi literatur* yakni metode pengumpulan informasi teoritis dengan cara membaca, mencatat, serta mengolah berbagai referensi agar diperoleh landasan teori yang kuat serta juga kerangka berpikir yang mendukung rumusan hipotesis, selanjutnya dilakukan persiapan alat serta juga bahan yang terdiri dari mesin oven *powder coating* sebagai sarana pemanasan spesimen, *thermometer* untuk mengukur suhu saat pemanasan, *spray powder* sebagai alat aplikasi serbuk, *gerinda* untuk menghaluskan permukaan, alat uji ketebalan *coating thickness gauge*, serta *durometer shore A* untuk menguji kekerasan lapisan, di mana seluruh alat tersebut didukung oleh bahan utama berupa serbuk *powder coating* serta juga baja ASTM A36 sebagai spesimen uji; untuk persiapan bahan dijelaskan bahwasanya *powder coating* yang dipergunakan berbentuk serbuk dengan sifat termoplastik sehingga mampu meleleh serta juga melunak ketika dipanaskan serta bisa dipergunakan kembali, komposisinya secara umum terdiri dari *resin binder* sebesar 40–60% yang dapat berupa *epoxy*, *polyester*, *epoxy-polyester hybrid*, *polyurethane*, maupun *acrylic* sebagai penentu sifat akhir lapisan, pigmen sebanyak 3–10% seperti *titanium dioxide* serta juga *iron oxide* yang memberikan warna, *filler* sekitar 5–20% berupa *barium sulfate*, *calcium carbonate*, atau *talc* untuk menambah volume sekaligus memperbaiki sifat mekanik, *additive* sebanyak 0.5–5% berupa *flow agent*, *degassing agent*, *curing catalyst*, serta juga *anti-caking agent* yang berfungsi meningkatkan aliran serta juga ketahanan terhadap UV, serta *curing agent* sebesar 5–10% seperti *dicyandiamide*, *TGIC*, atau *HAA* untuk membentuk lapisan keras setelah pemanasan, sementara baja ASTM A36 yang dipergunakan sebagai spesimen uji merupakan baja karbon rendah dengan karakteristik mudah dilas, murah, serta umum diaplikasikan didalam konstruksi maupun otomotif, tetapi karena ketahanannya terhadap korosi relatif rendah maka pelapisan pelindung *powder coating* menjadi sangat penting; setelah persiapan alat serta juga bahan selesai, temuan dilanjutkan dengan penentuan variabel temuan yang terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, serta juga variabel terkontrol, di mana variabel bebas adalah faktor yang dimodifikasi peneliti yaitu variasi posisi *heater* dengan jarak 50 cm, 30 cm, serta juga 10 cm, suhu pemanasan konstan 250°C, serta waktu pemanasan 15 menit, sedangkan variabel terikat merupakan parameter hasil uji yang dipengaruhi oleh variabel bebas meliputi uji makro, pengukuran ketebalan lapisan, serta uji kekerasan mempergunakan *shore durometer*, adapun variabel terkontrol adalah aspek yang dijaga tetap sama agar hasil temuan valid serta juga tidak bias, meliputi suhu, waktu, serta penggunaan baja ASTM A36 sebagai material uji, sehingga secara keseluruhan metode temuan ini dirancang untuk mengevaluasi secara komprehensif pengaruh variasi posisi pemanas didalam oven *powder coating* terhadap kualitas lapisan pelindung pada baja ASTM A36 baik dari sisi ketebalan, kekerasan, maupun adhesi permukaannya.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Proses pelapisan *powder coating* dalam temuan ini dilaksanakan di bengkel *Marproject Garage* yang berlokasi di Jalan Magersari, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang. Material yang dipergunakan berupa baja ASTM A36 yang banyak dipakai didalam industri konstruksi maupun permesinan. Tahap pengujian dibagi ke didalam beberapa laboratorium berbeda sesuai jenis pengujiannya. Untuk pengamatan struktur makro serta pengukuran ketebalan lapisan dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITN Malang. Sedangkan pengujian kekerasan lapisan dilaksanakan di Laboratorium Pengujian Bahan, Politeknik Negeri Malang. Seluruh rangkaian kegiatan dilakukan secara sistematis dengan tujuan memperoleh data komprehensif mengenai pengaruh variasi jarak pemanas terhadap kualitas hasil *powder coating*.

Pengujian struktur makro dilakukan pada temperatur 250°C dengan variasi jarak pemanas sebesar 10 cm, 30 cm, serta juga 50 cm. Setiap spesimen dipanaskan selama 15 menit. Pemeriksaan dilakukan secara visual mempergunakan kamera *iPhone 15 Pro* dengan lensa *ultra wide* 12 MP (13 mm, f/2.2) yang memungkinkan pengambilan gambar makro dengan sudut pandang 120°. Dokumentasi ini bertujuan mengidentifikasi kelainan

Ramandika Galih Pratama, Soeparno Djiwo

lapisan seperti *orange peel* maupun cacat permukaan lain tanpa melihat detail mikro. Komposisi serbuk pelapis yang dipergunakan terdiri atas resin, *curing agent*, serta aditif yang masing-masing memiliki fungsi didalam menentukan adhesi, penyebaran, serta juga ketahanan lapisan.

Pada jarak 10 cm, pengamatan visual menunjukkan lapisan *coating* cukup merata dengan ketebalan seragam. Tidak ditemukan cacat seperti retakan atau porositas. Hal ini mengindikasikan resin meleleh sempurna serta juga mengalir rata, sementara *curing agent* mampu mengikat partikel dengan baik sehingga membentuk lapisan kuat yang menempel erat pada substrat baja serta juga lapisan seng di bawahnya. Peran aditif pun berjalan optimal, terlihat dari permukaan yang halus serta juga bebas dari cacat visual.

Sementara itu, pada jarak 30 cm, lapisan masih terlihat menyebar dengan cukup merata namun terdapat area yang ketebalannya berkurang. Permukaan juga sedikit kurang halus di beberapa titik. Kondisi ini kemungkinan disebabkan energi panas yang tidak sepenuhnya terserap sehingga resin tidak meleleh sempurna. Reaksi *curing* yang tidak optimal menyebabkan ikatan antar partikel kurang homogen. Aditif pun kehilangan sebagian efektivitasnya didalam mengatur aliran, sehingga terlihat perbedaan tekstur halus dengan permukaan yang agak kasar pada area tertentu.

Berbeda dengan dua kondisi sebelumnya, pada jarak 50 cm lapisan tampak tidak seragam, bahkan ditemukan cacat permukaan berupa *orange peel*. Fenomena ini menandakan bahwasanya distribusi panas yang diterima material tidak cukup untuk melelehkan resin dengan sempurna. Akibatnya, proses pengikatan partikel tidak maksimal sehingga struktur lapisan menjadi rapuh. Aditif tidak mampu menutupi kelemahan tersebut, sehingga lapisan menunjukkan daya lekat yang rendah pada permukaan baja.

Tahap berikutnya adalah pengujian ketebalan mempergunakan alat *coating thickness gauge*. Pengukuran dilakukan di tiga titik utama, yakni bagian tengah pelat, sudut, serta juga sisi, untuk memastikan gambaran menyeluruh tentang variasi ketebalan. Seluruh sampel diuji pada temperatur 250°C dengan waktu pemanasan 15 menit.

Tabel 1. Hasil Pengujian Ketebalan Lapisan Powder Coating pada Jarak 10 cm

Jarak (cm)	Temperatur (°C)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata (µm)
10	250	13	11	21	15,00
10	250	30	31	44	35,00
10	250	43	46	45	44,67

Analisis dari tabel di atas memperlihatkan bahwasanya pada jarak 10 cm ketebalan lapisan menunjukkan tren peningkatan dari uji pertama hingga uji ketiga. Rata-rata lapisan berkisar antara 15,00 µm hingga 44,67 µm. Walaupun hasil ini menunjukkan pertumbuhan yang signifikan, distribusi ketebalan masih bervariasi. Variasi yang cukup besar ini menunjukkan bahwasanya jarak yang terlalu dekat menyebabkan distribusi panas tidak merata, sehingga meski beberapa titik menghasilkan lapisan tebal, ada pula area yang sangat tipis.

Tabel 2. Hasil Pengujian Ketebalan Lapisan Powder Coating pada Jarak 30 cm

Jarak (cm)	Temperatur (°C)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata (µm)
30	250	61	63	60	61,33
30	250	68	59	62	63,00
30	250	46	40	42	42,67

Hasil pada tabel ini menunjukkan bahwasanya ketebalan lapisan di jarak 30 cm relatif lebih stabil dibanding jarak 10 cm. Nilai rata-rata berkisar antara 42,67 µm hingga 63,00 µm. Secara umum, ketebalan lebih tinggi dibandingkan jarak sebelumnya serta juga distribusi lebih seragam. Hal ini membuktikan bahwasanya jarak 30 cm merupakan posisi pemanasan yang paling optimal karena panas yang diterima cukup untuk melelehkan resin sekaligus memungkinkan lapisan mengalir serta juga mengeras secara merata.

Tabel 3. Hasil Pengujian Ketebalan Lapisan Powder Coating pada Jarak 50 cm

Jarak (cm)	Temperatur (°C)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata (µm)
50	250	44	49	47	46,67
50	250	60	61	58	59,67
50	250	41	36	45	40,67

Berdasarkan tabel ini, ketebalan rata-rata pada jarak 50 cm justru mengalami penurunan dibanding jarak 30 cm. Nilai ketebalan berkisar antara 40,67 µm hingga 59,67 µm. Meski beberapa hasil masih tergolong cukup baik, adanya penurunan ketebalan menandakan bahwasanya panas tidak lagi tersalurkan secara efektif ke permukaan baja. Kondisi ini menimbulkan ketidakseragaman pada lapisan sehingga kualitas pelindung menurun.

Selain ketebalan, kekerasan lapisan juga diuji mempergunakan metode *Shore A durometer*. Tujuan utamanya untuk menilai seberapa kuat lapisan didalam menahan goresan, benturan, maupun paparan lingkungan.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kekerasan Lapisan pada Jarak 10 cm

Jarak (cm)	Temperatur (°C)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata HA
10	250	98	98	98	98,00
10	250	97	97,5	97	97,17
10	250	98	99	99	98,67

Dari tabel ini terlihat bahwasanya nilai kekerasan pada jarak 10 cm cukup tinggi dengan kisaran 97,17 HA hingga 98,67 HA. Meskipun nilainya baik, variasi tipis antar titik menunjukkan adanya distribusi panas yang tidak sepenuhnya konsisten.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kekerasan Lapisan pada Jarak 30 cm

Jarak (cm)	Temperatur (°C)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata HA
30	250	98	98	98,5	98,17
30	250	98	98	98	98,00
30	250	99,5	98	97,5	98,33

Pada jarak 30 cm, nilai kekerasan rata-rata sedikit lebih stabil serta juga konsisten, yaitu antara 98,00 HA hingga 98,33 HA. Hal ini menunjukkan distribusi panas pada jarak ini optimal sehingga lapisan tidak hanya tebal tetapi juga memiliki kekerasan yang seragam.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kekerasan Lapisan pada Jarak 50 cm

Jarak (cm)	Temperatur (°C)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata HA
50	250	98,5	96,5	98	97,67
50	250	96,5	94,5	97	96,00
50	250	98	97,5	98	97,83

Sedangkan pada jarak 50 cm, nilai kekerasan rata-rata turun menjadi kisaran 96,00 HA hingga 97,83 HA. Penurunan ini terjadi akibat penyebaran panas yang semakin lemah sehingga lapisan tidak mengeras dengan sempurna. Akibatnya, lapisan kurang tahan terhadap potensi goresan atau benturan.

3.2 Pembahasan

Analisa Data serta juga Pembahasan Hasil Pengujian Struktur Makro

Analisis data serta juga pembahasan mengenai hasil pengujian struktur makro pada spesimen yang dilapisi mempergunakan metode *powder coating* menunjukkan bagaimana variasi posisi pemanas (*heater*) berpengaruh signifikan terhadap kualitas lapisan akhir yang terbentuk pada baja ASTM A36. Pada pengujian pertama, dengan jarak pemanas 10 cm serta juga suhu pemrosesan 250°C, hasil yang diperoleh dapat dikategorikan sangat baik karena lapisan terlihat merata dengan ketebalan yang konsisten di seluruh permukaan spesimen, serta tidak ditemukan adanya cacat umum seperti *orange peel*, porositas, maupun area yang tidak terlapisi. Hal tersebut menandakan bahwasanya proses pelelehan *resin binder* berjalan optimal sehingga partikel *powder coating* mampu menempel serta juga menyebar secara sempurna pada substrat baja, apalagi kondisi pemanasan yang cukup dekat memastikan partikel tetap berada didalam keadaan cair saat mencapai permukaan sehingga menghasilkan ikatan yang kuat antarpartikel. Faktor komposisi serbuk yang mengandung resin, aditif, serta juga penguat cat juga berperan penting didalam stabilitas hasil, di mana aditif bekerja sebagai *flow control agent* untuk menjaga kestabilan lapisan ketika proses *curing* berlangsung, sedangkan penguat cat memperkokoh ikatan antarpartikel sehingga retakan maupun cacat permukaan tidak muncul. Fenomena ini sejalan dengan hasil temuan Priananda (2024) yang menekankan bahwasanya kombinasi suhu tinggi dengan jarak penyemprotan yang pendek mampu meningkatkan efisiensi pelelehan partikel serta menghasilkan lapisan yang padat serta juga memiliki daya lekat yang tinggi. Dengan demikian, pada jarak 10 cm, kualitas lapisan *powder coating* terbukti optimal baik dari segi distribusi, adhesi, maupun penampilan visual permukaan.

Berbeda dengan kondisi tersebut, pada pengujian kedua dengan jarak pemanas 30 cm pada suhu yang sama, meskipun hasilnya masih tergolong baik, namun kualitas lapisan sedikit menurun jika dibandingkan dengan jarak 10 cm. Berdasarkan pengamatan visual, lapisan masih terlihat cukup merata, tetapi terdapat beberapa bagian dengan ketebalan lebih tipis serta juga permukaan yang tidak sehalus lapisan sebelumnya. Penurunan kualitas ini kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya intensitas panas akibat bertambahnya jarak, sehingga partikel resin tidak sepenuhnya meleleh atau proses *curing* tidak berlangsung secara optimal. Teori

Ramandika Galih Pratama, Soeparno Djiwo

thermal diffusion serta juga *radiative heat transfer* mendukung hal ini, karena intensitas panas memang berkurang secara eksponensial terhadap jarak dari sumber, sementara sebagian energi hilang melalui mekanisme konduksi, konveksi, maupun radiasi sebelum mencapai permukaan baja. Akibatnya, suhu partikel ketika menempel tidak mencapai titik ideal untuk membentuk lapisan yang sempurna.

Kondisi tersebut juga sesuai dengan studi Ostrowski & Starosta (2017) yang mengemukakan bahwasanya jarak penyemprotan yang lebih pendek meningkatkan suhu serta kecepatan partikel, sehingga menghasilkan ikatan mekanis serta juga adhesi yang lebih tinggi, sementara jarak yang lebih jauh justru menurunkan kualitas lapisan karena aditif tidak bekerja optimal didalam mengontrol aliran partikel, sehingga beberapa area permukaan terlihat kurang halus. Hal ini menegaskan bahwasanya jarak 30 cm masih bisa menghasilkan lapisan yang cukup baik, tetapi kualitasnya menurun didalam hal ketebalan, kehalusan, serta daya lekat dibanding jarak yang lebih dekat.

Sementara itu, pada pengujian ketiga dengan jarak pemanas diperpanjang hingga 50 cm, hasilnya menunjukkan penurunan kualitas yang cukup drastis. Berdasarkan pengamatan struktur makro, lapisan tampak tidak merata, ketebalan bervariasi di berbagai bagian permukaan, serta juga ditemukan cacat visual berupa *orange peel* yang cukup jelas. Cacat ini terjadi karena partikel resin gagal meleleh dengan sempurna sehingga tidak mampu menyebar merata di permukaan baja. Menurunnya intensitas panas pada jarak 50 cm membuat partikel kehilangan energi optimal sebelum menempel, sehingga resin hanya meleleh sebagian serta juga menyebabkan proses *curing* tidak sempurna.

Akibatnya, ikatan antarpartikel menjadi lemah, peran *binder* tidak maksimal, serta lapisan yang terbentuk tidak padat serta juga kurang homogen. Aditif yang seharusnya menjaga aliran lapisan tidak mampu mengimbangi ketidaksempurnaan tersebut, sehingga permukaan lapisan terlihat kasar serta juga daya lekatnya terhadap substrat baja juga menurun. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui teori *radiative heat loss* yang menyatakan bahwasanya semakin jauh jarak sumber panas, semakin besar energi hilang melalui radiasi serta juga konveksi bebas, sehingga suhu partikel saat mencapai permukaan menjadi terlalu rendah untuk mengalami transisi fase yang optimal.

Temuan ini juga diperkuat oleh temuan Liliani et al. (2025) yang menyimpulkan bahwasanya efektivitas proses pemanasan pada pelapisan termoplastik menurun signifikan pada jarak lebih dari 30 cm, karena energi panas yang diterima partikel tidak cukup untuk memicu pelelehan penuh serta juga menyebabkan kualitas adhesi serta homogenitas permukaan berkurang. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwasanya variasi posisi pemanas sangat menentukan hasil akhir lapisan *powder coating*, di mana jarak 10 cm memberikan hasil terbaik dengan lapisan merata, halus, serta juga memiliki daya lekat tinggi; jarak 30 cm masih menghasilkan lapisan yang cukup baik tetapi mengalami penurunan pada ketebalan serta juga kualitas permukaan; sedangkan jarak 50 cm terbukti menghasilkan kualitas yang buruk dengan permukaan kasar, cacat visual, serta ikatan antarpartikel yang lemah.

Keseluruhan hasil ini menegaskan bahwasanya pengaturan posisi *heater* didalam proses *powder coating* merupakan faktor penting yang tidak bisa diabaikan. Distribusi panas yang optimal terbukti menjadi kunci keberhasilan terbentuknya lapisan pelindung berkualitas tinggi pada baja ASTM A36, sehingga didalam praktik industri, jarak pemanas perlu diatur dengan presisi agar proses pelapisan menghasilkan produk yang tidak hanya tahan lama, tetapi juga memenuhi standar estetika serta juga kekuatan mekanik yang diharapkan.

Analisa Data serta Pembahasan Hasil Pengujian Ketebalan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan terhadap ketebalan lapisan *powder coating* dengan variasi posisi pemanas (*heater*) pada jarak 10 cm, 30 cm, serta juga 50 cm dengan kondisi temperatur tetap 250°C serta waktu pemanasan 15 menit, diperoleh temuan penting bahwasanya variasi jarak pemanas memberikan pengaruh signifikan terhadap ketebalan serta kualitas lapisan yang terbentuk pada baja ASTM A36. Secara umum, grafik ketebalan yang ditunjukkan dari hasil pengujian menggambarkan adanya perbedaan nyata pada tiap variasi jarak, di mana semakin dekat posisi pemanas maka distribusi panas cenderung lebih terfokus serta juga intens, sementara semakin jauh jaraknya energi panas yang diterima permukaan berkurang secara drastis. Kondisi ini menghasilkan karakteristik lapisan yang berbeda, baik dari segi ketebalan, kerapatan, hingga potensi munculnya cacat permukaan seperti *orange peel*. Dengan demikian, analisis ini menunjukkan bahwasanya kontrol terhadap posisi pemanas merupakan faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses *powder coating* agar menghasilkan lapisan yang merata, halus, serta juga memiliki kekuatan adhesi yang baik.

Pada pengujian pertama dengan posisi pemanas sejauh 10 cm, hasil pengamatan menunjukkan lapisan yang terbentuk tampak merata dengan visualisasi yang baik serta juga tidak ditemukan adanya cacat serius

seperti porositas ataupun bagian yang tidak terlapisi. Resin meleleh secara sempurna sehingga lapisan tampak menyatu dengan substrat baja ASTM A36 yang sebelumnya sudah dilapisi *zinc*. Namun demikian, ketebalan rata-rata yang diperoleh pada jarak ini relatif rendah, yakni hanya sebesar 53,20 μm . Rendahnya ketebalan pada jarak ini berkaitan dengan intensitas panas yang terlalu tinggi akibat jarak pemanas yang terlalu dekat, sehingga resin cepat meleleh tetapi partikel tidak memiliki waktu cukup untuk menyebar secara merata sebelum proses *curing* selesai. Menurut teori *heat transfer*, pemusatan sumber panas pada titik tertentu akan menimbulkan distribusi panas yang tidak seimbang di seluruh permukaan material, sehingga meskipun secara visual terlihat rapi, ketebalan lapisan bisa tidak konsisten pada level mikroskopis. Perry serta juga Green (2007) didalam *Chemical Engineers' Handbook* menekankan bahwasanya konsentrasi panas yang terlalu tinggi justru dapat mengurangi pemerataan energi termal, serta juga hal ini sesuai dengan pengamatan di lapangan. Bahkan, Priananda (2024) juga menyatakan bahwasanya jarak dekat memang menghasilkan daya lekat yang tinggi, tetapi risiko ketidakteraturan pada permukaan tetap ada bila distribusi panas tidak terkontrol. Artinya, posisi pemanas 10 cm memang memberikan hasil visual yang baik, tetapi kualitas ketebalan lapisan belum sepenuhnya optimal karena terdapat potensi *overheat* yang membuat lapisan kurang seragam.

Selanjutnya, pada pengujian dengan jarak pemanas 30 cm diperoleh hasil yang lebih baik serta juga bahkan dapat disebut paling optimal di antara variasi yang diuji. Lapisan *powder coating* pada jarak ini terlihat merata dengan distribusi yang halus, tidak ditemukan adanya cacat permukaan, serta juga ketebalan lapisan yang dihasilkan rata-rata mencapai 63,00 μm , angka tertinggi didalam seluruh pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwasanya distribusi panas dari pemanas pada jarak menengah berada pada titik ideal, karena energi panas dapat menyebar secara merata melalui mekanisme konveksi serta juga radiasi, namun intensitasnya masih cukup untuk memanaskan partikel resin hingga melebur sempurna. Teori *thermal radiation* menjelaskan bahwasanya pada jarak menengah, radiasi panas dapat menjangkau area lebih luas dengan intensitas yang seimbang, sehingga memberikan efek optimal pada pelelehan serta juga penempelan partikel pada substrat logam. Perry serta juga Green (2007) juga menegaskan pentingnya distribusi panas yang merata didalam menentukan keberhasilan *coating*. Temuan Jilbert et al. (2019) turut memperkuat temuan ini dengan menyatakan bahwasanya kombinasi suhu yang tepat, distribusi panas yang merata, serta waktu pemanasan yang cukup adalah faktor utama yang menentukan keberhasilan *powder coating*. Oleh karena itu, jarak 30 cm dapat dianggap sebagai posisi pemanas yang ideal karena mampu menghasilkan lapisan dengan daya lekat kuat, ketebalan seragam, serta juga tampilan permukaan yang halus.

Berbeda dengan dua jarak sebelumnya, hasil pada jarak pemanas 50 cm menunjukkan kualitas lapisan yang menurun secara signifikan. Hasil pengamatan memperlihatkan bahwasanya lapisan tampak kasar, tidak merata, serta terdapat cacat visual seperti *orange peel*. Beberapa bagian permukaan terlihat lebih tipis serta juga tidak sepenuhnya menempel pada substrat, menunjukkan lemahnya adhesi akibat proses *curing* yang tidak berjalan sempurna. Dari hasil pengukuran, ketebalan rata-rata yang diperoleh pada jarak ini hanya sebesar 41,60 μm , menjadikannya hasil terendah dari keseluruhan pengujian. Jarak yang terlalu jauh menyebabkan energi panas yang diterima oleh partikel resin menjadi sangat rendah, sehingga partikel tidak mampu mencapai suhu transisi yang dibutuhkan untuk meleleh sempurna. Akibatnya, resin gagal menyebar secara merata serta juga ikatan antarpartikel menjadi lemah. Liliani et al. (2025) menjelaskan bahwasanya efektivitas pemanasan pada proses pelapisan termoplastik menurun drastis pada jarak lebih dari 30 cm, karena energi panas banyak hilang selama perjalanan melalui mekanisme konveksi bebas serta juga radiasi. Kondisi ini juga sesuai dengan temuan Jilbert et al. (2019) yang menyebutkan bahwasanya distribusi panas yang tidak merata menyebabkan terbentuknya lapisan tipis, cacat permukaan, hingga risiko *peeling*. Oleh karena itu, jarak pemanas 50 cm dapat dikategorikan tidak efektif karena menghasilkan lapisan yang tipis, tidak seragam, serta juga memiliki kecenderungan lebih tinggi untuk mengalami cacat atau pengelupasan.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat dipahami bahwasanya variasi posisi pemanas memiliki pengaruh besar terhadap ketebalan serta juga kualitas lapisan *powder coating*. Jarak 10 cm menghasilkan lapisan yang secara visual baik namun ketebalannya cenderung rendah akibat panas yang terlalu intens; jarak 30 cm terbukti paling optimal dengan ketebalan tertinggi serta juga kualitas permukaan yang seragam; sedangkan jarak 50 cm menghasilkan lapisan dengan ketebalan terendah serta juga kualitas yang buruk akibat kurangnya energi panas. Dengan demikian, pengaturan posisi pemanas tidak hanya sekadar aspek teknis, melainkan merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan proses pelapisan. Hasil ini dapat dijadikan acuan praktis didalam industri manufaktur logam, khususnya untuk kalibrasi oven serta juga penyusunan standar operasional prosedur (SOP) agar lapisan yang dihasilkan lebih berkualitas, tahan lama, serta efisien secara energi.

Analisa Data serta juga Pembahasan Hasil Pengujian Kekerasan

Berdasarkan hasil uji yang dilakukan, variasi posisi pemanas *heater* dengan jarak 10 cm, 30 cm, serta juga 50 cm pada temperatur tetap 250 °C dengan waktu pemanasan 15 menit memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap tingkat kekerasan lapisan *powder coating*. Pada jarak 10 cm, hasil pengujian memperlihatkan adanya fluktuasi nilai kekerasan di antara spesimen yang diuji. Beberapa titik memperlihatkan kekerasan yang cukup tinggi, tetapi sebagian lainnya justru rendah, sehingga tidak terdapat konsistensi pada seluruh permukaan lapisan. Fenomena ini terjadi karena distribusi panas yang terlalu terkonsentrasi pada area tertentu, membuat sebagian permukaan mengalami kondisi *overcuring* sementara bagian lain mengalami *undercuring*. Kondisi termal yang tidak merata ini menyebabkan ikatan molekul resin terbentuk secara tidak homogen, sehingga lapisan menjadi kurang stabil. Pada area yang terlalu matang, struktur lapisan cenderung rapuh, sementara bagian yang kurang matang bersifat lunak serta juga mudah terkelupas. Ketidakseimbangan inilah yang kemudian berpengaruh pada daya tahan mekanis lapisan, karena permukaan yang tidak seragam akan lebih rentan terhadap tekanan maupun gesekan. Penjelasan ini sejalan dengan temuan yang dikemukakan oleh Novak et al. (2020), di mana dijelaskan bahwasanya kualitas hasil *curing* sangat bergantung pada kestabilan suhu serta juga pemerataan distribusi panas. Artinya, jarak 10 cm meskipun menghasilkan pelapisan yang terlihat baik secara visual, pada kenyataannya tidak mampu menghadirkan kekerasan yang seragam serta juga optimal karena distribusi panas yang berlebihan pada titik tertentu justru mengurangi kualitas keseluruhan lapisan.

Berbeda dengan jarak 10 cm, pengujian pada jarak 30 cm menunjukkan hasil yang paling optimal di antara seluruh variasi jarak yang diuji. Pada kondisi ini, lapisan memperlihatkan nilai kekerasan tertinggi serta juga konsistensi yang lebih stabil. Hal ini menandakan bahwasanya proses *curing* berlangsung secara merata di seluruh permukaan baja ASTM A36. Jarak 30 cm dinilai ideal karena memungkinkan panas dari *heater* menyebar lebih seimbang melalui mekanisme konveksi serta juga radiasi, sehingga seluruh partikel resin menerima energi panas yang cukup untuk melebur dengan sempurna. Proses pelelehan resin yang optimal menghasilkan struktur molekul yang lebih homogen serta juga rapat, sehingga lapisan memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap abrasi maupun tekanan mekanis. Pada jarak ini, tidak ditemukan indikasi adanya *overcuring* maupun *undercuring*, yang berarti energi panas yang diterima material sudah sesuai dengan parameter ideal. Temuan ini juga konsisten dengan temuan Novak et al. (2020) yang menyebutkan bahwasanya jarak pemanas yang tepat sangat berpengaruh terhadap keberhasilan *curing*, yang pada akhirnya menentukan tingkat kekerasan serta juga ketahanan lapisan. Hasil tersebut memperlihatkan bahwasanya posisi pemanas pada jarak 30 cm dapat dianggap sebagai kondisi termal yang paling ideal didalam aplikasi *powder coating*, karena tidak hanya menghasilkan lapisan yang keras, tetapi juga stabil, tahan lama, serta memiliki kualitas fungsional serta juga estetika yang baik.

Sementara itu, pada jarak 50 cm, hasil pengujian memperlihatkan penurunan kualitas yang cukup signifikan. Kekerasan lapisan pada jarak ini merupakan yang terendah di antara seluruh spesimen, serta juga lapisan yang terbentuk terlihat lunak serta kurang mampu menahan tekanan maupun abrasi. Kondisi ini diakibatkan oleh proses *curing* yang tidak sempurna karena energi panas yang diterima permukaan material terlalu rendah. Posisi *heater* yang terlalu jauh membuat partikel resin tidak mendapatkan energi panas yang cukup untuk melebur sepenuhnya, sehingga ikatan molekul yang terbentuk menjadi lemah serta juga tidak rapat. Secara mikroskopis, hal ini ditunjukkan oleh struktur lapisan yang kurang padat dengan resistansi mekanik yang rendah. Keadaan ini berisiko mempercepat degradasi permukaan, terutama ketika baja dipergunakan didalam kondisi lingkungan ekstrem atau beban mekanis yang berat. Hal ini sejalan dengan pendapat Novak et al. (2020) yang menegaskan bahwasanya suhu rendah atau waktu *curing* yang tidak mencukupi akan menghasilkan lapisan dengan kekerasan rendah, permukaan tidak rata, serta ikatan yang lemah dengan substrat. Oleh karena itu, jarak 50 cm dapat disimpulkan sebagai posisi yang tidak efektif untuk menghasilkan lapisan *powder coating* yang berkualitas, khususnya pada baja ASTM A36, karena tidak mampu memenuhi standar teknis yang dibutuhkan.

Secara keseluruhan, variasi posisi pemanas *heater* memberikan pengaruh yang nyata terhadap kualitas kekerasan lapisan *powder coating*. Dari hasil pengujian yang diperoleh, jarak 30 cm terbukti menjadi posisi yang paling ideal, karena menghasilkan lapisan dengan kekerasan tinggi, konsisten, serta juga bebas dari cacat permukaan. Pada jarak ini, perpindahan panas berlangsung secara optimal, sesuai dengan prinsip dasar *heat transfer* yang menekankan pentingnya jarak sumber panas didalam menentukan efisiensi distribusi energi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwasanya pengaturan posisi pemanas merupakan salah satu parameter kunci yang tidak boleh diabaikan didalam proses *powder coating*. Posisi yang terlalu dekat memang mampu menghasilkan pelapisan visual yang terlihat baik, tetapi berisiko menghadirkan kekerasan yang tidak konsisten.

Sebaliknya, posisi yang terlalu jauh justru membuat lapisan kurang matang serta juga berkurang kualitas mekaniknya. Hasil temuan ini tidak hanya memberikan bukti eksperimental, tetapi juga memperkuat landasan teoritis bahwasanya penentuan posisi *heater* yang tepat dapat meningkatkan performa lapisan pelindung, baik dari sisi kekuatan mekanik, ketahanan aus, maupun aspek estetika. Dalam industri manufaktur logam, temuan ini sangat penting karena dapat menjadi dasar didalam penyusunan standar operasional prosedur (SOP) serta kalibrasi mesin oven, guna memastikan bahwasanya produk yang dihasilkan memiliki kualitas optimal serta juga mampu bersaing didalam kebutuhan teknis maupun komersial.

4 Kesimpulan

Pengujian variasi posisi pemanas heater didalam proses *powder coating* tidak hanya memberikan pemahaman mengenai pengaruh jarak terhadap ketebalan serta juga kekerasan lapisan, tetapi juga menegaskan betapa pentingnya pengendalian parameter termal didalam aplikasi industri. Hasil yang menunjukkan bahwasanya jarak 30 cm merupakan posisi paling ideal dapat menjadi acuan praktis bagi perusahaan manufaktur didalam meningkatkan kualitas produk mereka, khususnya pada industri baja, otomotif, serta juga konstruksi. Dengan memanfaatkan pengetahuan ini, operator dapat menghindari risiko terjadinya *defect* seperti *orange peel*, *peeling*, maupun lapisan tipis yang tidak merata, sekaligus menjamin kekerasan lapisan yang konsisten sehingga material mampu bertahan terhadap gesekan maupun beban lingkungan ekstrem. Lebih jauh lagi, penerapan hasil temuan ini juga dapat meningkatkan efisiensi energi karena penggunaan jarak heater yang optimal mengurangi potensi pemborosan energi panas akibat jarak terlalu jauh atau risiko *overheating* akibat jarak terlalu dekat. Dalam *quality control*, penentuan posisi pemanas yang tepat dapat dijadikan standar operasional didalam proses pelapisan termal untuk menghasilkan produk dengan mutu seragam, stabil, serta memiliki daya tahan jangka panjang. Oleh karena itu, dapat ditegaskan bahwasanya pengaturan posisi heater bukan hanya persoalan teknis sederhana, melainkan bagian strategis didalam memastikan *performance* lapisan pelindung baik dari sisi fungsional maupun estetika, sekaligus menjawab tuntutan industri modern terhadap efisiensi, kualitas, serta juga daya saing produk.

5 Referensi

- Anjani, R. D., & Al Dzikri, D. (2022). *Pengaruh variasi temperatur pengeringan powder coating terhadap daya rekat lapisan cat pada mild steel ST37*. Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan.
- Arifin, J., Purwanto, H., & Syafaâ, I. (2017). *Pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik hasil pengelasan SMAW baja ASTM A36*. Majalah Ilmiah MOMENTUM, 13(1).
- Aruan, R. H., Pratikno, H., & Hadiwidodo, Y. S. (2023). *Analisis pengaruh suhu material pada pengaplikasian coating epoxy terhadap kekuatan adhesi baja A36*. Jurnal Teknik ITS, 12(1). <https://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/110657>
- Azis, M., et al. (2020). *Distribusi suhu pada oven powder coating dan pengaruhnya terhadap daya rekat lapisan*. Jurnal Rekayasa Material, 12(1), 33–39.
- Firmanto, A. (2020). *Pengaruh variasi temperatur oven terhadap daya rekat hasil powder coating ASTM A36 dengan pretreatment iron phosphating*. Politeknik Negeri Jember.
- Hadi, S. R., & Wirawan, W. (2019). Optimization of powder coating thickness on ASTM A36 steel for improved mechanical properties. *Surface Engineering*, 35(9), 754–761. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1613297>
- Harahap, B. S., & Santosa, Y. (2021). *Evaluasi daya rekat powder coating menggunakan metode ASTM D3359*. Jurnal Teknik Manufaktur, 14(3), 28–35.
- Hendronursito, Y., Ramahdani, F., Rajagukguk, T. O., Isnugroho, K., Amin, M., Birawidha, D., & Muttaqii, M. (2021). *Optimasi parameter proses pelapisan pada baja ASTM-A36 dengan partikel basalt menggunakan metode Taguchi*. Jurnal Riset Teknologi Industri, 15(1), 125–134.
- Irfan, M., Amiruddin, W., & Santosa, A. W. B. (2024). *Analisis pengaruh variasi kuat arus dan normalizing pada pengelasan FCAW menggunakan elektroda E81T-Ni1C terhadap struktur mikro dan sifat mekanis material baja ASTM A36*. Jurnal Teknik Perkapalan, 12(4).
- Liliani, N., Indrayani, N. L., & Ilyasa, K. F. (2025). *Pengaruh temperatur dan waktu pelapisan nikel terhadap ketebalan dan kekerasan permukaan pada baja ASTM A36 menggunakan proses elektroplating*. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 13(1). <https://jurnal.unismabekasi.ac.id/index.php/jitm/article/view/10636>

Ramandika Galih Pratama, Soeparno Djiwo

- Prayoga, D., Rosidah, A., & Suheni. (2025). *Analisis pengaruh jenis cat dan jumlah pelapisan spray coating baja karbon rendah ASTM A36 terhadap kekasaran dan laju korosi pada media NaCl 5%*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan V (SENASTITAN V).
- Priananda, F. (2024). *The effect of temperature and holding time variations on test value of powder coating layer thickness and test on material ASTM A36 steel*. Politeknik Negeri Jember.
- Priananda, F. Y. A. (2024). *Pengaruh variasi suhu dan holding time terhadap ketebalan dan kerekatan lapisan powder coating pada material baja ASTM A36*. Politeknik Negeri Jember. <https://sipora.polije.ac.id/36774>
- Qian, L., Li, M., Zhou, Z., Yang, H., & Shi, X. (2005). Comparison of nano-indentation hardness to microhardness. *Surface and Coatings Technology*, 195(2–3), 264–271.
- Rohatgi, S., & Sharma, S. (2016). *Powder coating: A review of the technology, applications, and future trends*. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13(6), 891–902.
- Saefuloh, I., Zakaria, Lusiana, R., Jannah, M., Sunardi, & Setiawan, I. (2021). *Pengaruh variasi kecepatan pengadukan dengan penambahan perlakuan panas lapisan electroless Ni-P terhadap laju korosi dan kekerasan permukaan baja karbon rendah ASTM A36*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(2), 241–248.
- Sahri, S., & Hendropasetyo, A. P. W. (2019). *Analysis of the effect line heating on mechanical properties and microstructure of steel ASTM A36 with variations cooling*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Siregar, R., & Yusuf, R. (2020). *Optimalisasi efisiensi energi dalam oven powder coating melalui analisis termal*. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 8(1), 19–26.
- Spyrou, E. (2012). *Powder coatings chemistry and technology* (3rd revised ed.).
- Suarnadwipa, I. N., & Murti, M. R. (2017). *Pengaruh beban pemanasan air terhadap efisiensi kondensor pada sistem heat pump*. *Jurnal METTEK (Jurnal Ilmiah Nasional Dalam Bidang Ilmu Teknik Mesin)*, 3(2).
- Wahyudi, A., & Hasibuan, F. (2021). *Pengaruh waktu dan temperatur curing terhadap kualitas lapisan powder coating*. *Jurnal Teknik Mesin UNIMED*, 9(1), 12–20.
- Wildan, W. (2022). *Pengaruh variasi jarak nozzle dan kuat arus pelapisan kawat SS420 terhadap karakterisasi permukaan baja A36*. Universitas Jember Repository.
- Zak, L. (2016). *Influence of the curing process on the quality of powder coating*. *MM Science Journal*, 2016(November), 1524–1527. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_11_2016126