

ANALISIS PENGENDALIAN KUALITAS PROSES PHOSPHATING PADA PT CITRA TUBINDO TBK

Bagas Micola¹
Arsyad Sumantika²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Industri, Universitas Putera Batam

²Dosen Program Studi Teknik Industri, Universitas Putera Batam
email: pb210410079@upbatam.ac.id

ABSTRACT

This study discusses quality control analysis in the phosphating process at PT Citra Tubindo Tbk, a manufacturer of Oil Country Tubular Goods (OCTG). The problem identified was the high rate of non-homogeneous defects in the phosphating process, reaching an average of 4.16% from January to August 2025, which exceeded the company's maximum standard of 2%. This research aims to identify the optimal process parameters to minimize defects and improve process stability using the Taguchi Method. The experimental design used an L9 (3³) Orthogonal Array involving three control factors: solution pH, immersion time, and temperature. Based on the analysis of the Signal-to-Noise (S/N) Ratio and mean response, it was found that the optimal combination of parameters to minimize defects is a solution pH of 38, an immersion time of 10 minutes, and a temperature of 70°C. The implementation of this optimal level combination is expected to reduce process variability and significantly decrease the defect rate, thereby meeting the company's quality standards.

Keywords: Defect; Phosphating; Quality Control; Taguchi Method.

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global, khususnya di sektor minyak dan gas, mendorong pertumbuhan industri Oil Country Tubular Goods (OCTG) di Indonesia. Sebagai komponen vital dalam eksplorasi dan transportasi energi, produk pipa baja harus memiliki standar kualitas tinggi untuk menghadapi kondisi lingkungan yang ekstrem. Persaingan industri yang semakin ketat menuntut perusahaan manufaktur untuk tidak hanya meningkatkan kapasitas produksi, tetapi juga menjamin konsistensi mutu produk (Gaspersz, 2022). Dalam konteks ini, pengendalian kualitas menjadi strategi kunci bagi perusahaan untuk

mempertahankan daya saing dan memenuhi ekspektasi pelanggan akan produk yang handal dan tahan lama.

PT Citra Tubindo Tbk, sebagai salah satu produsen utama pipa baja tanpa kampuh (*seamless pipe*) di Indonesia, menerapkan standar kualitas yang ketat pada setiap lini produksinya, termasuk pada tahapan surface treatment. Salah satu proses krusial dalam tahapan ini adalah *phosphating*, yang bertujuan membentuk lapisan kristal fosfat pada permukaan logam. Lapisan ini berfungsi vital untuk meningkatkan daya rekat pelumas, mencegah korosi, dan mengurangi gesekan pada proses *threading* (Widyanto & Susanto, 2023).

Kualitas hasil *phosphating* sangat menentukan performa akhir produk pipa, sehingga stabilitas proses ini menjadi prioritas utama perusahaan.

Namun, berdasarkan data inspeksi produksi periode Januari hingga Agustus 2025, ditemukan adanya fluktuasi kualitas yang signifikan pada proses *phosphating*. Rata-rata tingkat kecacatan (*defect*) tercatat sebesar 4,16%, angka ini melampaui batas toleransi maksimum perusahaan yang ditetapkan sebesar 2%. Jenis cacat yang paling dominan adalah *nonhomogeneous*, yaitu kondisi di mana lapisan fosfat tidak terbentuk secara merata, muncul bercak, atau memiliki ketebalan yang tidak konsisten. Fenomena ketidakhomogenan ini memiliki dampak krusial terhadap performa fungsional pipa *Oil Country Tubular Goods (OCTG)*. Lapisan fosfat sejatinya berfungsi sebagai base layer vital yang menjamin daya rekat pelumas (*lubricant adhesion*) pada permukaan logam. Ketika lapisan terbentuk secara tidak merata (*nonhomogeneous*), kemampuan permukaan pipa untuk menahan pelumas menjadi tidak optimal. Dalam aplikasi lapangan, kondisi ini sangat berbahaya karena dapat meningkatkan koefisien gesek secara drastis pada saat proses *threading* (pembuatan ulir) maupun saat penyambungan pipa (*make-up*) di lokasi pengeboran. Gesekan yang tidak teredam dengan baik berpotensi menyebabkan kerusakan fisik pada ulir (*galling*), kebocoran sambungan, hingga kegagalan struktur saat pipa menghadapi tekanan ekstrem di lingkungan korosif.

Secara visual dan teknis, instabilitas proses ini bermanifestasi dalam dua karakteristik cacat yang kontradiktif namun sama-sama merugikan, yang

sangat dipengaruhi oleh fluktuasi parameter kimia. Pada kondisi di mana konsentrasi larutan atau pH terlalu rendah, reaksi pembentukan kristal menjadi lemah, menghasilkan lapisan yang terlalu tipis, tidak menutup sempurna, dan mudah terkelupas saat terjadi kontak fisik. Sebaliknya, apabila konsentrasi atau reaktivitas larutan terlalu tinggi, laju reaksi menjadi tidak terkendali yang memicu pembentukan endapan berlebih (*excessive coating*). Hal ini menghasilkan struktur kristal yang kasar, rapuh, dan memunculkan bercak-bercak yang mengindikasikan ketidakseragaman deposisi fosfat di sepanjang permukaan pipa. Oleh karena itu, meminimalkan variasi ini bukan sekadar masalah estetika produk, melainkan syarat mutlak untuk menjamin reliabilitas dan keamanan operasional pipa OCTG sesuai standar industri migas. Ketidakstabilan ini diindikasikan akibat variasi pada parameter proses utama, yaitu konsentrasi kimia (pH) larutan, waktu perendaman, dan suhu operasional yang belum terkendali dengan optimal.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pendekatan sistematis yang mampu mengidentifikasi setting parameter proses terbaik guna meminimalkan variasi. Penelitian ini menggunakan Metode Taguchi sebagai alat analisis utama. Metode Taguchi menawarkan pendekatan desain eksperimen yang efisien menggunakan *Orthogonal Array*, yang memungkinkan evaluasi pengaruh berbagai faktor proses secara simultan dengan jumlah percobaan yang minimal (Montgomery, 2020). Keunggulan metode ini terletak pada konsep *Robust Design*, yang bertujuan membuat proses menjadi tidak sensitif terhadap faktor gangguan (*noise*),

sehingga mampu menghasilkan kualitas yang konsisten (Phadke, 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor penyebab terjadinya *defect nonhomogeneous* dan menentukan kombinasi parameter proses (pH, waktu, dan suhu) yang paling optimal. Dengan menerapkan perbaikan berbasis metode Taguchi, diharapkan tingkat kecacatan dapat ditekan secara signifikan di bawah standar maksimum perusahaan, efisiensi proses meningkat, dan kualitas produk pipa PT Citra Tubindo Tbk dapat lebih terjamin stabilitasnya.

KAJIAN TEORI

2.1 Pengendalian Kualitas dan Proses *Phosphating*

kualitas merupakan aktivitas teknik dan manajemen yang bertujuan mengukur karakteristik kualitas produk, membandingkannya dengan spesifikasi, dan mengambil tindakan peningkatan yang tepat jika ditemukan ketidaksesuaian (Adi Sopian, 2021; Mitra, 2016). Dalam industri manufaktur pipa baja, pengendalian kualitas sangat krusial pada tahap *surface treatment*, khususnya proses *phosphating*. *Phosphating* adalah proses pelapisan konversi kimia yang membentuk lapisan kristal fosfat tak larut pada permukaan logam. Tujuan utamanya adalah meningkatkan ketahanan korosi, daya rekat pelumas, dan memfasilitasi proses pelapisan lanjutan (*coating*). Kualitas lapisan *phosphate* sangat dipengaruhi oleh parameter proses seperti konsentrasi larutan kimia, waktu pencelupan, dan suhu operasi (Narayanan, 2021). Ketidakstabilan pada parameter ini dapat menyebabkan cacat berupa *non-homogeneous coating* yang merugikan kualitas produk akhir.

2.2 Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah metode perbaikan kualitas yang berfokus pada desain produk dan proses yang *robust* (tangguh) terhadap gangguan (*noise*). Metode ini menggunakan *Orthogonal Array* untuk merancang eksperimen dengan jumlah percobaan yang efisien namun tetap mampu menganalisis pengaruh banyak faktor (Halimah & Ekawati, 2020). Selain itu, Taguchi menggunakan *Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio)* untuk mengukur penyimpangan karakteristik kualitas dari nilai target. Karakteristik kualitas dalam penelitian ini termasuk dalam kategori *Smaller-the-Better*, di mana nilai respon (*defect*) yang semakin kecil menunjukkan kualitas yang semakin baik (Collins et al., 2021). Kombinasi level faktor yang menghasilkan *S/N Ratio* tertinggi dianggap sebagai kondisi parameter yang paling optimal.

2.3 Penelitian Terdahulu (*State of the Art*)

Penelitian terkait optimasi parameter proses dan pengendalian kualitas telah banyak dilakukan sebelumnya. Octariani et al. (2021) menerapkan metode Taguchi pada industri furnitur dan berhasil menemukan *setting* optimal untuk meminimalkan cacat kayu. Di sektor manufaktur logam, Toebagoes et al. (2024) menggunakan metode serupa untuk menekan cacat pada produk baja tulangan sirip S36 dengan mengoptimalkan kecepatan penggulangan. Penelitian lain oleh Chilbule et al. (2024) dan Samet et al. (2025) berfokus pada optimasi parameter suhu dan tekanan pada material komposit dan *heat pipe*, yang membuktikan efektivitas Taguchi dalam meningkatkan performa material. Namun, penelitian-penelitian tersebut mayoritas berfokus pada produk furnitur, baja tulangan, atau

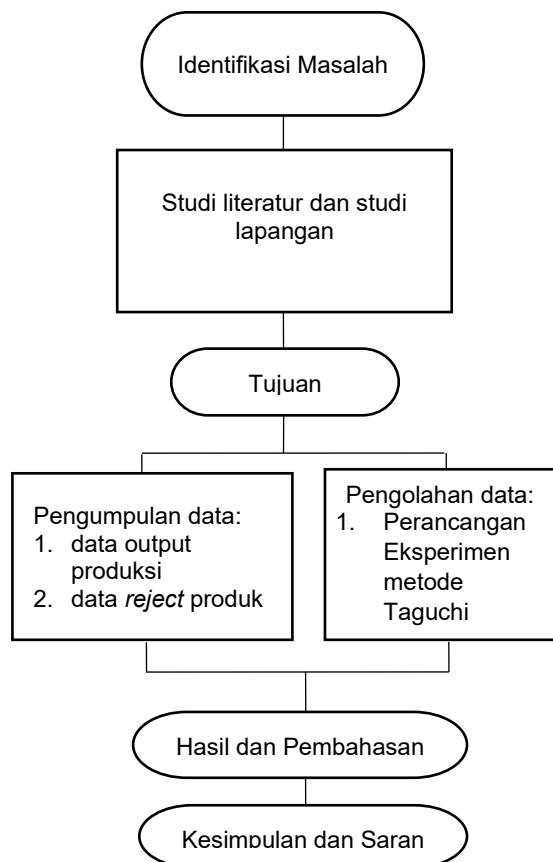
material komposit. Penelitian ini memiliki kebaruan (*novelty*) dengan menerapkan metode Taguchi secara spesifik pada proses *phosphating* untuk produk pipa *Oil Country Tubular Goods* (OCTG), dengan fokus variabel pada pH larutan, waktu pencelupan, dan suhu untuk mengatasi masalah cacat *non-homogeneous*.

2.4 Kerangka Berpikir

Penelitian ini dimulai dengan identifikasi masalah tingginya *defect* pada proses *phosphating*. Selanjutnya dilakukan penetapan parameter kritis (pH, Waktu, Suhu) yang akan dikendalikan. Perancangan eksperimen disusun menggunakan *Orthogonal Array* L9 (3³) untuk mendapatkan data respon cacat. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan S/N Ratio dan *Mean Response* untuk mendapatkan kombinasi parameter optimal yang mampu meminimalkan *defect* dan meningkatkan stabilitas proses.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di PT Citra Tubindo Tbk, Batam, dengan fokus pada lini produksi pipa *Oil Country Tubular Goods* (OCTG). Objek penelitian adalah proses *phosphating* yang mengalami masalah tingginya tingkat cacat *non-homogeneous*.



Gambar 1. Desain Penelitian (Sumber: Data Penelitian, 2025)

Data historis *defect* diambil dari periode Januari hingga Agustus 2025 sebagai dasar identifikasi masalah awal. Desain penelitian menggunakan metode eksperimen Taguchi untuk mengoptimalkan parameter proses. Metode ini dipilih untuk mendapatkan informasi maksimal mengenai pengaruh variabel proses dengan jumlah percobaan yang efisien. Rancangan eksperimen disusun menggunakan

matriks *Orthogonal Array* L9 (3^3), yang mengakomodasi 3 faktor kontrol dengan masing-masing 3 variasi level. Sebelum dilakukan perancangan eksperimen, penelitian ini diawali dengan pemetaan alur proses *surface treatment* yang berjalan di lini produksi untuk memahami variabel-variabel yang terlibat. Proses *phosphating* pada objek penelitian tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan bagian dari rangkaian tahapan *chemical treatment* yang berurutan dan saling mempengaruhi. Secara garis besar, proses pembentukan lapisan fosfat pada pipa OCTG melalui serangkaian tahapan *pre-treatment* kritis sebelum masuk ke bak utama. Tahapan dimulai dengan proses *degreasing*, yang bertujuan membersihkan permukaan pipa dari kontaminan organik seperti oli, grease, sisa coolant, dan kotoran lain yang terbawa dari proses permesinan (*threading*). Kebersihan permukaan ini sangat vital karena residu minyak dapat menghalangi reaksi kimia pada tahap selanjutnya. Setelah pembersihan, dilakukan proses pembilasan (*rinsing*) tahap pertama untuk meluruhkan sisa bahan kimia pembersih.

Tahapan selanjutnya adalah *pickling*, yaitu proses pelarutan lapisan oksida atau karat pada permukaan logam menggunakan larutan asam kuat untuk menghasilkan permukaan logam dasar yang aktif dan cerah. Proses ini diikuti oleh pembilasan kedua (*rinsing*) guna mencegah terbawanya asam ke bak berikutnya. Sebelum masuk ke proses inti, pipa melewati tahap *refining* (*kondisioning* permukaan) menggunakan larutan *grain refiner* yang mengandung titanium. Tahap ini berfungsi untuk mengaktifkan permukaan logam dan menyediakan inti *nukleasi* agar kristal fosfat dapat tumbuh lebih halus dan rapat.

Setelah permukaan siap, pipa masuk ke proses utama yaitu *phosphating* (pencelupan dalam larutan *zinc phosphate*), di mana reaksi konversi kimia terjadi membentuk lapisan kristal kimia pelindung. Rangkaian proses ditutup dengan *final rinsing* untuk membersihkan sisa garam fosfat yang tidak bereaksi, dan diakhiri dengan proses pengeringan (*drying*) untuk menghilangkan kelembapan yang dapat memicu korosi kembali. Pengendalian yang ketat pada setiap tahapan *pre-treatment* ini diasumsikan konstan (terkendali) selama penelitian, sehingga fokus eksperimen dapat diarahkan sepenuhnya pada optimasi parameter kunci di bak utama *phosphating*. Variabel bebas (faktor kontrol) yang diteliti ditetapkan berdasarkan observasi lapangan dan studi literatur. Rincian faktor dan level yang digunakan dalam eksperimen disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor dan Level Parameter

Kode	Faktor Kontrol	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
A	pH Larutan	-	30	38	50
B	Waktu Pencelupan	Menit	4	10	20
C	Suhu Proses	°C	70	78	85

(Sumber: Data Penelitian, 2025)

Variabel terikat (respon) dalam penelitian ini adalah jumlah *defect* yang dihasilkan dari setiap percobaan eksperimen. Pengumpulan data dilakukan dengan menjalankan 9 kali percobaan sesuai kombinasi matriks *Orthogonal Array*,

kemudian mengukur dan mencatat hasil kualitas lapisan *phosphate* pada permukaan pipa. Teknik analisis data menggunakan perhitungan *Signal-to-Noise Ratio* (S/N Ratio) untuk mengevaluasi variabilitas kualitas. Mengingat tujuan penelitian adalah meminimalkan jumlah cacat, maka karakteristik kualitas yang digunakan adalah *Smaller-the-Better*. Analisis dilanjutkan dengan menghitung *Mean Response* untuk setiap level guna menentukan kombinasi parameter yang paling optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan menggunakan desain *Orthogonal Array L9* (3^3) yang melibatkan 9 kali percobaan dengan kombinasi level parameter yang berbeda. Respon yang diukur adalah persentase *defect non-homogeneous* pada permukaan pipa. Data hasil eksperimen dan perhitungan *Signal-to-Noise* (S/N) *Ratio* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Eksperimen dan S/N Ratio

Percobaan	Faktor A (pH)	Faktor B (Waktu)	Faktor C (Suhu)	Defect (%)	S/N Ratio (dB)
1	30	4	70	6.2	-15.85
2	30	10	78	4.9	-13.80
3	30	20	85	5.6	-14.96
4	38	4	78	3.1	-9.82
5	38	10	70	1.8	-5.11
6	38	20	70	2.7	-8.63
7	50	4	85	5.4	-14.65
8	50	10	70	4.3	-12.67
9	50	20	78	4.9	-13.80

(Sumber: Data Penelitian, 2025)

Sebelum dilakukan analisis statistik mendalam menggunakan *Signal-to-Noise Ratio*, analisis kualitatif dilakukan terlebih dahulu dengan mengamati kondisi fisik lapisan fosfat yang terbentuk pada setiap percobaan. Observasi visual ini penting untuk memvalidasi data numerik *defect* yang diperoleh. Sebagai perbandingan ekstrem, dapat dilihat perbedaan signifikan antara hasil Percobaan 1 dan Percobaan 5.

Pada Percobaan 1 (kombinasi A1-B1-C1), di mana proses dijalankan pada kondisi batas bawah parameter (pH 30, waktu 4 menit, dan suhu 70°C), hasil lapisan menunjukkan kualitas yang kurang memadai dengan tingkat *defect* mencapai 6,2%. Secara visual, permukaan pipa terlihat memiliki lapisan yang tipis dan tidak merata (*uneven coating*). Ketidakefektifan ini mengindikasikan bahwa waktu kontak yang singkat (4 menit) dikombinasikan dengan pH rendah menyebabkan reaksi konversi kimia belum berlangsung sempurna, sehingga kristal fosfat gagal menutupi seluruh permukaan logam secara homogen.

Sebaliknya, peningkatan kualitas yang drastis terlihat pada Percobaan 5 (kombinasi A2-B2-C1) dengan parameter pH 38, waktu 10 menit, dan suhu 70°C. Percobaan ini mencatatkan tingkat *defect* terendah sebesar 1,8%. Hasil pengamatan visual dan *mikroskopis* pada sampel ini menunjukkan struktur lapisan yang jauh lebih padat, seragam, dan berwarna abu-abu gelap merata tanpa adanya bercak yang signifikan. Waktu perendaman selama 10 menit pada pH 38 dan suhu proses 70°C terbukti memberikan kesempatan yang cukup bagi kristal fosfat untuk tumbuh (*nukleasi*)

dan menutup permukaan logam dengan rapat, sementara suhu proses mendukung laju reaksi yang optimal. Perbedaan kontras antara kedua percobaan ini mengonfirmasi bahwa variasi pada level parameter yang diuji memiliki dampak nyata dan langsung terhadap karakteristik fisik lapisan fosfat. Berdasarkan Tabel 2, nilai *S/N Ratio* tertinggi diperoleh pada Percobaan ke-5 yaitu sebesar -5.11 dB dengan nilai *defect* terendah sebesar 1.8%². Dalam metode Taguchi dengan karakteristik *Smaller-the-Better*, nilai *S/N Ratio* yang lebih besar (mendekati nol atau positif) menunjukkan variasi proses yang lebih kecil dan kualitas yang lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi parameter pada percobaan tersebut mendekati kondisi optimal. Untuk menentukan level optimal dari masing-masing faktor secara spesifik, dilakukan analisis *Mean Response* (rata-rata respon) pada setiap level faktor. Hasil perhitungan rata-rata *defect* untuk setiap level ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rata-Rata Respon (Mean Defect) Tiap Level

Level	Faktor A (pH)	Faktor B (Waktu)	Faktor C (Suhu)
Level 1	5.57	4.90	4.27
Level 2	2.53	3.67	4.30
Level 3	4.87	4.40	4.40
Delta Rank	3.04 1	1.23 2	0.13 3

(Sumber: Data Penelitian, 2025)

Analisis *Main Effect* berdasarkan Tabel 3 menunjukkan pengaruh masing-masing faktor sebagai berikut:

1. Faktor A (pH Larutan)
Nilai rata-rata *defect* terendah (2.53) dicapai pada Level 2 (pH 38). pH yang terlalu rendah (Level 1) menyebabkan reaksi terlalu agresif, sedangkan pH terlalu tinggi (Level 3) menghambat pembentukan lapisan yang seragam.
2. Faktor B (Waktu Pencelupan)
Kualitas terbaik diperoleh pada Level 2 (10 menit) dengan rata-rata *defect* 3.67. Waktu 4 menit belum cukup membentuk lapisan sempurna, sedangkan 20 menit berpotensi menyebabkan *over-coating*.
3. Faktor C (Suhu Proses): Suhu Level 1 (70°C) memberikan rata-rata *defect* terendah (4.27). Meskipun perbedaan antar level suhu relatif kecil, suhu 70°C memberikan laju reaksi yang terkendali.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa suhu dan waktu pencelupan adalah faktor kritis dalam pembentukan lapisan konversi (Sari & Utomo, 2023). Berdasarkan analisis di atas, kombinasi parameter proses optimum untuk meminimalkan *defect non-homogeneous* adalah A2 – B2 – C1, yaitu pH larutan 38, Waktu Pencelupan 10 menit, dan Suhu Proses 70°C. Kombinasi ini berbeda dengan kondisi operasional awal perusahaan yang memiliki variabilitas tinggi, sehingga penerapan parameter ini direkomendasikan untuk menstabilkan kualitas produksi.

Untuk memahami mekanisme fisik yang terjadi dalam proses pembentukan lapisan, analisis mendalam dilakukan terhadap pengaruh masing-masing level faktor berdasarkan nilai mean response yang diperoleh:

1. Analisis Pengaruh pH Larutan (Faktor A)

Hasil analisis menunjukkan bahwa pH larutan memegang peranan paling dominan dalam menentukan kualitas lapisan. Pada Level 1 (pH 30), tingkat cacat tercatat tinggi. Secara kimiawi, kondisi ini menunjukkan tingkat keasaman yang berlebihan, yang menyebabkan reaksi *etching* pada permukaan logam menjadi terlalu agresif. Akibatnya, lapisan fosfat sulit menempel dengan kuat atau terbentuk terlalu tipis sehingga mudah terkelupas. Sebaliknya, pada Level 3 (pH 50), cacat kembali meningkat karena pH yang terlalu tinggi menghambat laju reaksi pembentukan kristal (*coating formation*), menyebabkan deposisi yang tidak merata. Kondisi optimal tercapai pada Level 2 (pH 38), di mana keseimbangan asam memungkinkan inisiasi nukleasi kristal yang stabil, menghasilkan lapisan yang *homogen* dan rapat.

2. Analisis Pengaruh Waktu Pencelupan (Faktor B)

Durasi kontak antara benda kerja dan larutan kimia sangat menentukan kematangan lapisan. Pada Level 1 (4 menit), waktu reaksi terbukti belum mencukupi untuk menutupi seluruh permukaan pipa secara sempurna, meninggalkan area-area terbuka (*bare spots*) yang terdeteksi sebagai cacat *nonhomogeneous*. Namun, memperpanjang waktu hingga Level 3 (20 menit) justru berdampak negatif, terindikasi

dari naiknya rata-rata cacat. Fenomena ini dikenal sebagai *over-coating* atau pertumbuhan kristal berlebih, di mana kristal fosfat menumpuk menjadi struktur yang kasar dan rapuh. Oleh karena itu, Level 2 (10 menit) diidentifikasi sebagai titik jenuh ideal di mana lapisan terbentuk sempurna tanpa mengalami *degradasi* struktur akibat reaksi berlebih.

3. Analisis Pengaruh Suhu Proses (Faktor C)

Faktor suhu berkaitan erat dengan energi kinetik reaksi. Meskipun data statistik *mean response* menunjukkan perbedaan angka yang tipis antara level suhu, analisis teknis mengarahkan pada pemilihan Level 1 (70°C) sebagai kondisi operasi paling ideal. Penggunaan suhu yang lebih tinggi pada Level 2 (78°C) dan Level 3 (85°C), meskipun mempercepat reaksi, membawa risiko ketidakstabilan proses. Suhu yang terlalu tinggi dapat memicu laju penguapan larutan dan reaksi deposisi yang terlalu cepat dan tidak terkendali (*uncontrolled rapid deposition*), yang sering kali menghasilkan endapan lumpur (*sludge*) fosfat berlebih dan struktur kristal yang kasar pada permukaan pipa. Suhu 70°C memberikan laju reaksi yang moderat dan terkendali, yang krusial untuk menjaga konsistensi produksi massal serta memberikan efisiensi energi yang lebih baik bagi perusahaan.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi faktor-faktor kritis penyebab cacat *non-homogeneous* pada proses *phosphating* di PT Citra Tubindo Tbk. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode Taguchi, disimpulkan bahwa faktor pH larutan,

waktu pencelupan, dan suhu proses memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas lapisan phosphate. Kombinasi parameter proses yang paling optimal untuk meminimalkan *defect* dan meningkatkan stabilitas proses adalah pH larutan 38 (Level 2), waktu pencelupan 10 menit (Level 2), dan suhu proses 70°C (Level 1) . Penerapan kombinasi parameter ini terbukti menghasilkan nilai *Signal-to-Noise Ratio* terbaik dan rata-rata *defect* terendah dibandingkan kondisi operasional lainnya. Oleh karena itu, perusahaan direkomendasikan untuk menerapkan setting parameter ini sebagai standar operasional baru guna menekan tingkat cacat di bawah batas toleransi perusahaan.

Implikasi Manajerial dan Rekomendasi Implementasi Temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi manajemen operasional PT Citra Tubindo Tbk. Penerapan kombinasi parameter optimal (pH 38, Waktu 10 menit, Suhu 70°C) tidak hanya sebatas penyesuaian setting mesin, namun memerlukan dukungan sistem pengendalian kualitas yang terintegrasi.

1. Revisi Standar Operasional Prosedur (SOP):Perusahaandirekomendasikan untuk memutakhirkan dokumen SOP pada stasiun kerja *phosphating* dengan menetapkan parameter hasil eksperimen Taguchi ini sebagai standar baku baru, menggantikan parameter lama yang memiliki variabilitas tinggi .
2. Sistem Monitoring *Real-time*: Mengingat sensitivitas proses terhadap fluktuasi pH dan suhu, disarankan penggunaan alat monitoring digital terintegrasi atau peningkatan frekuensi pengambilan sampel manual (*titrasi*) oleh operator

untuk memastikan parameter tetap berada dalam batas kendali (Level 2 optimal) .

3. Efisiensi Biaya: Pemilihan suhu operasional 70°C (lebih rendah dari suhu percobaan maksimal 85°C) memberikan keuntungan ganda: penurunan tingkat cacat sekaligus penghematan konsumsi energi termal pada tangki pemanas. Hal ini selaras dengan prinsip efisiensi produksi tanpa mengorbankan kualitas.
4. Pelatihan Operator: Sosialisasi dan pelatihan teknis kepada operator rantai produksi mengenai pengaruh kritis waktu perendaman (mencegah *over-coating*) perlu dilakukan untuk memastikan kepatuhan terhadap durasi 10 menit yang telah ditetapkan

DAFTAR PUSTAKA

- Adi Sopian. (2021). Pengendalian Kualitas Proses Produksi. *Jurnal Teknik Industri*.
- Ayu Lestari, & Purwatmini. (2021). Analisis Pengendalian Kualitas Produk. *Jurnal Manajemen Operasi*.
- Chilbule, S., et al. (2024). Optimization of heat pipe charged with CuO nanofluid using Taguchi technique. *Applied Thermal Engineering*.
- Collins, et al. (2021). Design of Experiments using Taguchi Method. *Engineering Journal*.
- Gaspersz, V. (2022). Total Quality Management (TQM) untuk Praktisi Bisnis dan Industri. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Halimah, & Ekawati. (2020). Penerapan Metode Taguchi dalam Pengendalian Kualitas. *Jurnal Optimasi Sistem Industri*.

- Mitra, A. (2016). *Fundamentals of Quality Control and Improvement* (4th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Narayanan, T. S. (2021). *Surface Pretreatment by Phosphate Conversion Coatings: A Review*. *Reviews in Advanced Materials Science*.
- Octariani, et al. (2021). *Metode Taguchi Dalam Analisis Pengendalian Kualitas Produk Furniture*. *Jurnal Teknik Industri*.
- Phadke, M. S. (2018). *Quality Engineering Using Robust Design*. New York: Prentice Hall.
- Samet, et al. (2025). *Optimization of high strength CF/LM-PAEK thermoplastic composite tube manufacturing parameters using the Taguchi Method*. *Composite Structures*.
- Sari, R. P., & Utomo, B. (2023). *Optimasi Parameter Proses Pelapisan Logam untuk Meningkatkan Ketahanan Korosi*. *Jurnal Material dan Metalurgi*, 12(1), 45-52.
- Toebagoes, et al. (2024). *Analisis Pengendalian Kualitas Produk Baja Tulangan Sirip S36 Dengan Menggunakan Metode Taguchi Pada Quality Control*. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*.
- Widyanto, B., & Susanto, H. (2023). *Korosi dan Pencegahannya pada Logam Industri*. Bandung: Alfabeta.

	<p>Penulis pertama, Bagas Micola, merupakan mahasiswa Program Studi Teknik Industri, Universitas Putera Batam. Penulis aktif melakukan penelitian di bidang pengendalian kualitas dan manajemen produksi industri manufaktur.</p>
	<p>Penulis kedua, Arsyad Sumantika, S.T.P., M.Sc., merupakan Dosen Program Studi Teknik Industri, Universitas Putera Batam. Penulis memiliki kepakaran di bidang teknik industri dan aktif membimbing penelitian mahasiswa terkait pengendalian kualitas dan manajemen produksi industri manufaktur.</p>