

Telaah Pustaka Penggunaan Zat Aditif Sintetik dan Ekstrak Tumbuhan pada Pelapisan Tembaga secara Listrik

Fayza Maya Elwarni, Muhamad Alvin Reagen, Salprima Yudha S*, Khafit Wiradimafan

Didaftarkan: [28 Desember 2024]

Direvisi: [30 Desember 2024]

Terbit: [31 Desember 2024]

ABSTRAK: Pelapisan tembaga secara listrik atau elektroplating tembaga adalah proses pelapisan logam dengan tembaga menggunakan bantuan arus listrik. Untuk mendapatkan lapisan tembaga berkualitas optimal dengan penambahan zat aditif baik sintetik maupun alami, sangat penting untuk mengontrol pertumbuhan kristal dan distribusi ion tembaga, sehingga menghasilkan lapisan tembaga dengan kilau yang tinggi, daya lekat yang kuat, dan ketahanan korosi yang baik. Penambahan senyawa sintetik dan berbagai ekstrak tumbuhan (kulit bakau, daun jambu biji, daun binahong, kulit buah kakao) serta gelatin telah dikaji berdasarkan literatur yang ada dapat secara signifikan mempengaruhi morfologi, ketebalan, dan sifat khusus pada lapisan tembaga. Mekanisme kerja aditif melibatkan interaksi kompleks antara aditif, ion logam, dan permukaan substrat.

PENDAHULUAN

Kajian riset mengenai elektroplating atau pelapisan logam secara Listrik sedang banyak dikembangkan akhir-akhir ini di berbagai aspek kehidupan modern, mulai dari barang-barang rumah tangga hingga komponen industri [1]. Elektroplating atau elektrodposisi adalah proses pelapisan logam pada suatu material dengan menggunakan arus listrik dan tegangan yang konstan. Pada proses elektroplating, tembaga dipilih sebagai bahan pelapis karena memiliki sifat mekanik yang baik (lunak, ulet) dan sifat fisika yang unggul (konduktivitas termal dan listrik tinggi). Selain itu, posisi tembaga dalam deret volta membuat logam ini mudah tereduksi (menangkap elektron) dan digantikan oleh logam lain yang memiliki potensi reduksi lebih besar [2]. Namun, untuk mendapatkan lapisan tembaga dengan kualitas yang optimal, proses elektroplating memerlukan penambahan zat aditif. Zat aditif ini berfungsi untuk mengontrol laju pertumbuhan kristal, memperbaiki distribusi ketebalan lapisan, meningkatkan daya lekat, dan memberikan sifat-sifat khusus pada lapisan tembaga, seperti kilau atau ketahanan terhadap korosi [3]. Zat aditif sintetik, yang dirancang secara khusus di laboratorium, menawarkan efisiensi tinggi dan fleksibilitas dalam menyesuaikan sifat lapisan. Namun, biaya produksi yang tinggi dan potensi dampak lingkungan menjadi pertimbangan. Di sisi lain, zat aditif alami yang berasal dari tumbuhan atau mineral, menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Ekstrak tumbuhan, misalnya, sering digunakan sebagai inhibitor pada proses korosi dan gelatin sebagai brightener [4][5].

Dalam industri elektroplating, kepadatan arus dibatasi ketat di bawah 3A/dm^2 untuk *through-hole plating* dan 2A/dm^2 untuk *blind hole plating* [6].

Kualitas lapisan tembaga sangat dipengaruhi oleh penambahan aditif seperti akselerator, inhibitor, supresor, brightener, dan leveler. Aditif-aditif ini memiliki peran spesifik dalam mengontrol laju reaksi, morfologi kristal, dan sifat permukaan lapisan tembaga. Akselerator mempercepat proses pengendapan, inhibitor menghambat pertumbuhan kristal di area tertentu, supresor menghaluskan permukaan, *brightener* memberikan kilau, dan leveler meratakan ketebalan lapisan. Kombinasi yang tepat dari aditif ini memungkinkan diperolehnya lapisan tembaga dengan kualitas yang tinggi dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi [7][3]. Tujuan dari telaah pustaka ini adalah untuk memahami peran berbagai jenis aditif dalam meningkatkan kualitas lapisan tembaga melalui proses elektroplating tembaga. Hasil dari telaah pustaka ini diharapkan dapat mendorong pemanfaatan bahan alami sebagai aditif dalam elektroplating, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis dan memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Zat Aditif Sintetik

- **Polietilen glikol (PEG)**

Senyawa polietilen glikol (PEG) merupakan senyawa polieter yang berfungsi sebagai inhibitor dalam proses elektroplating tembaga dengan cara adsorpsi pada permukaan katoda. Adsorpsi PEG meningkatkan polarisasi katodik, sehingga distribusi arus menjadi lebih merata dan menghasilkan lapisan tembaga yang lebih halus dan padat [8].

Kajian eksperimen yang telah dilaporkan bahwa polietilen glikol (PEG8000) dapat digunakan sebagai inhibitor dalam larutan elektrolit H_2SO_4 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, dan Cl^- . Morfologi permukaan tembaga setelah lapisan bervariasi tergantung konsentrasi PEG8000. Hasilnya menunjukkan bahwa, tanpa inhibitor, permukaan tembaga terlihat datar namun memiliki kristal dan mikropori yang tidak teratur. Penambahan 20 ppm PEG8000 menghasilkan permukaan kasar dengan butiran longgar, sedangkan konsentrasi 80-160 ppm menghaluskan permukaan dan meningkatkan keseragaman butiran tembaga pada permukaan. Di sisi lain, konsentrasi PEG 320 ppm menghasilkan butiran halus namun lebih banyak mikropori. Oleh karena itu, penelitian ini menghasilkan informasi bahwa, secara keseluruhan, PEG8000 pada konsentrasi 160 ppm memberikan hasil pelapisan dengan morfologi permukaan tembaga terbaik, dengan butiran padat dan halus [9].

- **Asam sulfonat 3-N, N-Dimetilaminoditiokarbamoil-1-propana (DPS)**

Senyawa lain yaitu asam sulfonat 3-N,N-Dimetilaminoditiokarbamoil-1-propana (DPS) merupakan aditif yang berfungsi sebagai akselerator dalam proses elektroplating tembaga. Zat ini bekerja dengan memfasilitasi transfer elektron antara elektroda dan ion tembaga dalam larutan [10]. Aditif ini sebagai lapisan tunggal yang menyusun secara mandiri atau *self-assembled monolayers* (SAM) sebelum elektrodposisi tembaga. DPS membentuk ikatan yang kuat dengan permukaan tembaga, dan laju pembentukannya dapat dikontrol berdasarkan waktu. Dalam larutan asam $\text{Cu}^{+2} + \text{PEG} + \text{Cl}^-$, stabilitas lapisan DPS bergantung pada potensi dan kecepatan putaran elektroda. Proses dua langkah yang melibatkan

derivatisasi lapisan benih tembaga dengan DPS berhasil menghasilkan pengisian lajur dengan lebar yang berbeda (0,5-50 μm) [11].

- **Campuran DPS dan PEG**

Kajian riset lebih lanjut telah mencoba mengkaji pengaruh campuran aditif DPS dan PEG (berat molekul = 8000) terhadap struktur, kekasaran permukaan, dan resistivitas film tembaga yang diendapkan secara elektrokimia dari larutan elektrolit asam sulfat-sulfat (0,3 M CuSO_4 + 1,8 M H_2SO_4 + 70 ppm Cl^-). Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa intensitas puncak-puncak difraksi bergantung pada konsentrasi aditif dalam bak pelapisan. Penambahan aditif mempengaruhi kekasaran permukaan film. Rekristalisasi suhu ruangan terjadi pada film yang diendapkan dengan aditif DPS dan PEG selama beberapa minggu, menyebabkan perubahan tegangan, penurunan resistivitas, peningkatan ukuran butir, dan peningkatan tekstur kristalografi tertentu. Keberadaan aditif PEG dan DPS sangat mempengaruhi resistivitas dan ketergantungan waktu pada suhu ruangan, terutama pada campuran 46 μM PEG dan 2-34 μM DPS menghasilkan rekristalisasi yang berlangsung selama beberapa minggu. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan aditif organik dalam proses elektrodposisi tembaga memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat-sifat struktural, morfologis, dan sifat kelistrikan dari film tembaga yang dihasilkan [12].

- **Bis-(3-sodiumsulfofoprophyl disulfide) (SPS)**

Senyawa bis-(3-sodiumsulfofoprophyl disulfide) (SPS) merupakan akselator dalam proses elektroplating tembaga, yang digunakan dalam pembuatan papan sirkuit cetak dan komponen elektronik lainnya. Meskipun SPS digunakan secara luas, mekanisme spesifik tentang cara kerjanya sebagai akselerator belum sepenuhnya dipahami hingga saat ini. Maka dari itu, banyak peneliti mengusulkan sebuah model tentang cara kerja SPS sebagai akselerator. Dalam model ini menggunakan simulasi komputer untuk mengeksplorasi cara kerja zat kimia yang disebut SPS untuk mempercepat proses elektroplating tembaga. SPS yang teradsorpsi pada katoda diserang oleh H^+ , Cl^- , dan anion oksigen dari $-\text{SO}_3\text{H}$, menerima elektron dari katoda, dan terurai menjadi dua molekul asam 3-merkaptopropana-1-sulfonat (MPS). Selanjutnya, dua MPS bebas bergabung menjadi SPS, melepaskan elektron untuk mereduksi Cu^{2+} menjadi Cu^+ . Melalui siklus reaksi SPS ini, elektron pada permukaan lapisan benih tembaga (katoda) ditransfer ke Cu^{2+} untuk menghasilkan Cu^+ , sehingga mempercepat proses deposisi [13].

- **Imidazol 1,4-butanadiol diglisidil eter (IBDGE)**

Peneliti lain telah mengembangkan aditif supresor (penekan) multifungsi menggunakan senyawa imidazol 1,4-butanadiol diglisidil eter (IBDGE) untuk elektroplating tembaga dengan menggabungkan imidazol dan 1,4-butanadiol diglisidil eter (BDGE). Kopolimer ini memiliki gugus eter, hidroksil, dan imidazolium, menunjukkan efek penekan sinergis dalam elektroplating tembaga dan interaksi kompleks dengan bis-(natrium-sulfofopropil)-disulfida (SPS). Sintesis dilakukan dengan mencampur 0,1 mol imidazol dan 0,1 mol 1,4-butanadiol diglisidil eter (BDGE) dalam etanol absolut pada 60°C selama 6 jam. Hasil kajian risetnya menunjukkan bahwa IBDGE berperan efektif sebagai

aditif supresor dalam elektroplating tembaga, membuka peluang untuk pengembangan aditif yang lebih efisien di masa depan [14].

- **Pirol 1,4-butanadiol diglisidil eter (PBDGE)**

Kopolimer PBDGE telah disintesis dari pirol dan BDGE, sebagai leveler untuk meningkatkan kualitas elektroplating pada lubang-lubang papan sirkuit cetak (*printed circuit board-PCB*). Penelitian ini menggunakan metode *linear sweep voltammetry* (LSV), pengukuran galvanostatik (GMS), dan voltametri siklik untuk melihat bagaimana PBDGE berkoordinasi dengan aditif lainnya. Penambahan PBDGE sebagai aditif menghasilkan peningkatan signifikan pada *throwing power* sebesar 35,5%. Selain itu, reaksinya dipelajari melalui perhitungan kimia kuantum dan simulasi dinamika molekuler (MD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa cincin pirol dari molekul PBDGE teradsorpsi pada permukaan tembaga sebagai situs adsorpsi untuk menyeimbangkan lapisan tembaga tanpa dipengaruhi oleh perbedaan posisi lubang tembus [15].

- **Polyquaternium-2**

Polyquaternium-2 adalah senyawa kimia yang berperan penting dalam proses pelapisan tembaga pada PCB, khususnya pada bagian lubang-lubang kecil atau *through-hole*. Senyawa ini berfungsi sebagai *leveling agent* yang membuat lapisan tembaga menjadi lebih rata dan halus. Mekanisme kerjanya adalah dengan menempel pada permukaan tembaga, menghambat pertumbuhan kristal tembaga yang tidak merata, dan meningkatkan polarisasi katoda. Penggunaan Polyquaternium-2 bersama dengan zat aditif lain seperti SPS, PEG, dan Cl⁻ memberikan hasil yang sangat baik, menghasilkan lapisan tembaga yang lebih seragam dan berkualitas tinggi. Dengan demikian, Polyquaternium-2 berkontribusi signifikan dalam meningkatkan kualitas produk elektronik [16].

- **1-Hydroxyethylidene-1,1-diphosphate (HEDP)**

Asam 1-Hydroxyethylidene-1,1-diphosphate (HEDP) merupakan inhibitor komersial dengan struktur molekul yang terdiri dari atom karbon pusat yang terhubung dengan dua gugus asam fosfonat, satu gugus hidroksil, dan satu gugus metil [17]. Inhibitor ini memiliki kemampuan membentuk kompleks dengan berbagai kation divalen, termasuk Ca²⁺, Mg²⁺, Cu²⁺, Fe²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺, dan Pb²⁺ [18][19].

Asam 1-Hydroxyethylidene-1,1-diphosphate (HEDP) umumnya digunakan pada elektroplating tembaga dalam larutan non-sianida menggunakan pirofosfat dan HEDP sebagai agen pengompleks ganda. Elektrolit terdiri dari Cu₂P₂O₇·4H₂O, K₄P₂O₇, HEDP, C₆H₁₄N₂O₇, C₆H₅K₃O₇, dan KOH, dengan suhu kerja pada 40°C dan pH 8,8. Substrat besi dipersiapkan melalui pembersihan alkali dan perendaman asam sebelum elektrodeposisi selama 20 menit. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi HEDP 40 g/L menghasilkan deposit tembaga yang halus, padat, dan seragam. Efisiensi arus tanpa HEDP mencapai 95,39%, sementara dengan penambahan HEDP 40, 60, dan 80 g/L, efisiensinya menjadi 93,76%, 92,87%, dan 94,93%. HEDP adalah aditif yang dapat meningkatkan efisiensi arus dan kualitas permukaan lapisan tembaga dalam proses elektroplating non-sianida [20].

Zat Aditif Alami

- **Ekstrak Kulit Batang Bakau**

Tanin, salah satu senyawa polifenol, seringkali menjadi komponen aktif dalam ekstrak kulit batang baiku. Tanin memiliki gugus fungsi aktif seperti nitro ($-\text{NO}_2$) atau hidroksil ($-\text{OH}$) yang berperan penting dalam menghambat korosi. Sebagai contoh, tanin yang diekstrak dari kulit bakau (*Rhizophora Apiculata* Blume) adalah senyawa polifenol dengan molekul besar yang telah terbukti efektif sebagai inhibitor korosi [21].

Dalam kaitannya sebagai aditif dalam proses elektroplating tembaga, ekstrak kulit bakau ditambahkan ke larutan elektrolit CuSO_4 dan H_3BO_3 dalam aquabides, dengan variasi konsentrasi 0-3% v/v. Perubahan tegangan setelah elektrodeposisi sebesar 0,1 V untuk semua variasi inhibitor. Hasil kajian terhadap morfologi permukaan pelat baja bervariasi, yaitu tanpa inhibitor dan 1% inhibitor menghasilkan lapisan yang merata, lektroplating menggunakan 2% inhibitor menyebabkan ketebalan material pada permukaan tidak rata, sedangkan pada penggunaan aditif sebanyak 3% mengembalikan kehalusan permukaan namun dengan beberapa gumpalan. Laju korosi menurun dan efisiensi inhibisi meningkat signifikan pada 2,5% volume inhibitor, karena tanin membentuk lapisan pelindung dan kompleks dengan Fe^{3+} [22].

- **Ekstrak Daun Jambu Biji**

Tanin dalam daun jambu biji, yang mencapai kadar 12-18%, berperan sebagai inhibitor korosi alami yang efektif [23]. Gugus-gugus fungsional pada tanin, seperti nitrogen, oksigen, dan sulfur, serta ikatan rangkapnya, memungkinkan tanin untuk terikat kuat pada permukaan logam. Hal ini membentuk lapisan pelindung yang mencegah kontak langsung antara logam dengan lingkungan korosif [24]. Kajian pengaruh ekstrak daun jambu biji telah dilakukan dengan menambahkan ekstrak tersebut ke larutan elektrolit CuSO_4 dan H_3BO_3 dalam aquades, dengan variasi konsentrasi 0-9% v/v. Hasil eksperimen dalam penelitian tersebut menyatakan bahwa, peningkatan konsentrasi hingga 5% dalam proses elektrodeposisi, telah dapat mengurangi penurunan massa baja (yang telah terlapisi) setelah perendaman dalam HCl selama 10 jam, dengan laju korosi terendah 0,85 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$ dan efisiensi inhibisi 74,63%. Pengamatan mikroskop optik pada 0,1-0,5% menunjukkan lapisan pelindung yang semakin halus dan merata seiring peningkatan konsentrasi. Namun, analisis tambahan menyatakan bahwa konsentrasi tinggi justru tidak efektif dan dapat mempercepat korosi, kemungkinan disebabkan oleh sifat asam tanin yang mengikis permukaan baja [25].

- **Ekstrak Daun Binahong**

Ekstrak daun binahong digunakan sebagai inhibitor alami dalam larutan elektrolit CuSO_4 dan H_3BO_3 dalam aquades, dengan konsentrasi 0-3% v/v. Baja dilapisi selama 10, 20, dan 30 menit, lalu diuji korosinya dalam Na_2SO_4 . Hasil menunjukkan bahwa tegangan tetap (0,1 V), yang dikombinasikan dengan waktu elektrodeposisi 30 menit dan konsentrasi inhibitor 3% memberikan hasil terbaik dengan laju korosi 0,291 mpy dan efisiensi inhibisi 89,19%. Pengamatan mikroskop optik menunjukkan permukaan paling halus pada sampel 3%, meski masih ada sedikit korosi setelah 21 hari perendaman dalam Na_2SO_4 . Analisis menggunakan *X-ray diffractometer* (XRD) menunjukkan keberadaan lapisan Cu pada kedua sampel, namun tanpa sampel inhibitor menunjukkan pembentukan Cu_2O yang lebih

signifikan dibandingkan sampel dengan inhibitor 3%, menunjukkan efektivitas inhibitor dalam menghambat korosi [3].

- **Ekstrak Kulit Buah Kakau**

Kajian pemanfaatan ekstrak kulit buah kakao dilakukan dengan penambahan ekstrak ke dalam larutan elektrolit CuSO_4 dan H_3BO_3 dalam aquades, dengan variasi konsentrasi 0-2,5% v/v. Hasil pelapisan selanjutnya dilakukan ketahanan terhadap proses korosi menggunakan larutan HCl. Pengamatan mikroskop menunjukkan adanya perubahan morfologi permukaan baja, dengan hasil terbaik pada konsentrasi ekstrak 1,5%, yang menghasilkan permukaan yang sangat halus dan rata. Analisis XRD mengungkap pembentukan struktur kristal berbasis tembaga yang lebih baik dengan penambahan ekstrak kulit buah kakao. Uji korosi menunjukkan efisiensi mencapai 81,9% pada konsentrasi 1,5% ekstrak buah kakao. Namun, hasil tambahan menunjukkan bahwa pemanasan hingga 60°C merusak lapisan pelindung, menunjukkan batasan inhibitor pada suhu tinggi [26].

- **Gelatin**

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh kepadatan arus dan penambahan gelatin pada morfologi endapan tembaga menggunakan *modified-hydrodynamic electroplating test cell* (M-HETC). Hasil eksperimen yang telah dilakukan menunjukkan bahwa arus secara signifikan mempengaruhi ketebalan dan morfologi pelapisan. Penambahan gelatin terbukti efektif dalam meratakan permukaan pelapisan, mengurangi kekasaran, dan meningkatkan keseragaman ketebalan, terutama pada arus rendah. M-HETC memberikan distribusi arus yang luas dan kondisi perpindahan massa yang terkontrol, membuatnya menjadi satu sistem yang berguna untuk mempelajari pengaruh berbagai parameter proses pada kualitas pelapisan tembaga. Selain itu, M-HETC menawarkan sistem yang lebih sederhana dan memungkinkan analisis yang lebih mudah terhadap morfologi permukaan pelapisan tembaga [27].

KESIMPULAN

Proses elektroplating tembaga sangat bergantung pada penambahan zat aditif untuk mengoptimalkan kualitas lapisan. Baik aditif sintetis aditif alami dari ekstrak tumbuhan memiliki peran penting dalam mengontrol pertumbuhan kristal, meningkatkan daya lekat, dan memberikan sifat khusus pada lapisan tembaga. Aditif bekerja dengan cara mengadsorpsi pada permukaan katoda, membentuk kompleks dengan ion logam, atau bertindak sebagai inhibitor korosi. Penelitian menunjukkan bahwa pemilihan jenis dan konsentrasi aditif yang tepat sangat krusial untuk mendapatkan lapisan tembaga dengan sifat fisik, kimia, dan mekanik yang diinginkan. Selain itu, studi mengenai mekanisme kerja

aditif pada tingkat molekuler dan pengaruhnya terhadap lingkungan juga menjadi fokus penelitian terkini.

PROSEDUR PENELITIAN

Telaah pustaka ini dilakukan dengan mengumpulkan berbagai pustaka terkait dengan topik elektroplating tembaga dengan penambahan aditif sintetik dan ekstrak tumbuhan dari karya ilmiah berbahasa Indonesia dan/atau berbahasa Inggris. Pustaka-pustaka tersebut dikaji secara komprehensif dan dilakukan kompilasi, sehingga didapatkan berbagai hal terkait dengan pelapisan logam menggunakan tembaga secara listrik serta pengembangan penelitian yang mungkin masih terus bisa ditumbuhkembangkan.

DEKLARASI

Para Penulis tidak memiliki konflik dalam hal penulisan dan pendanaan.

PERSANTUNAN

FME berterima kasih kepada Program Studi Magister (S2) Kimia FMIPA Universitas Bengkulu yang telah memberikan kesempatan untuk menempuh pendidikan magister kimia.

INFORMASI TENTANG PENULIS

Penulis Rujukan:

Salprima Yudha S
Laboratorium Kimia Anorganik Fisik
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA)
Universitas Bengkulu

Para Penulis

Fayza Maya Elwarni
Program Studi Magister (S2) Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA)
Universitas Bengkulu; jalan W.R. Supratman, Kandang Limun, Kota Bengkulu

Muhamad Alvin Reagen
Laboratorium Kimia Anorganik Fisik
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA)
Universitas Bengkulu

Khafit Wiradimafan
Laboratorium Kimia Organik
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA)
Universitas Bengkulu

Pusat Riset Produk Bahan Alam dan Material Fungsional
Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM)
Universitas Bengkulu

PUSTAKA

- [1] Sigit, S.; Widodo, G.; Wasito, B.; Basuki, K.T.; Fahrnunissa, F. Effect of Current, Time, Feed and Cathode Type on Electroplating Process of Uranium Solution. *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. **2017**, 23(1):11–22. DOI: 10.17146/urania.2017.23.1.3155.
- [2] Budiyo, E.; Setiawan, D.A.; Supriadi, H.; Ridhuan K. Pengaruh Jarak Anoda-Katoda pada Proses Elektroplating Tembaga terhadap Ketebalan Lapisan dan Efisiensi Katoda Baja AISI 1020. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. **2017**, 5(1):21–9, <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v5i1.115>.
- [3] Oktavia, N.; Dahlan, D. Elektodeposisi Lapisan Tembaga pada Baja SS-304 dengan Larutan Elektrolit Mengandung Ekstrak Daun Binahong sebagai Inhibitor Korosi. *Jurnal Fisika Unand*. **2024**, 13(3):413–9. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.3.413-419.2024>.
- [4] Woo, T.G.; Lee, M.H.; Seol, K.W. Effect of Gelatin and Chloride Ions on The Mechanical Properties and Microstructural Evolution of Copper Foil. *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*. **2018**, 56(7):518–23. DOI:10.3365/KJMM.2018.56.7.518
- [5] Morand, Y. Copper metallization for Advanced IC: Requirements and Technological Solutions. *Microelectronic Engineering*. **2000**, 50(1–4):391–401. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(99\)00307-X](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(99)00307-X)
- [6] Zhai, Y.H.; Peng, Y.X.; Hong, Y.; Chen, Y.M.; Zhou, G.Y.; He, W. Synthesis and Evaluation of Organic Additives for Copper Electroplating of Interconnects. *Journal of Electrochem*. **2023**, 29(8). DOI: 10.13208/j.electrochem.2208111
- [7] Guo, L.; Li, S.; He, Z.; Fu, Y.; Qiu, F.; Liu, R. Electroplated Copper Additives for Advanced Packaging: A Review. *ACS Omega*. **2024**, 9(19):20637–47. DOI:10.1021/acsomega.4c01707
- [8] Jin, Y.; Sun, M.; Mu, D.; Ren, X.; Wang, Q.; Wen, L. Investigation of PEG Adsorption on Copper in Cu²⁺ Free Solution by SERS and AFM. *Electrochim Acta*. **2012**, 78:459–65. DOI:10.1016/j.electacta.2012.06.039
- [9] Xiang, J.; Qin, Z.; Zhang, H.; Qin, R.; Zeng, C.; Zhou D. Influence of Polyethylene Glycol Inhibitors on Properties of Electroplated Copper Layer. *Journal of Physics: Conference Series*. **2022**, 2393(1):1–5. DOI:10.1088/1742-6596/2393/1/012036
- [10] Tabakovic, I.; Inturi, V.; Riemer, S. Composition, Structure, Stress, and Coercivity of Electrodeposited Soft Magnetic CoNiFe Films: Thickness and Substrate Dependence. *Journal of The Electrochemical Society*. **2002**, 149(1):C18. DOI:10.1149/1.1421346
- [11] Tabakovic, I.; Riemer, S.; Sun, M. Self-Assembled Monolayer of 3-N, N-Dimethylaminodithiocarbamoyl-1-Propanesulfonic Acid (DPS) Used in Electrodeposition of Copper. *Journal of The Electrochemical Society*. **2013**, 160(12):D3197–205. DOI:10.1149/2.034312jes
- [12] Vas'ko, V.A.; Tabakovic, I.; Riemer, S.C.; Kief, M.T. Effect of organic additives on structure, resistivity, and room-temperature recrystallization of electrodeposited copper. *Microelectronic Engineering*. **2004**, 75(1):71–7. doi : 10.1016/j.mee.2003.10.008.
- [13] Wang, A.Y.; Chen, B.; Fang, L.; Yu, J.J.; Wang, L.M. Influence of Branched Quaternary Ammonium Surfactant Molecules as Levelers for Copper Electroplating from Acidic Sulfate Bath. *Electrochimica Acta*. **2013**, 108:698–706. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.07.017>
- [14] Hai, N.T.M.; Furrer, J.; Barletta, E.; Luedi, N.; Broekmann, P. Copolymers of Imidazole

- and 1,4-Butandiol Diglycidyl Ether as an Efficient Suppressor Additive for Copper Electroplating. *Journal of The Electrochemical Society*. **2014**, 161(9):D381–7. DOI 10.1149/2.0111409jes
- [15] Li, J.; Zhou, G.; Hong, Y.; Wang, C.; He, W.; Wang, S. Copolymer of Pyrrole and 1,4-Butanediol Diglycidyl as an Efficient Additive Leveler for Through-Hole Copper Electroplating. *ACS Omega*. **2020**, 5(10):4868–74. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03691>
- [16] Chen, B.; Wang, A.; Wu, S.; Wang, L. Polyquaternium-2: A New Leveling Agent for Copper Electroplating from Acidic Sulphate Bath. *Electrochemistry*. **2016**, 84(6):414–9. DOI:10.5796/electrochemistry.84.414.
- [17] Hoffmann, T.; Friedel, P.; Harnisch, C.; Häußler, L.; Pospiech, D. Investigation of Thermal Decomposition of Phosphonic Acids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. **2012**, 96:43–53. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.001>
- [18] Yan, R.; Gao, X.; He, W.; Chen, T.; Ma, H. 1-Hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid (HEDP)-Zn Complex Thin Films for The Corrosion Protection of Cold-Rolled Steel (CRS). *Corrosion Science*. **2019**, 157:116–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.033>
- [19] Deluchat, V.; Bollinger, J.C.; Serpaud, B.; Caullet, C. Divalent Cations Speciation with Three Phosphonate Ligands in The Ph-Range of Natural Waters. *Talanta*. **1997**, 44(5):897–907. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(96\)02136-4](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(96)02136-4).
- [20] Li, M.G.; Wei, G.Y.; Li, M.; Wang, J.F.; Chen, L.; Zhao, X.X. Effect of HEDP on Copper Electroplating from Non-Cyanide Alkaline Baths. *Surface Engineering*. **2014**, 30(10):728–34. DOI:10.1179/1743294414Y.0000000256
- [21] Gambier, F.; Shah, A.M.; Hussin, M.H.; Mohamad, Ibrahim.; M.N.; Rahim, A.A.; Brosse, N. Condensed Tannins from Mangrove and Grape Pomace as Renewable Corrosion Inhibitors and Wood Adhesive. *Journal of Advanced Chemical Engineering*. **2018**, 8(1). DOI:10.4172/2090-4568.1000182
- [22] Lubis, M.F.; Dahlan, D. Sintesis Lapisan Antikorosi Menggunakan Tanin dari Kulit Batang Bakau sebagai Inhibitor. *Jurnal Fisika Unand*. **2020**, 9(2):277–83. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.2.277-283.2020>
- [23] Mulyaningsih, N.; Mujiarto, S.; Ubaydillah, G. Pengaruh Daun Jambu Biji sebagai Inhibitor Korosi Alami Rantai Kapal. *Journal of Mechanical Engineering*. **2019**, 3(1):36–42. <https://doi.org/10.31002/jom.v3i1.1523>
- [24] Ngatin, A.; Wulandari, A.F.; Saffanah, A.D.; Suminar, D.R.; Setyaningrum S. Pemanfaatan Ekstrak Daun Jambu Biji sebagai Inhibitor Korosi Baja Paduan dalam Medium Larutan NaCl. *Fluida*. **2022**, 15(2):113–20. DOI:10.25077/jfu.10.4.479-485.2021
- [25] Prameswari, A., Dahlan, D. Pemanfaatan Ekstrak Daun Jambu Biji (*Psidium juajava*) sebagai Inhibitor Korosi Pada Baja. *Jurnal Fisika Unand*. **2021**, 10(4):479–85. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.4.479-485.2021>
- [26] Tissos, N.P.; Dahlan, D.; Yetri, Y.; Synthesis of Cuprum (Cu) Layer by Electrodeposition Method with Theobroma cacao Peels as Corrosion Protector of Steel. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. **2018**, 8(4):1290–5. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.4.4104>
- [27] Zeng, T. W.; Yen, S.C. Effect of Gelatin on Electroplated Copper Though the Use of a Modified-Hydrodynamic Electroplating Test Cell. *International Journal of Electrochemical Science*. **2021**, 16(2):1–9. DOI:10.20964/2021.02.48