

## ANALISIS TINGKAT AKURASI PROSES DEPOSISI PADA PENUMBUHAN LOGAM TIPIS DENGAN METODE ELEKTROKIMIA (STUDI: DENSITAS ARUS DAN WAKTU PENUMBUHAN)

**Rahmi Putri Wirman<sup>1\*</sup>, Alfian<sup>1</sup>, Halida Sophia<sup>2</sup>, Adia Putra Wirman<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Sains dan Teknologi, UIN Sulthan Thaha Saifuddin, Telanaipura, Kota Jambi, 36361, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Kimia, Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau, Tampan, Kota Pekanbaru, 28293, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Kimia, Farmasi dan Sains, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Duren Sawit, Kota Jakarta, 13460, Indonesia

\*e-mail: rahmi@uinjambi.ac.id

### ABSTRAK

*Telah dilakukan analisis tingkat akurasi proses penumbuhan logam tipis menggunakan metode deposisi elektrokimia. Instrumen penumbuhan logam tipis yang digunakan adalah sel elektrokimia, larutan elektrolit, dan sumber arus listrik Direct Current (DC). Variabel yang dianalisis adalah variasi densitas arus dan waktu yang diberikan pada sel elektrokimia dalam proses penumbuhan. Sampel logam tipis yang ditumbuhkan pada eksperimen ini adalah logam tipis Nikel Kobalt (NiCo). Sampel NiCo ditumbuhkan dengan 13 variasi densitas arus dan waktu penumbuhan. Hasil analisis menunjukkan bahwa penumbuhan logam tipis NiCo memiliki tingkat akurasi yang baik pada pemberian densitas arus sebesar 20 sampai 450 A/m<sup>2</sup>, dengan nilai persen akurasinya sebesar 97,04%. Sampel NiCo yang ditumbuhkan dengan densitas arus di atas 500 A/m<sup>2</sup> menghasilkan produk yang tidak baik, pada sampel terbentuk pengotor karbon dan terjadi proses oksidasi.*

Kata kunci: Logam tipis; Elektrokimia; Tingkat akurasi; Densitas arus; Waktu penumbuhan

### ABSTRACT

*[Title: Accuracy Level Analysis of Deposition Process on The Growth of Thin Metals with Electrochemical Methods (Study: Current Density And Growth Time)] Accuracy analysis of the thin metal forming process using electrochemical deposition methods has been carried out. Thin metal growth instruments were electrochemical cells, electrolyte solutions, and Direct Current (DC) electric current sources. The variables were the variations in current density and time given to electrochemical cells in the growth process. The thin metal sample grown in this experiment was the thin metal of Nickel Cobalt (NiCo). NiCo samples were grown with 13 kinds of variations in current density and growth time. The results showed that the growth of NiCo thin metal has a good level of accuracy at a current density of 20 to 450 A/m<sup>2</sup>, with the percentage value of the accuracy of 97.04%. NiCo samples grown with current densities above 500 A/m<sup>2</sup> resulted in a deformed product, carbon impurities were formed and an oxidation process occurs.*

Keywords: Thin metal; Electrochemical; Accuracy level; Current density; Time of growth

### PENDAHULUAN

Logam tipis adalah salah satu teknologi bahan yang dikembangkan untuk berbagai aplikasi pada kehidupan manusia. Sifat logam tipis yang memiliki lapisan-lapisan (*single layer* atau *multi layer*) dengan variasi ketebalan dan variasi jenis bahan penyusun dapat dimanfaatkan untuk berbagai komponen-komponen penunjang perkembangan teknologi. Logam tipis telah banyak dikembangkan sebagai bahan dasar dalam pembuatan sel surya untuk energi terbarukan (Moulin et al., 2015), pembuatan komponen elektronika (Wagner et al., 2004), pembuatan media penyimpanan berbasis plat tipis (Scheunert et al., 2016), dan masih banyak lagi pemanfaatan dari produk ini.

Di dalam riset nanomaterial khususnya dalam fabrikasi atau penumbuhan logam tipis dibutuhkan tingkat akurasi yang tinggi dan instrumen pendukung dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. Dengan mengetahui tingkat akurasi akan memudahkan untuk perancangan dan persiapan suatu eksperimen. Acuan ini juga akan memberikan variabel mana yang akan menghasilkan produk nanomaterial sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan. Banyak sekali metode penumbuhan logam tipis yang sudah dikembangkan saat ini, salah satunya adalah metoda deposisi elektrokimia atau elektrodeposisi. Contohnya dalam penelitian Mochizuki, C., et al dalam penumbuhan Pd-Ni-P *metallic glass* membutuhkan nilai densitas arus yang tepat untuk menghasilkan lapisan

deposisi logam tipis yang homogen dan komposisi penyusun *metallic glass* yang sesuai, yaitu sebesar  $2,5 \text{ A/dm}^2$  (Mochizuki, Chihiro; Senga, Takashi; Shibata, 2011). Analisis eksperimen deposisi secara elektrokimia juga dilakukan oleh Deng, M. et al. pada tahun 2009, pada analisis ini yang menjadi variabel pengaruh deposisi adalah temperatur dan konsentrasi larutan elektrolit (Deng, Ming-Jay; Lin, Pei-Chiung; Sun, I-Wen; Chen, Po-Yu; Chang, 2009). Beberapa keuntungan dari teknik penumbuhan elektrodeposisi adalah: dapat membuat sampel tipis yang homogen dengan ukuran besar, dapat melapisi atau menumbuhkan lapisan pada bahan *non equilibrium alloy*, sangat mudah dilakukan diberbagai jenis industri, dan merupakan sebuah proses yang sangat murah serta efisien (Pandey, R. K. Sahu, S. N. Chandra, 2017).

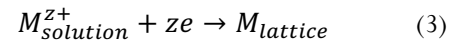
Proses perpindahan elektron pada sebuah media penghantar listrik (elektroda) yang terdiri dari kutub positif dan negatif merupakan proses dari metode elektrokimia. Terjadinya pertukaran elektron selama elektroda dialiri arus listrik melalui proses reaksi reduksi-oksidasi (redoks) secara bersamaan pada larutan elektrolit. Penangkapan elektron terjadi pada reaksi reduksi yang berlangsung pada katoda, katoda akan menarik kation dan menyerap elektron sehingga terjadinya reaksi reduksi pada katoda yang menyebabkan elektronnya berkurang, sehingga bilangan oksidasinya berkurang. Sedangkan pelepasan elektron pada peristiwa oksidasi di anoda akan menarik anion dan melepaskan elektron, sehingga bilangan oksidasinya bertambah (Bard, Allen J; Faulkner, 2004). Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan kimia dalam larutan akibat aliran arus listrik. Pada eksperimen *Michael Faraday* mengalirnya arus listrik 1 F akan terjadi oksidasi 1 massa ekuivalen zat di elektroda (anoda) dan terjadi reduksi 1 massa ekuivalen zat pada elektroda yang lainnya (Paunovic & Schlesinger, 2006). Dan perpindahan muatan terhadap 1 mol unit area dapat dirumuskan pada persamaan di bawah ini.

$$q_{(m=1)} = zF \quad (1)$$

dimana,  $q$  adalah muatan,  $z$  adalah perpindahan elektron dan  $F$  adalah konstanta Faraday. Apabila fungsi ini dilihat dari arus yang mengalir pada proses elektrokimia, maka berlaku :

$$I = zF \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

dimana,  $I$  adalah arus yang mengalir,  $m$  adalah massa deposisi elektrolisis dan  $t$  adalah fungsi waktu. Secara kimia proses deposisi logam secara elektrolisis dapat digambarkan kedalam skema berikut :



Pada skema ini dapat dilihat bahwa proses deposisi logam dengan metode elektrokimia dipengaruhi oleh  $z$  elektron dan energi yang berasal dari luar, yaitu sumber arus atau tegangan listrik (Paunovic & Schlesinger, 2006). Distribusi arus yang homogen akan menghasilkan distribusi ketebalan deposisi yang merata di atas substrat. Maka homogenitas dari distribusi arus merupakan faktor penting dalam mendapatkan hasil deposisi dengan ketebalan yang rata (Rose, Ian; Whittington, 2014).

Pada eksperimen Faraday menunjukkan kuantitas dari arus listrik yang dibutuhkan untuk mendeposisikan 1 gram logam memiliki konstanta sebesar 96500 coulomb (ampere-second). Yang kemudian nilai ini dikenal dengan Konstanta Faraday. Contohnya untuk mendeposisi nikel maka berlaku persamaan berikut.

$$W = 1,095It \quad (4)$$

dimana,  $W$  adalah jumlah nikel yang terdeposisi,  $I$  adalah arus yang mengalir di sel elektrokimia dan  $t$  waktu proses deposisi (Rose, Ian; Whittington, 2014).

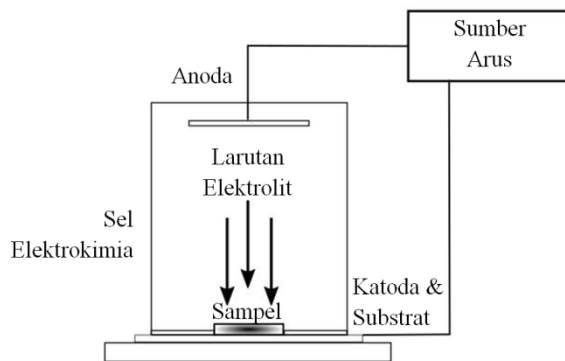
Pada penelitian ini, variabel yang di analisis adalah penentuan nilai densitas arus ( $J$ ) dan waktu penumbuhan ( $t$ ) yang diterapkan pada sistem sel elektrokimia dalam proses deposisi logam tipis. Sehingga penelitian ini menambah referensi tentang faktor pengaruh dan tingkat akurasi pada eksperimen penumbuhan logam tipis dengan menggunakan metode deposisi elektrokimia. Penentuan densitas arus dan waktu penumbuhan pada logam tipis merupakan salah satu faktor berpengaruh pada tingkat keberhasilan mendapatkan sampel yang baik, dari segi tingkat kekerasan, ketahanan terhadap korosi, dan struktur penyusun sampel yang padat serta homogen (Li et al., 2019).

## METODE

Penelitian ini adalah berbasis eksperimen di laboratorium yang meliputi persiapan instrumen, pembuatan sampel, dan karakterisasi ukuran sampel. Hasil pengukuran karakterisasi sampel merupakan data utama yang digunakan dalam analisis dengan dibandingkan dengan perhitungan teori. Hasil analisis dapat memberikan gambaran seberapa besar tingkat akurasi penumbuhan dengan menggunakan metode elektrokimia.

Tahapan pertama adalah persiapan atau pembuatan instrumen penumbuhan logam tipis. Pada tahap ini meliputi pembuatan kolam sel elektrokimia, pembuatan elektroda (Katoda dan Anoda) dan pembuatan larutan elektrolit. Instrumen penumbuhan

logam tipis dengan metode elektrokimia disusun seperti Gambar 1.



**Gambar 1.** Instrumen penumbuhan logam tipis dengan menggunakan metode elektrokimia.

Sel elektrokimia terbuat dari bahan dasar *plexiglass* setebal 5 mm. Bahan ini tidak berwarna dan memiliki transparansi hampir sama dengan kaca. *Plexiglass* dipotong dan dibentuk menjadi kolam segi empat dengan ukuran panjang 4 cm, lebar 2 cm, dan tinggi 6 cm. Bagian dasar kolam dibuat lobang segi empat dengan ukuran panjang 3 cm dan lebar 1 cm, yang merupakan area penumbuhan logam tipis.

Substrat (media tumbuhnya sampel logam tipis) yang digunakan adalah plat tembaga murni dengan ketebalan 0,2 mm. Tembaga murni dipilih karena sifatnya yang non magnetik dan memudahkan proses pemisahan antara substrat dengan produk logam tipis. Untuk menentukan seberapa banyak logam tipis yang tumbuh pada substrat, substrat ditimbang terlebih dahulu sebelum dilakukan eksperimen penumbuhan. Kemudian setelah logam tipis ditumbuhkan, substrat beserta logam tipis yang tumbuh di atasnya ditimbang lagi. Selisih nilai hasil pengukuran beratnya adalah nilai berat logam tipis yang terbentuk.

Tahap selanjutnya adalah pembuatan larutan elektrolit yang digunakan sebagai penghantar listrik antara anoda dengan katoda. Sampel logam tipis yang ditumbuhkan adalah logam tipis Nikel Kobalt (NiCo) dengan variasi densitas arus ( $J$ ) dan waktu ( $t$ ) pada proses penumbuhan. Bahan dasar kimia yang dilarutkan pada larutan elektrolit adalah Nikel (II) Sulfat dan Kobalt (II) Sulfat. Logam tipis Nikel Kobalt adalah salah satu material yang bisa dibuat dengan elektrodeposisi melalui larutan ion (Endress et al., 2017).

Logam tipis Nikel Kobalt dibuat sebanyak 13 buah dengan ketebalan yang sama yaitu 0,01 mm dengan variasi densitas arus 20, 35, 45, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 350, 450, dan 500  $A/m^2$ . Sehingga untuk menumbuhkan logam tipis dengan ketebalan yang sama, maka waktu penumbuhan memiliki variasi

sebanyak 13 data. Sumber arus listrik yang digunakan adalah listrik *direct current* (DC) dengan menggunakan *variable power supply* yang bisa diatur tegangan dan arusnya. Penumbuhan sampel logam tipis dengan densitas arus di bawah 20  $A/m^2$  tidak dilakukan karena waktu penumbuhan yang lama. Contohnya penumbuhan logam tipis dengan densitas arus sebesar 10  $A/m^2$  membutuhkan waktu selama enam jam untuk penumbuhan logam tipis setebal 0,01 mm. Eksperimen ini tidak dilakukan untuk menghindari ketidakstabilan kerja dari *power supply*, dimana akan mempengaruhi homogenitas dan ketebalan sampel. Efek perubahan densitas arus dan ketidakstabilan dari arus listrik yang diberikan pada penumbuhan logam tipis dapat dilihat pada penelitian Liu, Y. et al pada sampel logam lithium yang menghasilkan struktur yang tidak beraturan (Liu et al., 2021).

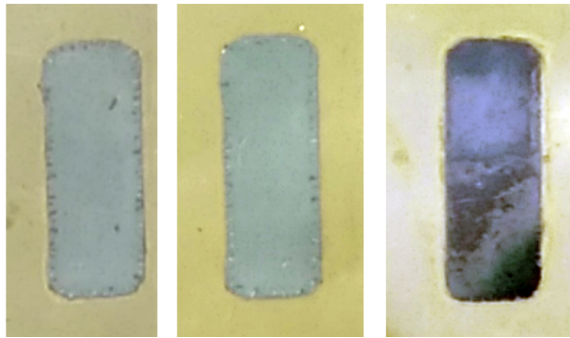
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses penumbuhan logam tipis dilakukan, dihasilkan 13 buah produk logam tipis dengan variasi pemberian densitas arus yang berbeda-beda. Logam tipis yang dibuat dengan densitas arus 20-450  $A/m^2$  menghasilkan produk logam tipis yang baik. Namun logam tipis yang ditumbuhkan dengan densitas arus 500  $A/m^2$  tidak menghasilkan produk yang baik, karena terdapat hasil sampingan berupa karbon dan korosif. Hal ini sesuai dengan eksperimen Huang, H. et al yang mengatakan bahwa korosi yang terbentuk pada lempeng katoda dipengaruhi oleh arus dan medan listrik (*Direct Current Electric Field/DCEF*). Faktor ini akan mempengaruhi migrasi ion dan sifat korosif pada logam (Huang et al., 2014). Sehingga pemberian waktu penumbuhan yang cepat pada proses pembuatan sampel akan memberikan hasil yang tidak bagus.

Berdasarkan pengamatan disaat penumbuhan logam tipis dengan densitas arus 500  $A/m^2$ , pada sel larutan elektrolit terdapat gelembung-gelembung udara, sehingga fenomena ini mengakibatkan terbentuknya proses oksidasi pada penumbuhan partikel logam tipis. Produk logam tipis yang terganggu dengan fenomena oksidasi dapat dilihat pada Gambar 2 untuk logam tipis yang ditumbuhkan dengan densitas arus 500  $A/m^2$ . Jadi, dengan nilai densitas arus yang besar ( $>500 A/m^2$ ) pada proses penumbuhan logam tipis akan mempersingkat waktu penumbuhan tetapi tidak memberikan produk logam tipis yang baik.

Untuk melihat tingkat akurasi penumbuhan logam tipis dengan menggunakan metoda elektrokimia, diperlukan analisis data perbandingan antara spesifikasi produk hasil eksperimen dengan hasil perhitungan teori. Dari hasil analisis, logam tipis dengan densitas arus penumbuhan 20-450  $A/m^2$  memberikan penumbuhan partikel yang baik, atau jumlah partikel yang terbentuk mendekati nilai perhitungan teori

(deviasi perbandingan kedua data bernilai kecil). Sedangkan logam tipis dengan densitas arus 500 A/m<sup>2</sup> memberikan jumlah partikel yang terbentuk masih jauh dari target perhitungan teori, dibuktikan dengan hasil eksperimen yang nilainya memiliki deviasi yang cukup lebar dengan perhitungan teori. Dari hasil perhitungan, pada logam tipis dengan densitas arus 500 A/m<sup>2</sup> hanya terbentuk lapisan nikel sebanyak 12% dari target penumbuhan secara teori.



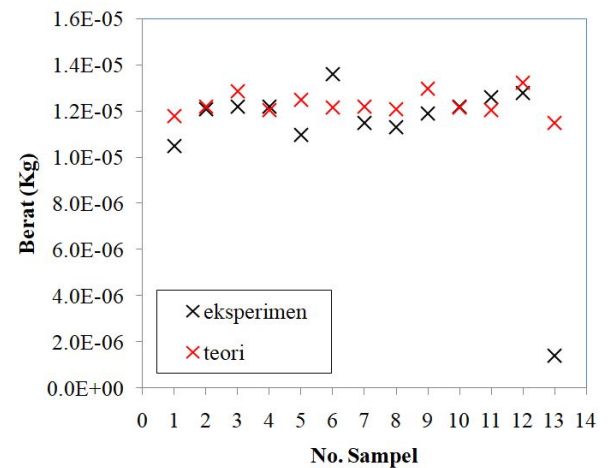
**Gambar 2.** Hasil penumbuhan logam tipis dengan densitas arus 350, 450, dan 500 A/m<sup>2</sup> (dari kiri ke kanan).

Hasil perbandingan nilai penumbuhan sampel secara eksperimen dengan teori dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan temuan pada eksperimen, instrumen penumbuhan logam tipis dengan metode elektrokimia pada penelitian ini dapat menghasilkan produk logam tipis yang baik pada pemberian densitas arus maksimum sebesar 450 A/m<sup>2</sup>. Sehingga dalam penentuan tingkat akurasi dari instrumen ini, logam tipis dengan densitas arus 500 A/m<sup>2</sup> dapat dieliminasi, karena logam tipis ini terbentuk pada saat di luar kemampuan kerja instrumen penumbuhan dengan baik.

Pada rentang penumbuhan dengan densitas arus antara 20 sampai 450 A/m<sup>2</sup> didapatkan hasil penumbuhan logam tipis yang baik, bersih dari oksidasi, dan memiliki tingkat akurasi penumbuhan yang akurat (dengan nilai akurasi > 0,88). Secara total proses eksperimen didapatkan nilai akurasi penumbuhan sebesar 0,97 atau nilai persen efisiensinya sebesar 97,04% dari target penumbuhan secara teori.

Jika dilihat dengan analisis korelasi Pearson, kedua data memberikan nilai korelasi sebesar 0,28. Artinya penumbuhan logam tipis melalui eksperimen elektrokimia memiliki pola korelasi yang lemah terhadap pola penumbuhan yang dihitung secara teori. Dari Gambar 3, memperlihatkan masing-masing data memiliki pola tersendiri sehingga korelasinya lemah, namun hasil penumbuhan sampel logam tipis ini cukup baik, dengan deviasi data yang kecil, dan memiliki nilai akurasi dan efisiensi yang bagus. Tidak hanya temuan pada penelitian ini, pengaruh densitas arus pada proses

pembuatan sampel tipis dengan elektrokimia (elektrodeposisi) juga mempengaruhi morfologi permukaan, struktur mikro, ukuran partikel, kekuatan, dan ketahanan terhadap korosi dari sampel (Wang et al., 2019). Densitas arus juga mempengaruhi tingkat porositas dan ukuran crystallite, hal ini dapat dilihat pada penelitian penumbuhan film Cadmium telluride memberikan hasil sampel yang optimal pada densitas arus 18 mA/cm<sup>2</sup> dengan tingkat porositas yang rendah serta ukuran crystallite yang besar (Razmjoo et al., 2017).



**Gambar 3.** Perbandingan pengukuran jumlah partikel logam tipis hasil eksperimen dan perhitungan teori.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penumbuhan sampel logam tipis telah berhasil dilakukan dengan proses deposisi dengan cara elektrokimia. Dengan metode ini proses pembuatan logam tipis dilakukan dengan hantaran listrik antara anoda dan katoda melalui larutan yang bersifat elektrolit. Pada eksperimen ini, variabel penentu dari ketebalan atau banyaknya partikel logam tipis yang tumbuh pada substrat adalah densitas arus yang diberikan pada sel elektrokimia dan waktu proses penumbuhan. Penumbuhan logam tipis pada metode elektrokimia akan menghasilkan produk yang bagus apabila diberikan densitas arus yang tepat. Pada eksperimen ini densitas arus yang menghasilkan produk logam tipis yang baik adalah pada rentang 20-450 A/m<sup>2</sup>. Pemberian densitas arus pada rentang ini adalah yang cukup aman bagi produk, karena tidak terjadi proses oksidasi pada penumbuhan sampel jika diberikan arus yang besar. Hasil perbandingan antara data eksperimen dengan perhitungan secara teori menunjukkan bahwa eksperimen ini memiliki akurasi atau nilai efisiensi yang sangat baik. Tetapi sebaran data hasil eksperimen dengan variasi densitas arus belum membentuk korelasi atau pola yang sama dengan data teori (korelasinya lemah).

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penelitian ini terlaksana dengan dukungan Pusat Penelitian UIN Sulthan Thaha Saifuddin Jambi dan menggunakan dana bantuan (Hibah) penelitian Kementerian Agama Republik Indonesia Tahun 2019.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Bard, Allen J; Faulkner, L. R. (2004). *Electrochemical Methods Fundamentals and Application*. John Wiley & Sons, Inc.
- Deng, Ming-Jay; Lin, Pei-Chiung; Sun, I-Wen; Chen, Po-Yu; Chang, J.-K. (2009). Electrodeposition of Ni-Cu Alloys in an Air and Water Temperature Ionic Liquid. *Electrochemistry*, 77(8), 582–584.
- Endress, F., Abbott, A., & Douglas, M. (2017). *Electrodeposition from Ionic Liquids* (2nd ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Huang, H. L., Pan, Z. Q., Guo, X. P., & Qiu, Y. B. (2014). Effects of direct current electric field on corrosion behaviour of copper, Cl<sup>-</sup> ion migration behaviour and dendrites growth under thin electrolyte layer. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 24(1), 285–291. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63059-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63059-4)
- Li, B., Li, D., Chen, W., Liu, Y., Zhang, J., Wei, Y., Zhang, W., & Jia, W. (2019). Effect of current density and deposition time on microstructure and corrosion resistance of Ni-W/TiN nanocomposite coating. *Ceramics International*, 45(4), 4870–4879. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.184>
- Liu, Y., Xu, X., Sadd, M., Kapitanova, O. O., Krivchenko, V. A., Ban, J., Wang, J., Jiao, X., Song, Z., Song, J., Xiong, S., & Matic, A. (2021). Insight into the Critical Role of Exchange Current Density on Electrodeposition Behavior of Lithium Metal. *Advanced Science*, 8(5). <https://doi.org/10.1002/advs.202003301>
- Mochizuki, Chihito; Senga, Takashi; Shibata, M. (2011). Electrodeposition of Pd-Ni-P Metallic Glass Films. *Electrochemistry*, 79(4), 249–251.
- Moulin, E., Mathias Müller, T. C., Warzecha, M., Hoffmann, A., Paetzold, U. W., & Aeberhard, U. (2015). Highly transparent front electrodes with metal fingers for p-i-n thin-film silicon solar cells. *EPJ Photovoltaics*, 6, 6–11. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2015001>
- Pandey, R. K. Sahu, S. N. Chandra, S. (2017). *Handbook of Semiconductor Electrodeposition*. CRC Press.
- Paunovic, M., & Schlesinger, M. (2006). *Fundamentals of Electrochemical Deposition: Second Edition. Fundamentals of Electrochemical Deposition: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/0470009403>
- Razmjoo, O., Bahrololoom, M. E., & Najafisayar, P. (2017). The effect of current density on the composition, structure, morphology and optical properties of galvanostatically electrodeposited nanostructured cadmium telluride films. *Ceramics International*, 43(1), 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.120>
- Rose, Ian; Whittington, C. (2014). *Nickel Plating Handbook*. Nickel Institute.
- Scheunert, G., Heinonen, O., Hardeman, R., Lapicki, A., Gubbins, M., & Bowman, R. M. (2016). A review of high magnetic moment thin films for microscale and nanotechnology applications. *Applied Physics Reviews*, 3(1). <https://doi.org/10.1063/1.4941311>
- Wagner, S., Lacour, S. P., Jones, J., Hsu, P. H. I., Sturm, J. C., Li, T., & Suo, Z. (2004). Electronic skin: Architecture and components. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 25(2-3 SPEC.ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.physe.2004.06.032>
- Wang, J., Lei, W., Deng, Y., Xue, Z., Qian, H., Liu, W., & Li, X. (2019). Effect of current density on microstructure and corrosion resistance of Ni-graphene oxide composite coating electrodeposited under supercritical carbon dioxide. *Surface and Coatings Technology*, 358, 765–774. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.061>