PENGARUH KROM PADA ELEKTRODEPOSISI NIKEL DARI LARUTAN NIKEL-KROM

Pramujo Widiatmoko*, Isdiriyani Nurdin
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha no 10, Bandung 40132
Email: pramujo.widiatmoko@che.itb.ac.id

Abstrak

Elektrodeposisi merupakan metode alternatif yang potensial untuk mengurangi kandungan nikel dari limbah elektroplating sekaligus meningkatkan nilai ekonomisnya, dengan produk berupa logam nikel murni. Penelitian ini bertujuan mengkuantifikasi pengaruh krom dalam proses pemulihan nikel dari larutan limbah industri yang mengandung nikel dan krom. Nikel sulfat dan krom sulfat digunakan sebagai pendekatan larutan hasil ekstraksi limbah padat. Percobaan dilakukan pada tekanan dan temperatur ruang dengan variasi rasio krom terhadap nikel serta konsentrasi asam borat sebagai aditif. Hasil percobaan menunjukkan bahwa keberadaan krom dengan rasio Cr/Ni 28,9% meningkatkan polarisasi aktivasi sekitar 500 mV. Kondisi optimum untuk percobaan ini diperoleh ketika rasio Cr/Ni 3,7%-berat. Perubahan rasio Cr/Ni dalam larutan dari 3,7% menjadi 14,8% menurunkan efisiensi arus sebesar 57%, menurunkan efisiensi deposisi 5%, serta meningkatkan kebutuhan energi hingga 8,3%. Morfologi deposit nikel menjadi lebih buruk dengan kenaikan rasio Cr/Ni, dan berubah menjadi deposit hidroksida pada rasio Cr/Ni 14,8%.

Kata kunci: elektrodeposisi nikel, larutan nikel-krom, krom, limbah elektroplating

Abstract

Electrodeposition, which can convert nickel ion into pure nickel metal, is an alternative for reducing nickel concentration in electroplating waste and in same time increasing its economic value. The aim of this research is to study the effect of chromium presence on the performance of Nickel recovery from liquid waste of Ni-Cr electroplating process. Liquid of electroplating waste leachate is represented by solutions containing nickel and chromium sulfate method. All experiments were carried out at ambient temperature and pressure with Cr/Ni ratio and boric acid composition as variables. Result of the research shows that chromium presence in solution with 28.9% Cr/Ni ratio increases activation polarization of about 500 mV. Optimum condition of the experiment is obtained for Cr/Ni ratio 3.7%-w. Increasing Cr/Ni ratio from 3.7% to 14.8% decreases current efficiency by 57% and deposition efficiency by 5%, and also increases energy consumption by 8.3%. Morphology of deposited nickel deteriorates with increasing of Cr/Ni ratio and hydroxide compound is formed when it reaches 14.8%.

Keywords: nickel electrodeposition, nickel-chromium solution, chromium, electroplating waste

*korespondensi

1. Pendahuluan

Nikel banyak digunakan di industri, baik sebagai bahan konstruksi, paduan baja, katalis, maupun pelapis logam lain. Limbah yang mengandung nikel dari industri-industri tersebut dikategorikan sebagai bahan berbahaya sehingga memerlukan penanganan lebih lanjut agar tidak mencemari lingkungan. Kandungan nikel yang cukup besar di dalam limbah, terutama limbah katalis dan limbah industri pelapisan, serta nilai ekonomis nikel yang relatif tinggi memungkinkan pemulihan nikel melalui jalur elektrodposisi menjadi ekonomis.

Salah satu kendala yang dihadapi pada pengendapan nikel dari larutan limbah, terutama dari industri elektroplating, adalah keberadaan ion krom dalam larutan. Efisiensi arus akan turun dengan naiknya konsentrasi krom (III) dalam larutan elektrolit. Penurunan maksimum diperoleh pada konsentrasi krom 100 mg.dm⁻³ yaitu sebesar 10% hingga 13% (Mohanty dkk., 2002). Mengingat potensi pemulihan nikel dari limbah elektroplating, penelitian ini diarahkan pada pemahaman kuantitatif pengaruh krom terhadap elektrodposisi nikel dari limbah tersebut.

Proses elektrodposisi nikel merupakan reaksi elektrokimia, melibatkan elektron yang dipasok oleh sumber arus listrik searah. Reaksi tersebut terjadi di permukaan elektroda. Ion nikel dari larutan akan tereduksi membentuk lapisan logam nikel di katoda, sementara di anoda akan terjadi reaksi oksidasi dan terbentuk gas oksigen. Elektrolit berfungsi sebagai media penghantar muatan listrik yang dibawa oleh ion-ion tersebut.

Berdasarkan tabel potensial standar (Jones, 1992) potensial reduksi standar ion nikel (II) menjadi logam nikel adalah -0,23 volt terhadap elektroda standar hidrogen (SHE = *Standard Hydrogen Electrode*). Sementara itu, potensial reduksi standar oksigen pada kondisi asam adalah +1.23 volt/SHE (Pletcher, 1990). Secara keseluruhan, reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

Dengan demikian, potensial standar sel untuk elektrodposisi nikel adalah -1,46 volt terhadap SHE.

Berdasarkan Hukum Faraday, massa logam nikel yang terbentuk di katoda sebanding dengan besar muatan listrik yang dialirkan dan sebanding dengan berat ekuivalen kimia dari senyawa tersebut (Prentice, 1991). Persamaan tersebut secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$m = (Mr/n) \times (It/F) \quad (1)$$

Potensial reduksi krom (III) menjadi logam krom sebesar -0,74 volt sehingga potensial standar sel untuk reaksi deposisi krom tersebut adalah -1.97 volt. Dengan perbedaan potensial standar sebesar 0,51 V dengan nikel, ion krom yang ada dalam larutan elektrolit dapat ikut tereduksi selama proses elektrodposisi nikel.

2. Metodologi

Percobaan dilakukan dalam sel elektrokimia dengan titanium sebagai katoda. Elektrolit yang terdiri dari larutan nikel sulfat 12,5 g/L dan krom sulfat, dengan konsentrasi yang divariasikan, dilarutkan ke dalam aqua DM bersama dengan aditif berupa natrium sulfat sebanyak 60 g/L, magnesium sulfat 6 g/L, dan asam borat dengan variasi konsentrasi. Selanjutnya, larutan tersebut diaduk hingga semua bahan larut. Listrik searah dari *rectifier* dialirkan ke elektroda yang tercelup sepenuhnya di dalam cairan elektrolit tersebut pada tegangan kerja yang lebih besar daripada potensial standar sel, yaitu 2 volt. Percobaan dilakukan pada temperatur dan tekanan ruang.

Data percobaan yang diukur adalah arus listrik, tegangan kerja, serta massa nikel yang terdeposisi. Massa deposit nikel diukur dengan cara menimbang massa katoda awal dan massa katoda setelah deposisi, kemudian dihitung selisihnya. Arus listrik dan tegangan sel diukur dengan amperemeter dan voltmeter. Parameter yang dijadikan acuan dalam unjuk kerja proses ini adalah efisiensi arus dan konsumsi energi, serta perolehan kembali logam nikel yang dinyatakan dalam efisiensi deposisi.

Larutan nikel sulfat dan krom sulfat digunakan sebagai pendekatan dari larutan limbah industri yang ingin diteliti. Konsentrasi asam borat, aditif yang berperan penting dalam proses deposisi nikel, divariasikan untuk mengetahui pengaruh keberadaan krom terhadap kebutuhan aditif. Sementara itu, konsentrasi krom dalam

larutan dinyatakan dalam rasio massa krom:nikel.

3. Hasil dan Pembahasan

Percobaan elektrodposisi nikel dengan menggunakan larutan nikel mengandung krom memperlihatkan hasil yang berbeda secara signifikan dibandingkan dengan menggunakan larutan nikel saja. Berikut dibahas pengaruh krom terhadap kurva polarisasi, kebutuhan aditif, efisiensi arus, efisiensi deposisi, kebutuhan energi, serta morfologi deposit nikel.

3.1 Pengaruh Krom terhadap kurva polarisasi

Hal pertama yang dapat diamati dengan adanya krom dalam larutan adalah perubahan kurva polarisasi, sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Percobaan dilakukan menggunakan larutan dengan rasio Cr/Ni sesuai konsentrasi dalam limbah elektroplating yaitu 28,9%. Keberadaan krom meningkatkan polarisasi aktivasi, yaitu energi awal yang dibutuhkan untuk memulai reaksi. Polarisasi aktivasi ini dihitung berdasarkan selisih antara potensial sel ketika reaksi mulai terjadi dengan potensial standar sel. Pada larutan nikel tanpa krom, polarisasi aktivasi sangat kecil. Reaksi mulai terjadi pada potensial -1,5 V, yaitu ketika arus listrik mulai terukur, sementara potensial standar sel nikel sebesar -1,46 V. Dengan keberadaan krom pada larutan nikel, tegangan yang diperlukan untuk memulai reaksi terlihat meningkat 500 mV mendekati potensial sel standar krom yaitu -1,97 V. Hal ini mengindikasikan adanya hambatan kinetik dari reduksi Cr(III) yang terlihat sebagai peningkatan polarisasi aktivasi di permukaan katoda.

3.2 Pengaruh Krom terhadap kebutuhan aditif

Krom juga berpengaruh terhadap konsentrasi aditif yang dibutuhkan untuk memperoleh logam nikel. Semakin tinggi konsentrasi krom, jumlah aditif yang diperlukan akan semakin besar. Aditif yang paling signifikan pengaruhnya adalah asam borat yang berperan sebagai buffer pH untuk mencegah pasivasi permukaan katoda selama proses reduksi nikel (Yin dan Lin, 1996). Hal ini karena selama proses elektrodposisi, peningkatan pH lokal terjadi di permukaan katoda yang memungkinkan terbentuknya senyawa hidroksida.

Gambar 1. Pengaruh keberadaan krom dengan rasio Cr/Ni 28,9% terhadap kurva polarisasi

Berdasarkan data hasil kali kelarutan yang disajikan pada Tabel 1, senyawa krom (III) hidroksida jauh lebih mudah mengendap dibandingkan dengan nikel hidroksida. Peningkatan konsentrasi ion OH^- seiring dengan kenaikan pH larutan tersebut menyebabkan kelarutan ion krom menurun. Endapan senyawa krom kemudian bereaksi lebih lanjut dengan air membentuk krom heksaaqua dan menutup permukaan katoda. Dengan penambahan asam borat sebagai buffer pH, pembentukan senyawa hidroksida tersebut dapat dicegah.

Tabel 1. Hasil kali kelarutan, Ksp senyawa Krom dan Nikel Hidroksida

Senyawa	Ksp
krom (III) hidroksida	$6,3 \times 10^{-31}$
krom (II) hidroksida	$2,0 \times 10^{-16}$
nikel (II) hidroksida	$2,0 \times 10^{-15}$

Sumber:

<http://www.csudh.edu/oliver/chemdata/data-ksp.htm>

Pada rasio krom: nikel tertentu, konsentrasi asam borat minimum yang diperlukan juga tertentu. Apabila konsentrasi asam borat kurang dari konsentrasi minimum tersebut, endapan nikel yang terbentuk akan mengandung pengotor. Larutan dengan rasio krom:nikel 0,93% membutuhkan asam borat minimum sebanyak 12 g/L. Sementara itu, asam borat 36 g/L dapat digunakan untuk elektrodposisi nikel dari larutan dengan rasio krom:nikel sampai 7,4%.

Berdasarkan hasil analisis XRD seperti terlihat pada Gambar 2 dan 3, dengan konsentrasi asam borat 12 g/L, deposit nikel yang terbentuk dari larutan dengan rasio krom:nikel 0,46% dan 0,93% masih

bercampur dengan pengotor. Dengan kenaikan konsentrasi asam borat menjadi 36 g/L, nikel yang relatif murni dapat dielektrodeposisi dari larutan dengan rasio krom:nikel 1,85%, seperti terlihat pada Gambar 4. Penambahan konsentrasi krom menjadi 7,4% menyebabkan timbulnya kembali pengotor di dalam deposit, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi krom dalam larutan akan berpengaruh terhadap kebutuhan aditif, terutama asam borat.

Gambar 2. Analisis XRD deposit nikel untuk H_3BO_3 12 g/L, rasio Cr/Ni 0,46%

Gambar 3. Analisis XRD deposit nikel untuk H_3BO_3 12 g/L, rasio Cr/Ni 0,93%

Gambar 4. Analisis XRD deposit nikel untuk H_3BO_3 36 g/L, rasio Cr/Ni 1,85%

Gambar 5. Analisis XRD deposit nikel untuk H_3BO_3 36 g/L, rasio Cr/Ni 7,4%

3.3 Pengaruh krom terhadap efisiensi arus

Efisiensi arus, yang dinyatakan sebagai rasio antara massa deposit nikel yang terbentuk dengan massa deposit nikel teoritis yang dihitung dari persamaan Faraday, juga terpengaruh oleh keberadaan krom. Hasil percobaan dengan berbagai variasi konsentrasi krom dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Pengaruh rasio Cr/Ni terhadap efisiensi arus

Efisiensi arus mula-mula naik seiring dengan kenaikan konsentrasi krom hingga mencapai rasio krom : nikel 3,7%. Pada konsentrasi krom yang lebih tinggi, efisiensi turun drastis dari sekitar 70% menjadi hanya 16% pada rasio krom:nikel 14,8%. Penurunan efisiensi tersebut menunjukkan bahwa fraksi arus listrik yang digunakan untuk mereduksi ion nikel menjadi logam nikel berkurang. Selama percobaan, pembentukan gelembung di permukaan katoda tidak kentara sehingga disimpulkan bahwa penurunan efisiensi tersebut tidak disebabkan oleh pembentukan gas hidrogen sebagai reaksi reduksi kompetitor.

Pembentukan ion hidroksida di permukaan katoda diduga menjadi faktor

utama berkurangnya massa nikel yang diperoleh. Hal ini dimungkinkan karena percobaan dilakukan dengan mengatur pH elektrolit di daerah pH 4 sampai pH 5. Reaksi elektrolisis dapat menyebabkan kenaikan pH lokal hingga mencapai daerah netral. Pada daerah ini, kemungkinan terbentuknya ion hidroksida di daerah permukaan katoda sangat tinggi.

3.4 Pengaruh krom terhadap efisiensi deposisi

Waktu optimum elektrodposisi nikel yang diperoleh melalui percobaan adalah satu jam. Oleh karena itu, efisiensi deposisi didefinisikan sebagai massa nikel yang diperoleh dari elektrodposisi selama satu jam dibandingkan dengan massa nikel dalam larutan. Gambar 7 menunjukkan hasil percobaan pengaruh krom pada efisiensi deposisi. Terdapat kesamaan antara grafik efisiensi deposisi dengan grafik efisiensi arus. Berdasarkan percobaan, efisiensi deposisi turun dari sekitar 6% menjadi 1% ketika rasio krom : nikel dinaikkan dari 3,7% menjadi 14,8%.

Gambar 7. Pengaruh rasio Cr/Ni terhadap efisiensi deposisi

3.5 Pengaruh krom terhadap kebutuhan energi listrik

Sementara itu, kebutuhan energi listrik untuk elektrodposisi nikel meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi krom dalam larutan, seperti dapat dilihat pada Gambar 8. Sampai dengan rasio krom:nikel 3,7%, kebutuhan energi relatif tidak jauh berbeda. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, kebutuhan energi meningkat drastis dari sekitar 3 kWh/kg nikel menjadi 11,3 kWh/kg nikel. Hal tersebut disebabkan oleh penurunan efisiensi arus serta peningkatan hambatan

perpindahan muatan oleh lapisan hidroksida yang terbentuk di permukaan elektroda. Semakin tinggi rasio krom:nikel dalam larutan, pembentukan hidroksida akan semakin cepat sehingga permukaan katoda tertutupi dan mengurangi nukleasi pembentukan nikel. Oleh karena itu, kebutuhan energinya meningkat secara cepat.

Gambar 8. Pengaruh komposisi Cr/Ni terhadap kebutuhan energi untuk elektrodposisi

Untuk mempelajari lebih jauh pengaruh krom, percobaan dengan menggunakan metode *Design of Experiment* (DOE) tipe *full factorial* dilakukan dengan variasi krom dan asam borat. Asam borat dipilih karena pengaruhnya yang signifikan terhadap pembentukan deposit nikel (Hoare, 1986). Krom sulfat divariasikan dengan batas atas 3,2 g/L, nilai tengah 1,65 g/L, dan batas bawah 0,2 g/L. Sedangkan batas atas Asam Borat sebesar 50 g/L, nilai tengah 43 g/L, dan batas bawah 36 g/L. Percobaan dengan nilai tengah dengan 3 kali pengulangan. Hasil analisis DOE ditampilkan dalam diagram pareto, seperti dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Gambar 9. Diagram pareto efek variabel-variabel percobaan terhadap efisiensi arus pada elektrodposisi nikel

Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa efisiensi arus lebih banyak dipengaruhi oleh faktor keberadaan krom dalam larutan bila dibandingkan dengan asam borat. Sementara itu, Gambar 10 menunjukkan bahwa kebutuhan energi untuk elektrodeposisi dipengaruhi oleh krom, asam borat, maupun interaksi antara keduanya. Faktor-faktor tersebut berpengaruh pada konduktivitas larutan serta kecenderungan terbentuknya lapisan di permukaan katoda, yang pada gilirannya meningkatkan tahanan sel.

Gambar 10. Diagram pareto efek variabel-variabel percobaan terhadap kebutuhan energi untuk elektrodeposisi Nikel

3.6 Pengaruh krom terhadap morfologi deposit nikel

Selanjutnya, pengaruh keberadaan krom terhadap morfologi deposit logam nikel yang diperoleh, ditentukan dengan melakukan percobaan elektrodeposisi dari larutan dengan berbagai konsentrasi krom. Konsentrasi krom dalam larutan dinyatakan dalam rasio massa krom:nikel, divariasikan dari 0% (tanpa krom) sampai dengan 14,8%.

Elektrodeposisi dari larutan nikel tanpa krom dengan aditif magnesium sulfat, natrium sulfat, dan asam borat dapat menghasilkan endapan logam nikel yang cerah dan tebal, seperti terlihat pada Gambar 11. Melalui analisis XRD yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 12, diketahui bahwa endapan yang terbentuk adalah nikel murni dan tidak ada pengotor yang ikut mengendap.

Percobaan elektrodeposisi dengan larutan nikel-krom memperlihatkan bahwa keberadaan krom berpengaruh terhadap morfologi deposit nikel yang dihasilkan, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 13. Pada konsentrasi krom yang rendah (rasio krom:nikel 0,46%), nikel yang terbentuk tebal dan mengkilap (Gambar 13.A).

Gambar 11. Deposit nikel hasil elektrodeposisi dari larutan nikel tanpa krom

Gambar 12. Analisis XRD deposit nikel dari larutan nikel tanpa krom

Bila dibandingkan dengan deposit nikel tanpa krom pada Gambar 11, pengaruh krom terlihat dari kesinambungan lapisan nikel yang dihasilkan. Deposit nikel yang terbentuk dari larutan tanpa krom menghasilkan lapisan nikel yang kontinyu di seluruh permukaan katoda sehingga dapat dikelupas dalam bentuk lembaran-lembaran. Dengan adanya krom, lapisan yang terbentuk mulai tidak kontinyu. Hal ini dapat dilihat dari terbentuknya serpihan-serpihan kecil ketika logam nikel dilepas dari permukaan katoda.

Gambar 13. Pengaruh krom dalam larutan terhadap deposit nikel hasil elektrodeposisi

Seiring dengan kenaikan konsentrasi krom dalam larutan, pengaruh krom semakin kentara. Pada rasio krom : nikel 3,7%, lapisan logam nikel yang terbentuk menjadi lebih tipis, seperti terlihat pada Gambar 13.B. Selain itu, logam yang terbentuk mulai

tampak kusam. Pada rasio krom:nikel 14,8%, nikel tidak lagi terbentuk sebagai lapisan logam. Sebagai gantinya, serbuk berwarna hitam terbentuk di permukaan katoda seperti terlihat pada Gambar 13.C.

Ji dkk. (1995) menunjukkan bahwa terjadi kenaikan pH lokal selama proses elektrolisis. Kenaikan tersebut terutama terjadi di permukaan elektroda karena tidak dilakukan pengadukan sehingga spesi yang bereaksi tidak dapat segera digantikan oleh spesi dari fasa ruah elektrolit. Serbuk hitam yang terbentuk di permukaan katoda tersebut kemungkinan berupa kompleks ion krom (III) heksaaqua.

Ketika reaksi deposisi dimulai, pH larutan rendah, sehingga krom (III) bersama air cenderung membentuk ion kompleks tersebut. Reaksi yang berlangsung menaikkan pH larutan menuju kondisi ketika ion krom (III) heksaaqua bereaksi dengan ion hidroksida membentuk senyawa krom hidroksida kompleks yang tidak larut dalam air. Lapisan hidroksida tersebut menghalangi sebagian transfer muatan dan meniadakan nukleasi serta pertumbuhan nikel di permukaan katoda (Lantelme dan Seghioeur, 1998).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dipaparkan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa keberadaan krom meningkatkan polarisasi aktivasi, mengurangi efisiensi arus dan meningkatkan kebutuhan energi pada proses elektrodposisi nikel. Efisiensi arus menurun drastis ketika rasio Cr/Ni lebih besar dari 3,7%. Sementara itu, kebutuhan energi meningkat secara eksponensial ketika rasio Cr/Ni di atas 3,7%. Kenaikan konsentrasi krom di dalam larutan elektrolit membutuhkan lebih banyak asam borat sebagai buffer pH. Efisiensi arus sangat dipengaruhi oleh konsentrasi krom sementara kebutuhan energi dipengaruhi oleh interaksi antara konsentrasi krom dan konsentrasi asam borat. Morfologi deposit nikel menjadi lebih buruk dengan kenaikan rasio Cr/Ni, dan berubah menjadi deposit hidroksida pada rasio Cr/Ni lebih dari 14,8%.

Daftar notasi

E°_{sel} = potensial standar sel.
SHE = potensial standar hidrogen
F = tetapan Faraday, 96500 C/ekiv.

m = massa senyawa yang terbentuk ataupun yang terurai, dalam gram (g).
I = besar arus listrik yang digunakan, dalam ampere (A).
t = waktu elektrodposisi, dalam detik.
n = valensi atom atau jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi, ekiv/mol.
Mr = berat molekul senyawa, dalam g/mol.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT Pasadena Venture Indonesia, yang telah membantu pembiayaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Abe, S.; Gendron, A.S.; Ettel, V.A. Nickel Electrowinning Process. U.S. Patent 4,078,979, March 14, 1978.
- Hoare, J. P. On the role of boric acid in the watts bath. *Journal of The Electrochemical Society*. **1986**, 133(12), 2491-2494.
- Ji, J.; Cooper, W. C.; Dreisinger, D. B.; Peters, E. Surface pH measurements during nickel electrodeposition. *Journal of Applied Electrochemistry*. **1995**, 25 (7), 642-650.
- Jones, D. A. *Principles and Prevention of Corrosion*; Macmillan Publishing Company: New York, 1992; 43.
- Lantelme, F.; Seghioeur, A. Model of nickel electrodeposition from acidic medium. *Journal of Applied Electrochemistry*. **1998**, 28(9), 907-913.
- Mohanty, U. S.; Tripathy, B. C.; Singh, P.; Das, S. C. Effect of Cr^{3+} on the electrodeposition of nickel from acidic sulfate solutions. *Minerals Engineering*. **2002**, 15 (7), 531-537.
- Pletcher, D.; Walsh, F. C. *Industrial Electrochemistry*, 2nd edition; Chapman & Hall: Glasgow, 1990; 491.
- Prentice, G. *Electrochemical Engineering Principles*; Prentice-Hall International Inc.: New Jersey, 1991; 11.
- Yin, K. M.; Lin, B. T. Effect of boric acid on the electrodeposition of iron, nickel, and Iron-nickel. *Surface and Coating Technologies*. **1996**, 78(1-3), 205-210.