

PENGARUH LAPISAN IMPLANTASI ION NITROGEN (N₂) TERHADAP KEKERASAN DAN LAJU KOROSI BAJA TAHAN KARAT 304

Viktor Malau

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta, 55281
Phone: +62-274-521673, FAX: +62-274-521673, E-mail: malau@ugm.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh lapisan tipis dari implantasi ion nitrogen (N₂) Cr terhadap kekerasan dan laju korosi permukaan baja tahan karat 304 dalam larutan 0,3 % NaCl. Baja tahan karat 304 termasuk baja tahan karat austenitik dengan komposisi 0,08 % C; 2 % Mn; 19 % Cr; 9,5 % Ni dan 1,00 % Si. Bahan ini banyak digunakan untuk pipa dan bejana tekan.

Lapisan nitrogen diperoleh dengan cara mengimplantasikan nitrogen ke permukaan spesimen. Parameter penelitian terdiri dari lama implantasi yaitu 0, 30, 45, 60, 75, 90, 105, dan 120 menit dengan arus implantasi konstan sebesar 50 μ A dan energi implantasi konstan 100 keV. Proses implantasi dilakukan dalam ruang vakum. Kekerasan permukaan spesimen dapat diketahui dengan uji indentasi mikro Vickers pada beban 10 gr, sedangkan laju korosi dapat diketahui dengan metode polarisasi dengan tiga elektroda.

Secara umum, implantasi nitrogen memberi peningkatan kekerasan permukaan baja tahan karat 304. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh bila baja 304 diimplantasi dengan lama implantasi 90 menit dengan nilai kekerasan 257 VHN. Baja 304 tanpa implantasi menghasilkan laju korosi tertinggi sebesar 54,6 mpy. Lapisan implantasi nitrogen (N₂) menghasilkan penurunan laju korosi baja 304 secara signifikan dalam larutan NaCl 0,3 %. Laju korosi terendah dihasilkan pada lama implantasi lebih besar dari 90 menit. Jadi, baja tahan karat 304 sebaiknya diimplantasi dengan lama implantasi \geq 90 menit agar diperoleh laju keausan terkecil yaitu sebesar 37,5 mpy.

Kata kunci: implantasi ion, kekerasan, laju korosi

1. Pendahuluan

Pemakaian logam, termasuk baja tahan karat 304, banyak dijumpai pada berbagai bidang teknik seperti bidang industri, konstruksi, dan berbagai komponen mesin yang harus memenuhi persyaratan seperti kekuatan, tahan korosi, tahan aus, dan tahan beban kejut. Dalam kenyataannya, tidak ada bahan yang memiliki sifat sempurna dengan kekuatan tinggi sekaligus tahan aus, tahan beban kejut serta tahan korosi. Bila ditemukan bahan yang demikian, tentu harga bahan tersebut akan mahal sekali. Dalam perkembangannya, ada usaha-usaha menggunakan baja dengan sifat mekanis yang tidak terlalu tinggi, harga relatif murah dan mudah diperoleh di pasaran. Sifat kurang baik dari bahan tersebut dapat ditingkatkan dengan berbagai cara, dan salah satu cara yang dapat ditempuh adalah dengan teknik perlakuan permukaan (*surface treatment*) berupa pemberian lapisan pada permukaan logam tersebut.

Dalam kebanyakan kasus di lapangan, kegagalan komponen-komponen suatu mesin atau suatu konstruksi seperti poros, roda gigi, *camshaft* selalu dimulai dari permukaannya, baik akibat aus, korosi maupun fatik.

Dengan demikian, bila permukaan komponen-komponen tersebut dapat dibuat memiliki sifat lebih baik dibandingkan dengan bagian dalamnya, maka jumlah kegagalan dapat diminimumkan. Berbagai teknik pelapisan untuk meningkatkan sifat-sifat permukaan dapat ditempuh mulai dari teknik konvensional (karburasi, nitridasi, karbonitridasi, cyaniding, ...) dan teknik modern (*laser hardening*, *vacuum evaporation*, *sputtering*, implantasi ion, dan *plasma nitriding*, ...). Teknik pelapisan dengan cara modern biasanya dilakukan terhadap spesimen dengan ukuran kecil dan membutuhkan dimensi presisi.

Penelitian ini memilih teknik implantasi ion. Proses implantasi dilaksanakan pada suhu kamar. Bahan pelapis yang akan digunakan adalah ion nitrogen N₂ yang diperoleh dengan teknik implantasi. Bahan yang akan dilapisi adalah baja tahan karat 304. Sifat-sifat lapisan yang akan diteliti adalah kekerasan, laju korosi, dan struktur mikro. Parameter penelitian berupa lama implantasi yaitu 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 dan 150 menit dengan energi ion tetap 75 keV dan arus 10 μ A.



2. Tinjauan Pustaka

Berikut ini disebutkan hasil dari beberapa penelitian tentang laju korosi pada material. Bayon, dkk meneliti perilaku korosi-aus dari lapisan multilayer Cr/CrN yang diperoleh dengan teknik PVD *arc cathodic* pada baja F1272 dalam larutan 0,05M NaCl. Lapisan yang diuji mempunyai tebal 55nm, 135 nm dan 500 nm. Laju korosi-aus terendah dihasilkan lapisan dengan tebal 500 nm. Bila tebal lapisan semakin besar, maka laju korosi ausnya semakin kecil [1].

Takemoto, dkk melakukan penelitian terhadap perilaku korosi baja paduan Ti-Cr dalam larutan 0,154 M NaCl dan 0,0476 M NaF. Penelitian dilakukan dengan variasi Ti-Cr dan diperoleh bahwa kenaikan kandungan Cr memberikan penurunan laju korosi [2].

Gomes, dkk dengan metode simulasi numerik dan eksperimen telah menghitung kadar lapisan Cr dan N₂ pada permukaan baja karbon SAE 1020. Lapisan Cr diperoleh dengan teknik *Electron Beam* (EB) dan lapisan Cr ini dilapisi lagi dengan N₂ dengan teknik *Plasma Immersion Ion Implantation* (PIII). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa lapisan CrN memiliki ketahanan korosi lebih kecil dibandingkan dengan material dasar tanpa lapisan [3].

Zhou, dkk telah meneliti ketahanan aus dari lapisan CrN (dengan teknik pelapisan *arc ion plating*) pada permukaan aluminium 2024. Bola Si₃N₄ digesekkan ke permukaan aluminium yang telah dilapisi CrN dan diperoleh hasil bahwa ketahanan aus permukaan aluminium 2024 meningkat secara signifikan [4].

Sonobe, dkk menyebutkan bahwa lapisan khrom nitrida (CrN) yang diperoleh dengan teknik PVD pada baja karbon sedang dapat lebih meningkatkan tahan korosi dan kekuatan fatik dibandingkan dengan teknik pelapisan konvensional [5]. Otim dan Malau telah melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas terhadap ketangguhan dan laju korosi baja tahan karat Stavax untuk *molding* PVC dan menyimpulkan bahwa suhu temper 250 °C memberi laju korosi minimum pada baja tahan karat Stavax dalam larutan HCl [6].

Tarigan, dkk meneliti tentang pengaruh *surface treatment* terhadap ketahanan korosi dari *aluminum adhesively bonded structure* dan diperoleh hasil bahwa *phosphoric acid anodizing* dapat meningkatkan ketahanan korosi [7]. Nakahara, dkk meneliti laju korosi dari bahan *sintered Ti-Mo* dalam larutan NaOH dengan variasi kandungan Mo dan konsentrasi larutan NaOH. Hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa laju korosi paduan Ti-Mo meningkat bila kandungan Mo dan konsentrasi larutan NaOH naik [8]. Katayama, dkk meneliti laju korosi lapisan Zn dan lapisan Zn-Al (5 % dan 55 % Al) pada baja karbon dalam larutan NaCl. Laju korosi lapisan Zn dan lapisan Zn-Al (5% Al) pada baja karbon dalam larutan NaCl tidak berbeda secara signifikan. Sementara lapisan Zn-Al dengan 55 % Al menghasilkan laju korosi lebih rendah pada larutan 0,5

kmol/m³ NaCl dibandingkan dengan larutan 0,05 kmol/m³ NaCl [9]. Penelitian dari Takano, dkk tentang laju korosi dari lapisan Zn-Al (dengan kandungan Al bervariasi dari 0 sampai 30 %) yang dilapiskan pada baja dengan teknik *hot-dipping* menunjukkan bahwa lapisan Zn-Al dengan kandungan 15 % Al dalam larutan 5 % NaCl mempunyai laju korosi terkecil [10]. Laju korosi dalam larutan 34 % HNO₃ dari bahan Ti6Al4V yang telah diberi perlakuan panas hampir sama dengan laju korosi dari bahan Ti6Al4V yang telah diberi lapisan Ti-15Cu-15Ni [11].

3. Landasan Teori

Baja 304 merupakan baja tahan karat austenitik dan banyak digunakan untuk konstruksi / equipment yang berinteraksi dengan zat-zat kimia korosif. Baja 304 memiliki komposisi kimia 0,08 % C; 18-20 % Cr; 8-10,5 % Ni; 2 % Mn dan Si ≤ 1 %. Baja 304 merupakan pengembangan dari baja tipe 302 dengan mengurangi kandungan karbon C untuk menghindari presipitasi karbida. Baja 304 ini masih dikembangkan lagi menjadi 304L, 304N dan 304LN dengan maksud mempermudah pengelasan peningkatan kekuatan baja tersebut.

a. Implantasi Nitrogen (N₂)

Implantasi ion merupakan suatu proses penambahan unsur asing (ion dopan) ke permukaan material target dengan cara pengionan atom asing tersebut, dipercepat dalam tabung akselerator oleh medan listrik, pemfokusan dalam medan elektromagnetik dan kemudian menembakkannya ke permukaan material target. Lapisan permukaan yang mendapat implantasi ini akan memiliki kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan substratnya. Permukaan substrat / material dasar akan bereaksi dengan bahan yang diimplantasikan, dalam hal ini ion-ion dopan berenergi tinggi akan dicangkokkan ke bahan padat dengan bantuan akselerator ion sehingga terjadi penyusupan ion dan terbentuk senyawa keras antara ion dopan dengan atom target. Penggunaan energi tinggi sampai 100 keV akan menyebabkan ion dopan menembus masuk ke bawah permukaan substrat dan selanjutnya ion dopan terjebak di dalam substrat.

b. Kekerasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini menggunakan alat uji kekerasan mikro Vickers dengan indenter berbentuk kerucut. Permukaan spesimen dibuat rata dan halus terlebih dahulu sebelum diuji. Permukaan atas dan bawah spesimen harus sejajar agar didapat hasil pengukuran kekerasan lebih presisi. Pengujian dilakukan dengan menempatkan spesimen pada landasan indentasi, kemudian diberikan beban indentasi tertentu. Kekerasan permukaan dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$VHN = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$



dengan VHN = kekerasan Vickers permukaan (kg/mm^2), F = beban indentasi (kg) dan d = diagonal rata-rata bekas injakan indenter pada permukaan spesimen (mm).

c. Laju Korosi

Ada beberapa cara pengujian laju korosi yang dapat ditemui di lapangan. Salah satu uji korosi logam yang sering digunakan adalah cara polarisasi dengan menggunakan tiga sel elektroda Tafel. Di bawah ini diberikan rumusan untuk mencari laju korosi dengan menggunakan tiga sel elektroda Tafel [12].

$$r = 0,129 \frac{ai}{nD} \tag{2}$$

dengan r = laju korosi (mpy), a = berat atom

i = rapat arus korosi ($\mu\text{A/cm}^2$)

n = valensi atom

D = berat jenis sampel (gr/cm^3)

Perhitungan laju korosi untuk paduan, perlu dihitung terlebih dahulu berat equivalennya (*equivalen weight* = EW) dengan persamaan [13].

$$EW = N_{EQ}^{-1} \tag{3}$$

$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{\omega_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{\omega_i n_i}{a_i} \right) \tag{4}$$

dengan EW = berat equivalen

N_{EQ} = nilai equivalen total

ω_i = fraksi berat

a_i = nomor massa atom

n_i = elektron valensi

Dengan demikian persamaan (2) berubah menjadi:

$$r = 0,129 \frac{i(EW)}{D} \tag{5}$$

4. Pelaksanaan Penelitian

a. Bahan

- i. Potongan baja 304 tanpa lapisan.
- ii. Potongan baja 304 yang telah diberi lapisan N_2 dengan teknik implantasi
- iii. Gas nitrogen N_2 untuk lapisan implantasi
- iv. Kertas ampelas dengan ukuran butir halus dan kasar
- v. Autosol, bahan etsa dan alkohol.

b. Alat

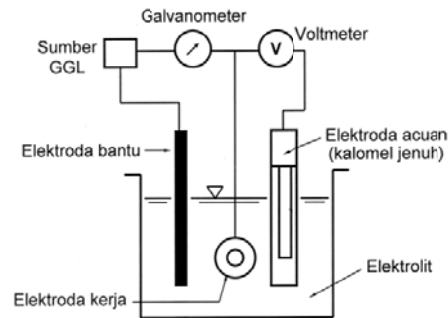
- i. Mesin implantor ion yang dilengkapi dengan

pompa rotary, pompa difusi, sistem kontrol vakum, kontrol aliran gas, kontrol suhu, sumber tegangan tinggi DC, sistem pendinginan

- ii. Mesin poles untuk menghaluskan permukaan spesimen
- iii. Mesin uji kekerasan untuk mengetahui kekerasan permukaan benda uji
- iv. Mesin uji korosi untuk mengetahui laju korosi benda uji
- v. Mikroskop optik dan SEM (Scanning Electron Microscopy).

c. Cara Penelitian

Skema alat uji korosi tipe sel tiga elektroda diperlihatkan pada Gambar 1. Dengan mengukur besar arus yang mengalir pada rangkaian sel tiga elektroda, maka laju korosi dapat dihitung berdasarkan persamaan (5).



Gambar 1. Skema alat uji korosi tipe sel tiga elektroda [14]

Pengujian ini menggunakan tiga elektroda yaitu:

i. Elektroda kerja (*working electrode*)

Elektroda kerja sebagai elektroda yang akan diteliti, digunakan istilah elektroda kerja sebagai ganti dari anoda karena penelitiannya tidak terbatas hanya pada perilaku yang bersangkutan dengan anoda, tetapi juga penyelidikan tentang perilaku katoda.

ii. Elektroda pembantu (*counter/auxiliary electrode*)

Elektroda pembantu adalah elektroda kedua yang khusus untuk mengangkut arus dalam rangkaian yang terbentuk dalam penelitian. Elektroda ini tidak digunakan untuk mengukur potensial. Platina, emas dan titanium dapat digunakan sebagai bahan elektroda pembantu.

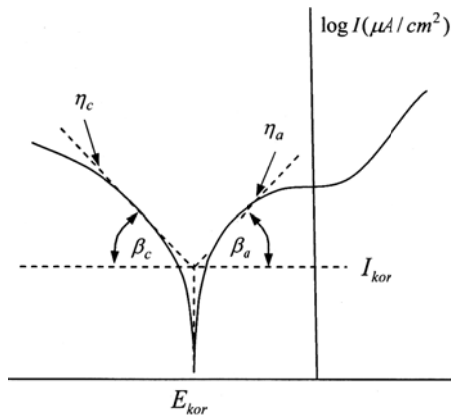
iii. Elektroda acuan (*reference electrode*)

Elektroda acuan adalah elektroda yang digunakan sebagai titik dasar yang sangat mantap untuk mengacu pengukuran-pengukuran potensial elektroda kerja. Arus yang mengalir melalui elektroda ini kecil sekali sehingga dapat diabaikan. Elektroda acuan yang sering digunakan adalah elektroda kalomel jenuh.



Ketiga elektroda tersebut dicelupkan ke dalam larutan elektrolit pada tabung elektrokimia dan terhubung dengan potensiostat/galvanostat.

Proses korosi dimulai dengan pemberian potensial pada elektroda kerja dari -2000 mV sampai dengan 2000 mV dan di-scanning dengan kecepatan tertentu kemudian diplot pada diagram kurva potensial lawan logaritma intensitas arus seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva potensial vs log intensitas arus [12]

Proses yang terjadi pada elektroda kerja adalah sebagai berikut:

i. Elektroda kerja diberi potensial negatif (polarisasi katodik)

Elektroda kerja mengalami **reaksi reduksi** yang ditunjukkan dengan gradien negatif pada grafik sebelah kiri. Reaksi ini terjadi saat diberi potensial -2000 mV dan diperbesar sampai dengan arus reduksi mencapai nol pada potensial korosi (E_{kor}) tertentu.

Proses reduksi berakhir ketika arus mencapai nilai nol.

ii. Elektroda kerja diberi potensial positif (polarisasi anodik)

Elektroda kerja mengalami **reaksi oksidasi** setelah reaksi reduksi berakhir, ditunjukkan dengan gradien positif pada grafik sebelah kanan. Reaksi ini terjadi saat diberi potensial dan arus yang semakin besar. Potensial yang biasanya diberikan sampai dengan 2000 mV.

Rapat arus korosi (I_{kor}) diperoleh dari hasil ekstrapolasi kurva potensial lawan logaritma intensitas arus yaitu dengan cara menentukan titik perpotongan garis Tafel reaksi reduksi (η_c) dan garis tafel reaksi oksidasi (η_a) pada garis potensial korosi (E_{kor}). Nilai η_c dan η_a ditentukan dengan persamaan berikut [13]:

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0} \text{ dan } \eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_0} \quad (6)$$

dengan

η_c = tafel reaksi reduksi, η_a = tafel reaksi oksidasi

i_c = arus pada reaksi katoda,

i_a = arus pada reaksi anoda

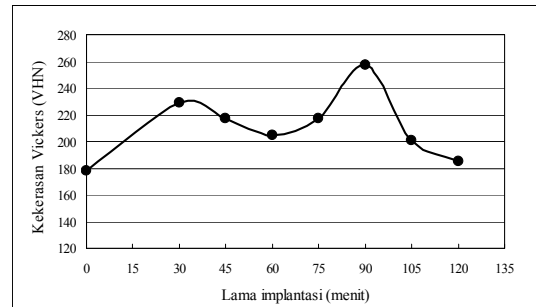
$i_0 = i_a = -i_c = i_{kor}$ = arus saat perubahan reaksi reduksi menuju reaksi oksidasi

β_c = gradien tafel reaksi katoda

β_a = gradien tafel reaksi anoda

5. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Gambar 3 memperlihatkan distribusi kekerasan permukaan baja 304 sebagai fungsi lama implantasi N₂.



Gambar 3. Pengaruh lama implantasi nitrogen N₂ terhadap kekerasan permukaan baja 304 dengan arus berkas ion 50 μA dan energi ion 100 keV

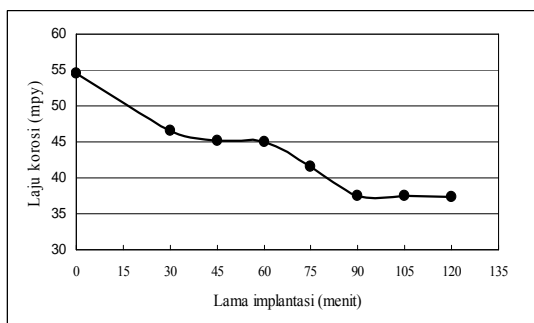
Baja 304 tanpa implantasi memiliki kekerasan 180 VHN dan secara umum lapisan implantasi N₂ memberi peningkatan kekerasan permukaan baja 304. Kekerasan permukaan meningkat dari 180 VHN menjadi 257 VHN jika lama implantasi naik sampai 90 menit dan kekerasan ini menurun apabila lama implantasi lebih besar dari 90 menit.

Peningkatan kekerasan permukaan yang terjadi pada baja 304 yang diimplantasi ion nitrogen disebabkan oleh meningkatnya kerapatan atom-atom di dalam substrat. Kekerasan juga ikut dipengaruhi oleh interaksi antara ion dopan (ion yang diimplantasikan) dengan substrat, yaitu interaksi antara Fe dan N₂ yang memiliki sifat sangat keras. Jika lama implantasi naik sampai 90 menit, ion dopan masih berinteraksi secara baik dengan Fe, tetapi kondisi sebaliknya terjadi bila lama implantasi lebih besar dari 90 menit. Untuk lama implantasi lebih besar dari 90 menit, jumlah ion dopan pada permukaan melampaui jumlah yang dibutuhkan untuk menaikkan kekerasan atau dalam hal ini ion dopan menjadi jenuh



dengan kekerasan yang lebih rendah.

Distribusi laju korosi permukaan baja 304 yang telah diberi lapisan implantasi N₂ dapat dilihat seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh lama implantasi nitrogen N₂ terhadap laju korosi permukaan baja 304 dalam larutan 0,3 % NaCl dengan arus berkas ion 50 μ A dan energi ion 100 keV

Gambar 4 menunjukkan bahwa lapisan implantasi N₂ pada permukaan baja 304 menurunkan laju korosi secara signifikan dalam larutan 0,3 % NaCl. Laju korosi permukaan baja 304 tanpa implantasi adalah sebesar 54,6 mpy. Laju korosi menurun bila lama implantasi meningkat sampai 90 menit, dan selanjutnya laju korosi tersebut konstan bila lama implantasi lebih besar dari 90 menit. Penurunan laju korosi ini adalah akibat terbentuknya paduan Fe dan N₂ yang dapat berupa FeN, Fe₂N, Fe₃N atau Fe₄N yang lebih tahan korosi.

Berdasarkan uraian di atas dapatlah diketahui bahwa baja tahan karat tipe 304 akan memiliki kekerasan tertinggi bila diimplantasi nitrogen (N₂) dengan lama implantasi 90 menit. Dan pada lama implantasi 90 menit ini, baja 304 memiliki laju korosi terendah sebesar 37,5 mpy dalam larutan 0,3 % NaCl. Jadi agar diperoleh kekerasan dan laju korosi optimum, sebaiknya baja 304 diimplantasi selama 90 menit untuk arus berkas 50 μ A dengan energi ion 100 keV.

5. Kesimpulan

- Lapisan implantasi nitrogen N₂ pada permukaan baja tahan karat tipe 304 akan menaikkan kekerasan dan sebaliknya lapisan implantasi N₂ akan menurunkan laju korosi secara signifikan dalam larutan 0,3 % NaCl.
- Kekerasan tertinggi baja 304 adalah 257 VHN dengan lama implantasi 90 menit, dan laju korosi terkecil sebesar 37,5 mpy dicapai untuk lama implantasi 90 menit. Atau dengan kata lain, lama implantasi optimum adalah 90 menit agar baja 304 memiliki kekerasan tertinggi dengan laju korosi terendah.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada yang telah

membayai penelitian ini dengan Kontrak Kerja No. 2026/H1.17/PL/2010 tanggal 6 April 2010.

Daftar Pustaka

- [1] Bayon, R., Igartua, A., Fernandez, X., Martinez, R., *Corrosion-wear Behavior of PVD Cr/CrN Multilayer Coatings for Gear Applications*, International Tribology, Elsevier, 2008.
- [2] Takemoto, S., Hattori, M., Yoshinari, M., Kawada, E., *Corrosion Mechanism of Ti-Cr Alloys in Solution Containing Fluoride*, Dental Material, Elsevier, 2008.
- [3] Gomes, G. F., Ueda, M., Reuther, H., *Chromium Recoil Implantation into SAE 1020 Steel by Nitrogen Ion Bombardement*, Brazilian Journal of Physics, Vol. 34, No. 4B, 2004.
- [4] Zhou, F., Chen, K., Wang, M., Xu, X., *Friction and Wear Properties of CrN Coating Sliding against Si₃N₄ Balls in Water and Air Wear*, Elsevier Issues, Vol. 265, (2008) p. 1029-1037.
- [5] Sonobe, M., Schiozawa, K., and Motobayashi, K., *Improvement in Corrosion Resistance of CrN Coated Steel with Multi Stage Deposition Method and Its Corrosion Fatigue Strength*, Proc. of the 1996 4th International Conference on Comp. Aided Assesment and Control, 1996.
- [6] Otim Suprpto dan Viktor Malau, *Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Ketangguhan dan Laju Korosi Baja Tahan Karat Stavax untuk Molding PVC*, Prosiding Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri, ISBN 979-8541-29-4, Yogyakarta, 18-19 Mei 2004, p. V67-V71
- [7] Tarigan, P., Yuli Yulianty and Ratna Dewi Anjani, *The effect of Surface Treatment to The Corrosion Resistance of Adhesively Bonded Structure*, KOROSI & MATERIAL, Vol. II, No. 5, Oktober 2002, p. 19-26.
- [8] Nakahara, K., Tokumoto, K., Sakaguchi, S., Hayashi, Y., *Corrosion Behavior of Sintered Ti-Mo Alloy in NaOH Solution*, Journal of the Japan Society of Powder Metallurgy, Vol. 45, No. 8, (1998) 769-774.
- [9] Katayama, H., Tay, Y. C., Vilorio, A. S., Nishikata, A., and Tsuru, T., *Corrosion Monitoring of Zn and Zn-Al Coated Steels under Wet-Dry Cyclic Conditions Using AC Impedance Method*, Materials Transactions, JIM, Vol. 38, (1997) p. 1089-1094.
- [10] Takano, Y., Takada, Hatano, T., Nakada, T., *Estimation of Corrosion Resistance of Zn-0-30 % Al Hot-Dipping Coating on Steel*, Materials Science Research International, Vol. 4 No. 1, (1998) p. 64-70.
- [11] Chang, T. M. L., and Yang, C. Y., *A Comparison of*



the Corrosion Behavior and Surface Characteristics of Vacuum-brazed and Heat treated Ti6Al4V alloy, Journal of Materials Sciences, Vol. 9, (1998), p. 429-437.

- [12] Fontana, M. G., *Corrosion Engineering*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [13] Jones, D. A., *Principles and Prevention of Corrosion*, MacMilman Publishing Company, Ohio, 1991.
- [14] Tretthewey, K. R., and Chamberlain, J., *Korosi untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasa*, PT. Gramedia Pustaka Pratama, Jakarta, 1991.

