

## PENGARUH NITRIDASI ION SUHU RENDAH PADA KETAHANAN AUS DAN KOROSI BIOMATERIAL STAINLESS STEEL AUSTENITIK 316L

Sudjarmoko, Bambang Siswanto, Wirjoadi, Lely Susita RM

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281

e-mail: sd\_moko@yahoo.co.id

Diterima 03 Juli 2012, diterima dalam bentuk perbaikan 27 Juli 2012, disetujui 30 Juli 2012

### ABSTRAK

**PENGARUH NITRIDASI ION SUHU RENDAH PADA KETAHANAN AUS DAN KOROSI BIOMATERIAL STAINLESS STEEL AUSTENITIK 316L.** Dalam penelitian ini telah selesai dilakukan proses nitridasi ion dan karakterisasi cuplikan SS 316L. Proses nitridasi ion telah dilakukan pada cuplikan untuk variasi suhu nitridasi 350, 400, 450, 500, dan 550 °C, pada tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam. Struktur-mikro, komposisi unsur dan struktur fase lapisan nitrida yang terbentuk pada permukaan cuplikan diamati menggunakan teknik SEM-EDAX dan XRD, dan diketahui bahwa lapisan tipis nitrida besi telah terbentuk pada permukaan cuplikan. Lapisan nitrida besi tersebut mempunyai struktur fase antara lain  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N,  $\gamma$ '-Fe<sub>4</sub>N, CrN, Cr<sub>2</sub>N dan austenit terekspansi  $\gamma_N$  yang mempunyai sifat-sifat istimewa. Hasil karakterisasi ketahanan aus cuplikan SS 316L menunjukkan terjadinya peningkatan ketahanan aus sekitar 2,6 kali cuplikan standar pada suhu nitridasi 350 °C, dan dari uji korosi dengan larutan Hanks diperoleh laju korosi optimum 29,87 mpy atau ketahanan korosinya meningkat sekitar 137%. Dengan demikian dapat diketahui bahwa dengan menggunakan teknik nitridasi ion telah terbentuk lapisan nitrida besi pada permukaan cuplikan SS 316L, dan mereka mempunyai sifat ketahanan aus dan ketahanan korosi sangat baik. Sifat kekerasan yang tinggi dan mempunyai ketahanan korosi yang baik tersebut, terutama disebabkan terbentuknya nitrida besi dan fase austenit terekspansi  $\gamma_N$  pada proses nitridasi suhu rendah.

**Kata kunci:** Nitridasi ion, ketahanan aus, ketahanan korosi, fase austenit terekspansi

### ABSTRACT

**EFFECT OF THE LOW TEMPERATURE ION NITRIDING ON THE WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL BIOMATERIALS.** In the present study has been completed done the ion nitriding process and characterization of the 316L SS samples. The ion nitriding process has been conducted on the samples for nitriding temperature variation of 350, 400, 450, 500, and 550 °C, the optimum nitrogen gas pressure of 1.8 mbar and optimum nitriding time of 3 hours. The micro-structure, elemental composition and the phase structure of the nitride layer formed on the surface of samples were observed using the techniques of SEM-EDAX and XRD, respectively. It is known that a thin layer of iron nitrides has been formed on the surface of the samples. Iron nitride layer has a phase structure including  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N,  $\gamma$ '-Fe<sub>4</sub>N, CrN, Cr<sub>2</sub>N and expanded austenite  $\gamma_N$ . The characterization results of the wear resistance of the 316L SS samples showed an increasing of about 2.6 times the wear resistance of standard samples after nitriding temperature of 350 °C. From the corrosion test by using the Hanks solution was obtained 29.87 mpy corrosion rate or the increasing of corrosion resistance of about 137%. Thus it can be seen that by using ion nitriding technique the iron nitride layer has been formed on the surface of the 316L SS samples, and they have an excellent properties of wear resistance and corrosion resistance, which were caused especially due to the formation of an expanded austenite  $\gamma_N$ . Properties of the high hardness and has the good corrosion resistance, especially due to the formation of iron nitride and expanded austenite phases  $\gamma_N$  at low temperature nitriding process.

**Keywords:** Ion nitriding, wear resistance, corrosion resistance, phase of expanded austenite

### PENDAHULUAN

Penggunaan material lapisan tipis dan komponen permukaan yang direkayasa semakin meningkat dan didorong oleh kebutuhan untuk memperbaiki dan meningkatkan nilai kekerasan, ketahanan korosi dan ketahanan aus suatu permukaan material. Stainless steel austenitik adalah kelompok stainless steel yang paling penting berkaitan dengan pemanfaatannya yang sangat luas dalam berbagai bidang industri, dan juga sebagai biomaterial yang dimanfaatkan dalam bidang kedokteran. Stainless steel mempunyai sifat ketahanan korosi yang sangat baik disebabkan karena pembentukan selaput permukaan pasif (a passive surface film), akan tetapi untuk berbagai

macam aplikasi industri kekerasannya relatif rendah dan ketahanan ausnya kurang memadai (1-6). Ketahanan aus komponen stainless steel pada umumnya dapat ditingkatkan dengan teknik rekayasa permukaan (*surface engineering techniques*), yaitu memodifikasi sifat-sifat lapisan permukaan dengan cara proses pelapisan (*coating processes*) seperti deposisi uap secara fisika (*physical vapor deposition*), deposisi uap secara kimia (*chemical vapor deposition*) atau semprotan plasma (*plasma spray*), PI3 (*plasma immersion ion implantation*), teknik implantasi ion maupun proses difusi seperti karburasi atau nitridasi ion (4,7,8,9). Beberapa penelitian yang dilakukan telah menunjukkan bahwa nitridasi ion terhadap stainless steel pada suhu relatif rendah menghasilkan lapisan permukaan keras yang menghasilkan terjadinya peningkatan ketahanan aus tanpa mengurangi ketahanan korosi (2,3,7,10).

Nitridasi ion atau juga disebut nitridasi plasma adalah suatu proses termokimia (*thermochemical process*) untuk memperbaiki sifat-sifat permukaan material, seperti pengerasan permukaan, ketahanan aus, ketahanan korosi dan kekuatan lelah (*fatigue strength*) dari berbagai macam stainless steel (11-14). Pada saat ini nitridasi ion telah banyak digunakan dalam kegiatan industri untuk meningkatkan ketahanan aus dan ketahanan korosi komponen-komponen berbasis stainless steel. Nitridasi ion adalah proses di mana nitrogen dimasukkan ke permukaan stainless steel pada suhu tertentu. Nitridasi ion ini adalah metode pengerasan permukaan memanfaatkan teknologi lucutan pijar (*glow discharge technology*) untuk memasukkan unsur nitrogen ke permukaan diikuti dengan proses difusi ke dalam material (1,8). Proses ini dilakukan dalam ruang hampa di bawah tegangan tinggi dan ion-ion dalam plasma yang terbentuk dipercepat menumbuk permukaan benda kerja. Proses tumbukan ion tersebut memanaskan benda kerja dan membersihkan permukaan, sehingga menyebabkan nitrogen aktif dalam pengaruh lucutan pijar untuk membentuk lapisan tipis nitrida besi.

Pada umumnya nitridasi ion konvensional dilakukan pada suhu nitridasi di atas 500 °C agar dihasilkan lapisan ternitridasi yang tebal pada permukaan cuplikan, yang secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan dan sifat keausan (10,17). Akan tetapi ketahanan korosi dari permukaan stainless steel austenitik berkurang secara dramatis akibat pembentukan nitrida krom (CrN) selama perlakuan permukaan, karena terjadinya penurunan kandungan krom bebas yang tersedia dalam matriks stainless steel untuk pembentukan lapisan permukaan protektif (*the protective surface film*) (2,10,15). Untuk menghindari terjadinya pengendapan CrN, nitridasi ion dapat dilakukan pada suhu rendah, biasanya di bawah suhu 450 °C, dan dihasilkan fase austenit tereksansi (*expanded austenite*)  $\gamma_N$  atau fase-S yang mempunyai kekerasan tinggi dan ketahanan korosi yang lebih baik. Suhu nitridasi yang rendah dan distorsi perlakuan panas yang rendah (*low heat treatment distortion*) dari proses nitridasi ion telah menarik minat yang besar dari sudut pandang teknologi, dan banyak penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan kekerasan permukaan yang tinggi tanpa terjadi degradasi ketahanan korosi.

Dalam penelitian ini dilakukan kajian pengaruh suhu nitridasi rendah terhadap peningkatan ketahanan aus dan korosi stainless steel AISI 316L, pembentukan fase austenit tereksansi, juga pengaruhnya terhadap struktur-mikro dan struktur fase dari permukaan cuplikan yang ternitridasi. Uji ketahanan aus dilakukan menggunakan alat uji keausan berdasarkan pada laju material yang terauskan atau jumlah material yang aus per satuan jarak luncur atau waktu pengausan; sedangkan ketahanan korosi diukur dengan alat uji korosi potensiostat PGS-201T menggunakan larutan Hanks, yaitu larutan yang disimulasikan seperti cairan dalam tubuh manusia. Analisis struktur-mikro dilakukan menggunakan teknik SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan analisis struktur fase kristalin dilakukan menggunakan teknik difraksi sinar-X (XRD).

## **METODOLOGI**

### **Bahan**

Bahan yang digunakan dalam proses nitridasi ion adalah biomaterial berbasis besi berupa stainless steel austenitik jenis 316L dengan kemurnian (% berat): Fe-69%, Cr-18%, Ni-10%, Mo-3%; gas nitrogen, dan bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan larutan Hanks untuk uji korosi terdiri dari NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KCl, NaHCO<sub>3</sub>, glukosa, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O, dan MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O produksi PT Merck yang memiliki tingkat kemurnian 99,5%.

### **Alat**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari: peralatan nitridasi ion yang dilengkapi dengan sumber tegangan tinggi dc, sistem vakum, sistem masukan gas dan regulator suhu; alat uji keausan, alat uji korosi

potensiostat PGS-201T, SEM-EDAX merk Jeol JSM-636 OLA, dan difraktometer sinar-X (XRD) tipe Simadzu XRD-6000 menggunakan sumber radiasi  $\text{CuK}\alpha$  dengan panjang gelombang 1,54056Å.

### Tata Kerja

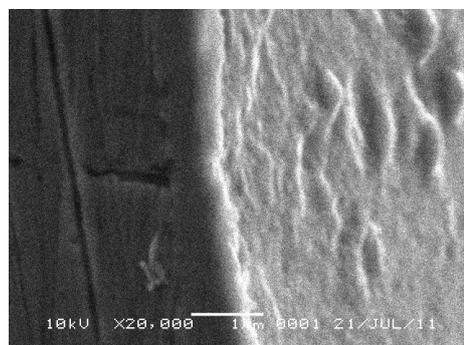
Bahan yang digunakan untuk cuplikan berupa stainless steel austenitik jenis 316L ukuran 1,0 cm × 1,0 cm dan tebal 2,0 mm dibuat menurut teknik metalografi konvensional dengan pengampelasan dan penghalusan permukaan. Pengampelasan dilakukan menggunakan kertas ampelas, selanjutnya dipoles atau dihaluskan menggunakan pasta intan dan digosok dengan kain beludru sampai dihasilkan permukaan yang halus dan mengkilap. Untuk menghilangkan kotoran pada permukaan cuplikan dilakukan pencucian menggunakan alkohol dan kemudian dimasukkan ke dalam pembersih ultrasonik.

Setelah diperoleh cuplikan dilanjutkan dengan proses nitridasi ion yang dilakukan menggunakan peralatan nitridasi ion. Peralatan tersebut terdiri dari bejana vakum terbuat dari logam dilengkapi dengan sistem vakum, sistem masukan gas nitrogen, sistem tegangan tinggi dc 300 – 1.200 volt dan regulator suhu. Pada penelitian ini suhu nitridasi ion divariasi pada kisaran 350, 400, 450, 500 dan 550 °C; sedangkan tekanan gas nitrogen divariasi untuk nilai 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 dan 2,4 mbar; dan variasi waktu nitridasi ion 1, 2, 3, 4 dan 5 jam.

Ketahanan aus cuplikan ditentukan berdasarkan pada laju material yang terauskan atau jumlah material yang aus (massa, volume atau tebal) per satuan jarak luncur atau waktu pengausan, dimana beban pengaus adalah 319,376 gram dan waktu pengausan selama 15 menit. Ketahanan korosi cuplikan ditentukan menggunakan alat uji korosi potensiostat PGS-201T untuk mengukur besarnya arus korosi  $I_{kor}$ . Besarnya laju korosi sebagai fungsi dari arus korosi ( $\text{ampere}/\text{m}^2$ ), yaitu besarnya arus listrik yang mengalir dari anode menuju ke katode atau sebaliknya, rapat jenis bahan dan luas cuplikan. Untuk mengetahui struktur mikro dan komposisi unsur permukaan cuplikan dilakukan analisis dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-Ray*); sedangkan untuk mengetahui struktur fase kristalin dari lapisan tipis nitrida dilakukan pengujian dengan XRD (*X-ray Diffraction*) menggunakan metode pencocokan dengan data JCPDS.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

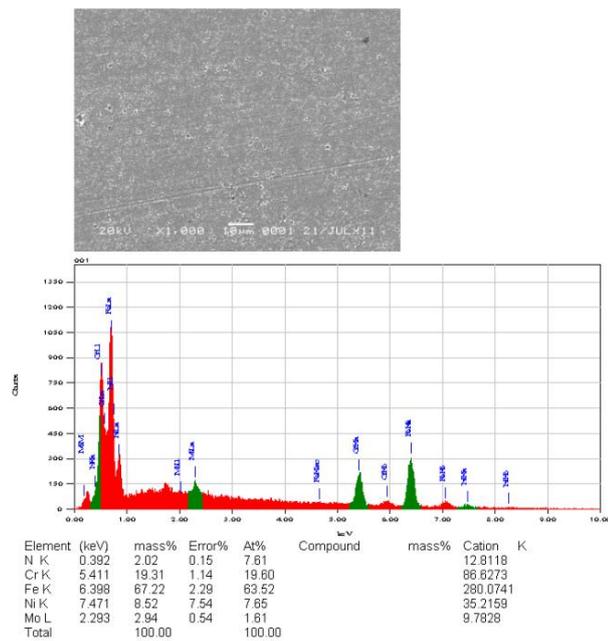
Mikrograf SEM dari tampak-lintang cuplikan SS 316L setelah dinitridasi ion pada suhu 350 °C, tekanan gas nitrogen dan waktu nitridasi optimum masing-masing pada 1,8 mbar dan 3 jam ditampilkan pada Gambar 1. Berdasarkan mekanisme nitridasi ion untuk cuplikan berbasis Fe, atom-atom besi yang terpercik keluar dari permukaan cuplikan akibat tumbukan ion-ion nitrogen bereaksi dengan nitrogen dalam fase gas untuk membentuk  $\text{FeN}$  yang tidak stabil, selanjutnya terkondensasi pada permukaan cuplikan, melepaskan nitrogen dan membentuk nitrida besi yang lebih stabil seperti struktur fase  $\epsilon\text{-Fe}_{2,3}\text{N}$  dan  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ . Dalam proses nitridasi ion tersebut terbentuk dua jenis lapisan nitrida, yaitu lapisan senyawa (*compound layer*) yang berwarna putih yang mempunyai struktur fase  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  atau fase  $\epsilon\text{-Fe}_{2,3}\text{N}$ , dan daerah difusi (*diffusion zone*) di bawah lapisan senyawa<sup>(14,16)</sup>, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Lapisan senyawa tersebut mempunyai sifat sangat keras sehingga tahan terhadap keausan.



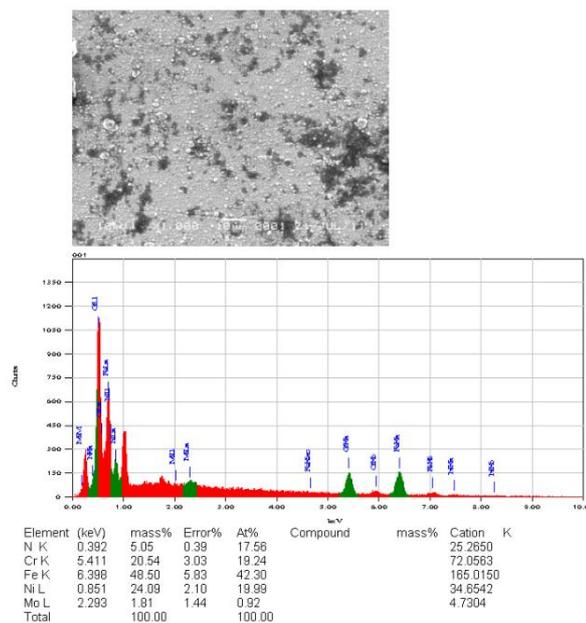
Gambar 1. Mikrograf SEM dari tampak-lintang cuplikan SS 316L setelah dinitridasi ion pada suhu 350 °C, tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam.

Dalam penelitian ini juga dilakukan pengamatan struktur-mikro dan komposisi unsur menggunakan teknik SEM-EDAX, terutama untuk mengetahui kandungan unsur nitrogen pada permukaan cuplikan setelah proses

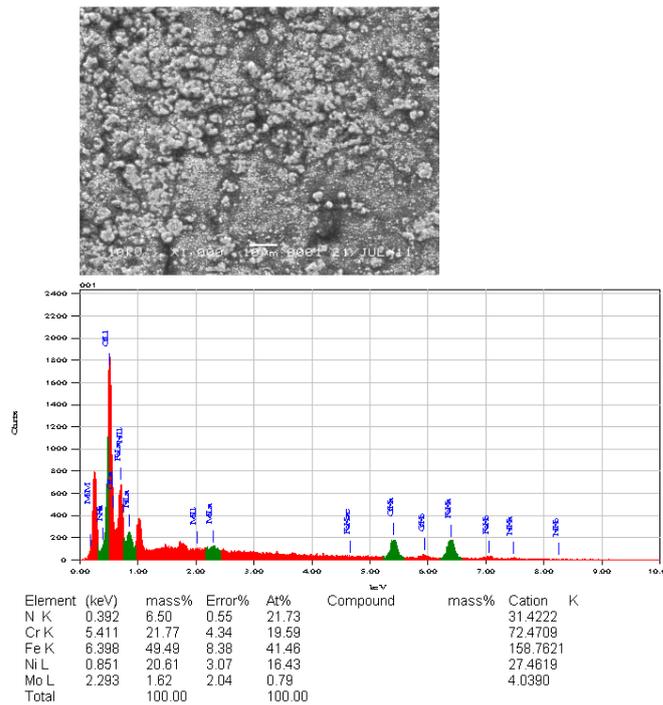
nitridasi ion. Pada Gambar 2 ditampilkan mikrograf SEM-EDAX cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion untuk variasi suhu nitridasi 350, 500 dan 550 °C pada tekanan gas nitrogen dan waktu nitridasi optimum masing-masing adalah 1,8 mbar dan 3 jam. Berdasarkan Gambar 2 tersebut dapat diketahui bahwa besarnya kandungan nitrogen yang terdepositkan pada permukaan cuplikan SS 316L dipengaruhi oleh suhu nitridasi ion. Pada suhu nitridasi yang semakin tinggi persentase atom nitrogen semakin naik, persentase atom krom relatif tetap dan persentase atom besi semakin menurun. Pada suhu nitridasi di bawah 400 °C akan terbentuk fase austenit tereksansi  $\gamma_N$ , dan pada suhu yang lebih tinggi akan terbentuk fase  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N,  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>3N dan CrN<sup>(1,7,9)</sup>, sedangkan pada suhu di atas 500 °C terjadi presipitasi nitrida krom yang mengakibatkan terjadinya degradasi ketahanan korosi SS 316L<sup>(4,9,14,16)</sup>. Untuk menentukan struktur fase nitrida yang terbentuk pada permukaan cuplikan SS 316L tersebut digunakan teknik XRD.



(a)



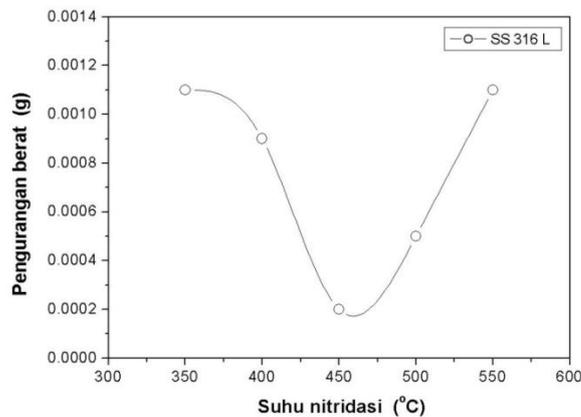
(b)



(c)

Gambar 2. Mikrograf SEM-EDAX cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion untuk variasi suhu nitridasi, pada tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam, (a) suhu 350 °C, (b) suhu 500 °C dan (c) suhu 550 °C.

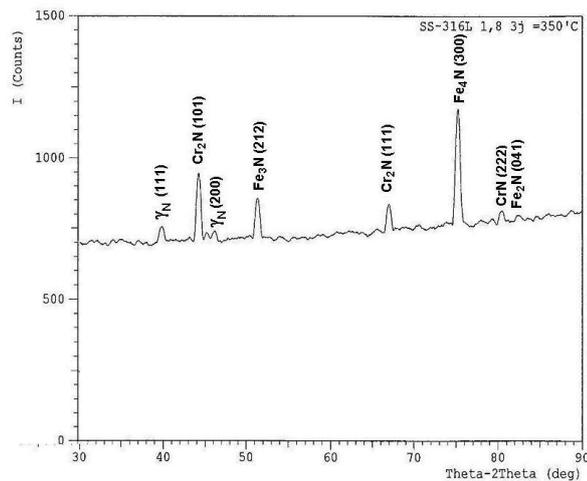
Keausan merupakan peristiwa gesekan dan pelepasan partikel-partikel metal dari permukaannya yang disebabkan oleh metal atau logam lainnya, bahan non metal, cairan atau gas yang bergerak. Dalam penelitian ini ketahanan aus ditentukan menggunakan alat uji aus yang berdasarkan pada jumlah material cuplikan yang terauskan, yaitu massa per satuan waktu pengausan. Berat beban pengaus adalah 319,376 gram dan waktu pengausan selama 15 menit. Berdasarkan Gambar 3 dapat diketahui bahwa cuplikan SS 316L mengalami pengurangan berat optimum sebesar 0,2 mg atau terjadi peningkatan ketahanan aus optimum sekitar 14,5 kali dibandingkan dengan cuplikan standar, pada suhu nitridasi optimum 450 °C, dan tekanan gas nitrogen dan waktu nitridasi optimum masing-masing 1,8 mbar dan 3 jam; sedangkan pada suhu nitridasi 400 dan 350 °C masing-masing masih terjadi peningkatan ketahanan aus sekitar 3,2 kali dan 2,6 kali terhadap cuplikan standar. Peningkatan ketahanan aus tersebut terutama akibat terbentuknya lapisan senyawa yang sangat keras pada permukaan cuplikan yang ternitridasi ion, seperti yang telah dijelaskan di atas.



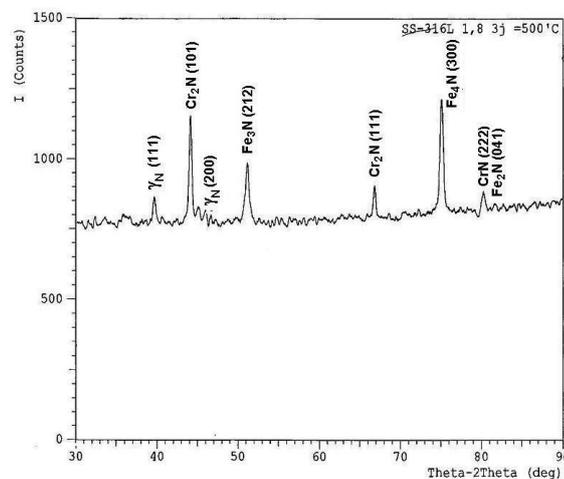
Gambar 3. Grafik ketahanan aus cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion untuk variasi suhu nitridasi, pada tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam.

Untuk mengetahui struktur fase lapisan nitrida besi yang terbentuk pada permukaan cuplikan SS 316L dilakukan dengan menggunakan teknik XRD. Gambar 4 menampilkan pola difraksi cuplikan SS 316L setelah proses nitridasi ion pada suhu nitridasi 350, 500 dan 550 °C. Berdasarkan informasi sudut hamburan, intensitas dan jarak antar bidang, setelah dicocokkan dengan data JCPDS (*Joint Comittee Powder on Diffraction Standards*), pola difraksi cuplikan SS 316L sesudah proses nitridasi menghasilkan puncak-puncak  $\gamma_N(111)$ ,  $Cr_2N(101)$ ,  $\gamma_N(200)$ ,  $\epsilon-Fe_3N(212)$ ,  $Cr_2N(111)$ ,  $\gamma'-Fe_4N(300)$ ,  $CrN(222)$  dan  $\epsilon-Fe_2N(041)$ ; masing-masing dengan jarak antar-bidang 2,26671 Å, 2,05039 Å, 1,96968 Å, 1,78103 Å, 1,39812 Å, 1,26402 Å, 1,19391 Å dan 1,16590 Å pada sudut difraksi ( $2\theta$ ) 39,733°, 44,133°, 46,043°, 51,253°, 66,865°, 75,093°, 80,360° dan 82,705°. Gambar 4(a) memperlihatkan bahwa pada suhu nitridasi rendah tidak hanya fase austenit tereksipansi  $\gamma_N$  yang terbentuk, tetapi juga diperoleh nitrida besi  $\epsilon-Fe_{2-3}N$ ,  $\gamma'-Fe_4N$  dan nitrida krom  $CrN$  dan  $Cr_2N$ . Pada Gambar 4(b) dan 4(c) untuk suhu nitridasi 500 dan 550 °C, memperlihatkan bahwa intensitas fase austenit tereksipansi  $\gamma_N$  menurun dan intensitas fase nitrida krom  $CrN$  dan  $Cr_2N$  meningkat; karena pada suhu nitridasi di atas 450 °C memberikan peningkatan mobilitas unsur krom sehingga memungkinkan terjadinya presipitasi nitrida krom dalam lapisan yang ternitridasi, dan mengakibatkan degradasi ketahanan korosi cuplikan SS 316L.

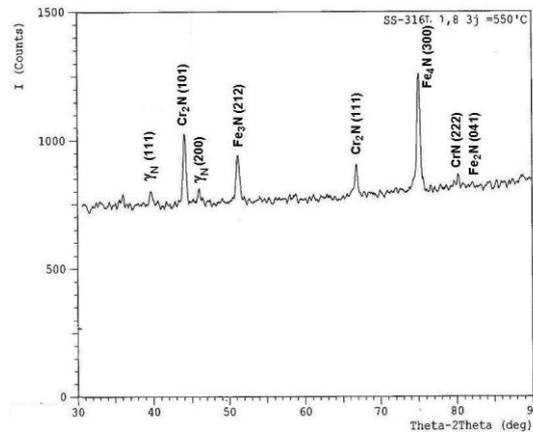
Fase austenit tereksipansi  $\gamma_N$  yang terbentuk pada nitridasi suhu rendah adalah fase metastabil paduan besi superjenuh dengan nitrogen dan dicirikan oleh pola difraksi sinar-X dengan puncak lebih lebar yang terdislokasi ke kiri relatif terhadap pola difraksi matriks austenitik standar dari stainless steel austenitik; hal ini disebabkan ekspansi konstante kisi yang disebabkan oleh penyisipan nitrogen<sup>(1,4,17)</sup>. Lapisan larutan padat interstisi ini memiliki sifat-sifat yang sangat keras atau mempunyai ketahanan keausan yang tinggi dan ketahanan korosi yang baik.



(a)



(b)

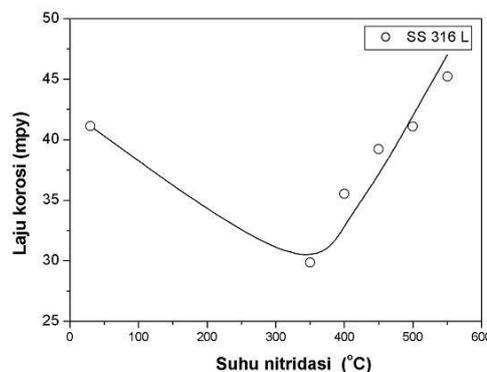


(c)

Gambar 4. Pola difraksi cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion untuk (a) suhu nitridasi 350 °C, (b) suhu nitridasi 500 °C dan (c) suhu nitridasi 550 °C pada tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam.

Hasil serupa juga didapatkan oleh N. Mingolo dkk.<sup>(17)</sup>, dimana mereka melakukan nitridasi AISI 316L dalam campuran 75%  $N_2$ /25%  $H_2$  pada suhu nitridasi 400-550 °C. Pada suhu nitridasi 400 °C selain diperoleh fase austenit tereksansi  $\gamma_N$  juga diperoleh nitrida besi  $\epsilon$ - $Fe_3N$  dan  $\gamma'$ - $Fe_4N$ , serta nitrida krom  $Cr_2N$ ; sedangkan selama nitridasi pada suhu 550 °C terjadi presipitasi nitrida secara intensif, meskipun fase  $\gamma_N$  juga terdeteksi. Selain itu, F.C. Nascimento dkk.<sup>(7)</sup> juga memperoleh hasil yang serupa, nitridasi ion pada suhu 300 °C dihasilkan austenit tereksansi  $\gamma_N$  sebagai fase yang paling dominan, pada suhu nitridasi 400 °C selain dihasilkan fase  $\gamma_N$  juga diperoleh fase  $\epsilon$ - $Fe_{2+x}N$ ,  $\gamma'$ - $Fe_4N$  dan CrN; sedangkan pada suhu nitridasi 500 °C hanya dihasilkan fase nitrida besi  $\epsilon$ - $Fe_{2+x}N$ ,  $\gamma'$ - $Fe_4N$  dan nitrida krom CrN.

Seperti telah dibahas di atas, pada permukaan cuplikan SS 316L terbentuk fase  $\gamma_N$  yang mempunyai sifat istimewa, yaitu mempunyai kekerasan tinggi dan ketahanan korosi sangat baik; oleh karena itu pada penelitian ini juga dilakukan uji korosi untuk mengetahui ketahanan korosinya. Uji ketahanan korosi cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion dilakukan dengan menggunakan larutan Hanks yang disimulasikan mirip dengan cairan tubuh manusia. Larutan Hanks dibuat dari bahan-bahan kimia yang terdiri dari: NaCl 8,0 g/l,  $CaCl_2$  0,14 g/l, KCl 0,4 g/l,  $NaHCO_3$  0,35 g/l, glukosa 1,0 g/l,  $NaH_2PO_4$  0,1 g/l,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  0,1 g/l,  $Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$  0,06 g/l,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  0,06 g/l. Pengukuran laju korosi dilakukan menggunakan potensiostat PGS-201T, menghasilkan kurva potensial vs log intensitas rapat arus korosi. Berdasarkan kurva tersebut diperoleh data intensitas rapat arus korosi cuplikan SS 316L untuk variasi suhu nitridasi 350 - 550 °C. Besarnya laju korosi cuplikan terutama sebagai fungsi intensitas rapat arus korosi, dan juga berat ekuivalen, kerapatan dan luas cuplikan. Oleh karena itu dengan menggunakan data-data intensitas rapat arus korosi untuk variasi suhu nitridasi 350 – 550 °C yang diperoleh dapat ditentukan laju korosi cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion, seperti ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik laju korosi sebagai fungsi suhu nitridasi dari cuplikan SS 316L hasil nitridasi ion pada tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam.

Berdasarkan Gambar 5 tersebut diketahui bahwa laju korosi optimum cuplikan SS 316L sebesar 29,866 mpy pada suhu nitridasi 350 °C atau meningkat 137%, dan pada suhu tersebut juga terjadi peningkatan ketahanan aus 2,6 kali jika dibandingkan dengan cuplikan standar. Hal ini terjadi terutama karena pada permukaan cuplikan terbentuk fase austenit tereksansi  $\gamma_N$ .

Pada suhu nitridasi yang lebih tinggi dari 350 °C cenderung terjadi presipitasi atau pengendapan nitrida krom (CrN dan Cr<sub>2</sub>N) yang hadir bersama struktur fase Fe<sub>3</sub>N dan Fe<sub>4</sub>N. Terjadinya presipitasi nitrida krom tersebut selama proses nitridasi ion menyebabkan penurunan ketahanan korosi atau peningkatan laju korosi permukaan cuplikan SS 316L, hal ini akibat pengurangan kandungan krom bebas yang tersedia dalam matriks stainless steel untuk pembentukan lapisan permukaan protektif<sup>(2,10,15)</sup>. Pada suhu nitridasi rendah di bawah 450 °C akan memberikan mobilitas unsur krom cukup rendah untuk menghindari presipitasi nitrida krom pada lapisan permukaan cuplikan yang ternitridasi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut di atas dapat diambil kesimpulan sebagai berikut. Perlakuan permukaan cuplikan SS 316L menggunakan teknik nitridasi ion yang dilakukan pada rentang suhu 350-550 °C, tekanan gas nitrogen optimum 1,8 mbar dan waktu nitridasi optimum 3 jam dapat menghasilkan lapisan permukaan ternitridasi yang terdiri dari struktur fase austenit tereksansi  $\gamma_N$ , nitrida besi dan nitrida krom. Pada suhu nitridasi rendah hingga 350 °C terbentuk struktur fase austenit tereksansi  $\gamma_N$  dan fase  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N yang lebih dominan selain juga terbentuk fase  $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N dan fase nitrida krom CrN dan Cr<sub>2</sub>N. Ketika suhu nitridasi dinaikkan hingga suhu 550 °C, selain masih dihasilkan fase  $\gamma_N$ ,  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>N dan CrN dengan jumlah atau intensitas yang kecil juga diperoleh fase  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N,  $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N dengan intensitas meningkat dan presipitasi Cr<sub>2</sub>N dalam intensitas yang cukup besar. Fase austenit tereksansi  $\gamma_N$  atau fase nitrogen superjenuh ini memiliki sifat kekerasan atau ketahanan aus yang tinggi dan ketahanan korosi sangat baik. Berdasarkan uji keausan diperoleh peningkatan ketahanan aus sekitar 2,6 kali untuk suhu nitridasi ion 350 °C; dan pada suhu nitridasi tersebut dari uji ketahanan korosi dalam larutan Hanks memperlihatkan bahwa ketahanan korosinya optimum, dan mengalami penurunan ketika suhu nitridasi dinaikkan; hal ini terjadi karena terbentuknya presipitasi nitrida krom pada lapisan permukaan yang ternitridasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini sepenuhnya dibiayai dari Program Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa (PIPKPP) Tahun 2011, Kantor Kementerian Riset dan Teknologi. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada BATAN dan Kementerian Riset dan Teknologi yang telah menyetujui dan membiayai kegiatan penelitian yang kami lakukan, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

1. F.A.P. FERNANDES, S.C. HECK, R.G. PEREIRA, A. LOMBARDI-NETO, G.E. TOTTEN and L.C. CASTELETTI, *Journal Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 40, Issue 2, (2010) 175-179
2. M. DROUET, J.C. STINVILLE, P. VILLECHAISE, J.P. RIVIERE, and C. TEMPLIER, *Eur. Phys. Appl. Phys.* **43**, (2008) 349-351
3. A. NISHIMOTO, K. AKAMATSU, *Plasma Processes and Polymers*, **6** (2009) S306-S309
4. F. BORGIOLO, A. FOSSATI, E. GALVANETTO, T. BACCI, *Surface & Coatings Technology* **200** (2005) 2474-2480
5. L. WANG, Y. LI, Y. WANG, *Key Engineering Materials* **373-374** (2008) 308-311
6. J. BARANOWSKA, *Advances In Manufacturing Science and Technology*, Vol. 32, No. 1, (2008) 59-68
7. F.C. NASCIMENTO, C.M. LEPIENSKI, C.E. FOERSTER, A. ASSMANN, S.L.R. DA SILVA, C.J. DE M. SIQUEIRA, A.L. CHINELATTO, *J. Mater. Sci.* **44** (2009) 1045-1053
8. K. SHETTY, S. KUMAR and P.R. RAO, *Journal of Physics: Conference Series* **100** (2008) 1-6

9. SUDJATMOKO, WIRJOADI, B. SISWANTO, SUHARNI, T. SUJITNO, *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, Volume 13, Nomor 2 (2010) 93-100
10. R.R.M. DE SOUSA, F.O. DE ARAUJO, J.A.P. DA COSTA, T. DUMELow, R.S. DE OLIVEIRA, C. ALVES, Jr., *Vacuum* **83** (2009) 1402-1405
11. S. H. AHN and I. LEE, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 3, (2008) 356-358
12. E.A. OCHOA, C.A. FIGUEROA, and F. ALVAREZ, *Surface and Coating Technology*, Volume 200, Issue 7, (2005) 2165-2169
13. S.R. HOSSEINI and F. ASHRAFIZADEH, *International Journal of ISSI*, Vol. 5, No. 2, (2008) 29-35
14. J.C. DIAZ-GUILLEN, A. CAMPA-CASTILLA, S.I. PEREZ-AGUILAR, E.E. GRANDA-GUTIERREZ, A. GARZA-GOMEZ, J. CANDELAS-RAMIREZ, R. MENDEZ-MENDEZ, *Effect of duty cycle on surface properties of AISI 4340 using a pulsed plasma nitriding process*, *Superficies y Vacio*, **22(1)** (2009) 1-4
15. Y.T. XI, D.X. LIU, D. HAN and Z.F. HAN, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, Vol. 21, No. 1 (2008) 21-29
16. S.Y. SIRIN, K. SIRIN, E. KALUC, *Materials Characterization* **59** (2008) 351-358
17. N. MINGOLO, A.P. TSCHIPTSCHIN, C.E. PINEDO, *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 4215-4218