

## DEPOSISI AL DAN NITRIDASI PADA BAHAN COR-TEN UNTUK MENINGKATKAN KEKERASAN DAN KETAHANAN KOROSI SUHU TINGGI

Wagiyo H.<sup>1</sup>, Ari H.<sup>1</sup> dan Syahril<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

<sup>2</sup>Pusat Kemitraan Teknologi Nuklir (PKTN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**DEPOSISI AL DAN NITRIDASI BAHAN COR-TEN UNTUK MENINGKATKAN KEKERASAN DAN KETAHANAN KOROSI PADA SUHU TINGGI.** Telah dilakukan deposisi lapisan tipis aluminium dan nitridasi terhadap bahan *Cor-Ten Steel* yang dilanjutkan dengan uji korosi suhu tinggi (oksidasi). Nitridasi dilakukan dengan menggunakan tungku yang dialiri gas N<sub>2</sub> dan NH<sub>3</sub> cair pada suhu 550 °C, selama 3 jam, 5 jam, 7 jam dan 20 jam, kemudian uji korosi dengan menggunakan alat *Thermal Gravimetry Analysis/Magnetic Suspension Balance (TGA/MSB)* selama 50 jam pada suhu 650 °C. Setelah dioksidasi sampel dikarakterisasi struktur kristalnya menggunakan alat *X-Ray Diffractometer (XRD)*, strukturmikro menggunakan alat *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan kekerasannya menggunakan alat *Micro Hardness Tester*. Hasil uji korosi suhu tinggi menunjukkan bahwa, sampel yang laju oksidasinya paling kecil atau ketahanan korosinya tinggi adalah yang dinitridasi selama 5 jam, dengan lapisan tipis aluminium menunjukkan lapisan pelindung berupa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sedang hasil uji kekerasan bahan *Cor-Ten* menunjukkan peningkatan, kekerasan sesudah dinitridasi menjadi dua kali lipat yaitu dari 137 VHN menjadi 340 VHN. Kekerasan setelah dideposisi Al dan nitridasi selama 5 jam meningkat tajam lebih dari empat kali lipat yaitu sebesar 744 VHN, hal ini disebabkan karena terbentuknya aluminium nitrida (AlN) yang keras.

**Kata kunci :** Deposisi Al, Ketahanan korosi *Cor-Ten*, Nitridasi, *TGA/MSB*, *XRD*, *SEM*

### ABSTRACT

**AL DEPOSITION AND NITRIDATION TREATMENT OF COR-TEN STEEL TO IMPROVE HARDNESS AND HIGH-TEMPERATURE CORROSION RESISTANCE.** Samples of *Cor-Ten* steels have been subjected to surface treatment, by coating Al and followed by nitridation. High-temperature corrosion tests were then carried out using a Thermo Gravimetry Analysis called Magnetic Suspension Balance. The Nitridation process was performed at 550 °C for 3, 5, 4, 7 and 20 hours under flowing N<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> gases. Corrosion tests were performed for 50 hours at 650 °C, followed by a characterization using X-Ray Diffractometer (XRD) to determine the crystal structure, and using Scanning Electron Microscope (SEM) for observing microstructure and the hardness of the alloys the using Micro Hardness Tester. It appears that sample nitridized for 5 hours, show the lowest corrosion rate or highest corrosion resistance, due to the corrosion barrier was Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> protective layer. The both hardness of *Cor-Ten* increases from 137 VHN to 340VHN (after nitridation) and to 744 VHN after Al deposition and nitridation for 5 hours. The increase of Hardnessivity might be associated with the formation of nitride aluminium.

**Key words :** Al Deposition, Corrosion resistant of *Cor-Ten* Steel, Nitridation, *TGA/MSB*, *XRD*, *SEM*

### PENDAHULUAN

Korosi merupakan proses alam yang banyak ditemui dalam kehidupan sehari-hari, yang selalu menjadi masalah dan tidak dapat dihindari. Akan tetapi hal ini dapat dikurangi seminimal mungkin bila para ahli, khususnya ahli desain teknik memahami penyebab terjadinya korosi dan cara penanggulangannya.

Oleh karena itu korosi merupakan hal yang menarik untuk diteliti dan didiskusikan karena dampak yang ditimbulkan dapat menyebabkan kerugian baik secara langsung seperti pada saat perbaikan atau penggantian komponen yang terkorosi, maupun tidak langsung misalnya, pencemaran lingkungan yang dapat menjadi

beban bagi kehidupan manusia dan dapat juga memboroskan sumber daya alam [1,2].

Pengujian korosi pada suhu tinggi sangat bermanfaat dalam bidang teknik nuklir seperti pada pengujian komponen reaktor [3], komponen pemanas insenerator untuk pengeringan limbah, pengilangan minyak, pabrik petrokimia, *furnace* (tungku) dan turbin mesin. Tingkat korosi suhu tinggi terutama ditentukan oleh laju reaksi antara unsur-unsur logam pada paduan dengan gas yang ada pada lingkungannya seperti O, C, N, H, S dan Cl. Reaksi terjadi dengan cara unsur-unsur logam yang keluar ke permukaan bereaksi dengan gas, atau dengan cara gas-gas masuk ke dalam logam bereaksi dengan unsur-unsur logam. Ketahanan korosi pada suhu tinggi ditentukan oleh kadar unsur-unsur logam pada paduan yang dapat membentuk kerak oksida dan sifat fisiknya yang stabil. Untuk itu dilakukan disain bahan-bahan yang tahan terhadap korosi suhu tinggi, seperti pembuatan bahan *super alloy* atau dengan penciptaan lapisan kerak oksida khrom yang oksidasinya cepat dan atau kerak oksida aluminium (alumina) yang kerak oksidanya rapat [2,3].

Pemilihan bahan untuk operasi suhu tinggi merupakan tantangan bagi para ahli iptek bahan, ahli mesin dan ahli kimia. Kecenderungan inovasi proses yang makin kompleks membuat makin sulit dalam pemilihan bahan untuk mengakomodasinya. Pada masa yang akan datang beberapa perubahan di dalam pemakaian bahan harus diantisipasi dan sangat diperlukan paduan tahan panas yang kuat ketahanan mekaniknya maupun ketahanan korosinya.

Ketahanan bahan terhadap korosi suhu tinggi hanya tergantung pada kestabilan kerak oksida yang terbentuk dan tidak *porous* serta melekat kuat pada paduannya. Untuk itu dapat dilakukan dengan pelapisan dan atau nitridasi [1,4].

Untuk waktu nitridasi yang lama, bahan *stainless steels* kurang menguntungkan, karena terjadinya karbida krom yang menyebabkan defisiensi krom. Pada umumnya nitridasi pada baja paduan rendah waktunya dari 10 jam hingga 130 jam [5].

Penelitian ini bertujuan untuk mencari parameter proses nitridasi bahan *Cor-Ten* yang dilapis Al kemudian dinitridasi, diharapkan dapat meningkatkan ketahanan korosi pada suhu tinggi. Bahan *Cor-Ten* banyak dipakai pada komponen pengambil panas pada pembangkit daya (PLTU dan PLTG). Bahan pelapis Al pada substrat *Cor-Ten* ini selain dapat membentuk lapis lindung oksida aluminium yang kuat pada komponen insenerator, juga lapisan ini mempunyai daya hantar panas yang baik. Hal ini sangat menguntungkan dalam aplikasinya sebagai komponen pengambil panas pada instalasi pembangkit daya. Pada bahan *Cor-Ten* dipilih suhu oksidasi 650 °C, selain untuk mengakselerasi terjadinya korosi sewaktu pengujian, bahan tersebut juga banyak digunakan untuk cerobong asap [6]. Pada waktu dipakai untuk *casing*, bagian dalam dari insenerator /tungku yang beroperasi

pada suhu 1300 °C, bisa mencapai 650 °C, sehingga suhu oksidasi tersebut mendekati suhu riil di lapangan.

Untuk mengetahui ketahanan korosi pada suhu tinggi, sampel *Cor-Ten* yang telah dilapis Al dan dinitridasi, diuji dengan alat *TGA/MSB*. Hasil oksidasi ini dapat diketahui dengan adanya pertambahan massa pada sampel, yang terekam pada komputer dan didukung data karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *X-Ray Diffractometer (XRD)* dan *Micro Hardness Tester*.

## TEORI

### Pengertian Korosi

Di alam hampir semua benda padat mengalami korosi, perbedaannya adalah material tertentu dapat lebih tahan terhadap korosi, sementara yang lain tidak. Kecepatan terjadinya korosi juga sangat tergantung dari media korosi, suhu, lingkungan seperti kelembaban kritis, jumlah zat pencemar di udara, arah dan kecepatan angin, radiasi matahari dan jumlah curah hujan. Masing-masing material memiliki kelebihan dan kelemahan terhadap jenis-jenis korosi tertentu. Cara yang terbaik untuk mencegah terjadinya korosi adalah dengan menciptakan keadaan yang dapat menetralkan terjadinya proses korosi, misalnya dengan menggunakan bahan pelapis permukaan yang anti terhadap salah satu jenis korosi atau menggunakan bahan yang tahan terhadap jenis korosi tertentu.

Rata-rata laju korosi statik pada suhu tinggi ditunjukkan dengan perubahan massa per satuan luas yang dinyatakan oleh persamaan (1) [7].

$$\Delta m = (W_F - W_0) / A \quad \dots\dots\dots (1)$$

dimana

- $\Delta m$  = perubahan massa per satuan luas (g/m<sup>2</sup>)
- $W_F$  = massa setelah dioksidasi (g)
- $W_0$  = massa sebelum dioksidasi (g)
- $A$  = luas permukaan sebelum dioksidasi (m<sup>2</sup>)

Bila dibuat kurva hubungan antara perubahan massa persatuan luas terhadap waktu oksidasi, untuk bahan yang mempunyai ketahanan korosi pada temperatur tinggi, karena dipermukaannya mempunyai lapis lindung yang kuat dan stabil biasanya kurvanya berbentuk parabolik, persamaan parabolik standar dapat dituliskan [8]:

$$\Delta m = (k_p t)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana

- $\Delta m$  = perubahan massa per satuan luas (g/m<sup>2</sup>)
- $k_p$  = konstanta parabolik (g<sup>2</sup>m<sup>-4</sup>s<sup>-1</sup>)
- $t$  = lama oksidasi (s)

Sedang bahan yang tidak tahan korosi suhu tinggi kurvanya cenderung linier.

## Nitridasi pada Logam

Nitridasi adalah proses berdifusinya atom N pada substrat logam sehingga terbentuk nitrida. Nitridasi bisa dilakukan dengan menggunakan gas  $N_2$ , ammonia cair atau gas, bisa juga gas  $N_2$  dicampur dengan ammonia. Pembentukan lapisan nitrida, misalnya  $Fe_2N$  dan  $AlN$  terjadi pada suhu antara  $500\text{ }^\circ\text{C}$  hingga  $590\text{ }^\circ\text{C}$ . Molekul nitrogen terbentuk dari disosiasi ammonia, menjadi tiga bagian  $H_2$  dan satu bagian  $N_2$ . Molekul nitrogen ini dapat menjadi nitridan yang baik bila suhunya tinggi, karena pada suhu tinggi energi geraknya juga tinggi [10].

Suatu susunan atom logam yang berbentuk kristal bila ditambahkan atom asing lain yang berbeda ukurannya dapat menimbulkan distorsi kisi baru, disamping distorsi kisi yang telah ada. Penambahan atom asing ini dapat dilakukan dengan memanaskan logam yang akan menyebabkan atom-atom logam bervibrasi sehingga mudah dimasuki atom asing atau atom asing tersebut diberi tenaga dengan medan listrik yang disisipkan pada susunan atom logam. Distorsi kisi tersebut akan menimbulkan regangan kisi (*lattice strain*) yang akan mempersulit pergerakan dislokasi, sehingga diperlukan gaya yang lebih besar untuk menggerakkan atom dalam kristal. Karena dislokasi tidak mudah bergerak, sehingga bahan akan meningkat kekuatan dan kekerasannya.

## METODE PERCOBAAN

### Preparasi Sampel

Sampel *Cor-Ten Steel* berbentuk lempeng dengan ukuran panjang dan lebar  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , tebal 2,9 mm. Untuk mendapatkan permukaan yang halus maka sampel diampelas dengan mesin *grinding* dari *grit* 80, 120, 400, 600, 1000 dan 1500. Sebelum proses pelapisan dan nitridasi.

### Proses Deposisi Lapisan Al

Proses deposisi lapisan Al pada substrat *Cor-Ten* dilakukan menggunakan teknik menguapkan bahan target (*Physical Vapor Deposition*). Proses pelapisan terjadi dalam ruang hampa dengan tekanan sekitar  $1 \times 10^{-6}$  torr [9]. Alat *PVD* yang digunakan dalam percobaan ini merek *Varian* yang berada di PTBIN. Bahan Al dalam kondisi tersebut mempunyai titik uap 1085 K.

Proses pelapisan dengan teknik *PVD* terlebih dahulu substrat diletakkan pada tempat substrat, target berupa aluminium padatan murni diletakkan pada *crucible* (tempat target), setelah itu tabung divakumkan minimal sampai  $5,4 \times 10^{-6}$  torr. Target diuapkan dengan cara menembakkan berkas elektron hingga mencapai suhu penguapan, kemudian uap dari target ditangkap oleh substrat sehingga menempel pada permukaan substrat. Kondensasi dari uap pada substrat akan menghasilkan lapisan tipis Al.

Ketebalan lapisan tipis yang terbentuk pada substrat dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya jarak, posisi relatif substrat terhadap target dan waktu deposisi. Pelapisan dilakukan pada jarak 145 mm dari target selama 30 menit. Setelah dideposisi sampel *Cor-Ten* dilakukan nitridasi, sedang komposisi *Cor-Ten* seperti ditunjukkan Tabel 1

Tabel 1. Komposisi kimia sampel *Cor-Ten*.

No.	Komposisi Kimia	(% berat)
1.	C	0,0943
2.	S mak	0,0047
3.	Pmak	0,0903
4.	Si	0,4466
5.	Al	0,0442
6.	Mn	0,3159
7.	Cu	0,3184
8.	Ni	0,1923
9.	V	0,0081
10.	Cr	0,9075
11.	Fe	sisanya

\*Hasil Analisis AAS Laboratorium Uji Material PT Krakatau Steel.

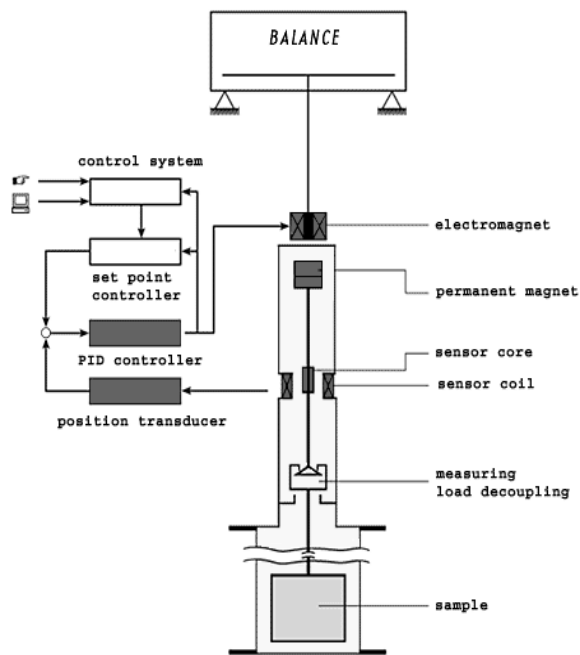
## Proses Nitridasi

Nitridasi dilakukan dengan menggunakan gas  $N_2$  dan  $NH_3$  cair, bisa juga gas  $N_2$  dicampur dengan  $NH_3$ . Pembentukan lapisan nitrida ( $Fe_2N$ ) terjadi pada suhu antara  $500\text{ }^\circ\text{C}$  sampai  $590\text{ }^\circ\text{C}$ . Molekul  $N_2$  terbentuk dari disosiasi  $NH_3$ , menjadi tiga bagian  $H_2$  dan satu bagian  $N_2$ . Molekul  $N_2$  ini dapat menjadi nitridan yang baik bila suhunya tinggi, dengan demikian energi geraknya juga tinggi.

Proses nitridasi dilakukan dengan cara mengalirkan gas  $N_2$  ke dalam *elenmeyer* yang berisi  $NH_3$  cair, campuran antara gas  $N_2$  dan uap  $NH_3$  kemudian dialirkan ke dalam tungku yang berisi sampel yang telah dideposisi Al. Suhu tungku diset pada  $550\text{ }^\circ\text{C}$  dengan lama nitridasinya 3 jam, 5 jam, 7 jam dan 20 jam. Untuk mengurangi bau amoniak selama proses nitridasi dilakukan pencelupan ujung keluaran selang ke dalam bak yang berisi air.

## Pengujian Korosi Suhu Tinggi dan Karakterisasi Bahan

Pengujian korosi dilakukan dengan menggunakan peralatan *Thermal Gravimetry Analysis /Magnetic Suspension Balance (TGA/MSB)* merek *Rubotherm Präzisionsmesstechnik GmbH*, yang berkerja berdasarkan perubahan massa [11]. Alat ini mempunyai kelebihan bila dibandingkan dengan peralatan termal gravimetri lainnya karena metode penimbangan pada alat ini menggunakan suspensi magnetik, dimana sampel yang di timbang tidak kontak langsung dengan



Gambar 1. Skema alat TGA/MSB [11].

timbangannya. Besar kecilnya sampel akan berpengaruh pada besar kecilnya medan elektromagnet yang dihasilkan dan akan berpengaruh pada jarak magnet permanen.

Dengan kondisi demikian maka memungkinkan untuk menimbang dalam kondisi, atmosferik, vakum dan bertekanan. Sampel dan timbangan yang terpisah ini akan menguntungkan untuk uji korosi pada suhu dan tekanan yang tinggi atau media yang korosif dalam waktu yang lama, karena timbangan tidak ikut terkorosi. Berat sampel maksimal untuk timbangan ini adalah 25 g, suhu maksimalnya 1100 °C dan resolusinya sebesar 10 µg. Pengujian ketahanan korosi dengan TGA/MSB ini dilakukan selama 50 jam dengan suhu 650 °C untuk sampel Cor-Ten.

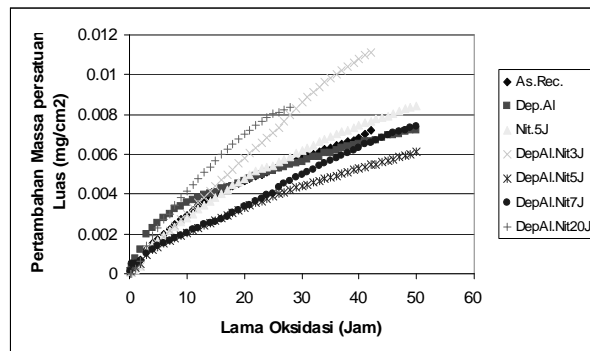
Sampel yang telah diuji korosi selanjutnya dikarakterisasi struktur kristal dengan XRD dan strukturmikro menggunakan SEM, sedangkan untuk mengetahui kekerasan bahan Cor-Ten sebelum dan sesudah perlakuan, kekerasannya diukur dengan Micro Hardness Tester

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Oksidasi Suhu Tinggi Bahan Cor-Ten

Data pertambahan massa hasil oksidasi sampel Cor-Ten pada suhu tetap 650 °C, yang di set selama 50 jam menggunakan alat TGA/MSB, dihitung menggunakan rumus (1) Namun dalam pelaksanaannya ada gangguan listrik mati sehingga untuk sampel *as received*, dan DepAl.Nit3j alat mati setelah 42 jam, sedang untuk sampel DepAl.Nit20j alat mati setelah

28 jam. Kemudian dari hasil perhitungan dibuat kurvanya seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dari Gambar 2 sampel yang dideposisi Al kecepatan oksidasinya lebih kecil bila dibandingkan dengan sampel *as received*, hal ini disebabkan karena pada sampel yang dideposisi Al dipermukaan terbentuk lapis lindung berupa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dapat menghambat proses korosi selanjutnya.



Gambar 2. Kurva hasil oksidasi bahan Cor-Ten pada 650 °C yang dilapisi Al dan nitridasi 550 °C.

Sedang pada sampel yang dinitridasi selama 5 jam pada 550 °C, kecepatan oksidasinya lebih besar dari pada sampel *as received*, hal ini disebabkan karena pada proses awal nitridasi atom nitrogen larut padat pada kisi BCC (Ferit), yang dapat menimbulkan distorsi kisi sehingga menyebabkan bahan tidak tahan terhadap korosi, begitu juga dengan sampel yang dilapisi Al dan dinitridasi selama 3 jam.

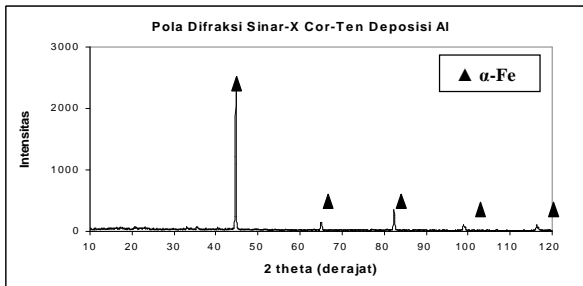
Pada sampel yang dideposisi Al dan dinitridasi selama 5 jam pada 550 °C, perubahan massa persatuan luasnya paling rendah, ini berarti bahan tersebut kecepatan oksidasinya rendah, sehingga ketahanan korosi paling baik. Hal ini dimungkinkan karena sebagian aluminium nitrida pada permukaan sampel selama proses oksidasi akan bereaksi dengan oksigen, membentuk lapisan pelindung Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang menghambat terjadinya oksidasi dan melindungi logam dari korosi selanjutnya. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> merupakan oksida logam yang sangat baik untuk melindungi korosi pada suhu tinggi.

Pada sampel yang dideposisi Al dan dinitridasi selama 7 jam pada 550 °C, kecepatan oksidasi masih lebih baik dari pada sampel *as received*, sedang pada sampel yang dideposisi Al dan dinitridasi selama 20 jam pada 550 °C, kecepatan oksidasi sangat tinggi. Hal ini disebabkan karena semakin lama nitridasi akan terbentuk *white layer* (Fe<sub>3</sub>N) yang bersifat rapuh, sehingga menurunkan ketahanan korosinya.

### Hasil XRD Bahan Cor-Ten

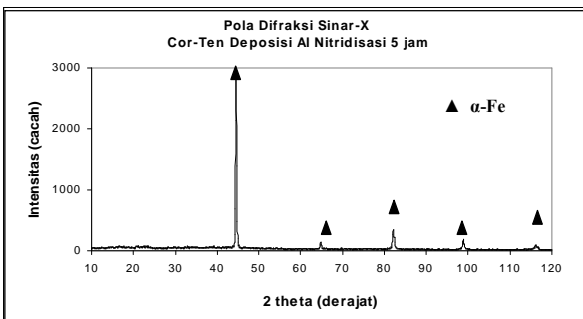
Untuk mengetahui perubahan fasa yang terjadi pada sampel Cor-Ten maka dilakukan pengujian struktur kristal dengan difraksi sinar-X. Hasil pengujian berupa pola difraksi sinar-X pada bahan Cor-Ten setelah

dideposisi Al selama 30 menit dengan teknik PVD, serta setelah deposisi Al dan dinitridasi 5 jam seperti ditampilkan pada Gambar 3, dan Gambar 4. Gambar 3 adalah pola difraksi sinar-X, hasil deposisi Al selama 30 menit. Dari Gambar tersebut tidak terlihat adanya puncak Al, hal ini dimungkinkan karena lapisan Al masih bersifat *amorf* atau masih di bawah batas deteksi alat XRD tersebut.



Gambar 3. Pola difraksi sinar-X sampel Cor-Ten setelah deposisi Al selama 30 menit.

Dari Gambar 4 ditunjukkan pola difraksi Cor-Ten setelah deposisi Al dan dinitridasi 5 jam, ternyata juga tidak terjadi perubahan fasa yang signifikan, pola difraksi yang terbentuk menunjukkan fasa Ferit, tidak tampak fasa nitrida aluminium maupun nitrida besi, hal ini disebabkan karena fraksi nitrida tersebut masih sangat kecil dibandingkan dengan matriksnya sehingga tidak terdeteksi oleh alat.

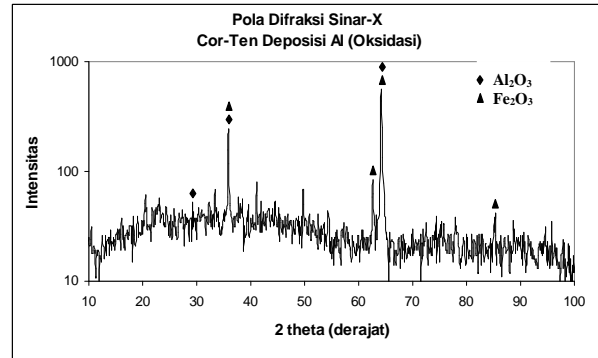


Gambar 4. Pola difraksi sinar-X Cor-Ten deposisi Al nitridasi 5 jam pada 550 °C.

Pola difraksi bahan Cor-Ten setelah dideposisi Al, dioksidasi 50 jam pada 650 °C ditunjukkan pada Gambar 5. Sedangkan sampel yang dideposisi Al, nitridasi 3 jam pada 550 °C, dioksidasi 42 jam pada 650 °C ditunjukkan pada Gambar 6.

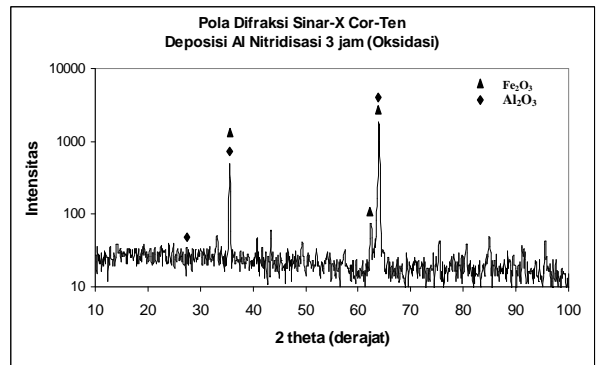
Gambar 5 adalah pola difraksi Cor-Ten yang dideposisi Al dan dioksidasi pada, dari pola difraksi tersebut kelihatan oksida besi yang hampir tumpang tindih dengan oksida aluminium pada kedua puncak yang dominan, yang agak sulit dibedakan.

Namun dari hasil uji komposisi kimia dipermukaan dengan alat EDS menunjukkan adanya kedua unsur logam dari oksida tersebut.



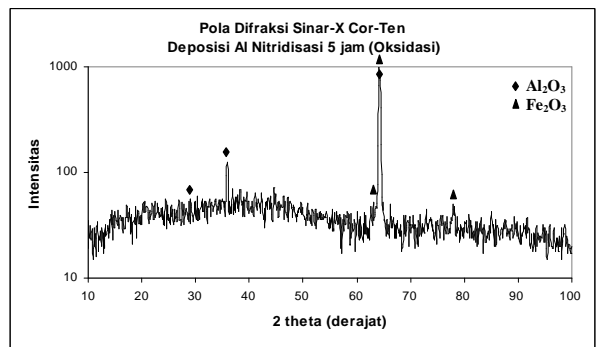
Gambar 5. Pola difraksi sinar-X sampel Cor-Ten deposisi Al, dioksidasi 50 jam pada 650 °C

Gambar 6 pola difraksi sinar-X Cor-Ten deposisi Al nitridasi 3 jam, 550 °C dan dioksidasi 42 jam pada 650 °C. Polanya mirip Gambar 5 yang tanpa nitridasi, disini hanya kelihatan puncak-puncak dari oksida besi ( $Fe_2O_3$ ) dan oksida aluminium ( $Al_2O_3$ ), sedang puncak nitrida belum kelihatan.



Gambar 6. Pola difraksi sinar-X Cor-Ten deposisi Al nitridasi 3 jam, 550 °C dan dioksidasi 42 jam pada 650 °C

Pola difraksi sampel Cor-Ten deposisi Al dan nitridasi 5 jam dan dioksidasi 50 jam pada 650 °C seperti ditunjukkan Gambar 7. Dari Gambar 7 kelihatan pola difraksi hampir sama dengan Gambar 5, hanya intensitas relatifnya yang berbeda, hal ini dikarenakan ketahanan korosinya yang berbeda. Dimana sampel yang dideposisi Al dan dinitridasi selama 5 jam ketahanan korosi paling baik dari pada yang dideposisi Al saja.



Gambar 7. Pola difraksi sinar-X Cor-Ten deposisi Al nitridasi 5 jam, 550 °C dan dioksidasi 50 jam pada 650 °C

## Hasil Pengujian Kekerasan Cor-Ten

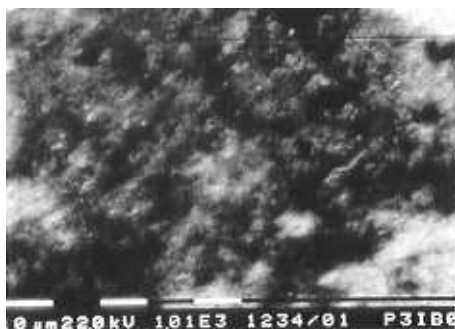
Kekerasan pada sampel *Cor-Ten* sebelum perlakuan (*As received*) dan sesudah perlakuan serta setelah dioksidasi diukur dengan alat uji kekerasan mikro (*Micro Hardness Tester*) dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 terlihat bahan *Cor-Ten* sebelum pelapisan Al (*as received*) kekerasannya sebesar 137,5 VHN, setelah dinitridasi selama 5 jam kekerasannya meningkat dua kali lebih, menjadi 340 VHN. Kekerasan setelah dideposisi Al dan nitridasi selama 5 jam kekerasannya meningkat tajam lebih dari lima kalinya yaitu sebesar 744 VHN, hal ini diduga karena terbentuknya aluminium nitrida (AlN)

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan Vickers.

No	Sampel Cor-Ten	Angka kekerasan Vickers (VHN)
1.	<i>As received</i>	137
2.	Nitridasi 5 jam	340
3.	Deposisi Al dinitridasi 5 jam	744
4.	<i>As received</i> dan telah dioksidasi	340
5.	Deposisi Al dinitridasi 5 jam dan telah dioksidasi	305
6.	Deposisi Al dinitridasi 20 jam dan telah dioksidasi	330

## Hasil Pengamatan Strukturmikro

Hasil pengamatan strukturmikro menggunakan alat SEM seperti ditunjukkan Gambar 8 dan Gambar 9. Gambar 8 menunjukkan strukturmikro permukaan (lapisan oksida) baja *Cor-Ten* setelah proses pelapisan tipis Al dengan teknik PVD, nitridasi selama 5 jam dan oksidasi pada suhu 650 °C selama 50 jam.



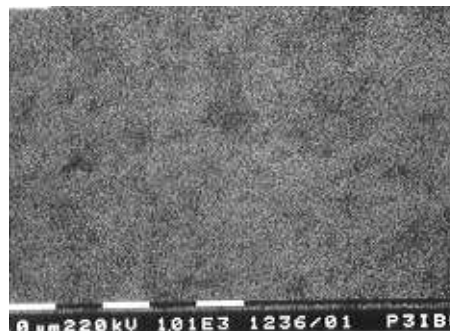
Gambar 8. Strukturmikro permukaan baja *Cor-Ten* pasca deposisi Al, nitridasi dan oksidasi pada 650 °C selama 50 jam citra elektron sekunder.

Dari pengujian komposisi menggunakan *Energy Dispersive Spectrometer (EDS)*, lapisan oksida yang terbentuk mengandung unsur logam (dalam persen berat) 14,20% Al; 0,47% Mn; 2,39% Cu dan 82,95% Fe.

Hal ini konsisten dengan hasil analisis fasa dengan difraksi sinar X yaitu secara dominan fasa yang terbentuk

adalah Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Namun *BSE image* (Gambar 9) tidak menunjukkan kontras fasa yang tegas.

Fenomena ini mengindikasikan bahwa fasa-fasa tersebut kemungkinan besar membentuk lapisan-lapisan (*layers*) yang merata diseluruh permukaan benda uji. Kontras (gelap-terang) yang teramati pada Gambar 9 disebabkan oleh topografi permukaan dan bukan kontras fasa.



Gambar 9. Strukturmikro permukaan baja *Cor-Ten* pasca deposisi Al, nitridasi dan oksidasi pada 650 °C selama 50 jam citra hamburan balik elektron (*SEM BSE image*).

## KESIMPULAN

Proses pelapisan tipis aluminium dengan teknik PVD menunjukkan hasil lapisan tipis aluminium yang terbentuk secara merata diseluruh permukaan benda uji.

Dari hasil uji korosi/oksidasi dengan alat TGA/MSB pada sampel *Cor-Ten* (deposisi Al) dengan suhu oksidasi 650 °C menggunakan media udara selama 50 jam, diperoleh ketahanan korosi bahan *Cor-Ten* (deposisi Al) yang paling tinggi adalah hasil nitridasi pada suhu 550 °C selama 5 jam.

Kekerasan sebelum dan sesudah dinitridasi meningkat dua kali lipat lebih yaitu dari 137 VHN menjadi 340 VHN. Kekerasan setelah dideposisi Al dan nitridasi selama 5 jam meningkat tajam lebih dari empat kali lipat yaitu sebesar 744 VHN, hal ini diduga karena terbentuk aluminium nitrida (AlN) yang keras.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. WAGIYO H., SULISTIOSO G.S. dan SITI M., Pengaruh Nitridasi Terhadap Ketahanan Korosi Temperatur Tinggi Bahan SS312A, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Iptek Bahan*, (2004) 126-130
- [2]. UNTORO P., WAGIYO H., *Workshop on Corrosion Using TGA/MSB*, National Nuclear Energy Agency (BATAN), Serpong, (2002)
- [3]. DANI M., WAGIYO H., TEGUH S.P.P., SUSI I., *J. Mikroskopi dan Mikroanalisis*, 6(1) (2003)
- [4]. WRIGHT I.G., *High-Temperature Corrosion*, Metal Handbook, 13, 9<sup>th</sup>-Ed., (1990)
- [5]. LAI G.Y., *High Temperature Corrosion of Engineering Alloys*, Group Leader High

- Temperature Alloys Haynes International, Inc.  
Kokomo, Indiana, (1990)
- [6]. <http://www.adq.it/eng/products/prodo3.htm>,  
(2003)
- [7]. G 54 Standard Practice for Simple Static Oxidation  
Testing, ASTM Standards, **03.02**, (1993)
- [8]. STREHL G., NAUMENKO D., AL-BADAIRY H.,  
RODRIQUEZ LOBO L. M., BORCHARDT G.,  
TATLOCK G. J. and QUADAKKERS W. J.,  
*Materials at High Temperature*, **17**(1), Science  
Reviews, (2000)
- [9]. WASA K. and HAYAKAWA S., *Handbook of  
Sputter Deposition Technology, Principle,  
Technology and Applications*, Noyes Publication,  
(1992)
- [10]. ROBERGO P. R., *Handbook of Corrosion  
Engineering*. Mc.Graw-Hill. New York, (2000)
- [11]. [http://www.ankersmid.com/China/  
PhysicCharacterisation/Products/Rubotherm](http://www.ankersmid.com/China/PhysicCharacterisation/Products/Rubotherm)