

## UJI OKSIDASI BAJA AISI 316L UNTUK BAHAN KOMPONEN PLTN MAJU

B. Bandriyana<sup>1</sup>, Pudji Untoro<sup>1</sup>, Bambang Sugiono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Pengembangan Sistem Reaktor Maju - BATAN

<sup>2</sup>Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam –Universitas Indonesia

### ABSTRAK

**UJI OKSIDASI BAJA AISI 316L UNTUK BAHAN KOMPONEN PLTN MAJU.** Pengujian oksidasi dilakukan untuk evaluasi ketahanan korosi baja AISI 316L sebagai bahan komponen PLTN maju. Pengukuran laju oksidasi dilakukan dengan uji termogravimetri pada temperatur oksidasi 700°C selama 5000 menit. Pengujian struktur mikro dan sifat oksida dan pengukuran kekerasan bahan dilakukan dengan uji metalografi, pengujian X-ray Diffractometer (XRD) dan uji kekerasan Vickers. Dari pengujian termogravimetri diperoleh penambahan berat sebesar 0,35 mg/cm<sup>2</sup>, dengan laju oksidasi awal mengikuti kaidah parabola. Foto struktur mikro menunjukkan perubahan bentuk dan ukuran butir dan tebal lapisan oksida 2,3 µm. Kekerasan bahan sesudah oksidasi mengalami penurunan dari 186 menjadi 174 skala Vickers. Hasil pengujian XRD menunjukkan terbentuknya oksida Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai lapisan pelindung oksidasi yang mantap dan fasa Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> yang menjadi penyebab sensitisasi tidak terbentuk. Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa laju oksidasi dan korosi bahan memenuhi persyaratan desain bahan komponen pembangkit energi dalam PLTN maju.

**Kata kunci:** oksidasi, baja AISI 316L, PLTN maju

### ABSTRACT

**OXIDATION TEST OF STEEL AISI 316L AS A COMPONENTS MATERIAL FOR ADVANCE NUCLEAR POWER PLANT.** Oxidation test was carried out to evaluate corrosion resistance of steel AISI 316L as material for components of advance nuclear power plant. The measurement of corrosion rate was performed using Thermogravimetry Analysis (TGA) at oxidation temperature of 700°C for 5000 minutes. Microstructure and oxide layer properties test and the measurement of hardness for materials were carried out by utilizing metalography, X-ray diffractometer (XRD) and Vickers hardness test. Based on TGA analyses, the weight increase was found to be 0.35 mg/cm<sup>2</sup> with an oxide layer growth rate that following parabolic shape. Microstructure photograph showed that there were changes in the shapes and sizes of the grains and thickens of an oxide layer of 2.3 µm. The hardness

of material after oxidation process was decrease from 186 to 174 at Vickers scale. XRD results showed the formation of a stable  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  oxide layer that protected the surface and  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  phase which could cause sensitization did not form. Therefore, it was concluded that the growth rate of oxide layer and corrosion of the material meet the design requirements for power plant components in an advance nuclear power plant.

**Key words** : oxidation, steel AISI 316L, advance nuclear power plant

## **PENDAHULUAN**

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Maju didesain dengan temperatur operasi tinggi untuk memperoleh efisiensi yang tinggi. Untuk sistem pembangkit yang menggunakan turbin gas, digunakan temperatur desain antara 500 sampai dengan  $700^\circ\text{C}$ . Sistem ini memerlukan dukungan material dengan kekuatan tinggi dan tahan terhadap oksidasi. Pada proses temperatur tinggi, material akan mengalami kerusakan yang disebabkan oleh, antara lain interaksi antara permukaan dengan lingkungan yang meliputi: oksidasi, karburisasi, nitridasi yang berlanjut pada berbagai macam jenis korosi [1, 2]. Jenis serta tingkat kerusakan yang ditimbulkan sangat bergantung pada lingkungan dan material yang digunakan.

Untuk memenuhi persyaratan material yang diperlukan banyak digunakan logam baja tahan karat ataupun logam paduan khusus. Baja AISI 316L merupakan material yang dikembangkan dari baja tahan karat AISI 316 dengan mengurangi kadar karbon sampai 0,03%[3]. Permasalahan pokok dalam penggunaan baja AISI 316L untuk komponen reaktor temperatur tinggi adalah ketahanannya terhadap korosi akibat oksidasi. Oleh karena itu, untuk mengevaluasi keandalan material baja AISI 316L tersebut perlu dilakukan uji oksidasi temperatur tinggi beserta pengamatan pada perubahan struktur mikronya.

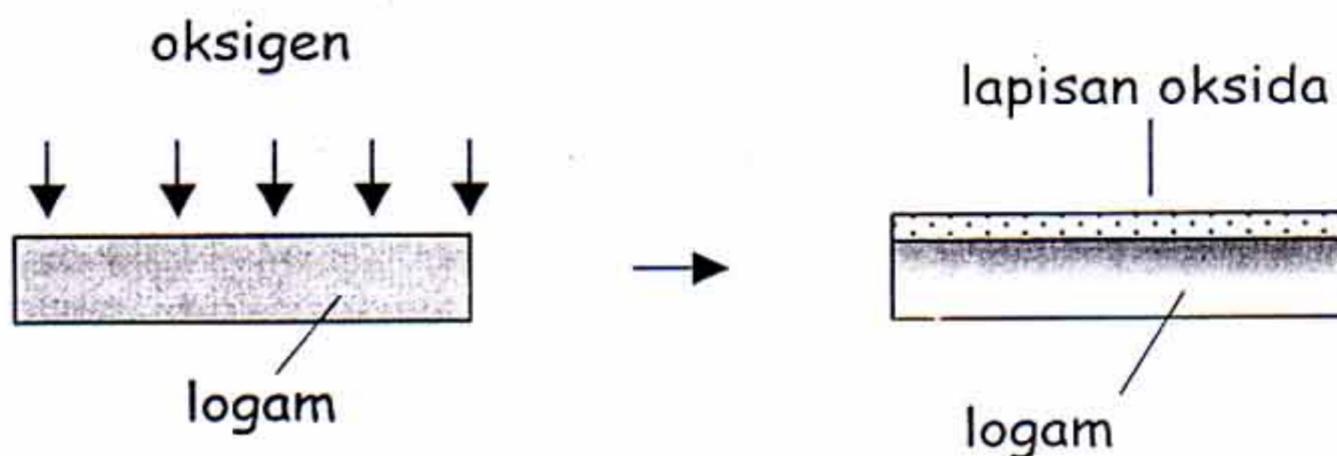
Makalah ini membahas pengujian oksidasi baja AISI 316L pada temperatur  $700^\circ\text{C}$  sebagai simulasi temperatur operasi PLTN maju. Data karakteristik dan laju oksidasi digunakan untuk mengevaluasi kelayakannya sebagai bahan komponen.

Ruang lingkup pengujian meliputi uji termogravimetri, pengukuran lapisan oksida, pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan. Metode pengujian oksidasi yang digunakan adalah pengujian termogravimetri untuk mengetahui laju oksidasi pada suatu temperatur tertentu. Untuk melengkapi analisis perilaku bahan terhadap oksidasi dilakukan uji struktur mikro dan kekerasan. Pengujian struktur mikro digunakan untuk mengamati perubahan struktur akibat oksidasi sedangkan pengujian kekerasan dimaksudkan untuk mengetahui perubahan sifat mekaniknya. Evaluasi kelayakan dan keandalan bahan dilakukan dengan membandingkan data hasil pengujian dan persyaratan desain yang ditentukan.

## TEORI

### Oksidasi temperatur tinggi pada baja

Proses korosi dan oksidasi temperatur tinggi terjadi akibat adanya interaksi antara unsur yang terkandung pada material dengan oksigen dari lingkungan. Akibat interaksi terbentuk oksida-oksida logam yang sebagian besar merupakan senyawa ionik seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skema proses korosi dengan oksidasi.

Reaksi pembentukan oksida dari logam/*metal* (M) dengan oksigen (O) dan membentuk oksida (MO) adalah:[4]



Laju oksidasi bergantung pada 3 faktor penting yaitu: (1) laju difusi reaktan melalui selaput oksida, (2) laju pemasokan oksigen ke permukaan luar oksida, dan (3) nisbah volume molar oksida terhadap logam[5]. Nisbah volume molar oksida yang terbentuk akibat oksidasi terhadap volume logam yang termakan karena memproduksi oksida, adalah faktor paling penting dalam menentukan sifat oksida dan laju korosi untuk rentang waktu yang lama. Nisbah molar untuk proses oksidasi pada material ini menurut Pilling dan Bedworth dapat dinyatakan dengan *Pilling-Bedworth ratio* (PB rasio), dengan rumusan sebagai berikut:[5]

$$PB_{\text{rasio}} = (M d) / (m D) \quad (2)$$

di mana,

- M = massa molekul oksida
- m = massa logam dalam massa M oksida
- D = kerapatan molekul oksida
- d = kerapatan molekul logam.

Untuk bahan dengan PB rasio lebih besar dari 1 maka oksida yang terbentuk akan sinambung dan berfungsi sebagai pelindung. Oksidasi baja tahan karat yang merupakan logam paduan akan menghasilkan oksida-oksida tertentu tipe-p, yaitu FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrO, dan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[6]. Proses oksidasi ini dipengaruhi oleh waktu, konsentrasi dan komposisi unsur dan temperatur oksidasi. Unsur krom memberikan hambatan yang baik terhadap oksidasi pada besi dan baja. Pada baja tahan karat, kandungan unsur krom yang tinggi akan memperkaya lapisan paling dalam pada selaput besi oksida,

dan membentuk lapisan oksida krom ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) tepat di bawah oksida besi sebagai lapisan pelindung untuk menahan proses korosi lanjut. Oksida  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  merupakan oksida penting dengan valensi lebih rendah dari logam utama dan mempunyai PB rasio 2,02.

Jenis baja tahan karat austenitik yang tahan terhadap korosi suhu tinggi dan banyak dipakai dalam industri adalah baja tipe AISI 316, 316L dan 316 Ti[7]. Jenis baja ini mempunyai kandungan krom di atas 18% dan mengandung unsur penstabil Mo dan menahan bahaya sensitisasi sehingga mampu membentuk lapisan oksida krom yang mantap pada suhu tinggi. Pengurangan unsur karbon pada baja 316L akan mencegah timbulnya bahaya sensitisasi akibat pembentukan krom-karbida ( $\text{C}_6\text{Cr}_{23}$ ). Pembentukan lapisan pelindung yang mantap merupakan cara yang efektif untuk mengendalikan oksidasi baja. Lapisan oksida yang mantap diperlukan untuk merintang difusi ion besi dan elektron-elektron. Perilaku ketahanan korosi baja sangat ditentukan oleh karakteristik lapisan oksida yang terbentuk dan perlu diteliti karakter serta pengaruhnya terhadap sifat material terutama untuk beberapa operasi temperatur tinggi. Karakteristik ini menghasilkan laju oksidasi yang dapat ditentukan dengan uji termogravimetri. Secara teoritis diketahui untuk baja tahan karat pada awal oksidasi akan menghasilkan laju oksidasi yang mengikuti kaidah parabola[5].

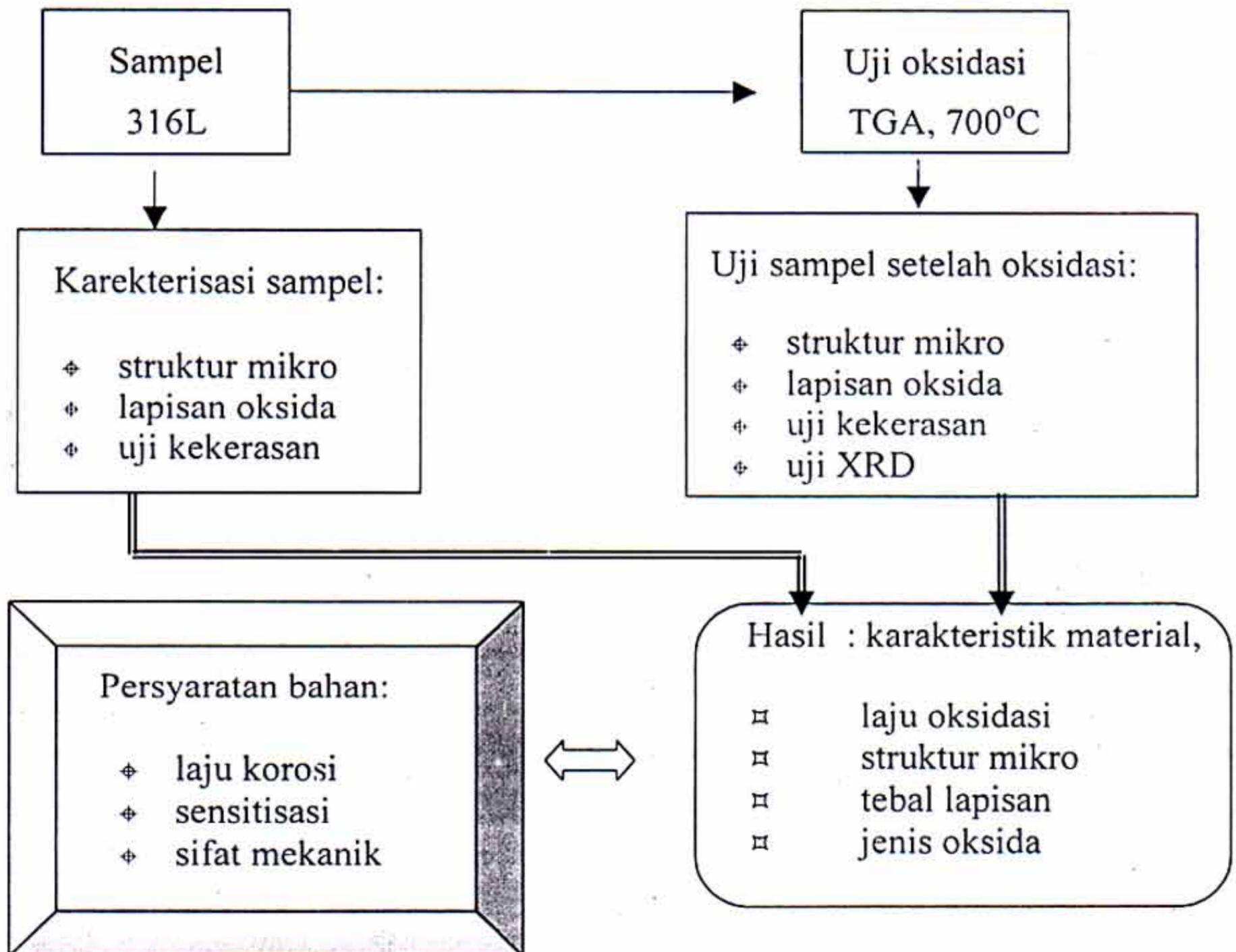
## TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Pengujian oksidasi dan studi kelayakan bahan dilakukan dengan tata kerja dan urutan proses seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Sampel benda uji diambil dari baja tahan karat AISI 316L dari laboratorium P3IB-BATAN dengan ukuran panjang 2 cm, lebar 1 cm dan tebal 2 mm. Oksidasi dan pemanasan dilakukan langsung pada alat uji termogravimetri.

Karakterisasi material untuk mengetahui struktur mikro, sebelum dioksidasi dilakukan dengan pengujian Mikroskop Optik menggunakan standar uji ASTM E 3-95, yang dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Jurusan Metalurgi

Universitas Indonesia[8]. Untuk pengujian ini dilakukan dengan preparasi tanpa etsa untuk melihat struktur mikro secara keseluruhan dan adanya presipitat dalam material. Selain uji mikrostruktur dilakukan pengujian kekerasan mikro pada sampel AISI 316L sebelum dioksidasi dengan standard pengujian kekerasan Vickers. Pengujian dilakukan dengan beban penjejakan 25 gram selama 15 detik, untuk titik pengukuran di matrik, batas butir dan endapan presipitat. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Jurusan Metalurgi Universitas Indonesia.

Untuk mengetahui ketahanan oksidasi dilakukan pengujian oksidasi sampel AISI 316L *as received* dengan uji TGA dengan temperatur oksidasi 700°C selama 5000 menit. Sebelum pengujian sampel dibersihkan dengan alkohol untuk mendapatkan permukaan yang halus dan bersih dari debu maupun kotoran. Pengujian dilakukan dengan menggunakan standar operasi dan pengujian pesawat TGA-RUBOTHERM yang dilengkapi sistem *magnetic suspension balance* yang dilakukan di Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Bahan–BATAN[9]. Selanjutnya dilakukan karakterisasi material dari sampel setelah dioksidasi, untuk mengetahui struktur mikro, tebal lapisan oksida, dan komposisi unsur dengan Mikroskop Optik. Pengujian kekerasan mikro pada beberapa kedalaman sampel setelah dioksidasi dilakukan dengan pengujian kekerasan Vickers. Untuk mengetahui jenis senyawa atau fase yang ada pada sampel dilakukan pengujian XRD sampel setelah dioksidasi. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Jurusan Metalurgi Universitas Indonesia dengan pesawat uji Philips Analytical X-ray B.V, menggunakan difraktometer tipe PW 710 dan tabung anoda Cu[11]. Setelah pengujian dilakukan penyusunan data, hasil dan analisis serta evaluasi hasil. Evaluasi material untuk penggunaan komponen reaktor temperatur tinggi. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan persyaratan dan bahaya oksidasi dengan karakter material hasil uji.



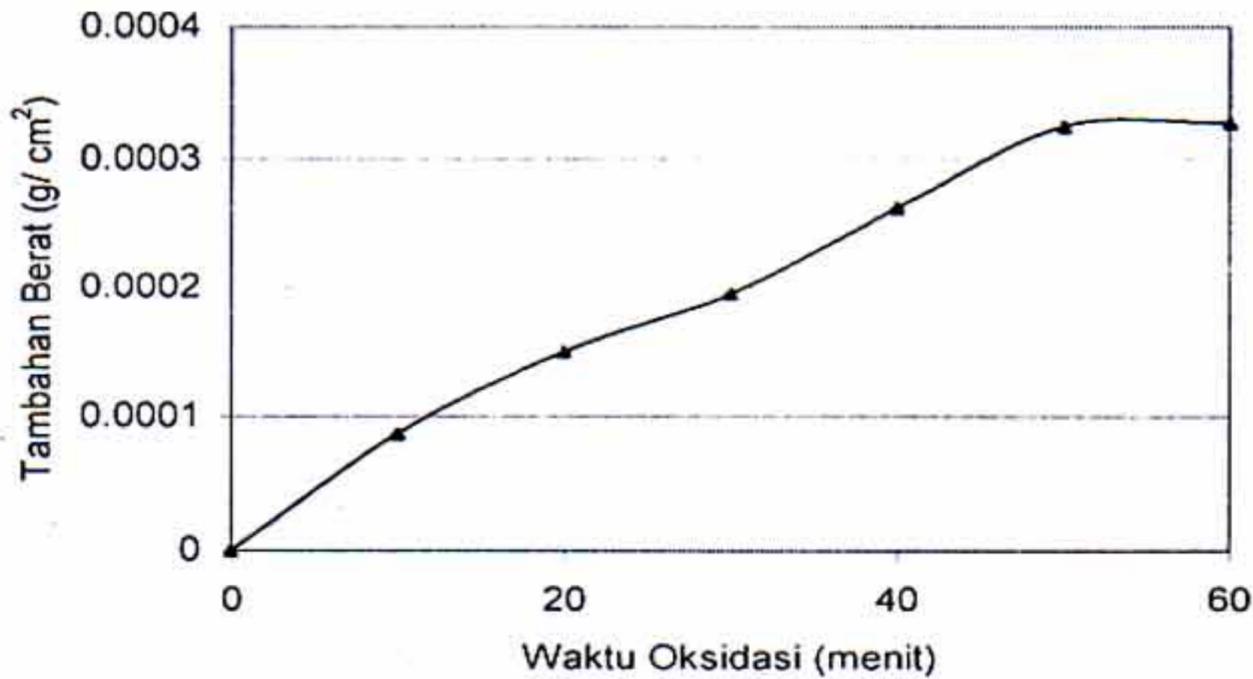
Gambar 2. Alur pengujian dan evaluasi material baja AISI 316L.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil uji oksidasi termogravimetri

Hasil pengujian termogravimetri adalah suatu data yang menunjukkan hubungan antara pertambahan berat per-satuan ( $\Delta M$ ) yang timbul sebagai fungsi waktu uji oksidasi atau dinyatakan dalam kurva yang disebut kurva termal. Kurva hasil pengujian oksidasi sampel baja AISI 316L pada temperatur uji 700°C pada awal

oksidasi untuk waktu uji sampai dengan 60 menit disajikan pada Gambar 3, sedangkan data hasil pengujian selama 5000 menit disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 3. Kurva termal oksidasi awal baja AISI 316L, 700°C sampai 60 menit

Tabel 1. Hasil pengujian oksidasi baja AISI 316L pada 700°C

Waktu oksidasi (menit)	Pertambahan berat / satuan luas (mg/cm <sup>2</sup> )
0	0
500	0,325
1000	0,308
1500	0,313
2000	0,275
2500	0,323
3000	0,3
3500	0,313
4000	0,318
4500	0,29
5000	0,323

Pada awal oksidasi sampai 60 menit diperoleh kurva termal yang mengikuti kaidah parabola dan terjadi laju oksidasi dengan penambahan berat secara cepat mencapai sekitar  $0,32 \text{ mg/cm}^2$ . Laju oksidasi awal terjadi bersamaan dengan reaksi yang menghasilkan oksida dan membentuk lapisan tipis sebagai pelindung oksidasi. Pada awal oksidasi lapisan pelindung belum sempurna sebagai penghalang oksidasi dan pertambahan berat terjadi yang menunjukkan masih terjadinya oksidasi. Setelah waktu 60 menit sampai waktu oksidasi 5000 menit, pertambahan berat yang terjadi sangat kecil atau pertambahan berat total tetap sebesar  $0,35 \text{ mg/cm}^2$ . Pada kondisi ini telah terbentuk lapisan pelindung yang handal dari oksida yang menghalangi terjadinya proses oksidasi lanjut pada material. Selama pengujian 5000 menit tidak teramati kondisi pengelupasan (*spalling*) yang menunjukkan karakter oksida melekat dengan baik pada logam dan cukup mantap sebagai lapisan pelindung oksidasi. Hasil ini menunjukkan bahwa material sangat baik untuk menahan korosi oksidasi.

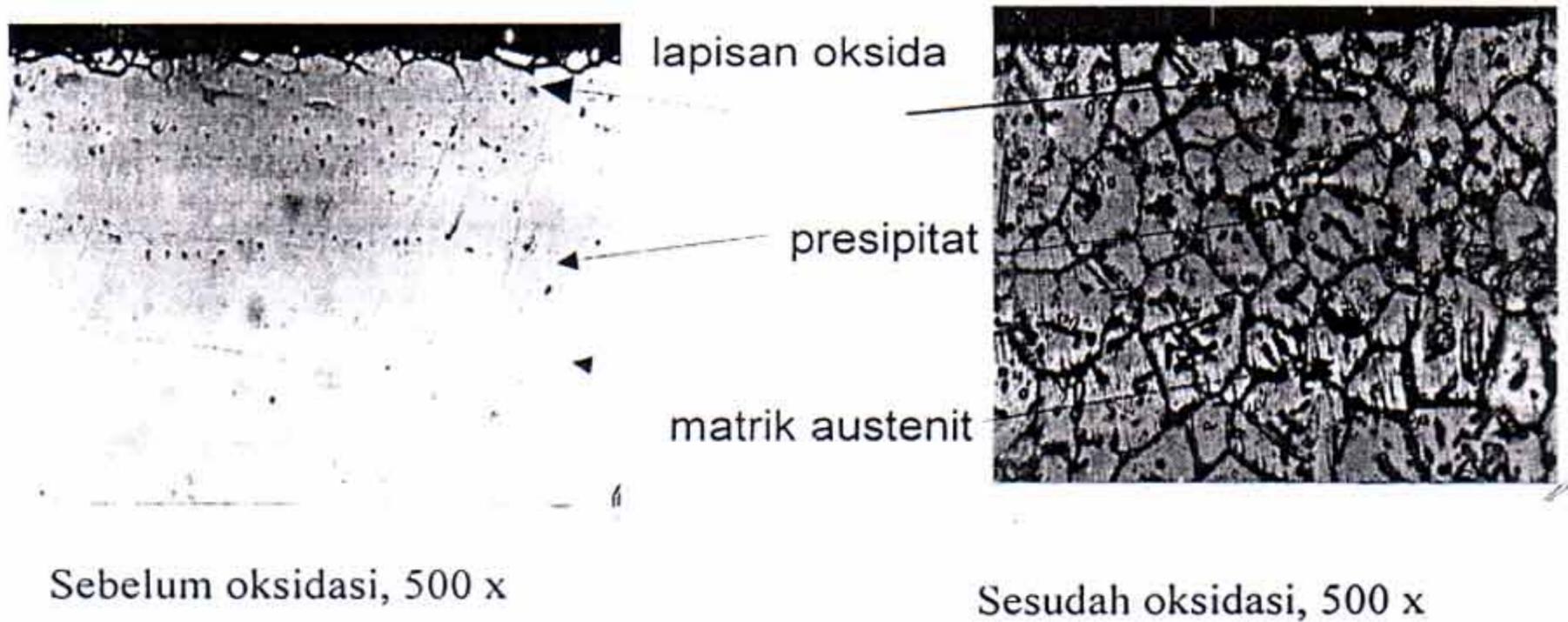
### Foto mikroskop optik

Hasil pengujian dari mikroskop optik berupa foto struktur mikro sebelum dan sesudah oksidasi disajikan dalam Gambar 4.

Dari foto mikroskopik pada Gambar 4 dapat diamati bahwa dengan sampel yang dipoles tanpa dietsa tampak struktur mikro bahan secara keseluruhan beserta lapisan tipis yang terbentuk pada temperatur ruang. Dari hasil foto tampak beberapa bintik pengotor yang menunjukkan kondisi material sedikit mengalami presipitasi (pengotoran) pada kondisi *as received*.

Dari foto struktur mikro setelah oksidasi yang dilakukan dengan etsa menggunakan asam oksalat 15 %, 8 V, 60 detik tampak batas butir dengan garis putih. Bintik warna hitam merupakan presipitat dan oksida yang tampak berkembang/membesar dan terdistribusi ke seluruh matrik logam dan batas butir. Bentuk dari butir

tampak jelas dan semakin bulat dengan ukuran cukup homogen. Lapisan tipis yang dihasilkan tampak lebih tebal dibandingkan dengan kondisi sebelum oksidasi.



Gambar 4. Foto struktur mikro baja AISI 316L sebelum dan sesudah oksidasi.

### Pengukuran tebal lapisan oksida dan kekerasan

Berdasarkan foto mikrostruktur dilakukan pengukuran tebal lapisan oksida untuk kondisi sebelum dan sesudah oksidasi. Pada kondisi sebelum oksidasi terdapat lapisan tipis yang menunjukkan adanya oksidasi pada kondisi temperatur ruang. Tebal oksidasi yang terukur adalah  $1,6 \mu\text{m}$  yang menunjukkan kondisi material sedikit mengalami presipitasi (pengotoran) pada kondisi *as received*. Untuk kondisi setelah oksidasi, lapisan oksida dapat diamati pada lapisan dan bintik hitam yang terbentuk pada permukaan batas antar muka logam dan udara dalam proses oksidasi. Lapisan tipis yang dihasilkan tampak lebih tebal dibanding pada kondisi sebelum oksidasi dengan hasil pengukuran  $2,36 \mu\text{m}$ . Dari hasil termogravimetri diketahui ketebalan oksida terbentuk dalam waktu cepat sekitar 60 menit yang mengakibatkan oksidasi yang terjadi sangat kecil.

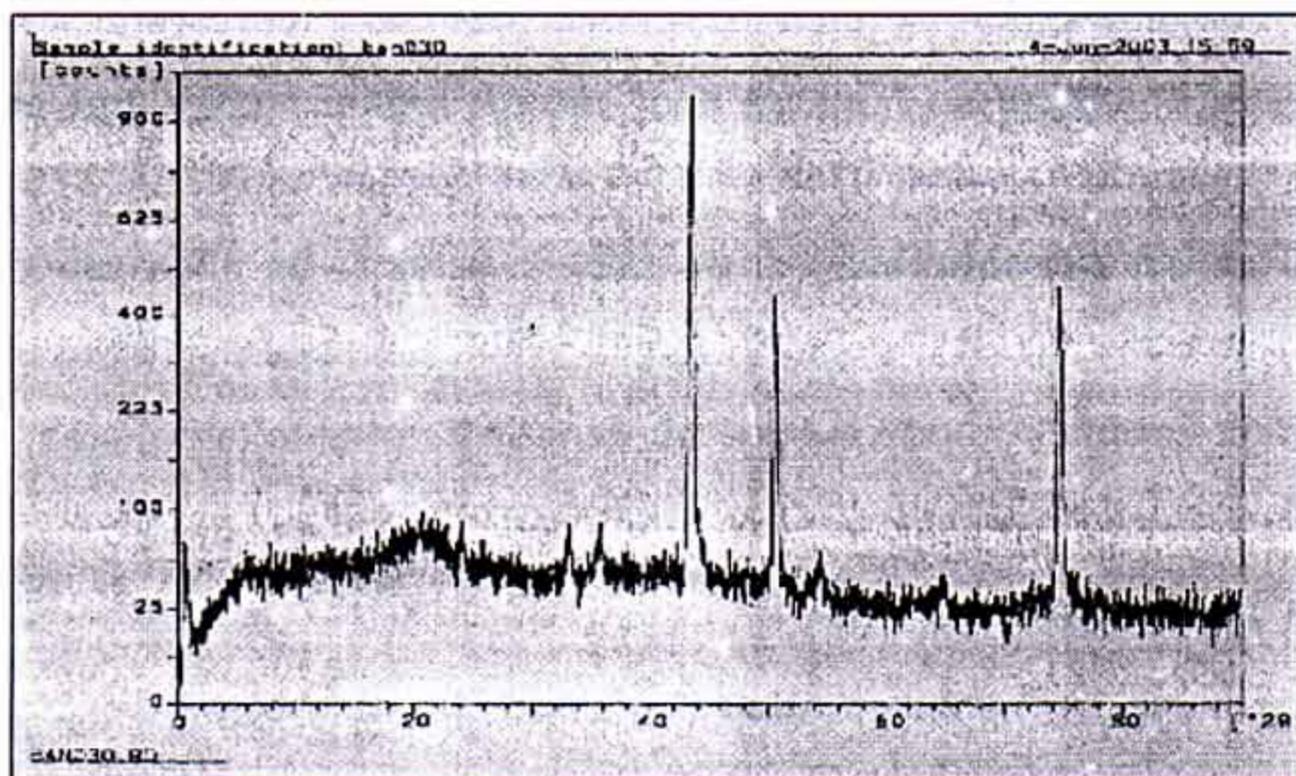
Hasil pengujian kekerasan mikro untuk beberapa posisi kedalaman pada kondisi sebelum dan sesudah oksidasi dijelaskan sebagai berikut. Untuk kondisi sebelum oksidasi kekerasan Vickers bervariasi dari 187 pada bagian permukaan menuju 183 pada bagian tengah sampel. Setelah dioksidasi dengan temperatur oksidasi  $700^{\circ}\text{C}$  selama 5000 menit, kekerasan Vickers pada matrik logam mengalami penurunan dan berkisar pada harga kekerasan Vickers 138 pada bagian tepi dan 130 pada bagian tengah. Hasil uji ini menunjukkan bahwa sifat kekerasan berubah setelah dioksidasi. Untuk kondisi setelah oksidasi pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  kekerasan sampel pada logam matrik berkurang karena komposisi berubah dengan pembentukan oksida.

### Hasil XRD setelah oksidasi

Data XRD setelah oksidasi dengan temperatur tetap  $700^{\circ}\text{C}$  selama 5000 menit menunjukkan adanya 17 puncak seperti disajikan dalam spektrum unsur pada Gambar 5. Puncak dengan intensitas tinggi yang menunjukkan unsur dan fase pokok dalam sampel yang diolah dari data hasil XRD diberikan dalam Tabel 2. Pengolahan hasil XRD dilakukan dengan File PDF-WIN dan dilakukan pencocokan unsur dengan menggunakan program GSA.

Data ini menunjukkan terbentuknya oksida akibat terjadinya reaksi oksidasi yang disertai dengan perubahan struktur mikro dan pengembangan presipitat. Data XRD menunjukkan akibat oksidasi pada  $700^{\circ}\text{C}$  selama 5000 menit terbentuk beberapa oksida. Presipitat awal yang teramati dalam uji struktur mikro semakin membesar baik di batas butir maupun di matrik logam adalah oksida dan presipitat baru. Oksida besi  $\text{FeO}$  dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  telah terbentuk demikian pula oksida  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  yang merupakan lapisan tipis pelindung oksidasi sehingga laju oksidasi yang diamati dengan penambahan berat sampel segera mendekati nol. Fasa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  yang menjadi penyebab serangan sensitisasi pada temperatur ini belum terbentuk. Fasa lain dalam matrik maupun batas butir yang

dominan seperti teramati dalam perbandingan persentase dalam uji SEM-EDAX yang terbentuk adalah Fe- $\alpha$  , Fe-C, dan Cr-Ni-Fe.



Gambar 5. Spektrum hasil XRD setelah oksidasi 700°C.

Tabel 2. Kandungan senyawa dan fase hasil pengolahan data uji XRD

Puncak No.	2 $\theta$ ( $^{\circ}$ )	d ( $\text{A}^{\circ}$ )	Intensitas ( <i>cacah</i> )	Senyawa
1.	33,080	2,7057	29	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2.	35,800	2,5124	19	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
3.	43,465	2,0803	630	Cr-Ni-Fe
4.	48,265	1,8840	8	NiFe
5.	50,610	1,8021	234	Cr-Ni-Fe
6.	50,775	1,7966	172	Cr-Ni-Fe
7.	54,405	1,6850	11	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
8.	64,855	1,4365	5	FeO
9.	74,510	1,2724	156	CrNiFe

## Rangkuman dan evaluasi

Dari hasil pengujian ini dapat dinyatakan bahwa baja tahan karat AISI 316L mempunyai ketahanan korosi-oksidasi yang tinggi sampai dengan temperatur operasi 700°C. Laju oksidasi terjadi sesuai dengan kaidah parabola dan membentuk lapisan oksida mantap dengan ketebalan sekitar 2  $\mu\text{m}$  dan penambahan berat total sekitar 0,3  $\text{mg}/\text{cm}^2$  dalam waktu 60 menit. Lapisan oksida berisikan oksida krom ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) dengan PB rasio 2,3 terbentuk dan sangat protektif sehingga oksidasi terhadap logam segera terlindungi. Serangan sensitisasi diawali dengan pembentukan fasa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  yang menyebabkan deplesi krom pada batas butir dan mengganggu pembentukan krom oksida. Akibat sensitisasi akan timbul serangan korosi batas butir yang merusak material. Dengan tidak adanya fasa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  maka pembentukan oksida krom tidak terganggu dan oksidasi lanjut akan terlindungi. Perubahan kekuatan dan sifat mekanik cukup stabil yang ditunjukkan dengan penurunan kekerasan yang relatif kecil.

Untuk PLTN maju dengan turbin gas dan beberapa komponen pembangkit energi temperatur operasi berkisar 500°C. Bahaya korosi oksidasi temperatur tinggi merupakan serangan utama pada material di samping tegangan termal yang bekerja pada bahan. Oleh karena itu material yang diperlukan untuk komponen reaktor temperatur tinggi adalah bahan yang tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi. Laju korosi baja AISI 316L pada temperatur 700°C seperti yang diperoleh dalam pengujian diprediksikan memenuhi laju ambang batas korosi sebesar  $10^{-3} \text{ kg}^{-2}\text{jam}^{-1}$  [4]. Batas kekerasan di sekitar 150 Vickers menunjukkan kesetaraan nilai kekuatan yang tinggi dengan tegangan tarik sekitar 600 MPa. Dari data evaluasi yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa baja AISI 316L cukup baik untuk komponen pembangkit energi dan turbin gas.

## KESIMPULAN

Baja tahan karat AISI 316L mempunyai ketahanan oksidasi dan korosi yang baik pada temperatur 700°C. Pada oksidasi selama 5000 menit menghasilkan lapisan oksida dengan pertambahan berat 0,35 mg/cm<sup>2</sup>. Tebal lapisan oksida yang terbentuk 2,36 µm dan tidak mengalami pengelupasan. Oksida Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terbentuk dalam lapisan permukaan logam dan menjadi lapisan pelindung oksidasi yang mantap. Fase Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> yang menjadi penyebab terjadinya korosi butir tidak terbentuk pada temperatur oksidasi 700°C. Perubahan struktur mikro dan kekerasan akibat oksidasi relatif kecil sehingga kekuatan bahan tidak berkurang. Berdasar hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa baja tahan karat AISI 316L memenuhi persyaratan yang cukup sebagai bahan komponen pembangkit energi pada PLTN maju.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ADYANA, Sifat Mekanik Material, Material Science and Engineering, Universitas Indonesia, 2000
2. PUDJI UNTORO, Resiko Kerusakan Korosi pada Temperatur Tinggi, Seminar PLTN ke-8, BATAN, Jakarta, 2002.
3. ANONIM, "Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys", ASM Hand Book-Volume 1, 1992.
4. TRETHERWEY, K. R., and CHAMBERLIN J., alih bahasa oleh ALEX TRI KANTJONO WIDODO, Korosi, PT Gramedia, Jakarta, 1991.
5. ANONIM, "Metallography and Material Characterization", ASM Hand Book-Volume 10, 1992.
6. JONES DENNY, A., "Principle and Prevention of Corrossion", Macmillan Publishing Company, USA, 1992.
7. PECKNER, D., and BERNSTEIN I.M., "Hand Book of Stainless Steels", Mc Graw-Hill, USA, 1977.