

FORMULASI ARITMETIKA BRAGG PADA PENGKAJIAN STRUKTUR KRISTAL BAJA *SUPERALLOY* TIPE F1, A2 DAN A2-APS

BRAGG ARITHMETIC FORMULATION ON CRYSTAL STRUCTURE ASSESSMENTS OF SUPERALLOY STEEL TYPE F1, A2 AND A2-APS

Parikin^a, Mohammad Dani^a, Bambang Sugeng^a, Novita Dwi Purnamasari^b,
Syahfandi Ahda^a, Sulistioso Giat Sukaryo^a

^aPusat Sains dan Teknologi Bahan Maju Badan Tenaga Nuklir Nasional,
Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang Selatan, Banten 15314.

^bDepartemen Fisika Fakultas Ilmu Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
e-mail : farihin@batan.go.id, novitas21196@gmail.com

Abstrak

Perekayasa material BATAN berhasil mensintesis serial baja *superalloy* tipe Austenitik (A2) dan Feritik (F1). Beberapa bahan telah dilakukan *treatments* menggunakan *arc plasma sintering* (APS) dengan memvariasi waktu penyinaran. Telah dilakukan pengukuran difraksi sinar-X untuk mengidentifikasi bangun struktur kristal dan parameter kisi dari baja F1, A2 dan A2 yang disintering APS selama 2 detik penyinaran. Pengkajian dilakukan menggunakan formulasi Bragg; merunutkan deret aritmetika (S^2) dengan parameter kisi hasil perbanyakand_{hkl} dan $\sqrt{S^2}$. Hasil memaparkan bahwa: baja F1, A2 dan A2-APS berturut-turut berstruktur *body centered cubic* (BCC) dengan parameter kisi 2,87 Å, *face centered cubic* (FCC) dengan parameter kisi 3,59 Å, dan *face centered cubic* (FCC) dengan parameter kisi 3,60 Å. Struktur mikro yang menarik diperlihatkan oleh Mikroskop Optik (OM) dan Mikroskop Elektron (SEM). Asumsi kondisi proses peleburan sama, kedua tipe baja memiliki struktur cor yang mirip. Baja F1 menampilkan batas butir (*grain boundary*) lebih halus dibandingkan dengan batas butir baja A2 yang cenderung lebar garis batasnya. Baja A2-APS, menampilkan pola struktur butiran cenderung bulat-bulat (*globular*). Mikrografi SEM memetakan sebaran presipitat pada baja F1 di batas dan di dalam butir, dan pada baja A2 hanya di batas butir. Spektrum EDX menunjukkan komposisi presipitat baja F1 adalah (C,Cr,Fe), dan baja A2 adalah (C,Cr,Fe,Ni). Karena dominasi unsur Cr dan C, presipitat kromium karbida ($Cr_{23}C_6$) terbentuk pada batas butir.

Kata Kunci : Feritik F1, Austenitik A2, XRD, Aritmetika, Formula Bragg, Struktur Mikro

Abstract

BATAN material engineers have succeeded in producing a series of *superalloy* steels of Austenitic (A2) and Ferritic (F1) type. Several have been treated by using *arc plasma sintering* (APS) at varying irradiation time. X-ray diffraction measurements were already performed to find out the shape of the crystal structures and lattice parameters of F1, A2 and A2-APS steel (2 seconds of APS-irradiation). The calculations were carried out using Bragg formula by comparing the S^2 -arithmetic series and the interplanar spacing that correspond to lattice parameters. Obtained that: F1 steel has a crystal of body centered cubic (BCC) with lattice parameter 2.87 Å, A2 steel has a face centered cubic (FCC) structure with lattice parameter 3.59, and A2-APS steel has a face centered cubic (FCC)

structure with lattice parameter 3.60 \AA . As a comparison, there were also observations of material surface microstructure by using Optical Microscope (OM) and Electron Microscope (SEM). Assuming the same conditions of casting process, both types of test materials have similar cast-structures. The F1 steel exhibits a finer grain boundary when compared to the grain boundary in A2 steel which tends to be highly visible to the width of its boundaries. While A2-APS steel shows the grains pattern structures that previously elongated changed to become slightly rounded (globular). SEM-micrographs show the precipitates on the F1 steel scattered at the grain boundaries and inside the grain, whereas in A2 steel lies at the grain boundary only. EDX spectrums show the precipitate composition of F1 steel including (C,Cr,Fe), and in A2 steel is (C,Cr,Fe,Ni). Due to the dominance of Cr and C elements, chromium carbide (Cr_2C_6) precipitates were formed at the grain boundaries.

Keywords : F1-Ferritic, A2-Austenitic, XRD, Arithmetic, Bragg Formula, Microstructure

Diterima (received) : 30 April 2018, Direvisi (revised) : 25 Oktober 2018, Disetujui (accepted) : 30 Oktober 2018

PENDAHULUAN

Baja adalah logam paduan dengan beberapa unsur lain, termasuk karbon dimana besi sebagai unsur dasarnya. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0,2% hingga 2,1%¹⁾. Unsur-unsur yang selalu ada dalam komposisi baja yaitu karbon, mangan, fosfor, sulfur, silikon, dan sebagian kecil oksigen, nitrogen dan aluminium. Selain itu, ada unsur lain yang ditambahkan untuk membedakan karakteristik beberapa jenis baja, antara lain; nikel, krom, molybdenum, boron, titanium, vanadium dan niobium. Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur lainnya, berbagai jenis kualitas paduan baja bisa dibuat menjadi baja paduan super (*superalloy*), seperti yang telah dilakukan oleh para perancang material di BATAN sejak tahun 2006. Fabrikasi secara mandiri dalam skala laboratorium telah dilakukan menggunakan metode *casting*²⁾ dengan membuat serial baja austenitik (A) dan feritik (F) untuk memenuhi kebutuhan baja yang memiliki keunggulan khusus seperti bahan struktur operasi temperatur tinggi. Baja serial A dan F non standar ini merupakan baja *low carbon* ramuan mandiri. Baja ini bila sudah terkarakterisasi baik diharapkan dapat ditetapkan sebagai kandidat bahan struktur reaktor untuk operasi suhu tinggi. Sampai saat ini telah dibuat dua buah serial baja Austenitik (A1&A2) dan baja Feritik (A2&F2). Baja ini memperlihatkan beberapa sifat karakteristik ekstrim seperti kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap korosi/oksidasi yang sangat baik. Studi

yang telah dilakukan pada baja ini memperlihatkan sifat mekanis yang sangat baik, seperti: sifat mampu membentuk dengan proses *cold rolling* dan juga memiliki sifat *weld-ability* dengan *residual stress* yang cenderung negatif³⁾. Rata-rata kekerasan material ini sekitar 160 HVN (84 HRC). Terakhir dilaporkan bahwa baja jenis ini menunjukkan tingkat korosi yang sangat baik, hampir 0,0802 mm per tahun (*mpy*)⁴⁾ dan tahan oksidasi⁵⁾ hingga temperatur 850°C. Karakteristik ini salah satunya dapat dipengaruhi oleh bangun struktur kristalnya.

Untuk mengetahui struktur kristal dari sebuah baja maka dapat digunakan aplikasi teknik difraksi, antara lain; difraksi sinar X. Hasil pengukuran difraksi sinar X dapat digunakan untuk menganalisis struktur kristal suatu bahan. Dijelaskan bahwa jika sinar X mengenai suatu material maka akan mengalami beberapa fenomena optik, seperti: difraksi, transmisi, dan refleksi. Pada saat sinar X mengenai bidang-bidang kristal akan didifraksikan pada sudut tertentu yang khas. Sehingga akan memberikan informasi berupa sudut hamburan (2θ) dan intensitas difraksi (I). Pola antara sudut hamburan dan intensitas merupakan pengejawantahan dari Hukum Bragg yang dapat digunakan untuk memprediksi bangun struktur kristal dan parameter kisi bahan.

Artikel ini memaparkan hasil analisis difraksi dalam menentukan bangun kristal dan parameter kisi-nya dari profil pengukuran difraksi sinar-X melalui hubungan persamaan bidang refleksi *hkl* (*Miller Indices*) sebagai deret aritmetika dengan jarak interplanar d_{hkl} . Spesimen

yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja feritik tipe F1 dan baja austenitik tipe A2. Karakterisasi struktur mikro-kristal dilakukan dengan fasilitas mikroskop optik (MO) dan *X-Ray Diffraction* (XRD), sementara komposisi kimia bahan diukur dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX).

ARITMETIKA FORMULA BRAGG

Difraksi sinar X adalah suatu metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter kisi struktur dan mendapatkan ukuran partikel. Keluaran alat difraksi adalah sebuah profil atau pola difraksi yang dapat memberikan data kualitatif dan semi kuantitatif spesimen padatan. Teknik difraksi sinar X dapat digunakan untuk beberapa hal, diantaranya; pengukuran jarak rata-rata antara lapisan atau baris atom, penentuan kristal tunggal, penentuan struktur kristal dari material yang tidak diketahui, mengukur bentuk, ukuran, dan tegangan internal dari kristal kecil (6). Teknik ini didasarkan pada sinar X monokromatis mengenai material kristalin, sedemikian hingga setiap bidang kristal akan memantulkan atau menghamburkan sinar X ke segala arah (isotropic). Interferensi terjadi hanya antara sinar pantul yang sefase. Interferensi saling menguatkan terjadi jika sinar X yang sefase memiliki selisih lintasan kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang. Pernyataan ini dinamakan Hukum Bragg untuk difraksi kristal (7).

Hukum Bragg secara umum dirumuskan seperti dalam Pers. (1):

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

atau

$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

dimana $n=1$, dengan memasukkan nilai panjang gelombang target Cu (λ_{Cu}) sebesar 1,54 Å, dapat diperoleh jarak antar bidang d_{hkl} puncak difraksi. Selanjutnya dari kombinasi nilai d_{hkl} setiap puncak dapat dilakukan perhitungan nilai parameter kisi a menggunakan Pers. (5) sebagai hasil penurunan dari Pers. (3) yang merupakan bentuk deret hitung (aritmetika) dari Indeks *Miller* (*Miller Indices*) dan Pers. (4) yang merupakan persamaan untuk kristal kubik, sebagai berikut:

$$S^2 = h^2 + k^2 + l^2 \quad (3)$$

$$\frac{1}{d} = \frac{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}{a} \quad (4)$$

Maka dapat diperoleh hubungan:

$$a = \sqrt{S^2} \cdot d_{hkl} = S \cdot d_{hkl} \quad (5)$$

Aritmetika S^2 untuk bangun kristal sederhana seperti : kubus sederhana (Simple Cubic; SC), kubus pusat badan (Body

Centered Cubic; BCC) dan kubus pusat muka (Face Centered Cubic; FCC) dapat disusun seperti dalam Tabel 1.

Tabel 1.
Aritmetika Indeks *Miller*

Bangun Kristal	hkl	S^2
Kubus Sederhana (SC)	100, 110, 111, 200, 210, 211, 220, 221, ...	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9,dst.
Kubus Pusat Badan (BCC)	110, 200, 211, 220, 310, 222, 400, ...	2, 4, 6, 8, 10, 12, 16,dst.
Kubus Pusat Muka (FCC)	111, 200, 220, 311, 222, 331, 420, ...	3, 4, 8, 11, 12, 19, 20,dst.

BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam studi ini ada 3 (tiga) buah, yaitu: baja feritik tipe F1, baja austenitik tipe A2 dan baja austenitik tipe A2 yang disintering menggunakan arc-plasma sintering (APS) selama 2 detik. Baja tersebut adalah baja non standar dan merupakan baja low carbon ramuan mandiri yang dibuat dengan teknik casting menggunakan dapur induksi (Inductance Furnace). Pembuatan ingot baja superalloy ini dilakukan di Telimek LIPI (F1 & A2) dan Politeknik Manufaktur (A2-APS) di Bandung (8). Komposisi kimia baja hasil casting setelah diukur dengan menggunakan Optical Emission Spectrometry (OES), memiliki kandungan unsur-unsur seperti tersusun pada Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

Spesimen baja tipe F1, A2 dan A2-APS ditunjukkan pada Gambar 1. Spesimen ini dikarakterisasi struktur kristal dan struktur mikronya berturut-turut menggunakan

difraktometer *Phillips PANalytical Empyrean PW1710* dan Mikroskop Optik (MO) *Olympus* di Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) BATAN. Mula-mula bahan dibentuk balok berdimensi 30x15x5 mm³ untuk memudahkan penempatan spesimen di atas meja uji. Sementara pengukuran pola difraksi sinar-X dilakukan dengan menggunakan panjang gelombang *Cu-target* (1,54 Å) dengan langkah pencacahan 0,05° dan jangkauan sudut pengukuran $2\theta=30^\circ$ hingga 100° , dengan *mode step counting* dan *preset counts* 2 detik. Setelah melalui proses preparasi bahan metal, karakterisasi spesimen dilanjutkan dengan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik untuk melihat perbedaan struktur mikro permukaan baja tipe feritik (*ascast*) dan austenitik (*ascast*) serta austenitik yang disintering dengan APS selama 2 detik.



Gambar 1.

Spesimen uji: (a) Baja F1, (b) Baja A2 dan (c) Baja A2-APS.

Komposisi kimia baja hasil *casting* setelah diukur dengan menggunakan *Optical Emission Spectrometry* (OES), memiliki kandungan unsur-unsur seperti tersusun pada Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 2.
Komposisi kimia Baja tipe F1

Unsur	%wt.
Fe	72,97
Ni	0,12
Cr	23,71
Mn	0,82
Si	2,02
Al	0,01
Ti	0,01
Sn	0,01
Nb	0,01
C	0,26
S	0,01
P	0,02
V	0,06

Tabel 3.
Komposisi kimia Baja tipe A2

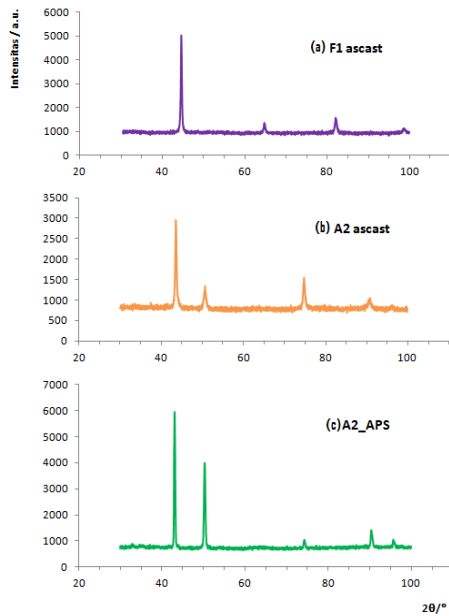
Unsur	%wt.
Fe	56,43
Ni	25,04
Cr	16,55
Mn	0,504
Si	0,89
Al	0,003
Ti	0,004
C	0,293
P	0,013

Tabel 4.
Komposisi kimia Baja tipe A2-APS

Unsur	%wt.
Fe	57,71
Ni	25,1
Cr	15,43
Mn	0,32
Si	0,96
C	0,35
Ti	0,002
Sn	0,005
Nb	0,005
Cu	0,005
W	0,001
S	0,01
P	0,02
V	0,04

HASIL DAN PEMBAHASAN

Difraksi Sinar-X. Hasil pengukuran pola difraksi dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) pada spesimen baja tipe F1, A2 dan A2 disintering APS dengan panjang gelombang 1,54 Å (*Cu target*) ditampilkan dalam Gambar 2.



Gambar 2.
 Profil difraksi sinar-X spesimen:
 (a) Baja F1 (b) Baja A2 dan (c) Baja A2-APS.

Dari pola difraksi tersebut, dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan bangun struktur kristal dan nilai parameter kisi (a,b,c) masing-masing bahan spesimen dengan mencari nilai 2θ di setiap posisi puncak (peak) pada pola menggunakan gaussian fitting, kemudian dihitung nilai $\sin\theta$. Proses di atas juga bisa dilakukan dengan mendapatkan hasil cetak keluaran yang dihitung alat XRD. Selanjutnya dengan memasukkan $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ dalam Pers. 2 didapat nilai d_{hkl} sebagai nilai d_1, d_2, d_3, \dots ; sehingga diperoleh data seperti tersusun pada Tabel 5, Tabel 6 & Tabel 7.

Tabel 5.
 Hasil perhitungan d_{hkl} untuk baja tipe F1

$2\theta/^\circ$	$\theta/^\circ$	$\sin\theta$	$d/\text{\AA}$	d_i
44,53777	22,2688	0,37909	2,031663	d_1
64,74930	32,3746	0,53564	1,437892	d_2
82,10591	41,0529	0,65697	1,172345	d_3
98,66663	49,3333	0,75873	1,015105	d_4

Tabel 6.
 Hasil perhitungan d_{hkl} untuk spesimen baja tipe A2

$2\theta/^\circ$	$\theta/^\circ$	$\sin\theta$	$d/\text{\AA}$	d_i
43,62268	21,8111	0,37169	2,072135	d_1
50,68294	25,3414	0,42817	1,798806	d_2
74,79761	37,3988	0,60756	1,267677	d_3
90,88183	45,4409	0,71275	1,080601	d_4
96,25888	48,1294	0,74488	1,033992	d_5

Tabel 7.
 Hasil perhitungan d_{hkl} untuk spesimen baja tipe A2-APS

$2\theta/^\circ$	$\theta/^\circ$	$\sin\theta$	$d/\text{\AA}$	d_i
43,10645	21,5532	0,36750	2,095747	d_1
50,35437	25,1771	0,42557	1,809770	d_2
74,33026	37,1651	0,60432	1,274485	d_3
90,42799	45,2140	0,70996	1,08484	d_4
95,70636	47,8531	0,74165	1,038491	d_5

Kemudian untuk mendapatkan bangun kristal dan parameter kisi masing-masing spesimen, Pers.5 dapat digunakan dengan penjabaran tabulasi aritmetika seperti tersusun dalam Tabel 8, Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 8.
 Aritmetika S^2 dan d_{hkl} pada spesimen baja tipe F1

hkl	S^2	S	d_1	d_2	d_3	d_4
100	1	1	2,032	1,438	1,172	1,015
110	2	1,414	2,873	2,034	1,658	1,436
111	3	1,732	3,519	2,491	2,031	1,758
200	4	2	4,063	2,876	2,345	2,030
210	5	2,236	4,543	3,215	2,621	2,270
211	6	2,449	4,977	3,522	2,872	2,486
	7	2,646	5,376	3,804	3,102	2,686
220	8	2,829	5,7467	4,067	3,316	2,871
300	9	3	6,095	4,314	3,517	3,045
310	10	3,163	6,425	4,547	3,707	3,210

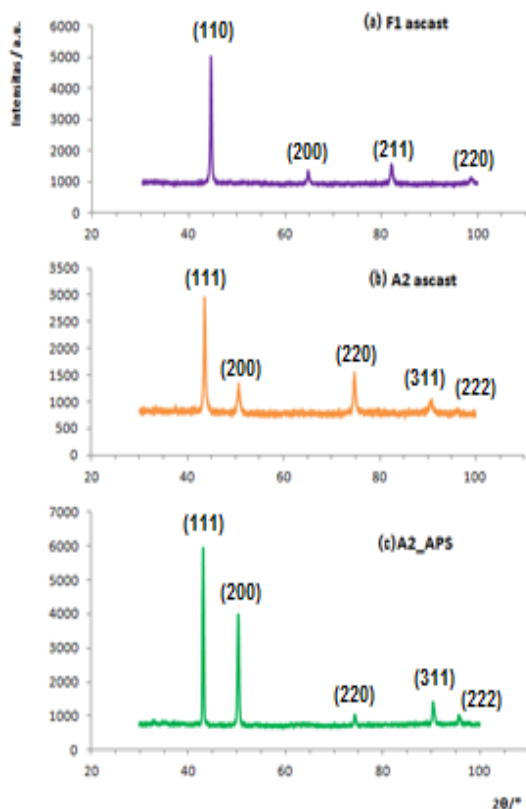
hkl	S^2	S	d_1	d_2	d_3	d_4
100	1	1	2,031663	1,437892	1,172345	1,015105
110	2	1,414214	2,873205	2,033486	1,657946	1,435575
111	3	1,732051	3,518943	2,490502	2,030561	1,758214
200	4	2	4,063325	2,875784	2,34469	2,03021
210	5	2,236068	4,542936	3,215224	2,621444	2,269844
211	6	2,44949	4,976537	3,522101	2,871648	2,48649
	7	2,645751	5,375274	3,804304	3,101734	2,685716
220	8	2,828427	5,746409	4,066972	3,315893	2,871151
300	9	3	6,094988	4,313676	3,517036	3,045315
310	10	3,162278	6,424681	4,547013	3,707281	3,210044

Tabel 9.
Aritmetika S^2 dan d_{hkl} pada spesimen baja tipe A2

hkl	S^2	S	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
100	1	1	2,072	1,799	1,267	1,081	1,034
110	2	1,414	2,930	2,544	1,793	1,528	1,462
111	3	1,732	3,589	3,116	2,196	1,872	1,791
200	4	2	4,144	3,598	2,535	2,161	2,068
210	5	2,236	4,633	4,022	2,835	2,416	2,312
211	6	2,450	5,076	4,406	3,105	2,647	2,533
	7	2,646	5,482	4,759	3,354	2,859	2,736
220	8	2,828	5,861	5,088	3,585	3,056	2,925
300	9	3	6,216	5,397	3,803	3,242	3,102
310	10	3,162	6,553	5,688	4,009	3,417	3,270
311	11	3,317	6,872	5,966	4,204	3,584	3,429
222	12	3,464	10,151	8,812	6,210	5,294	3,582

Tabel 10.
Aritmetika S^2 dan d_{hkl} pada spesimen baja tipe A2-APS

hkl	S^2	S	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
100	1	1	2,072	1,799	1,267	1,081	1,034
110	2	1,414	2,930	2,544	1,793	1,528	1,462
111	3	1,732	3,589	3,116	2,196	1,872	1,791
200	4	2	4,144	3,598	2,535	2,161	2,068
210	5	2,236	4,633	4,022	2,835	2,416	2,312
211	6	2,450	5,076	4,406	3,105	2,647	2,533
	7	2,646	5,482	4,759	3,354	2,859	2,736
220	8	2,828	5,861	5,088	3,585	3,056	2,925
300	9	3	6,216	5,397	3,803	3,242	3,102
310	10	3,162	6,553	5,688	4,009	3,417	3,270
311	11	3,317	6,872	5,966	4,204	3,584	3,429
222	12	3,464	10,151	8,812	6,210	5,294	3,582



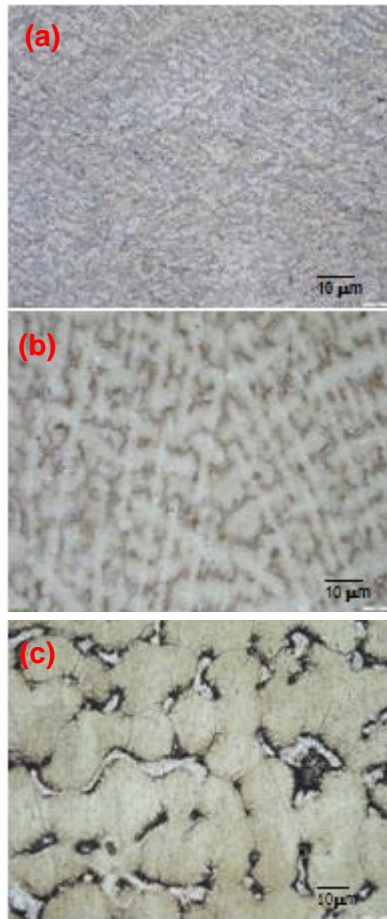
Gambar 3.

Hasil identifikasi profil difraksi sinar-X spesimen: (a) Baja F1, (b) Baja A2 dan (c) Baja A2-APS menggunakan aritmetika Bragg

Hasil tabulasi Tabel 8 memperlihatkan dengan jelas bahwa spesimen baja F1 memiliki deret aritmetika: 2, 4, 6, 8, ... dst. (lihat kotak warna kuning) yang ekuivalen dengan bidang (110), (200), (211), (220), ... dst. maka sesuai referensi pada Tabel 1 bangun struktur kristal baja F1 adalah kubus pusat badan (*bcc*) dengan nilai parameter kisi rerata sebesar: 2,87 Å.

Hal serupa ditunjukkan pada tabulasi Tabel 9 dan Tabel 10 dimana spesimen baja A2 dan A2-APS memiliki deret aritmetika: 3, 4, 8, 11, 12, ... dst. (lihat kotak warna kuning) dimana ekuivalen dengan bidang (111), (200), (220), (311), (222), ... dst. dan merujuk pada Tabel 1 bangun struktur kristal untuk baja A2 dan A2-APS adalah kubus pusat muka (*fcc*) dengan nilai parameter kisi rerata berturutan sebesar: 3,58 Å dan 3,60 Å.

Gambar 3 merupakan pola difraksi sinar-X bahan yang telah berhasil diidentifikasi bangun struktur kristalnya dari bidang refleksi/ indeks Miller yang ditampilkan merupakan korelasi antara formula Bragg dalam Pers. (1) dan deret aritmetika S^2 dalam Pers. (3).



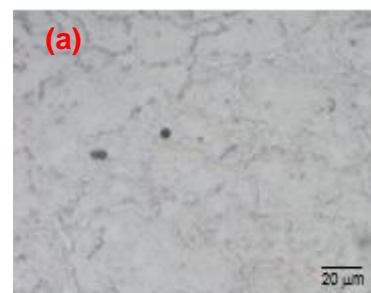
Gambar 4.
Struktur Mikro: (a) Baja F1,
(b) Baja A2 dan (c) Baja A2-APS;
Mikroskop Optik (OM-100x)

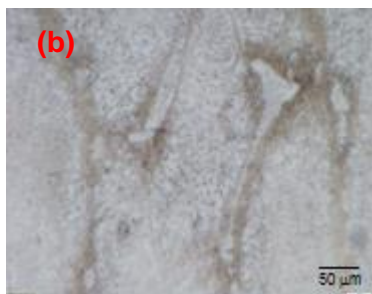
Struktur Mikro. Hasil pengamatan struktur mikro spesimen uji menggunakan mikroskop optik ditampilkan pada Gambar 4 dengan pembesaran 100x. Pada baja tipe F1 dan A2 dengan pembesaran 100x tampak gambaran struktur mikro yang homogen membentuk fasa dendritik yang merupakan ciri dari material yang dicor. Dengan kondisi proses *casting* yang sama, struktur cor pada baja tipe F1 terlihat sangat berbeda, dimana sensitisasi bahan terhadap proses pendinginan⁹⁾ menghasilkan batas butir (*grain boundary*) yang lebih halus dibandingkan dengan batas butir dalam baja tipe A2 yang cenderung sangat jelas batas-batasnya (lihat Gambar 4a dan 4b). Pola butiran bunga es sangat jelas pada struktur mikro permukaan baja tipe A2 yang memperlihatkan jarum-jarum (*needle like*)¹⁰⁾ memanjang dan terorientasi saling tumpang tindih dan jalin menjalin di *spot* pengamatan. Dalam kedua bahan ini terjadi proses presipitasi

di sepanjang batas butir. Dilaporkan pada literatur bahwa presipitat yang terbentuk adalah krom karbida: $Cr_{23}C_6$ ^{3,11,12)}. Presipitat ini tumbuh di sepanjang batas butir yang teramati, dan

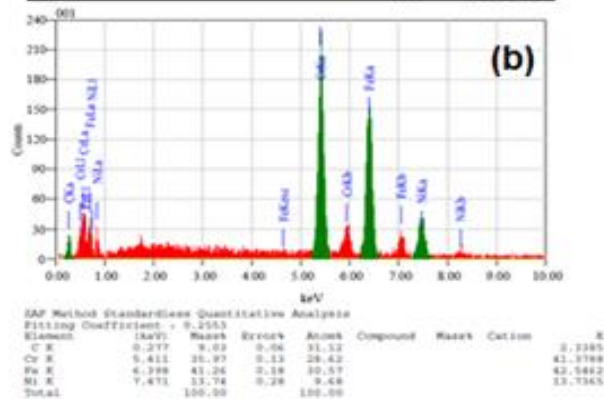
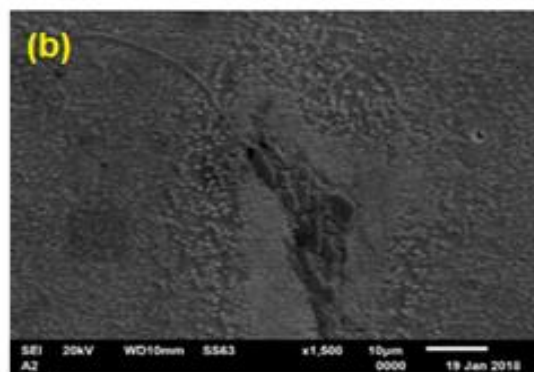
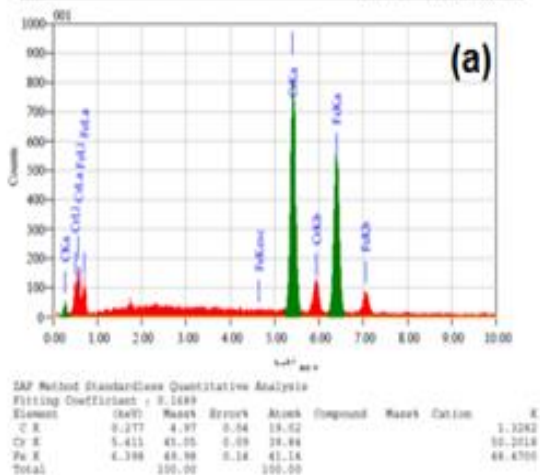
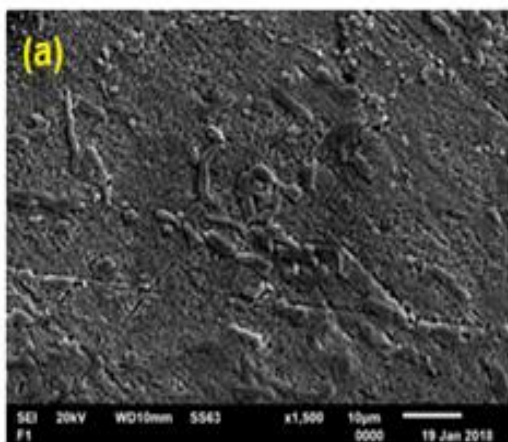
diduga konsentrasi presipitat lebih luas dibatas butir baja tipe A2. Akan tetapi setelah diperlakukan sintering dengan *arc plasma sintering* (APS) selama 2 detik (Gambar 4c), pola butiran yang memanjang pada baja tipe A2, struktur butiran (*grain*)-nya berubah bentuk menjadi agak bulat-bulat (*globular*). Akibat proses pemanasan sintering, terjadi penataan ulang (*rearrangements*) butiran-butiran tersebut saling melebur dan bergabung membentuk koloni yang lebih besar. Demikian juga presipitat yang berbentuk *worm-like* semakin terkonsentrasi melingkupi butiran matriknya.

Gambar 5 memperlihatkan perbesaran gambar struktur permukaan bahan dengan mikroskop optik (OM-1000x). Tampilan Gambar 5b menunjukkan bahwa presipitasi di permukaan baja tipe A2 tersebar di seluruh permukaan spesimen. Butiran (*grain*)-nya berbentuk jarum-jarum memanjang. Sedangkan untuk baja tipe F1 (Gambar 5a) dengan perbesaran yang sama memperlihatkan presipitasi yang tumbuh di sepanjang batas butir. Dari sebarannya terlihat presipitasi baja tipe A2 lebih banyak dibandingkan pada baja tipe F1. Baja merupakan paduan dari Fe dan C, pada fasa feritik hanya mampu melarutkan 0,02% karbon sedangkan pada austenitik hanya mampu melarutkan 2,14% karbon, sehingga jika terlalu banyak unsur yang dimasukkan ke dalam komposisi baja tersebut, akan mencapai titik jenuh dan terjadi presipitasi¹¹⁾.





Gambar 5. Struktur mikro (a) Baja tipe F1 dan (b) Baja tipe A2; Mikroskop Optik(OM-1000x)



Gambar 6. SEM-1500x dan spektrum EDX pada (a) Baja F1, (b) Baja A2.

Pada baja A2 dengan perbesaran 100x tampak struktur mikro yang homogen, tidak terdapat fasa lain, dan berbentuk dendritik yang merupakan ciri dari material yang dicor. Sedangkan pada baja A2 dengan perbesaran 1000x tampak terdapat presipitasi yang tersebar di seluruh spesimen, butir-butirnya berbentuk memanjang karena pengaruh dari *rolling*. Sedangkan pada Baja F1 dengan perbesaran 100x tampak struktur mikro yang homogen tidak terdapat fasa lain dan berbentuk dendritik yang lebih halus dari A2 yang merupakan ciri dari material yang dicor. Sedangkan untuk baja F1 dengan perbesaran 1000x tampak presipitasi yang terkungkung di sepanjang batas butir. Untuk presipitas baja A2 lebih banyak dibandingkan pada F1. Pada A2 yang telah diberi APS didapatkan presipitas yang berwarna putih, berbeda dengan baja F1 dan A2 dimana presipitasnya berwarna hitam. Lebih lanjut jika diamati lebih detail antara gambar 4c (MO-100x) dan 5b (MO-1000x) yang merupakan baja tipe A2 dengan komposisi kimia yang sama maka terlihat perbedaan yang cukup kentara, yaitu presipitasi semakin mengecil/ menipis pada baja A2 yang telah disintering dengan APS.

Spektrum EDX. Hasil pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 1500x untuk menampilkan spektrum *Energy Dispersive X-ray* (EDX) pada seluruh permukaan spesimen baja F1 dan baja A2 yang dapat dilihat pada Gambar 6. Secara semi kuantitatif komposisi kimia bahan yang terukur pada bahan adalah: baja tipe F1, unsur-unsur dominan penyusun bahan adalah (C,Cr,Fe), sedangkan baja tipe A2 didominasi oleh unsur (C,Cr,Fe,Ni). Data pengukuran elemental ini lebih lanjut memperlihatkan bahwa pada baja feritik tipe F1 pembentukan presipitasi menyebar dari batas butir (*grain boundary*) hingga butiran (*grain*), sedangkan pada baja austenitik tipe A2, presipitasi terkonsentrasi pada batas butir saja. Dilaporkan bahwa karena didominasi oleh konten unsur Cr dan unsur C maka krom karbida ($Cr_{23}C_6$)¹²⁾ terbentuk sebagai presipitat di batas butir.

SIMPULAN

Setelah dilakukan pengkajian dengan menggunakan metode aritmatika formula Bragg diperoleh bahwa: Baja tipe F1 berstruktur *body centered cubic* (BCC) dengan parameter kisi $a = 2.87 \text{ \AA}$. Baja tipe A2 berstruktur *face centered cubic* (FCC) dengan parameter kisi $a = 3.59 \text{ \AA}$. Baja tipe A2 yang disintering APS selama 2 detik berstruktur *face centered cubic* (FCC) dengan parameter kisi $a = 3.60 \text{ \AA}$. Dengan asumsi kondisi proses peleburan (*casting*) yang sama, kedua bahan uji memiliki struktur cor yang mirip. Pada baja tipe F1 batas butir (*grain boundary*) yang terbentuk lebih halus dibandingkan dengan batas butir dalam baja tipe A2 yang cenderung sangat terlihat batas-batasnya. Baja tipe A2 setelah diperlakukan sintering dengan *arc plasma sintering* (APS) selama 2 detik, pola butiran yang memanjang berubah bentuk struktur butirannya (*grain*) menjadi agak bulat-bulat (*globular*). Demikian pula butiran presipitat terkonsentrasi melingkupi butiran matrik baja di sepanjang batas butir (*grain boundary*). Pengamatan SEM-EDX memperlihatkan bahwa: presipitat pada baja tipe F1 tersebar di batas butir dan di dalam butir, sedangkan pada baja tipe A2 terletak pada batas butir. Komposisi presipitat pada baja tipe F1 meliputi (C,Cr,Fe). Sedangkan pada baja tipe A2 yaitu C,Cr,Fe,Ni). Dimungkinkan karena konten unsur Cr dan unsur C dominan maka krom karbida ($Cr_{23}C_6$) terbentuk

sebagai presipitat di batas butir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kepala PSTBM dan BSBM. Kami juga berterima kasih kepada: Dr. Ing. Arbi Dimiyati, Drs. Bambang Sugeng, M.T., Imam Wahyono, S.ST., Sumaryo S.ST., Agus Sujatno, A.Md. dan Rohmad Salam, A.Md. atas diskusinya. Selain itu, para penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial dari DIPA 2017.

DAFTAR PUSTAKA

1. Callister, Jr. W. D. and Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering*, SI Version, John Wiley & Sons, Inc, New York, U.S.A., 2011
2. Wiczerzak, K., Bala, P., Stepień, M., Cios, G., Koziel, T., *The Characterization Of Cast Fe-Cr-C Alloy*, Archives of Metallurgy and Materials, Vol.60, No.2, 2015, p779-782
3. Parikin, Ismoyo, A.H., Iskandar, R., and Dimiyati, A., *Residual Stress Measurements on The TIG-Weldjoint of 57Fe15Cr25Ni Austenitic Steel for Structure Material Applications by Means X-Ray Diffraction Techniques*, Makara Journal of Technology-University of Indonesia, 2017, Vol. 21 No. 2, p49-57
4. Parikin, Sugeng, B., Dani, M., dan Sukaryo, S.G., *Ketahanan Oksidasi Baja Super Austenitik 15%Cr-25%Ni pada Temperatur 850 °C*, Jusami (*Indonesia Science and Materials Journals*), Vol. 18 No. 4, 2017, p179-184.
5. Maziasz, P. J., *Development of Creep-Resistant and Oxidation-Resistant Austenitic Stainless Steels for High Temperature Applications*, JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), Volume 70, Issue 1, 2018, pp 66–75
6. Suharyana, *Dasar-Dasar Dan Pemanfaatan Metode Difraksi Sinar-X*. Universitas Sebelas Maret Surakarta, 2012
7. Mo, F., Sun, G., Li, J., Zhang, C., Wang, H., Chen, Y., Liu, Z., Yang, Z., Li, H., Yang, Z., Pang, B., Huang, Y., Tian, Y., Gong, J., Chen, B., Peng, S., *Recent Progress of Residual Stress Distribution and Structural Evolution in Materials and Components by Neutron Diffraction Measurement at*

- RSND*, Quantum Beam Sci. Vol.2, No.15, 2018, p1-19; doi:10.3390/qubs2030015
8. Effendi,N., Jahja,A.K.,Structural Characterization and Its Physical Properties Of Non-Standard A1 Austenite Steel, *Int. Journal of Materials and Mechanical Engineering*, Vol. 3 No.2, 2014, p38-44
 9. Handoyo,Y., Pengaruh Quenching Dan Tempering Pada Baja Jis Grade S45C Terhadap Sifat Mekanis, *Jurnal Imiah Teknik Mesin, Universitas Islam 45 Bekasi*, Vol. 3 No. 2, 2015
 10. Sanchez,J.M., Vicario,I., Albizuri,J., Guraya,T., Koval,N.E., Garcia,J.C. Compound Formation and Microstructure of As-Cast High Entropy Aluminums, *Metals*, vol.8, No.167, 2018, p1-11; doi:10.3390/met8030167
 11. Dani,M., Parikin, Iskandar,R., and Dimiyati,A., Investigation on Precipitations and Defects of the Fe-24Cr-2Si-0.8Mn Ferritic Super Alloy Steel, *J. Sci. Mat. Ind.*, Vol. 18 No. 4, 2017, p173-178
 12. Lee,S.H., Na,H.S. , Lee,K.W., Choe,Y. and Kang,C.Y., Microstructural Characteristics and M23C6 Precipitate Behavior of the Course-Grained Heat-Affected Zone of T23 Steel without Post-Weld Heat Treatment, *Metals*, Vol.8, No.170, 2018, p1-14; doi:10.3390/met8030170.