

SINTESIS PADUAN BARU BAJA OXIDE DISPERSION STRENGTHENED (ODS) FERITIK Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr DENGAN DISPERSOID Y_2O_3 SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL CLADDING ELEMEN BAKAR REAKTOR NUKLIR DENGAN METODE MEKANOSINTESIS

NEW ALLOY SYNTHESIS OF OXIDE DISPERSION STRENGTHENED (ODS) FERRITIC STEEL Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr WITH Y_2O_3 DISPERSOID AS A CANDIDATE FUEL CLADDING MATERIAL FOR NUCLEAR REACTORS USING MECHANOSYNTHESIS METHOD

Hakimul Wafda^{1,3,*}, Djoko Hadi Prajitno², Asril Pramutadi Andi Mustari³, Fahma Roswita^{1,3}

¹Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gd.80, Tangerang Selatan, 15314

²Pusat Riset Teknologi Proses Radiasi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gd.90, Tangerang Selatan, 15314

³Program Studi Ilmu dan Rekayasa Nuklir, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung, 40132

*E-mail korespondensi: hakimul.wafda@brin.go.id

Diterima 12 April 2023, diterima dalam bentuk perbaikan 10 Agustus 2023, disetujui 13 November 2023

ABSTRAK

SINTESIS PADUAN BARU BAJA OXIDE DISPERSION STRENGTHENED (ODS) FERITIK Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr DENGAN DISPERSOID Y_2O_3 SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL CLADDING UNTUK REAKTOR NUKLIR DENGAN METODE MEKANOSINTESIS. Bahan struktur merupakan salah satu kunci penting dalam penelitian reaktor nuklir generasi keempat. Sejak peristiwa kecelakaan di Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Fukushima-Daiichi, telah terjadi peningkatan pengembangan Accident Tolerant Fuel (ATF) cladding atau kelongsong bahan bakar toleran kecelakaan untuk menghindari kecelakaan reaktor air ringan. Maka dari itu inovasi perekayasa ATF merupakan salah satu kegiatan dalam litbang material maju yang sedang banyak dikembangkan. Kandidat material yang paling menjanjikan untuk ATF cladding adalah baja yang diperkuat dengan Oxide Dispersion Strengthened (ODS). Dalam penelitian ini baja ODS feritik Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr- Y_2O_3 disintesis dengan metode mekanosintesis menggunakan alat Planetary Ball Mill (PBM) dengan variasi komposisi Zr sebesar 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%. Mekanosintesis dilakukan selama 8 jam dengan menggunakan bola stainless steel. Perbandingan berat sampel dengan bola yaitu 1:10. Karakterisasi sampel dilakukan menggunakan mikroskop optik, X-Ray Diffraction (XRD), dan Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS). Hasil observasi menunjukkan homogenitas yang baik pada bahan hasil sintesis.

Kata kunci: Kelongsong, reaktor nuklir, baja ODS, mekanosintesis

ABSTRACT

NEW ALLOY SYNTHESIS OF ODS FERRITIC STEEL Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr WITH Y_2O_3 DISPERSOID AS A CANDIDATE CLADDING MATERIAL FOR NUCLEAR REACTORS USING MECHANOSYNTHESIS METHOD. Structural materials are one of the important keys in fourth-generation nuclear reactor research. Since the incident at the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant, there has been an increase in the development of Accident Tolerant Fuel (ATF) cladding to avoid light water reactor accidents. Therefore, ATF engineering innovation is one of the activities in the research and development of advanced materials currently being developed. Oxide Dispersion Strengthened (ODS) steel is the most promising material candidate for ATF cladding. In this study, the ODS ferritic steel Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr- Y_2O_3 was synthesized by the mechanosynthesis method using a Planetary Ball Mill (PBM) with variations in the Zr composition of 0%, 0.5%, 1%, and 1.5%. Mechanosynthesis was carried out for 8 hours using a stainless steel ball. The weight ratio of the sample to the ball is 1:10. The characterization was carried out using an optical microscope, X-Ray Diffraction, and Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive System (SEM-EDS). The observation results showed good homogeneity of the synthesized material.

Keywords: Cladding, nuclear reactor, ODS steel, mechanosynthesis

PENDAHULUAN

Salah satu material temperatur tinggi yang penting dikembangkan untuk keselamatan reaktor nuklir adalah material untuk komponen struktur reaktor khususnya kelongsong. Pembuatan material kelongsong elemen

bakar nuklir pada operasi temperatur tinggi sangat bermanfaat dalam pengembangan desain struktur reaktor nuklir masa depan. Penelitian dan pengembangan material kelongsong elemen bakar nuklir juga dilakukan untuk meningkatkan keselamatan nuklir khususnya pada saat terjadi kecelakaan sehingga pemilihan material dengan sifat nuklir yang ditingkatkan sebagai kandidat *Accident-Tolerant Fuels* (ATF) menjadi penting [1]–[3]. Beberapa material kelongsong telah dikembangkan di Laboratorium Fisika Material BRIN-Tamansari Bandung untuk dimanfaatkan dalam pengembangan desain struktur reaktor masa depan [4], [5]. Penelitian dan pengembangan material untuk kelongsong elemen bakar nuklir yang sedang berkembang dengan pesat saat ini adalah baja *Oxide-Dispersion Strengthened* (ODS) [6]–[9]. Berdasarkan hasil penelitian D.T. Hoelzer bahwa baja paduan dengan dispersi partikel oksida ini mampu berfungsi dengan baik di suhu tinggi yaitu di atas 750 °C sehingga memungkinkan digunakan sebagai kandidat ATF *cladding*. Dalam fasilitas nuklir beberapa baja ODS komersial dengan sebaran nano oksida menunjukkan performa yang baik pada pemakaian di kondisi suhu tinggi [10]. Selain mempunyai kekuatan tinggi, paduan ini juga tahan terhadap korosi, memiliki resistensi *creep* dan dapat bekerja pada lingkungan paparan radiasi neutron [11]–[14]. Untuk meningkatkan ketahanan baja ODS terhadap kondisi radiasi dan korosi maka pemilihan disperoid atau unsur oksida memegang peranan penting. Salah satu pilihan disperoid baja ODS adalah yttria oksida (Y_2O_3), karena penambahan partikel yttria oksida menjadikan baja ODS memiliki sifat ketahanan radiasi yang baik karena akan menstabilkan fasa dibawah kondisi radiasi [15]–[17]. Baja yang diperkuat dispersi oksida dengan 8-9 wt% Cr memiliki sifat *creep* dan ketahanan radiasi yang sangat baik karena adanya nanopartikel dalam matriks yang bisa menghambat dislokasi dan migrasi batas butir [18]–[20].

Penambahan Zirkonium (Zr) ke baja feritik ODS-FeCrAl dapat mengubah struktur kristal partikel oksida dominan, meningkatkan koherensi antarmuka partikel-matriks dan morfologi dispersi sampai batas tertentu. Zirkonium merupakan elemen paduan penting terutama pada paduan ODS-FeCrAl dalam hal ini disperoid yang digunakan adalah Y_2O_3 . Zirkonium dapat menghambat pembentukan partikel kasar Y-Al-O pada paduan ODS-FeCrAl dan digantikan dengan partikel halus Y-Zr-O. Dalam penelitian Jian Ren dan R Gao dikatakan bahwa energi ikat partikel Y-Zr-O lebih tinggi dibandingkan dengan partikel Y-Al-O dan partikel Y-Ti-O pada matriks Fe, artinya fasa Y-Zr-O lebih mudah dibentuk dan lebih stabil dibandingkan dengan dua fasa oksida lainnya [21], [22]. Stabilitas fasa oksida yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju nukleasi sehingga mengarah pada pembentukan partikel halus. Dengan memvariasi jumlah Zr diharapkan dapat mengetahui variasi Zr yang paling baik dengan parameter distribusi elemen, ukuran partikel rata-rata serta fasa dari masing-masing sampel.

Menurut X. Han *et al.* diketahui bahwa penambahan wt% Zr dapat secara efektif meningkatkan *coarsening resistance* oksida [23]. Dalam penelitian Peng Dou juga diketahui penambahan paduan Zr dapat menambah kekuatan dan ketahanan terhadap kerusakan iradiasi pada suhu tinggi sehingga akan membantu optimalisasi paduan ODS di masa yang akan datang terutama untuk aplikasi reaktor nuklir maju [24]. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan paduan baru ODS feritik menggunakan disperoid Y_2O_3 dengan variasi komposisi Zr. Pembahasan dalam penelitian ini dibatasi sampai kriteria struktur mikro dari bahan.

METODOLOGI

Proses sintesis baja ODS-Yttria dilakukan dengan mempersiapkan bahan yang diperlukan antara lain serbuk Fe (99,8%), Cr (98,8%), Al (99,5%), W(98,5%), Ti(99,9%), Zr(99,9%) dan nano-yttria(99,8%). Pada penelitian ini terdapat 4 sampel dengan komposisi masing-masing sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

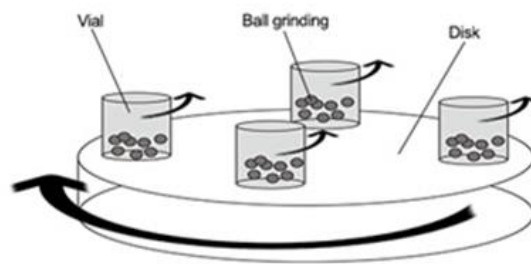
Tabel 1. Komposisi material

Nomor Sampel	Komposisi (wt%)						
	Fe	Cr	Al	W	Ti	Zr	Y_2O_3
1	Bal.	9	5	1	0.3	-	0.35
2	Bal.	9	5	1	0.3	0.5	0.35
3	Bal.	9	5	1	0.3	1	0.35
4	Bal.	9	5	1	0.3	1.5	0.35

Sampel serbuk ditimbang sesuai dengan komposisi pada Tabel 1 menggunakan neraca analitik dengan masing-masing sampel memiliki massa total 10 g. Proses mekanosintesis dilakukan dengan cara bahan serbuk diproses *milling* menggunakan PBM dengan *ball grinding* berbahan *stainless steel* yang memiliki ukuran 5-11 mm

dengan rasio berat 1:10. Proses *mixing* dan *alloying* dilakukan dengan frekuensi 60 Hz selama 8 jam pada temperatur ruangan. Skema PBM seperti terlihat pada Gambar 1.

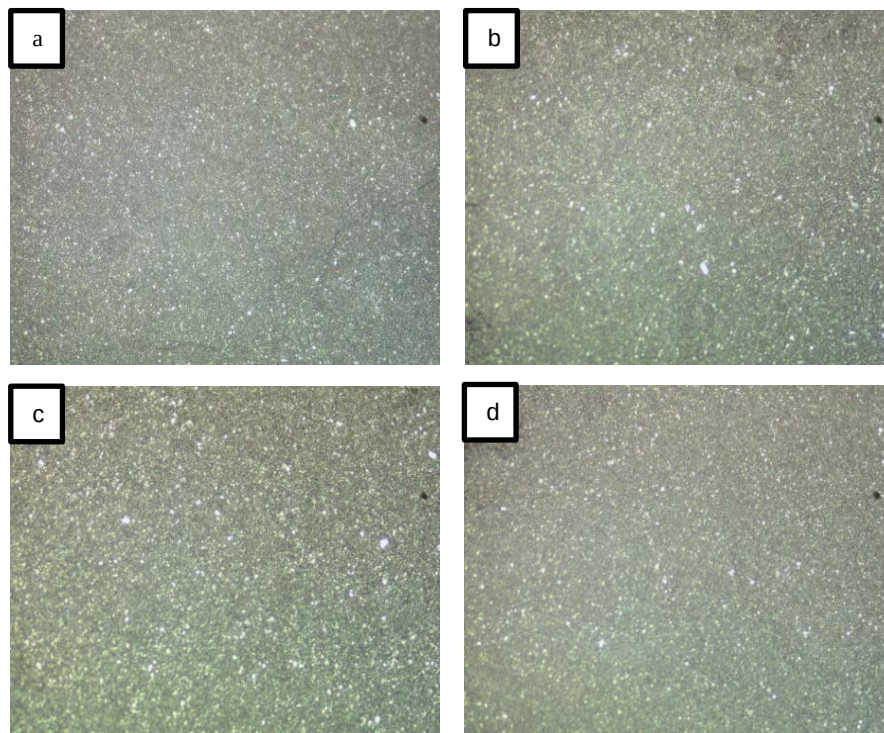
Sampel hasil *milling* selanjutnya dikarakterisasi yang merupakan kegiatan penting untuk analisis, evaluasi dan optimasi hasil khususnya komposisi material baru baja ODS-Yttria untuk aplikasi di fasilitas nuklir. Sesuai dengan target, karakterisasi difokuskan pada struktur, fasa dan kristal untuk analisis dan evaluasi mekanisme penguatan bahan. Mikroskop optik digunakan untuk mengetahui struktur awal sampel. Kemudian untuk struktur lanjutan digunakan pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) bertipe JEOL JSM IT300 untuk deteksi dan analisis butir, presipitat serta proses penghalusan butir. Uji *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) dengan tipe *Oxford XMax 20* digunakan untuk mengetahui komposisi dan homogenitas material. Difraksi sinar-X dilakukan dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) tipe *Bruker D8 Advance* menggunakan radiasi $Cu K\alpha$ ($\lambda=0,15406nm$) untuk mengetahui fasa dari material baja ODS.



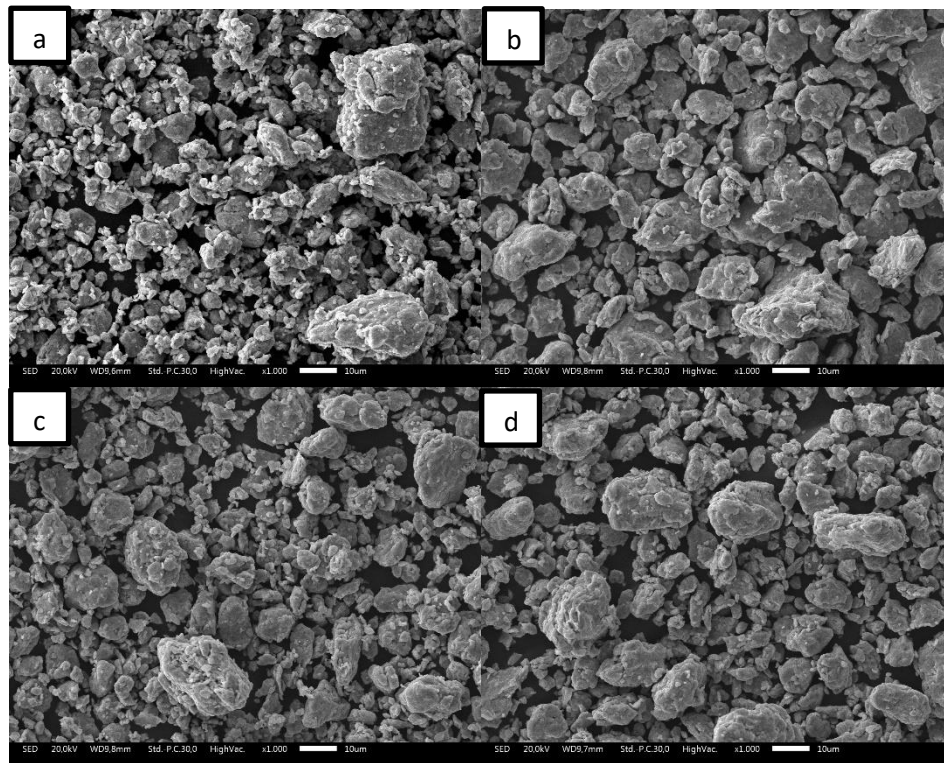
Gambar 1. Skema alat *planetary ball mill*

HASIL DAN PEMBAHASAN

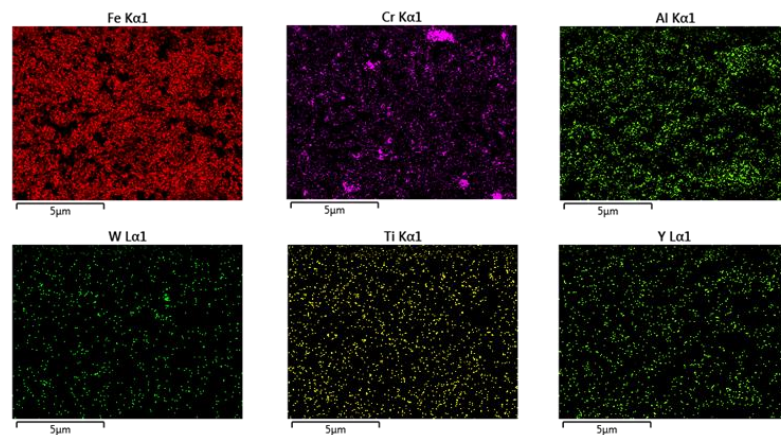
Hasil pengamatan mikroskop optik yang terlihat pada Gambar 2. Secara umum tidak ada perbedaan yang signifikan antara keempat sampel. Menurut Gambar 2 terlihat bahwa secara umum partikel serbuk telah mengalami proses paduan mekanik. Proses paduan tersebut meliputi pengelasan dingin, *fracturing* dan pengelasan berulang selama proses di *planetary ball mill*. Pengelasan dingin merupakan proses pengelasan dalam kondisi padat menggunakan tekanan pada suhu ruang untuk menghasilkan penyatuan logam yang kokoh. Pengelasan dingin ini terjadi pada saat proses *milling* di dalam alat *high energy milling* karena pada saat proses terjadi tekanan yang memungkinkan terjadinya proses pengelasan dingin.



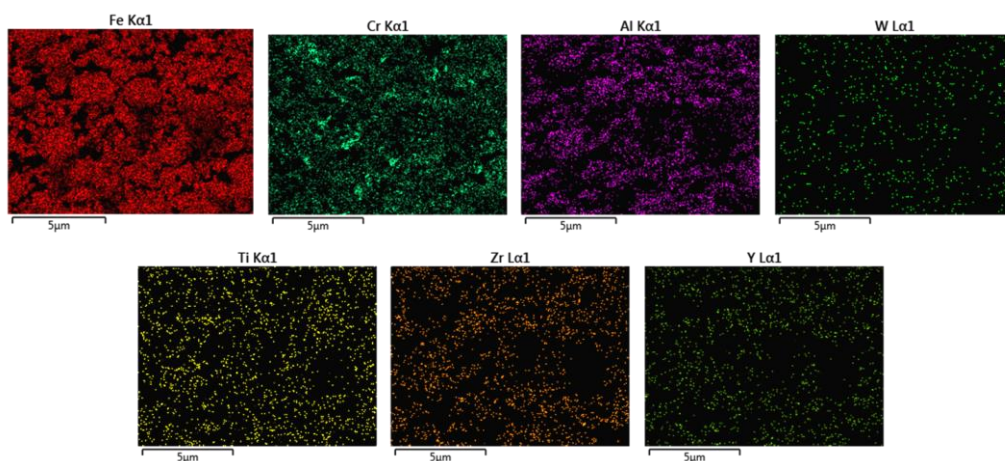
Gambar 2. Hasil pengamatan mikroskop optik (a) Sampel 1 (b) Sampel 2 (c) Sampel 3 dan (d) Sampel 4



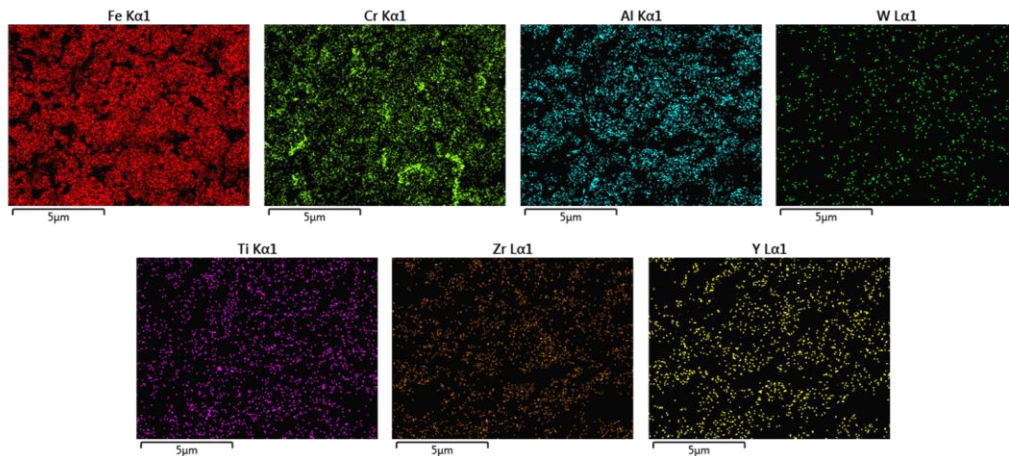
Gambar 3. Hasil pengamatan menggunakan SEM dengan perbesaran x1000 pada setiap sampel (a) Sampel 1 (b) Sampel 2 (c) Sampel 3 (d) Sampel 4



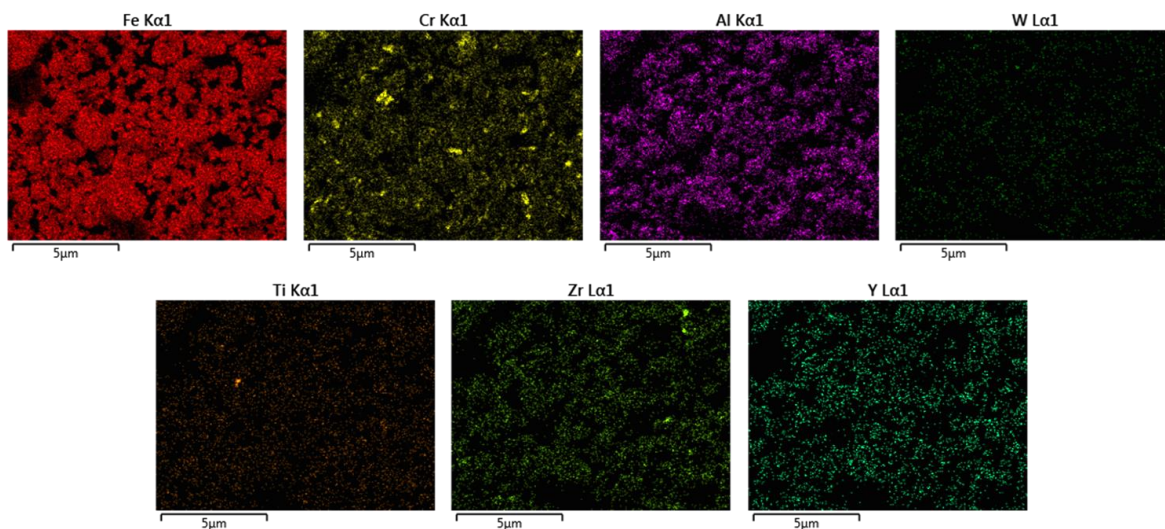
Gambar 4. Hasil *mapping element* sampel 1



Gambar 5. Hasil *mapping element* sampel 2



Gambar 6. Hasil *mapping element* sampel 3



Gambar 7. Hasil *mapping element* sampel 4

Gambar 3 a-d menunjukkan hasil SEM dari struktur mikro setelah proses *milling* untuk semua sampel. Terlihat bahwa struktur mikro dari serbuk cukup seragam sesuai dengan harapan (ukuran/morfologi) setelah melewati proses *milling*. Sampel 1 menunjukkan ukuran partikel rata-rata yang lebih kecil dari sampel yang lain.

Gambar 4-7 menunjukkan distribusi elemen dari semua sampel dengan menggunakan metoda *element mapping* pada EDS. Gambar 4 hanya menunjukkan distribusi 6 elemen karena tidak memasukkan elemen Zr, sedangkan gambar lain memberikan informasi distribusi Zr. Untuk sampel 1, secara umum semua elemen telah menunjukkan sebaran yang merata, walaupun pada area tertentu masih terdapat distribusi dengan konsentrasi tinggi dan rendah. Sampel 2, 3 dan 4 (Gambar 5-7) memperlihatkan distribusi 6 elemen yang cukup merata seperti ditunjukkan oleh sampel 1. Distribusi elemen Zr dari sampel 2, 3 dan 4 juga terlihat cukup merata. Data kuantitatif dari EDS ditunjukkan pada Gambar 8, terlihat bahwa material-material dengan komposisi besar saat pencampuran dapat terdeteksi dengan mudah dan telah sesuai dengan perbandingan komposisinya. Namun, untuk material dengan komposisi rendah seperti Ti dan Y hampir tidak terdeteksi karena batas sensitivitas EDS.

Distribusi elemen dalam sampel juga diperiksa menggunakan *mapping element* seperti pada Gambar 4 (tanpa elemen Zr), Gambar 5 (elemen Zr 0,5%), Gambar 6 (elemen Zr 1%), dan Gambar 7 (elemen Zr 1,5%). Berdasarkan Gambar 4-7 menunjukkan distribusi elemen yang homogen pada semua unsur. Hal ini menunjukkan material-material serbuk telah berhasil terpadu dengan baik.

Hasil pengukuran EDS sampel 1 - 4 menggunakan area didapatkan hasil spektrum seperti pada Gambar 4-7. Pada Gambar 4 (sampel 1) tidak terlihat sebaran elemen Zr sedangkan untuk sampel 2-4 terlihat adanya sebaran Zr. Rincian hasil pada Tabel 2-4 untuk setiap sampel dapat terlihat wt% yang didapatkan hampir mendekati dari hasil riil. Akan tetapi, ada beberapa unsur yang tidak terdeteksi seperti unsur Ti dan Y. Hal ini disebabkan karena limitasi alat EDS yang tidak bisa mendeteksi komposisi material yang terlampaui kecil. Selanjutnya masing-masing tabel komposisi EDS memperlihatkan wt% dari setiap sampel dengan hasil mendekati hasil riil yang diperoleh. Hanya unsur Y saja yang tidak bisa terdeteksi.

Tabel 2. Komposisi EDS dalam wt% sampel 1

Elemen	wt%
Al	5,21
Ti	0,00
Cr	9,11
Fe	84,25
Y	0,00
Zr	0,00
W	1,43
Total	100,00

Tabel 3. Komposisi EDS dalam wt% sampel 2

Elemen	wt%
Al	5,21
Ti	0,24
Cr	9,20
Fe	84,37
Y	0,00
Zr	0,00
W	0,98
Total	100,00

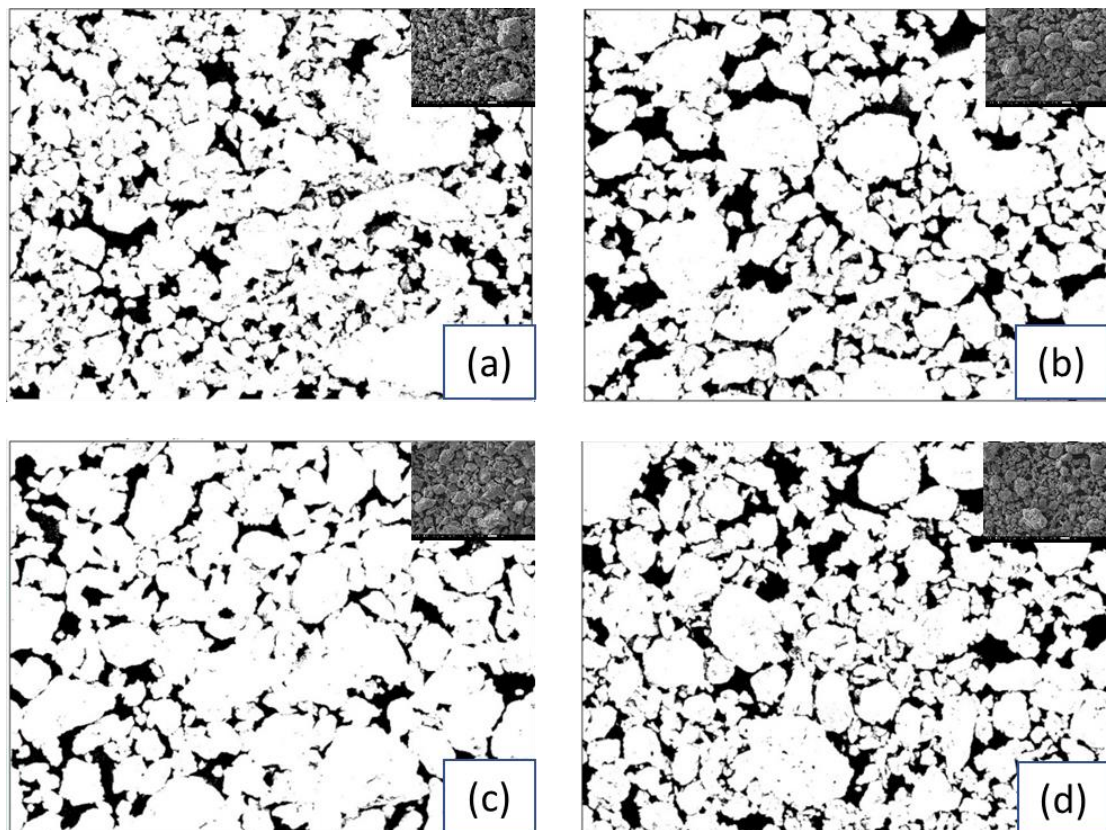
Tabel 4. Komposisi EDS dalam wt% sampel 3

Elemen	wt%
Al	5,43
Ti	0,00
Cr	9,86
Fe	83,72
Y	0,00
Zr	0,00
W	0,99
Total	100,00

Tabel 5. Komposisi EDS dalam wt% sampel 4

Elemen	wt%
Al	5,43
Ti	0,00
Cr	8,42
Fe	83,29
Y	0,00
Zr	1,33
W	1,54
Total	100,00

Gambar 8 menunjukkan hasil transformasi ke 8-bit dengan menggunakan *ImageJ* untuk perhitungan ukuran partikel. Kemudian dilakukan pengukuran ukuran partikel dengan menggunakan *software ImageJ*. Hasil dari pengukuran menggunakan *ImageJ* didapatkan ukuran partikel rata-rata yang ditunjukkan pada Tabel 6.

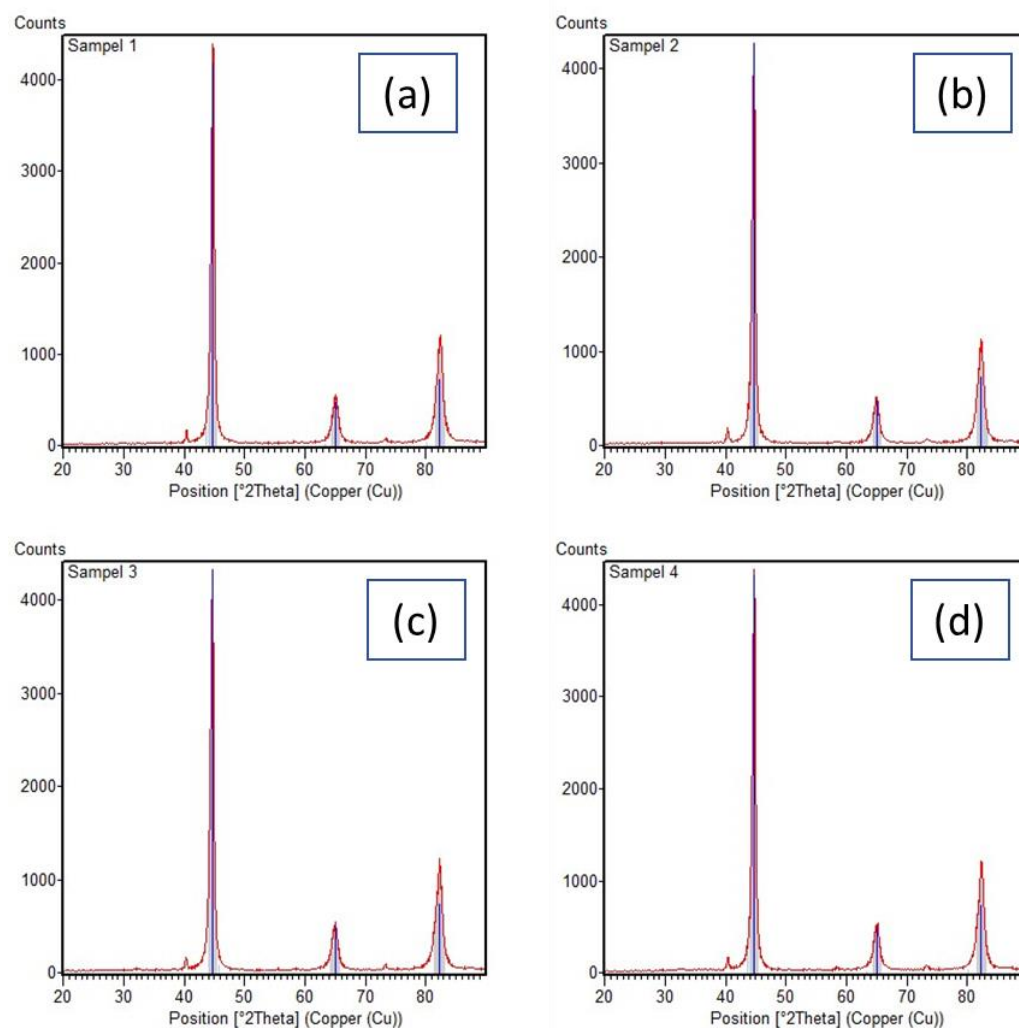


Gambar 8. Pengukuran menggunakan *ImageJ* dengan mode 8 bit untuk (a) sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3 dan (d) sampel 4.

Tabel 6. Hasil pengukuran menggunakan software *ImageJ*

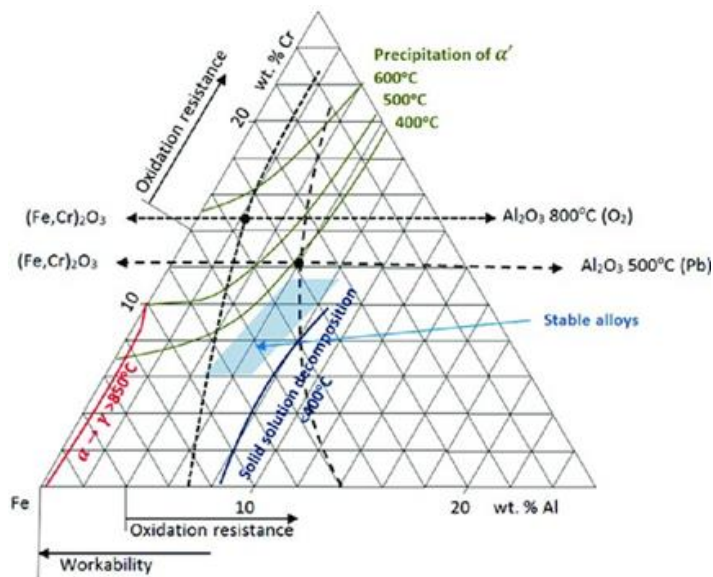
Sampel nomor	Ukuran partikel rata-rata (nm)	Luas area (nm ²)	Luas area/ukuran partikel rata-rata (nm)
1	26.375,63	1.819.919,10	69
2	134.628,89	11.443.456,42	85
3	69.786,45	6.559.927,05	94
4	258.389,97	14.469.838,76	56

Hasil pengukuran luas area/ukuran partikel rata-rata yang didapatkan tidak berbeda secara signifikan. Ukuran terkecil didapatkan pada sampel 4 sebesar 56 nm dan ukuran terbesar pada sampel 3 dengan ukuran 96 nm.



Gambar 9. Hasil pengujian XRD (a) Sampel 1 (b) Sampel 2 (c) Sampel 3 dan (d) Sampel 4

Seluruh hasil XRD menunjukkan formasi *peak* yang hampir sama artinya fasa-fasa yang muncul diantara keempat sampel adalah sama (fasa major α -Fe). Komposisi yang didapatkan fasa α -Fe dapat dikonfirmasi dengan diagram fasa Fe-Cr-Al pada Gambar 10. Hasil ini sesuai dengan komposisi yang didapatkan dari EDS. Berdasarkan hasil analisis XRD didapatkan parameter kisi sampel 1 adalah a (Å) 2,8662, b (Å) 2,8662 dan c (Å) 2,8662, kemudian sampel 2 dan 3 adalah a (Å) 2,8660, b (Å) 2,8660 dan c (Å) 2,8660 serta sampel 4 a (Å) 2,8670, b (Å) 2,8670 dan c (Å) 2,8670 sehingga sistem kristal dari hasil XRD adalah kubik. Hasil XRD menunjukkan bahwa material telah terpadu pada saat dilakukan proses *milling*.



Gambar 10. Skema diagram fasa terner Fe-Cr-Al [25]

KESIMPULAN

Paduan baru baja feritik ODS telah didapatkan dengan metode mekanosintesis. Berdasarkan hasil *mapping* sebaran terlihat merata sehingga membuktikan bahwa material-material yang telah diproses dengan metode mekanosintesis terpadu dengan baik. Homogenitas paduan sesuai dengan target yang diharapkan dan dapat dikonfirmasi dengan hasil EDS. Ukuran luas area/rata-rata ukuran partikel terkecil didapatkan pada sampel 4 dengan ukuran 56 nm dan ukuran terbesar pada sampel 3 dengan ukuran 96 nm. Hasil XRD menunjukkan pembentukan fasa major α -Fe.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BRIN dan ITB yang telah membantu pelaksanaan kegiatan penelitian ini. Penelitian ini didukung program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) dan program Riset ITB nomor : 324H/IT1.C02/KU/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. J. Zinkle *et al.*, "Development of Next Generation Tempered and ODS Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steels for Fusion Energy Applications."
- [2] G. R. Odette, "On the status and prospects for nanostructured ferritic alloys for nuclear fission and fusion application with emphasis on the underlying science," *Scr Mater*, vol. 143, pp. 142–148, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.scriptamat.2017.06.021.
- [3] B. J. Merrill, S. M. Bragg-Sitton, and P. W. Humrickhouse, "Modification of MELCOR for severe accident analysis of candidate accident tolerant cladding materials," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 315, pp. 170–178, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.02.021.
- [4] E. A. Basuki *et al.*, "Isothermal Oxidation Behavior of Ferritic Oxide Dispersion Strengthened Alloy at High Temperatures," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 54, no. 2, pp. 370–382, Mar. 2022, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.2.10.
- [5] H. Wafda, D. H. Prajitno, and V. Trisnawan, "Synthesis of Zr-Nb-Mo-Y-Sn alloys for fuel cladding material for PWR small-medium nuclear reactor," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Nov. 2021. doi: 10.1063/5.0066918.
- [6] Bandriyana, A. Sujatno, R. Salam, B. Sugeng, and A. Dimiyati, "High temperature Oxidation of ODS alloy with zirconia dispersions synthesized using Arc Plasma Sintering," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/176/1/012047.

- [7] M. Taguchi, H. Sumitomo, R. Ishibashi, and Y. Aono, "Effect of Zirconium Oxide Addition on Mechanical Properties in Ultrafine Grained Ferritic Stainless Steels," *Materials Transactions - MATER TRANS*, vol. 49, pp. 1303–1310, Jun. 2008, doi: 10.2320/matertrans.MRA2008036.
- [8] M. Lambrecht and L. Malerba, "Positron annihilation spectroscopy on binary Fe–Cr alloys and ferritic/martensitic steels after neutron irradiation," *Acta Materialia - ACTA MATER*, vol. 59, pp. 6547–6555, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.actamat.2011.06.046.
- [9] T. K. Kim *et al.*, "Current Status and Future Prospective of Advanced Radiation Resistant Oxide Dispersion Strengthened Steel (ARROS) Development for Nuclear Reactor System Applications," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 572–594, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.12.005>.
- [10] D. T. Hoelzer, "History and Outlook of ODS/NFA Ferritic Alloys for Nuclear Applications."
- [11] H. Zhang *et al.*, "Processing and microstructure characterisation of oxide dispersion strengthened Fe-14Cr-0.4Ti-0.25Y₂O₃ ferritic steels fabricated by spark plasma sintering," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 464, pp. 61–68, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.jnucmat.2015.04.029.
- [12] M. A. Meyers and K. K. Chawla, *Mechanical behavior of materials*. Cambridge University Press, 2009.
- [13] A. García-Junceda, N. Garcia, M. Campos, M. Cartón Cordero, and J. Torralba, "Effect of Zirconium on the Microstructure and Mechanical Properties of an Al-Alloyed ODS Steel Consolidated by FAHP," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 98, Jun. 2015, doi: 10.1111/jace.13691.
- [14] L. Toulbi *et al.*, "Assessment of a new fabrication route for Fe–9Cr–1W ODS cladding tubes," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 428, pp. 47–53, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jnucmat.2011.12.013.
- [15] H. Yu *et al.*, "Radiation tolerance of alumina scale formed on FeCrAl ODS ferritic alloy," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 29, p. 101102, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.101102>.
- [16] M. G. Petaccia and J. L. Gervasoni, "Nano-yttria in oxide dispersion strengthened tungsten under alpha particle irradiation," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 20, p. 100681, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100681>.
- [17] D. Kumar, U. Prakash, V. v Dabhade, K. Laha, and T. Sakthivel, "Influence of Yttria on Oxide Dispersion Strengthened (ODS) Ferritic Steel," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 2, Part 1, pp. 3909–3913, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.646>.
- [18] K. Verhiest *et al.*, "Advances in the development of corrosion and creep resistant nano-yttria dispersed ferritic/martensitic alloys using the rapid solidification processing technique," *Ceram Int*, vol. 40, no. 9, Part A, pp. 14319–14334, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.023>.
- [19] L. Dai, Y. Liu, and Z. Dong, "Size and structure evolution of yttria in ODS ferritic alloy powder during mechanical milling and subsequent annealing," *Powder Technol*, vol. 217, pp. 281–287, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.039>.
- [20] P. Susila, D. Sturm, M. Heilmaier, B. S. Murty, and V. Subramanya Sarma, "Effect of yttria particle size on the microstructure and compression creep properties of nanostructured oxide dispersion strengthened ferritic (Fe–12Cr–2W–0.5Y₂O₃) alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 13, pp. 4579–4584, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.078>.
- [21] J. Ren, L. Yu, Y. Liu, C. Liu, H. Li, and J. Wu, "Effects of Zr addition on strengthening mechanisms of Al-alloyed high-Cr ODS steels," *Materials*, vol. 11, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.3390/ma11010118.
- [22] R. Gao, L. L. Xia, T. Zhang, X. P. Wang, Q. F. Fang, and C. S. Liu, "Oxidation resistance in LBE and air and tensile properties of ODS ferritic steels containing Al/Zr elements," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 455, no. 1, pp. 407–411, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.07.028>.
- [23] X. Han *et al.*, "A comparison study of change in hardness and microstructures of a Zr-added FeCrAl ODS steel irradiated with heavy ions," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 841, p. 143050, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143050>.
- [24] P. Dou, S. Jiang, L. Qiu, and A. Kimura, "Effects of contents of Al, Zr and Ti on oxide particles in Fe–15Cr–2W–0.35Y₂O₃ ODS steels," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 531, p. 152025, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152025>.

- [25] B. A. Tarasov, A. v Osintsev, M. D. Savelyev, I. I. Kononov, and M. S. Tarasova, "Short-term Mechanical Properties of Fe-Cr-Al-Si Alloys," *KnE Materials Science*, vol. 4, no. 1, p. 491, May 2018, doi: 10.18502/kms.v4i1.2202.