



ANALISA UKURAN PARTIKEL SERBUK KOMPOSIT NiCrAl DENGAN PENAMBAHAN REAKTIF ELEMEN UNTUK APLIKASI LAPISAN TAHAN PANAS

Resetiana Dwi Desiati^{a,*}, Ani Sugiarti^a, Safitry Ramandhany^{a,b}

^aPusat Penelitian Fisika - LIPI

Gedung 440-442 Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15310

^bProdi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri (UIN) Syarif Hidayatullah Jakarta, 15412

*E-mail: rese001@lipi.go.id

Masuk Tanggal : 13-08-2017, revisi tanggal : 16-05-2018, diterima untuk diterbitkan tanggal 21-06-2018

Intisari

Dalam makalah ini dibahas mengenai ukuran sampel serbuk NiCrAl yang ditambahkan reaktif elemen yttrium (Y), silikon (Si), hafnium (Hf), dan zirkonium (Zr) menjadi paduan NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, NiCrAlZr dengan proses *milling* menggunakan *ball mill* selama 36 jam dengan kecepatan *milling* 25 Hz atau 1500 rpm dan perbandingan antara serbuk dengan *ball mill* adalah 1:2. SEM (*scanning electron microscopy*) digunakan untuk mengkarakterisasi serbuk paduan yang bertujuan untuk mengetahui morfologi serbuk seperti bentuk dan ukuran partikel. Gambar *digital* dari hasil karakterisasi SEM diolah menggunakan *software* ImageJ untuk mengetahui ukuran partikelnya dan hasil pengukurannya dibandingkan dengan data hasil karakterisasi menggunakan PSA (*particle size analyzer*). Analisis serbuk NiCrAl pada partikel saat 0 jam (sebelum *milling*) berdasarkan data PSA bernilai rata-rata 44,04 μm sedangkan data pengolahan ImageJ untuk klasifikasi serbuk paduan bernilai rata-rata 46,98 μm . Disamping itu untuk klasifikasi partikel pada serbuk NiCrAl setelah 36 jam *milling* berdasarkan data PSA bernilai rata-rata 71,12 μm sedangkan data pengolahan ImageJ bernilai rata-rata 67,93 μm . Metode analisis tersebut juga dilakukan untuk serbuk NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, dan NiCrAlZr. Sehingga berdasarkan hasil analisa dapat diketahui bahwa pengolahan gambar digital SEM menggunakan ImageJ memiliki keakuratan kurang lebih sebesar 80% dari data PSA. Hal ini disebabkan dari bentuk serbuk paduan yang tidak homogen dan sebarannya yang tidak merata. Selain itu pula dapat diketahui juga bahwa sampel serbuk paduan NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, NiCrAlZr setelah pemilinan selama 36 jam mengalami perbesaran ukuran dari kondisi awal atau 0 jam yang disebabkan selama proses pemilinan mengalami aglomerasi dan *cold welding*. Penambahan reaktif elemen dengan komposisi kecil pada NiCrAl tidak berdampak pada ukuran partikel.

Kata Kunci: Ukuran partikel, NiCrAl, reaktif elemen

Abstract

In this paper we discuss about the particle size of NiCrAl powder in addition to reactive elements, i.e. yttrium (Y), silicon (Si), hafnium (Hf), and zirconium (Zr) to produce compound powder of NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, and NiCrAlZr produced by milling process using ball mill for 36 hours at rotating speed of 25 Hz or 1500 rpm and the ball to powder ratio (BPR) of 1:2. Scanning electron microscopy (SEM) was used to characterize the powder sample to understand the morphology of the sample such as particle shape and size. Digital picture of SEM results was analyzed using free software ImageJ to understand the particle size and the results was compared by using characterization results of Particle Size Analyzer (PSA). Analysis of NiCrAl powder on at 0 hour (before milling) has a value of 44.04 μm based on PSA data, while based on ImageJ processing data NiCrAl powder has an average value of 46.98 μm . On the contrary, the PSA data on the classification of NiCrAl powder after 36 hours of milling time has a particle size of 71.12 μm whereas ImageJ processing data has an average value of 67.93 μm . These analysis methods have also been applied to NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, and NiCrAlZr powders. Therefore, analysis results reveal that the digital processing of SEM image using ImageJ has an accuracy value of about 80% compared with PSA data. It is caused by the shape of powder sample which was not homogenous and not well-distributed. In addition, the SEM results show that the particle size of compound powder of NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, and NiCrAlZr after 36 hours was larger than the initial condition or 0

hours of milling time due to agglomeration and cold welding during milling process. The addition of reactive elements with small compositions to NiCrAl has no impact on particle size.

Keywords: Particle size, NiCrAl, reactive element

1. PENDAHULUAN

NiCrAl adalah suatu paduan material yang umumnya dipakai untuk bahan pelapis dalam hal meningkatkan ketahanan korosi atau oksidasi material yang diaplikasikan pada suhu tinggi seperti pada mesin turbin pesawat terbang atau mesin pembangkit listrik. Dalam perpaduannya dibutuhkan suatu reaktif elemen (RE) untuk meningkatkan daya ikat lapisan protektif sehingga memperpanjang usia pakai dari komponen sudu turbin pesawat terbang. yttrium (Y), silikon (Si), hafnium (Hf), ataupun zirconium (Zr) merupakan reaktif elemen (RE) yang ditambahkan pada paduan material NiCrAl.

Jumlah RE yang digunakan tidak lebih dari 1 %berat dan tidak kurang dari 0,1 %berat dari total masa keseluruhan. Hal ini dikarenakan apabila jumlah RE memiliki kadar $\geq 1\%$ atau $\leq 0,1\%$ maka lapisan oksida protektif akan mudah terkelupas saat diaplikasikan. Justifikasi prosentase berat RE berdasarkan pada studi yang dilakukan oleh Mahesh, dkk. [1] mengenai lapisan NiCrAlY yang ditambahkan reaktif element cerium sebesar 0,4 %berat pada substrat superalloy menggunakan teknik HVOF menyatakan bahwa mikrostruktur lapisan yang terbentuk sangat baik tanpa ada retakan tidak hanya pada lapisan tetapi juga pada daerah batas antara lapisan dan substrat. Oleh karena itu, untuk mengetahui karakteristik dari masing-masing unsur elemen terhadap material pelapis NiCrAl maka diperlukan analisa dari partikel paduan tersebut.

Ukuran partikel pada material pelapis secara signifikan dapat mempengaruhi oksidasi pada lapisan seperti yang diungkapkan oleh Chang-Jiu Li, dkk. [2]. Pada teknik pelapisan *thermal spray* seperti halnya *plasma spray* ataupun HVOF (*high velocity oxide fuel*) untuk bahan *spray* metalik konvensional yang digunakan biasanya menggunakan serbuk dengan ukuran partikel sekitar 50 – 100 μm . Hal ini juga

berkaitan dengan *gun* yang digunakan, apabila terjadi penggumpalan serbuk karena kelembaban yang tinggi juga akan menghambat laju aliran menuju *gun*.

Partikel memiliki sifat yang unik yang secara langsung berkorelasi dengan ukuran, bentuk, dan distribusi ukuran. Oleh karena itu untuk memastikan sifat dan karakteristiknya maka sangat penting untuk dapat mengukur secara efisien dan akurat [3]-[7]. Metode yang paling umum digunakan yaitu dengan mendispersikan material uji serbuk menggunakan media pendispersi dan pengukuran partikel dilakukan dengan menggunakan PSA [8]. Metode PSA baik digunakan untuk ukuran partikel yang kasar dimana hubungan antar partikel lemah dan kemungkinan untuk beraglomerasi kecil. Selain itu metode lain adalah dengan analisa gambar *digital* yang diperoleh dari karakterisasi menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*), TEM (*transmission electron microscopy*), dan AFM (*atomic force microscopy*). Gambar *digital* diolah kembali menggunakan perangkat lunak tidak berbayar yang telah umum dipakai yaitu ImageJ [9]-[10].

Perangkat lunak ImageJ umumnya digunakan untuk menganalisa ukuran partikel yang bersifat homogen baik ukuran maupun bentuknya sehingga dapat memberikan hasil analisa dengan tingkat akurasi yang tinggi. Namun fitur-fitur yang ada dalam ImageJ tentu juga memungkinkan untuk mengukur partikel yang tidak homogen bentuk dan ukurannya [11]. Akurasi untuk partikel yang tidak homogen tentu tidak sebaik dengan partikel homogen. Oleh karena itu untuk memahami dan mengetahui karakteristik partikel NiCrAl+RE (Y, Si, Hf, dan Zr) maka akan dilakukan analisa partikel menggunakan kedua metode yaitu PSA dan ImageJ dalam pengolahan gambar *digital* SEM.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Serbuk nikel, kromium, alumunium, yttrium, silikon, hafnium, dan zirkonium yang akan digunakan sebagai sampel paduan serbuk ditimbang dengan komposisi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi serbuk yang akan dipadukan (dalam gram)

Serbuk	Ni	Cr	Al	Y	Si	Hf	Zr
NiCrAl	138,0	48	14	-	-	-	-
NiCrAlY	137,2	48	14	0,8	-	-	-
NiCrAlSi	137,2	48	14	-	0,8	-	-
NiCrAlYSi	136,4	48	14	0,8	0,8	-	-
NiCrAlHf	137,2	48	14	-	-	0,8	-
NiCrAlZr	137,2	48	14	-	-	-	0,8

Jumlah RE (Y, Si, Hf, dan Zr) yang digunakan pada penelitian ini adalah sebanyak 0,4 % berat atau 0,8 gr dari massa keseluruhan.

Setelah pencampuran sesuai dengan komposisi pada Tabel 1, sampel kemudian dilakukan proses *milling* selama 36 jam menggunakan *planetary ball miller type SFM-1 desktop planetary ball miller*, MTI Corporation dengan kecepatan *milling* 25 Hz atau 1500 rpm, dimana perbandingan antara serbuk dengan *ball mill* adalah 1:2.

Sampel paduan serbuk yang akan dianalisa yaitu kondisi saat 0 jam atau kondisi sebelum dilakukan *milling* dan kondisi setelah *milling* selama 36 jam. Analisa yang digunakan untuk karakterisasi sampel yaitu SEM merk JEOL tipe JIB 4610F yang bertujuan untuk mengetahui morfologi sampel paduan serbuk baik bentuk dan ukurannya.

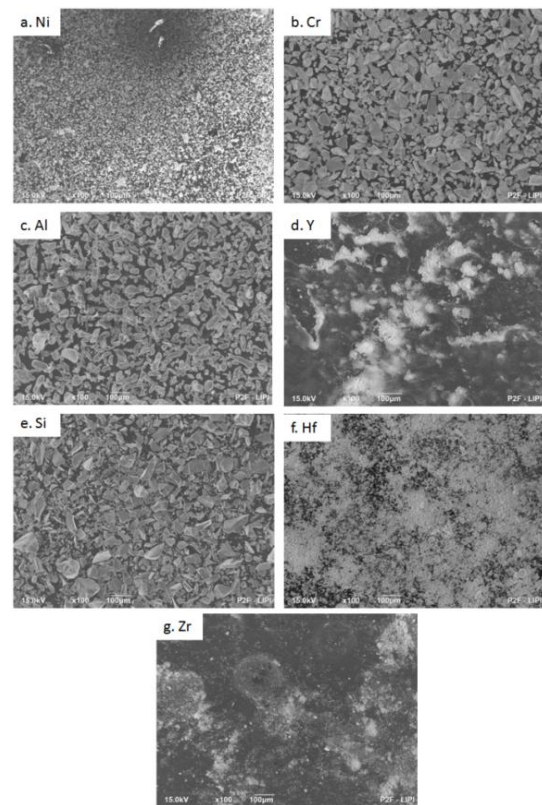
Gambar SEM dengan perbesaran 100X digunakan untuk mengelompokkan ukuran partikel kategori besar dan sedang. Gambar SEM dengan perbesaran 500X digunakan untuk mengelompokkan ukuran partikel kategori kecil. Jumlah partikel pada satu *frame* gambar SEM kurang lebih adalah 50 partikel.

Hasil yang berupa gambar digital diolah kembali untuk mengetahui ukuran sampelnya menggunakan *software* ImageJ versi 1.50i, Java 1.60_20 (32 bit). Selain itu sampel serbuk paduan juga dikarakterisasi menggunakan metode konvensional untuk mengetahui ukuran dan distribusi partikel menggunakan PSA (*particle size analysis*) merk Cilas tipe PSA1190. Kemudian hasil analisa dari kedua metode tersebut dibandingkan satu dengan yang lainnya.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Struktur Morfologi Serbuk

Gambar 1 menunjukkan hasil karakterisasi SEM masing-masing serbuk unsur yang digunakan sebagai sampel paduan pelapis NiCrAl+RE. Berdasarkan hasil dapat diketahui bahwa strukturmikro serbuk nikel berbentuk *sponge* dengan ukuran partikel sebesar $\pm 3-7 \mu\text{m}$, kromium berbentuk *flakes* dengan ukuran partikel sebesar $\pm 75 \mu\text{m}$ dan alumunium berbentuk pipih lonjong berukuran $\pm 118 \mu\text{m}$ sedangkan unsur dari RE silikon ($\pm 149 \mu\text{m}$), yttrium ($\pm 0,4 \mu\text{m}$), hafnium ($\pm 0,4 \mu\text{m}$) dan zirkonium ($\pm 1 \mu\text{m}$) berbentuk *metal flakes*. Hasil karakterisasi SEM serbuk paduan sebelum dan setelah proses *milling* ditunjukkan pada Gambar 2.

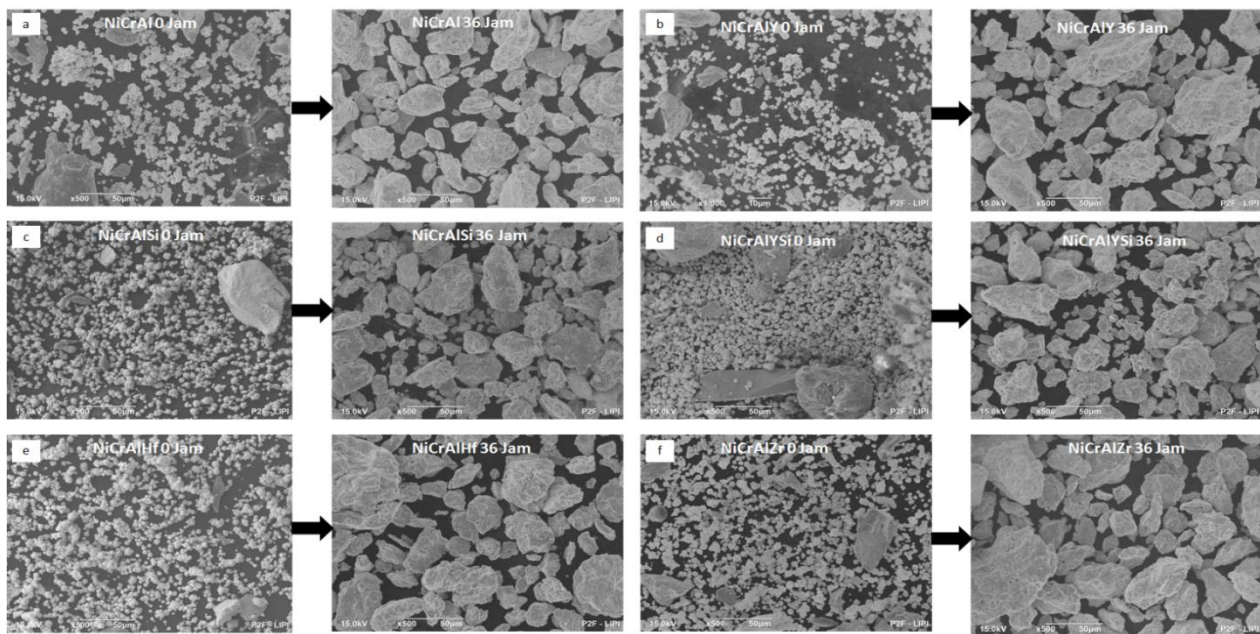


Gambar 1. Morfologi serbuk unsur hasil pencitraan dengan SEM dengan perbesaran 100X: (a) nikel, (b) kromium, (c) alumunium, (d) yttrium, (e) silikon, (f) hafnium, dan (g) zirkonium

Serbuk paduan NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, NiCrAlZr pada kondisi 0 jam terlihat belum homogen dimana partikel serbuk berukuran besar bercampur dengan partikel serbuk yang berukuran kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pencampuran tanpa proses *milling* membuat karakteristik partikel masih sama baik bentuk dan ukurannya dengan serbuk unsur yang digunakan. Namun setelah mengalami proses

milling selama 36 jam terlihat bahwa masing-masing morfologi sampel tampak ukuran yang tidak homogen dan lebih besar dari kondisi 0 jam. Hal ini dapat dikarenakan terjadi proses aglomerasi dan *cold welding* selama proses *milling*. Aglomerasi merupakan proses bergabungnya partikel-partikel kecil menjadi struktur yang lebih besar melalui peningkatan sifat fisis seperti suhu. Semakin lama proses *milling* maka ukuran partikel cenderung semakin halus dan cenderung teraglomerasi akibat interaksi gaya elektrostatis yang cukup kuat pada partikel tersebut.

Reaktif elemen tidak terlalu berdampak pada ukuran partikel dari serbuk pelapis. Hal ini dikarenakan komposisi reaktif elemen yang kecil yaitu 0,4%, namun reaktif elemen dapat berdampak pada ukuran butir sebagaimana yang diungkapkan oleh D. Naumenko, dkk [12] tahun 2016, reaktif elemen berpengaruh terhadap ukuran butir yaitu memperkecil ukuran butir, sehingga performa dari material lebih baik.



Gambar 2. Morfologi serbuk paduan logam sebelum *milling* (0 jam) dan setelah *milling* (36 jam) hasil pencitraan dengan SEM : (a) NiCrAl, (b) NiCrAlY, (c) NiCrAlSi, (d) NiCrAlYSi, (e) NiCrAlHf, dan (f) NiCrAlZr

3.2 Analisa Ukuran Partikel Serbuk Menggunakan ImageJ

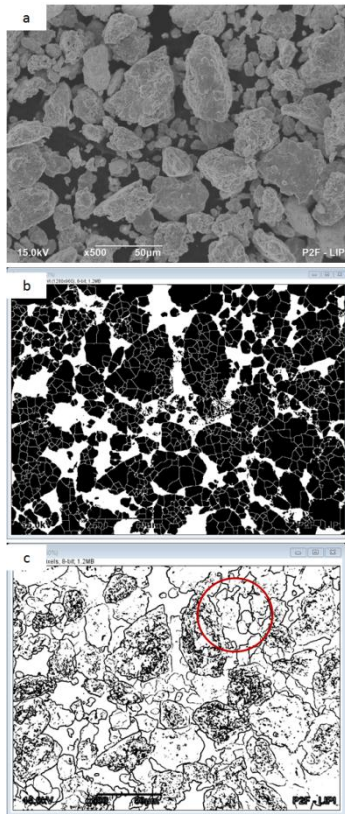
Pada umumnya analisis ukuran partikel serbuk dengan imageJ dilakukan dengan metode seperti *segmentation based on edge detection*, *thresholding method* atau *region-based segmentation methods* serta teknik yang paling sering digunakan yaitu teknik *watershed segmentation* untuk mengetahui ukuran partikel yang berbentuk homogen dan merata sebaran partikel serbuknya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, telah dilakukan upaya analisis ImageJ dengan menggunakan dua metode. Pada metode *watershed segmentation* terlihat bahwa satu partikel bisa terbagi menjadi beberapa partikel yang lebih kecil sehingga ukuran partikel yang diketahui tidak sesuai untuk partikel yang tidak merata sebarannya pada gambar SEM. Sedangkan dengan metode *segmentation based on edges detection* memungkinkan partikel bersatu dengan partikel lain yang menumpuk pada gambar SEM

dimana hasil ukuran partikelnya kemungkinan lebih besar.

Dengan demikian kedua metode tersebut tidak dapat digunakan dalam mengelompokkan partikel yang sangat tidak beraturan dan bertumpuk-tumpuk atau tidak merata distribusinya pada Gambar 3.

Dengan demikian pada studi ini, sampel paduan serbuk NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, dan NiCrAlZr dianalisis dengan ImageJ menggunakan metode *freehand selection* untuk mendapatkan ukuran partikel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan metode ini dimungkinkan untuk mendapatkan ukuran partikel paduan serbuk yang diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu partikel ukuran kecil ($0 < \text{kecil} < 15 \mu\text{m}$), sedang ($15 < \text{sedang} < 50 \mu\text{m}$) dan besar ($50 < \text{besar} < 100 \mu\text{m}$). Untuk partikel ukuran besar (area kuning) dan sedang (area merah), menggunakan gambar SEM dengan perbesaran

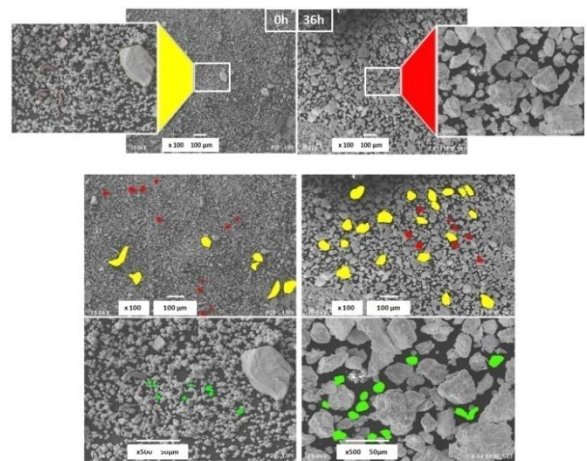
100X. Hal ini bertujuan agar makin banyak partikel yang diukur partikelnya menggunakan metode *freehand selection*. Sedangkan untuk partikel ukuran kecil (area hijau), gambar dengan perbesaran 500X yang digunakan. Hal ini bertujuan agar proses penandaan area dapat sesuai dengan bentuk partikelnya sehingga lebih jelas dan presisi.



Gambar 3. (a) Gambar asli pencitraan SEM, (b) *watershed segmentation*, (c) *segmentation based on edges detection*

Berdasarkan data imageJ dengan metode *freehand selection*, maka diketahui bahwa untuk ukuran sampel serbuk NiCrAlSi sebelum *milling* (0 jam) didapatkan data ukuran kategori besar yaitu 85,04 μm , sedang yaitu 34,74 μm , dan kecil yaitu 5,29 μm . Ukuran serbuk NiCrAlSi setelah *milling* (36 jam) didapatkan data ukuran kategori besar yaitu 92,076 μm , sedang yaitu 40,99 μm , dan kecil yaitu 16,25 μm .

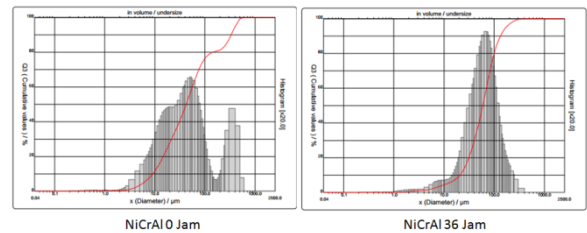
Jadi ukuran partikel sampel relatif menjadi lebih besar dari kondisi 0 ke 36 jam waktu *milling*, baik untuk ukuran kategori kecil, sedang maupun besar. Hal ini menunjukkan hasil yang didapat dari imageJ sesuai dengan pencitraan yang didapat dari SEM bahwa ukuran sampel menjadi lebih besar karena proses aglomerasi dan *cold welding*.



Gambar 4. Pengolahan data menggunakan ImageJ pada sampel serbuk NiCrAlSi sebelum dan setelah *milling*

3.3 Analisa Ukuran Partikel Serbuk Menggunakan PSA

Karakterisasi menggunakan PSA (*particle size analysis*) bertujuan untuk membandingkan dan mengetahui tingkat keakurasian ImageJ terhadap PSA. Berdasarkan data PSA, sampel mengalami perbesaran ukuran dari kondisi 0 ke 36 jam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik perubahan ukuran partikel serbuk NiCrAl berdasarkan karakterisasi PSA

Hal ini membuktikan bahwa hasil yang didapatkan dari analisa PSA sama dengan analisa hasil SEM dan ImageJ yaitu ukuran sampel menjadi lebih besar setelah *milling* selama 36 jam karena terjadi proses aglomerasi dan *cold welding*. Pada sampel 0 jam terlihat lebih kecil ukurannya, dimungkinkan bahwa sampel serbuk masih terukur sendiri-sendiri karena belum tercampur dengan rata membentuk paduan. Apabila dibandingkan, data yang diperoleh menggunakan imageJ dan PSA didapatkan hasil seperti pada Gambar 6. Dari perbandingan tersebut diperoleh data ketidaksesuaian ImageJ terhadap PSA.

Berdasarkan data pada Gambar 6 tersebut diketahui bahwa ketidaksesuaian pada kategori partikel besar memiliki nilai terendah kurang lebih sebesar 0,43 % dan tertinggi kurang lebih sebesar 16,24 %. Pada kategori partikel sedang yaitu memiliki ketidaksesuaian kurang lebih

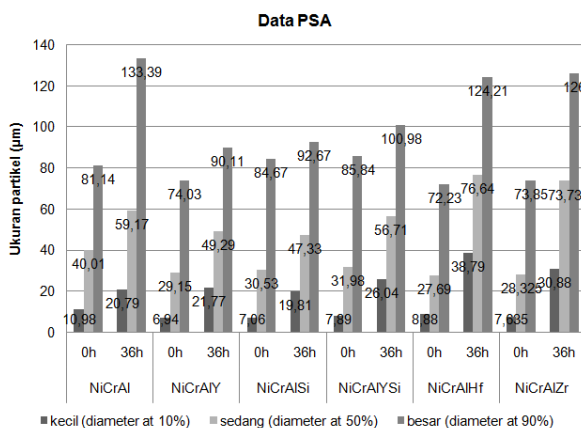
sebesar 4,88 % untuk nilai terendah dan 19,13 % untuk nilai tertinggi, sedangkan pada partikel kategori kecil ketidaksesuaian sebesar 6,93% nilai terendah dan 19,92% untuk nilai tertinggi. Hal ini dikarenakan saat pengolahan menggunakan *software* ImageJ pada kategori partikel besar dan sedang menggunakan gambar SEM perbesaran 100X sehingga dimungkinkan adanya penyimpangan dalam pemilihan area sampel. Penyimpangan juga dapat terjadi saat gambar dengan pixel yang terbatas kemudian diperbesar gambarnya sehingga akan sulit dalam memilih area sesuai dengan bentuk dan ukuran partikelnya. Oleh karena itu, untuk kategori partikel kecil maka digunakan gambar SEM perbesaran 500X agar mampu terdefinisi ukuran partikelnya, dimana ukuran partikelnya memiliki nilai ketidaksesuaian dengan data PSA sebesar 6,93% batas terendah dan 19,92% batas tertinggi. Hal ini dimungkinkan pada gambar perbesaran SEM 500X yang terdefinisi ukuran kecil tidak dapat terakomodir secara keseluruhan pada gambar yang dianalisis.

Jadi berdasarkan data analisa tersebut, didapatkan tingkat keakuratan analisa

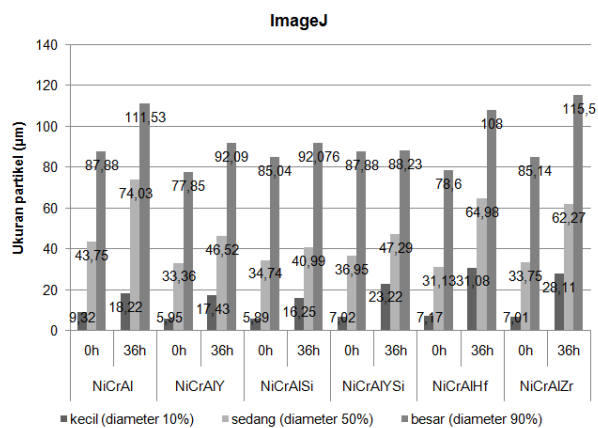
menggunakan ImageJ untuk sampel serbuk paduan NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, NiCrAlZr sebelum *milling* dan setelah *milling* selama 36 jam dengan data PSA sekitar 80% atau ketidaksesuaian dengan data PSA sekitar 20%. Hal ini menunjukkan bahwa analisa menggunakan *software* ImageJ cukup relevan apabila digunakan untuk mengolah data gambar yang didapatkan dari karakterisasi SEM untuk menganalisis ukuran partikel sampel.

Tabel 2. Nilai rata-rata ukuran partikel (dalam μm)

PSA		ImageJ	
0 Jam	36 Jam	0 Jam	36 Jam
44,04	71,12	46,98	67,93
36,71	53,72	39,05	52,01
40,75	53,27	41,89	49,77
41,90	61,24	43,95	52,91
36,27	79,88	38,97	68,02
36,60	76,87	41,97	68,63



(a)



(b)

Gambar 6. Perbandingan data ukuran partikel serbuk NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, NiCrAlZr menggunakan: (a) PSA dan (b) ImageJ

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa data ukuran sampel NiCrAl, NiCrAlY, NiCrAlSi, NiCrAlYSi, NiCrAlHf, NiCrAlZr setelah pemilinan selama 36 jam mengalami perbesaran ukuran dari kondisi awal atau 0 jam yang disebabkan selama proses pemilinan mengalami aglomerasi dan *cold welding*. Nilai rata-rata ukuran partikel serbuk NiCrAl tanpa reaktif elemen dan dengan penambahan reaktif elemen tidaklah terlalu berbeda jauh, hal ini disebabkan penambahan reaktif elemen dengan komposisi

yang kecil tidak berdampak pada ukuran partikel.

Nilai ketidaksesuaian antara data ImageJ terhadap data PSA untuk partikel besar yaitu sekitar 0,43% - 16,24%, untuk partikel sedang sekitar 4,88% - 19,13% dan untuk partikel kecil sekitar 6,93% - 19,92%.

Pengolahan data menggunakan ImageJ bisa digunakan sebagai alternatif pengukuran untuk ukuran partikel sampel yang didapatkan dari hasil gambar SEM karena memiliki keakuratan kurang lebih 80% apabila dibandingkan dengan hasil karakterisasi menggunakan PSA.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didukung dan dibiayai dari beberapa program penelitian antara lain kegiatan Unggulan LIPI sub program Pengembangan Material dan Rekayasa Manufaktur (PMRM) 2017, Insentif INSINAS Riset Pratama Individu (IRPI) 2018 dan STRG ITS Toray 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. A. Mahesh, R. Jayaganthan, dan S. Prakash, "A study on the oxidation behavior of HVOF sprayed NiCrAlY-0.4 wt.% CeO₂ coatings on superalloys at elevated temperature," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 119, no. 3, pp. 449-457, 2010.
- [2] C. Li dan W. Li, "Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition," *Surface Coating Technology.*, vol. 162, pp. 31-41, 2002.
- [3] M. Vippola, M. Valkonen, E. Sarlin, M. Honkanen, dan H. Huttunen, "Insight to nanoparticle size analysis—novel and convenient image analysis method versus conventional techniques," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 6-11, 2016.
- [4] P. J. A. Borm, D. Robbins, S. Haubold, T. Kuhlbusch, H. Fissan, K. Donaldson, R. Schins, V. Stone, W. Kreyling, J. Lademann, J. Krutmann, D. B. Warheit, dan E. Oberdorster, "The potential risks of nanomaterials: A review carried out for ECETOC," *Particle and Fibre Toxicology.*, vol. 3, no.11, pp. 1-35, 2006.
- [5] W. J. Stark, P. R. Stoessel, W. Wohlleben, dan A. Hafner, "Industrial applications of nanoparticles," *Chemical Society Reviews*, vol. 44, pp. 5793-5805, 2015.
- [6] A. D. Maynard dan R. J. Aitken, "Assessing exposure to airborne nanomaterials: Current abilities and future requirements," *Nanotoxicology*, vol. 1, no. 1, pp. 26-41, 2007.
- [7] K. Savolainen, L. Pylkkänen, H. Norppa, G. Falck, H. Lindberg, T. Tuomi, M. Vippola, H. Alenius, K. Hämeri, J. Koivisto, D. Brouwer, D. Mark, D. Bard, M. Berges, E. Jankowska, M. Posniak, P. Farmer, R. Singh, F. Krombach, P. Bihari, G. Kasper, dan M. Seipenbusch, "Nanotechnologies, engineered nanomaterials and occupational health and safety - A review," *Saf. Sci.*, vol. 48, no. 8, pp. 957-963, 2010.
- [8] R. Kumari dan N. Rana, "Particle size and shape analysis using ImageJ with customized tools for segmentation of particles," *Int. J. Eng. Res.*, vol. 4, no. 11, pp. 23-28, 2015.
- [9] A. Podlasov dan E. Ageenko, "Working and development with ImageJ," *Univ. Joensuu - Tech. Pap.*, pp.1-18, 2003.
- [10] C. Suryanarayana, "Mechanical alloying and milling," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 1-2, pp. 1-184, 2001.
- [11] C. Kurniawan, T. B. Waluyo, dan P. Sebayang, "Analisis ukuran partikel menggunakan free software Image-J," *Semin. Fis. 2011 Pus. Penelit. Fis. LIPI*, 2011, pp. 12-13.
- [12] D. Naumenko, B. A. Pint, dan W. J. Quadackers, "Current thoughts on reactive element effects in alumina-forming systems: In memory of John," *Oxid. Met.*, vol. 86, no. 1, pp.1-43, 2016.

