Abdul Basyir

Peneliti
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Pusat Penelitian Fisika
abdu077@lipi.go.id

Didik Aryanto

Peneliti
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Pusat Penelitian Fisika
didi027@lipi.go.id

Jayadi

Perekayasa
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Pusat Penelitian Fisika
jayadi75@yahoo.com

Wahyu Bambang Widayatno

Peneliti
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Pusat Penelitian Fisika
wahy012@lipi.go.id

Agus Sukarto Wismogroho

Peneliti
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Pusat Penelitian Fisika
agus046@lipi.go.id

KARAKTERISASI SERBUK TIMAH DARI SISTEM ATOMISASI GAS ARGON PANAS – SUB SISTEM GAS ALIR TABUNG GAS

The tin powder was used in some applications and technology such as for part manufacture through alloying, pressing, and sintering process, mixing material for the pyrotechnic application, the main material for solder pasta, mixing material on tin chemical, and others. Therefore, the demand for tin powder with a small size, spherical shape, and high purity is increasing severely. Indonesia (PT. Timah Tbk.) is one of the world's largest producers of tin raw materials. This raw material can be processed as powder by the atomization method. In this research, hot argon gas atomization system was used to generate tin powder. Raw tin was melted in a melting chamber with temperature variations of 600, 700, 800, and 900 °C. This experiment generates powder with a dominant size of 37 – 150 μm. Meanwhile, for size powder of 0 – 30 μm, dominated by size range of 0 – 10 μm. Furthermore, the size powder of 0 – 30 μm is composed of tin phase, without tin oxide. The tin powder of melting chamber temperature of 900 °C produces the largest tin powder with a size of 0 – 10 μm and spherical powder.

Keywords: Tin Powder, Hot Argon Gas Atomization, Gas Tube System

1. PENDAHULUAN

Timah merupakan salah satu material logam yang mempunyai titik lebur yang rendah (232 °C), namun titik uap yang tinggi (2.602 °C), sehingga pembuatan serbuk timah akan lebih efektif menggunakan prinsip peleburan (*liquid*), daripada menggunakan prinsip penguapan (*gas*). Salah satu metode pembuatan serbuk yang menggunakan prinsip peleburan adalah metode atomisasi gas. Dimana metode ini menggunakan media fluida berupa gas (oksigen, nitrogen, argon) bertekanan tinggi/rendah dan/atau bersuhu tinggi/rendah untuk menumbuk dan/atau memecah leburan (*liquid*) dari suatu material, menjadi serbuk [1-3].

Serbuk timah sendiri dapat digunakan dalam beberapa aplikasi seperti untuk campuran dalam proses pembuatan *alloying material* melalui mekanisme *pressing* dan *sintering*, sebagai bahan utama dalam pembuatan pasta solder, sebagai *fuel material* dalam aplikasi piroteknik, material dalam aplikasi *additive manufacturing*, dan lain sebagainya [4-6]. Oleh karena itu, permintaan serbuk timah semakin meningkat, terutama untuk serbuk timah yang berukuran kecil dan kemurnian yang baik, serta berbentuk bulat [7-8].

Penelitian kami sebelumnya di Pusat Penelitian Fisika – LIPI tentang powderisasi timah menggunakan metode atomisasi gas – satu nosel dan metode atomisasi gas panas dengan sistem kompresor gas oksigen telah menghasilkan serbuk timah dengan ukuran antara 1 – 150 μm dan tidak terbentuk fasa timah oksida pada serbuk tersebut [9]. Akan tetapi, serbuk timah yang dihasilkan dominan berbentuk tidak beraturan, seperti lonjong – memanjang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan serbuk timah yang tidak hanya berukuran kecil dan tanpa timah oksida, namun juga mempunyai bentuk bulat. Dimana penelitian ini akan menggunakan metode atomisasi gas dengan sistem gas alir berupa gas argon panas dari tabung gas. Harapannya adalah gas argon yang mempunyai sifat inert akan mampu menghasilkan serbuk timah dengan bentuk bulat, apalagi didukung oleh sistem gas alir berupa tabung yang akan mampu mengalirkan gas dengan lebih stabil dibandingkan sistem kompresor.

Selain itu, dari penelitian terdahulu diketahui bahwa semakin tinggi suhu dan tekanan gas alir atomisasi, maka ukuran dari serbuk yang dihasilkan akan semakin kecil. Begitu juga dengan efek dari suhu ruang peleburan, dimana semakin tinggi suhu dari ruang peleburan, maka ukuran serbuk yang dihasilkan juga

akan semakin kecil [10-11]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, juga akan diamati pengaruh dari suhu ruang peleburan terhadap distribusi ukuran serbuk timah $\leq 30 \mu\text{m}$. Prioritas terhadap ukuran tersebut dikarenakan ukuran maksimal yang banyak digunakan untuk aplikasi pasta solder adalah $38 \mu\text{m}$, disamping itu, semakin kecil ukuran dari serbuk timah, maka harga-nya akan semakin mahal [12].

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, yaitu eksperimen powderisasi timah dengan sistem atomisasi gas argon panas. Desain dari sistem atomisasi gas argon panas ini tersusun oleh enam komponen utama yaitu (1) mesin pengatur suhu, (2) ruang peleburan timah, (3) sistem sumber gas alir, (4) ruang pemanas gas alir, (5) ruang utama atomisasi, dan (6) ruang penampungan serbuk (lihat Gambar 1). Dalam eksperimen ini dilakukan variasi perubahan suhu pada ruang peleburan, sedangkan parameter suhu dan tekanan dari gas alir dibuat tetap seperti pada Tabel 1.

Gambar 1: Desain dari sistem atomisasi gas panas yang digunakan dalam penelitian ini

Tabel 1: Jenis variasi yang dilakukan dalam eksperimen pada penelitian ini

JENIS VARIASI	SUHU GAS ALIR (°C)	TEKANAN GAS ALIR (BAR)	SUHU RUANG PELEBURAN (°C)
Variasi 1	150	8	600
Variasi 2	150	8	700
Variasi 3	150	8	800
Variasi 4	150	8	900

Secara umum, proses penelitian ini dimulai dengan pembuatan serbuk timah menggunakan sistem atomisasi gas seperti pada Gambar 1. Dalam proses tersebut, dimasukkan input timah padat berbentuk granular sebanyak 50 gram. Timah padat tersebut akan dilebur dan diatomisasi, sehingga dihasilkan output berupa serbuk timah. Setelah itu, serbuk yang dihasilkan dari empat variasi suhu ruang peleburan disaring menggunakan saringan 100 mesh, 400 mesh, dan 500 mesh. Dari hasil saringan tersebut didapat distribusi ukuran serbuk timah yang dihasilkan dalam range tertentu. Dalam penelitian ini saringan 100 mesh, 400 mesh, dan 500 mesh *equivalent* dengan ukuran $37 - 150 \mu\text{m}$, $30 - 37 \mu\text{m}$, dan $0 - 30 \mu\text{m}$. Pada serbuk hasil saringan 500 mesh dilakukan pengukuran distribusi ukuran lebih lanjut menggunakan *imageJ software*. Input dalam pengukuran ini adalah *image data* dari pengukuran *Scanning Electron Microscope (SEM)* perbesaran 600 kali. Selain itu, pada serbuk timah tersebut juga dilakukan pengujian SEM Hitachi SU-3500 (20 kV) untuk melihat bentuk dari serbuk yang dihasilkan, dan pengujian komposisi fasa pada serbuk menggunakan alat *X Ray Diffraction (XRD)* Rigaku Smartlab, dengan tabung sinar x Cu K α (voltase 40 kV dan arus 30 mA) sepanjang $10 - 90^\circ$, dengan *step width* sebesar 0.01 degree. Mekanisme eksperimen pembuatan serbuk

dan karakterisasi serbuk dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2: Diagram alir dari proses eksperimen dan karakterisasi serbuk pada penelitian ini

3. HASIL DAN DISKUSI

Setelah dilakukan powderisasi menggunakan sistem atomisasi gas argon panas dengan variasi suhu ruang peleburan, diketahui bahwa suhu ruang peleburan 900 °C menghasilkan serbuk berukuran 0 – 37 µm lebih banyak daripada yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600, 700, dan 800 °C. Serbuk timah yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600, 700, 800, dan 900 °C didominasi oleh ukuran 37 – 150 µm. Kuantitas dari serbuk ukuran ini semakin berkurang dengan meningkatnya suhu ruang peleburan. Dimana suhu ruang peleburan 900 °C menghasilkan serbuk timah ukuran 37 – 150 µm lebih sedikit daripada yang dihasilkan dari 600, 700, dan 800 °C (lihat Gambar 3). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu ruang peleburan dapat meningkatkan kuantitas powder timah yang berukuran 0 – 30 µm dan 30 – 37 µm.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Gambar 3: (a) Distribusi ukuran dari total serbuk timah yang dihasilkan pada suhu ruang peleburan 600 – 900 °C, dan persentase distribusi ukuran-nya yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C, dan (e) 900 °C

Parameter utama yang membuat peningkatan suhu dapat mempengaruhi peningkatan kuantitas output dan kuantitas output dari serbuk timah ukuran 0 – 37 μm adalah perubahan viskositas dari leburan timah tersebut. Dimana peningkatan suhu membuat jarak antar partikel pada leburan menjauh, sehingga kohesinya menjadi lemah. Penurunan kohesi menyebabkan viskositas dan tegangan permukaan dari leburan menjadi turun [13-14]. Beberapa persamaan matematis antara viskositas dengan suhu, juga menunjukkan bahwa viskositas mempunyai hubungan berbanding terbalik dengan suhu, baik itu pada material logam maupun polimer, seperti Persamaan (1) dari Poiseuille, (2) dari Slotte, (3) dari Arrhenius-Andrade untuk material polimer, dan (4) dari Vogel-Tamman-Fulcher untuk material polimer, dimana μ adalah viskositas dan T adalah suhu [15-16].

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{c}{(\alpha + T)^n} \quad (2)$$

$$\mu = A e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 e^{\left[\frac{B}{T-T_0}\right]} \quad (4)$$

Penurunan viskositas pada leburan timah akan mengurangi gaya gesek antara leburan timah dengan material dari wadah ruang peleburan, terutama pada saat leburan tersebut mengalir dari ruang peleburan menuju ruang utama atomisasi. Oleh karena itu, penting untuk menjaga kondisi leburan timah berada dalam kondisi *liquid* (100%) pada saat leburan mengalami atomisasi dan/atau ditumbuk oleh gas alir panas atomisasi. Apalagi leburan timah ini akan mulai mengalami solidifikasi ketika berada pada suhu yang lebih rendah (sekitar 1.2 kali dari suhu lebur timah). Oleh karena itu, semakin rendah viskositas dari leburan timah, maka akan semakin banyak dihasilkan serbuk yang berukuran kecil.

Gambar 4: Hasil pengukuran SEM pada serbuk timah ukuran $\leq 30 \mu\text{m}$ yang dilebur pada suhu (a) 600°C , (b) 700°C , (c) 800°C , dan 900°C

Gambar 4 menunjukkan bahwa morfologi dari serbuk timah yang dihasilkan, didominasi bentuk bulat, hanya ada beberapa bentuk serbuk yang memanjang – berekor. Dimana serbuk timah berbentuk memanjang berekor lebih banyak dijumpai pada serbuk yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600°C , dibandingkan pada serbuk timah yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 900°C . Secara kuantitatif, jumlah serbuk timah berbentuk bulat yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600°C dan 900°C adalah sebanyak 86% (979 partikel) dan 89% (1469 partikel). Persentase ini didapat setelah dilakukan perhitungan menggunakan *imageJ software* dengan melibatkan 1119 partikel dan 1647 partikel dari serbuk timah yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600°C dan 900°C (lihat Gambar 5). Rasio ukuran terbesar terhadap ukuran terkecil dari jari-jari suatu geometri berbentuk bulat adalah 1:1. Dalam perhitungan ini, toleransi untuk rasio dari ukuran terbesar terhadap ukuran terkecil dari jari-jari serbuk timah dianggap berbentuk bulat adalah ± 0.3 (0.7 - 1.3). Dari data perhitungan ini diketahui bahwa serbuk berbentuk bulat semakin banyak dijumpai pada serbuk yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 900°C daripada serbuk yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600°C . Hal ini dikarenakan, pada suhu yang lebih tinggi, maka leburan akan memiliki viskositas yang rendah, sehingga pada saat ditumbuk oleh gas argon panas, maka leburan tersebut akan lebih mudah dipecah. Hal yang sama terjadi pada powderisasi tembaga dengan menggunakan gas atomisasi, dimana pada suhu peleburan yang lebih tinggi yaitu 1355°C , dihasilkan serbuk tembaga berbentuk bulat lebih banyak dibandingkan serbuk tembaga yang dihasilkan dari suhu $\leq 1200^\circ\text{C}$ [17].

Selain itu, kecepatan dan tekanan alir yang cenderung konstan dari sistem gas berupa tabung gas juga mempunyai efek terhadap bentuk serbuk timah, sehingga bentuk dari serbuk timah yang dihasilkan didominasi oleh bentuk bulat. Aliran gas yang konstan ini membuat permukaan dari leburan timah mengalami tumbukan dengan nilai yang konstan dan stabil. Hasil yang berbeda didapatkan ketika menggunakan gas alir dengan sistem gas berupa gas kompresor, dimana aliran gas yang dihasilkan kurang stabil, sehingga leburan timah yang terkena tumbukan tidak terkena secara merata, maka bentuk dari serbuk yang dihasilkan didominasi oleh bentuk memanjang – berekor [18].

Beberapa bentuk serbuk yang dihasilkan berbentuk memanjang – berekor, karena pada saat ditumbuk oleh gas panas atomisasi, kondisi leburan timah sudah mengalami penurunan suhu (viskositasnya

meningkat), sehingga droplet hasil tumbukan tersebut mengalami solidifikasi sebelum berada dalam bentuk keseimbangan, yaitu rasio terkecil dari luas permukaan berbanding volume. Secara geometri, bentuk keseimbangan tersebut berupa bentuk bulat.

Gambar 5: Hasil pengukuran SEM perbesaran 200 kali pada serbuk timah ukuran $\leq 30 \mu\text{m}$ yang dilebur pada suhu (a) 600 °C dan (b) 900 °C; Hasil copy pada *imageJ software* terhadap hasil SEM serbuk timah yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan (c) 600 °C dan (d) 900 °C; Hasil pengukuran pada *imageJ software* terhadap serbuk timah yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan (e) 600 °C dan (f) 900 °C.

Dikarenakan permintaan pasar yang tinggi terhadap serbuk timah berukuran kecil ($\leq 30 \mu\text{m}$), maka dilakukan pengukuran distribusi ukuran serbuk lebih lanjut pada serbuk berukuran ini. Secara kuantitatif pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan *imageJ software* terhadap gambar yang dihasilkan dari uji SEM. *ImageJ software* telah banyak digunakan pada beberapa bidang penelitian seperti biologi, kimia, dan fisika, untuk mendapatkan hasil kuantitatif dari ukuran suatu partikel, bakteri, dan sebagainya, menggunakan input gambar dari hasil SEM [19-21]. Selain itu beberapa penelitian menunjukkan bahwa

pengukuran menggunakan *imageJ software* menghasilkan keakuratan dan/atau kesesuaian diatas 80% terhadap hasil pengukuran menggunakan alat particle size analyser (PSA) [22-23]. Proses pengukuran dengan *imageJ software* dalam penelitian ini dilakukan secara manual. Pengukuran ini dilakukan dengan mengukur masing-masing diameter dari partikel yang terdapat pada gambar hasil SEM perbesaran 600 kali (lihat Gambar 6).

Gambar 6: Pengukuran terhadap hasil dari pengukuran SEM perbesaran 600 kali pada serbuk timah ukuran $\leq 30 \mu\text{m}$ yang dihasilkan dari ruang peleburan (a) 600 °C, (b) 700 °C, (c) 800 °C, dan 900 °C

Gambar 7: Hasil pengukuran menggunakan *imageJ software* terhadap distribusi ukuran serbuk timah $\leq 30 \mu\text{m}$ yang dihasilkan dari ruang peleburan 600 – 900 °C

Dari hasil pengukuran ini diketahui bahwa serbuk yang dihasilkan dari ruang peleburan 900 °C menghasilkan serbuk berukuran 0 – 10 µm sebanyak 76%, sedangkan serbuk ukuran yang sama, dihasilkan dari ruang peleburan 600 °C sebesar 70%. Ada peningkatan output sebesar 6% pada serbuk timah berukuran 0 – 10 µm, akibat peningkatan suhu dari 600 °C menjadi 900 °C. Adapun output serbuk timah berukuran 10 – 30 µm lebih banyak dihasilkan dari suhu ruang peleburan sebesar 600 °C (sebanyak 30%), dibandingkan suhu ruang peleburan sebesar 900 °C (sebanyak 25%) (lihat Gambar 7). Selain itu, dari data terserbut diketahui juga bahwa serbuk timah berukuran 0 – 5 µm paling banyak dihasilkan dari suhu ruang peleburan 900 °C, sedangkan serbuk timah berukuran 5 – 10 µm paling banyak dihasilkan dari suhu ruang peleburan 800 °C, adapun serbuk timah berukuran 10 – 15 µm paling banyak dihasilkan dari suhu ruang peleburan 700 °C, dan serbuk timah berukuran 15 – 30 µm paling banyak dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600 °C. Secara umum, distribusi ukuran serbuk timah ≤ 30 µm didominasi oleh ukuran 0 – 10 µm (lebih dari 70%).

Gambar 8: Hasil pengujian XRD pada serbuk timah ukuran ≤ 30 µm yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600 °C dan 900 °C

Berdasarkan hasil pengujian *x-ray diffraction* (lihat Gambar 8) diketahui bahwa serbuk timah ukuran ≤ 30 µm yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600 °C dan 900 °C tersusun oleh fasa tunggal timah (PDF-4 Axiom 2019 RDB = 04-004-7747), dengan parameter kisi $a = 5.834475$ Å, $b = 5.834475$ Å, dan $c = 3.182594$ Å. Dari hasil pengujian ini, diketahui bahwa tidak terjadi perubahan orientasi terhadap puncak-puncak serbuk timah yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600 °C dan 900 °C. Selain itu, peningkatan suhu ruang peleburan juga tidak menimbulkan fasa timah oksida pada serbuk timah yang dihasilkan.

4. KESIMPULAN

Sistem atomisasi gas argon panas dengan sub sistem gas alir dari tabung gas menghasilkan serbuk timah berukuran 0 – 30 µm yang didominasi oleh ukuran serbuk 0 – 10 µm (lebih banyak 6% dari yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600 °C). Ukuran serbuk ini semakin banyak dihasilkan dengan peningkatan suhu ruang peleburan. Dimana suhu ruang peleburan 900 °C menghasilkan serbuk timah ukuran 0 – 30 µm lebih banyak dibandingkan dengan yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600, 700, dan 800 °C. Selain itu, bentuk serbuk timah yang dihasilkan didominasi oleh serbuk dengan bentuk bulat. Dimana, suhu ruang peleburan 900 °C menghasilkan serbuk timah berbentuk bulat lebih banyak 3% dibandingkan dengan yang dihasilkan dari suhu ruang peleburan 600 °C. Disamping itu, serbuk yang dihasilkan dari sistem atomisasi ini tersusun oleh fase tunggal, yaitu fase timah, tidak ditemui timah oksida.

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian Fisika - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, PT. Timah Industri, dan KEMENRISTEK/BRIN yang telah memberikan dukungan berupa fasilitas eksperimen.

men, fasilitas pengujian, bahan penelitian, dan dana penelitian, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Selain itu, peneliti juga mengucapkan terimakasih kepada Dr. Agus Sukarto Wismogroho yang telah membimbing dan mengarahkan peneliti dalam penulisan paper dan eksperimen ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] NEIKOV, O. D., NABOYCHENKO, S., dan YEFIMOV, N. V., *Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications*, 2nd ed., Elsevier, 2018.
- [2] BECKERS D. et al., “Impact of process flow conditions on particle morphology in metal powder production via gas atomization”, *Advanced Powder Technology Journal*, v. 31, n. 1, pp. 300-311, Jan 2020.
- [3] TSIRLIS, M. dan MICHAILIDIS, N., “Low-pressure gas atomization of aluminum through a Venturi nozzle”, *Advanced Powder Technology Journal*, v. 31, n. 4, pp. 1720-1727, April 2020.
- [4] AKKAS, M. dan BOZ, M., “Investigation of the compressibility and sinterability of AZ91 powder production and particle production by gas atomisation method”, *Journal of Magnesium and Alloys*, v. 7, n. 3, pp. 400-413, Sept. 2019.
- [5] AGRAWAL, J. P., *High energy materials: propellants, explosives, and pyrotechnics*, 1st ed., New Delhi, Wiley-VCH, 2010.
- [6] KASSYM, K. dan PERVEEN, A., “Atomization processes of metal powders for 3D printing”, *Materials Today: Proceedings*, v. 26, n. 2, pp. 1727-1733, Mar. 2020.
- [7] ACHELIS, L. dan UHLENWINKEL, V., “Characterisation of metal generated by a pressure-gas-atomiser”, *Materials Science & Engineering A*, v. 477, n. 1-2, pp. 15-20, Mar. 2008.
- [8] TANG, J., ET al., “Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process”, *Advanced Powder Technology*, v. 30, n. 10, pp. 2330-2337, Okt. 2019.
- [9] BASYIR, A., et al., “Powderisasi timah murni menggunakan metode atomisasi gas – satu nosel gas”, *Jurnal Litbang Industri*, v. 10, n. 2, pp. 97 – 102, Des. 2020.
- [10] GAO, C. et al., “Characterization of spherical AlSi10Mg powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China Journal*, v. 29, n. 2, pp. 374-384, Feb. 2019.
- [11] BASYIR, A., “Pengaruh suhu ruang peleburan dan tekanan gas alir terhadap output powder timah yang dihasilkan dari sistem atomisasi gas argon panas”, In: *Seminar Nasional Fisika (SNF) UNJ*, ABS-131, Jakarta Timur, DKI Jakarta, Indonesia, 20 June 2020.
- [12] BASTOW, E., “Does solder particle size impact the electrical reliability of a no-clean solder paste flux residue?”, *Indium Corp. Tech.* Pp. 1–8, 2017.
- [13] LUBIS, N. A., “Pengaruh kekentalan cairan terhadap waktu jatuh benda menggunakan falling ball method”, *Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, v. 2, n. 2, pp. 26-32, Agu. 2018.
- [14] FERREIRA, I. L., CASTRO, J. A., dan GARCIA, A., “Dependence of surface tension and viscosity on temperature in multicomponent alloys”, In: *Khanna, R., Wettability and Interfacial Phenomena: Implications for Material Processing*, 1 ed., chapter 7, London, UK, IntechOpen Publishing, 2019.
- [15] HIGGINS, B. G., *Viscous models for liquids: temperature dependence*, In: *Report of Chemical Engineering and Material Science Department*, University of California, Davis, California, 2014.
- [16] SAFAROV, J. et al., “Effect of temperature on thermal (density), caloric (heat capacity), acoustic (speed of sound) and transport (viscosity) properties of 1-octyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate at atmospheric pressure”, *Journal of Chem. Thermodynamics*, v. 124, pp. 49-64, Sep. 2018.
- [17] OZBILEN, S., UNAL, A., dan SHEPPARD, T., “Influence of superheat on particle shape and size of gas atomized copper powders”, *Powder Metallurgy Journal*, v. 34, n. 1, pp. 53-61, July 2013.
- [18] BASYIR, A., “Karakterisasi timah powder yang dihasilkan dari atomisasi gas oksigen panas – sistem gas kompresor”, In: *Seminar Nasional Sains (SINASIS) UNINDRA*, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, Indonesia, 21 June 2020.
- [19] STOLZE, N. et al., “Automated image analysis with ImageJ of yeast colony forming units from cannabis flowers”, *Journal of Microbiological Methods*, v. 164, n. 105681, pp. 1-6, Agu. 2019.

- [20] TRIHUTOMO, P., “Pengaruh volume alir udara terhadap sebaran gelembung pada bubble plume”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 6, n. 2, pp.127-135, Juni 2015.
- [21] SUMADIYASA, M. dan MANUABA, I. B. S., “Penentuan ukuran Kristal menggunakan formula Scherrer, Williamson-Hull Plot, dan ukuran partikel dengan SEM”, *Jurnal Buletin Fisika*, v. 19, n. 1, pp. 28-34, Feb. 2018.
- [22] DESIATI, R. D., SUGIARTI, E., dan RAMANDHANY, S., “Analisa ukuran partikel serbuk komposit NiCrAl dengan penambahan reaktif elemen untuk aplikasi lapisan tahan panas”, *Jurnal Metalurgi*, v. 33, n. 1, pp. 27-34, Juni 2018.
- [23] KURNIAWAN, C., WALUYO, T. B., dan SEBAYANG, P., “Analisis ukuran partikel menggunakan free software Image-J”, In: *Seminar Nasional Fisika*, ISSN 2088-4176, Serpong, Banten, Indonesia, 12-13 Juli 2011.