



Mass Loss Pada Pemaduan Logam Ni-Fe-Mn-Al Metode Vacuum Arc Melting Furnace Terhadap Hume-Rothery Rules

Hamdan Akbar Notonegoro^{1,2*}, Bambang Soegijono², Sovian Aritonang³, Sunardi¹,
Dhimas Satria¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jend. Soedirman KM.3 Cilegon 42435, Indonesia

²Program Pasca Sarjana Material Sains, Dept. Fisika, Universitas Indonesia, Depok 16424,

³Prodi Teknologi Daya Gerak, Universitas Pertahanan, IPSC Sentul-Bogor, Indonesia

*Email Penulis: hamdan_an@untirta.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

NaskahDiterima 10/10/2017
NaskahDirevisi 26/10/2017
NaskahDisetujui 31/10/2017
Naskah Online 31/10/2017

ABSTRAK

Logam paduan merupakan material hasil campuran antar logam, atau antara logam dengan elemen lain, yang dibuat untuk menghasilkan sifat dan karakter material logam yang diinginkan. Material logam paduan yang dibuat menggunakan Compact Arc Melter MAM-1 memiliki resiko terbuangnya sejumlah bagian (*mass loss*) komposisi saat peleburan. Untuk itu perlu diidentifikasi pengaruh metode peleburan yang digunakan terhadap kondisi *mass loss*. Dari Hume-Rothery's Rules diketahui bahwa perbedaan jari-jari atom dan elektron valensi antara elemen pelarut dan terlarut mempengaruhi besarnya *mass loss* yang terjadi. Dalam penelitian ini telah dibuat logam paduan sistem Ni₂₀Fe₃₀Mn₃₂Al₁₈ (at. %) menggunakan Compact Arc Melter MAM - 1 dengan dua variasi level busur. Ditemukan bahwa penggunaan busur api level 3 menghasilkan kehilangan massa yang lebih besar dari level 4. Namun, komposisi paduan yang diperoleh dengan busur api level 3 lebih proporsional terhadap komposisi yang direncanakan dibandingkan dengan busur api level 4, yang mengalami defisit kandungan Mn. Dengan demikian busur api level 3 digunakan untuk mendapatkan paduan dengan rasio komposisi (wt. %) proporsional dengan komposisi yang direncanakan.

Katakunci: Mass loss, logam paduan berbasis Ni, arc melting, Hume-Rothery rules

1. PENDAHULUAN

Logam paduan merupakan material hasil campuran antar logam, atau antara logam dengan elemen lain, yang dibuat untuk menghasilkan sifat dan karakter material logam yang diinginkan. Baik itu sifat mekaniknya, ketahanannya terhadap kondisi kerja, maupun sifat magnetiknya. Salah satu produk logam paduan yang terkenal hingga saat ini adalah baja yang merupakan hasil campuran antara besi (Fe) dan karbon (C). Dari komposisi dasar baja tersebut kemudian berkembang menjadi varian turunannya, antara lain *low carbon steel*, *stainless steel*, dan lain-lain. Selain baja tersebut ada pula material *superalloy* yang merupakan campuran berbasis nikel dengan elemen Fe, Mn dan Al (Pollock and Tin, 2006). Logam paduan ini berpotensi untuk aplikasi pada temperatur tinggi maupun sebagai logam paduan

magnetik (Zainul Huda, 2011; Cheng *et al.*, 2013; Dubenko *et al.*, 2015; Notonegoro *et al.*, 2016).

Dalam proses pencampuran bahan baku logam paduan, selain temperatur cair dan temperatur evaporasi dari masing-masing elemen, perlu diperhatikan pula karakteristik masing-masing elemen bahan baku terhadap kaidah Hume-Rothery rules, yaitu (Evans, Lloyd and Mujibur, 1979; Stiehler *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2009):

1. Jari-jari atom (r) elemen terlarut dan pelarut harus memiliki perbedaan kurang dari 15%:

$$\% \text{ perbedaan} = \left(\frac{r_{\text{terlarut}} - r_{\text{pelarut}}}{r_{\text{pelarut}}} \right) \times 100\% \leq 15\%$$

2. Struktur kristal elemen terlarut dan elemen pelarut harus mirip.
3. Kelarutan sempurna terjadi jika elemen terlarut dan elemen pelarut memiliki elektron valensi yang sama. Bahan logam dengan elektron valensi yang lebih besar akan lebih mudah melarutkan bahan logam dengan elektron valensi yang lebih kecil.
4. Elemen pelarut dan elemen terlarut harus memiliki kesamaan nilai elektronegatif. Jika perbedaan nilai elektronegatifnya terlalu besar, maka cenderung membentuk paduan intermetalik dibanding membentuk larutan padat.

Proses pencampuran bahan baku logam paduan pada umumnya dilakukan melalui proses peleburan. Diantara berbagai metode peleburan yang ada, salah satunya menggunakan metode *electric arc furnace* (EAF). Ada pula yang menyebut metode ini *arc melting furnace* (AMF), *electric arc melting* (EAM) atau *arc melting* (AM). Metode ini tak lain adalah mencairkan elemen-elemen logam menggunakan busur api yang dihasilkan dari arus listrik yang mengalir diantara elektroda yang berbeda kutub.

Peleburan dengan metode ini ada yang dilakukan pada kondisi vakum dan dalam suasana gas *inert* atau biasa disebut metode *vacuum arc melting* (VAM). Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya oksidasi saat berlangsungnya peleburan dengan mengeliminasi keberadaan oksigen dari dalam ruang bakar semaksimal mungkin. Salah satu alat peleburan yang menggunakan metode ini adalah *Compact Arc Melter MAM - 1 Edmund Bühler GmbH* (Gambar 1) yang memiliki kapasitas peleburan skala laboratorium (5 - 20 gr) dan mampu melebur hingga mencapai temperatur 3500 °C. Besarnya busur api yang digunakan untuk peleburan diatur lewat panel pengontrol yang terbagi kedalam sembilan level pembakaran (level: 0-9). Di bagian atas alat peleburan ini terdapat *pressure meter* jarum yang menginformasikan besarnya tekanan udara pada ruang peleburan. Namun tidak ditemukan panel monitor untuk mengetahui tingginya temperatur saat peleburan berlangsung. Berdasarkan spesifikasi temperatur maksimal yang bisa dicapai alat tersebut, diperkirakan kenaikan temperatur disetiap level pembakaran adalah sebesar 388,89 °C (Edmund Bühler GmbH, 2017).

Tidak adanya panel monitoring temperatur di ruang bakar telah menyisakan resiko. Bukan tidak mungkin panas busur api yang berlebih akan membuat sebagian elemen menguap dan terbuang saat proses pemaduan (Paduani *et al.*, 2007). Sehingga kehilangan massa (*mass loss*) tersebut berpotensi mempengaruhi rasio komposisi paduan logam yang terbentuk. Hal ini dapat mengakibatkan paduan logam yang dihasilkan tidak sesuai dengan komposisi yang direncanakan.

Compact Arc Melter MAM-1



Gambar 1. *Compact Arc Melter MAM - 1 Edmund Bühler GmbH* (Edmund Bühler GmbH, 2017).

Dalam penelitian ini telah dibuat paduan logam berbasis Ni dengan sistem paduan $\text{Ni}_{20}\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{32}\text{Al}_{18}$ (at. %) (Liao and Baker, 2008) menggunakan *Compact Arc Melter MAM - 1* dengan dua variasi level busur api untuk melihat pengaruhnya terhadap sampel yang dihasilkan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Paduan logam seberat 5 gr dengan komposisi elemen pada Tabel 4.1 dibuat sebanyak dua buah. Bahan baku yang digunakan adalah serbuk logam Ni, Mn, Fe dan Al dengan kemurnian 99.99%. Sebelum dilebur, bahan tersebut dicampur menggunakan mortar dan dikompaksi menjadi pellet berdiameter 1.2 mm. Kemudian pellet tersebut disinter pada temperatur 900 °C selama 1 jam.

Tabel 1. Komposisi $\text{Ni}_{20}\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{32}\text{Al}_{18}$.

Unsur	Ni	Fe	Mn	Al	Total
(at. %)	20	30	32	18	100
(wt.%)	22.78	32.50	34.08	9.42	100
Massa (gr)	1.14	1.63	1.70	0.47	5.00

Selanjutnya, kedua sampel tersebut dilebur dengan metode VAM menggunakan *Arc Melting Furnace MAM-1 Edmund Bühler* pada dua level arus yang berbeda. Level 3 untuk sampel 1 dan level 4 untuk sampel 2. Pengaturan ini dilakukan dengan memutar panel level arus yang terdapat didepan *furnace* tersebut. Setelah peleburan, kedua sampel ditimbang dan dikarakterisasi dengan *Atomic absorption spectroscopy* (AAS) untuk mengidentifikasi perubahan massa dan komposisi dari sampel yang dihasilkan.

3. PEMBAHASAN

Identifikasi kelarutan masing-masing elemen dalam logam paduan disusun berdasarkan kaidah *Hume-Rothery's Rules* pada Tabel 2. Sebagai basis elemen, Ni menjadi elemen berperan sebagai pelarutnya.

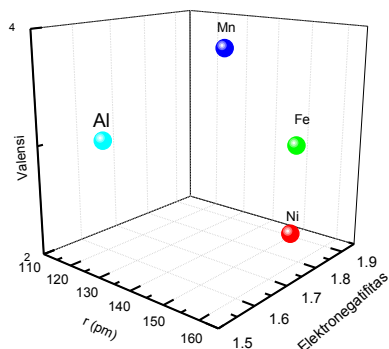
Sementara itu Fe, Mn, dan Al berperan menjadi elemen terlarut.

Tabel 2. Sifat dasar dari masing-masing elemen yang akan dipadukan.

Elemen Paduan	r (pm)	Elektro negatifitas (EN)	Valensi (Val)	$\Delta \%r_{Ni}$	ΔEN_{Ni}	ΔVal_{Ni}
Ni	149	1.91	2	0.00	0	0
Fe	156	1.83	3	4.70	-0.08	1
Mn	161	1.55	4	8.05	-0.36	2
Al	118	1.61	3	-20.81	-0.3	1

Dari data Tabel 2, tampak atom Fe, Mn, dan Al memiliki perbedaan jari-jari atom kurang dari <15% terhadap atom Ni. Sehingga tidak ada batas kelarutan elemen-elemen tersebut terhadap Ni. Selanjutnya, tampak perbedaan nilai elektronegatifitas dari Mn dan Al jauh lebih besar terhadap Ni bila dibandingkan dengan Fe. Sehingga Mn dan Al berpotensi membentuk paduan intermetalik dengan Ni. Disisi lain, nilai valensi antara Fe dengan Al yang sama besar membuat Al akan mudah larut kedalam Fe secara sempurna. Namun demikian, tingginya nilai valensi elemen Fe, Mn dan Al bila dibandingkan dengan nilai valensi dari Ni membuat Fe, Mn dan Al akan lebih sulit untuk dilarutkan oleh Ni (Evans, Lloyd and Mujibur, 1979; Stiehler *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2009).

Tampak pada Gambar 2 hasil pemetaan sifat dasar masing-masing elemen dari Tabel 2. Secara diagonal, terlihat posisi Al dan Mn terpisah jauh dari Ni bila dibandingkan dengan Fe. Sehingga kedua elemen tersebut berpotensi menjadi kendala dalam proses pemaduan. Hal ini menjadi alasan kuat untuk melakukan langkah pendahuluan atau *pre-treatment* dalam proses peleburan elemen-elemen paduan.



Gambar 2. Peta Hume-Rothery's Rules Ni-Fe-Mn-Al terhadap nilai jari-jari atom, elektronegatifitas dan valensi.

Kedua sampel tersebut kemudian dilebur dengan level arus yang berbeda yaitu level 3 untuk sampel 1 dan level 4 untuk sampel 2. Setelah peleburan, kedua sampel ditimbang kembali untuk mengetahui besarnya kehilangan massa yang terjadi yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 4.2. Tampak bahwa pada sampel 1 mengalami kehilangan massa sebesar 26% atau seperempatnya dari massa awal. Sedangkan pada sampel 2 terjadi kehilangan massa sebesar 12.6% dari

massa awal atau hampir setengahnya dari massa yang hilang pada sampel 1.

Tabel 3. Massa yang hilang dari Komposisi $Ni_{20}Fe_{30}Mn_{32}Al_{18}$ pada hasil perlakuan Sampel 1 dan Sampel 2.

Massa awal (gr)	5	Δ	%
Sampel 1 (gr)	3.697	1.3	26
Sampel 2 (gr)	4.369	0.63	12.6

Selanjutnya, untuk mengetahui perubahan komposisi paduan akibat massa yang hilang tersebut serta mengetahui bagian unsur yang berkurang akibat kehilangan massa tersebut maka dilakukan identifikasi unsur melalui uji AAS yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 4. Dari hasil uji AAS terhadap masing-masing sampel tersebut tampak adanya perubahan rasio massa (wt. %) komposisi yang terbentuk dari rasio massa komposisi yang direncanakan. Perubahan komposisi tersebut disebabkan oleh adanya massa yang hilang selama peleburan. Hal ini membuat wt.% dari unsur yang tertinggal menjadi lebih tinggi dari sebelumnya. Tampak pada sampel 1 kehilangan massa terjadi pada unsur Ni, Fe, dan Mn dengan porsi yang hampir sama sedangkan porsi massa Al dalam komposisi paduan cenderung tetap. Sementara itu pada sampel 2 nampak kehilangan massa yang terjadi didominasi oleh Mn, sedangkan porsi Fe nampak menjadi lebih besar.

Tabel 4. Hasil AAS terhadap komposisi logam paduan $Ni_{20}Fe_{30}Mn_{32}Al_{18}$ hasil perlakuan Sampel 1 dan Sampel 2.

Unsur	Sampel 1 (wt.%)	Sampel 2 (wt.%)	Referensi (wt.%)
Ni	20.02	22.17	22.78
Fe	30.3	48.38	32.5
Mn	31.47	19.99	34.08
Al	18.21	9.46	9.42
Total	100	100	100

Merujuk pada Hume-Rothery's Rules, nampak bahwa peleburan menggunakan busur api telah mempengaruhi interaksi antar elemen-elemen logam paduan yang memiliki jari-jari sama atau lebih besar dari elemen pelarutnya. Pada saat peleburan menggunakan busur api level 3 atau temperatur ~ 1166.67 °C yang telah melewati *melting point* Al dan dekat dengan *melting point* Mn, interaksi tersebut mengakibatkan terjadinya kehilangan massa (*mass loss*) dan elemen Ni, Fe dan Mn berkurang secara proporsional. Tetapi pada saat peleburan menggunakan busur api level 4 atau temperatur ~ 1555.56 °C yang telah melewati *melting point* semua elemen, Mn kian sulit larut kedalam paduan dibandingkan Fe. Hal tersebut diyakini karena jari-jari atom dan valensi Mn yang lebih besar diantara elemen lainnya. Interaksi Mn yang tidak larut tersebut dengan busur api yang terbentuk dari aliran elektron menyebabkan partikel Mn berhamburan terbang dan menjadi jelaga di dinding ruang peleburan.

Dari hasil tersebut diketahui bahwa kelarutan logam dalam logam paduan dipengaruhi oleh karakteristik dari masing-masing elemen penyusunnya. Sehingga dalam membuat paduan perlu diperhitungkan karakteristik elemen yang akan dipadukan menggunakan *Hume-Rothery's Rules*. Pada paduan logam Ni-Fe-Mn-Al yang dilebur menggunakan *Compact Arc Melter MAM - 1* tersebut, penggunaan busur api level 3 lebih baik dalam menghasilkan paduan dengan rasio komposisi yang lebih proporsional terhadap komposisi paduan yang direncanakan.

4. KESIMPULAN

Tidak adanya panel *monitoring* temperatur ruang bakar *Compact Arc Melter MAM - 1* telah menyisakan resiko. Panas busur api yang berlebih saat proses peleburan akan membuat sebagian elemen menguap dan terbuang. Dari *Hume-Rothery's Rules* diketahui bahwa perbedaan jari-jari atom dan elektron valensi antara elemen pelarut dan terlarut juga dapat mempengaruhi hal tersebut. Untuk melihat pengaruhnya, pembuatan logam paduan sistem $Ni_{20}Fe_{30}Mn_{32}Al_{18}$ (at. %) menggunakan *Compact Arc Melter MAM - 1* dengan variasi level busur api telah dilakukan.

Ditemukan bahwa penggunaan busur api level 3 menghasilkan *mass loss* yang lebih besar dari busur api level 4. Namun, rasio komposisi paduan yang diperoleh menggunakan busur api level 3 lebih proporsional terhadap komposisi yang direncanakan dibandingkan menggunakan busur api level 4, yang mengalami defisit kandungan Mn. Untuk itu, penggunaan busur api level 3 dilakukan untuk memperoleh rasio komposisi (wt. %) paduan yang proporsional dengan komposisi yang direncanakan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Dep. Fisika FMIPA-UI atas fasilitas risetnya. Terimakasih juga kepada Dr. Setia Budi MSc. (Univ. Negeri Jakarta) atas masukan dan diskusinya. Terimakasih juga pada Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA yang telah mendukung penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, K. *et al.*, 2013. Interdiffusion and atomic mobility studies in Ni-rich fcc Ni-Al-Mn alloys. Vol.579, . pp. 124-131. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.05.046.
- Dubenko, I. *et al.*, 2015. Multifunctional properties related to magnetostructural transitions in ternary and quaternary Heusler alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Elsevier Vol.383, . pp. 186-189. doi: 10.1016/j.jmmm.2014.10.083.
- Edmund Bühler GmbH, 2017. *Compact Arc Melter MAM-1 - Edmund Bühler GmbH Compact Arc Melter MAM-1 - Edmund Bühler GmbH*. Available at: <https://www.edmund-buehler.de/en/materials-science/arc-melting/compact-arc-melter-mam-1/> (Accessed: 1 January 2017).
- Evans, R., Lloyd, P. and Mujibur, R., 1979. On the origin of the Hume-Rothery rules for phase stability in α and β brasses. Journal of

- Physics F: Metal Physics Vol.9, No.10. p. 1939. doi: 10.1088/0305-4608/9/10/006.
- Liao, Y. and Baker, I., 2008. Microstructure and room-temperature mechanical properties of Fe₃₀Ni₂₀Mn₃₅Al₁₅. Vol.9, . pp. 35-38. doi: 10.1016/j.matchar.2008.01.017.
- Notonegoro, H. A. *et al.*, 2016. Magnetic hysteresis evolution of Ni-Al alloy with Fe and Mn substitution by vacuum arc melting to produce the room temperature magnetocaloric effect material. Vol.20019, . p. 20019. doi: 10.1063/1.4953944.
- Paduani, C. *et al.*, 2007. A study of Fe_{2+x}Mn_{1-x}Al alloys: Structural and magnetic properties. Physica B: Condensed Matter Vol.398, No.1. pp. 60-64. doi: 10.1016/j.physb.2007.04.068.
- Pollock, T. R. and Tin, S., 2006. Nickel based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties. Journal of propulsion and power Vol.22, No.2. pp. 361-374.
- Stiehler, M. *et al.*, 2007. On modifications of the well-known Hume-Rothery rules: Amorphous alloys as model systems. Journal of Non-Crystalline Solids Vol.353, No.18-21. pp. 1886-1891. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2007.01.052.
- Zainul Huda, 2011. Effects of annealing parameters on grain-growth behavior of HAYNES®-718 superalloy. International Journal of the Physical Sciences Vol.6, No.30. pp. 7073-7077. doi: 10.5897/IJPS11.245.
- Zeng, Q.-S. *et al.*, 2009. Substitutional alloy of Ce and Al. Proceedings of the National Academy of Sciences Vol.106, No.8. pp. 2515-2518. doi: 10.1073/pnas.0813328106.

