

## BAB VIII. PENGARUH KOMPOSISI BAHAN TERHADAP *MECHANICAL PROPERTIES* PADA *CRUCIBLE* UNTUK PELEBURAN ALUMINIUM

Rusiyanto<sup>1</sup>, D.F. Fitriyana<sup>1</sup>, R.D. Widodo<sup>1</sup>, W. Widayat<sup>1</sup>,  
Heri Yudiono<sup>1</sup>, Ari Dwi Nur M<sup>1</sup>, Hendrix Firmansyah<sup>1</sup>,  
Sudiyono<sup>1</sup>, Wara Dyah Pita Rengga<sup>1</sup>, M.S. Ilham<sup>1</sup>, Casminto<sup>1</sup>,  
dan I. Sanubari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin FT Universitas Negeri Semarang

me\_rusiyanto@mail.unnes.ac.id  
deniifa89@mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/ik.v1i1.80>

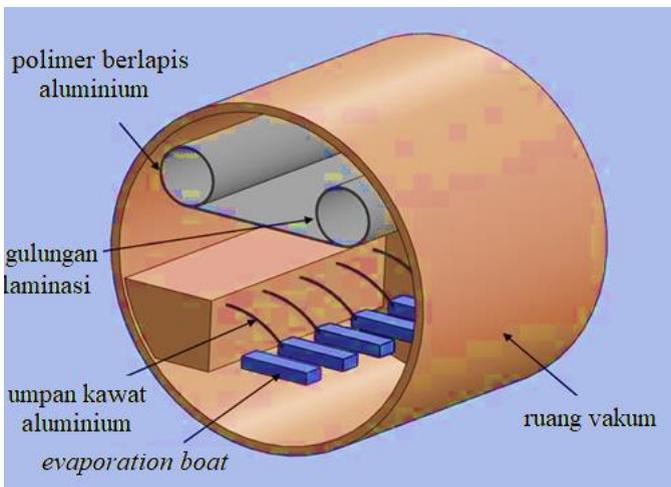
### Abstrak

*Crucible* terbuat dari bahan keramik atau logam yang digunakan untuk meleburkan logam atau bahan lainnya pada suhu yang sangat tinggi sebelum dituangkan pada suatu cetakan. Pada buku ini akan membahas tentang pengaruh komposisi bahan penyusun *crucible* terhadap sifat mekanik yang dihasilkan. *Crucible* dibuat dengan mencampurkan semen tahan api, limbah *evaporation boats*, pasir silika, grafit dan kaolin dengan komposisi tertentu. Proses pencampuran bahan dilakukan selama 60 menit dengan penambahan air sebanyak 25% dari total berat material. Proses kompaksi dilakukan dengan tekanan sebesar 80 kg/cm<sup>2</sup>. Spesimen yang terbentuk didinginkan pada suhu 30°C selama 7 hari sebelum di sintering. Proses *sintering* dilakukan pada suhu 1200°C selama 2 jam menggunakan *furnace* untuk menghasilkan produk akhir. Proses karakterisasi menggunakan pengujian *impact* sesuai dengan ASTM D256 dan pengujian makrografi. Hasil pengujian menunjukkan spesimen F memiliki kekuatan *impact* yang lebih besar dibandingkan spesimen yang lain yaitu sebesar 0,018 J/mm<sup>2</sup>. Hasil pengujian makrografi pada semua spesimen menunjukkan patahan *brittle* yang ditandai dengan patahan datar.

Kata kunci: *Crucible*, *Evaporation Boats*, Pasir Silika, Grafit, Kaolin

## PENDAHULUAN

*Evaporation boats* merupakan suatu paduan material yang digunakan untuk memproduksi lapisan aluminium tipis pada aplikasi dekoratif, plastik, gelas atau kemasan makanan pada ruangan vakum ( Mukhopadhyay *et al.*, 2009). Proses *metalizing plastic* adalah sebuah proses yang dilakukan dengan memanaskan aluminium menggunakan *evaporation boats* hingga titik lebur di ruang hampa sehingga atom dan molekul akan menguap dan menempel pada permukaan plastik yang bergerak dengan kecepatan tinggi lalu didinginkan dengan cepat sehingga mengkristal dan membentuk lapisan tipis di seluruh lapisan plastic seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.1. Proses *metalizing plastic* yang dilakukan pada aplikasi kemasan makanan pada suatu *vacuum chamber* biasanya memiliki ketebalan  $\pm 50$  nm (Bayus, 2015).

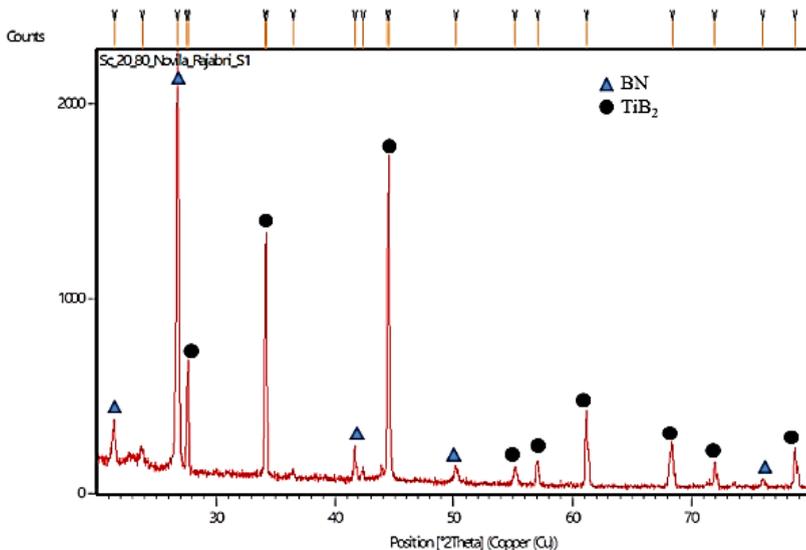


Gambar 8.1. Skema Proses *Metalizing Plastic* pada *Vacuum Chamber* (Bayus, 2015)

Teknologi ini banyak digunakan oleh industri manufaktur *metalizing plastics* yang menghasilkan produk kemasan makanan. Adanya lapisan metal aluminium pada kemasan makanan bertujuan untuk menghilangkan kontaminasi bahan makanan oleh

mikro organisme. Namun dalam operasinya, industri yang bergerak pada bidang ini selalu menghasilkan *evaporation boats*. Hal ini dikarena *life span* material *evaporation boats* hanya 15 jam (Bayus, 2015). Setelah waktu tersebut, diperlukan penggantian *evaporation boats* untuk mempertahankan keefektifan proses *metalizing plastic*. Hal inilah yang menyebabkan besarnya volume limbah *evaporation boats* yang dihasilkan pada industri metalisasi plastik.

Limbah *evaporation boats* memiliki kandungan *Boron Nitride* (BN) dan *Titanium Diborida* ( $\text{TiB}_2$ ) yang memiliki sifat konduktif elektrik dengan resistensi tinggi terhadap bahan kimia dan panas (3M Advanced Materials, 2015). Selain itu kombinasi material tersebut memiliki sifat konduktivitas termal yang tinggi dengan titik leleh mencapai  $2700^\circ\text{C}$ . Selain itu sifat bahan tersebut memiliki ketahanan oksidasi mencapai  $1000^\circ\text{C}$  sehingga sangat cocok jika diaplikasikan pada *crucible*, kowi atau *refractory* (Fajri *et al.*, 2021).



Gambar 8.2. Hasil Uji XRD pada Limbah *Evaporation Boats* (Fajri *et al.*, 2021)

Hasil uji XRD pada limbah *evaporation boats* ditunjukkan pada Gambar 8.2. Hasil uji menunjukkan bahwa BN dan  $\text{TiB}_2$  yang

cukup tinggi dengan kristalinitas yang tinggi. Puncak yang dihasilkan cukup tinggi. Kombinasi dari BN dan TiB<sub>2</sub> mengakibatkan limbah *evaporation boats* memiliki kesamaan sifat *chemical*, *mechanical* dan *electrical* yang sama dengan *evaporation boats* sebelum digunakan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1. Sifat Fisik dan Mekanik pada *Evaporation Boats* (3M Advanced Materials, 2015)

<i>Property</i>	<i>Value</i>
<i>Density, (g/cm<sup>3</sup>)</i>	> 2.75
<i>Porosity, P (%)</i>	< 3
<i>Brinell hardness (HB 2.5/40)</i>	45
<i>Flexural strength, 4-point bending, (MPa)</i>	70
<i>Young's modulus, E (GPa)</i>	55
<i>Fracture toughness K<sub>Ic</sub> (MPa √m)</i>	1.8
<i>Thermal conductivity at 20°C, λ(W/mK)</i>	80
<i>Resistivity at 1600°C, Rel (10<sup>-6</sup> Ωcm)</i>	1300 – 4800

U.S Patent dengan nomor paten 3256103 yang berjudul *Refractory Article* diajukan oleh Martin A. Roche, Jr., and Joseph C. Fisher, Jr., Fostoria. Pada paten tersebut menyebutkan BN dan TiB<sub>2</sub> dapat digunakan untuk memperbaiki *high temperature properties* dan meningkatkan *thermal cracking resistance* saat diaplikasikan pada aluminum *vaporization crucibles* dan *boats*. Invensi pada paten tersebut menggunakan metode *hot pressing* dengan komposisi campuran masing-masing titanium boride (T, boron nitrida dan titanium nitrida masing-masing sebesar 10-89%, 10-89%, dan 1- 10% (Roche, *et al.*, 1966).

U.S Patent dengan nomor paten 3544486 yang berjudul *Refractory Bodies Containing Aluminum Nitride (AlN), Boron Nitride And Titanium Boride* diajukan oleh Edmund M. Passmore, dan Wilmington, Mass. Pada paten tersebut bahan keramik yang bersifat menghantarkan listrik (konduktif) dibuat dengan campuran Aluminum Nitrida, Boron Nitrida dan Titanium Borida. Campuran ketiga bahan tersebut dilakukan proses *vacuum hot pressing* sehingga mampu menghasilkan material keramik yang bersifat sangat konduktif pada suhu tinggi karena memiliki *thermal*

*stability* dan *chemical inertness* yang baik. Penambahan AlN yang memiliki *sinterability* yang baik, membuat kombinasi material ini cocok diaplikasikan untuk refraktori (Edmund M. Passmore, Wilmington, 1994).

Limbah *evaporation boats* merupakan potensi besar untuk pemanfaatan dan pengelolaan limbah dimasa depan. Ketersediaan limbah *evaporation boats* dalam jumlah besar menunjukkan material BN dan TiB<sub>2</sub> yang melimpah. Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan limbah *evaporation boats* sebagai material *crucible* untuk peleburan aluminium. Selain mengurangi dampak lingkungan karena pencemaran limbah, penelitian ini juga dapat digunakan sebagai cara untuk meningkatkan nilai tambah dan nilai ekonomi limbah *evaporation boats* pada industri yang bergerak pada bidang metalising plastik. Peluang komersialisasi produk *crucible* ini masih sangat luas. Hal ini karena tingginya kebutuhan *crucible* untuk industri peleburan berbagai jenis logam yang ada di tanah air.

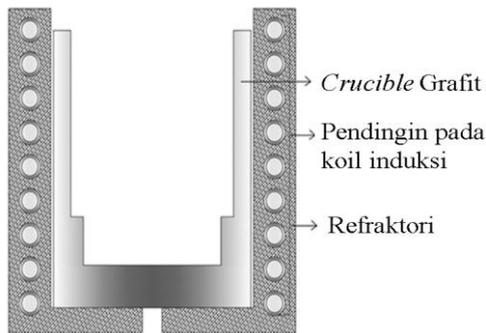
Minimumnya jumlah produsen dalam negeri, mengakibatkan tingginya nilai impor *crucible*. Selama tahun 2017-2020, nilai total impor *crucible* mencapai 5.552.135 (US \$) atau sekitar Rp 79.444.389.288,00 (BPS, 2021). Dari data tersebut, nilai rata-rata impor selama 2017-2020 sebesar 1.388.034 (US \$) per tahun atau sekitar Rp 19.861.097.322 per tahun. Jika asumsi *Gross Margin* yg ditambahkan 40% maka *Market size Crucible import* adalah 1.943.247 (US \$) per tahun atau sekitar Rp 27.805.532.674,00 per tahun.

## **KOWI/CRUCIBLE**

Pengecoran logam adalah proses pembuatan benda dengan menuangkan logam cair ke dalam rongga cetakan. Pengecoran logam dapat dilakukan untuk bermacam - macam logam seperti, baja paduan, tembaga, aluminium, besi, dan baja, serta paduan lain (Leman et al., 2014). Dalam proses produksinya, pengecoran logam membutuhkan dapur lebur yang dirancang untuk mencairkan logam dan paduannya. Selanjutnya logam cair tersebut dituang ke

dalam cetakan untuk menghasilkan produk akhir (Hakim, 2010; Mubarak et al., 2020; Sundari, 2011).

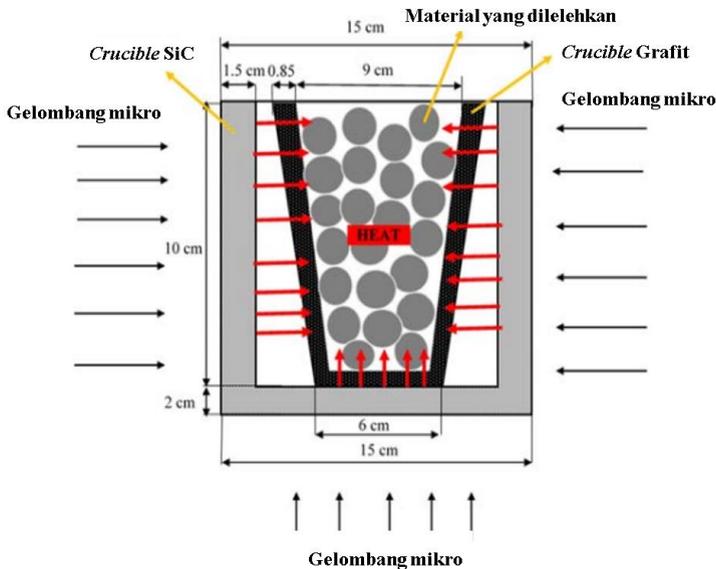
Kowi atau *crucible* merupakan sebuah wadah yang digunakan untuk meleburkan atau mencairkan logam pada proses pengecoran (*casting*) atau dapat juga digunakan untuk memanaskan bahan dalam proses perlakuan panas (Hendronursito *et al.*, 2019). Dalam pengertian lain, Kowi atau *crucible* adalah wadah yang terbuat dari keramik atau logam yang digunakan untuk meleburkan atau memurnikan material logam dan paduannya pada suhu yang sangat tinggi (Przylucki *et al.*, 2018). Kowi atau *crucible* dapat digunakan untuk meleburkan paduan nonferrous, tembaga, aluminium, dan timah hitam. Peleburan besi cor dapat dilakukan menggunakan dapur induksi frekuensi rendah (kupola). Dapur induksi frekuensi tinggi digunakan untuk melebur material yang tahan pada temperatur tinggi. Peleburan aluminium dengan skala kecil dan skala sedang biasanya dilakukan menggunakan tungku *crucible*. Ciri khas tungku *crucible* yaitu berbentuk krus menyerupai pot dengan diameter atas yang lebih lebar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.3 dan Gambar 8.4.



Gambar 8.3. Penggunaan *Crucible* pada Dapur Induksi (Patidar *et al.*, 2017)

Daya tahan atau masa pakai dari sebuah *crucible* tergantung pada kualitasnya agregat yang tidak hanya harus tahan suhu tinggi tetapi juga bersifat *inert* atau tidak bereaksi secara kimia dengan

bahan *fused solid materials* dan *tangled gas*. Pada umumnya, *failure* atau kegagalan suatu *crucible* tidak dapat dihindari karena penggunaan yang dilakukan secara terus menerus (Hendronursito *et al.*, 2019).



Gambar 8.4. Penggunaan *Crucible* pada *Microwave Furnace* (Mitrică *et al.*, 2020)

Kegagalan yang terjadi pada *crucible* dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu retak dan deformasi. Retak pada *crucible* dapat menyebabkan kebocoran cairan peleburan sehingga mengganggu produksi proses yaitu menyusutkan volume cairan peleburan; penurunan suhu yang menyebabkan kegagalan pengecoran karena tidak menghasilkan model pengecoran yang diinginkan. Deformasi yang terjadi pada *crucible* disebabkan oleh bahan *crucible* tidak dapat menahan suhu tinggi selama proses peleburan yang terjadi berkali-kali (Hendronursito *et al.*, 2019).

Oleh sebab itu, *crucible* harus memiliki karakteristik material dengan kemurnian tinggi, butiran halus, konduktivitas termal yang baik, kepadatan tinggi, porositas rendah, ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap *thermal shock*, stabilitas termal yang

baik, permeabilitas rendah, kekuatan mekanik yang tinggi, dan ketahanan oksidasi yang baik (Chen *et al.*, 2019). Selain itu, kekerasan pada *crucible* sangat berpengaruh terhadap kualitas dan *lifetime* pada *crucible*. *Crucible* dengan nilai kekerasan yang rendah dapat menyebabkan serbuk yang terkandung dalam kowi ikut tercampur pada proses peleburan sehingga dinding pada *crucible* tergerus dan tidak tahan lama. Semakin tinggi nilai kekerasan pada material pada *crucible* mengakibatkan *fatigue strength* meningkat (Henschel *et al.*, 2017).

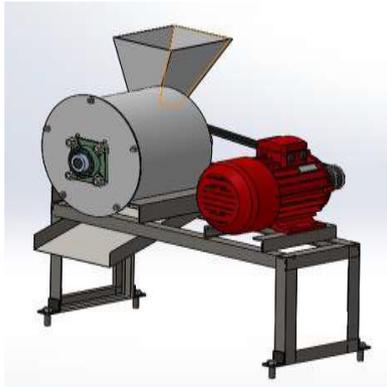
### Produksi *Crucible* dengan Berbagai Komposisi Bahan

#### 6) Persiapan Bahan Baku



Gambar 8.5. Limbah *Evaporation Boats*

Bahan yang digunakan pembuatan *crucible* adalah limbah *evaporation boats*, kaolin, semen tahan api, pasir silika dan grafit. Limbah *evaporation boats* yang diperoleh dari PT 3M (Gambar 8.5) dihaluskan menggunakan mesin *crusher* (Gambar 8.6). Proses pengayakan atau *meshing* dilakukan dengan mesh 80 (Gambar 8.7) untuk menghasilkan serbuk limbah *evaporation boats* (Gambar 8.8).

Gambar 8.6. Mesin *Crusher*Gambar 8.7. Ayakan *Mesh 80*

Selain limbah *evaporation boats*, pada penelitian ini juga menggunakan material semen tahan api, pasir silika, kaolin, dan grafit sebagai campuran untuk membuat spesimen *crucible*. Semen tahan api yang digunakan adalah *castable C-16* yang banyak digunakan pada aplikasi perekat batu tahan api, *furnace*, tungku peleburan, *incenerator*, cerobong, *ducting*, dan *rotary kilns*. Pasir silika memiliki titik lebur dan berat jenis masing-masing sebesar  $1715^{\circ}\text{C}$  dan  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Pasir silika banyak digunakan pada industri ban, karet, gelas, semen, beton, keramik, elektronik, dan cat. Material grafit hitam dari serbuk baterai diperoleh dari industri pengecoran logam Ceper Klaten, sedangkan lempung kaolin asli Belitung diperoleh dari toko kimia Indrasari, Kota Semarang, Jawa Tengah.



Gambar 8.8. Serbuk Limbah *Evaporation Boats*

## 2) Pencampuran bahan-bahan

Komposisi bahan yang digunakan pada proses pembuatan *crucible* ditunjukkan pada Tabel 8.2. Proses *mixing* bahan baku dengan komposisi tertentu dilakukan selama 60 menit menggunakan mesin *mixer* yang ditunjukkan pada Gambar 8.9. Selama proses *mixing*, dilakukan penambahan air sebanyak 25% dari total berat material dan diaduk sampai material kalis atau tidak lengket.

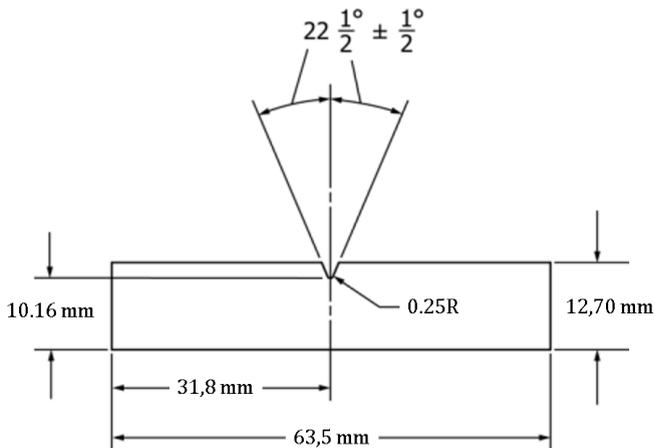
Tabel 8.2. Komposisi Bahan Dalam Pembuatan *Crucible*

Nama Spesimen	Bahan Baku	Komposisi
A	Semen tahan api	100%
	Serbuk limbah <i>evaporation boats</i>	0%
	Pasir silika	0%
B	Semen tahan api	50%
	Serbuk limbah <i>evaporation boats</i>	50%
	Pasir silika	0%
C	Semen tahan api	40%
	Serbuk limbah <i>evaporation boats</i>	50%
	Pasir silika	10%
D	Kaolin	30%
	Serbuk limbah <i>evaporation boats</i>	40%
	Grafit	30%
E	Kaolin	15%
	Serbuk limbah <i>evaporation boats</i>	70%

Nama Spesimen	Bahan Baku	Komposisi
F	Grafit	15%
	Kaolin	25%
	Serbuk limbah <i>evaporation boats</i>	50%
	Grafit	25%



Gambar 8.9. Mesin *Mixer* untuk Mencampurkan Bahan Baku



Gambar 8.10. Geometri Spesimen Pengujian  
(American Society for Testing & Materials, 1987)

### 3) Pembuatan spesimen *crucible*

Bahan – bahan yang telah dicampur, dimasukkan dalam cetakan untuk menghasilkan spesimen sesuai ASTM D256 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.10. Setelah itu, dilakukan proses kompaksi menggunakan mesin press dengan gaya kompaksi sebesar  $80 \text{ kg/cm}^2$ . Spesimen dengan berbagai komposisi yang telah dilakukan kompaksi didiamkan pada suhu ruang selama satu minggu sebelum di *sintering* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.11.



Gambar 8.11. Spesimen *Crucible* Setelah Proses Kompaksi

#### 4) Proses *sintering*

Proses *sintering* dilakukan pada spesimen *crucible* yang telah didiamkan pada suhu ruang selama satu minggu. *Sintering* adalah suatu proses pepadatan dari sekumpulan serbuk pada suhu tinggi mendekati titik leburnya hingga terjadi perubahan struktur mikro, pengurangan jumlah dan ukuran pori, pertumbuhan butir, dan peningkatan densitas. Proses *sintering* dilakukan pada suhu  $1150^\circ\text{C}$  selama 2 jam didalam *furnace* atau tungku pemanas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.12.



Gambar 8.12. Proses *Sintering* pada Spesimen *Crucible*

#### 5) Proses karakterisasi

Pengujian struktur makro digunakan untuk mengetahui bentuk patahan yang terjadi setelah dilakukan uji *impact*. Pengujian struktur makro kamera *Digital Single Lens Reflex* (DSLR) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.13. Pengujian *impact* dilakukan untuk mengetahui kekuatan *impact* spesimen uji sesuai ASTM D256 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.14.



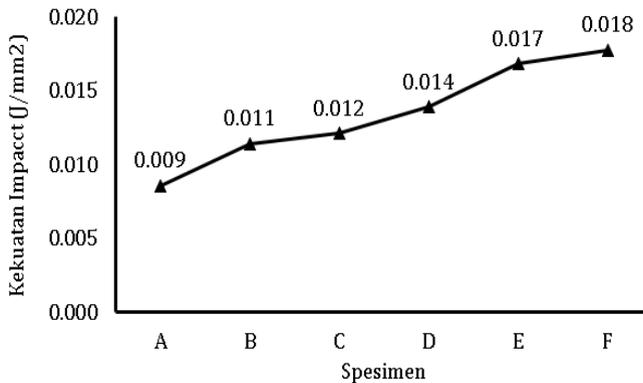
Gambar 8.13. Kamera Cannon 600D



Gambar 8.14. Proses Uji *Impact* Menggunakan Alat Mesin *Impact Gotech*

### PENGARUH KOMPOSISI BAHAN TERHADAP KUALITAS *CRUCIBLE*

Hasil pengujian *impact* pada spesimen *crucible* ditunjukkan pada Gambar 8.15. Kekuatan *impact* terendah ditemukan pada spesimen A dengan nilai kekuatan *impact* sebesar 0,009 J/mm<sup>2</sup>. Sedangkan kekuatan *impact* yang paling tinggi ditemukan pada spesimen F dengan nilai kekuatan *impact* sebesar 0,018 J/mm<sup>2</sup>. Spesimen A dibuat dengan menggunakan 100% semen tahan api. Sedangkan pada spesimen F menggunakan bahan yang terdiri dari campuran kaolin, serbuk limbah *evaporation boats*, dan grafit dengan komposisi masing-masing sebesar 25%, 50%, dan 25%.



Gambar 8.15. Pengaruh Komposisi Terhadap Kekuatan *Impact* pada Spesimen *Crucible*

Penggunaan serbuk limbah *evaporation boats* sebanyak 50% pada spesimen B dan spesimen C dapat meningkatkan kekuatan *impact* dibandingkan nilai kekuatan *impact* pada spesimen A yang menggunakan 100% semen tahan api. Nilai kekuatan *impact* pada spesimen B dan spesimen C masing-masing sebesar 0,011 J/mm<sup>2</sup> dan 0,012 J/mm<sup>2</sup>. Nilai kekuatan *impact* pada spesimen B dan spesimen C mengalami peningkatan sebesar 33% dan 41% dibandingkan nilai kekuatan *impact* pada spesimen A.

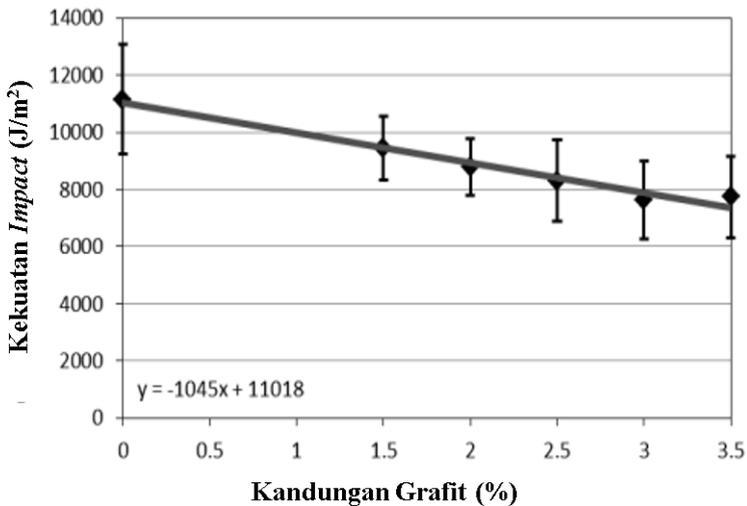
Penggunaan campuran serbuk limbah *evaporations boats*, kaolin dan grafit pada spesimen F terbukti mampu menghasilkan kekuatan *impact* yang lebih besar dibandingkan spesimen yang terbuat dari limbah 100% semen tahan api pada spesimen A maupun pada spesimen yang lain. Komposisi limbah *evaporation boats* yang digunakan pada spesimen A, spesimen B, spesimen C, spesimen D, spesimen E dan spesimen F masing-masing sebesar 0%, 50%, 50%, 40%, 70% dan 50%. Penambahan limbah *evaporation boats* dapat meningkatkan kekuatan *impact* dengan komposisi maksimum 50% pada setiap spesimen *crucible*. Jika kandungan limbah *evaporation boats* kurang atau lebih dari 50% mengakibatkan penurunan kekuatan *impact* pada setiap spesimen.

Kandungan BN pada limbah *evaporation boats* merupakan material yang memiliki titik lebur tinggi dan ketahanan yang baik pada suhu tinggi (Nurrohmah *et al.*, 2020). Hal inilah yang menyebabkan spesimen yang menggunakan limbah *evaporation boats* pada spesimen B, spesimen C, spesimen D, spesimen E dan spesimen F memiliki kekuatan *impact* yang lebih besar dibandingkan spesimen A. Kekuatan *impact* pada spesimen F, memiliki kekuatan *impact* yang paling besar, karena adanya campuran limbah *evaporation boats*, kaolin dan grafit.

Bahan grafit diketahui memiliki ketahanan temperatur yang tinggi serta tidak menimbulkan reaksi antara material yang dilebur dengan material kowi. Grafit mempunyai karakteristik lunak, ringan, dan mampu menghantarkan listrik sehingga dapat digunakan sebagai bahan reaktor yang bekerja pada suhu tinggi. yakni dijadikan bentuk berupa elektroda. Selain itu grafit memiliki konduktivitas listrik tinggi dan kemampuan ketahanan terhadap *thermal shock* yang baik. Pengaruh kandungan grafit terhadap kekuatan *impact* pada spesimen *crucible* dapat dilihat pada spesimen D, spesimen E dan Spesimen F. Pada spesimen D, dengan kandungan grafit sebesar 30% menghasilkan nilai kekuatan *impact* yang lebih rendah dibandingkan spesimen E dan spesimen F yang menggunakan grafit sebesar 15% dan 25%. Kandungan grafit yang paling baik digunakan sebesar 25% (spesimen F). Jika kandungan

grafit ditingkatkan hingga 30% dapat mengakibatkan penurunan nilai kekuatan *impact* pada spesimen *crucible*.

Secara umum, material grafit sebagai aditif dapat digunakan untuk memodifikasi sifat mekanik pada material dasar dan menghasilkan material baru yang lebih *rigid*. Namun, semakin tinggi kandungan grafit yang digunakan mengakibatkan penurunan *impact strength* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.16. Hal ini terjadi karena material grafit memiliki *bonding strength* yang rendah dengan material lain, sehingga saat dilakukan uji *impact* dengan beban dinamis akan mengakibatkan material mengalami *fracture* yang lebih cepat (Ando, 2018; Kumar *et al.*, 2021; Nurrohmah *et al.*, 2020).

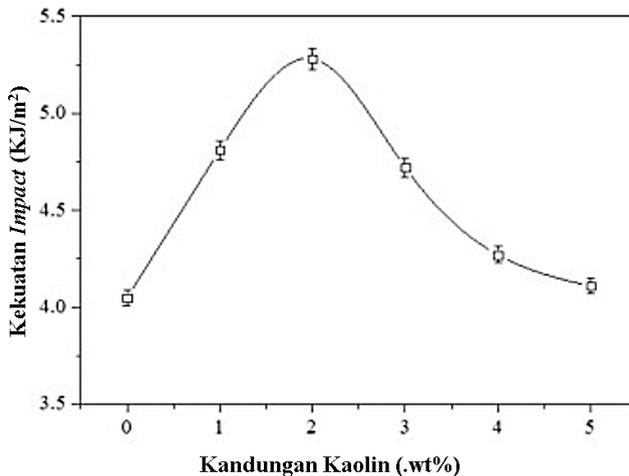


Gambar 8.16. Pengaruh Komposisi Grafit sebagai Aditif Terhadap Kekuatan *Impact* (Ando, 2018)

Penggunaan kaolin pada penelitian ini ditemukan pada spesimen D, spesimen E dan spesimen F. Kaolin sebagai campuran pembuatan kowi berfungsi sebagai bahan perekat. Kaolin merupakan jenis tanah liat dalam kelompok alumina silikat, sebagai bahan dasar pembuatan keramik. Pada spesimen D, spesimen E dan spesimen F menggunakan kaolin dengan komposisi masing-masing sebesar 30%, 15% dan 25%. Spesimen F dengan kandungan kaolin sebesar 25% mampu menghasilkan

kekuatan *impact* yang lebih tinggi dibandingkan spesimen yang menggunakan kaolin sebesar 15% dan 30%. Peningkatan komposisi kaolin dari 15% menjadi 25% pada spesimen E dan F mengakibatkan peningkatan kekuatan *impact*. Hal terjadi karena partikel kaolin menurunkan *surface energy* sehingga meningkatkan *dispersibility* dan *interfacial compatibility* antara kaolin dan bahan penyusun lainnya dalam pembuatan spesimen *crucible*. Peningkatan *dispersibility* dan *interfacial compatibility* karena kaolin yang digunakan semakin banyak menghasilkan *interfacial binding force* yang semakin baik antara kaolin dan bahan lain dalam pembuatan spesimen *crucible* sehingga kekuatan *impact* semakin besar (Nurrohmah *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2017).

Komposisi maksimum kaolin yang bisa digunakan adalah sebesar 25% seperti pada spesimen F. Jika penggunaan kaolin semakin banyak, seperti pada spesimen D (30%), maka mengakibatkan penurunan kekuatan *impact*. Hal ini terjadi karena *agglomeration* material kaolin yang semakin banyak sehingga kekuatan *impact* spesimen *crucible* mengalami penurunan (Yang *et al.*, 2017). Hasil yang sama didapatkan oleh Yang dkk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.17. Kandungan kaolin sebesar 0%-2% meningkatkan kekuatan *impact*. Namun, jika kaolin yang digunakan lebih besar dari 2%, kekuatan *impact* yang dihasilkan semakin turun.



Gambar 8.17. Pengaruh Komposisi Kaolin Terhadap Kekuatan Impact (Yang et al., 2017)

Spesimen *crucible* yang menggunakan campuran kaolin, limbah *evaporation boats*, dan grafit (Spesimen D, E dan F) menghasilkan kekuatan *impact* yang lebih besar dibandingkan spesimen *crucible* yang menggunakan campuran semen tahan api, limbah *evaporation boats*, dan pasir silika (Spesimen A, B dan C). Hal ini menunjukkan penggunaan kaolin, limbah *evaporation boats*, dan grafit memiliki pengaruh yang lebih baik terhadap kualitas *crucible* yang dihasilkan dibandingkan spesimen *crucible* yang menggunakan campuran semen tahan api, limbah *evaporation boats*, dan pasir silika. Penggunaan silika pada spesimen C, menghasilkan kekuatan *impact* yang lebih tinggi dibandingkan spesimen *crucible* yang tidak menggunakan silika seperti pada spesimen B dan A.

Penambahan silika pada material keramik dapat meningkatkan ketahanan pada temperatur tinggi dengan keunggulan pada sifat mekanik dan elektrik (Fajri *et al.*, 2021). Selain itu, peningkatan nilai kekuatan *impact* pada spesimen *crucible* menunjukkan spesimen *crucible* semakin tangguh. Adanya fraksi massa  $\text{SiO}_2$  dapat membatasi jumlah deformasi plastis yang diserap matrik. Hal ini mengarahkan kepada fenomena terjadinya *fracture* secara cepat pada penguat, pelepasan (*delamination*) matrik partikel  $\text{SiO}_2$  dan *spalling* partikel penguat. Sebagai konsekuensinya, terjadi peningkatan kekuatan *impact* seiring dengan penambahan partikel penguat  $\text{SiO}_2$  (Suprihanto *et al.*, 2006). Penggunaan silika pada spesimen *crucible* menghasilkan kekuatan *impact* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan spesimen *crucible* yang terbuat dari campuran kaolin, limbah *evaporation boats*, dan grafit.

Gambar 8.18 menunjukkan foto makro pada spesimen A, spesimen B dan spesimen C setelah dilakukan uji *impact*. Pada spesimen A menunjukkan foto makro yang berwarna putih dan bersifat tunggal atau tidak ditemukan adanya warna yang lain. Hal ini terjadi karena pada spesimen A menggunakan 100% semen

tahan api untuk membuat spesimen *crucible*. Hal ini terjadi karena semen tahan api yang digunakan memiliki komposisi kimia (*Chemical Composition*) yang terdiri dari  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{SiO}_2$  masing-masing sebesar  $> 50 \%$ , dan  $< 36 \%$ . Dominasi kandungan alumina atau  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada semen tahan api mengakibatkan morfologi pada spesimen didominasi warna putih.

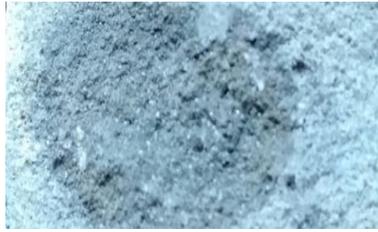
Pada struktur makro spesimen B dan C didominasi warna hitam yang menunjukkan limbah *evaporation boats* pada spesimen *crucible*. Secara umum pengamatan struktur makro dilakukan untuk mengetahui bentuk patahan yang terjadi pada spesimen setelah dilakukan uji *impact*. Gambar 8.19 menunjukkan foto makro pada spesimen D, spesimen E dan spesimen F setelah dilakukan uji *impact*. Pada struktur makro didominasi warna hitam yang menunjukkan limbah *evaporation boats*. Selain itu, terdapat bintik-bintik putih menunjukkan material kaolin, sedangkan material grafit ditunjukkan dengan warna kemerahan sebagai akibat proses sintering yang dilakukan pada suhu tinggi.



(a)



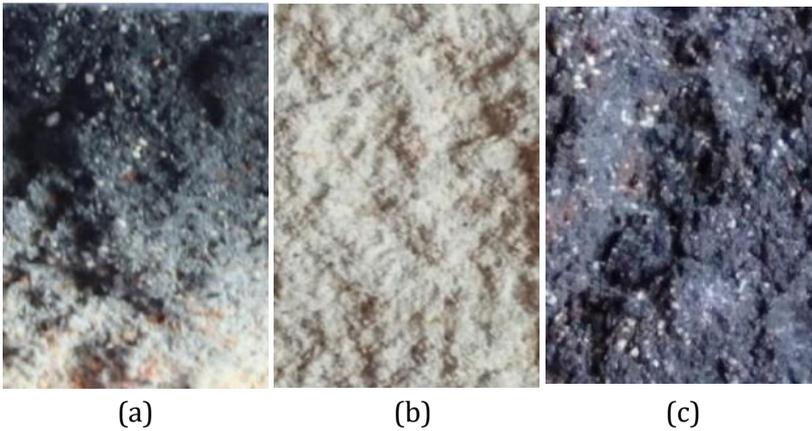
(b)



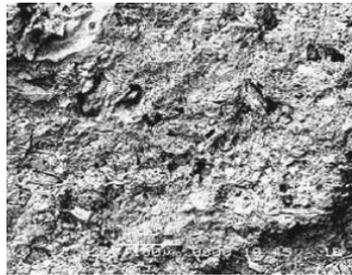
(c)

Gambar 8.18. Foto Makro dengan Perbesaran 100x pada (a) Spesimen A, (b) Spesimen B, dan (c) Spesimen C

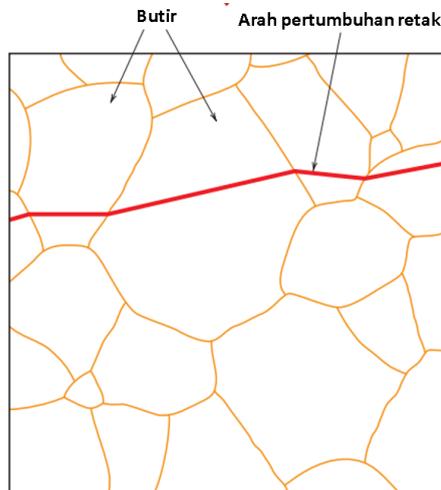
Spesimen setelah uji *impact* menunjukkan adanya patahan yang berbentuk granular atau patahan getas yang ditandai dengan patahan datar yang memantulkan cahaya dan terlihat mengkilap yang disebabkan oleh mekanisme pembelahan pada butir-butir keramik. Selain itu, juga ditemukan struktur makro pada spesimen uji memiliki bentuk *cleavage* yang merupakan ciri patah getas. Bentuk atau morfologi fenomena *cleavage* ditunjukkan pada Gambar 8.20. Sebagian besar material dengan *brittle crystalline*, *crack propagation* yang terjadi biasanya ditandai dengan pemutusan ikatan atom yang berurutan dan berulang di sepanjang bidang kristalografi tertentu. Proses inilah yang dinamakan *cleavage*. Tipe kegagalan ini disebut dengan *transgranular (transcrystalline)*, karena *fracture* yang terjadi melewati *grains* sehingga menghasilkan patahan yang berwarna cerah. Ilustrasi terjadinya kegagalan *transgranular* ditunjukkan pada Gambar 8.21. Selain itu, pada *brittle fracture* ditandai dengan adanya *radial fan-shaped ridge* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.22 (Callister and Rethwisch, 2018).



Gambar 8.19. Foto Makro dengan Perbesaran 100x pada (a) spesimen D, (b) spesimen E, dan (c) spesimen F



Gambar 8.20. Foto Permukaan *Cleavage* pada Material Keramik (Poznyak *et al.*, 2012)



Gambar 8.21. Skema Terjadinya *Transgranular Fracture*

(Callister and Rethwisch, 2018)



Gambar 8.22. Foto Permukaan pada *Brittle Fracture*  
(Callister and Rethwisch, 2018)

## SIMPULAN

Limbah *evaporation boats* memiliki potensi yang besar untuk diaplikasikan sebagai material *crucible*. Kandungan BN dan  $TiB_2$  pada limbah *evaporation boats* dapat meningkatkan kekuatan *impact* pada material *crucible*. Spesimen *crucible* dengan kekuatan *impact* yang paling besar ditemukan pada spesimen F. Spesimen F, terbuat dari campuran kaolin, serbuk limbah *evaporation boats* dan grafit dengan komposisi masing-masing sebesar 25%, 50% dan 25%. Spesimen *crucible* dengan kekuatan *impact* yang paling kecil ditemukan pada spesimen A yang menggunakan 100% semen tahan api.

Material kaolin dan grafit dengan komposisi masing-masing sebesar 25% lebih sesuai digunakan sebagai campuran limbah *evaporation boats* dalam proses pembuatan material *crucible*. Hal ini karena kombinasi material limbah *evaporation boats*, kaolin dan grafit mampu menghasilkan kekuatan *impact* (*impact strength*) yang lebih tinggi dibandingkan material *crucible* yang terbuat dari campuran limbah *evaporation boats* dan semen tahan api, serta campuran limbah *evaporation boats*, semen tahan api, pasir silika.

Kandungan maksimum limbah *evaporation boats* dalam pembuatan spesimen *crucible* adalah sebesar 50%. Jika kandungan limbah *evaporation boats* lebih atau kurang dari 50% dapat

mengakibatkan penurunan kekuatan *impact*. Semua patahan spesimen setelah uji *impact* menunjukkan ciri patahan *brittle* yang ditandai dengan adanya patahan berbentuk datar, *transgranular fracture*, *cleavage* dan permukaan pada patahan yang berbentuk *radial fan-shaped ridge*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Semarang dan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan Riset dan Teknologi pada Daftar Isian Pelaksanaan Anggaran (DIPA) Universitas Negeri Semarang Nomor: SP DIPA-023.17.2.677507/2021, tanggal 23 November 2020, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Dana DIPA UNNES Tahun 2021 Nomor 285.26.4/UN37/PPK.3.1/2021, Tanggal 26 April 2021.

## Daftar Pustaka

- 3M Advanced Materials., 2015. *3M Evaporation Boats*, pp.1–2.
- American Society for Testing & Materials. (1987). *ASTM D256 : Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. June 2010*.
- Ando, M., 2018. Influence of Graphite Additives on Mechanical, Tribological, Fire Resistance and Electrical Properties in Polyamide 6. *Tehnički vjesnik*, 25(4), pp.1014-1019.
- Bayus, J.A., 2015. *Environmental Life Cycle Comparison of Aluminum-based High Barrier Flexible Packaging Laminates*. Rochester Institute of Technology, pp.1-73.
- BPS., 2021. *Badan Pusat Statistik*.
- Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2018. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Vol. 9. New York: Wiley.
- Chen, H., Xiang, H., Dai, F.Z., Liu, J., & Zhou, Y., 2019. Porous High Entropy (Zr<sub>0.2</sub>Hf<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.2</sub>Nb<sub>0.2</sub>Ta<sub>0.2</sub>) B<sub>2</sub>: A Novel Strategy Towards Making Ultrahigh Temperature Ceramics Thermal Insulating. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(10), pp.2404-2408.
- Edmund, M., Passmore., & Wilmington, M., 1994. Refractory Bodies Containing Aluminum Nitride, Boron Nitride and Titanium Boride. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*.
- Fajri, N.R., Rusiyanto, R., Widodo, R.D., Sumbodo, W., & Fitriyana,

- D.F., 2021. Pengaruh Thermal Shock dan Komposisi Evaporation Boats, Semen Tahan Api, dan Pasir Silika terhadap Kekuatan Impact dan Foto Makro Lining Refractory. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(1), pp.11-17.
- Hakim, A., 2010. Perancangan Dan Pembuatan Dapur Pelebur Untuk Kuningan Dengan Kapasitas 50 Kg Untuk Keperluan Industri Rumah Tangga. *USU Institutional repository*.
- Hendronursito, Y., Isnugroho, K., & Birawidha, D.C., 2019. Analysis of Crucible Performance for Aluminum Scrap Casting at Small and Medium Enterprises (SMEs) Foundry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 478(1), pp.012005. IOP Publishing.
- Henschel, S., Gleinig, J., Lippmann, T., Dudczig, S., Aneziris, C.G., Biermann, H., Krüger, L., & Weidner, A., 2017. Effect of Crucible Material for Ingot Casting on Detrimental Non-Metallic Inclusions and the Resulting Mechanical Properties of 18CrNiMo7-6 Steel. *Advanced Engineering Materials*, 19(9), pp.1700199.
- Kumar, V., Mishra, A., Mohan, S., & Mohan, A., 2021. Utilization of Waste Graphite Crucible for the Fabrication of Ex-situ AA1100/Graphite Composite via Stir Casting Route. *Materials Today: Proceedings*, 46, pp.1481-1486.
- Leman, A., Tiwan., & Mujiyono., 2014. Pengembangan Tungku Peleburan Aluminium Untuk Mengembangkan Kompetensi Pengecoran Di SMK Program Studi Keahlian Teknik Mesin. *INOTEKS: Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan, Teknologi, dan Seni*, 18(10), pp.81-94.
- Mitrică, D., Șerban, B.A., Olaru, M., Burada, M., Dumitrescu, D., & Bănică, C.I., 2020. Modelling of the Energy Transfer During Scrap Melting in Microwave Furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 916(1), pp.012068
- Mubarok, A.H.M.A.D., Ilham, M.M., & Fauzi, A.S., 2020. Limbah Aluminium Bekas, Sampah Rumah Tangga, Mengurangi Pengangguran Rancang Bangun Metal Foundry Limbah Aluminium Bekas Berkapasitas 2 Kg Berbahan Bakar Gas Lpg. *Semnas IV*, 4(1), pp.1-6.
- Mukhopadhyay, A., Raju, G.B., Basu, B., & Suri, A.K., 2009. Correlation between Phase Evolution, Mechanical Properties and Instrumented Indentation response of TiB<sub>2</sub>-based Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(3), pp.505-516.

- Nasution, F.R., 2010. *Perancangan Ulang Dan Pembuatan Cawan Lebur Pada Dapur Crucible Untuk Peleburan Alumunium/Paduan Dengan Kapasitas 30 KG/ Peleburan*. Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Nurrohmah, S.I., Rusiyanto, R., Widodo, R.D., & Sumbodo, W., 2020. Pengaruh Thermal Shock dan Komposisi Grafit, Kaolin (Clay) terhadap Struktur Makro dan Ketahanan Impact Kowi Berbahan Dasar Limbah Evaporation Boats. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(2), pp.287-295.
- Patidar, B., Hussain, M.M., Jha, S.K., Sharma, A., & Tiwari, A.P., 2017. Analytical, Numerical and Experimental Analysis of Induction Heating of Graphite Crucible for Melting of Non-magnetic Materials. *IET Electric Power Applications*, 11(3), pp.342-351.
- Poznyak, A.I., Levitskii, I.A., & Barantseva, S.E., 2012. Basaltic and Granitic Rocks as Components of Ceramic Mixes for Interior Wall Tiles. *Glass and Ceramics*, 69(7), pp.262-266.
- Przylucki, R., Golak, S., Bulinski, P., Smolka, J., Palacz, M., Siwiec, G., & Blacha, L., 2018. Analysis of the Impact of Modification of Cold Crucible Design on the Efficiency of the Cold Crucible Induction Furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 355(1), pp.012009.
- Roche, M.A. Jr., Joseph, C., Fisher, & Jr., F., 1966. Refractory Article. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*.
- Sundari, E., 2011. Rancang Bangun Dapur Peleburan Alumunium Bahan Bakar Gas. *Austenit*, 3(01), pp.17-26.
- Suprihanto, A., & Setyana, B., 2006. Pengujian Mekanik Dan Fisik Pada Metal Matrix Composite (Mmc) Aluminium Fly Ash. *Rotasi*, 8(4), pp.50-57-57.
- Yang, N., Zhang, Z.-C., Ma, N., Liu, H.-L., Zhan, X.-Q., Li, B., Gao, W., Tsai, F.-C., Jiang, T., Chang, C.-J., Chiang, T.-C., & Shi, D., 2017. Effect of Surface Modified Kaolin on Properties of Polypropylene Grafted Maleic Anhydride. *Results in Physics*, 7, pp.969-974.