



**PENGARUH TEMPERATUR *SINTERING* TERHADAP DENSITAS,
POROSITAS, DAN KEKUATAN *BENDING LINING REFRACTORY*
BERBASIS LIMBAH *EVAPORATION BOATS***

Skripsi

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Mesin**

Oleh

Lucky Erliyanti

NIM. 5201415036

**PENDIDIKAN TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2019**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Lucky Erliyanti
NIM : 5201415036
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin
Judul : Pengaruh Temperatur *Sintering* terhadap Densitas, Porositas,
dan Kekuatan *Bending Lining Refractory* Berbasis Limbah
Evaporation Boats

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian
Skripsi Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas
Negeri Semarang.

Semarang, 31 Juli 2019

Pembimbing,



Drs. Sunyoto, M. Si.

NIP. 196511051991021001

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul PENGARUH TEMPERATUR *SINTERING* TERHADAP DENSITAS, POROSITAS, DAN KEKUATAN *BENDING LINING REFRACTORY* BERBASIS LIMBAH *EVAPORATION BOATS* telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 12.. bulan Agustus tahun 2019 .

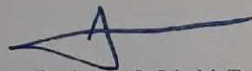
Oleh

Nama : Lucky Erliyanti
NIM : 5201415036
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin

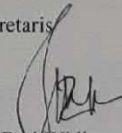
Panitia

Ketua

Sekretaris



Rusiyanto S. Pd., M. T.
NIP. 197403211999031002

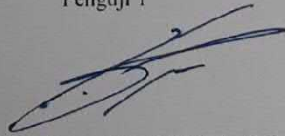


Dr. Dwi Widjanarko, S. Pd., M. T.
NIP. 196901061994031003

Penguji 1

Penguji 2

Pembimbing



Dr. Ir. Rahmat Doni Widodo, S.T., M.T. IPP.
NIP. 197509272006041002



Rusiyanto S. Pd., M. T.
NIP. 197403211999031002



Drs. Sunyoto, M. Si.
NIP. 196511051991021001

Mengetahui

Dekan Fakultas Teknik UNNES



Dr. I. Nur Qadus, M. T. IPM.
NIP. 196911301994031001

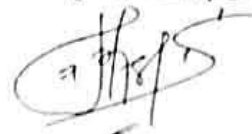
PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi/TA ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 12 Agustus 2019

Yang membuat pernyataan,



Lucky Erliyanti
NIM. 5201415036

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Untuk sukses, sikap sama pentingnya dengan kemampuan –Walter Scott-
Kelihatannya semua itu mustahil sampai semuanya terbukti –Nelson Maandela-

Untuk kedua orang tua dan adik yang Saya cintai

Untuk sahabat-sahabat Saya

Untuk teman-teman PTM 2015

RINGKASAN

Eriyanti, Lucky. 2019. Pengaruh Temperatur *Sintering* terhadap Densitas, Porositas, dan Kekuatan *Bending Lining Refractory* Berbasis Limbah *Evaporation Boats*. Pembimbing: Drs. Sunyoto, M.Si. Skripsi. Pendidikan Teknik Mesin.

Evaporation Boats merupakan limbah yang bisa didaur ulang menjadi bahan *refractory*. Namun belum termanfaatkan secara maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *sintering* terhadap densitas, porositas, dan kekuatan *bending lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.

Metode penelitian dalam penelitian ini adalah Desain *Experimental*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *evaporation boats*, Semen *Castable C-16*, dan pasir silika. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi temperatur *sintering* yaitu 800⁰C, 1000⁰C, dan 1200⁰C. Sedangkan variabel terikatnya adalah nilai densitas, porositas, dan uji *Bending*. Variabel kontrolnya antara lain komposisi spesimen *lining*, yaitu limbah *evaporation boats* 50%, Semen *Castable C-16* 40%, pasir silika 10%, dan air 15% diluar presentase campuran bahan sebelum air dimasukkan serta laju pemanasan 5⁰C/menit dan waktu penahanan selama 2 jam. Data yang sudah didapatkan kemudian dianalisis dengan cara analisis deskriptif, disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat pengaruh temperatur *sintering* terhadap densitas, porositas, dan kekuatan *bending*. Nilai densitas terendah ditunjukkan pada temperatur 800⁰C sebesar 1,72 gram/cm³ dan tertinggi ditunjukkan pada temperatur 1200⁰C sebesar 3,08 gram/cm³. Nilai porositas terendah ditunjukkan pada temperatur 1200⁰C sebesar 42% dan tertinggi ditunjukkan pada temperatur 800⁰C sebesar 18%. Kekuatan *bending* terendah ditunjukkan pada temperatur 800⁰C sebesar 7,32 MPa dan tertinggi ditunjukkan pada temperatur 1200⁰C sebesar 32,91 MPa. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa terdapat pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap densitas, porositas, dan kekuatan *Bending lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.

Kata Kunci: *sintering*, *lining refractory*, densitas, porositas, kekuatan *bending*, *evaporation boats*.

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi/TA yang berjudul PENGARUH TEMPERATUR *SINTERING* TERHADAP DENSITAS, POROSITAS, DAN KEKUATAN *BENDING LINING REFRACTORY* BERBASIS LIMBAH *EVAPORATION BOATS*. Skripsi/TA ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi S1 Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.

Shalawat dan salam disampaikan kepada Nabi Muhammad SAW, mudah-mudahan kita semua mendapatkan safaat Nya di yaumul akhir nanti, Aamiin. Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M. T., Dekan Fakultas Teknik, Rusiyanto, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan sekaligus Koordinator Program Studi Pendidikan Teknik Mesin atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa.
3. Drs. Sunyoto, M. Si., Pembimbing yang penuh perhatian dan atas perkenaan memberi bimbingan dan dapat dihubungi sewaktu-waktu disertai kemudahan menunjukkan sumber-sumber yang relevan dengan penulisan karya ini.
4. Dr. Rahmat Doni Widodo, S. T., M. T. dan Rusiyanto S. Pd., M. T., Penguji yang telah memberi masukan yang sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan, menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
5. Semua dosen, staf/karyawan, dan PLPP Jurusan Teknik Mesin FT UNNES yang telah memberi bekal pengetahuan yang berharga dan banyak membantu selama proses penelitian.

6. Dan berbagai pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga Skripsi/TA ini dapat bermanfaat untuk pelaksanaan pembelajaran di Jurusan Teknik Mesin FT UNNES.

Semarang, 2019

Lucky Erliyanti
NIM. 5201415036

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN BERLOGO	ii
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	iii
PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN	v
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	4
1.3 Pembatasan Masalah.....	5
1.4 Rumusan Masalah.....	6
1.5 Tujuan	6
1.6 Manfaat	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Kajian Pustaka	8
2.2 Landasan Teori	11
2.2.1. Pengecoran Logam.....	11
2.2.2. Tungku	13
2.2.3. <i>Lining</i>	19
2.2.4 <i>Refractory</i>	21
2.2.5. Evaporation boats.....	22
2.2.6. <i>Boron nitride</i> dan <i>Titanium diboride</i>	24
2.2.7. Semen Tahan Api (<i>Castable Tipe C-16</i>)	26

2.2.8. Pasir silika	28
2.2.9. <i>X-Ray Diffractions</i> (XRD)	32
2.2.10. <i>Sintering</i>	35
2.2.11. Densitas dan Porositas	36
2.2.12. Kekuatan <i>Bending</i>	40
2.3 Kerangka Berpikir	44
2.4 Hipotesis	45
BAB III METODE PENELITIAN	46
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	46
3.2 Desain Penelitian	46
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	48
3.4 Parameter Penelitian	54
3.6 Teknik Pengumpulan Data	61
3.7 Kalibrasi Instrumen	62
3.8 Teknik Analisis Data	64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	66
4.1. Hasil Penelitian	66
4.1.1 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	66
4.1.2 Pengujian Densitas	67
4.1.3 Pengujian Porositas	70
4.1.4 Pengujian Kekuatan <i>Bending</i> (σ_b)	72
4.2. Pembahasan Penelitian	74
4.2.1. Pengaruh Variasi Temperatur <i>Sintering</i> Terhadap Densitas <i>Lining Refractory</i> Berbasis Limbah <i>Evaporation Boats</i>	75
4.2.2. Pengaruh Variasi Temperatur <i>Sintering</i> Terhadap Porositas <i>Lining Refractory</i> Berbasis Limbah <i>Evaporation Boats</i>	76
4.2.3. Pengaruh Variasi Temperatur <i>Sintering</i> Terhadap Kekuatan <i>Bending Lining Refractory</i> Berbasis Limbah <i>Evaporation Boats</i> ...	77
BAB V PENUTUP	79
5.1. Kesimpulan	79
5.2. Saran	80

DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-Jenis <i>Refractory</i>	22
Tabel 2.2 Tabel Spesifikasi <i>Evaporation Boats</i> PT 3M Jakarta	23
Tabel 2.3 Komposisi Unsur Kimia Pasir Silika	31
Tabel 2.4 Penentuan Span	42
Tabel 2.5 Diameter <i>Bearing</i>	42
Tabel 2.6 Ukuran Spesimen	43
Tabel 3.1 Jumlah Spesimen Penelitian	57
Tabel 3.2 Tabel Instrumen Penelitian	62
Tabel 4.1 Hasil Nilai Densitas pada Temperatur 800 ⁰ C	68
Tabel 4.2 Hasil Nilai Densitas pada Temperatur 1000 ⁰ C	68
Tabel 4.3 Hasil Nilai Densitas pada Temperatur 1200 ⁰ C	69
Tabel 4.4 Hasil Nilai Porositas pada Temperatur 800 ⁰ C	70
Tabel 4.5 Hasil Nilai Porositas pada Temperatur 1000 ⁰ C	71
Tabel 4.6 Hasil Nilai Porositas pada Temperatur 1200 ⁰ C	71
Tabel 4.7 Nilai Kekuatan <i>Bending</i>	73
Tabel 4.8 Nilai Densitas, Porositas, dan Kekuatan <i>Bending</i>	74
Tabel 4.9 Perbandingan Nilai Densitas antara Spesimen Penelitian dengan Bahan <i>Refractory</i> Yang Sering Digunakan Secara Umum	76
Tabel 4.10 Perbandingan Nilai Porositas antara Spesimen Penelitian dengan Bahan <i>Refractory</i> Yang Sering Digunakan Secara Umum.....	78
Tabel 4.11 Perbandingan Nilai Kekuatan <i>Bending</i> antara Spesimen Penelitian dengan Bahan <i>Refractory</i> Yang Sering Digunakan Secara Umum	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Bagian Dapur Kupola	15
Gambar 2.2 Tungku Induksi	18
Gambar 2.3 Lining pada Tungku Induksi	19
Gambar 2.4 Konstruksi <i>lining</i> tungku induksi	20
Gambar 2.5 <i>Evaporation Boats</i>	22
Gambar 2.6 Satu unit kristal heksagonal dari TiB_2	26
Gambar 2.7 Semen <i>Castable</i> Tipe C-16	28
Gambar 2.8 Pasir Silika	28
Gambar 2.9 Perubahan bentuk kristal selama <i>Sintering</i>	35
Gambar 2.10 Skema <i>4-Point Bending</i>	42
Gambar 2.11 Kerangka Berpikir	45
Gambar 3.1 Gambar Hubungan Antar Variabel	48
Gambar 3.2 Ayakan <i>Mesh</i> 80	49
Gambar 3.3 Cetakan Spesimen Densitas dan Porositas	49
Gambar 3.4 <i>Universal Testing Machine</i>	50
Gambar 3.5 <i>Furnace</i>	50
Gambar 3.6 Neraca Digital	51
Gambar 3.7 Mesin <i>Press</i>	51
Gambar 3.8 <i>Roll Plat</i>	52
Gambar 3.9 <i>Vernier Caliper</i>	52
Gambar 3.10 <i>Stopwatch</i>	53

Gambar 3.11 Plastik Klip	53
Gambar 3.12 Spesimen Uji Densitas	58
Gambar 3.13 Spesimen Uji Porositas	59
Gambar 3.14 Spesimen Uji <i>Bending</i>	60
Gambar 4.1 Grafik Hasil Pengujian XRD	67
Gambar 4.2 Grafik Rata-rata Nilai Densitas	69
Gambar 4.3 Grafik Rata-rata Nilai Porositas	71
Gambar 4.4 Grafik Kekuatan <i>Bending</i> terhadap Variasi Temperatur <i>Sintering</i> ..	73

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Presensi Seminar Proposal Skripsi	87
Lampiran 2 Berita Acara Seminar Proposal Skripsi	88
Lampiran 3 Undangan Seminar Proposal Skripsi	89
Lampiran 4 Surat Tugas Dosen	90
Lampiran 5 Laporan Selesai Bimbingan Proposal Skripsi	91
Lampiran 6 Surat Keterangan Pengujian dan Grafik Pengujian <i>Bending</i>	92

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri pengecoran logam di Indonesia diprediksi masih eksis beberapa tahun ke depan. Pemerintah membutuhkan banyak logam dalam pembangunan seiring dengan pembangunan infrastruktur yang dilakukannya. Kebutuhan kendaraan seperti mobil dan sepeda motor yang pada dasarnya membutuhkan logam dalam pembuatan komponen-komponennya. Menurut Hariyanti (2014: 1), komponen-komponen otomotif biasanya terbuat dari besi dan aluminium. Kebutuhan logam untuk setiap unit mobil dan sepeda motor berbeda-beda. Kebutuhan akan logam berbahan besi setiap 1 unit mobil membutuhkan 50-200 kilogram sedangkan untuk 1 unit motor 22-25 kilogram. Untuk logam aluminium setiap 1 unit mobil membutuhkan 60-100 kilogram sedangkan untuk 1 unit motor 3 kilogram. Pengecoran logam juga sangat banyak dibutuhkan oleh perusahaan-perusahaan lainnya, seperti untuk alat berat, elektronik, dan pemesinan. Komponen pemesinan biasanya digunakan pada sektor migas, petrokimia, semen, serta pulp dan kertas.

Tungku juga terdapat beberapa bagian lagi yang mendukung proses peleburan logam. Saat ini berbagai upaya telah dilakukan untuk membantu para pengusaha industri pengecoran logam yakni dengan mengembangkan tungku atau dapur untuk peleburan. Pengembangan tungku umumnya dilakukan untuk meningkatkan efisiensi kerja tungku agar semakin baik.

Industri pengecoran logam ataupun di kampus yang menerapkan mata kuliah pengecoran logam, yang menjadi salah satu hal penting yang perlu diperhatikan saat proses pengecoran yaitu proses peleburan bahan di tungku peleburan. Tungku peleburan akan memasak logam yang solid hingga menjadi cair. Menurut Waghela, et al., (2018: 2) tungku adalah peralatan yang digunakan untuk meleburkan logam untuk proses pengecoran atau pemanasan suatu bahan untuk mengubah bentuk dan ukurannya seperti penggulangan, penempaan, dan lain-lain. Tungku juga dapat digunakan untuk mengubah sifat-sifat dari logam-logam seperti proses perlakuan panas.

Untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pembakaran dari sebuah tungku peleburan, diperlukan inovasi terhadap tungku peleburan tersebut. Dalam penelitian ini bahan pembuatan *lining* yang terbuat dari bahan *Refractory* komposisi bahannya ditambah dengan *evaporation boats* yang ada di Laboratorium Teknik Mesin FT UNNES karena belum dimanfaatkan secara optimal. Penulis mencoba memanfaatkan kembali *evaporation boats* tersebut agar menjadi lebih berguna dan tidak mencemari lingkungan. Inovasi tentang pemanfaatan limbah industri harus dilakukan karena semakin lama semakin berkembang, lingkungan sekitar akan tercemar dan keseimbangan di alam akan terganggu.

Penulis akan menambahkan *evaporation boats* pada komposisi pembuatan *lining*. Menurut 3M *Technical Ceramics*, (2015: 1) pada limbah *evaporation boats* tersebut mengandung unsur *Boron nitride* dan *Titanium diboride*. Penambahan *evaporation boats* pada komposisi pembuatan *lining* didasarkan pada persamaan

sifat-sifat antara bahan *Refractory* yang biasa digunakan dalam pembuatan *lining* (batu tahan api) dengan sifat limbah *evaporation boats* tersebut. Menurut artikel di website PT 3M diketahui bahwa salah satu material penyusun *evaporation boats* tersebut adalah *Boron nitride* yang tahan terhadap temperatur yang tinggi karena memiliki titik leleh hingga 2700°C , konduktivitas termal hingga 400 W/mK (untuk kristal tunggal), dan ketahanan terhadap oksidasi hingga 1000°C .

Pembuatan *lining* yang sangat diperhatikan adalah bahan *Refractory* untuk membuat batu tahan api pada *lining* tersebut. Menurut Bhatia (2012: 3) *Refractory* adalah bahan anorganik, non-logam, berpori dan heterogen yang terdiri dari agregat mineral yang memiliki ketahanan panas dan fase pengikatan yang stabil, serta aditif. Bahan baku utama yang digunakan dalam produksi *Refractory* adalah oksida silikon, aluminium, magnesium, kalsium dan zirkonium dan beberapa *Refractory* non-oksida seperti karbida, nitrida, borida, silikat, dan grafit. *Refractory* digunakan oleh industri metalurgi di lapisan internal tungku, kiln, reaktor dan pengangkut lainnya untuk menampung dan mengangkut logam dan terak.

Irwansyah, et al. (2010: 1-2) menyatakan bahwa pemakaian (keawetan atau umur pakai) dari bahan *Refractory* ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya harus tahan terhadap temperatur tinggi dan juga harus *inert* atau tidak bereaksi secara kimia dengan leburan bahan padat dan gas yang bersinggungan dengannya. Maka dari itu, untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas kinerja dari *Refractory* yang ada di industri-industri yang menggunakan tungku atau dapur peleburan untuk bahan logam maupun non-logam, diperlukan bahan baku

Refractory yang memiliki stabilitas kimia dan fisika yang dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang tinggi (di atas 1400°C).

Penulis akan meneliti tentang besaran fisis dari suatu bahan yaitu densitas dan porositas serta kekuatan *bending*. Fasya dan Iskandar (2015: 4) menyatakan bahwa densitas merupakan besaran fisis yaitu perbandingan massa (m) dengan volume benda (V). Pengukuran densitas dengan material yang bentuknya padat atau *bulk* pengujiannya bisa menggunakan Metode *Archimedes*. Porositas merupakan perbandingan antara volume ruang yang kosong (rongga berpori) terhadap volume dari zat padat itu sendiri. Porositas dari suatu bahan pada umumnya dinyatakan sebagai porositas terbuka atau *apparent porosity*.

Berdasarkan latar belakang di atas, diperlukan penelitian tentang PENGARUH TEMPERATUR *SINTERING* TERHADAP DENSITAS, POROSITAS, DAN KEKUATAN *BENDING LINING REFRACTORY* BERBASIS LIMBAH *EVAPORATION BOATS*. Sebagai komposisi baru, diperlukan adanya penelitian tentang sifat fisisnya, yang mana penulis memilih untuk meneliti porositas, densitas, dan ketahanan panas dari komposisi baru untuk membuat *lining* tersebut.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang diuraikan seperti di atas, maka dapat diidentifikasi permasalahan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Limbah *evaporation boats* belum dimanfaatkan secara maksimal di PT 3M Jakarta.

2. Limbah *evaporation boats* mengandung unsur *Boron nitride* yang memiliki sifat tahan terhadap panas yang baik namun belum dimanfaatkan dengan maksimal.
3. Masih sedikit pemanfaatan limbah yang digunakan untuk *refractory lining* agar dapat digunakan sebagai bahan isolator pada tungku peleburan.

1.3 Pembatasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang sudah diuraikan, maka pembatasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penambahan limbah *evaporation boats* yang mengandung *Boron nitride* yang digunakan hanya berasal dari limbah industri PT 3M Jakarta.
2. Komposisi pembuatan *lining* terdiri dari limbah *evaporation boats*, semen tahan api jenis *Castable* tipe C-16, dan pasir silika.
3. Peneliti hanya akan meneliti besar nilai densitas, porositas, dan kekuatan *Bending* dari komposisi baru *lining* tersebut.
4. Dilakukan proses pemanasan terhadap spesimen penelitian yaitu *sintering* dengan temperatur 800⁰C, 1000⁰C, dan 1200⁰C.
5. Laju pemanasan 5⁰C/menit dan waktu penahanan selama 2 jam. Pendinginan dilakukan di dalam tungku, jadi tungku dibiarkan dingin sampai temperatur tungku.
6. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian untuk mendapatkan nilai densitas dan porositas dengan menggunakan prinsip kerja dari Hukum *Archimedes*. Sedangkan untuk uji kekuatan *Bending* dilakukan dengan menggunakan Alat Uji *Bending*.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang ada dan untuk memperjelas masalah yang dihadapi, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh temperatur *sintering* terhadap densitas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *sintering* terhadap porositas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*?
3. Bagaimana pengaruh temperatur *sintering* terhadap kekuatan *Bending lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*?

1.5 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap densitas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.
2. Mengetahui pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap porositas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.
3. Mengetahui pengaruh temperatur *sintering* terhadap kekuatan *Bending lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.

1.6 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain sebagai berikut.

- a. Mengatasi limbah *evaporation boats* yang dihasilkan PT 3M Jakarta dengan memanfaatkannya agar dapat digunakan kembali.

- b. Penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya tentang pembuatan *lining*.
- c. Penelitian ini dapat dijadikan sumber referensi untuk proses pembelajaran maupun keperluan perusahaan yang berkaitan dengan pembuatan *lining*.
- d. Menambah hasil penelitian pada perkembangan ilmu pengetahuan tentang pengecoran logam terutama di Jurusan Teknik Mesin FT UNNES.
- e. Hasil penelitian ini merupakan hasil penerapan dari ilmu yang sudah Penulis dapatkan di bangku perkuliahan.
- f. Memenuhi mata kuliah Skripsi yang wajib ditempuh untuk mendapatkan gelar Sarjana Pendidikan Strata 1 Pendidikan Teknik Mesin.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Beberapa penelitian yang relevan dengan penelitian ini, penulis melakukan kajian pustaka terhadap penelitian yang dilakukan oleh Dahliana, et al. (2013: 52) menyimpulkan bahwa temperatur sintering mempengaruhi sifat fisis sampel komposit MgO-SiO₂. Seiring dengan kenaikan temperatur *sintering* sampel yaitu 1000⁰C, 1100⁰C, 1200⁰C, dan 1300⁰C, nilai densitas mengalami peningkatan sedangkan presentase porositas mengalami penurunan. Nilai kekerasan semakin meningkat karena ukuran butir yang semakin besar. Keterbatasan temperatur *sintering* sampel yang digunakan menyebabkan peneliti belum memperoleh sifat dengan harga stabil. Dibuktikan dengan grafik hasil penelitian yaitu nilai densitas dan kekerasan yang selalu naik seiring dengan meningkatnya temperatur *sintering* sedangkan nilai porositas cenderung menurun.

Penelitian yang dilakukan Sandra, et al. (2014: 395) menyimpulkan bahwa pemakaian aditif dengan temperatur *sintering* tinggi dapat terjadi penurunan densitas 0,853 gr/cm³ hingga 0,752 gr/cm³ dan penambahan porositas 21,186% hingga 23,287%. Banyaknya aditif dan temperatur *sintering* mempengaruhi banyaknya pori yang dihasilkan oleh membran. Temperatur *sintering* optimal pada membran keramik berpori untuk absorpsi logam berat Fe yaitu pada temperatur 400⁰C yang dapat menurunkan kandungan logam berat pada air tanah dari konsentrasi 3,8014 ppm hingga 0,2802 ppm. Hal ini terjadi

karena bahan aditif arang batok kelapa dan polimer PVA (*Polyvinylalcohol*) dengan temperatur tinggi dapat mengurangi kerapatan dan memperbesar porositas dari membran keramik tersebut. Ini dikarenakan sifat polimer PVA yang menguap pada temperatur tinggi. Pada jurnal penelitian yang meneliti tentang pengaruh temperatur terhadap pembentukan pori pada arang bambu didapatkan hasil bahwa temperatur *sintering* mempengaruhi banyaknya pori yang dihasilkan. Semakin tinggi temperatur *sintering* yang digunakan semakin banyak pori yang dihasilkan. Dari hasil tersebut diketahui bahwa banyaknya aditif dan temperatur *sintering* yang digunakan dapat mempengaruhi banyaknya pori yang dihasilkan oleh membran.

Penelitian yang dilakukan oleh Destyanto (2007: 55) menyimpulkan bahwa Komposit Plastik *High Density Polyethylene, Polyethylene Therephthalate* (HDPE, PET) - karet ban bekas menunjukkan sifat fisik dan mekanik terbaik pada temperatur *sintering* 160⁰C. Sifat fisik yang diteliti adalah densitas dan penyusutan, sedangkan sifat mekanisnya adalah kekuatan impak dan kekuatan lentur. Dibuktikan ketika peneliti menaikkan temperatur *sintering* dari 150⁰C ke 160⁰C akan meningkatkan densitas, penyusutan, kekuatan impak, dan kekuatan lentur, yang nilainya; 2,95 %; 16,9 %; 27,7 % dan 38,03 %. Sedangkan menaikkan temperatur *sintering* melebihi temperatur 160⁰C akan menurunkan sifat-sifat komposit. Penurunan sifat komposit dengan temperatur *sintering* dari temperatur 160⁰C ke 180⁰C adalah penyusutan 3,4 %; densitas 0,32 %; kekuatan impak 9,39 %; dan kekuatan lentur 16,86 %. Menaikkan temperatur *sintering* melebihi 160⁰C akan menurunkan sifat fisik maupun kekuatan mekaniknya.

Penelitian yang dilakukan oleh Nugraha (2010: 55) mendapatkan beberapa kesimpulan yaitu densitas pada karbon-karbon komposit batubara-*coal tar pitch* meningkat karena adanya pengaruh dari kenaikan temperatur. Sedangkan porositasnya berbanding terbalik dengan densitasnya dimana mengalami penurunann karena pengaruh kenaikan temperatur. Hal ini dibuktikan dengan hasil penelitian yang menyebutkan bahwa pada temperatur 200⁰C densitasnya 1,17 gr/cm³ dan porositasnya 14,59 %, temperatur 300⁰C densitasnya 1,23 gr/cm³ dan porositasnya 10,68 %, temperatur 400⁰C densitasnya 1,24 gr/cm³ dan porositasnya 10 %, dan temperatur 500⁰C densitasnya 1,25 gr/cm³ dan porositasnya 9,06 %.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ramlan, et al. (2017: 6) mendapatkan beberapa kesimpulan yaitu nilai rata-rata densitas pada magnet permanen BaO-6Fe₂O₃ 4.35 g/cm³ dan nilai rata-rata porositasnya 1.03 %. Hal ini dibuktikan dengan grafik hasil penelitian yang menyebutkan bahwa pada temperatur 1150⁰C densitasnya 3,24 gr/cm³ dan porositasnya 8,31 %, temperatur 1200⁰C densitasnya 4,22 gr/cm³ dan porositasnya 2,91%, temperatur 1250⁰C densitasnya 4,35 gr/cm³ dan porositasnya 1,03 %, dan temperatur 1300⁰C densitasnya 4,34 gr/cm³ dan porositasnya 1,01 %. Dapat disimpulkan bahwa nilai densitas meningkat dan porositasnya mengalami penurunann karena adanya pengaruh dari kenaikan temperatur.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Dutta dan Bose (2012: 123) didapatkan beberapa kesimpulan yaitu nilai rata-rata densitas dari pin yang diteliti melalui proses metalurgi serbuk meningkat dengan meningkatnya temperatur

sintering. Hal ini terutama disebabkan oleh penurunan porositas fraksional total sampel seiring dengan peningkatan temperatur *sintering*. Dibuktikan dengan tabel hasil penelitian yaitu pada temperatur 750⁰C densitasnya 5,221 gr/cm³ dan porositasnya 0,4710 %, temperatur 1000⁰C densitasnya 5,433 gr/cm³ dan porositasnya 0,4495%, dan temperatur 1250⁰C densitasnya 5,825 gr/cm³ dan porositasnya 0,4098%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai densitas meningkat dan porositasnya mengalami penurunann karena adanya pengaruh dari kenaikan temperatur.

Dari penelitian-penelitian diatas, dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur *sintering* berpengaruh terhadap nilai densitas dan porositas suatu bahan. Perbedaan penelitian-penelitian sebelumnya dengan penelitian yang dilakukan penulis adalah komposisi bahan utama yang digunakan. Penulis akan menggunakan limbah *evaporation boats* dari PT 3M Jakarta yang ada di Laboratorium Jurusan Teknik Mesin FT UNNES. Limbah tersebut akan digunakan untuk membuat *lining refractory* tungku. Selain itu, penulis akan meneliti tentang kekuatan *Bending* pada *lining refractory* tungku.

2.2 Landasan Teori

2.2.1. Pengecoran Logam

Sudjana (2008: 144) mengatakan bahwa pengecoran atau penuangan (*casting*) merupakan proses membentuk bahan baku atau benda kerja yang relatif mahal sehingga kualitas benda kerja perlu pemantauan atau pengendalian sejak awal proses dimana bahan masih mentah. Menghasilkan suatu produk dengan

sifat yang sudah direncanakan, maka komposisi dan kadarnya harus dianalisis terlebih dahulu. Bahan yang baik memiliki komposisi yang homogen serta larut dalam keadaan padat.

Menurut Leman (2010: 1) proses pengecoran logam adalah suatu proses pembuatan benda dengan urutan yang berkesinambungan mulai dari perancangan benda coran, menuangkan logam cair, hingga proses pengerjaan akhir (*finishing*). Dimulai dengan perancangan benda coran. Dalam perancangan yang merupakan proses awal pengecoran logam ini pasti akan mempengaruhi kualitas akhir suatu produk yang akan dihasilkan. Perancangan benda coran di awal proses juga harus memperhatikan banyak hal lain yang nantinya akan mempengaruhi proses selanjutnya dalam pengecoran logam, agar mudah dan dalam proses selanjutnya tidak ditemukan masalah yang krusial.

Hasil dari perancangan benda coran tersebut merupakan desain pola benda coran yang selanjutnya akan dibuat pola dan kotak inti. Pola dan kotak inti tersebut selanjutnya akan dibuat cetakan benda coran dan inti. Setelah logam dicairkan di dapur peleburan dan cetakan sudah siap digunakan, maka langkah selanjutnya yaitu menuangkan logam cair kedalam cetakan. Apabila sudah terpenuhi, maka biarkan logam tersebut menjadi keras karena mengalami pendinginan selama beberapa waktu di dalam cetakan tersebut. Tahap selanjutnya setelah beberapa waktu yang dirasa cukup, cetakan tersebut dibongkar dan benda coran yang sudah jadi bisa dibersihkan.

Dalam proses pengecoran logam, tidak hanya berhenti pada proses pembersihan benda coran saja, namun juga harus ada pengerjaan akhir (*finishing*)

menggunakan mesin (proses pemesinan). Sudjana (2008: 307) menyatakan bahwa proses pemesinan merupakan proses lanjutan ataupun proses akhir dari semua proses pengecoran logam dalam rangka pembentukan logam menjadi bahan baku berupa besi tempa atau baja paduan yang sengaja dirancang sesuai bentuk benda yang diinginkan agar mendapatkan bentuk mendekati dengan bentuk benda yang sebenarnya.

2.2.2. Tungku

Tungku peleburan merupakan salah satu hal yang penting untuk diperhatikan dalam dunia industri pengecoran logam. Karena di dalam tungku tersebut kita akan mencairkan atau meleburkan logam untuk kemudian dicetak. Maka dari itu, untuk memanaskan logam yang akan dicairkan dibutuhkan suatu alat yang disebut tungku. Bila dilihat dari segi energi panas yang dihasilkan, tungku dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu tungku yang memanfaatkan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran gas dan tungku yang menghasilkan panas yang memanfaatkan listrik sebagai sumber energinya (tungku induksi) (Rizal, et al., 2016: 1).

Menurut Waghela, et al., (2018: 2) tungku adalah peralatan yang digunakan untuk meleburkan logam untuk proses pengecoran atau pemanasan suatu bahan untuk mengubah bentuk dan ukurannya seperti penggulangan, penempaan, dan lain-lain. Tungku juga dapat digunakan untuk mengubah sifat-sifat dari logam-logam seperti proses perlakuan panas.

Dari beberapa pengertian diatas, dapat disimpulkan bahwa tungku adalah suatu alat yang digunakan untuk meleburkan atau mencairkan logam yang akan

dicetak pada proses pengecoran logam. Tungku juga memiliki beberapa klasifikasi atau macamnya.

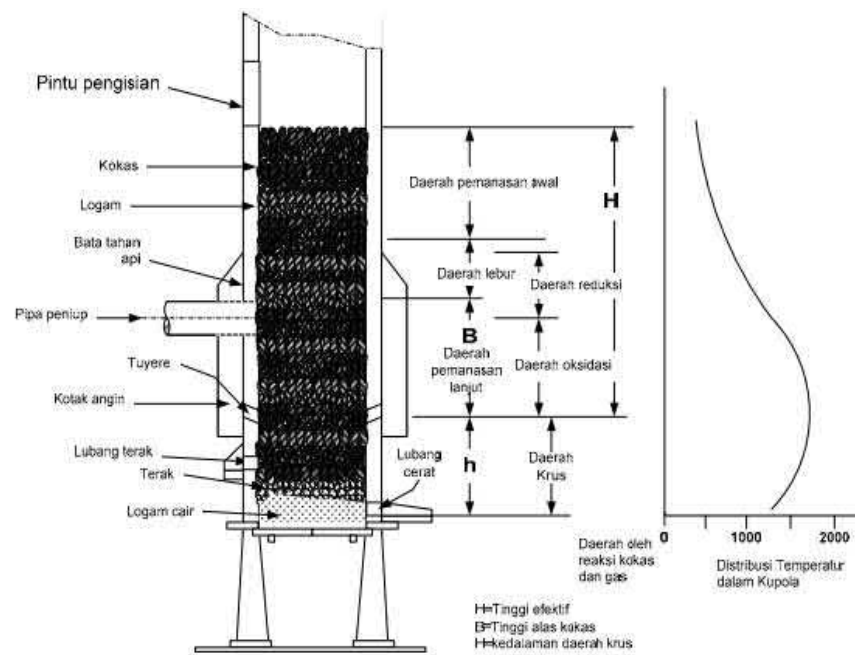
Waghela, et al., (2018: 2) mengatakan bahwa secara umum tungku dapat diklasifikasi menjadi dua jenis dari cara tungku tersebut menghasilkan panas, yaitu tungku jenis pembakaran dan tungku jenis listrik. Pada tungku tipe pembakaran umumnya yang digunakan sebagai bahan bakar adalah minyak dan batubara. sedangkan jenis tungku listrik dapat disebut juga sebagai tungku induksi. Tungku listrik ini umumnya digunakan dalam industri otomotif (mobil) dan skrap leleh.

Proses peleburan bahan yang akan dituangkan (logam cair) dilakukan dengan cara memanaskannya di dalam dapur Kupola dan dapur Induksi frekwensi rendah. Peleburan menggunakan dapur Kupola (*Cupola Furnace*) merupakan cara meleburkan bahan tuang yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan dapur listrik dan dapur lainnya. Karena dapur Kupola memiliki beberapa keunggulan, antara lain adalah sebagai berikut.

1. Konstruksi dapur kupola sangat sederhana dan mudah dalam pengoperasian.
2. Biaya operasional relatif rendah.
3. Kapasitas relatif besar.
4. Komposisi kimia mudah dikendalikan.
5. Dapat digunakan dalam peleburan secara terus-menerus.

Dapur Kupola (*Cupola Furnance*) merupakan salah satu dapur pemanas yang paling banyak atau hampir 90 % digunakan dalam melakukan peleburan dalam fungsi penuangan (pengecoran). Metoda yang lain juga sering digunakan

terutama untuk kebutuhan produk *cast iron* dengan kualitas khusus. Dapur kupola terbuat dari baja berbentuk silinder dengan posisi tegak, pada dinding bagian dalam dilapisi batu tahan api karena di dalam terjadi proses peleburan. Biasanya bahan bakar yang digunakan dalam peleburan baja ini adalah kokas (batu bara). Bahan logam yang menjadi bahan baku untuk dilebur dan dimasukkan ke dalam dapur ini harus memiliki susunan yang benar. Untuk itu dapur kupola dirancang sedemikian rupa sehingga mudah dalam mengoperasikannya. Dapat dilihat bagian-bagian dari dapur kupola secara rinci pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.1. Bagian Dapur Kupola

Dapat dilihat susunan bahan-bahan dari gambar dapur Kupola diatas, dimana bahan baku logam yang terdiri atas besi kasar (*Pig Iron* dan besi-besi bekas) serta bahan bakarnya yaitu kokas dimasukan kedalam dapur melalui saluran pengisi, dimasukkan secara berlapis dimulai dengan kokas hingga dapur tersebut terisi penuh, setelah semua unsur dimasukkan ke dalam dapur dan dirasa

sudah siap maka pembakaran dimulai dengan melakukan pembakaran awal dengan pemantik menggunakan arang kayu yang ditiup oleh udara melalui saluran yang disebut *Tuyere*. *Tuyere* yakni salah satu bagian dari dapur Kupola, dimana *Tuyere* dari dapur Kupola ini terdapat dalam berbagai bentuk misalnya silinder, segi empat atau *Rotary Blower*. Dari semua bentuk ini memiliki sistem peniup yang prinsip kerjanya sama yaitu dimana udara yang ditiupkan ini ditampung terlebih dahulu didalam kotak-kotak udara sebelum ditiupkan melalui *Tuyere* tersebut.

Menurut Sudjana (2008: 181) dapur Kupola dengan konstruksi dari beberapa bagian dengan fungsinya masing-masing, antara lain :

1. Bagian atau daerah pemanasan awal, yaitu bagian mulai dari pintu pengisian sampai pada tempat dimana logam mulai mencair.
2. Bagian daerah peleburan, yakni bagian dari alas kokas dan di tempat ini logam sudah mencair.
3. Bagian daerah pemanasan lanjut, yakni bagian yang berada pada daerah lebur dari *Tuyere*, pada daerah ini dilakukan pemanasan pada logam cair yang mengalir diantara sela-sela kokas.
4. Daerah Krus yaitu bagian dari batas *tuyere* hingga dasar Kupola dimana pada bagian ini logam cair bersama dengan terak ditampung.

Ada beberapa bagian penting lainnya di dalam dapur Kupola ini, dimana bagian-bagian ini merupakan bagian yang akan terjadi oksidasi akibat reaksi dari kokas, pada bagian ini disebut sebagai:

- a. Daerah Oksidasi, yaitu daerah yang terdapat diantara *Tuyere* hingga bagian tengah dari alas kokas. Proses oksidasi ini dapat terjadi karena adanya proses pembakaran awal kokas dengan bantuan udara yang ditiupkan melalui *Tuyere*.
- b. Daerah Reduksi yaitu daerah yang terdapat dibagian atas dari daerah oksidasi dimana Gas CO₂ yang terbentuk di daerah oksidasi direduksi oleh kokas.

Ukuran dapur peleburan Kupola ditentukan berdasarkan tinggi efektif. Tinggi efektif tersebut dihitung dari pertengahan *Tuyere* hingga bagian bawah pintu masuk pemanasan awal pada logam. Tinggi efektif dapur harus memiliki ukuran 4 sampai 5 kali diameter dari dapur Kupola tersebut sesuai dengan gambar. Apabila ukuran tinggi efektif terlalu panjang, tahanan terhadap laju aliran dari gas akan semakin besar. Sedangkan apabila terlalu pendek, pemindahan panas (laju panas) menjadi tidak efektif (Sudjana, 2008: 179-181).

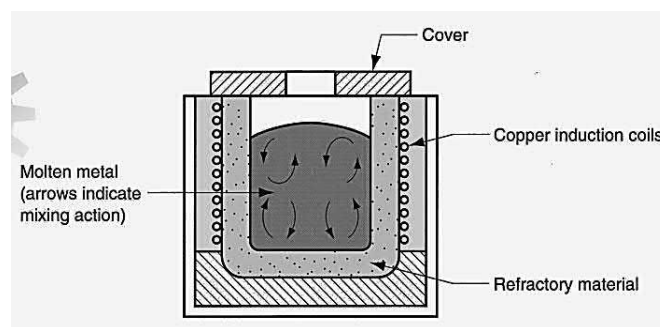
Menurut Rahmat (2015: 2) beberapa jenis tungku yang sering dipakai dalam pengecoran logam adalah sebagai berikut.

1. Tungku Induksi

Tungku induksi merupakan jenis tungku listrik yang menggunakan prinsip induksi dalam pemanasan logam hingga mencapai titik leburnya. Rincian spesifikasi dan kegunaan:

- a. Mampu mengatur komposisi kimia pada skala peleburan kecil.
- b. Terdapat dua jenis tungku yaitu *Coreless* (frekuensi tinggi) dan *core* atau *channel* (frekuensi rendah, ± 60 Hz).
- c. Biasanya digunakan pada industri pengecoran logam non-ferro maupun logam ferro.

- d. Secara khusus dapat digunakan untuk keperluan *superheating* (memanaskan logam cair di atas temperatur cair normal untuk memperbaiki mampu alir), penahanan temperatur (menjaga logam cair pada temperatur konstan untuk jangka waktu lama, sehingga sangat cocok untuk aplikasi proses *die-casting*), dan *duplexing*/tungku parallel (menggunakan dua tungku seperti pada operasi pencairan logam dalam satu tungku dan memindahkannya ke tungku lain)



Gambar 2.2 Tungku Induksi

2. Tungku Krusibel

Rincian spesifikasi dan kegunaan:

- Telah lama digunakan oleh banyak pihak dalam dunia peleburan logam.
- Proses pemanasan menggunakan berbagai jenis bahan bakar.
- Tungku ini fleksibel, dapat dipakai dalam keadaan diam, dimiringkan atau juga dipindah-pindahkan.
- Dapat diaplikasikan pada logam ferro dan non-ferro.

3 Tungku Kupola

Tungku Kupola terdiri dari suatu saluran/bejana baja vertikal yang di dalamnya terdapat susunan bata tahan api. Rincian spesifikasi dan kegunaan:

- Muatan terdiri dari susunan atau lapisan logam, kokas dan fluks.

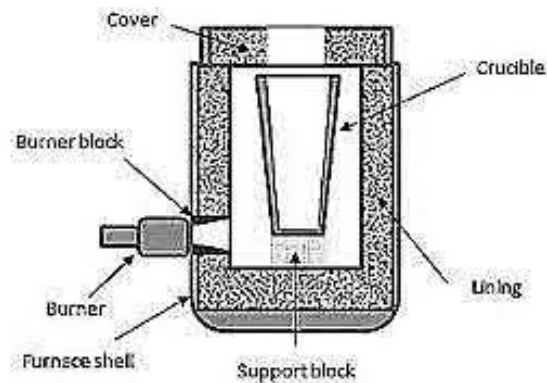
- b. Kupola dapat beroperasi secara terus menerus, menghasilkan logam cair dalam jumlah besar, dan laju peleburan tinggi.
- c. Biasanya digunakan untuk melebur Besi Cor (*Cast Iron*).

2.2.3. Lining



Gambar 2.3 Lining pada Tungku Induksi

Menurut Nugroho dan Umardhani (2011: 2-4), untuk menghasilkan sebuah konstruksi *Refractory* pada sebuah tungku induksi langkah awal atau proses awal yang harus dilakukan adalah proses *sintering* yang dilakukan pada bahan *Refractory* untuk *lining* tungku yang baru. Sehingga bahan *lining* yang semula terdiri dari serbuk kasar, sebagian akan berubah menjadi bersifat keramik yang tahan terhadap temperatur yang tinggi maupun sifat kimia. Untuk konstruksi *lining* tungku induksi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.4 Konstruksi *lining* tungku induksi

Sedangkan butir pada *Refractory* yang digunakan pada konstruksi *Refractory* untuk *lining* tungku peleburan baja dapat dikelompokkan menjadi 2 yaitu butir agregat besar dan butir agregat kecil. Yang termasuk pada butir agregat besar/kasar adalah butiran yang tertahan di nomor *mesh* 20 sedangkan yang termasuk butir agregat kecil/halus adalah butir yang tertahan di nomor *mesh* 100. Ukuran butir untuk agregat besar yaitu lebih besar dari 0,250 mm dan ukuran butir untuk agregat kecil berukuran lebih kecil dari 0,250 mm. Hal ini didasari dari ukuran butir yang dapat lolos dari nomor *mesh* 60.

Ukuran butir dan juga bentuknya akan mempengaruhi ketahanan dan sifat-sifat keramik dari *Refractory*. Untuk ukuran butir agregat yang kecil atau halus akan mempengaruhi kekuatan dan ketangguhan keramik *Refractory* menjadi semakin meningkat. Karena nilai densitas antar butir tersebut akan semakin baik dan porositas menjadi berkurang pada konstruksi *Refractory* yang akan dibuat *lining* tungku peleburan logam. Butiran agregat kecil lebih baik digunakan untuk bahan *Refractory* karena proses *sintering* akan berjalan lebih cepat dan mengurangi jumlah pori pada material *Refractory* karena antar butiran akan

mengalami difusi antar butir yang lebih baik dan cepat dibandingkan butiran agregat besar. Penggunaan agregat kecil dan agregat besar pada suatu konstruksi *Refractory* untuk *lining* tungku lebih baik dikarenakan butiran agregat kecil mampu mengisi celah antara butir agregat besar sehingga konstruksi *Refractory* menjadi rapat sehingga akan meningkatkan kekuatan, mempercepat proses *sintering Refractory* dan menghemat biaya instalasi *Refractory* dan dapat berfungsi mengurangi kerutan/*shrinkage* dan meningkatkan stabilitas *Refractory* pada temperatur tinggi.

2.2.4 Refractory

Bahan *Refractory* biasanya digunakan untuk membuat benda yang tahan terhadap temperatur panas yang tinggi. Pengertian dari *Refractory* atau bahan tahan api adalah salah satu bahan yang dapat mempertahankan kekuatannya pada kondisi temperatur yang tinggi. *Refractory* merupakan bahan non-logam sebagai struktur maupun komponen sistem yang biasa digunakan pada lingkungan kerja di atas 1000⁰C. *Refractory* digunakan dalam industri metalurgi terutama pada tungku sebagai komponen utama untuk pelapis atau isolasi selama beroperasi. *Refractory* juga merupakan bahan apa saja yang tahan terhadap efek padatan, cairan, atau gas yang abrasif atau korosif pada temperatur tinggi. Beberapa persyaratan umum lain dari bahan *Refractory* adalah tahan terhadap perubahan temperatur secara tiba-tiba, konservasi panas dan koefisien ekspansi termalnya rendah (Ogunsemi, et al., 2018: 2).

Bahan apa pun dapat digambarkan sebagai bahan tahan api, jika dapat menahan aksi padatan, cairan, atau gas yang abrasif atau korosif pada temperatur

yang tinggi. Bahan tahan api dibuat dalam berbagai kombinasi dan bentuk tergantung pada aplikasinya (*United Nations Environment Programme*, 2006: 2).

Irwansyah, et al. (2010: 1-2) menyatakan bahwa pemakaian (keawetan atau umur pakai) dari bahan *Refractory* ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya harus tahan terhadap temperatur tinggi dan juga harus *inert* atau tidak bereaksi secara kimia dengan bahan yang dilebur. Maka dari itu, untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas kinerja dari *Refractory* yang ada di industri-industri yang menggunakan tungku atau dapur peleburan untuk bahan logam maupun non-logam, diperlukan bahan baku *Refractory* yang memiliki stabilitas kimia dan fisika yang dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang tinggi (di atas 1400⁰C). Jenis-jenis *refractory* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Jenis-Jenis *Refractory*

Acid	Basic	Neutral	Special
- Fire brick	- Magnesite	- Chromite	- Pure alumina
- Semi silika	- Dolomite	- Carbon	- Zirconthoria
- Silika	- Chrome magnesite	- Grafit	- Spinel
	- Magnesite chrome	- Silicon carbide	- Boron nitride
	- Forsterite		

2.2.5. Evaporation boats



Gambar 2.5 *Evaporation Boats*

Diketahui bahwa bentuk awal dari limbah *evaporation boats* adalah balok persegi panjang, untuk itu agar dapat diproses untuk dijadikan spesimen pada penelitian ini maka limbah *evaporation boats* harus dijadikan serbuk terlebih dahulu menggunakan mesin *pres* hidrolis. Karena sebenarnya alat tersebut digunakan untuk membuat tangki di dunia industri. Dikutip dari *kennametal.com* produk *evaporation boats* memiliki sifat :

- a. Stabilitas jangka panjang.
- b. Sifat listrik yang konsisten.
- c. Tahanan listrik yang dapat disetel.
- d. Tahan guncangan termal yang tinggi.

Tabel 2.2 Tabel Spesifikasi *Evaporation Boats* PT 3M Jakarta.

Property	2-component	3-component
Density, ρ (g/cm ³)	>2,75	>2,80
Porosity, P (%)	<3	<6
Maximum water uptake (%) at 38 ⁰ C, 90% RH	<1,5	<1,0
Phase composition	TiB ₂ , BN	TiB ₂ , BN,
Color	Gray	AIN Gray
Electrical Properties		
Resistivity at 1600 ⁰ C, R _{si} (10 ⁻⁵ Ω cm)	1300-4800	375-4800
Mechanical Properties at Room Temperature		
Brinell hardness (HB 2,5/40)	45	95
Flexural strength, 4-point banding, σ (MPa)	70	90
Weibull modulus, m (1)	>20	>20
Young's modulus, E (GPa)	55	56
Fracture toughness, K (MPa \sqrt{m})	1,8	2
Thermal Properties		
Maximum thermal extension at 20-1600 ⁰ C (%)	<1,2	<1,5
Coefficient of thermal expansion at 20-1600 ⁰ C, α 10 ⁻⁵ /K	5,5 0,68	7 0,67
Specific heat at 20 ⁰ C, c _p (J/G ⁰ K)	80	55
Thermal conductivity at 20 ⁰ C, λ (W/m ⁰ K)		

Sumber : 3MTM *Evaporation Boats* dan 3MTM *Evaporation Boats 2 Series*

2.2.6. *Boron nitride dan Titanium diboride*

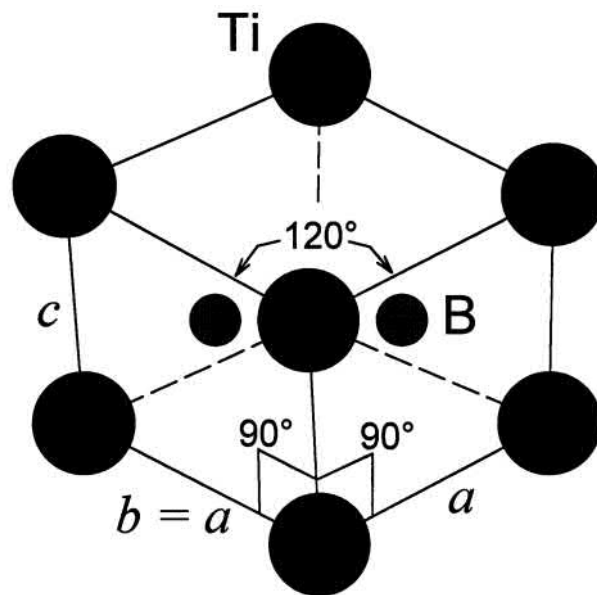
Heksagonal *Boron nitride* (BN) semakin banyak digunakan karena kombinasi sifatnya yang unik yang meliputi nilai densitas rendah ($2,27 \text{ g/cm}^3$), stabil pada temperatur tinggi (titik lebur mendekati 2600°C), kelembaman kimia (ketahanan korosi terhadap asam dan logam cair), kestabilan di udara hingga 1000°C (dalam atmosfer gas argon hingga 2200°C dan dalam nitrogen hingga 2400°C), stabil pada temperatur yang berubah secara tiba-tiba, kemudahan pengerjaan bentuk dalam kondisi panas tekan, mempunyai karakter isolasi listrik yang sangat baik, serta konduktivitas termal yang sangat tinggi. Sebagai konduktor termal, peringkat BN dengan *stainless steel* pada temperatur *cryogenic* dibandingkan dengan *Berilium oksida* (BeO) pada kondisi tinggi di atas 700°C , konduktivitas termal Heksagonal *Boron nitride* melebihi BeO beracun.

Sifat dielektrik yang baik (konstanta dielektrik adalah 4, yaitu setengah dari $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), juga kekuatan dielektrik yang tinggi. Koefisien gesekannya yang kecil dipertahankan hingga 900°C , sedangkan pelumas padat lainnya seperti grafit dan Molibdenum disulfida dibakar pada temperatur yang lebih rendah. Karena stabilitas temperatur tinggi dan *inertness* terhadap karbon dan karbon monoksida hingga 1800°C itu adalah sebagai keramik tahan api unggul dengan keramik nitrida Si_3N_4 dan Al_3N dan keramik oksida MgO, CaO, ZrO_2 . Karena sifat non-pembasahannya maka stabil untuk diserang oleh gelas cair, silikon cair, boron, terak nonoksidasi, garam cair (boraks, kriolit) dan lelehan logam reaktif (mis. Al, Fe, Cu, Zn). Karena sinterabilitasnya yang buruk, bentuk padat dari nitrida boron

heksagonal diperoleh hampir secara eksklusif dengan penekanan panas (Ertuğ, 2013: 36).

Titanium diboride (TiB_2) dikenal sebagai bahan keramik yang memiliki kekuatan dan daya yang relatif tahan terhadap temperatur yang tinggi, hal tersebut dibuktikan dengan sifat yang dimilikinya yaitu titik leleh yang tinggi, kekerasan, rasio kekuatan dan kepadatan, serta keausan resistensi yang baik. Namun, saat ini penggunaan bahan ini tampaknya terbatas pada aplikasi khusus area sebagai pelindung tahan benturan, alat potong, cawan lebur, dan memakai lapisan tahan api. Suatu penemuan baru yang penting adalah aplikasi penggunaan katoda TiB_2 dalam reduksi elektrokimia alumina menjadi logam aluminium. Kemungkinan apabila pengerjaan mesin TiB_2 dapat disempurnakan, penggunaannya dalam bidang kelistrikan dapat berkembang pesat.

Dalam jangkauan yang lebih luas, bahan ini memiliki hambatan yaitu dalam faktor ekonomi, khususnya biaya dalam pemadatan bahan yang memiliki titik lebur yang tinggi dan kekhawatiran tentang variabilitas sifat material. Saat ini banyak artikel tentang penelitian yang membahas sifat fisik, mekanik, dan termal TiB_2 sebagai fungsi kepadatan dan ukuran butir. Untuk *Titanium diboride*, prosedur pengolahannya tampaknya tidak begitu halus, dan akibatnya, kita harus mengantisipasi variabilitas *batch* ke *batch* yang lebih besar. Karena itu, yang paling penting adalah memiliki koheren tampilan properti TiB_2 dan ketergantungannya pada struktur mikro. Karya ini mengkonstruksi pandangan seperti itu dalam konteks tren nilai properti (Munro, 2000: 1).



Gambar 2.6 Satu unit kristal heksagonal dari TiB_2 .

2.2.7. Semen Tahan Api (*Castable Tipe C-16*)

Menurut website dari PT Benteng Api Refractorindo, semen tahan api (*Castable tipe C-16*) adalah jenis material *Refractory* yang masuk dalam kategori *monolithic*, yaitu material *Refractory* yang belum terbentuk dan untuk pemakaiannya perlu proses pembentukan atau dicampur dengan bahan yang lainnya seperti air bersih. *Castable* adalah jenis semen cor tahan api yang digunakan sebagai spesialis pemasangan pada *Boiler Furnace*, *Industrial Furnace*, *Kiln*, *Incinerators*, maupun keperluan cor tahan api umum lainnya.

Semen Cor Tahan Api C16/*Castable* TNC 16 atau biasa disebut *Castable* C16 ini pemasangannya dengan sistem *Formwork / By Casting*. Jadi harus dilakukan proses pengecoran yang memerlukan *formwork / casting* dengan menggunakan kayu/besi yang disesuaikan dengan kondisi pekerjaan.

Demi memperkuat fisik pengecoran diperlukan *Steel Anchor* dengan tujuan untuk menambah kekuatan fisik *castable* dan hasil pengecoran akan bertahan lebih lama. Setelah proses pengecoran, langkah selanjutnya yaitu proses pengeringan yang dilakukan selama kurang lebih 24 jam sebelum terkena temperatur yang tinggi. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan menghilangkan kadar air dalam cor agar *castable* kering dengan sempurna dan menghindari keretakan saat terkena temperatur api yang tinggi.

Spesifikasi produk (*product specification*) *Castable C-16* :

1. Nama Produk (*Product Name*) : *TECHNOCAST Castable TNC 16*
2. Jenis Produk (*Type Product*) : *Castable C16*
3. Daya Tahan Temperatur (*Max Service Temperature*) : 1500°C
4. Berat Jenis (*Bulk Density*) : $2.1 - 2.2 \text{ ton/m}^3$
5. Campuran Air (*Application Mix Water*) : $12 - 16 \%$
6. Daya Konduksi Temperatur (*Thermal Conductivity*) :
 - a. Pada 350°C : 0.82 Kcal/Mh
 - b. Pada 450°C : 0.87 Kcal/Mh
7. Komposisi kimia (*Chemical Composition*) :
 - a. Al_2O_3 : $> 50 \%$
 - b. SiO_2 : $< 36 \%$
8. *Packing* : 50 Kg/ bag

Semen *castable* tipe C-16 ini bisa didapatkan di Toko Lee Son Seng Semarang dengan harga Rp 450.000/*sack*.



Gambar 2.7 Semen *Castable* Tipe C-16

2.2.8. Pasir silika



Gambar 2.8 Pasir Silika

Pasir silika adalah jenis pasir yang mengandung kristal-kristal silika (SiO_2) dan pasir ini di dalamnya terdapat senyawa pengotor yang biasanya terbawa saat proses pengendapan. Pasir silika memiliki komposisi gabungan dari SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , dan K_2O . Pasir silika biasanya berwarna putih bening

atau bisa memiliki warna yang lain tergantung pada senyawa pengotornya. Memiliki beberapa sifat yaitu kekerasannya 7 (Skala Mohs), berat jenisnya 2,65 gr/cm³, kristalnya berbentuk heksagonal, dan panas spesifik 0,185. Pasir silika sering digunakan untuk mengolah air kotor menjadi air bersih. Fungsi ini baik untuk menghilangkan sifat fisiknya, seperti kekeruhan, lumpur dan bau (Aliaman, 2017: 20-21).

Pasir silika atau biasa disebut juga pasir kuarsa merupakan material alam yang jumlahnya melimpah di Indonesia, tercatat bahwa total sumber daya pasir silika sebesar 18 miliar ton. Permintaan pasir silika dari dunia industri cukup tinggi, diketahui pemenuhan kebutuhan industri akan pasir silika dengan kadar kemurnian yang tinggi cukup banyak. Di dunia perindustrian pemakaian pasir silika saat ini cukup pesat, seperti dalam industri ban, karet, gelas, semen, beton, keramik, tekstil, kertas, kosmetik, elektronik, cat, film, pasta gigi, dan lain-lain.

Pasir silika dengan kemurnian yang tinggi sulit untuk didapatkan di alam. Hal tersebut dikarenakan pasir silika memiliki afinitas yang tinggi terhadap oksida dan atom lain dengan elektronegativitas tinggi. Secara kimia, ikatan antara oksigen dengan silikon bersifat 50% kovalen dan 50% ionik, sehingga membentuk ikatan yang kuat. Kandungan pengotor yang terdapat didalam pasir silika dapat mempengaruhi kualitas pasir silika dan produk berbahan baku pasir silika seperti merusak transmisi dari fiber optik dan transparansi pada industri kaca, menghitamkan produk keramik dan menurunkan titik leleh dari material *Refractory*.

Jadi dalam penggunaannya, pasir silika perlu dimurnikan atau dibersihkan terlebih dahulu. Proses pemurnian pasir silika dapat dilakukan dengan metode kimia, fisika, biologi, atau gabungan antara ketiga metode tersebut. Selain dengan metode-metode tersebut, proses pemurnian pasir silika dapat dilakukan dengan proses *leaching* asam, dimana proses ini menggunakan asam organik dan asam anorganik. Proses pemurnian pasir silika juga dapat dilakukan dengan metode *leaching* dengan *treatment sonikasi*. *Sonikasi* pada proses pemurnian pasir silika digunakan sebagai energi untuk mempercepat proses *leaching*.

Pasir silika merupakan salah satu jenis pasir yang banyak dimanfaatkan dalam kehidupan manusia. Sebagai contoh pasir silika bisa digunakan untuk bahan baku kaca, keramik bahkan untuk saringan *filter* air. Pasir silika salah satu mineral yang umum ditemukan dikerak kontinen bumi. Mineral ini memiliki struktur kristal heksagonal yang terbuat dari silika trigonal terkrystalisasi (silikon dioksida, SiO_2), dengan skala kekerasan Mohs 7 dan densitas $2,65 \text{ g/cm}^3$. Bentuk umum kuarsa adalah prisma segienam yang memiliki ujung piramida segienam.

Pasir silika di Indonesia umumnya berasal dari Bangka yang biasa disebut pasir bangka, dan juga dari daerah Bandar Lampung yang biasa disebut pasir silika Lampung. Selain dari Bangka dan Lampung, Pasir silika atau pasir kuarsa juga ada beberapa dari daerah lain, seperti Tuban atau biasa orang menyebutnya pasir silika Tuban dan di beberapa daerah Kalimantan, dan Sumatra Selatan.

Tabel 2.3 Komposisi Unsur Kimia Pasir Silika.

Komposisi	Presentase (%)
C	8,36
Na ₂ O	4,25
Al ₂ O ₃	0,34
SiO ₂	86,93
CaO	0,12

(Sumber: Hardin, 2018: 31)

Dalam kegiatan industri, penggunaan pasir silika atau pasir kuarsa sudah berkembang meluas, baik langsung sebagai bahan baku utama maupun bahan tambahan. Sebagai bahan baku utama, misalnya digunakan dalam industri gelas kaca, semen, tegel, mosaik keramik, bahan baku fero silikon, silikon *carbide* bahan abrasit (*amplas* dan *sand blasting*). Sedangkan sebagai bahan tambahan, misal dalam industri cor, industri perminyakan dan pertambangan, bata tahan api (*Refractory*), dan lain sebagainya. Pasir silika juga biasa dipergunakan untuk membuat gelas, kaca, bahan campuran semen, *blasting* pipa (*sand blasting*) dan lainnya. Pasir silika digunakan untuk menyaring lumpur, tanah dan partikel besar / kecil dalam air dan biasa digunakan untuk penyaringan tahap awal (Hardin, 2018: 28-31).

Pasir ini nantinya akan menjadi salah satu bahan campuran untuk membuat spesimen penelitian. Bisa didapatkan melalui toko online.

2.2.9. *X-Ray Diffractions (XRD)*

XRD merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui fasa senyawa suatu material. Menurut Setiabudi dkk (2012: 33), XRD atau difraksi sinar X merupakan metode analisa yang menggunakan interaksi sinar X dengan atom dalam sistem kristal dari suatu material yang diteliti. Analisis yang dilakukan dapat berupa analisis kualitatif dan kuantitatif. Kristal merupakan susunan atom-atom yang tersusun rapi dalam ruang 3 dimensi akibat ikatan antar atom.

Kegiatan analisis yang berfungsi untuk mengidentifikasi senyawa yang terkandung dalam sebuah material dengan memanfaatkan pembiasan cahaya dari berkas cahaya yang dibiaskan oleh material. Prinsip kerja XRD adalah senyawa terbentuk dari kumpulan atom-atom yang membentuk bidang tertentu, kemudian bidang membentuk bentuk tertentu akan didatangkan cahaya/foton dari sudut tertentu akan menghasilkan pola pantulan dan pembiasan tertentu (khas). Kekhasan pola difraksi dijadikan sebagai landasan dalam analisa kualitatif yang berguna sebagai pembeda senyawa satu dengan senyawa yang lain menggunakan instrumen XRD. Pola unik ini seperti halnya dengan *fingerprint* pada manusia sehingga setiap senyawa akan berbeda. Perbedaan ini disebabkan karena meskipun arah datangnya cahaya sama, namun objek yang terkena berbeda akan memiliki orientasi yang berbeda yang mengakibatkan bayangan yang berbeda.

Hasil difraksi berkas cahaya pada kristal material dinyatakan dengan besar sudut yang terbentuk, dalam 2θ yaitu besarnya sudut datang dengan sudut difraksi yang dideteksi oleh detektor. Menurut Jamaluddin (2010: 8), XRD memiliki tiga komponen dasar yakni sumber sinar-X (*X-Ray Source*), spesimen uji, dan detektor

sinar-X (*X-ray detector*). Menurut Setiabudi dkk (2012: 43), komponen utama yang terdapat pada XRD adalah tabung elektron, monokromator, *filter*, sampel *holder*, *detector*, dan *software* analisa.

Tabung elektron merupakan tempat pembentukan elektron untuk menumbuk plat logam agar menghasilkan sinar X yang berguna untuk menumbuk material. Komponen tabung elektron adalah filament, tabung kedap udara, plat logam, dan pendingin. Monokromator adalah komponen XRD untuk mengubah berkas polikromatik menjadi berkas monokromatik. *Filter* adalah komponen XRD untuk menyaring berkas cahaya yang tidak dibutuhkan agar tidak mengganggu analisa data (*noise*). Sampel *holder* adalah komponen XRD untuk meletakkan sampel. Detektor adalah komponen XRD untuk mendeteksi berkas cahaya yang terdifraksi. Berkas cahaya yang telah terdifraksi akan tersimpan dalam pita. *Software* adalah perangkat lunak yang dibagi menjadi 2 yaitu perangkat lunak untuk menerjemahkan rekaman pada pita menjadi nilai sudut 2θ kemudian dirubah menjadi pola difraktogram. Kedua, *software* untuk menginterpretasikan data sudut 2θ sesuai intensitasnya kemudian diketahui indeks Miller dan nilai parameter kisi serta jarak antar kisi. *Software* kedua ini kemudian dapat digunakan untuk mengetahui struktur kristal material sampel.

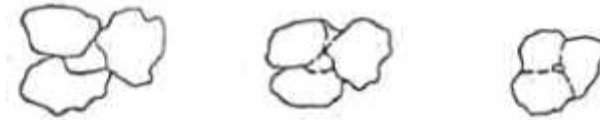
Spesimen uji yang digunakan dalam uji XRD berupa serbuk sebanyak 1 mg atau 0,1 gram. Prinsip kerja alat difraksi sinar-X adalah menyinari spesimen uji pada suatu plat kaca dengan sinar-X yang kemudian didifraksikan sinarnya ke segala arah untuk dideteksi berkas sinarnya oleh detektor. Menurut Setiabudi dkk (2012: 45), material yang digunakan untuk pengujian XRD harus berukuran $10\mu\text{m}$

atau *mesh* 200. Hasil difraksi dari difraktometer dapat berupa analog maupun digital.

Menurut Setiabudi dkk (2012: 39), hukum Bragg adalah formula matematis dalam proses difraksi sebagai hasil interaksi antara sinar X yang dipantulkan oleh material. Bragg menunjukkan bidang yang terisi atom akan memantulkan radiasi seperti pemantulan cahaya pada cermin. Metode difraksi berdasarkan hukum Bragg ($\gamma = 2d\sin\theta$), untuk menghasilkan pola difraksi dapat dilakukan variasi panjang gelombang dan sudut difraksi. Metode difraksi dapat dilakukan dengan dua jenis yakni metode Laue dan metode Debye-Scherrer.

Metode Laue adalah metode difraksi yang dilakukan dengan melakukan perubahan panjang gelombang dan sudut θ dibuat tetap. Teknik yang dilakukan berupa menetapkan arah sinar sudut datang sinar X dan mengubah plat logam yang menjadi sasaran tembak pada tabung sinar X. Metode ini memiliki kelemahan berupa kurang praktis karena harus mengubah-ubah plat logam. Metode Debye-Scherrer adalah metode difraksi yang dilakukan dengan melakukan perubahan pada sudut difraksi dan panjang gelombang dibuat tetap. Metode Debye-Scherrer biasa disebut sebagai metode serbuk, yaitu metode yang lebih modern dari metode Laue. Material yang memiliki panjang gelombang sama namun arah datangnya berbeda akan menyebabkan pola interferensi yang berbeda. Metode difraksi serbuk (*powder diffraction method*) dapat digunakan untuk menentukan struktur kristal.

2.2.10. *Sintering*



Gambar 2.9 Perubahan bentuk kristal selama *Sintering*.

Sintering adalah suatu proses mengubah butiran (material keramik) menjadi bahan keramik yang padat dan kuat melalui pemanasan. *Sintering* merupakan proses perlakuan panas terhadap suatu padatan serbuk pada temperatur tinggi yang diawali oleh pemberian tekanan sebelum dipanaskan dengan tujuan untuk mengurangi porositas. Saat padatan serbuk di-*sintering*, material tersebut mengalami perubahan kekuatan dan pengaruh elastisitas, kekerasan dan kekuatan patahan, konduktivitas listrik dan termal, permeabilitas gas dan cairan, ukuran dan bentuk partikel, ukuran dan bentuk pori, komposisi kimia, dan struktur kristal (Rifai dan Hartono, 2016: 2)

Teknik *sintering* adalah suatu reaksi yang akan terjadi pada saat proses pembakaran dengan temperatur yang dikontrol dan densifikasi padatan serbuk dapat diperoleh sekaligus sehingga tingkat porositas berkurang dan densitas relatif, kekerasan serta kekuatan tarik (*mechanical strength*) bertambah/naik (Sembiring dan Karo-Karo, 2007: 1).

Menurut Nugroho dan Umardhani (2011: 5-6), proses *sintering* disebut juga dengan proses densifikasi. Agar bahan yang mendapat perlakuan *sintering* mencapai kepadatan yang maksimum, maka diperlukan pemanasan dengan temperatur yang mendekati titik cair atau titik leleh dari material tersebut. Proses

sintering ini bermula dari kontak antar butir, selanjutnya titik kontak akan melebur akibat adanya proses difusi (transformasi massa) atom-atom. Difusi yang menyeluruh akan mengakibatkan penyusutan/*shrinkage* dengan porositas material tersebut juga akan berkurang akibat adanya pergerakan batas butir. Karena nilai porositas yang berkurang selama proses *sintering* karena adanya penyusutan volume pori-pori, maka densitas dari material meningkat seiring dengan peningkatan temperatur *sintering*. Laju penyusutan ini dipengaruhi oleh waktu dan temperatur *sintering*.

Saat temperatur *sintering* meningkat, densitas dari sampel meningkat dan ukuran partikel menjadi kasar (Jatmika, dkk, 2014: 1). Dalam penelitian ini temperatur *sintering* yang akan diujikan adalah 800⁰C, 1000⁰C, dan 1200⁰C dengan laju pemanasan 5⁰C/menit dan waktu penahanan 2 jam.

2.2.11. Densitas dan Porositas

Selama perlakuan panas atom-atom gelas mengalami proses kristalisasi sehingga volumenya menurun. Bila massa tidak berubah maka penurunan volume mengakibatkan rapat massa meningkat. Dengan demikian semakin tinggi nilai densitas maka nilai porositas semakin menurun. Hal ini dikarenakan kerapatan yang semakin meningkat sehingga sela ruang kosong telah terisi (Umbarwati, dkk, 2013: 7).

Densitas sebenarnya merupakan ukuran untuk kerapatan suatu zat yang dapat dinyatakan sebagai banyaknya zat (massa) per satuan volume zat itu sendiri. Jadi, untuk satuan dari densitas adalah satuan massa per satuan volume, seperti misalnya kg per meter kubik, gram per centimeter kubik, dan lain sebagainya.

Untuk pengujian densitas sendiri dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Archimedes* (Sumpena, 2017: 3).

Densitas termasuk ke dalam salah satu sifat fisis yang dimiliki suatu bahan yang menggambarkan kerapatan ikatan material-material penyusun suatu bahan. Tingkat densitas dipengaruhi oleh jenis dan jumlah mineral serta persentasenya, porositas, dan fluida pengisi rongga. Densitas memiliki beberapa macam yaitu densitas asli (*natural density*) yaitu densitas batuan dalam keadaan aslinya, densitas kering (*dry density*) yaitu densitas batuan dalam keadaan susut setelah batuan dipanaskan, dan densitas jenuh (*saturated density*) yaitu densitas batuan dalam keadaan jenuh setelah batuan dijenuhkan dalam suatu fluida.

Porositas dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara volume ruang yang terdapat diantara suatu material yang berupa pori-pori (ruang diantara serbuk yang selalu terisi oleh fluida seperti udara, minyak atau gas bumi) terhadap volume material secara keseluruhan. Porositas batuan merupakan rasio volume rongga-rongga pori terhadap volume total seluruh batuan yang dinyatakan dalam persen. Porositas juga tergantung pada jenis bahan, ukuran, distribusi pori-pori, sementasi, riwayat diagenetik dan komposisinya. Suatu batuan dikatakan memiliki porositas efektif apabila bagian rongga-rongga dalam batuan saling berhubungan dan biasanya lebih kecil dari rongga-rongga pori. Ada dua jenis porositas yang dikenal dalam teknik reservoir, yaitu porositas absolut merupakan rasio volume pori-pori total batuan terhadap volume total batuan dan porositas efektif merupakan rasio volume pori-pori yang saling berhubungan terhadap volume total batuan. Densitas dan porositas material dipengaruhi oleh struktur mikronya.

Struktur mikro memberikan informasi tentang orientasi kristalin, distribusi material penyusun, cacat, batas butir, ukuran butir atau pori (Ridha dan Darminto, 2016: 2).

Porositas dapat ditentukan dengan cara menghitung massa jenis tiap benda coran yaitu dengan menghitung massa benda coran kemudian dibagi dengan volumenya. Apabila massa jenisnya besar, berarti hal tersebut menandakan nilai porositasnya kecil. Sebaliknya, apabila nilai densitas rendah maka nilai porositasnya tinggi.

Pada proses *sintering* kemungkinan akan terjadi perubahan struktur dimana partikel-partikel saling berikatan dan ukuran butir menjadi lebih besar, sehingga dapat menutupi seluruh permukaan. Jadi memungkinkan tidak ada ruang kosong antar partikel yang menyusun material tersebut (Umbarwati, dkk, 2013: 6-7).

Penentuan porositas menggunakan persamaan: massa jenis = berat benda coran dibagi luas penampang benda coran atau ($\rho = m/v$). Pengujian densitas dilakukan dengan menggunakan metode *Archimedes*. Dalam menentukan massa jenis suatu benda pada eksperimen ini, akan menerapkan Hukum *Archimedes* : “*setiap benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya ke dalam fluida, akan mendapat gaya ke atas sebesar berat fluida yang dipindahkan oleh benda itu*”. Melalui pemahaman ini kita akan membandingkan harga massa jenis yang dihitung secara konvensional (menghitung massa dan volume) dan dengan menerapkan hukum *Archimedes*.

Prosedur pengujian Densitas adalah sebagai berikut :

- a. Menentukan berat kering specimen (*dry mass*), dengan ketelitian sampai 0,01 gram.
- b. Menentukan berat spesimen di dalam air (*suspended mass*), dengan ketelitian sampai 0,01 gram. Pengukuran dilakukan dengan mengikatkan spesimen di neraca dengan benang, kemudian ditimbang beratnya didalam air
- c. Perhitungan densitas dari spesimen dengan menggunakan persamaan:

$$\rho_m = \frac{M_k}{M_k - M_a} \times \rho_{H_2O} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.1}$$

Dimana:

ρ_m : densitas aktual (gram/cm³)

M_k : massa sampel kering (gram)

M_a : massa sampel dalam air (gram)

ρ_{H_2O} : massa jenis air = 1 gram/cm³

- d. Mengulang prosedur untuk jenis spesimen yang berbeda (Wilastri, 2011:3).

Porositas dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah volume ruang kosong (rongga pori) yang dimiliki oleh zat padat terhadap jumlah dari volume zat padat itu sendiri. Porositas suatu bahan pada umumnya dinyatakan sebagai porositas terbuka atau *apparent porosity* (Sumpena, 2017: 3).

Nilai porositas dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan berdasarkan standar ASTM D7263-09.

$$\phi = \frac{M_b - M_k}{M_b - M_a} \times 100\% \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.2}$$

Dimana:

ϕ adalah porositas (%)

M_b adalah massa basah (g)

M_k : massa sampel kering (gram)

M_a : massa sampel dalam air (gram) (Putri dan Putra, 2017: 2-3).

Menurut Nugroho dan Umardhani (2011: 5-6), porositas dapat mulai terbentuk pada saat pembentukan bahan, biasanya berasal dari ruang yang kosong diantara partikel-partikel yang terbentuk saat proses penyatuan atau kompaksi butir/serbuk selama proses pembuatan *Refractory*. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi porositas dapat terbentuk selama proses *sintering* yaitu karena adanya difusi atom yang tidak setimbang, gas yang terperangkap pada atmosfer *sintering*, atau penyebaran fasa cair yang meleleh saat *sintering*. Semakin berkurangnya porositas yang terbentuk pada material *Refractory*, maka densitas material *refractory* akan semakin tinggi dan material *Refractory* semakin padat.

Karena bahan *refractory* yang semakin padat, akan berpengaruh pada ketahanan *refractory* terhadap erosi suatu material menjadi semakin baik. Apabila nilai porositas yang dimiliki bahan *refractory* semakin besar, akan mengakibatkan mudahnya proses *infiltrasi* logam cair ataupun terak/*slag* ke dalam material *refractory*. Sehingga dapat menyebabkan bagian permukaan bahan *refractory* yang digunakan mudah lepas karena terinfiltrasi oleh logam maupun terak cair (*slag attack*). Jadi, untuk membuat bahan *refractory lining* yang baik dengan nilai porositas yang kecil dibutuhkan temperatur *sintering* yang lebih tinggi.

2.2.12. Kekuatan *Bending*

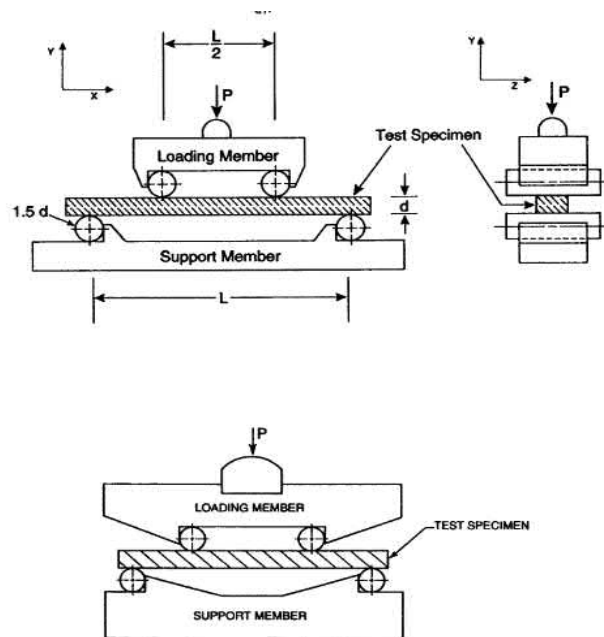
Kekuatan *Bending* diuji menggunakan pengujian lengkung (*Bending*) yang merupakan salah satu pengujian sifat mekanik bahan yang dilakukan pada

spesimen uji. Uji *Bending* diberikan pada bahan yang digunakan sebagai konstruksi atau komponen yang akan menerima pembebanan lengkung maupun proses pelengkungan dalam pembentukan. Pelengkuan (*Bending*) merupakan proses pembebanan terhadap suatu bahan pada suatu titik ditengah-tengah dari bahan yang ditahan diatas dua tumpuan. Dengan pembebanan ini bahan akan mengalami deformasi dengan dua buah gaya yang berlawanan bekerja pada saat yang bersamaan.

Bahan yang diberikan pembebanan akan mengalami perubahan bentuk (deformasi) secara bertahap dari elastis menjadi plastis hingga akhirnya mengalami kerusakan (patah). Proses pembebanan lengkung memiliki dua gaya yang bekerja secara bersamaan dengan jarak tertentu serta arah yang berlawanan, maka Momen lengkung (M_b) itu akan bekerja dan ditahan oleh sumbu batang tersebut atau sebagai momen tahanan lengkung (W_b). Proses pengujian lengkung memiliki tujuan pengujian yang berbeda tergantung kebutuhannya.

Berdasarkan kebutuhannya, maka pengujian lengkung dibedakan menjadi 2, yaitu pengujian lengkung beban dan pengujian lengkung perubahan bentuk. Pengujian lengkung beban ialah pengujian lengkung yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan bahan uji dalam menerima pembebanan lengkung. Pengujian lengkung perubahan bentuk berbeda dengan pengujian lengkung beban. Pada dasarnya proses pengujian lengkung perubahan bentuk ini bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh bahan uji ini dapat dibengkok atau dibentuk tanpa pemanasan. Oleh karena itu didalam prosesnya diperlukan pengamatan yang cermat serta memperhatikan berbagai aturan yang ditentukan dalam pengujian.

Proses pengujian *Bending*, terdapat 2 cara untuk melakukannya yaitu *4-point Bending* dan *3-point Bending*. Penelitian ini menggunakan *4-point Bending*, *4-point Bending* adalah cara pengujian dengan menggunakan dua tumpuan dan dua penekan. Berikut merupakan skema pengujian *4 point bending*:



Gambar 2.10 Skema *4-Point Bending*

Pengujian *bending strength* didasarkan pada standar ASTM C1161-13. Berikut merupakan ketentuan yang digunakan dalam menentukan ukuran spesimen:

Tabel 2.4 Penentuan Span

Konfigurasi	Support span (L), mm	Loading span, mm
A	20	10
B	40	20
C	80	40

Tabel 2.5 Diameter *Bearing*

Konfigurasi	Diameter, mm
A	2,0-2,5
B	4,5
C	9,0

Tabel 2.6 Ukuran Spesimen

Konfigurasi	Lebar (b), mm	Tebal (d), mm	Panjang (L_T), min, mm
A	2,0	1,5	25
B	4,0	3,0	45
C	8,0	6,0	90

Penentuan besarnya kekuatan *Bending*, dapat diketahui dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\sigma_b = \frac{3PL}{4bd^2} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.3}$$

Dimana :

σ_b adalah kekuatan *Bending*

P adalah gaya tekan (N)

L adalah jarak antar kedua tumpuan (mm)

b adalah lebar spesimen (mm)

d adalah tebal spesimen (mm).

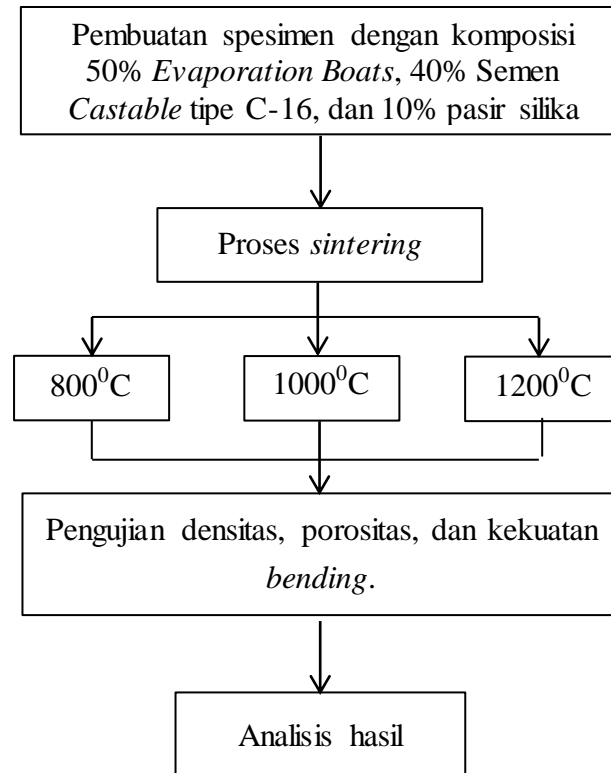
2.3 Kerangka Berpikir

Lining refractory yang baik harus memiliki sifat fisis, sifat mekanis, dan sifat *thermal* yang baik pula. Sifat fisis *lining refractory* dalam penelitian ini adalah densitas dan porositas, dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Temperatur *sintering* merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kualitas spesimen sehingga berpengaruh pula terhadap nilai densitas dan porositasnya. Temperatur *sintering* juga berpengaruh terhadap sifat mekaniknya, dalam penelitian ini adalah nilai kekuatan *bending*. Temperatur *sintering* yang digunakan yaitu 800⁰C, 1000⁰C, dan 1200⁰C dengan komposisi 50% *Evaporation Boats*, 40% Semen *Castable* tipe C-16, dan 10% pasir silika.

Temperatur *sintering* mempengaruhi nilai densitas, porositas, dan kekuatan *bending* spesimen penelitian. Semakin tinggi temperatur *sintering*, maka nilai densitas dan kekuatan *bending* akan semakin meningkat sedangkan nilai porositas akan turun. Semakin rendah temperatur *sintering*, maka akan semakin tinggi nilai porositas sedangkan nilai densitas dan kekuatan *bending* akan semakin turun. Semakin tinggi temperatur *sintering* akan menyebabkan struktur di dalam spesimen menyebar karena meleleh dengan baik dan saat pendinginan akan terjadi pemadatan sehingga struktur berubah menjadi lebih padat dan keras.

Mengetahui nilai densitas dan porositas dapat menggunakan Hukum *Archimedes* dan dimasukkan ke dalam Persamaan 2.1 dan 2.2 sedangkan untuk mengetahui nilai kekuatan *bending* dapat menggunakan Persamaan 2.3. Setelah dilakukan proses *sintering* menggunakan tiga variasi temperatur yaitu 800⁰C,

1000⁰C, dan 1200⁰C maka spesimen akan dilakukan pengujian densitas, porositas, dan *bending* setelah itu diambil datanya untuk dilakukan analisis.



Gambar 2.11 Kerangka berfikir

2.4 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka, landasan teori dan kerangka pikir di atas, maka hipotesis dalam penelitian ini yaitu:

1. Terdapat pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap densitas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.
2. Terdapat pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap porositas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.
3. Terdapat pengaruh temperatur *sintering* terhadap kekuatan *Bending lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Terdapat pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap densitas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*. Spesimen pada temperatur 800⁰C, memiliki nilai densitas yang terendah yaitu 1,72 gram/cm³. Spesimen pada temperatur 1200⁰C, memiliki nilai densitas yang tertinggi yaitu 3,08 gram/cm³. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi temperatur *sintering* maka spesimen akan semakin padat sehingga memiliki nilai densitas yang besar.
2. Terdapat pengaruh variasi temperatur *sintering* terhadap porositas *lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*. Spesimen pada temperatur 800⁰C, memiliki nilai porositas yang tertinggi yaitu 42%. Spesimen pada temperatur 1200⁰C, memiliki nilai porositas yang terendah yaitu 18%. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi temperatur *sintering* maka spesimen akan semakin padat sehingga memiliki nilai porositas yang rendah. Dapat diketahui bahwa nilai densitas berbanding terbalik dengan nilai porositasnya.
3. Terdapat pengaruh temperatur *sintering* terhadap kekuatan *Bending lining refractory* berbasis limbah *evaporation boats*. Spesimen pada temperatur 800⁰C, memiliki nilai kekuatan *Bending* yang terendah yaitu 7,32 MPa.

Spesimen pada temperatur 1200°C , memiliki nilai kekuatan *Bending* yang tertinggi yaitu 32,91 MPa. Kekuatan *Bending* akan meningkat seiring bertambahnya temperatur *sintering*. Hal tersebut dikarenakan temperatur *sintering* yang semakin tinggi akan membuat struktur di dalam spesimen lebih padat dan keras.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan terhadap penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perusahaan atau produsen tungku sebaiknya menggunakan temperatur *sintering* 1200°C untuk pembuatan *lining* yang baik.
2. Untuk menghasilkan *lining* dengan densitas yang tinggi, sebaiknya menggunakan temperatur *sintering* 1200°C .
3. Apabila ingin menghasilkan *lining* dengan porositas yang rendah, sebaiknya menggunakan temperatur *sintering* 1200°C .
4. Untuk menghasilkan *lining* dengan kekuatan *bending* yang tinggi, sebaiknya menggunakan temperatur *sintering* 1200°C .
5. Penelitian selanjutnya, agar lebih memperhatikan cara mencampur bahan-bahan agar tercampur dengan merata, cara menghancurkan *Evaporation Boats* agar menjadi serbuk dengan mudah, perlu penelitian lebih lanjut untuk meneliti sifat *thermal* dan sifat fisis serta mekanis yang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aliaman. 2017. **Pengaruh Absorpsi Karbon Aktif & Pasir Silika terhadap Penurunan Kadar Besi (Fe), Fosfat (PO₄), dan Deterjen dalam Limbah Laundry**. *Skripsi*. Program Studi Fisika Universitas Negeri Yogyakarta . Yogyakarta.
- Anonim. 2015. **3M™ Evaporation Boats**. Jakarta: 3M Advanced Materials Division.
- Anonim. 2015. **3M™ Evaporation Boats 2 Series**. Jakarta: 3M Advanced Materials Division.
- ASTM International C1161-13. 2014. **Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature**. Halaman 2-9.
- Aziz, Toriq Ibnu dan Abdullah Taman. 2015. **Pengaruh Love of Money dan Machiavellian terhadap Persepsi Etis Mahasiswa Akuntansi**. *Jurnal Nominal* 4(2): 4.
- Bhatia, A. 2012. **Overview of Refractory Materials**. Meadow Estates Drive: PDHonline Course M158 (3 PDH).
- Dahlia, Dian, Simon Sembiring, dan Wasinton Simanjuntak. 2013. **Pengaruh Temperatur Sintering terhadap Karakteristik Fisis Komposit MgO-SiO₂ Berbasis Silika Sekam Padi**. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* 1(1): 3-4.
- Destyanto, Fendy. 2007. **Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur Sintering Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Komposit Plastik (HDPE-PET)-Karet Ban Bekas**. *Skripsi*. Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Dutta, Goutam dan Dipankar Bose. 2012. **Effect of Sintering Temperature on Density, Porosity and Hardness of a Powder Metallurgy Component**. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(8): 1.
- Ertuğ, Burcu. 2013. **Powder Preparation, Properties and Industrial Applications of Hexagonal Boron Nitride**. cdn.intechopen.com/.../InTech-Powder_preparation_property/. 3 Januari 2019 (22:39).
- Fasya, Fahmi dan Norman Iskandar. 2015. **Melt Lost dan Porositas pada Aluminium Hasil Daur Ulang**. *Jurnal Teknik Mesin S-1* 3(1): 2-4.
- Hardin, Sandy Dwi. 2018. **Pengaruh Penggunaan Pasir Silika Sebelum dan Sesudah Diaktivasi Fisik terhadap Prestasi Mesin dan Emisi Gas Buang Sepeda Motor Bensin 4-Langkah**. *Skripsi*. Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bandar Lampung.

- Hariyanti, Dini. 2014. Industri Pengecoran Logam: 2015, Pertumbuhan Stagnan. Dalam *Bisnis.com* [online].
<http://industri.bisnis.com/read/20141210/257/381505/industri-pengecoran-logam-2015-pertumbuhan-stagnan> [6 Desember 2018 pukul 22.20].
<http://technical-ceramics.3mdeutschland.de/en/materials/3m-boron-nitride.html>
- Irwansyah, Ferli S., Juliandril, Iwan Hastiawan1, Soewanto Rahardjo, Rifki Septawendar. 2010. **Peningkatan Kualitas Refractory Alumina Silikat untuk Peleburan Kuningan dengan Teknik Infiltrasi**. *Journal of Indonesia Zeolites* 9(1): 1-2.
- Jamaluddin. 2010. **Makalah Fisika Material X-RD (X-Ray Diffractions)**. Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Haluoleo. Kendari.
- Jatmika, Jumaeda, Wahyu Widanarto, dan Mukhtar Effendi. 2014. **Pengaruh Temperatur Sintering terhadap Struktur dan Sifat Magnetik Material Mn-Zn Ferit**. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY*. Program Studi Fisika, Universitas Jenderal Soedirman. Banyumas. 26 April.
- Kennametal. 2017. **Evaporator Boats**. <https://www.kennametal.com/>. 7 Januari 2019 (15.10).
- Leman S., Arianto. 2010. **Perancangan Pengecoran Konstruksi Coran dan Perancangan Pola**. Yogyakarta: Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta.
- Munro, Ronald G. 2000. **Material Properties of Titanium Diboride**. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 105(5): 1.
- Nugraha, Adidjaya Chandra. 2010. **Pengaruh Temperatur Sinter terhadap Karakteristik Komposit Batubara-Coal Tar Pitch**. *Skripsi*. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Depok.
- Nugroho, Sri dan Yusuf Umardhani. 2011. **Karakterisasi Material Refractory Basa Berbahan Dasar Magnesia (MgO) Guna Lining Tungku Induksi Pengecoran Baja di PT X Klaten**. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi ke-2*. Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang. Semarang.
- Ogunsemi, B.T, Ikubanni, P.P, Agboola, O.O and Adediran, A.A. 2018. **Investigative Study of The Effects of Certain Additives on Some Selected Refractory Properties of Ant-Hill Clay for Furnace Lining**. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 9(12): 2.
- Putri, Tania Dian dan Ardian Putra. 2017. **Analisis Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Sifat Fisis Sinter Silika dan Tipe Fluida (Air) pada Mata Air Panas Sapan Maluluang, Kecamatan Alam Pauh Duo, Kabupaten Solok Selatan**. *Jurnal Fisika Unand* 6(1): 2-3.
- Rahmat, Muhammad Rais. 2015. **Perancangan dan Pembuatan Tungku Heat Treatment**. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 3(2): 2.
- Ramlan, Muljadi, Priyo Sardjono, Fakhili Gulo, dan Dedi Setiabudidaya. 2017. **Effect of Sintering Temperature to Physical, Magnetic Properties and**

- Crystal Structure on Permanent Magnet BaFe₁₂O₁₉ Prepared From Mill Scale. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(8): 1.
- Ridha, Mohammad dan Darminto. 2016. **Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi menggunakan Metode Archimedes dan Software Image-J.** *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya* 12(3): 2.
- Rifai, Muhammad dan Hartono, Sigit Budi. 2016. **Pengaruh Proses Sintering pada Temperatur 800°C terhadap Kekerasan dan Kekuatan Bending pada Produk Gerabah.** *TRAKSI* 16 (2): 2.
- Rizal, Agus, Yudi Samantha, dan Asep Rachmat. 2016. **Pembuatan Tungku Pemanas (Muffle Furnace) Kapasitas 1200⁰C.** *Jurnal J-Ensitet* 2(2): 1.
- Sandra, Karina Okky, Agus Setyo Budi, dan Anggoro Budi Susilo. 2014. **Pengaruh Temperatur Sintering Terhadap Densitas dan Porositas pada Membran Keramik Berpori Berbasis Zeolit, Tanah Lempung, Arang Batok Kelapa, dan Polyvinylalcohol (PVA).** *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY.* Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta. Yogyakarta. 4.
- Sembiring, Simon Dan Pulung Karo-Karo. 2007. **Pengaruh Temperatur Sintering terhadap Karakteristik Termal dan Mikrostruktur Silika Sekam Padi.** *Jurnal Sains Mipa Edisi Khusus* 13(3): 1.
- Setiabudi, Agus, Rifan Hardian, dan Ahmad Muzakir. 2012. **Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia.** Bandung: UPI PRESS.
- Sudjana, Hardi. 2008. **TEKNIK PENGECORAN JILID 2 Untuk SMK Edisi Pertama.** Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.
- Sugiyono. 2015. **METODE PENELITIAN PENDIDIKAN (Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D).** Bandung: ALFABETA.
- Sumpena. 2017. **Pengaruh Paduan Serbuk Fe12% pada Aluminium terhadap Porositas dan Struktur Mikro dengan Metode Gravity Casting.** *Jurnal Engine* 1(1): 3.
- Umbarwati, Tri Yekti, Jan Ady, dan Siswanto. **Pengaruh Temperatur Sintering terhadap Karakteristik Fisis Mekanik Glass – Ceramics MgO.SiO₂ Berbasis Silika Sekam Tebu.** journal.unair.ac.id/download-fullpapers-jfta7be050c23full.pdf. 8 Januari 2019 (15.12).
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2006. **Thermal Energy Equipment: Furnaces and Refractories.** www.moderneq.com/pdf/Refractories.pdf. 3 Januari 2019 (19:34).
- Waghela, Rahul, Shreyas Parmar, Susmit Vasava, dan Dr. Nirajkumar Mehta. 2018. **Review of Refractory Materials for Innovative Investigation and Testing.** *International Journal of Advance Engineering and Research Development* 5(3): 2.
- Walker, Harbison. 2005. **Handbook of Refractory Practice.** Moon Township, PA: Harbison-Walker Refractories Company.

Wilastri, AP. Bayuseno, dan S. Nugroho. 2011. **Pengaruh Variasi Kecepatan Putar dalam Metode *Stir Casting* Terhadap Densitas dan Porositas Al-SiC untuk Aplikasi Blok Rem Kereta Api.** *Momentum* 7(2): 32.