



TUGAS AKHIR - TM141585

# **ANALISIS PENGARUH AGREGAT $Al_2O_3$ DAN MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL TERHADAP SIFAT FISIK DAN SIFAT THERMAL REFRAKTORI CASTABLE SiC**

TIO AGATHAMA PUTRA  
NRP 02111545000035

Dosen Pembimbing  
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



SKRIPSI- TM141585

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AGGREGATE  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> AND DISTRIBUTION MODULUS OF PARTICLE  
SIZE TO THE PHYSICAL AND CHEMICAL  
CHARACTERISTICS OF REFRACTORY CASTABLE SiC**

TIO AGATHAMA PUTRA  
NRP 02111545000035

Advisor  
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2018

**ANALISIS PENGARUH AGREGAT  $Al_2O_3$  DAN  
MODULUS DISTRIBUSI UKURAN BUTIRAN  
TERHADAP SIFAT FISIK DAN SIFAT THERMAL  
REFRAKTORI CASTABLE SiC**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

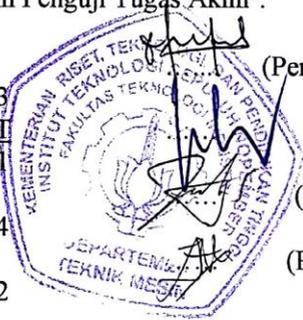
Oleh :

**TIO AGATHAMA PUTRA**

NRP. 02111545000035

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., MSc., Ph.D  
NIP. 198005202005011003 (Pembimbing)
2. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T  
NIP. 197407032000031001 (Penguji I)
3. Indra Sidharta, S.T., M.Sc.  
NIP. 198006192006041004 (Penguji II)
4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  
NIP. 196006231988031002 (Penguji III)



**SURABAYA**

**JANUARI, 2018**

# **ANALISIS PENGARUH AGREGAT $Al_2O_3$ DAN MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL TERHADAP SIFAT FISIK DAN SIFAT THERMAL REFRAKTORI CASTABLE SiC**

Nama Mahasiswa : Tio Agathama Putra  
NRP : 02111545000035  
Jurusan : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., Ph.D

## **Abstrak**

*Refraktori merupakan bahan yang tahan terhadap panas dan mempertahankan stabilitas fisik dan kimia yang cukup untuk tujuan struktural saat mereka terkena lingkungan dengan suhu tinggi. Salah satu refraktori monolitik yang banyak digunakan di industri yaitu castable. Sering juga disebut beton tahan api. Refraktori castable tersusun dari bahan refraktori berupa butiran serbuk mineral (agregat) yang ukuran butir dan distribusi butirannya bervariasi yang dicampur dengan biner (bahan perekat) dengan atau tanpa ditambah aditif. Salah satu contoh penggunaan refraktori castable di sistem pembangkit yaitu water wall tube. Shock termal dan thermal cycling biasa terjadi sini, sehingga refraktori castable silicon karbida digunakan di daerah ini karena ketahanan abrasi yang sangat baik pada suhu pembakaran yang tinggi. Maka dari itu refraktori castable SiC berfungsi sebagai pelapis agar material water wall tube tidak rusak dan ikut meleleh pada saat beroperasi.*

*Perancangan percobaan dilakukan dengan metode faktorial berupa dua faktor tiga level. Faktor pertama merupakan komposisi refraktori castable terdiri dari berbagai distribusi ukuran partikel ditentukan berdasarkan metode Dinger Funk untuk*

*distribusi kontinyu dengan level modulus distribusi ukuran butiran ( $q$ ) sebesar 0.21, 0.23 dan 0.25. Faktor kedua adalah agregat  $Al_2O_3$  yang didapatkan dari variasi jenis agregat yaitu mullite, bauxite, dan white fuse alumina. Pembuat spesimen uji terdapat dua tahap pembuatan refraktori castable, yaitu proses pengayakan dan proses pengecoran. Dimana spesimen yang dibuat berupa kubus (50x50x50mm) untuk pengujian bulk density, porositas dan cold crushing strenght sedangkan tabung ( $d=40mm$  dan  $t=50mm$ ) untuk pengujian thermal konduktiviti.*

*Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa semakin tinggi modulus distribusi ukuran butiran dapat meningkatkan bulk density, cold crushing strength dan konduktivitas panas tetapi porositas semakin turun dari castable SiC. Untuk SiC dengan agregat White fuse alumina menghasilkan bulk density, cold crushing strength dan konduktivitas panas tertinggi dibandingkan bauxite dan mullite terendah. Untuk porositas mullite memiliki nilai tertinggi dan white fuse alumina terendah.*

***Kata kunci : refraktori, castable, SiC***

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AGGREGATE  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> AND DISTRIBUTION MODULUS OF PARTICLE  
SIZE TO THE PHYSICAL AND CHEMICAL  
CHARACTERISTICS OF REFRACTORY CASTABLE SiC**

Name : Tio Agathama Putra  
NRP : 02111545000035  
Department : Mechanical Engineering  
Advisor : Suwarno, ST., MSc., Ph.D

***Abstract***

*Refractory is material that is resistant to the heat and maintains the physical and chemical stability for the structural purpose when they are in the high temperature environment. One of the monolithic refractories that is often used by industries is castable. It is also called fire resistant concrete. Refractory castable consists of refractory material in the form of mineral powder grain (aggregate) in which the grain size has variations that are mixed with binary (adhesive material) and with or without being added additives. One of the refractory castable usages in the generation system is used in this area because abrasion endurance is very good at the high burning temperature. Because of that, SiC refractory castable has a purpose as the layer, so water wall tube material will not get damaged and melted when operate.*

*Specimen planning is done by using factorial method in the form of two factors three levels. The first factor is the composition of refractory castable that contains various size particle distributions determined based on Dinger Funk method*

*for the continual distribution with grain-size modulus in the amount of 0.21, 0.23, and 0.25. The second factor is aggregate Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> that is got from the variations in aggregate type, they are mullite, bauxite, and white fuse alumina. Test specimen maker had two refractory castable making steps, they are sifting and casting process, in which the specimen made in the form of cube (50x50x50mm) for bulk density and cold crushing test, whereas tube (d=40mm and t=50mm) for thermal conductivity test.*

*From this research, it has been got the result that the higher modulus distribution of grain size will increase the bulk density, cold crushing strength, and thermal conductivity, but the porosity is lower than SiC castable. For SiC with aggregate, white fuse alumina results bulk density, cold crushing strength and the highest thermal conductivity than the lowest bauxite and mullite. For the porosity, mullite has the highest result, and white fuse alumina has the lowest result.*

**Keyword : refractory, castable, SiC**

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucap rasa syukur kepada Allah SWT, maka Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS PENGARUH AGREGAT  $Al_2O_3$  DAN MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN SIFAT THERMAL REFRAKTORI CASTABLE SiC**” telah selesai disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin – Depaertemen Teknik Mesin – Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa penyusunan ini tidak akan berhasil apabila tanpa ada bimbingan, bantuan, dukungan dan kerjasama dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta (**Tulus Wiyono dan Suzanti**) dan adek (**Dendy Lusitha Putra**) yang selalu memberi restu, nasihat, do'a dan dukungan.
2. Bapak **Suwarno, ST., MSc., Ph.D** selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberi pengarahan serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu **Ita** selaku ketua laboratorium , Bapak **Sukirman** dan Bapak **Markasan** selaku petugas labortorium PT.Loka Refractories.
4. Bapak **Ir. Hari Subiyanto, MSc, Indra Sidharta, ST., MSc, Dr. Eng., Sutikno, ST., M.T** selaku dosen penguji yang banyak memberikan masukan dan saran demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.
5. Bapak **Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, Ph.D.** selaku Ketua Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
6. Bapak **Triyogi Yuwono, Ir., DEA., Dr., Prof.** selaku dosen wali.

7. Seluruh Bapak dan Ibu dosen S-1 Teknik Mesin FTI-ITS yang telah membimbing penulis selama duduk di bangku perkuliahan.
8. **Pak Mantri, Pak Endang, Pak Gatot, Pak Budi, Mas Agus dan Mas Erdien** atas bantuan yang telah diberikan.
9. **Adi Susanto, Bachrun Assyahar dan Alfan Fauzi** yang selalu siap membantu, mendo'akan dan mendukung selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir.
10. **Irfan Maulana, Rizki Wase dan Miftahul Ahzabuddin** terima kasih atas do'a dan dukungannya.
11. **Pratitis Yuniarsih** sebagai *partner* tugas akhir atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa tidak ada yang sempurna di dunia ini, demikian juga dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua, Amin.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	iii
Abstrak.....	iv
Abstract.....	vi
Kata Pengantar.....	viii
Daftar Isi.....	x
Daftar Gambar.....	xiv
Daftar Tabel.....	xvi

### BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Refraktori (Batu Tahan Api).....	5
2.2. Sifat – Sifat Refraktori.....	7
2.3. Refraktori Monolitik (Tidak Berbentuk).....	10
2.4. Refraktori Castable.....	11
2.4.1. Agregat (Butiran Mineral).....	12
2.4.2. Pengisi (Filler) dan Modifier.....	13
2.4.3. Bahan Perekat (Bonding).....	14
2.4.4. Bahan Adiktif.....	15
2.5. Refraktori Castable SiC.....	16
2.6. Distribusi Ukuran Butiran.....	16
2.7. Pengayakan (Screening).....	18
2.8. Pengujian Sifat Material.....	19

2.8.1. Pengujian Bulk Density dan Apparent Porosity .....	19
2.8.2. Pengujian Cold Crushing Strength.....	20
2.8.3. Pengujian konduktifitas Panas .....	22
2.9. Penelitian Terdahulu .....	23

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1. Alur Proses Penelitian.....	25
3.2. Persiapan Bahan Baku .....	26
3.3. Desain Eksperimen .....	27
3.4. Pembuatan Spesimen Refraktori Castable .....	28
3.4.1. Proses Pengayakan.....	28
3.4.2. Proses Pengecoran .....	31
3.5. Pengujian .....	33
3.5.1. Pengujian Bulk Density dan Apparent Porosity .....	33
3.5.2. Pengujian Cold Crushing Strength.....	34
3.5.3. Pengujian Thermal Konduktivitas .....	35

### **BAB IV DATA DAN ANALISIS HASIL PENELITIAN**

4.1. Distribusi Ukuran Partikel .....	37
4.2. Pengujian Bulk Density dan Porositas .....	37
4.2.1. Data Hasil Pengujian Bulk Density dan Porositas....	38
4.2.2. Analisis dan Pembahasan Pengujian Bulk Density dan Porositas .....	40
4.3. Pengujian Cold Crushing Strength.....	44
4.3.1. Data Hasil Pengujian Cold Crushing Strength .....	44
4.3.2. Analisis dan Pembahasan Pengujian Cold Crushing Strength .....	46
4.4. Pengujian Konduktifitas Panas .....	48
4.4.1. Data Hasil Pengujian Konduktifitas Panas.....	49
4.4.2. Analisis dan Pembahasan Data .....	51

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1. Kesimpulan .....55  
5.2. Saran .....56

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Refraktori Bata (Berbentuk) dan Refraktori Monolitik (Tidak Berbentuk). [5] .....	6
Gambar 2.2 Analisa dengan Saringan Bertingkat. [7] .....	18
Gambar 2.3 Ilustrasi pengujian kuat tekan dingin [8] .....	21
Gambar 2.4 Instalasi peralatan uji konduksi [10].....	22
Gambar 3.1 Diagram Alir .....	25
Gambar 3.2 Spesimen Refraktori Castable .....	28
Gambar 3.3 Alat Pengujian Bulk Density .....	34
Gambar 3.4. Alat Uji Cold Crushing Strength [Laboratorium Metallurgi Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya] .....	35
Gambar 3.5. Alat Uji Konduktifitas Panas [Laboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya] ..	36
Gambar 4.1 CPFT Pada Setiap Ukuran Partikel.....	37
Gambar 4.2. Plot Hasil Pengujian Pengujian Bulk Density .....	41
Gambar 4.3. Plot Hasil Pengujian Porositas.....	42
Gambar 4.4. Spesimen Cold Crushing Strength .....	44
Gambar 4.5. Plot Rata-Rata Hasil Pengujian Cold Crushing Strength .....	47
Gambar 4.6. Spesimen Pengujian Konduktifitas Panas .....	49
Gambar 4.7. Plot Hasil Pengujian Konduktivitas Panas .....	52

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Refraktori Shaped dan Monolitikf.....	7
Tabel 2.2	Contoh dari beberapa Refraktori monolitik beserta sifat, penggunaannya dan metode aplikasi [2]. .....	11
Tabel 2.3	Kisaran Umum Jumlah Komponen Refraktori Castable [3]. .....	12
Tabel 2.4	Jenis dan Komposisi Kimia Agregat [3]. .....	13
Tabel 2.5	Filler dan Modifier Refraktori [3].....	14
Tabel 2.6	Klasifikasi Refraktori Castable berdasarkan kandungan Semen (Cao) [6] .....	15
Tabel 2.7	Jenis Aditif yang Umum dan Fungsinya di dalamnya Pembuatan Castable. [3].....	15
Tabel 2.8	Perbandingan Castable berbahan dasar SiC dan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [11].....	16
Tabel 2.9	Saringan Standart Seri Tyler.....	19
Tabel 2.10	Penelitian terdahulu .....	23
Tabel 3.2	Spesifikasi Bahan Baku .....	26
Tabel 3.3	Faktor dan Level Desain Eksperimen .....	28
Tabel 3.4	Proses pembuatan spesimen refraktori castable .....	29
Tabel 3.5	Proses pembuatan spesimen refraktori castable .....	31
Tabel 4.1	Hasil pengujian bulk density dan porositas Spesimen .....	38
Tabel 4.2	Desain Eksperimen Pengujian Bulk Density dan Porositas .....	40
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Cold Crushing Strength Spesimen .....	45
Tabel 4.4	Desain Eksperimen Cold Crushing Strength.....	46
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Konduktivitas Panas .....	49
Tabel 4.6	Desain Eksperimen Konduktivitas Panas .....	51

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Refraktori castable atau sering juga disebut beton tahan api merupakan bahan yang tahan terhadap panas dan mempertahankan stabilitas fisik dan kimia yang cukup untuk tujuan struktural saat mereka terkena lingkungan dengan suhu tinggi. Refraktori castable tersusun dari bahan refraktori berupa butiran serbuk mineral (agregat) yang ukuran butir dan distribusi butirannya bervariasi yang dicampur dengan biner (bahan perekat) dengan atau tanpa ditambah aditif. Refraktori castable banyak diaplikasikan secara luas pada industri operasi – operasi yang berlangsung dilingkungan temperatur tinggi, seperti pada industri peleburan logam, industri semen, sistem pembangkit energi maupun industri petrokimia.

Salah satu contoh penggunaan refraktori castable di sistem pembangkit yaitu *water wall tube*. *Shock thermal, thermal cycling* dan abrasi biasa terjadi sini. Refraktori castable silikon karbida digunakan di daerah ini karena memiliki sifat tahan abrasi yang sangat baik pada suhu pembakaran yang tinggi. Maka dari itu refraktori castable SiC berfungsi sebagai pelapis agar material *water wall tube* tidak rusak pada saat beroperasi.

Kurangnya pengetahuan tentang komposisi kimia, sifat dan karakteristik dari material refraktori castable SiC menyebabkan kegagalan material refraktori castable ketika digunakan dalam suatu proses sering ditemukan pada industri. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan sangat penting untuk mendapatkan hasil yang optimal terhadap konsumsi energi dan pemborosan biaya *maintenance* dapat dihindari.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui karakteristik refraktori castable, pengaruh agregat  $Al_2O_3$  dan

modulus distribusi ukuran agregat terhadap sifat fisik dan sifat *thermal* refraktori castable SiC. Diharapkan dengan adanya penelitian ini menambah ilmu tentang refraktori sehingga mengurangi kegagalan pada saat kondisi beroperasi serta mengefisienkan biaya perawatan.

### **1.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dituliskan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik refraktori jenis castable SiC yang dihasilkan dengan proses pengecoran ?
2. Bagaimana pengaruh agregat  $Al_2O_3$  terhadap sifat fisik dan sifat *thermal* refraktori castable SiC?
3. Bagaimana pengaruh modulus distribusi ukuran agregat terhadap sifat fisik dan sifat *thermal* refraktori castable SiC?

### **1.3. Batasan Masalah**

Supaya penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah, serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan, diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan adalah refraktori castable yang diasumsikan memiliki komposisi yang homogen
2. Bahan baku terdiri dari 95% agregat yang terdiri dari 80%SiC dan 20% agregat  $Al_2O_3$  dan 5% bahan pengikat Secar 71.
3. Komposisi kimia agregat SiC dan Secar 71 dianggap konstan.
4. Metode pencampuran dilakukan secara konvensional dengan variasi distribusi ukuran butiran dan bahan agregat  $Al_2O_3$ .
5. Pembentukan spesimen uji menggunakan metode pengecoran yang sama, bentuk disesuaikan dengan alat

cetak dan alat uji (kubus 50x50x50 mm dan tabung diameter=40mm dan tinggi=50mm).

6. Pengujian spesimen hanya terbatas pada pengaruh pengaruh agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran agregat terhadap sifat fisik dan sifat *thermal* refraktori castable SiC yaitu pengujian *bulk density*, porositas, *cold crushing strength* dan konduktivitas panas.

#### **1.4. Tujuan Penelitian**

Sesuai dengan rumusan masalah yang tertera, maka tujuan penelitian pada refraktori castable SiC ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik refraktori jenis castable SiC yang dihasilkan dengan proses pengecoran.
2. Mengetahui pengaruh agregat  $Al_2O_3$  terhadap sifat fisik dan sifat *thermal* refraktori castable SiC
3. Mengetahui pengaruh modulus distribusi ukuran agregat terhadap sifat fisik dan sifat *thermal* refraktori castable SiC.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah pengetahuan pembaca maupun penulis tentang karakteristik dari material refraktori castable.
2. Dapat digunakan sebagai referensi dalam mendesain dan menentukan refraktori castable yang cocok untuk aplikasi tertentu.
3. Dapat digunakan sebagai acuan dalam penelitian selanjutnya dalam bidang refraktori

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Refraktori (Batu Tahan Api)**

Refraktori adalah bahan anorganik non-logam yang tahan terhadap panas dan mempertahankan stabilitas fisik dan kimia yang cukup untuk tujuan struktural saat mereka terkena lingkungan dengan suhu tinggi.[6] Menurut standar ASTM C71, refraktori didefinisikan sebagai "bahan nonmetalik yang memiliki sifat kimia dan fisika yang membuatnya sesuai untuk struktur, atau sebagai komponen sistem, yang terkena lingkungan di atas 1000°F (538 ° C).[1]

Karena mempunyai kemampuan ini maka bahan refraktori umumnya digunakan pada operasi – operasi yang berlangsung dilingkungan temperatur tinggi, seperti blast furnace pada industri peleburan logam, tangki kaca pada industri pembuatan gelas, industri semen, sistem pembangkit energi maupun industri petrokimia.

Kriteria dalam pemilihan yang harus dimiliki oleh refraktori yang umum memiliki sebagai berikut: [2]

1. Tahan suhu tinggi dan perangkap panas di dalam area yang diinginkan
2. Menahan serangan dari logam cair, gas panas, atau terak
3. Menahan beban dan getaran kondisi servis
4. Tahan terhadap kontaminan bahan
5. Pertahankan stabilitas dimensi setelah atau selama *thermal cycling*
6. Tahan terhadap serangan lingkungan yang terkait dengan kondisi pengoksidasi atau *reducing*.

Refraktori diklasifikasikan menurut keadaan fisiknya, ada dua bentuk dasar refraktori yang digunakan di daerah tertentu yaitu refraktori bata (berbentuk) dan refraktori monolitik (tidak berbentuk). [3]



Gambar 2.1 Refraktori Bata (Berbentuk) dan Refraktori Monolitik (Tidak Berbentuk). [5]

Bahan baku yang digunakan untuk persiapan refraktori monolitik tidak ada perbedaan yang signifikan dengan yang digunakan untuk menyiapkan bata refraktori. Pada refraktori monolitik tidak diperlukan proses pembentukan tekan/cetak tekan dan pembakaran pada saat proses pembentukannya, seperti halnya yang dilakukan pada bata refraktori. Sehingga dapat menghemat penggunaan energi, waktu pembuatan, serta meningkatkan produksi kerja.

Refraktori jenis bata ataupun monolitik memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan sendiri-sendiri tiap jenis. Beberapa kelebihan dan kekurangan dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Refraktori Shaped dan Monolitik

Refraktori Bata (Berbentuk)	Refraktori Monolitik (Tidak Berbentuk)
Bentuknya tertentu	Bentuknya langsung menyesuaikan
Terdapat sistem sambungan	Sistem sambungan dapat dikurangi
Dimensi presisi	Dimensi sesuai cetakan
Proses pembuatan mahal	Proses pembuatan murah
Limbah hasil pemakaian banyak	Limbah hasil pemakaian dapat dikuangi

## 2.2. Sifat – Sifat Refraktori

Memahaman sifat-sifat dari refraktori adalah dasar untuk pengembangan, peningkatan, pengendalian mutu dan pemilihan pelapis tahan api untuk proses suhu tinggi. Pemilihan lapisan tahan api dilakukan secara sistematis dimulai dengan hati-hati. Sifat fisik dan kimia dari refraktori yang harus dipertimbangkan untuk mendapatkan produk tahan api unggul dari segi kualitas dan manufaktur. Proses untuk memastikan bahwa produk memenuhi standar yang ditetapkan. Sifat – sifat yang harus diperhatikan saat mendesain refraktori sebagai berikut : [3]

- Sifat Fisik : Massa jenis, Porositas, Kekuatan, Abrasi
- Panas *Thermal* : Ekspansi termal, Konduktivitas termal, Difusivitas
- Bahan kimia : Korosi / erosi

### **Bulk Density**

Ukuran dari rasio berat refraktori terhadap volume yang ditempatinya. *Bulk Density* adalah biasanya dinyatakan dalam pound per kubik kaki (pcf) atau kilogram per meter kubik ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ).

*Bulk Density* refraktori adalah pengukuran tidak langsung konduktifitas panas atau kemampuan menyimpan panas. Selain itu, sifat fisik lainnya, seperti kekuatan, abrasi, dan permeabilitas gas, sering dikaitkan dengan kepadatan dan porositas refraktori. Secara umum, semakin tinggi densitasnya, semakin rendah porositas.

### **Porositas**

Ukuran dari pori-pori terbuka dalam refraktori, dimana kemampuan refraktori untuk melawan penetrasi oleh logam, terak dan fluks.

### ***Strength* (kekuatan)**

Kekuatan pada saat kondisi dingin dan panas berbeda. Kekuatan bisa diukur di suhu ruangan digunakan untuk mengevaluasi tingkat pembentukan ikatan selama produksi dan juga menunjukkan kemampuan untuk penanganan dan pengiriman tanpa kerusakan dan tahan abrasi dan aplikasi pada suhu yang relatif rendah. Uji kekuatan pada suhu tinggi menilai kemampuan bahan untuk bertahan dari tekanan yang ditimbulkan dengan menahan ekspansi termal, termal shock dan beban mekanis. Kekuatan refraktori diukur dengan cold crushing strength dan modulus of rupture.

### **Abrasi**

Ukuran perlawanan dari bahan tahan api saat partikel berkecepatan tinggi mengundurkan permukaan tahan panas. Ini mengukur kekuatan ikatan dan partikel tahan api dan resistansi terhadap aliran partikel kecepatan tinggi di permukaannya. Kebutuhan untuk ketahanan abrasi yang baik dari bahan tahan api paling jelas terlihat pada petrochemical industri dimana partikel halus menembus permukaan refraktori pada kecepatan tinggi pada suhu yang agak tinggi. Cold crushing strength bisa memiliki indikasi langsung dengan prediktabilitas bahan tahan api mengenai ketahanannya terhadap abrasi.

## **Ekspansi Thermal**

Ini adalah ukuran refraktori tentang stabilitas liniernya bila terkena rentang temperatur tinggi yang berbeda dan kemudian didinginkan sampai suhu kamar. Ini didefinisikan sebagai perubahan linier permanen dan diukur dengan perubahan dalam dimensi linier terpanjang. Sebagian besar bahan tahan api berkembang saat dipanaskan. Oleh karena itu, ketika refraktori dipasang pada suhu kamar, seluruh struktur akan mengencang saat dipanaskan. Tapi jika suhu mencapai lebih tinggi dari suhu pelunakan sistem ikatan, struktur bisa terdistorsi atau runtuh. Oleh karena itu, sistem tahan api harus selalu dirancang sedemikian rupa sehingga suhu maksimum yang dapat dicapai dalam sistem lebih rendah daripada suhu leleh atau pelelehan bahan tahan api (butiran dan sistem pengikat). Sering kali retak diamati pada sistem refraktori monolitik saat didinginkan, namun, pada kebanyakan kasus, retakan tampak pada pendinginan tutup setelah sistem memanans.

## **Konduktifitas Panas (*Thermal Konduktivitas*)**

Konduktifitas panas adalah ukuran refraktori mengenai kemampuannya untuk memindahkan panas dari permukaan panas ke permukaan dingin saat terkena suhu tinggi. Uji konduktivitas termal sangat penting karena refraktori seharusnya memiliki konduktifitas panas yang rendah sehingga dapat mempertahankan panas didalam tungku yang akan merambat keluar. Penggunaan bahan tahan api untuk kegunaan spesifik.

## **Difusivitas Panas**

Sifat difusivitas termal sangat berguna untuk bahan yang mengandung karbon. ASTM C-714 adalah metode standar untuk menentukan difusivitas termal karbon dan grafit dengan metode pulsa termal.

## **Korosi**

Ketika refraktori terkena cairan korosif pada suhu tinggi, tingkat korosi / erosi bergantung pada butiran tahan api dan sistem ikatan kimia dari refraktori. Resistansi korosi / erosi adalah salah satu karakteristik refraktori yang paling penting, yang terpapar logam cair dan terak. Oleh karena itu, uji coba mensimulasikan kondisi yang refraktori selama penggunaan sangat penting. Selama formulasi refraktori, perhatian cermat diberikan pada komposisi refraktori dalam memilih butiran tahan api dan sistem ikatan. Dengan demikian, refraktori yang digunakan dalam proses pembuatan besi akan berbeda dengan pembuatan baja

### **2.3. Refraktori Monolitik (Tidak Berbentuk)**

Refraktori yang tidak terbentuk, juga disebut monolitik, tidak memiliki bentuk spesifik. Umumnya terdiri dari partikel refraktori kasar (agregat), fiberglass, dan pengikat. Hal ini dicampur dengan pengikat dan air di tempat dan diterapkan ke daerah tertentu baik dengan penyemprotan, dengan tangan atau dengan cara mekanis [2]. Untuk kondisi operasi yang berat dalam waktu yang lama penggunaan refraktori monolitik lebih menguntungkan.

Refraktori monolitik dapat dipakai untuk perbaikan lokal atau daerah tertentu di sekitar kerusakan tanpa merusak daerah di sekitarnya. Bahan baku yang digunakan untuk persiapan refraktori monolitik tidak ada perbedaan yang signifikan dengan yang digunakan untuk menyiapkan bata refraktori. Pada refraktori monolitik tidak diperlukan proses pembentukan tekan / cetak tekan dan pembakaran pada saat proses pembentukannya, seperti halnya yang dilakukan pada bata refraktori. Sehingga dapat menghemat penggunaan energi, waktu pembuatan, serta meningkatkan produksi kerja. Ada berbagai jenis refraktori monolitik yaitu *plastics, ramming mixes, mortars, coatings, castables/ pumpables, and gunning mixes* [3].

Tabel 2.2 Contoh dari beberapa Refraktori monolitik beserta sifat, penggunaannya dan metode aplikasi [2].

Type of refractory	Nature	How it is applied
Castables (% cement)	Fireclay to high-alumina aggregates. It varies from insulating (480 kg/m <sup>3</sup> ) to ultra-dense (3043 kg/m <sup>3</sup> )	It can be cast, gunned
• Conventional (15–30 %)		
• Low cement (3–10 %)		
• Ultra low (<3 %)		
• No cement (0 %)		
Low ultra-low- or no-cement castables	Fireclay to high-alumina aggregates. These are stronger, and more erosion resistant than conventional castables	Usually vibration-cast
Phosphate-bonded castables	Generally dense materials. Phosphates bonded are strong and erosion resistant, silicates are acid resistant	
Plastic	Dense, strong, delivered in plastic condition wrapped polythene	Sliced as needed and rammed into place with pneumatic rammer
Ramming mixes	Similar to plastics but much stiffer	It is usually rammed with pneumatic rammer
Gunning mixes	Heat setting granular refractory	Sprayed with air placement guns
Mortars	Used for laying firebrick and for minor surface repairs	

## 2.4. Refraktori Castable

Sering juga disebut beton tahan api. Refraktori castable tersusun dari bahan refraktori berupa butiran serbuk mineral (agregat) yang ukuran butir dan distribusi butirannya bervariasi yang dicampur dengan bahan perekat (bonding) dengan atau tanpa ditambah aditif. Refraktori castable dipasaran dijual dalam keadaan kering dan dicampur dengan air sebelum melakukan pemasangan. Biasanya *cast* (cetak) atau *vibrated* (getar) dengan cara yang sama seperti beton biasa, castables juga bisa dipasang dengan *trowelling* (sekop), *pneumatic gunning* atau sesekali *ramming* [4].

Proporsi masing-masing komponen yang digunakan bervariasi dalam setiap komposisi castable untuk mencapai sifat fisik dan kimia yang diinginkan sesuai aplikasi. Dalam castables padat konvensional, pencampuran jumlah air pengecoran berkisar antara 8-15% (tergantung pada basis agregat dan jenis semen yang digunakan) dan menghasilkan porositas dari sekitar 22-30% (penuh). Kisaran umum jumlah komponen dalam castable refraktori ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kisaran Umum Jumlah Komponen Refraktori Castable [3].

Refractory Castable Composition	
1. Aggregate	40–80%
2. Modifiers	5–30%
3. Bond agents	2–50%
4. Admixtures	<1%

#### 2.4.1. Agregat (Butiran Mineral)

Agregat adalah komponen matriks utama dalam refraktori castable dan biasanya terdiri dari 40-80% dari berat campuran castable. Pemilihan agregat penting dan kritis, sebagai sifat akhir dari produk castable ditentukan oleh komposisi kimia agregat dan karakteristik fisik. Dalam prakteknya, oksida refraktori alami atau sintetis dapat digunakan dalam komposit castable sebagai agregat untuk tujuan dengan biaya rendah, serupa dengan kasus bata tahan api[29]. Agregat tahan api merupakan kerangka dari castable. Ukuran agregat dapat berkisar dari 20 mm sampai 300 mm (50Mesh). Berbagai macam agregat tahan api tersedia, dan castables dapat diformulasikan berdasarkan satu atau kombinasi agregat untuk mencapai kimia, mineralogi, dan sifat fisik yang diinginkan.

Tabel 2.4 Jenis dan Komposisi Kimia Agregat [3].

Primary Alumina and Alumino-Silicate Aggregates		
Aggregate	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	Max. service limit <sup>a</sup> (°C)
Alumina—tabular or white fused	99 + %/0%	1870
Alumina—brown fused	94–98%/1–2%	1760
Bauxite—S.A. and Chinese	84–90%/5–7%	1760
Mullite—sintered or fused	74–76%/19–24%	1760
Bauxitic kaolin—calcined	58–70%/26–37%	1760
Andalusite	57–61%/38–40%	1760
Calcined kaolin and flint clay	40–47%/49–55%	1650
Pyrophyllite	13–30%/65–80%	1425
Fused silica	0%/99.7+%	1370

<sup>a</sup>In optimum castable formulation.

Other Dense Aggregates		
Aggregate	Chemical formula	Ratio
Periclase/Magnesite	MgO	89–98%
Dolomite	CaO·MgO	56–59%/32–40%
Magnesium aluminate spinel	MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26–32%/66–72%
Chromite	FeO·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10–24%/33–46%/15–29%
Silicon carbide	SiC	90–99%
AZS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·ZrO <sub>2</sub> ·SiO <sub>2</sub>	42–45%/36–37%/16–17%

### 2.4.2. Pengisi (*Filler*) dan *Modifier*

Untuk mengisi ukuran partikel dan untuk memberikan atribut lain yang diinginkan seperti pengendalian ekspansi, modifikasi kimia / mineralogi, peningkatan ikatan, dan lain-lain, pengisi dan *modifier* ditambahkan ke komposisi refraktori castable. Dalam banyak kasus, beberapa pengisi dan *modifier* digunakan dalam berbagai distribusi ukuran partikel. Pengisi dan *modifier* dapat mengukur fraksi berukuran kecil dari mineral yang sama yang digunakan sebagai agregat atau mineral lain yang dipilih untuk peningkatan komposisi. Tabel 2.5 mencantumkan pengisi dan *modifier* yang paling umum digunakan dalam komposisi refraktori castable dan fungsi utamanya. Refraktori castables digunakan untuk aplikasi tertentu atau kondisi operasi seperti penahanan aluminium, ketahanan terak, ketahanan shock termal, dll.[3]

Tabel 2.5 Filler dan Modifier Refraktori [3]

Common Refractory Fillers and Modifiers		
Filler/Modifier	Chemical formula	Function
Fine milled aggregates	Various	Chemistry/mineralogy adjustment, bond modification/development
Alumina		
Calcined	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Chemistry adjustment, bond modification/development
Reactive	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Flow/rheology control, bond modification/development
Silica		
Quartz	$\text{SiO}_2$	Shrinkage control ( $\sim 800^\circ\text{C}$ )
Fume	$\text{SiO}_2$	Flow/rheology characteristics, bond modification/development
Kyanite	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Shrinkage control ( $1325^\circ\text{C}$ – $1410^\circ\text{C}$ ), chemistry/mineralogy adjustment
Clay (fire, ball, bentonite)	Hydrated aluminosilicate	Filler, flow/rheology control
Zircon	$\text{ZrSiO}_4$	Reduce metal, slag, alkali attack
Graphite/Carbon	C	Reduce metal, slag attack
Fly ash	Varies	Low-temperature filler

### 2.4.3. Bahan Perekat (*Bonding*)

Mayoritas castable tahan api menggunakan semen alumina yang jika dicampur dengan air akan mengikat partikel-partikel agregat secara bersama dalam ikatan hidrolis yang mengeras pada suhu ruang membentuk beton refraktori. Tetapi beberapa tahun terakhir semen alumina mulai diminimalisir karena seringkali memiliki ketahanan api yang lebih rendah, kekuatan mekanisnya lebih lemah dan tidak sangat stabil pada temperatur kerja. Tujuan diminimalisir semen alumina agar pengaruh adanya CaO (semen) dalam semen dapat dihilangkan, utamanya untuk castable temperatur tinggi. Refraktori castable diklasifikasikan berdasarkan kandungan CaO dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Klasifikasi Refraktori Castable berdasarkan kandungan Semen (Cao) [6]

ASTM classification	
CASTABLE CLASSIFICATION	LIME CONTENT
Regular Castable Refractory	CaO > 2,5%
Low Cement Castable Refractory	1,0% < CaO < 2,5%
Ultra Low Cement Castable Refractory	0,2% < CaO < 1,0%
No Cement Castable Refractory	CaO < 0,2%

#### 2.4.4. Bahan Adiktif

Untuk melengkapi formulasi castable refraktori, berbagai jenis aditif atau campuran dapat digunakan untuk memodifikasi karakteristik aliran / *rheologi* dari castable, mengatur kecepatan kering (memperlambat atau mempercepat), mengurangi casting air, menstabilkan / mengendalikan pH. Dalam banyak kasus, beberapa aditif digunakan dalam formulasi tunggal. Aditif dan campuran digunakan dalam jumlah yang sangat kecil, biasanya 0,2% dan mungkin saja perubahan fungsi dengan memvariasikan jumlah yang digunakan. Penggunaan dan pengendalian yang tepat kombinasi aditif / campuran adalah aspek penting mendesain campuran castable. Pada tabel 2.7 mencantumkan jenis aditif dan fungsinya yang umum digunakan dalam pembuatan refraktori castable.

Tabel 2.7 Jenis Aditif yang Umum dan Fungsinya di dalamnya Pembuatan Castable. [3]

Additive	Function				
	Accelerator	Retarder	pH control	Water reducer	Rheology modifier
Lithium carbonate	x				
Calcium hydroxide	x		x		
Sodium carbonate	x		x		
Sodium bicarbonate			x		
Sodium citrate		x		x	x
Sodium phosphate(s)		x		x	x
Sodium polyacrylate				x	x
Polycarboxylate				x	x
Citric acid		x			
Boric acid		x			

## 2.5. Refraktori Castable SiC

Silicon Carbide adalah satu-satunya senyawa kimia dari karbon dan silikon. Ini pada awalnya diproduksi dengan reaksi elektro-kimia suhu tinggi dari pasir dan karbon. Silikon karbida adalah abrasif yang sangat baik dan telah diproduksi dan dibuat menjadi roda gerinda dan produk abrasif lainnya selama lebih dari seratus tahun. Saat ini material SiC telah berkembang menjadi refraktori berkualitas tinggi dengan sifat mekanik yang sangat baik.

Castables SiC mulai dikembangkan dan dipelajari karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan castable berbahan  $Al_2O_3$  diantaranya ditunjukkan pada tabel 2.8 :

Tabel 2.8 Perbandingan Castable berbahan dasar SiC dan  $Al_2O_3$  [11]

*Table 2: Selection of alternative material technology*

Customers' needs	Characteristics of products	Ordinary alumina materials	Silicon Carbide material
Resist to abrasion of clinker	High abrasion resistance	****	*****
Resist to abrasion of dust	High abrasion resistance	***	*****
Resist to clinker attack	High chemical resistance	***	*****
Resist to dust attack	High chemical resistance	**	*****
Resist to alkali attack	High chemical resistance	**	*****
Resist to thermal cycling	High thermal shock resistance	***	*****
Resist high temperature above 1500 Degree Celsius	Refractoriness > 1500 C	*****	*****
Resist high temperature with high oxidation atmosphere	High oxidation resistance	*****	*

Note: \* poor    \*\*fair    \*\*\*good    \*\*\*\*very good    \*\*\*\*\*excellent

## 2.6. Distribusi Ukuran Partikel

Terak menembus ke dalam bahan refraktori melalui pori-pori. Parameter ini memiliki hubungan yang erat dengan ketahanan terak tahan api. Untuk refraktori castables, pori terutama dihasilkan dari dua sumber. Salah satunya terkait dengan hilangnya air (baik air bebas atau air berikat dalam produk hidrasi semen) dan / atau komponen organik, dan yang lainnya terkait dengan kepadatan kemasan partikel yang bergantung pada distribusi ukuran butiran yang ditunjukkan oleh modulus distribusi (q) nilai dalam model Dinger Funk. Distribusi ukuran butiran castable refraktori memiliki efek penting pada kepadatan pengepakan dan kemampuan alirnya. Distribusi ukuran partikel, seperti telah

digunakan selama beberapa tahun, namun dalam skala yang agak terbatas; terutama untuk akhir distribusi yang lebih kasar. Pencapaian kerapatan kemasan 100% tidak mungkin dilakukan secara praktis, kontrol terhadap distribusi ukuran partikel dari castable penting agar distribusi ukuran partikel menentukan apakah castable adalah tipe *vibratable* atau *self-flowing*. Meskipun sejumlah model pengepakan telah dipresentasikan selama abad yang lalu, hanya sedikit yang telah terbiasa dalam persiapan pembuatan cetakan tahan api.

Sebagian besar serbuk yang digunakan untuk fabrikasi keramik memiliki distribusi ukuran partikel yang terus menerus antara beberapa ukuran minimum dan maksimum. Untuk campuran dengan ukuran diskrit, ditemukan bahwa selama partikelnya sangat berbeda ukurannya, kerapatan kemasan meningkat seiring jumlah komponen dalam campuran meningkat. Memperluas konsep ini ke distribusi kontinyu, distribusi ukuran partikel yang lebar memberikan kepadatan kemasan yang lebih tinggi daripada distribusi ukuran partikel yang sempit. Andreassen mengembangkan pendekatan pengemasan partikel berdasarkan penggunaan distribusi ukuran partikel kontinyu. Dalam pendekatan ini, pengemasan optimum terjadi bila distribusi ukuran partikel dapat digambarkan dengan persamaan kekuatan hukum yang biasa dikenal dengan persamaan Dinger Funk. [8]

$$\text{CPFT} = ((D^q - D_{\min}^q) / (D_{\max}^q - D_{\min}^q)) \times 100$$

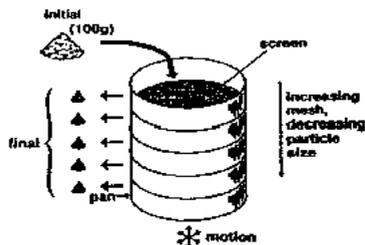
Dimana :

- |            |   |
|------------|---|
| CPFT       | : Persentase kumulatif lebih halus dari |
| D          | : ukuran butiran                        |
| $D_{\max}$ | : maksimum ukuran butiran               |
| $D_{\min}$ | : minimum ukuran butiran                |
| q          | : modulus distribusi ukuran partikel    |

## 2.7. Pengayakan (*Screening*)

Pengayakan (*screening*) merupakan suatu teknik yang paling umum digunakan untuk analisa ukuran partikel dengan cepat. Proses dasar dari *screening* adalah lolosnya material atau pemakanan dari sebuah screen dengan beberapa bukaan dari sebuah ukuran. Partikel yang lolos dari saringan adalah partikel yang lebih kecil, dan partikel yang tertinggal adalah partikel yang lebih besar. [7]

Kisi-kisi segi empat dari kawat dengan ukuran atau jarak tertentu disebut mesh. Ukuran mesh ditunjukkan dari jumlah kawat per unit panjang. Ukuran bukaan merupakan kebalikan dari ukuran mesh; ukuran mesh menandakan ukuran bukaan yang kecil, atau sebaliknya. Hal yang paling penting dalam penentuan ukuran mesh terletak pada jumlah kawat tiap inchi. Sebagai contoh, mesh 200 menyatakan ada 200 kawat per inchi atau 127  $\mu\text{m}$  jarak antar pusat kawat. Ukuran mesh ini diameter kawatnya adalah 52  $\mu\text{m}$ , dengan demikian ukuran bukaannya adalah 75  $\mu\text{m}$ .



Gambar 2.2. Analisa dengan Saringan Bertingkat. [7]

Ukuran bukaan paling kecil berada di paling bawah. Serbuk dimasukkan pada bagian rak paling atas dan kemudian digetarkan selama 15 menit. Untuk analisa partikel, sebagai contoh ukuran dari 100 gram biasanya cukup dengan menggunakan diameter screen 20 cm. Setelah digetarkan serbuk yang masuk kedalam masing-masing interval ukuran ditimbang dan dihitung prosentasenya tiap interval ukuran.

Partikel serbuk yang melewati suatu ukuran mesh ditandai dengan tanda (-) dan yang tertahan di suatu tingkat mesh diberi tanda (+). Sebagai contoh, -100/+200 mesh artinya serbuk tersebut melewati ukuran 100 mesh tetapi tidak bisa melewati ukuran 200 mesh.

Tabel 2.9. Saringan Standart Seri Tyler

Tyler Standard Series (Mesh Designation)	Sieve Opening
3	6.7 mm
4	4.75 mm
6	3.35 mm
8	2.36 mm
10	1.70 mm
14	1.18 mm
20	850 $\mu\text{m}$
28	600 $\mu\text{m}$
35	425 $\mu\text{m}$
48	300 $\mu\text{m}$
65	212 $\mu\text{m}$
100	150 $\mu\text{m}$
150	106 $\mu\text{m}$
200	75 $\mu\text{m}$

## 2.8. Pengujian Sifat Material

### 2.8.1. Pengujian *Bulk Density* dan *Apparent Porosity*

Pengujian *bulk density* dan *apparent porosity* merupakan bagian penting dalam material refraktori castable. *Bulk density* dan porositas dalam material refraktori castable berpengaruh terhadap sifat bahan refraktori, seperti sifat fisik dan thermal. *Bulk density* merupakan perbandingan berat refraktori terhadap volume yang ditempatinya. *Bulk density* adalah pengukuran tidak langsung konduktifitas panas atau kemampuan menyimpan panas. Selain itu, sifat fisik lainnya, seperti kekuatan, abrasi, dan permeabilitas gas, sering dikaitkan dengan kepadatan dan porositas refraktori. Secara umum, semakin tinggi densitasnya, semakin rendah porositas. *Bulk density* bahan dapat rumuskan dengan

$$B = \frac{D}{v} \text{ dan } P = \frac{(W - D)}{v} \times 100\%$$

Dimana :

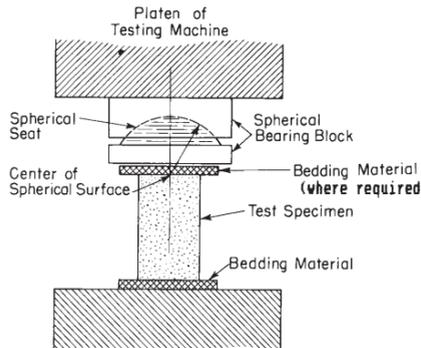
B	= Bulk density (gram/cm <sup>3</sup> )
P	= Porositas (%)
D	= Berat kering (gram)
W	= Berat kering permukaan (gram)
v	= Exterior volume (cm <sup>3</sup> )

### 2.8.2. Pengujian *Cold Crushing Strength*

Pengujian *cold crushing strength* dalam material refraktori adalah untuk mengetahui sifat material dalam mengatasi beban atau tekanan. Kekuatan dapat diukur di temperatur ruang atau diberbagai variasi temperatur sesuai kegunaan. Untuk kekuatan pada temperatur rendah/kamar tidak dapat digunakan secara langsung untuk memprediksi performance pada saat beroperasi. Pengujian pada temperatur rendah hanya dapat mengindikasikan kemampuan material refraktori terhadap menanganai penahanan bentuk dan pengiriman tanpa kerusakan, penahanan abrasi serta menahan impact dalam aplikasi temperatur yang relatif rendah. Aplikasi terpenting pengetahuan ini terutama untuk tujuan konstruksi di dalam instalasi lining tungku, pengangkutan dan penyimpanan. Untuk mendapatkan kekuatan yang tinggi, maka harus: [8]

1. Mempunyai zat pengikat yang baik (*good binding agent*)
2. Mempunyai susunan butir-butir yang kompak/padat, terutama jika proporsi ikatannya rendah/kecil.
3. Mempunyai densitas atau kerapatan yang tinggi pada masing-masing butir yang memadu.

4. Bahan yang porositas (berpori) umumnya memiliki kekuatan tekannya rendah.



Gambar 2.3. Ilustrasi pengujian kuat tekan dingin [8]

Gambar 2.3. menggambarkan ilustrasi pengujian kuat tekan dingin, spesimen uji diletakkan pada *testing machine* dan akan diberikan pembebanan yang di naikan secara bertahap dengan luas yang telah di standarkan untuk refraktori castable. Pengujian kuat tekan dilakukan hingga sampel uji tersebut hancur atau pecah mengalami deformasi. Spesimen uji untuk pengujian kuat tekan dingin (CCS) berbentuk kubus dengan dimensi (50 mm x 50 mm x 50 mm). Permukaan spesimen yang hendak dilakukan uji kuat tekan sebaiknya memiliki permukaan yang rata atau halus agar pembebanannya merata keseluruhan permukaan. Besarnya gaya maksimum yang diterima oleh sampel uji dinyatakan dalam rumus berikut ini.

$$S = \frac{W}{A}$$

dengan:

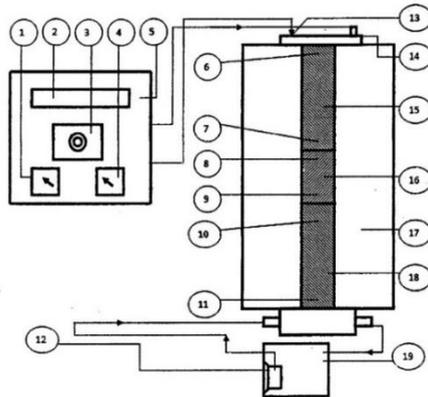
S = Cold Crushing Strength (kg/cm<sup>2</sup>, N/mm<sup>2</sup>)

W = Gaya maksimal (kg, N)

A = Luas penampang benda uji (cm<sup>2</sup>, mm<sup>2</sup>)

### 2.8.3. Pengujian konduktifitas Panas

Pengujian konduktifitas panas dalam material refraktori adalah untuk mengetahui sifat material dalam menghambat perpindahan panas keluar. Pengujian dilakukan dengan menggunakan logam tembaga dalam bentuk silinder sebagai logam penghantar, dengan pemberian panas melalui stainless steel. Deskripsi jelasnya dapat digambarkan pada skema instalasi sebagai berikut:



Gambar 2.4. Instalasi peralatan uji konduksi [10]

Keterangan :

- |                           |                             |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1. Amperemeter            | 11. Thermocouple 6 (TC 6)   |
| 2. Thermocouple selector  | 12. Pompa                   |
| 3. Set point adjuster     | 13. Thermocontrol referensi |
| 4. Voltmeter              | 14. Elemen pemanas          |
| 5. Thermocontrol          | 15. Logam perantara 1       |
| 6. Thermocouple 1 (TC 1)  | 16. Spesimen                |
| 7. Thermocouple 2 (TC 2)  | 17. Isolator                |
| 8. Thermocouple 3 (TC 3)  | 18. Logam perantara 2       |
| 9. Thermocouple 4 (TC 4)  | 19. Penampung air           |
| 10. Thermocouple 5 (TC 5) |                             |

## 2.9. Penelitian Terdahulu

Uraian singkat mengenai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.10.

Tabel 2.10. Penelitian terdahulu

	<b>Penelitian 1</b>	<b>Penelitian 2</b>
<b>Pengarang</b>	Emad Mohamed M. EWAIS and Nagy M. KHALIL	Anwasha Parija
<b>Tahun</b>	2010	2013
<b>Judul</b>	Refractory Castables Based on SiC Slab Waste	Low Cement High Alumina Castables: Effect of Distribution Coefficients
<b>Variabel</b>	CAC 50% Alumina CAC 80% Alumina	Modulus Distribusi Ukuran Butiran (q)
<b>Material</b>	Limbah Industri Plat Silikon Carbida	White Tabular Alumina White Fused Alumina
<b>Tujuan</b>	Respon dari ikatan dua jenis semen tahan api (tinggi dan rendah alumina) dengan pengujian refractoriness, cold crushing strength and densification parameter akan digunakan sebagai kriteria untuk evaluasi castables yang dihasilkan	Untuk mempelajari pengaruh distribusi ukuran partikel dengan metode Dinger Funk untuk distribusi kontinyu dan mempelajari sifat dari castable untuk flowability dan variasi sifat di temperatur yang berbeda

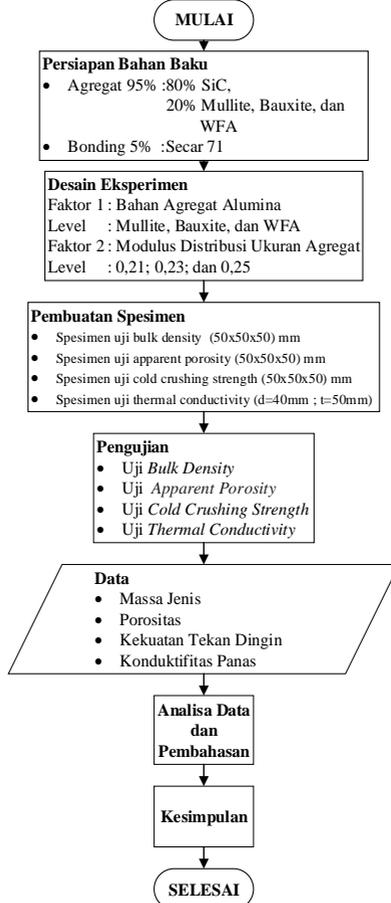
<p style="text-align: center;"><b>Hasil</b></p>	<p>Sampel castable yang disiapkan mengandung CAC kemurnian rendah ditandai dengan sintering yang cukup, sifat mekanis dan refraktori yang memungkinkan penggunaannya pada suhu sampai 1400 ° C sementara yang mengandung CAC kemurnian tinggi ditandai dengan sifat yang lebih baik memungkinkan penggunaannya pada Suhu yang relatif lebih tinggi sampai 1600 ° C.</p>	<p>Alumina reaktif, menjadi alumina halus dengan distribusi ukuran partikel terkontrol, membutuhkan sedikit air dan menghasilkan nilai arus yang lebih baik.</p> <p>Sifat self-flowing diperoleh untuk nilai q 0,21 dan 0,23 dan castables vibratable dengan nilai-nilai q 0,27 dan 0,29 untuk kedua agregat WTA dan alumina reaktif mengandung komposisi</p>
---	---	---

# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Alur Proses Penelitian

Tahap observasi yang dilaksanakan pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir proses berikut ini:



Gambar 3.1. Diagram Alir

### 3.2. Persiapan Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan dalam pengerjaan penelitian ini merupakan bahan baku pembuatan refraktori castable yang diperoleh dari produsen material refraktori, PT. Loka Refractories, Surabaya dengan spesifikasi pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Bahan Baku

	Massa Jenis (gr/cm <sup>3</sup> )	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiC	%CaO	Gambar
<b>Silicon Carbide</b>	3,2	-	2	0,5	90	-	
<b>Mullite</b>	2.70 - 2.90	68	27	0,25	-	-	
<b>Bauxite</b>	3.4 - 3.70	85	9-11	1,8	-	-	
<b>White Fuse Alumina</b>	3.30 - 3.70	99	0,2	0,2	-	-	
<b>Sekar 71</b>	1,04-1,23	70,5	0,7	-	-	28	

Komposisi Castable terdiri dari 95% agregat dan 5% bonding dari total berat bahan baku 1,5kg. Distribusi ukuran agregat dihitung dengan persamaan Dinger dan Funk's dengan modulus distribusi ukuran butiran ( $q$ ) = 0,21; 0,23; dan 0,25 sehingga didapatkan komposisi agregat seperti pada tabel 2.2. Perhitungan distribusi ukuran agregat dapat dilihat pada lampiran 1.

Tabel 3.2 Komposisi Agregat

Fraksi Ukuran(mm)	Agregat	Komposisi $q=0,21$ (gram)	Komposisi $q=0,23$ (gram)	Komposisi $q=0,25$ (gram)
5 3	Sic	116,0	126,4	136,7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,0	31,6	34,2
3 0,5	Sic	321,1	342,3	362,3
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80,3	85,6	90,6
0,5 0,074	Sic	232,3	238,7	243,4
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,1	59,7	60,9
0,074 0	Sic	470,6	432,6	397,6
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	117,7	108,1	99,4
Total		1425,0	1425,0	1425,0

### 3.3. Desain Eksperimen

Pada penelitian ini hasil pengujian akan dianalisis menggunakan desain eksperimen faktorial yang melibatkan dua faktor dimana masing-masing faktor memiliki tiga level sehingga dapat dinyatakan 3<sup>2</sup> faktorial desain.

Faktor dan level yang dimaksud dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 3.2 Faktor dan Level Desain Eksperimen

Faktor		Level		
		1	2	3
1.	Agregat $Al_2O_3$	Mullite	Bauxite	WFA
2.	Modulus Distribusi Ukuran Agregat	0,21	0,23	0,25

### 3.4. Pembuatan Spesimen Refraktori Castable

Terdapat dua tahap pembuatan refraktori castable, yaitu proses pengayakan dan proses pengecoran. Gambar 3.1 merupakan gambar spesimen refraktori castable yang telah melalui proses pengayakan dan proses pengecoran.



Gambar 3.1. Spesimen Refraktori Castable

#### 3.3.1. Proses Pengayakan

Tahapan yang dilakukan pada proses penyaringan butiran serbuk mineral (agregat) . dapat dilihat pada tabel 3.3. Proses ini bertujuan untuk mengetahui ukuran butiran yang tersedia yang nantinya digunakan untuk membuat spesimen.

Tabel 3.3. Proses pembuatan spesimen refraktori castable

No	Peralatan dan Tahapan Proses Pengecoran	Gambar
1	<p>Persiapan peralatan, Peralatan yang digunakan yaitu alat penyaring, neraca berat, sendok, dan wadah plastik</p>	
2	<p>Bahan yang digunakan yaitu SiC, Mullite, Bauxite, White Fuse Alumina</p>	

3	<p>Keringkan semua bahan yang akan digunakan sebagai bahan refraktori castable pada suhu 105°-110°C selama <math>\pm 2</math> jam</p>	
4	<p>Bahan yang telah kering dilakukan proses penyaringan dengan mesin secara bergantian</p>	
5	<p>Setelah dilakukan proses panyaringan. Terdapat bahan sisa diatas saringan dan catat ukuran butiran</p>	
6	<p>Masukkan masing-masing bahan ke dalam kantong plastik yang bersih dan kering</p>	

### 3.3.2. Proses Pengecoran

Setelah proses penyaringan selesai dilakukan, tahapan selanjutnya adalah proses pengecoran berupa pencampuran dan pencetakan bahan baku refraktori. Tahapan yang dilakukan pada proses pengecoran dapat dilihat pada tabel 3.4:

Tabel 3.4. Proses pembuatan spesimen refraktori castable

No	Peralatan dan Tahapan Proses Pengecoran	Gambar
1	<p>Persiapan peralatan, Peralatan yang digunakan untuk proses pengecoran yaitu cetakan dan wadah plastik</p>	
2	<p>Bahan yang digunakan yaitu SiC, Mullite, Bauxite, White Fuse Alumina sebagai agregat, bonding (Secar 71), dan air</p>	

3	<p>Campur butiran serbuk mineral (agregat), bonding(bahan perekat), dengan air</p>	
4	<p>Tuangkan campuran butiran serbuk mineral (agregat), biner (bahan perekat), dan air kedalam cetakan dengan digetarkan. Untuk spesimen uji <i>Thermal Konductivity</i> buat 3 lubang pada sisi samping.</p>	
5	<p>Buka cetakan jika spesimen refraktori castable telah kering</p>	

### 3.5. Pengujian

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian sifat fisik suatu refraktori castable yaitu pengujian *bulk density*, porositas dan pengujian *cold crushing strength*, selain itu juga dilakukan pengujian sifat thermal yaitu pengujian *thermal conductivity*. Pengujian mekanik dan thermal dilakukan pada material refraktori castable.

#### 3.4.1. Pengujian *Bulk Density* dan *Apparent Porosity*

Metode yang digunakan pada pengujian *bulk density* dan porositas pada penelitian ini mengikuti standart ASTM C 20 – 00 dengan prosedur pengujian sebagai berikut :

1. Bahan uji berupa refraktori castable yang telah di cor berbentuk kubus dengan dimensi 50x50x50 mm
2. Keringkan bahan uji di lemari pengeringan dengan suhu 105-110°C, selama  $\pm 2$  jam
3. Setelah dingin, timbang bahan uji dengan neraca berat sampai beratnya tetap. Berat yang didapat merupakan berat kering,  $D$  dengan ketelitian 0,1 gram
4. Lalu bahan uji direndam dalam air dan dipanaskan selama 2 jam hingga mendidih tetapi tidak ada kontak dengan bagian bawah alat pemanas.
5. Setelah mendidih, benda uji didinginkan temperatur kamar tetapi masih dalam air minimal selama 12 jam
6. Timbang bahan uji dalam keadaan terendam dengan neraca berat. Berat yang didapat merupakan berat dalam air,  $S$  dengan ketelitian 0,1 gram
7. Keluarkan benda uji dari dalam air lalu dibasuh dengan kain untuk menghilangkan air di permukaan benda uji

8. Lalu timbang bahan uji dengan neraca berat. Berat yang didapat merupakan Berat kering permukaan,  $W$  dengan ketelitian 0,1 gram

9. Hitung exterior volume bahan dengan rumus

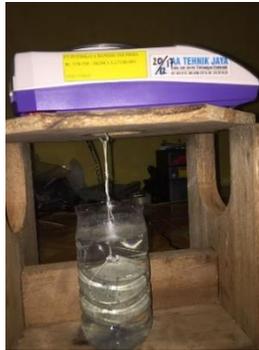
$$v = W - S$$

10. Hitung porositas bahan dengan rumus

$$P = \frac{(W - D)}{v} \times 100$$

11. Hitung bulk density bahan dengan rumus

$$B = \frac{D}{V}$$



Gambar 3.2. Alat Pengujian *Bulk Density*

### 3.4.2. Pengujian *Cold Crushing Strength*

Digunakan untuk mengetahui nilai kuat tekan dan sifat mekanis lainnya dari spesimen refraktori castable. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metallurgi Jurusan Teknik Mesin ITS. Metode yang digunakan pada pengujian *cold crushing strength* pada penelitian ini mengikuti standart ASTM C 133 dengan prosedur pengujian sebagai berikut :

1. Bahan uji berupa refraktori castable yang telah di cor berbentuk kubus dengan dimensi 50x50x50 mm

2. Keringkan bahan uji di lemari pengeringan dengan suhu 105-110°C, selama 18 jam
3. Pengujian dilakukan setelah 2 jam bahan uji dikeluarkan dari lemari pengering
4. Pasang dan tempatkan benda uji tepat pada posisi tengah alat bidang holder
5. Setting kecepatan tekan 500 N/s
6. Jalankan mesin sampai benda uji hancur
7. Mencatat beberapa parameter hasil uji *cold crushing strength*
8. Mendapatkan nilai kekuatan tekan



Gambar 3.3. Alat Uji *Cold Crushing Strength* [Laboratorium Metallurgi Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya]

### 3.4.3. Pengujian *Thermal Conductivity*

Konduktivitas panas mengacu kepada jumlah aliran panas yang melalui material dalam satuan waktu, per satuan gradien suhu sepanjang arah aliran dan per unit luas penampang. Pengujian dilakukan di Laboratorium Perpindahan Panas Jurusan Teknik Mesin ITS.



Gambar 3.4. Alat Uji Konduktifitas Panas [Laboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya]

Prosedur pengujian :

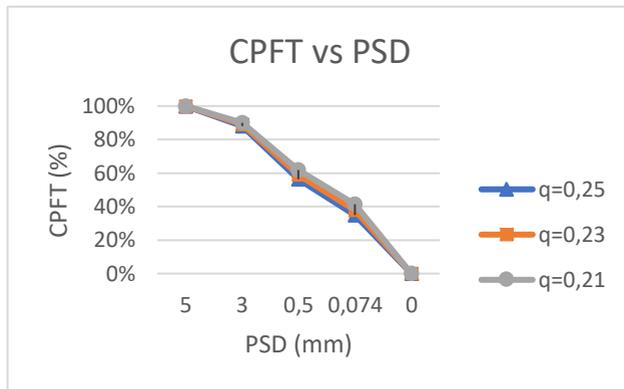
1. Bahan uji berupa refraktori castable yang telah di cor berbentuk tabung dengan dimensi diameter 40 mm dan tinggi 50 mm.
2. Pasang *thermocouple* pada lubang spesimen.
3. Masukkan spesimen ke dalam alat.
4. Tegangan *voltage* regulator diatur pada nilai 220 V
5. Pompa dipastikan dapat mensirkulasikan air pendingin dengan baik
6. *Thermocontrol* dinyalakan dengan menekan saklar tanganan *thermocontrol* pada posisi ON
7. Set point thermocontrol diatur pada nilai 100°C
8. Data siap diambil dengan waktu tunggu selama 2 jam setelah prosedur 6. Data yang diambil terdapat pada lembar data konduksi.
9. Mencatat beberapa parameter hasil uji konduktivitas panas
10. Mendapatkan nilai konduktifitas panas

## BAB IV

### DATA DAN ANALISIS HASIL PENELITIAN

#### 4.1. Distribusi Ukuran Partikel

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan Dinger dan Funk's didapatkan *cumulative percent finer than* (CPFT) seperti pada gambar 4.1 dibawah ini :



Gambar 4.1 CPFT Pada Setiap Ukuran Butiran

Dari gambar 4.1 dapat diketahui bahwa CPFT untuk modulus distribusi ukuran butiran ( $q$ ) =0,25 paling rendah dibandingkan CPFT yang lain. Sehingga, semakin besar modulus distribusi ukuran butiran ( $q$ ) maka semakin kecil CPFT menyebabkan prosentase fraksi kasar agregat semakin besar.

#### 4.2. Pengujian Bulk Density dan Porositas

Pengujian bulk density dan porositas dilakukan sesuai dengan standart ASTM C20-00 yaitu dengan mengukur berat kering (D), berat dalam air (S), dan berat kering permukaan(W) lalu hitung dengan rumus :

Exterior volume ( $v$ ) :

$$v = W - S$$

Porositas (P) :

$$P = \frac{(W - D)}{v} \times 100$$

Bulk density (B)

$$B = \frac{D}{V}$$

#### 4.2.1. Data Hasil Pengujian Bulk Density dan Porositas

Hasil pengujian bulk density dan porositas dituangkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil pengujian bulk density dan porositas Spesimen

Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Modulus Ukuran Butiran	Berat Kering (gr)	Berat Dalam Air (gr)	Berat Kering Permukaan (gr)	V (cm <sup>3</sup> )	Bulk Density (gr/cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)
Mullite	0,21	272,42	178,59	300,62	122,03	2,23	23%
		278,14	182,21	307,88	125,67	2,21	24%
	0,23	292,9	188,20	316,72	128,52	2,28	19%
		286,19	181,59	307,52	125,93	2,27	17%
	0,25	283,17	181,59	305,36	123,77	2,29	18%
		288,5	182,33	309,06	126,73	2,28	16%
Bauxite	0,21	290,55	189,75	315,2	125,45	2,32	20%
		290,38	186,76	313,34	126,58	2,29	18%
	0,23	291,26	188,42	314,63	126,21	2,31	19%
		276,8	175,77	295,53	119,76	2,31	16%
	0,25	293,57	190,97	315,88	124,91	2,35	18%
		290,98	186,17	309,82	123,65	2,35	15%
WFA	0,21	294,27	191,05	316,56	125,51	2,34	18%
		299,8	194,95	322,64	127,69	2,35	18%
	0,23	299,93	195,08	319,28	124,2	2,41	16%
		283,28	184,45	301,78	117,33	2,41	16%
	0,25	299,3	193,70	318,26	124,56	2,40	15%
		300,99	193,97	318,32	124,35	2,42	14%

Contoh perhitungan dari hasil pengujian *bulk density* dan porositas dari salah satu data spesimen yaitu SM1 sebagai berikut :

Diketahui :

Berat kering (D) : 272,42 gram

Berat dalam air (S) : 178,59 gram

Berat kering permukaan (W) : 300,62 gram

Ditanya : Bulk density dan Porositas

Perhitungan :

➤ Exterior Volume (v)

$$\begin{aligned} v &= W - S \\ &= 300,62 - 178,59 \\ &= 122,03 \text{ gr} \end{aligned}$$

Berdasarkan ASTM C20-00 1gr air = 1cm<sup>3</sup> maka v = 122,03 cm<sup>3</sup>

➤ Bulk Density (B)

$$\begin{aligned} B &= \frac{D}{V} \\ &= \frac{272,42}{122,03} \\ &= 2,23 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

➤ Porositas (P)

$$\begin{aligned} P &= \frac{(W - D)}{v} \times 100\% \\ &= \frac{(300,62 - 272,42)}{122,03} \times 100\% \\ &= 23\% \end{aligned}$$

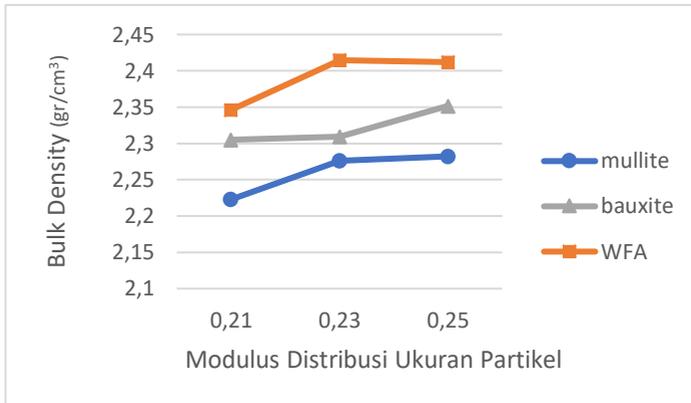
#### 4.2.2. Analisis dan Pembahasan Pengujian Bulk Density dan Porositas

Masukkan data hasil pengujian ke dalam kolom desain eksperimen minitab yang telah dibuat sebelumnya seperti pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Desain Eksperimen Pengujian Bulk Density dan Porositas

Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Modulus Distribusi Ukuran Butir	Bulk Density	Porositas
Mullite	0,21	2,23	0,231091
Mullite	0,23	2,28	0,185341
Mullite	0,25	2,29	0,179284
Bauxite	0,21	2,32	0,196493
Bauxite	0,23	2,31	0,185168
Bauxite	0,25	2,35	0,178609
WFA	0,21	2,34	0,177595
WFA	0,23	2,41	0,155797
WFA	0,25	2,40	0,152216
Mullite	0,21	2,21	0,236652
Mullite	0,23	2,27	0,169380
Mullite	0,25	2,28	0,162235
Bauxite	0,21	2,29	0,181387
Bauxite	0,23	2,31	0,156396
Bauxite	0,25	2,35	0,144278
WFA	0,21	2,35	0,178871
WFA	0,23	2,41	0,157675
WFA	0,25	2,42	0,139365

Dari hasil pengujian di plot grafik rata-rata hasil pengujian bulk density yang dapat dilihat pada gambar 4.2. Sedangkan porositas pada gambar 4.3.



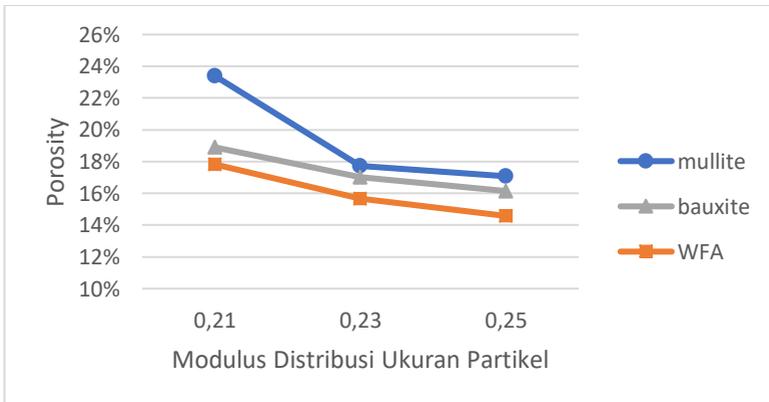
Gambar 4.2. Plot Hasil Pengujian *Bulk Density*

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa *bulk density* tertinggi dicapai oleh agregat SiC-WFA dan *bulk density* terendah terdapat pada agregat SiC-Mullite. Untuk agregat SiC-WFA trend line dari grafik meningkat dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25 dengan *bulk density* tertinggi terdapat pada  $q=0,25$  yaitu 2,41 gr/cm<sup>3</sup> dan *bulk density* terendah pada  $q=0,21$  yaitu 2,35 gr/cm<sup>3</sup>. Untuk agregat SiC-Bauxite trend line grafik naik dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25 dengan *bulk density* tertinggi pada  $q=0,25$  yaitu 2,35gr/cm<sup>3</sup> dan *bulk density* terendah pada  $q=0,21$  yaitu 2,30gr/cm<sup>3</sup>. Untuk agregat SiC-Mullite trend line grafik meningkat dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25 dengan *bulk density* tertinggi pada  $q=0,25$  yaitu 2,28gr/cm<sup>3</sup> dan *bulk density* terendah pada  $q=0,21$  yaitu 2,22gr/cm<sup>3</sup>.

Untuk mengetahui apakah agregat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap *bulk density* refraktori castable SiC, maka dilakukan pengujian menggunakan metode statistik. Pengujian 3<sup>2</sup> faktorial pada laporan penelitian ini menggunakan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

General Factorial Regression: Bulk Density versus Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Modulus Distribusi Ukura						
Factor Information						
Factor	Levels	Values				
Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	Mullite; Bauxite; WFA				
Modulus Distribusi Ukuran Butir	3	0,21; 0,23; 0,25				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	8	0,064331	0,008041	101,20	0,000	
Linear	4	0,062083	0,015521	195,33	0,000	
Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	0,051916	0,025958	326,68	0,000	
Modulus Distribusi Ukuran Butir	2	0,010167	0,005083	63,97	0,000	
2-Way Interactions	4	0,002248	0,000562	7,07	0,007	
Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Modulus Distribusi Ukuran Butir	4	0,002248	0,000562	7,07	0,007	
Error	9	0,000715	0,000079			
Total	17	0,065046				

Dari hasil pengujian menggunakan metode 3<sup>2</sup> faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0% untuk agregat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan 0,1% modulus distribusi ukuran butiran. Nilai tingkat signifikan (*P-value*) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa agregat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh secara signifikan terhadap bulk density refraktori castable SiC.



Gambar 4.3. Plot Hasil Pengujian Porositas

Gambar 4.3 adalah representasi dari nilai porositas terhadap modulus distribusi ukuran partikel (*q*) untuk agregat SiC dengan mullite, bauxite atau WFA. Agregat SiC-Mullite memiliki

porositas tertinggi dan porositas terendah dicapai oleh agregat SiC-WFA. Dimana setiap agregat memiliki trend line grafik turun dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25. Nilai porositas untuk agregat SiC-Mullite tertinggi 23% dan terendah 17%. Pada agregat SiC-Bauxite nilai tertinggi 19% dan terendah 17%. Dan untuk agregat SiC-WFA memiliki nilai porositas tertinggi 18% dan terendah 15%.

Hal ini sesuai dengan teori [3], Secara umum, semakin tinggi densitasnya, semakin rendah porositas. Maka, semakin besar modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) semakin kecil porositas dan agregat dengan porositas tertinggi yaitu SiC-Mullite dan terendah SiC-WFA.

Untuk mengetahui apakah agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap porositas refraktori castable SiC, maka dilakukan pengujian menggunakan metode statistik. Pengujian  $3^2$  faktorial pada laporan penelitian ini menggunakan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

General Factorial Regression: Porositas versus Agregat $Al_2O_3$ ; Modulus Distribusi Ukuran Butir						
Factor Information						
Factor	Levels	Values				
Agregat $Al_2O_3$	3	Mullite; Bauxite; WFA				
Modulus Distribusi Ukuran Butir	3	0,21; 0,23; 0,25				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	8	0,010147	0,001268	7,66	0,003	
Linear	4	0,009043	0,002261	13,65	0,001	
Agregat $Al_2O_3$	2	0,003462	0,001731	10,45	0,005	
Modulus Distribusi Ukuran Butir	2	0,005581	0,002790	16,85	0,001	
2-Way Interactions	4	0,001105	0,000276	1,67	0,240	
Agregat $Al_2O_3$ *Modulus Distribusi Ukuran Butir	4	0,001105	0,000276	1,67	0,240	
Error	9	0,001491	0,000166			
Total	17	0,011638				

Dari hasil pengujian menggunakan metode  $3^2$  faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0,5% untuk agregat  $Al_2O_3$  dan 0,1% modulus distribusi ukuran butiran. Nilai tingkat signifikan (*P-value*) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh secara signifikan terhadap porositas refraktori castable SiC.

### 4.3. Pengujian Cold Crushing Strength

Beban pengujian cold crushing strength sebesar 1000 N/s. Spesimen uji cold crushing strength berbentuk kubus seperti ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4. Spesimen Cold Crushing Strength

#### 4.3.1. Data Hasil Pengujian Cold Crushing Strength

Dari pengujian diperoleh beban maksimum yang dapat diterima spesimen. Beban maksimum tersebut digunakan untuk menghitung *Cold Crushing Strength*. Persamaan di bawah ini digunakan untuk menghitung *Cold Crushing Strength*:

$$S = \frac{W}{A}$$

dengan:

S = Cold Crushing Strength

W = Beban maksimum

A = Luas penampang spesimen

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Cold Crushing Strength Spesimen

Spesimen		Beban Maksimum (kgf)	Luas Penampang (cm <sup>2</sup> )	Cold Crushing Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
SiC Mullite	0,21	700	25,16	27,83
		770	25,21	30,54
	0,23	2330	25,00	93,19
		1700	25,30	67,19
	0,25	2650	25,26	104,93
		2160	25,51	84,69
SiC Bauxite	0,21	1430	25,65	55,75
		1340	25,08	53,43
	0,23	3680	25,47	144,49
		2380	25,47	93,45
	0,25	1910	24,92	76,64
		4910	25,72	190,90
SiC WFA	0,21	2000	26,01	76,89
		1810	25,08	72,17
	0,23	3220	26,89	119,75
		3680	25,17	146,19
	0,25	6040	25,76	234,47
		4910	25,84	190,00

Contoh perhitungan dari hasil pengujian *cold crushing strength* dari salah satu data spesimen yaitu SM1 sebagai berikut :

Diketahui :

Beban Maksimum (W) : 700 kgf

Luas Penampang (A) : 25,16 cm<sup>2</sup>

Ditanya : *Cold Crushing Strengt*

Perhitungan :

➤ Cold Crushing Strength

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{W}{A} \\
 &= \frac{700}{25,16} \\
 &= 27,83 \text{ kgf/cm}^2
 \end{aligned}$$

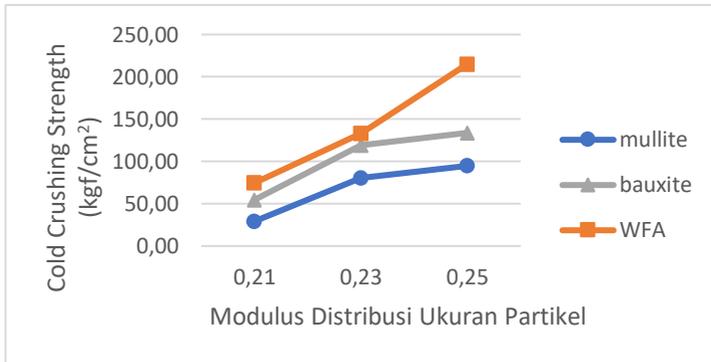
#### 4.3.2. Analisis dan Pembahasan Pengujian Cold Crushing Strength

Masukkan data hasil pengujian ke dalam kolom desain eksperimen minitab yang telah dibuat sebelumnya seperti pada tabel 4.7.

Tabel 4.7. Desain Eksperimen Cold Crushing Strength

Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Modulus Distribusi Ukuran Butir	Cold Crushing Strength
Mullite	0,21	27,83
Mullite	0,23	93,19
Mullite	0,25	104,93
Bauxite	0,21	55,75
Bauxite	0,23	144,49
Bauxite	0,25	76,64
WFA	0,21	76,89
WFA	0,23	119,75
WFA	0,25	234,47
Mullite	0,21	30,54
Mullite	0,23	67,19
Mullite	0,25	84,69
Bauxite	0,21	53,43
Bauxite	0,23	93,45
Bauxite	0,25	190,90
WFA	0,21	72,17
WFA	0,23	146,28
WFA	0,25	195,77

Dari hasil pengujian di plot grafik rata-rata hasil pengujian cold crushing strength yang dapat dilihat pada gambar 4.5



Gambar 4.5. Plot Rata-Rata Hasil Pengujian Cold Crushing Strength

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa *cold crushing strength* tertinggi dicapai oleh agregat SiC-WFA dan *cold crushing strength* terendah terdapat pada agregat SiC-Mullite. Untuk agregat SiC-WFA trend line dari grafik meningkat dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25 dengan *cold crushing strength* tertinggi terdapat pada  $q=0,25$  yaitu 215,12 kgf/cm<sup>2</sup> dan *cold crushing strength* terendah pada  $q=0,21$  yaitu 74,53 kgf/cm<sup>2</sup>. Untuk agregat SiC-Bauxite trend line grafik naik dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25 dengan *cold crushing strength* tertinggi pada  $q=0,25$  yaitu 133,77 kgf/cm<sup>2</sup> dan *cold crushing strength* terendah pada  $q=0,21$  yaitu 54,59 kgf/cm<sup>2</sup>. Untuk agregat SiC-Mullite trend line grafik meningkat dari modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) 0,21 hingga 0,25 dengan *cold crushing strength* tertinggi pada  $q=0,25$  yaitu 94,81 kgf/cm<sup>2</sup> dan *cold crushing strength* terendah pada  $q=0,21$  yaitu 29,18 gr/cm<sup>3</sup>.

Hal ini sesuai dengan teori [3], Secara umum, semakin rendah porositas, semakin tinggi *cold crushing strength*. Maka, semakin besar modulus distribusi ukuran partikel ( $q$ ) semakin tinggi nilai *cold crushing strength* dan agregat dengan *cold*

crushing strength tertinggi yaitu SiC-WFA dan terendah SiC-Mullite.

Untuk mengetahui apakah jenis agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap cold crushing strength refraktori castable SiC, maka dilakukan pengujian menggunakan metode statistik. Pengujian  $3^2$  faktorial pada laporan penelitian ini menggunakan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

General Factorial Regression: Cold Crushing St versus Agregat Al2O3; Modulus Distribu					
Factor Information					
Factor	Levels	Values			
Agregat Al2O3	3	Mullite; Bauxite; WFA			
Modulus Distribusi Ukuran Butir	3	0,21; 0,23; 0,25			
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	47717	5965	5,66	0,009
Linear	4	41622	10405	9,87	0,002
Agregat Al2O3	2	15929	7964	7,55	0,012
Modulus Distribusi Ukuran Butir	2	25693	12846	12,18	0,003
2-Way Interactions	4	6095	1524	1,44	0,296
Agregat Al2O3*Modulus Distribusi Ukuran Butir	4	6095	1524	1,44	0,296
Error	9	9492	1055		
Total	17	57209			

Dari hasil pengujian menggunakan metode  $3^2$  faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 1,2% untuk agregat  $Al_2O_3$  dan 0,3% modulus distribusi ukuran butiran. Nilai tingkat signifikan (*P-value*) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh secara signifikan terhadap *cold crushing strength* refraktori castable SiC.

#### 4.4. Pengujian Konduktifitas Panas

Pengujian konduktifitas panas dilakukan Set point termocontrol diatur pada nilai  $100^\circ C$ . Spesimen uji konduktifitas panas berbentuk tabung seperti ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Spesimen Pengujian Konduktifitas Panas

#### 4.4.1. Data Hasil Pengujian Konduktifitas Panas

Dari pengujian diperoleh energi untuk menghancurkan yang digunakan untuk menghitung konduktifitas panas.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Konduktivitas Panas

Agregat	q	T1	T2	T3	T4	T5	T6	k
SiC Mullite	0,21	104,5	102,8	94,2	72,6	38,3	37,4	2,88
		104,1	102,4	93,7	72,2	37,8	36,7	2,89
	0,23	102,3	100,5	80,3	62,7	35,8	35	3,74
		102,6	100,8	80,6	62,9	36	35,2	3,72
	0,25	101,6	100,1	85,4	76,1	36,9	35,9	5,89
		101,7	100,2	85,5	76,2	37	36	5,89
SiC Bauxite	0,21	96,7	95,5	76,4	62,6	33,4	32,6	3,17
		97	95,7	76,7	62,9	33,6	32,9	3,44
	0,23	97,7	96,2	79,5	68,2	35,3	34,4	4,84
		97,7	96,2	79,6	68,3	35,3	34,4	4,84
	0,25	99,3	97,5	75,2	65,6	37	36,1	6,84
		100,6	98,9	76,4	66,7	37,4	36,5	6,40
SiC WFA	0,21	100,7	99,3	82,5	69,7	32,8	31,9	3,99
		100,9	99,5	82,9	70	33,2	32,4	3,96
	0,23	103,3	102,2	80,5	73,3	33	31,9	5,58
		103,2	102,1	80,4	73,3	32,9	31,8	5,66
	0,25	99	96,8	83,6	74,2	43,1	41,7	8,54
		98,8	96,7	83,5	74,2	43,2	41,8	8,24

Contoh perhitungan dari hasil pengujian konduktivitas panas dari salah satu data spesimen yaitu SM1 sebagai berikut :

Diketahui :

Diameter tembaga 1 : 40 mm = 0,4 m  
 Jarak antar thermocouple 1 dan 2 : 10 mm = 0,1 m  
 Diameter spesimen : 40 mm = 0,4 m  
 Jarak antar thermocouple 3 dan 4 : 1 mm = 0,01 m

Temperatur Tiap Titik (°K)					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
104,5	102,8	94,2	72,6	38,3	37,4

Ditanya : konduktivitas panas

Perhitungan :

- Menentukan  $T_{avg}$  untuk tembaga

$$T_{avg} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$T_{avg} = \frac{104,5^\circ C + 102,8^\circ C}{2} = 103,65^\circ C$$

$$= 376,65^\circ K$$

Menentukan nilai  $k_{tembaga}$  untuk tembaga 1 dengan melihat dari data pada lampiran 4 dengan interpolasi menggunakan

$T_{avg}$ , didapatkan :  $K_{tembaga} \rightarrow 410,67 \text{ W/m} \cdot ^\circ K$

- Menentukan nilai  $Q_{teori}$  untuk Tembaga 1 :

$$A_{tembaga} = \pi r^2$$

$$A_{tembaga} = \pi 0,02^2$$

$$A_{tembaga} = 1,2566 \cdot 10^{-3} (m^2)$$

$$q_{tembaga} = K \cdot A \cdot \Delta T / L$$

$$q_{tembaga} = \frac{410,67 (W/m \cdot K) \cdot 1,256 \cdot 10^{-3} (m^2) \cdot 1,7 (K)}{0,1 (m)}$$

$$q_{tembaga} = 8,77 \text{ Watt}$$

- Menentukan  $k_{\text{praktek}}$  untuk spesimen

$$Q_{\text{tembaga}} = Q_{\text{spesimen}}$$

$$8,77 \text{ W} = k_{\text{spesimen}} \cdot 0,001256 \text{ m}^2 \cdot \frac{(94,2 \text{ }^\circ\text{C} - 72,6 \text{ }^\circ\text{C})}{0,01 \text{ m}}$$

$$k_{\text{spesimen}} = 3,23 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$$

Faktor koreksi 0,89 maka

$$k_{\text{spesimen}} = 2,88 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$$

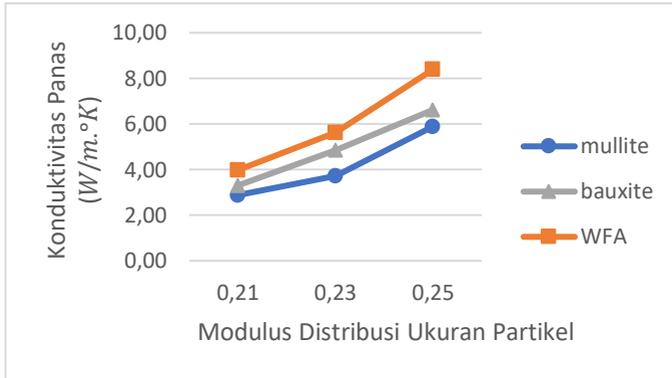
#### 4.4.2. Analisis dan Pembahasan Data

Masukkan data hasil pengujian ke dalam kolom desain eksperimen minitab yang telah dibuat sebelumnya seperti pada tabel 4.6.

Tabel 4.6. Desain Eksperimen Konduktifitas Panas

Agregat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Modulus Distribusi Ukuran Butir	Konduktivitas Panas
Mullite	0,21	2,88
Mullite	0,23	3,74
Mullite	0,25	5,89
Bauxite	0,21	3,17
Bauxite	0,23	4,84
Bauxite	0,25	6,84
WFA	0,21	3,99
WFA	0,23	5,58
WFA	0,25	8,54
Mullite	0,21	2,89
Mullite	0,23	3,72
Mullite	0,25	5,89
Bauxite	0,21	3,44
Bauxite	0,23	4,84
Bauxite	0,25	6,40
WFA	0,21	3,96
WFA	0,23	5,66
WFA	0,25	8,24

Dari hasil pengujian di plot grafik rata-rata hasil pengujian konduktifitas panas yang dapat dilihat pada gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4.7. Plot Hasil Pengujian Konduktivitas Panas

Plot rata-rata hasil pengujian konduktifitas panas diatas memiliki trendline yang fluktuatif dimana nilai konduktivitas panas tertinggi pada spesimen SiC-white fuse alumina dengan  $q=0,25$  yaitu  $8,39 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$  dan terendah SiC-mullite dengan  $q=0,25$  yaitu  $2,88 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$ . Hal ini terjadi dikarenakan nilai konduktivitas dipengaruhi oleh porositas spesimen. Semakin tinggi nilai porositas maka nilai konduktivitasnya semakin rendah [4].

Untuk mengetahui apakah agregat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap cold crushing strength refraktori castable SiC, maka dilakukan pengujian menggunakan metode statistik. Pengujian  $3^2$  faktorial pada laporan penelitian ini menggunakan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

General Factorial Regression: Konduktivitas Pa versus Agregat Al2O3; Modulus Distribusi						
Factor Information						
Factor	Levels	Values				
Agregat Al2O3	3	Mullite; Bauxite; WFA				
Modulus Distribusi Ukuran Butir	3	0,21; 0,23; 0,25				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	8	50,6963	6,3358	312,00	0,000	
Linear	4	49,3767	12,3442	607,87	0,000	
Agregat Al2O3	2	10,1501	5,0750	249,91	0,000	
Modulus Distribusi Ukuran Butir	2	39,2266	19,6133	965,83	0,000	
2-Way Interactions	4	1,3096	0,3274	16,12	0,000	
Agregat Al2O3*Modulus Distribusi Ukuran Butir	4	1,3096	0,3274	16,12	0,000	
Error	9	0,1828	0,0203			
Total	17	50,8690				

Dari hasil pengujian menggunakan metode  $3^2$  faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0% untuk agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran. Nilai tingkat signifikan (*P-value*) > 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa agregat  $Al_2O_3$  dan modulus distribusi ukuran butiran memiliki nilai tingkat signifikan (*P-value*) < 5% berpengaruh secara signifikan terhadap refraktori castable SiC.

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian setelah proses pengambilan dan analisa data adalah :

1. Pengaruh agregat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap sifat fisik dan termal refraktori castable SiC:
  - a. Nilai *bulk density* refraktori castable SiC-WFA memiliki nilai *bulk density* terbesar dibandingkan SiC dengan bauxite atau mullite.
  - b. Porositas refraktori castable SiC-WFA memiliki nilai porositas terkecil dibandingkan SiC dengan bauxite atau mullite karena porositas berbanding terbalik dengan *bulk density*.
  - c. *Cold crushing strength* castable SiC-WFA memiliki nilai *cold crushing strength* terbesar dibandingkan SiC dengan bauxite atau mullite karena memiliki porositas yang rendah.
  - d. Konduktivitas panas castable SiC-WFA memiliki nilai konduktivitas panas terbesar dibandingkan SiC dengan bauxite atau mullite karena memiliki porositas yang paling rendah.
2. Pengaruh modulus distribusi ukuran partikel terhadap sifat fisik dan termal refraktori castable SiC :
  - a. Nilai *bulk density* refraktori castable SiC semakin meningkat dengan signifikan seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel.
  - b. Porositas refraktori castable SiC menurun signifikan seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel.

- c. *Cold crushing strength* castable SiC meningkat signifikan seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel.
- d. Konduktivitas panas castable SiC meningkat signifikan seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel

## 5.2. Saran

1. Penelitian *cold crushing strength* dikembangkan dengan variasi temperatur.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan percobaan sifat fisik dan thermal lain dari refraktori SiC seperti abrasi, thermal ekspansi, difusifitas panas, PCE maupun korosi.

## Daftar Pustaka

- [1] ASM Handbook Vol. 2. 2005. Properties and Selection : Nonferrous Metals–Nickel, Cobalt, Lead, Tin, Zinc, Cadmium, Precious, Reactive, Refractory Metals and Alloys; Materials for Thermostats, Electrical Heating and Resistance Contacts, and Connectors. USA : ASM International
- [2] Prabir Basu. 2015. “*Circulating Fluidized Bed Boilers Design, Operation, and Maintenance*”. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
- [3] Charles A. Schacht. 2004. ”*Refractories Handbook*”. Schacht Consulting Services Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A
- [4] Harbison Walker. 1998. “*Modern Refractory Practice*”. Harbison Walker Refractory Company.
- [5] A.M. Garbers-Craig. 2008. “*How cool are refractory materials?*”. Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, University of Pretoria.
- [6] Christopher Parr, Thomas A. Bier, Nancy E. Bunt, Eduardo Spreafico. 1997. “*Calcium Aluminate Cement (CAC) Based Castable for Demanding Application*” Monolithics Conference, Tehran, Iran.
- [7] Pengaruh Paduan Abu Vulkanik dan Tanah Liat Terhadap Sifat Abrasif dan Kuat Tekan Dingin Sebagai Bahan Refraktori Achmad Basari
- [8] Ritonga, Andriansyah, Nugroho, Sri, dan Umardani, Yusuf. 2011. “*Karakterisasi Material Refraktori yang Digunakan pada Lining Tungku Industri Peleburan Baja PT Suyuti Sido Maju Cepur Klaten*”. Semarang. Undergraduate

thesis Mechanical Engineering Departement of Diponegoro University.

- [9] Efendy, Hadi, 2008, "*Studi Antioksidasi Refraktori Monolitik dengan Bahan Pengikat Tar Resin*", Disertasi S3 Institut Teknologi Bandung.
- [10] Modul Praktikum Perpan Konduktifitas Panas Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [11] Chanvit Chawengkul1 Thanapong Prasertphol 2 Punyoot Huantanom. "*New Silicon Carbide Containing Refractory Castablefor Resolving Problem in Cement Kiln*", The Siam Refractory Industry Co. Ltd., Thailand

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

#### Lembar Perhitungan CPFT

Komposisi Castable					
Agregat	95%	1425	Sic	80%	1140
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20%	285
Bonding	5%	75			

q=	0,21
Dmax=	5
Dmin=	0
Total Bahan	1500

#### Ukuran partikel dan CPFT untuk q = 0,21

Ukuran Partikel(mm)	CPFT (%)
5	100,0%
3	89,8%
0,5	61,7%
0,074	41,3%
0	0

**Kisaran ukuran dan jumlah partikel untuk  $q = 0,21$**

Fraksi Ukuran(mm)	%Komposisi
5-3 mm	10,2%
3-0,5 mm	28,2%
0,5-0,074mm	20,4%
<0,074mm	41%
Total	100,00%

**Jumlah yg dibutuhkan dalam 1,425 kg (gram)**

Fraksi Ukuran(mm)	Agregat	Komposisi (gram)
5-3 mm	Sic	116,0
	$Al_2O_3$	29,0
3-0,5 mm	Sic	321,1
	$Al_2O_3$	80,3
0,5-0,074mm	Sic	232,3
	$Al_2O_3$	58,1
<0,074mm	Sic	470,6
	$Al_2O_3$	117,7
Total		1425,0

q=	0,23
Dmax=	5
Dmin=	0
Total bahan	1500

**Ukuran partikel dan CPFT untuk  $q = 0,23$**

Ukuran Partikel(mm)	CPFT (%)
5	100,0%
3	88,9%
0,5	58,9%
0,074	37,9%
0	0

**Kisaran ukuran dan jumlah partikel untuk  $q = 0,23$**

Fraksi Ukuran(mm)	%Komposisi
5-3 mm	11,1%
3-0,5 mm	30,0%
0,5-0,074mm	20,9%
<0,074mm	38%
Total	100,00%

**Jumlah yg dibutuhkan dalam 1,425 kg (gram)**

Fraksi Ukuran(mm)	Agregat	Komposisi (gram)
5-3 mm	Sic	126,4
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,6
3-0,5 mm	Sic	342,3
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85,6
0,5-0,074mm	Sic	238,7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	59,7
<0,074mm	Sic	432,6
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	108,1
Total		1425,0

q=	0,25
Dmax=	5
Dmin=	0
Total bahan	1500

**Ukuran partikel dan CPFT untuk  $q = 0,25$**

Ukuran Partikel(mm)	CPFT (%)
5	100,0%
3	88,0%
0,5	56,2%
0,074	34,9%
0	0

**Kisaran ukuran dan jumlah partikel untuk  $q = 0,25$**

Fraksi Ukuran(mm)	%Komposisi
5-3 mm	12,0%
3-0,5 mm	31,8%
0,5-0,074mm	21,4%
<0,074mm	35%
Total	100,00%

**Jumlah yg dibutuhkan dalam 1,425 kg (gram)**

Fraksi Ukuran(mm)	Agregat	Komposisi (gram)
5-3 mm	Sic	136,7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,2
3-0,5 mm	Sic	362,3
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90,6
0,5-0,074mm	Sic	243,4
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60,9
<0,074mm	Sic	397,6
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,4
Total		1425,0

## Lampiran 2

# Lembar Hasil Pengujian Cold Crushing Strength

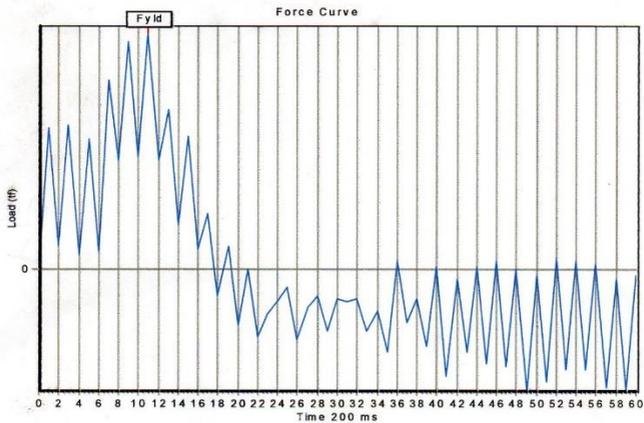
### TENSION TEST REPORT



### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE	: 21-December-2017	SIZE (mm)	: 50.72 X 49.6
SAMPLE NUMBER	: SM1 1/2	AREA (mm <sup>2</sup> )	: 2515.71
SPESECIFICATION	: SNI	OPERATOR	: mantri
SAMPLE TYPE	: SQUARE	TIME	: 13:35
CUSTOMER	: TIO		



Fmax (tf)	: 0.70	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.28
Fyield (tf)	: 0.70	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.28
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

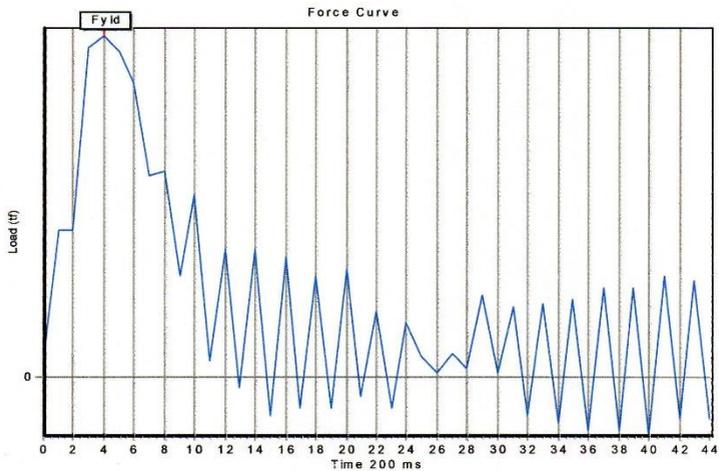


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SM1 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 51.11 X 49.33  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2521.26  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:53



Fmax (tf)	: 0.77	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.31
Fyield (tf)	: 0.77	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.31
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

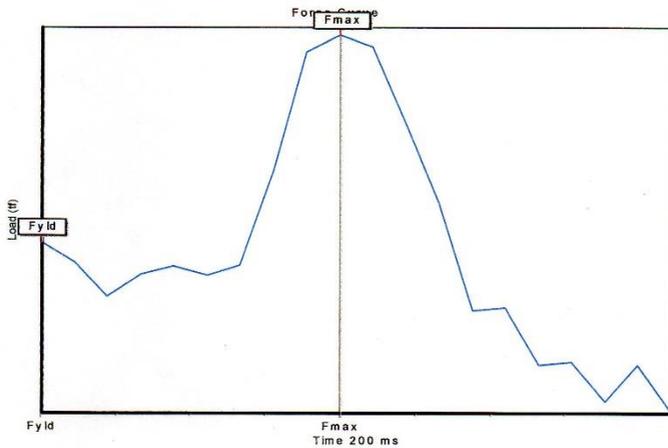
## TENSION TEST REPORT



### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE	: 21-December-2017	SIZE (mm)	: 50.84 X 49.18
SAMPLE NUMBER	: SM2 1/2	AREA (mm <sup>2</sup> )	: 2500.31
SPESIFICATION	: SNI	OPERATOR	: mantri
SAMPLE TYPE	: SQUARE	TIME	: 13:40
CUSTOMER	: TIO		



Fmax (tf)	: 2.33	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.93
Fyield (tf)	: 1.14	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.46
Ratio	: 2.05	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

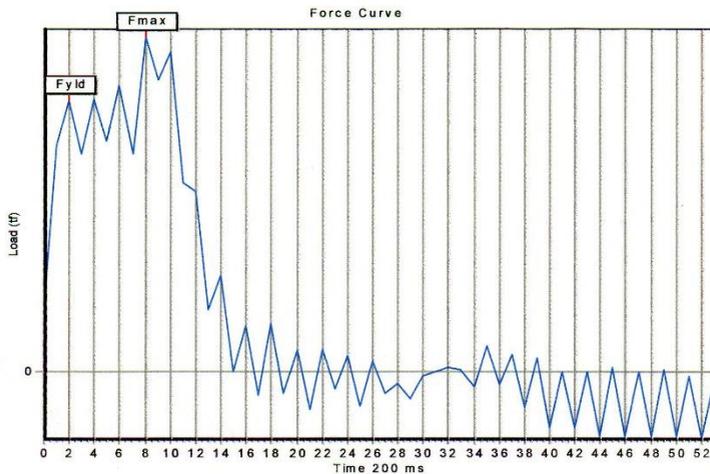


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SM2 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 49.39 X 51.23  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2530.25  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:56



Fmax (tf)	: 1.70	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.67
Fyield (tf)	: 1.38	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.55
Ratio	: 1.23	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

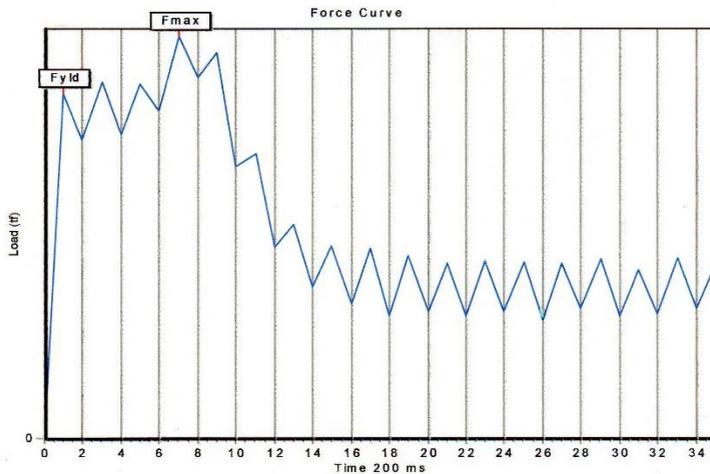


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SM3 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 49.58 X 50.94  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2525.61  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:38



Fmax (tf)	: 2.65	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.05
Fyld (tf)	: 2.27	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.90
Ratio	: 1.17	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

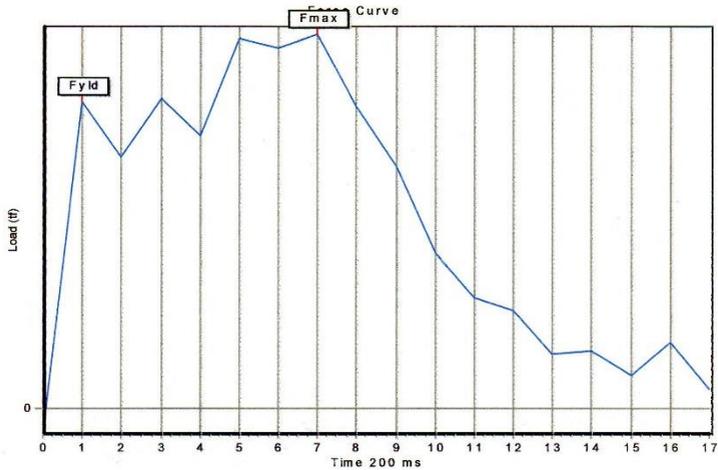


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SM3 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 50.11 X 50.9  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2550.6  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:55



Fmax (tf) : 2.16  
Fyield (tf) : 1.78  
Ratio : 1.22  
Notes :

Tensile Strength (kgf/mm<sup>2</sup>) : 0.85  
Yield Strength (kgf/mm<sup>2</sup>) : 0.70  
Elongation (%) : 0.00

## TENSION TEST REPORT

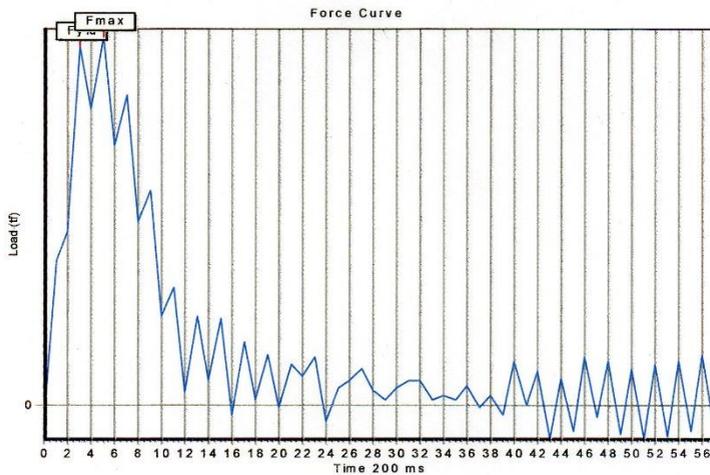


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SB1 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 49.4 X 50.77  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2508.04  
OPERATOR : mantri  
TIME : 14:00



Fmax (tf)	: 1.34	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.53
Fyfield (tf)	: 1.30	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.52
Ratio	: 1.03	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

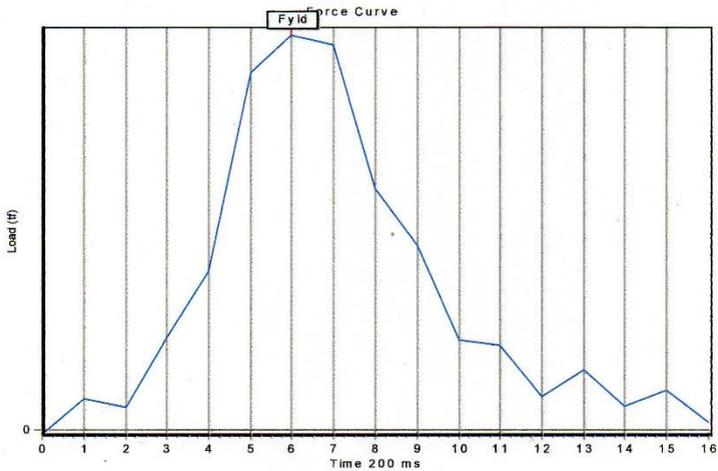


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SB2 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 51.4 X 49.55  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2546.87  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:49



Fmax (tf)	: 3.68	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.44
Fyield (tf)	: 3.68	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.44
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

**TENSION TEST REPORT**

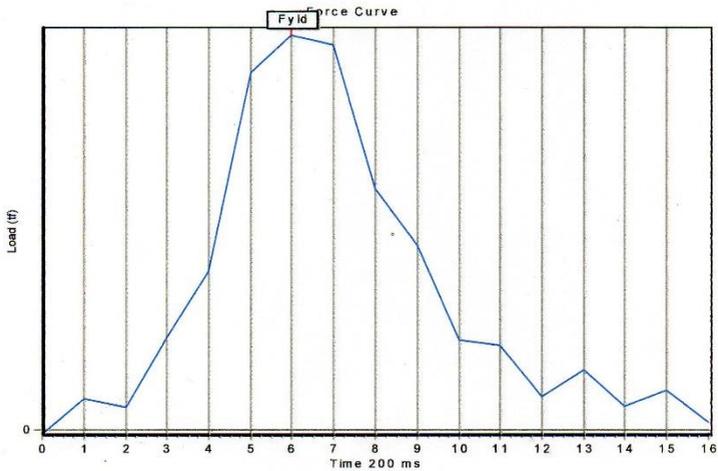


**LABORATORIUM METALURGI**

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SB2 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 51.4 X 49.55  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2546.87  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:49



Fmax (tf)	: 3.68	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.44
Fyield (tf)	: 3.68	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.44
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

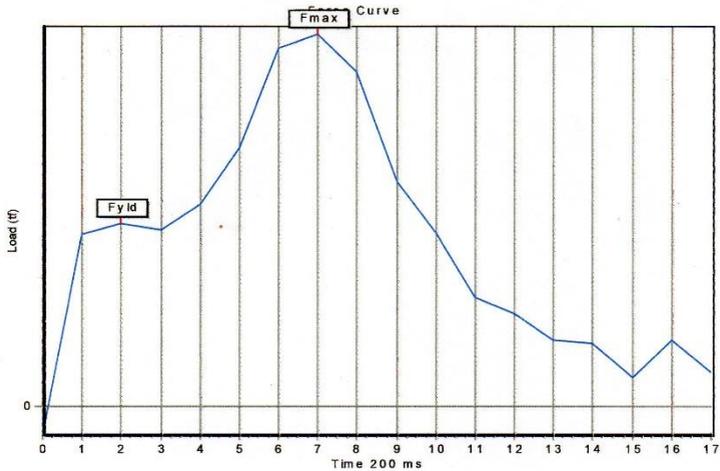


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SB2 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 51.4 X 49.55  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2546.87  
OPERATOR : mantri  
TIME : 14:02



Fmax (tf)	: 2.38	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.93
Fyield (tf)	: 1.17	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.46
Ratio	: 2.03	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

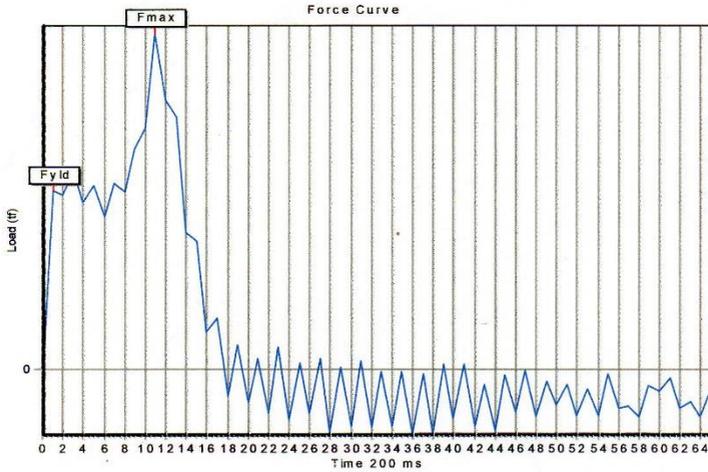


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SB3 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 49.37 X 50.48  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2492.2  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:32



Fmax (tf)	: 1.91	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.77
Fyfield (tf)	: 1.01	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.41
Ratio	: 1.88	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

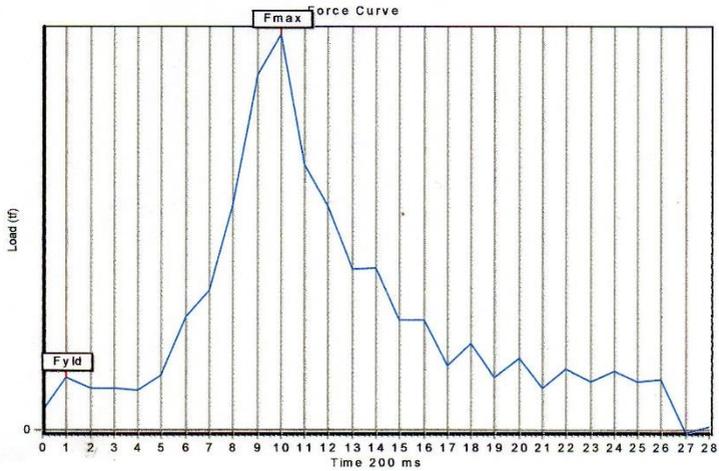


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SB3 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 50.95 X 50.48  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2571.96  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:51



Fmax (tf)	: 4.91	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.91
Fyld (tf)	: 0.66	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.26
Ratio	: 7.48	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

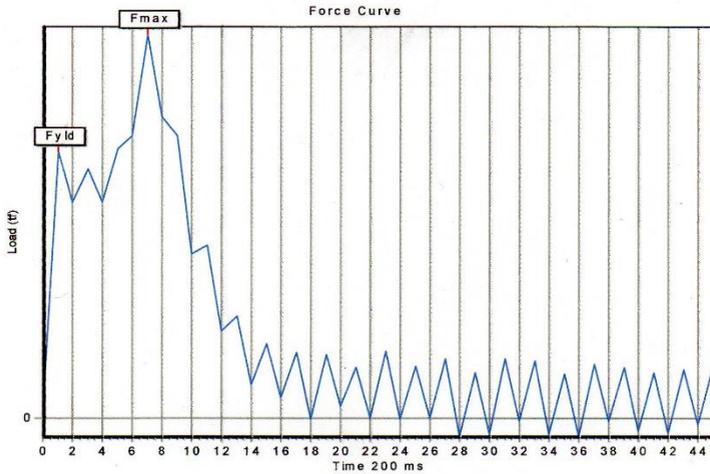


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SW1 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 51.7 X 50.31  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2601.03  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:42



Fmax (tf)	: 2.00	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.77
Fyield (tf)	: 1.39	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.53
Ratio	: 1.44	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

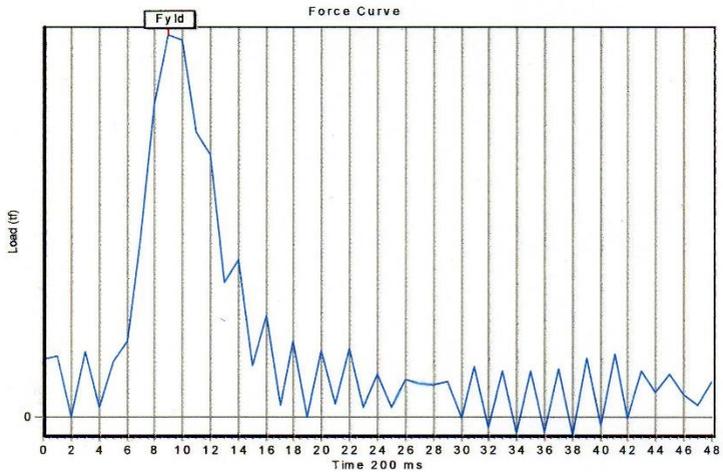


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SW1 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 49.4 X 50.77  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2508.04  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:48



Fmax (tf)	: 1.81	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.72
Fyield (tf)	: 1.81	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.72
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

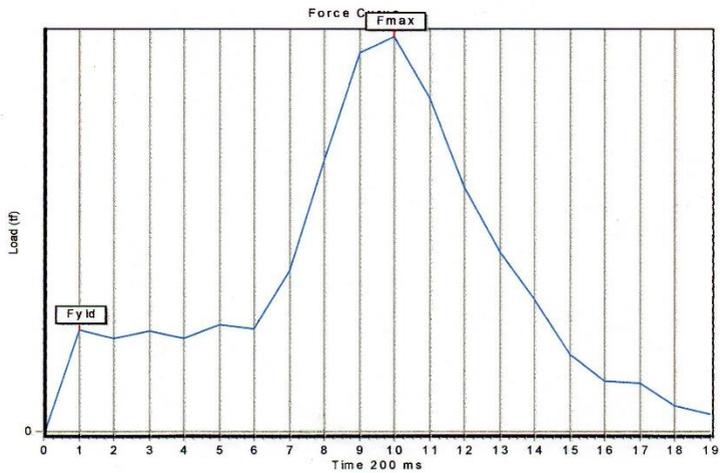


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SW2 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 52.54 X 51.18  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2689  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:44



Fmax (tf)	: 3.22	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.20
Fyield (tf)	: 0.82	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.30
Ratio	: 3.92	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

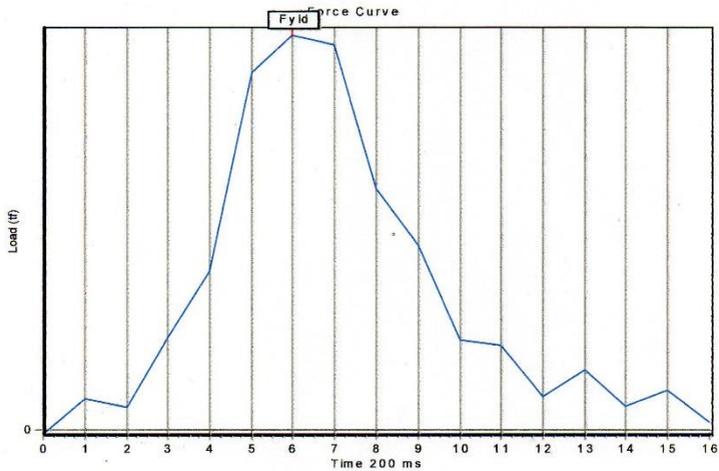


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SW2 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 50.72 X 49.6  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2515.71  
OPERATOR : mantri  
TIME : 14:04



Fmax (tf)	: 3.68	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.46
Fyield (tf)	: 3.68	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.44
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## TENSION TEST REPORT

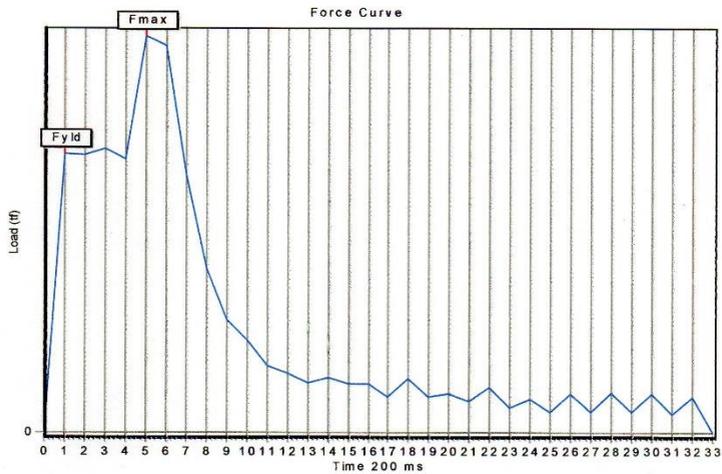


### LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SW3 1/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 50.57 X 50.94  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2576.04  
OPERATOR : mantri  
TIME : 13:45



$F_{max}$ (tf)	: 6.04	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 2.34
$F_{yld}$ (tf)	: 4.25	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.65
Ratio	: 1.42	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

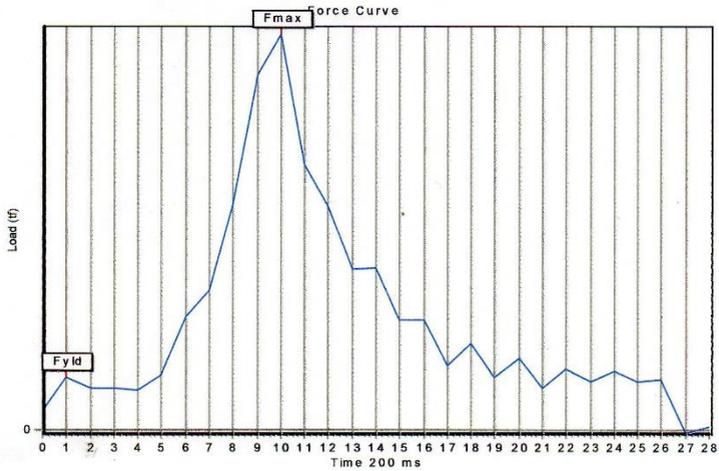


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER  
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017  
SAMPLE NUMBER : SW3 2/2  
SPESIFICATION : SNI  
SAMPLE TYPE : SQUARE  
CUSTOMER : TIO

SIZE (mm) : 49.4 X 50.77  
AREA (mm<sup>2</sup>) : 2508.04  
OPERATOR : mantri  
TIME : 14:06



Fmax (tf)	: 4.91	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 1.95
Fyld (tf)	: 0.66	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	: 0.26
Ratio	: 7.48	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

## Lampiran 3

### Lembar Hasil Pengujian Konduktivitas Panas

SPESIMEN		SM1							
NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3(° C)	T4(° C)	T5(° C)	T6(° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	104,5	102,8	94,2	72,6	38,3	37,4	1,4	210
3	100	104,1	102,4	93,7	72,2	37,8	36,7	1,4	210

#### HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,335	1,7	21,6	0,001256	0,1	0,01
-2,375	1,7	21,5	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C)	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	376,65	410,67	8,77	3,23	2,876556
3	100	376,25	410,63	8,77	3,25	2,88965407

SPESIMEN		SM2							
NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3(° C)	T4(° C)	T5(° C)	T6(° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	102,3	100,5	80,3	62,7	35,8	35	1,4	210
3	100	102,6	100,8	80,6	62,9	36	35,2	1,4	210

#### HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,56	1,8	17,6	0,001256	0,1	0,01
-2,53	1,8	17,7	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C)	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	374,40	410,44	9,28	4,20	3,735937
3	100	374,70	410,47	9,28	4,17	3,715101356

**SPESIMEN SM3**

NO	Thermostat	T1 (° C )	T2 (° C )	T3(° C )	T4(° C )	T5(° C )	T6(° C )	A	V
	Setting (° C )								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	101,6	100,1	85,4	76,1	36,9	35,9	1,4	210
3	100	101,7	100,2	85,5	76,2	37	36	1,4	210

**HASIL PERHITUNGAN**

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,615	1,5	9,3	0,001256	0,1	0,01
-2,605	1,5	9,3	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C )	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	373,85	410,39	7,73	6,62	5,891010
3	100	373,95	410,40	7,73	6,62	5,891154032

**SPESIMEN SB1**

NO	Thermostat	T1 (° C )	T2 (° C )	T3(° C )	T4(° C )	T5(° C )	T6(° C )	A	V
	Setting (° C )								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	96,7	95,5	76,4	62,6	33,4	32,6	1,4	210
3	100	97	95,7	76,7	62,9	33,6	32,9	1,4	210

**HASIL PERHITUNGAN**

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-3,09	1,2	13,8	0,001256	0,1	0,01
-3,065	1,3	13,8	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C )	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	369,10	409,91	6,18	3,56	3,172347
3	100	369,35	409,94	6,69	3,86	3,436918804

SPESIMEN		SB2							
NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	T4 (° C)	T5 (° C)	T6 (° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	97,7	96,2	79,5	68,2	35,3	34,4	1,4	210
3	100	97,7	96,2	79,6	68,3	35,3	34,4	1,4	210

### HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-3,005	1,5	11,3	0,001256	0,1	0,01
-3,005	1,5	11,3	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C)	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	369,95	410,00	7,72	5,44	4,843746
3	100	369,95	410,00	7,72	5,44	4,843746239

SPESIMEN		SB3							
NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	T4 (° C)	T5 (° C)	T6 (° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	99,3	97,5	75,2	65,6	37	36,1	1,4	210
3	100	100,6	98,9	76,4	66,7	37,4	36,5	1,4	210

### HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,86	1,8	9,6	0,001256	0,1	0,01
-2,725	1,7	9,7	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C)	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	371,40	410,14	9,27	7,69	6,844211
3	100	372,75	410,28	8,76	7,19	6,399444072

**SPESIMEN SW1**

NO	Thermostat	T1 (° C )	T2 (° C )	T3(° C )	T4(° C )	T5(° C )	T6(° C )	A	V
	Setting (° C )								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	100,7	99,3	82,5	69,7	32,8	31,9	1,4	210
3	100	100,9	99,5	82,9	70	33,2	32,4	1,4	210

**HASIL PERHITUNGAN**

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,7	1,4	12,8	0,001256	0,1	0,01
-2,68	1,4	12,9	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C )	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	373,00	410,30	7,21	4,49	3,994014
3	100	373,20	410,32	7,22	4,45	3,963245891

**SPESIMEN SW2**

NO	Thermostat	T1 (° C )	T2 (° C )	T3(° C )	T4(° C )	T5(° C )	T6(° C )	A	V
	Setting (° C )								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	103,3	102,2	80,5	73,3	33	31,9	1,4	210
3	100	103,2	102,1	80,4	73,3	32,9	31,8	1,4	210

**HASIL PERHITUNGAN**

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,425	1,1	7,2	0,001256	0,1	0,01
-2,435	1,1	7,1	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C )	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	375,75	410,58	5,67	6,27	5,582680
3	100	375,65	410,57	5,67	6,36	5,661170915

**SPESIMEN SW3**

NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	T4 (° C)	T5 (° C)	T6 (° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	99	96,8	83,6	74,2	43,1	41,7	1,4	210
3	100	98,8	96,7	83,5	74,2	43,2	41,8	1,4	210

**HASIL PERHITUNGAN**

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,91	2,2	9,4	0,001256	0,1	0,01
-2,925	2,1	9,3	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermostat (° C)	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	370,90	410,09	11,33	9,60	8,542087
3	100	370,75	410,08	10,82	9,26	8,241184677



## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Tio Agathama Putra, dilahirkan dari keluarga sederhana di Surabaya, 1 Agustus 1994, merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Ir. Tulus Wiyono, S.T dan Ibu Susanti. Yang beralamat di Perumahan Gunungsari Indah blok FF / 33 Desa Kedurus, Kecamatan Karang Pilang, Kota Surabaya. Pendidikan formal pertama adalah SDN Kedurus 1, SMPN 34 Surabaya, dan SMAN 13 Surabaya. Pada tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan D-3 Teknik Mesin Produksi Kerjasama ITS-DISNAKERTRANSDUK Prov. Jawa Timur. Setelah lulus D3 Teknik Mesin pada tahun 2015, penulis melanjutkan di S-1 Teknik Mesin FTI-ITS. Pada akhir semester, penulis menyelesaikan tugas akhir yang berhubungan dengan bidang studi metalurgi.