

PENGEMBANGAN DAN KARAKTERISASI MATERIAL KERAMIK UNTUK DINDING BATA TAHAN API TUNGKU HOFFMAN K1

Athanasius P Bayuseno

Magister Teknik Mesin, Program Pascasarjana Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto SH, Kampus Tembalang, Semarang

E-mail : abayuseno@yahoo.com

Abstrak

Keramik alumina komposit banyak diterapkan sebagai bahan tahan api tungku pemanas. Disamping itu tungku Hoffman K1 yang dimiliki laboratorium metalurgi fisik selama ini mengalami kerusakan. Penelitian ini bertujuan untuk membuat dan mengetahui ketahanankejut termal bata tahan api untuk tungku Hoffmann K1 dengan menggunakan uji karakterisasi, yang meliputi: pengujian densitas dan porositas, mikrografi serta pengujian kekuatan lentur (*three point bending test*). Komposisi sampel keramik refraktori terdiri dari Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 dan SiO_2 ; selanjutnya sampel disinter pada suhu $1200\text{ }^{\circ}C$ dengan penahanan waktu selama 2 jam. Penelitiankejut termal menggunakan variasi beda suhu $300\text{ }^{\circ}C$, $400\text{ }^{\circ}C$, $500\text{ }^{\circ}C$. Dari uji karakterisasi material menunjukkan hasil bahwa semakin tinggi beda suhu kejutan termal maka nilai kekuatan lentur dan porositas semakin rendah. Hal ini ditunjukkan oleh hasil pengukuran pada beda suhu $300\text{ }^{\circ}C$, nilai porositas: 8.26 % dan nilai MOR: 6,59 MPa; pada beda suhu $400\text{ }^{\circ}C$, nilai porositas: 6.91% dan nilai MOR: 4,27 MPa; pada beda suhu $500\text{ }^{\circ}C$, nilai porositas: 4.73%, dan nilai MOR 2,54 MPa.

Kata kunci: Alumina komposit; Ketahanankejut; refraktori

1. PENDAHULUAN

Keramik refraktori merupakan bahan padat anorganik bukan logam yang sukar meleleh pada suhu tinggi dan banyak digunakan didalam industri temperatur tinggi sebagai material dinding batu tahan api. Refraktori biasanya digolongkan berdasarkan sifat kimianya yaitu asam, basa, netral maupun super refraktori, yang mencakup bahan-bahan yang dapat digunakan untuk menahan pengaruh perubahan termal, kimia dan fisika yang berlangsung didalam tanur. Refraktori mencakup bahan-bahan yang digunakan untuk menahan pengaruh suhu tinggi (sukar leleh pada suhu tinggi). Refraktori dibuat dalam bentuk bata tahan api, seperti bata *silika*, *magnesit*, *kromit*, *refraktori silikon karbida* dan *zirkonia*, produk *alumina silikat* dan *alumina*. *Fluks* (bahan pelebur) yang diperlukan untuk mengikat partikel-partikel didalam refraktori diusahakan sedikit mungkin agar tidak terjadi vitrifikasi yang terlalu jauh. Bahan bakunya mempunyai berbagai ukuran partikel yaitu dari partikel yang kasar maupun partikel yang halus. Selama pembakaran berlangsung, partikel halus berfungsi sebagai pengikat untuk menambah kekuatan (Dore, and Hubner, 1984).

Keramik refraktori dapat ditemukan sebagai dinding batu Tungku Hoffman didalam laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin. Namun demikian beberapa bagian dinding batu tahan api tersebut telah mengalami kerusakan. Disatu sisi ketersediaan komponen tersebut sangat sulit didapat dipasaran. Permasalahan utama yang dihadapi industri Indonesia saat ini bahwa pangsa pasar produk keramik untuk laboratorium sedang mengalami kelesuhan, dilain pihak harga bahan baku keramik juga mengalami peningkatan. Untuk menghadapi persoalan kerusakan material refraktori yang sedang berlangsung maka

peneliti kelompok (KBK) bidang material Jurusan Teknik Mesin mencoba memproduksi suku cadang batu tahan api dan sebagai konsekuensi perlu melakukan penerapan teknologi pengembangan material baru untuk proses penyiapan dan pembuatan bahan baku keramik. Melihat kenyataan ini mendorong Tim Peneliti Fakultas Teknik UNDIP untuk melakukan kajian permasalahan yang ada didalam material tahan api tungku Hoffman dalam hal komposisi muatan bahan baku. Oleh karenanya penelitian ini bertujuan pada pembuatan bata tahan api yang secara teknis; (i) merupakan teknologi pengembangan material keramik tepat guna dan murah, dan (ii) dapat memaksimalkan sifat fisik dan mekanik serta termal batu tahan api. Untuk memaksimalkan karakteristik bata tahan api maka dilakukan evaluasi proses sintering, yaitu pengaruh laju pemanasan, waktu sinter, dan sifat tahanankejut termal. Karakterisasi sifat fisik dan mekanik dilakukan berturut tentang masa jenis dan porositas serta kekuatan patah bahan keramik. Struktur mikro produk keramik diamati dengan mikroskop optik. Komposisi kimia material dinding tungku diuji dengan metode x-ray fluorescence (XRF). Selanjutnya hasil penelitian ini diharapkan dapat mendorong penerapan teknologi pengembangan material keramik di masyarakat sehingga terciptanya kemandirian pembangunan industri.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Fokus utama pembahasan didalam penelitian tentang perancangan keramik untuk bata tahan api adalah sifat tahanan keramik terhadap perubahan suhu (*kejut termal*). Hal ini biasanya dilakukan dengan mengamati perubahan kekuatan patah keramik sebagai fungsi perbedaan suhu celup (*quenching*). Studi tentang tahanan termal keramik umumnya didasarkan pada

kedua pendekatan (*approach*). Pendekatan pertama menggunakan parameter tahanan retak awal- R' (*crack initiation parameter*). Dimana parameter ini menunjukkan perbedaan suhu kritis yang diijinkan agar keramik mampu bertahan akibat perubahan suhu tanpa mengalami retak dan dapat disajikan dalam persamaan berikut (Wang and Singh, 1994):

$$R' = \frac{\sigma_t \kappa (-\nu)}{\alpha E}$$

Dimana σ_t = kekuatan patah keramik; κ = konduktivitas termal; ν = Poisson's ratio; α = koefisien ekspansi termal dan E = modulus elastisitas.

Evaluasi tahanan keramik dibawah pengaruh perubahan suhu selanjutnya diperkenalkan oleh Hasselman (1963) dengan mempertimbangkan perambatan retak dan tingkat kegagalan yang dihasilkan. Perambatan retak yang dihasilkan dianalisa dengan menggunakan parameter sebagai berikut:

$$R'' = \frac{E \gamma_{eff}}{\sigma_t^2 (-\nu)}$$

Dimana γ_{eff} = energi retak permukaan.

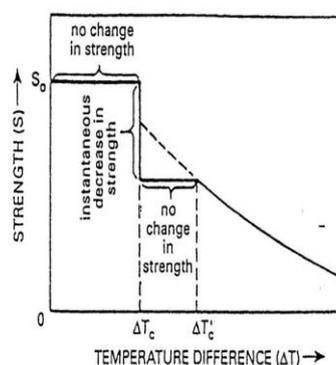
Kriteria tahanan termal keramik berdasarkan kedua pendekatan tadi menunjukkan suatu kontradiksi antara kedua pendekatan tadi. Perubahan kekuatan (σ_t) dan modulus elastisitas (E) memberikan efek yang berbeda pada tahanan keramik. Namun demikian dalam perancangan maupun pemilihan bahan keramik tahan panas memerlukan suatu kompromi karena perubahan salah satu sifat mekanis (E atau σ_t) akan mempengaruhi sifat yang lain.

Beberapa parameter yang lain juga telah diperkenalkan dengan menggunakan kedua pendekatan diatas (Wang and Singh, 1994). Parameter-parameter ini sekarang dapat digunakan dalam perancangan dan pemilihan bahan keramik untuk pemakaian suhu tinggi. Namun demikian parameter ini hanya menunjukkan unjuk kerja keramik berdasarkan kelompok bahan dan kondisi perubahan suhu tertentu.

Hasselman (1969) juga telah menyajikan suatu teori alternatif yang menggabungkan kedua pendekatan tadi dalam menyelesaikan persoalan-persoalan bahan keramik untuk pemakaian suhu tinggi. Dalam hal ini perilaku tahanan termal keramik diberikan suatu model pendekatan kekuatan patah terhadap perbedaan suhu celup (*quenching*) (Gambar 2.1).

Beberapa penelitian (Gupta, 1972; Lutz *et al.*, 1991) menunjukkan bahwa perilaku keramik terhadap perubahan suhu dipengaruhi oleh komposisi dan struktur mikronya. Gupta (1972) telah mengamati

pengaruh besar butir bahan alumina (α - Al_2O_3) terhadap perubahan perbedaan suhu celup. Kekuatan sisa (*retained strength*) alumina sampel menunjukkan kenaikan yang besar sebanding dengan peningkatan besar butir. Smith *et al.* (1972) selanjutnya menyelidiki pengaruh porositas terhadap perilaku alumina keramik dibawah pengaruh perubahan suhu. Hasilnya menunjukkan bahwa degradasi kekuatan (*strength degradation*) alumina menurun dengan peningkatan besaran porositas sehingga bahan tersebut mempunyai ketahanan termal yang baik (Ainsworth and Moore, 1969). Kirchner (1971) juga telah menegaskan bahwa tegangan tekan permukaan akan meningkatkan tahanan alumina keramik terhadap perubahan suhu.



Gambar 2. 1. Degradasi kekuatan patah alumina sebagai fungsi beda suhu celup (Hasselman, 1969)

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Bayuseno, Lattela dan O'Connor (1999) pada benda uji alumina dengan bentuk geometri balok (*bar*) menunjukkan bahwa penurunan kekuatan keramik terhadap perubahan perbedaan suhu celup sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hasselman (1969). Selain itu penelitian ini juga menegaskan bahwa tahanan termal keramik komposit kemungkinan akan menghasilkan kecenderungan yang sama, sehingga perlu dilakukan penelitian untuk informasi tambahan bagi peneliti yang terlibat pada pemilihan dan perancangan bahan keramik untuk dinding bata tahan api tungku temperatur tinggi. Mengingat prinsip-prinsip dalam penentuan dan pemilihan keramik untuk aplikasi suhu tinggi masih menghasilkan kontradiksi didalam menentukan variabel yang berpengaruh terhadap perubahan sifat mekanis. Dalam studi kasus bata tahan api tungku Hofmann K1 maka pemakaian benda uji dari material keramik produk lokal dalam penentuan kekuatan patah akan memberikan keunggulan dalam menghasilkan produk lokal (Ferber *et al.*, 1986).

3. MATERIAL DAN PROSEDUR PENGUJIAN

3.1 Material dan pembuatan sampel

Aluminium Oksida (alumina), silika, calcia, dan besi oksida dipersiapkan sebagai bahan dasar pembuatan sampel keramik, berdasarkan pengujian komposisi kimia pada bata tahan api dari tungku Hofmann K1. Adapun langkah-langkah yang dilakukan pada pembuatan sampel ini adalah sebagai berikut :

- *Tahap Persiapan*

Pada tahap persiapan ini bahan-bahan dasar dari keramik berupa serbuk aluminium oksida, silika, calcia, besi oksida ditimbang sesuai komposisi yang telah direncanakan, dimana perbandingan campuran berdasarkan pada berat bahan baku.

- *Proses pencampuran (mixing)*

Bahan baku aluminium oksida (alumina) silika, calcia, besi oksida yang telah ditimbang dicampur. Kemudian dilakukan proses homogenisasi dengan menggunakan mixer selama sekitar 2 jam, dengan penambahan air sebagai bahan pengikat sewaktu pencetakan. Adanya tambahan air ini mengakibatkan campuran berbentuk menjadi lumpur (*sharries*) yang homogen. Campuran lumpur (*milled sharries*) ini kemudian dikeringkan sampai mengandung kadar air sekitar 10 % sampai 15 % dengan dijemur.

- *Proses Pressing*

Pada tahap ini bahan baku dengan kadar air $\pm 15\%$ (*wet powder*) dimasukkan ke dalam cetakan dengan berat yang sama untuk masing-masing sampel yaitu 110 gram. Kemudian bahan baku ditekan sampai dengan 100 kN dengan menggunakan teknik pengepresan *uniaxial pressing*. Hasil dari pengepresan berupa batangan keramik mentah (*green body*). Ada 3 macam variasi sampel dimana untuk setiap variasi terdiri dari 3 buah *green body*, maka pada proses pencetakan ini dibuat batangan keramik mentah sejumlah 9 buah.

- *Proses sinter (sintering)*

Green body hasil dari pengepresan kemudian disinter pada suhu 1200°C dengan lama waktu penahanan 2 jam. Proses sintering ini dilakukan dalam tungku pemanas Hofmann K-1.

3.2 Pengujian komposisi kimia dan struktur mikro

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar unsur-unsur kimia yang terkandung di dalam refraktori tungku *Hofmann K1*. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Geologi di Departemen Energi Dan Sumber Daya Mineral Badan Geologi Pusat Survei Geologi Bandung. Selain itu pengujian mikrofografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro dari suatu material uji, karena sifat fisik atau mekanik dari suatu material tergantung dari struktur mikronya. Untuk pengujian mikrofografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang dengan menggunakan mikroskop merek Olympus U-MSSP4.

3.3 Pengujian massa jenis dan porositas

Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui *bulk density* dan *apparent porosity* dari sampel keramik. Pengujian ini berdasarkan metode ASTM C20-749 (*Standart Test Methods for Apparent Porosity and Bulk Density of Burned Refractory Brick by Boiling Water*) (Anonimous, 1978; Australian Standard 1774.5, 1989). Menentukan *exterior volume*, V (cm³), dengan persamaan:

$$V = M_s - S$$

Dimana:

M_s = *saturated mass* (gram);

S = *suspended mass* (gram)

Menentukan *apparent porosity*, P (%)

Apparent porosity adalah hubungan antara volume dari *open pores* dengan *exterior volume* dari spesimen.

$$P = \left(\frac{M_s - D}{V} \right) \times 100\%$$

Dimana :

M_s = *saturated mass* (gram)

D = *dry mass* (gram);

V = *exterior volume* (cm³)

- Menentukan masa jenis [*bulk density*, B (gram/cm³)]. *Bulk density* adalah hasil bagi dari *dry mass* dengan *exterior volume*, termasuk pore yang ada dalam body keramik.

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

3.4 Pengujian kekuatan patah dan kejutan termal

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan *Modulus of Rupture* atau kekuatan patah dari sampel keramik. Metode yang digunakan dalam pengujian ini adalah *three point bending method*. *Bending test* adalah salah satu pengujian yang dipakai untuk bahan yang getas dan keras seperti keramik, untuk mengetahui sifat-sifat mekanik dari benda uji tersebut. Pengujian ini dipilih karena bentuk batang uji sederhana sehingga mudah membuatnya dengan pengujian tarik. Standard pengujian mengacu pada standart uji ASTM C 268 – 70 (*Standard Test Method for Modulus of Rupture of Castable Refractories*). [Anonimous, 1978]

Selanjutnya pengujian pengaruh kejutan termal (*thermal shock*) dilakukan dengan mengukur perubahan kekuatan patah keramik perubahan suhu celup (*quenching*). Pada saat material keramik mengalami situasi dimana perubahan temperatur yang cepat (kejutan termal), maka akan timbul tegangan yang cukup besar. Ketahanan terhadap kerusakan (perpatahan) dibawah kondisi seperti ini disebut sebagai ketahanan terhadap beban kejutan termal (*thermal shock resistance*). Metode yang digunakan adalah metode pendinginan cepat yaitu dengan melakukan pendinginan secara cepat dengan media air terhadap benda uji yang tidak mengalami pemanasan.

Kekuatan benda uji yang telah dicelup di ukur untuk menentukan beda suhu kritis (ΔT_c).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemeriksaan komposisi kimia

Hasil pengujian komposisi kimia dari material refraktori yang dilakukan dilaboratorium Pusat Survei Geologi (PSG) di Bandung, dapat dilihat dalam tabel 4.1. Dari data hasil analisa kimia pada refraktori, hanya diambil 4 unsur yang paling dominan dalam pembuatan batu tahan api yaitu Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 dan CaO .

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi kimia material refraktori

No	Unsur	(wt.%)
1	SiO_2	1.15
2	Al_2O_3	92.74
3	Fe_2O_3	0.873
4	CaO	4.32
5	MgO	0.152
6	Na_2O	0.418
7	K_2O	0.0148
8	TiO_2	0.0055
9	MnO	0.0119
10	P_2O_5	0.0153
11	SO_3	0.112
12	ZnO	0.0029
13	NiO	0.0102
14	ZrO_2	0.0367
15	Cs_2O	0.0166
16	CuO	0.0018
17	SrO	0.0017
18	V_2O_5	0.0015
19	Cr_2O_3	0.0746
20	Cl	0.0243
21	Ga_2O_3	0.0127
22	MoO_3	0.0073

Kandungan (alumina) Al_2O_3 ternyata sangat besar yaitu sekitar 92.74%, kandungan calcia (calcium oksida) sebesar 4.32%, kandungan silika (SiO_2) 1.15%, kandungan besi (Fe_2O_3) 0.873%.

Pengaruh dari unsur silika didalam material refraktori ini adalah untuk mengurangi penyusutan badan keramik baik penyusutan kering maupun

penyusutan bakarnya pada saat dilakukan proses sintering. Silika juga berpengaruh mengurangi kekuatan dari badan keramik, kecuali dalam bentuk butir-butir yang sangat halus, kadang dapat bertindak sebagai bahan pelebur. Sedangkan silika dalam ukuran partikel yang besar akan menambah sifat tahan api dari keramik (mempertinggi suhu lebur) karena SiO_2 mempunyai titik lebur 1715 °C. Kandungan Al_2O_3 dalam material refraktori ini adalah 92,74%. Ini menunjukkan bahwa material alumina yang digunakan merupakan senyawa alumina tinggi. Kandungan alumina dalam suatu bahan baku keramik sangat berpengaruh terhadap suhu lebur, semakin tinggi kadar alumina, maka akan semakin tinggi suhu leburnya sehingga dengan semakin besarnya kandungan kadar alumina, akan menambah sifat tahan apinya. Semakin tinggi kadar alumina maka semakin tinggi pula suhu sinteringnya sedangkan kandungan magnesia sebesar 0.152% diharapkan dapat menambah sifat tahan api (kerefraktorian) dari material tersebut. Ini merupakan hal yang menguntungkan bagi keramik khususnya keramik bata tahan api, karena bata tahan api akan tetap stabil untuk dipakai pada temperatur yang sangat tinggi.

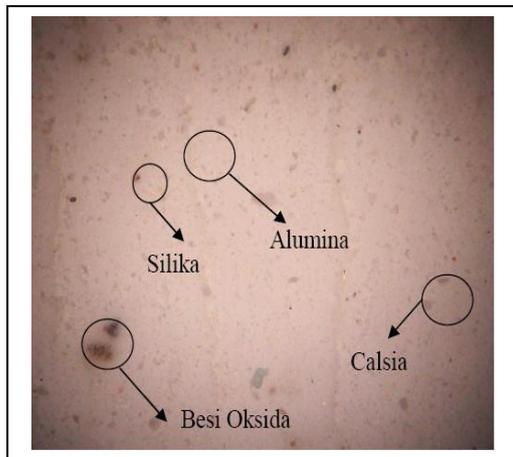
Kandungan dari besi Oksida (Fe_2O_3) dalam material refraktori akan mempengaruhi warna dari badan keramik setelah sintering. Biasanya warna yang dihasilkan setelah proses sintering adalah merah. Untuk berbagai jenis keramik khususnya keramik putih dan porselen, pengaruh warna ini tidak dikehendaki. Dengan kandungan Besi Oksida 0.873 % ini sangat kecil tapi pada batu tahan api pengaruh ini kurang begitu berarti. Kandungan senyawa CaO merupakan oksida refraktori yang berfungsi untuk meningkatkan suhu sintering. Maka pengaruh dari penambahan CaO diharapkan dapat meningkatkan suhu sintering sehingga bata tahan api dibuat mampu menahan suhu yang lebih tinggi.

4.2 Pengujian struktur mikro

Pada pengujian mikrografi spesimen tidak perlu dipolish dan dietsa cukup di amplas kemudian difoto mikro dengan menggunakan mikroskop Olympus yang dilengkapi dengan kamera perbesaran 100 kali dan 200 kali. Adapun spesimen yang difoto mikro adalah sampel yang telah di sinter pada suhu 1200 °C yang sudah di termal shock dengan beda suhu yaitu 300 °C, 400 °C dan 500 °C dengan penahanan masing-masing selama 1 jam. Gambar 4.1 dibawah menunjukkan foto struktur mikro dari spesimen pengujian mikrografi dengan suhu sinter 300 °C perbesaran 100x.

Dari gambar foto mikro spesimen refraktori secara umum memperlihatkan struktur yang berwarna terang yang mendominasi adalah senyawa alumina, sedangkan struktur yang berwarna putih dan berbentuk seperti akar tidak beraturan merupakan calcia. Sedangkan gumpalan-gumpalan yang berwarna kuning adalah silika, sedangkan berwarna hitam tersebar tidak merata dapat dimungkinkan sebagai besi oksida. Disamping itu foto mikro material refraktori terlihat

bahwa batu tahan api mempunyai batas butir yang sangat jelas dan letaknya tak beraturan.



Gambar 4.1 foto struktur mikro sampel dengan suhu sintering 300 °C (100x).

4.3 Pengujian densitas dan porositas

Dengan prosedur perhitungan berdasarkan rumus diatas, dapat diperoleh harga densitas untuk sampel material keramik refraktori tungku *Hofmann* ditunjukkan tabel 4.2 dibawah ini. Pada suhu sinter 500 °C memiliki nilai masa jenis yang paling tinggi yaitu sebesar 3.05 gram/cm³ sedangkan untuk beda suhu 400 °C memiliki nilai densitas sebesar 3.02 gram/cm³ dan untuk beda suhu 300 °C memiliki nilai densitas yang paling rendah yaitu 2.97 gram/cm³.

Tabel 4.2 hasil perhitungan densitas untuk beda suhu sintering 1200 °C

No	Dry mass (D) (gram)	Saturated Mass (Ms) (gram)	Suspended Mass (Sm) (gram)	Exterior volume (Ms-Sm) (cm ³)	Density D/V (gram / cm ³)	Rata-rata densitas (gram / cm ³)
1	4.04	4.11	2.78	1.33	3.04	
2	4.13	4.19	2.83	1.36	3.04	3.05
3	4.08	4.14	2.81	1.33	3.07	

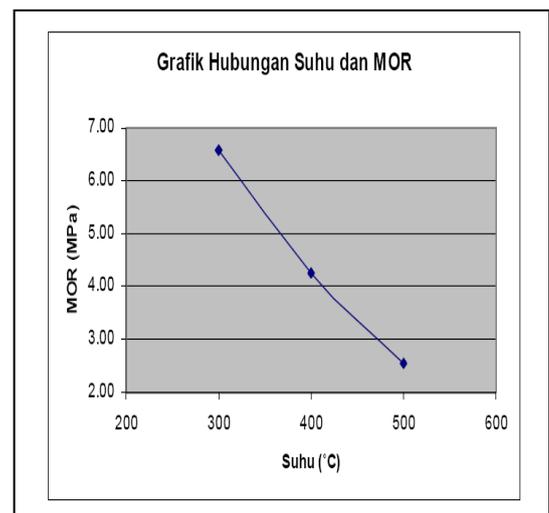
Hasil pengujian porositas dapat ditampilkan dalam tabel 4.3. Dengan menggunakan rumus yang disajikan diatas maka dapat diperoleh harga porositas untuk sampel material keramik refraktori tungku *Hofmann*. Dari pengamatan bahwa semakin tinggi suhu sinter akan menghasilkan penurunan harga porositas.

Tabel 4.3 Hasil pengukuran porositas untuk benda uji yang disinter pada 1200 °C

No	Dry mass (D) (gram)	Saturated Mass (Ms) (gram)	Exterior volume (Ms-Sm) (cm ³)	Exterior volume (Ms-Sm) (cm ³)	Porosity $\frac{Ms-D}{V} \times 100\%$ (%)	Rata-rata porositas (%)
1	4.69	4.81	3.25	1.56	7.69	
2	4.62	4.76	3.16	1.60	8.75	8.26
3	4.71	4.84	3.28	1.56	8.33	

4.4 Pengujian kejutan termal

Hasil pengujian kejutan termal dengan ukuran benda uji sebagai berikut: $F = 9.87 \text{ N}$; $L = 50.74 \text{ mm}$ b (lebar) = 5.65 mm d (tebal) = 4.57 mm dan dengan metode three point bending test. Data pengujian kekuatan patah atau MOR (*modulus of rupture*) sebagai fungsi beda suhu celup dapat disajikan dalam gambar 4.2.



Gambar 4.2

Grafik MOR sebagai fungsi beda suhu celup

Dari grafik terlihat bahwa pengaruh kejutan termal akan mengakibatkan menurunnya *Modulus of Rupture*. Setiap beda suhu kejut termal dinaikkan 100 °C *Modulus of Rupture* mengalami penurunan sebesar 37,5%. Penurunan MOR ini terjadi karena kebanyakan keramik memiliki koefisien termal dan modulus elastisitas yang tinggi sehingga mengakibatkan tegangan termal dimana tegangan ini mengakibatkan terjadinya retakan. Adanya cacat retakan akan merambat dengan cepat dibawah pengaruh kejutan termal dan pada beda suhu yang tinggi dapat mengakibatkan perpatahan.

5. KESIMPULAN

Dari pengamatan dan kaitan analisa yang dilakukan terhadap data-data penelitian, maka dapat diambil kesimpulan :

- Kandungan alumina sebesar 92,74% merupakan material keramik yang digunakan dalam batu tahan api (*refractory*) tungku hoffman merupakan batu tahan api dengan senyawa alumina tinggi.
- Struktur mikro pada sampel batu tahan api mempunyai batas butir yang sangat jelas dan letaknya yang tersebar tak beraturan. Dan pada beda suhu 500 °C terlihat retakan karena pengaruh kejut termal.
- Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap beda suhu kejut termal dinaikkan 100 °C nilai densitas naik 1% sedangkan nilai *Modulus of Rupture* turun 37,5%.

DAFTAR PUSTAKA

- Ainsworth, J.H. and Moore, R.E. (1969). *Fracture Behaviour of Thermally Shocked Alumina Oxide*. Journal of the American Ceramic Society, **52**, 628-629.
- Anonimous, (1978). *Annual Books of ASTM Standards Glass, Ceramic, Whiteware, Porcelain, Enamel*.
- Australian Standard 1774.5 (1989). *Refractories and Refractory Materials-Physical Test Methods. Method 5: The Determination of Density, Porosity and Water Adsorption* p 1-4. Standard Australia, Sydney.
- Bayuseno, A.P., Latella, B.A and O'Connor, B.H. (1999). *Resistance of Alumina and Spodumene-Alumina Ceramics to Thermal Shock*. Journal of the American Ceramic Society, **82**, 819-824.
- Dore, E and Hubner, H, (1984). *Alumina: Processing, Properties and application*. Springer – Verlag, New york.
- Ferber, M.K., Tennery, V.J., Waters, S.B. and Ogle, J. (1986). *Fracture strength characterisation of tubular ceramic materials using a simple c-ring geometry*. Journal of Materials Science, **21**, 2628-2632.
- Gupta, T.K. (1972). *Strength Degradation and Crack Propagation in Thermally Shocked Al₂O₃*. Journal of the American Ceramic Society, **55**, 249-253.
- Hasselmann, D.P.H. (1969). *Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics*. Journal of the American Ceramic Society, **52**, 600-604.
- Hasselmann, D.P.H. (1970). *Strength Behaviour of Polycrystalline Alumina Subjected to Thermal Shock*. Journal of the American Ceramic Society, **53**, 490-495.
- Kirchner, H.P., Gruver, R.M. and Walker, R.E. (1968). *Strengthening Alumina by Glazing and Quenching*. American Ceramic Society Bulletin, **47**, 798-802.
- Lutz, E.H., Swain, M.V. and Claussen, N. (1991). *Thermal Shock Behaviour of Duplex Ceramics*. Journal of the American Ceramic Society, **74**, 19-24.
- Smith, R.D., Anderson, H.U. and Moore, R.E. (1976). *Influence of Induced Porosity on Thermal Shock Characteristics of Al₂O₃*. American Ceramic Society Bulletin, **55**, 979-982.
- Wang, H. and Singh, R.N. (1994). *Thermal Shock Behaviour of Ceramics and Ceramics Composites*. International Materials Reviews, 39, 228-244.