

**SKRIPSI**

**STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL  
PADA KERAMIK ZIRCONIA BERPORI YANG DIBUAT DENGAN PFA (*PORE-  
FORMING AGENT*) TEPUNG BERAS**



**Disusun oleh:**

**Adrianus Prabowo Guritno**

**14/363216/TK/41398**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA  
2018**

## PENGESAHAN

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
guna memperoleh gelar **SARJANA**  
di Program Studi Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada  
Yogyakarta

Disusun Oleh :

Nama : Adrianus Prabowo Guritno

NIM :14/363216/TK/41398

Disetujui untuk diuji,

Dosen Pembimbing Skripsi

$\frac{29}{4}$  18  
— Waziz Wildan

Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

NIP. 196805121994031003

### PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Adrianus Prabowo Guritno  
NIM : 14/363216/TK/41398  
Tahun terdaftar : 2014  
Program Studi : Teknik Mesin  
Fakultas/Sekolah : Teknik

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Tugas Akhir ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/ lembaga lain, kecuali secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Tugas Akhir di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 29 November 2018



Adrianus Prabowo Guritno  
14/363216/TK/41398



UNIVERSITAS GADJAH MADA

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN DAN PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI

NASKAH SOAL

Nama Mahasiswa : Adrianus Prabowo Guritno  
Nomor Mahasiswa : 14/363216/TK/41398  
Program Studi : Teknik Mesin  
Modal : Teknologi Bahan  
Nomor Soal : TKM 4402 / I-2018/2019 / MWW / 23 / 03 / 11.08 / 2018  
Judul : Studi Porositas, Kekuatan Tekan dan Konduktivitas Termal pada Keramik Zirconia Berpori yang Dibuat dengan PFA (Pore-Forming Agent) Tepung Beras

Yogyakarta, 11 Agustus 2018  
Dosen Pembimbing Skripsi

Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 196805121994031003

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Karya tulis ini ku persembahkan untuk : Tuhan yang Maha Esa

Bapak, Mama, Kakak dan Saudara-saudara seperjuangan

Dan kepada semua yang mendapat manfaat dari karya ini.

Semoga kasih dan amal baik kita diterima oleh Tuhan yang Maha

Kuasa

AMIN.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Studi porositas, kekuatan tekan dan konduktivitas termal pada keramik Zirconia berpori yang dibuat dengan PFA (*Pore-Forming Agent*) Tepung beras ”** dengan baik dan lancar.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat bagi penulis untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (Strata-1) di Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

Dengan segenap kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang mendalam kepada :

1. Tuhan Yesus Kristus yang selalu mengasihi, melindungi dan menunjukkan jalan kepada saya sehingga karya ini pun dapat terselesaikan. Segala puji syukur ku panjatkan kepada-Mu.
2. Keluarga tercinta, kedua orangtua dan kakak
3. Prof. Mochammad Noer Ilman, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
4. Dr. Kusmono, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin (S1), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
5. Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph. D. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah dengan kasih dan kesabaran membimbing dan menuntun saya sehingga saya mendapatkan pelajaran tidak hanya dalam bidang akademik tetapi juga nasihat-nasihat yang akan saya bawa.
6. Dosen Program Studi Teknik Mesin (S1), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas ilmu yang diberikan.
7. Seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan bantuan selama masa studi.
8. Pak Aji, pak Yanto, mas Didiq dan seluruh mahasiswa/i pascasarjana di

Laboratorium Material Teknik atas segala masukan dan bantuan selama penelitian.

9. Rekan-rekan angkatan 2014 Teknik Mesin atas segala waktu dan perjuangan yang telah kita lewati selama masa studi di kampus yang tidak akan terupakan. M Forever!
10. Seluruh rekan, senior dan berbagai pihak yang telah membantu penulis secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini memiliki banyak kekurangan maupun kesalahan. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk kebaikan penulis di masa mendatang. Apabila terdapat kesalahan dalam penulisannya, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Semoga skripsi ini dapat memberikan sumbangan ilmu yang berguna bagi kita semua, khususnya dalam dunia ilmu pengetahuan dan keteknikan.

Yogyakarta, 29 November 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>PENGESAHAN</b>	i
<b>PERNYATAAN</b>	ii
<b>NASKAH SOAL</b>	iii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	iv
<b>KATA PENGANTAR</b>	v
<b>DAFTAR ISI</b>	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	ix
<b>DAFTAR TABEL</b>	xi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	xii
<b>DAFTAR NOTASI</b>	xiv
<b>INTISARI</b>	xvi
<b>ABSTRACT</b>	xvii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	5
<b>BAB III LANDASAN TEORI</b>	10
3.1. Keramik	10
3.2. Zirconia (ZrO <sub>2</sub> )	12
3.3. <i>Porous Ceramics</i>	14
3.4. Metode <i>Uniaxial Pressing</i>	16
3.5. Konduktivitas Termal ( <i>Thermal Conductivity</i> )	17
3.6. Pengujian Tekan	19

<b>BAB IV METODOLOGI PENELITIAN</b>	20
4.1 Diagram Alir Penelitian	20
4.2 Tempat Penelitian	21
4.3 Bahan Penelitian	21
4.4 Alat Penelitian	21
4.5 Proses Pengukuran Diameter Serbuk Tepung Beras	22
4.6 Prosedur penelitian	23
4.7 Pengujian	24
4.7.1 Pengujian Densitas	24
4.7.2 Pengujian Porositas	25
4.7.3 Pengujian Tekan	26
4.7.4 Pengamatan Struktur Mikro	27
4.7.5 Susut Bakar	28
4.7.6 Pengujian Konduktivitas Termal	29
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	31
5.1 Pengujian Densitas dan Porositas pada variasi komposisi campuran	31
5.1.1 Distribusi Ukuran Serbuk Tepung Beras ( <i>Rice Flour</i> )	31
5.1.2 Perhitungan Konversi Fraksi Volume Zirconia dan Tepung Beras pada <i>Green Body</i>	32
5.1.3 Uji Densitas dan Porositas pada Variasi Komposisi	35
5.2 Pengujian Penyusutan Volume	39
5.3 Pengujian Penyusutan Massa	41
5.4 Pengujian Tekan	43
5.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro	44
5.6 Hasil Uji <i>Thermal Conductivity</i>	52
<b>BAB VI KESIMPULAN</b>	59
6.1 Kesimpulan	59
6.2 Saran	59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	61
<b>LAMPIRAN</b>	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Diagram fase zirconia-yttria	12
Gambar 3.2	Fase perubahan zirconia	13
Gambar 3.3	Skema tipe pori pada keramik	15
Gambar 3.4	<i>Uniaxial pressing single action pressing versus double action pressing</i>	17
Gambar 3.5	(a) Perambatan retak saat pengujian tarik. (b) Perambatan retak saat pengujian tekan	19
Gambar 4.1	Diagram Alir Penelitian	20
Gambar 4.2	Skema pengujian tekan	26
Gambar 4.3	Skema kerja <i>Scanning Electron Microscope</i>	28
Gambar 4.4	Skema alat uji konduktivitas termal	30
Gambar 5.1	Grafik distribusi ukuran serbuk tepung beras	32
Gambar 5.2.	Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap nilai <i>bulk density</i> spesimen pada setiap komposisi	37
Gambar 5.3.	Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap nilai densitas relatif spesimen pada setiap komposisi	38
Gambar 5.4.	Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap nilai porositas spesimen pada setiap komposisi	38
Gambar 5.5.	Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap penyusutan volume spesimen	40
Gambar 5.6.	Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap penyusutan massa & volume spesimen	42
Gambar 5.7.	Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap kekuatan tekan ( $\sigma$ ) spesimen	43
Gambar 5.8.	Citra hasil pengamatan permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan variasi fraksi (%) volume tepung beras (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40%, (f) 50%	45
Gambar 5.9.	Citra hasil pengamatan permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan variasi fraksi (%) volume tepung beras (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40%, (f) 50%	46
Gambar 5.10	Ukuran pori pada permukaan keramik berpori dengan foto citra	

	SEM dengan fraksi volume tepung beras 90 %	47
Gambar 4.3	Skema alat uji konduktivitas termal (Yunitasari, 2016)	53
Gambar 5.11	Plot gradien suhu yang terjadi pada ketiga material pada spesimen 90Zr10Tb yang telah mengalami konduksi selama 180 menit	57
Gambar 5.12	Nilai konduktivitas termal dengan variasi fraksi volume tepung beras	58

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai Pengaruh Porositas terhadap Kekuatan Tekan	9
Tabel 3.1	<i>Properties and Application of Advanced Ceramics</i>	11
Tabel 4.1	Tabel konversi fraksi volume ke fraksi berat tepung beras	23
Tabel 5.1	Data distribusi ukuran serbuk tepung beras	31
Tabel 5.2	Penamaan komposisi spesimen uji	33
Tabel 5.3	Tabel konversi fraksi volume ke fraksi berat spesimen	34
Tabel 5.4.	Hasil perhitungan <i>bulk density</i> pada tiap komposisi spesimen	36
Tabel 5.5	Hasil perhitungan densitas relatif pada tiap komposisi spesimen	36
Tabel 5.6.	Hasil perhitungan porositas pada tiap komposisi spesimen	36
Tabel 5.7	Data susut <i>volume</i> komposisi 90Zr10Tb	39
Tabel 5.8	Data susut massa komposisi 90Zr10Tb	41
Tabel 5.9.	Hasil pengambilan data spesimen 90Zr10Tb	52

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Hasil perhitungan penyusutan volume	65
Lampiran 2.	Hasil perhitungan penyusutan massa	66
Lampiran 3.	Hasil Perhitungan <i>Bulk Density</i> , Densitas Relatif dan Porositas Spesimen Uji Tekan	67
Lampiran 4.	Hasil foto SEM 0%Vt tepung beras (spesimen utuh)	68
Lampiran 5.	Hasil foto SEM 10%Vt tepung beras (spesimen tuh)	68
Lampiran 6.	Hasil foto SEM 20%Vt tepung beras (spesimen tuh)	69
Lampiran 7.	Hasil foto SEM 30%Vt tepung beras (spesimen tuh)	69
Lampiran 8.	Hasil foto SEM 40%Vt tepung beras (spesimen tuh)	70
Lampiran 9.	Hasil foto SEM 50%Vt tepung beras (spesimen tuh)	70
Lampiran 10.	Hasil foto SEM 0%Vt tepung beras (spesimen tuh)	71
Lampiran 11.	Hasil foto SEM 10%Vt tepung beras (spesimen tuh)	71
Lampiran 12.	Hasil foto SEM 20%Vt tepung beras (spesimen utuh)	72
Lampiran 13.	Hasil foto SEM 30%Vt tepung beras (spesimen utuh)	72
Lampiran 14.	Hasil foto SEM 40%Vt tepung beras (spesimen utuh)	73
Lampiran 15.	Hasil foto SEM 50%Vt tepung beras (spesimen utuh)	73
Lampiran 16.	Hasil perhitungan pengujian tekan	74
Lampiran 17.	Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 50% fraksi volume tepung beras	75
Lampiran 18.	Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 40% fraksi volume tepung beras	76
Lampiran 19.	Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 30% fraksi volume tepung beras	77
Lampiran 20.	Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 20% fraksi volume tepung beras	78
Lampiran 21.	Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 10% fraksi volume tepung beras	79
Lampiran 22.	Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 0%fraksi volume tepung beras	80
Lampiran 23.	Alat penelitian	81
Lampiran 24.	<i>Green body</i> hasil kompaksi	83

Lampiran 25. Spesimen uji konduktivitas termal hasil <i>sintering</i>	83
Lampiran 26. Spesimen uji tekan hasil <i>sintering</i> (20% ZrO <sub>2</sub> -80 %Tb)	84

## DAFTAR NOTASI

A	= Luas penampang ( $\text{m}^2$ )
F	= Beban tekan (N)
k	= Konstanta konduktivitas termal ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )
$k_{\text{cu}}$	= Konstanta konduktivitas termal dari tembaga Tta dan Ttb (381,339 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ) (Holman, 1995)
$k_s$	= Konstanta konduktivitas termal spesimen ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )
MPa	= Mega Pascal
$m_o$	= Massa spesimen sebelum <i>sintering</i> (gr)
$m_t$	= Massa spesimen setelah <i>sintering</i> (gr)
P	= Tekanan (MPa)
Sp	= Spesimen uji
t	= Tinggi/tebal (mm)
Th	= Posisi pengukuran suhu pada bagian kiri spesimen ( $^\circ\text{C}$ )
Ts	= Posisi pengukuran suhu pada bagian kanan spesimen ( $^\circ\text{C}$ )
Tta	= Suhu tembaga tambahan di sebelah kiri spesimen ( $^\circ\text{C}$ )
Ttb	= Suhu tembaga tambahan di sebelah kanan spesimen ( $^\circ\text{C}$ )
T1	= Posisi termokopel dengan jarak 5 mm dari ujung kiri ( $^\circ\text{C}$ )
T2	= Posisi termokopel dengan jarak 15 mm dari ujung kiri ( $^\circ\text{C}$ )
T3	= Posisi termokopel dengan jarak 25 mm dari ujung kiri ( $^\circ\text{C}$ )
T3a	= Suhu hasil perhitungan dari data T1 dan T2, yang menunjukkan nilai suhu pada sisi kiri tembaga Tta ( $^\circ\text{C}$ )
T4	= Posisi termokopel dengan jarak 65,5 mm dari ujung kiri ( $^\circ\text{C}$ )
T4a	= Suhu hasil perhitungan dari data T5 dan T6, yang menunjukkan Nilai suhu pada sisi kiri tembaga Ttb ( $^\circ\text{C}$ )
T5	= Posisi termokopel dengan jarak 70,5 mm dari ujung kiri ( $^\circ\text{C}$ )
T6	= Posisi termokopel dengan jarak 85,5 mm dari ujung kiri ( $^\circ\text{C}$ )
$V_o$	= Volume spesimen sebelum <i>sintering</i> ( $\text{cm}^3$ )
$V_t$	= Volume spesimen setelah <i>sintering</i> ( $\text{cm}^3$ )
$v_1$	= Fraksi volume material 1 (%)

$v_2$	= Fraksi volume material 2 (%)
$W_{udara}$	= Berat benda di udara (g)
$W_{fluida}$	= Berat benda di dalam fluida (g)
$\sigma$	= Kekuatan tekan (MPa)
$\Delta x_{cu}$	= Tebal tembaga Tta dan Ttb (0,011 m )
$\Delta x_s$	= Tebal spesimen (Sp) (m)
$\mu m$	= Mikro meter
$\rho_1$	= Massa jenis material 1 (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_2$	= Massa jenis material 2 (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{bulk}$	= <i>Bulk density</i> (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{fluida}$	= Densitas fluida (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{rel}$	= densitas relatif komposit (%)
$\rho_t$	= <i>Theoretical density</i> (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_Z$	=Densitas spesimen zirconia (gr/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{Tb}$	=Densitas spesimen tepung beras (gr/cm <sup>3</sup> )
%V <sub>Zr</sub>	=Fraksi volume spesimen zirconia (%)
%V <sub>Tb</sub>	=Fraksi volume spesimen tepung Beras (%)
%W <sub>Zr</sub>	=Fraksi berat spesimen zirconia (%)

## INTISARI

Refraktori merupakan salah satu material teknik yang memiliki kemampuan untuk bekerja pada temperatur yang relatif tinggi. Karena itu, refraktori umumnya digunakan pada operasi temperatur tinggi. Salah satu bentuk *advanced ceramics* yang digunakan sebagai refraktori adalah keramik berpori. Penelitian ini menggunakan Zirconia ( $ZrO_2$ ) sebagai bahan keramik dan tepung beras sebagai PFA (*Pore-Forming Agent*). Tujuan dari penelitian ini untuk mempelajari porositas, kekuatan tekan dan konduktivitas termal dari keramik berpori zirconia dengan PFA tepung beras

Zirconia dan tepung beras dicampurkan dengan fraksi volume tepung beras sebanyak 0, 10, 20, 30, 40 dan 50%. Pembuatan spesimen dilakukan dengan metode *uniaxial pressing double action* dengan tekanan 10 MPa dan disinter pada temperatur 1450° C dengan laju pemanasan 10 °C/menit dan ditahan 120 menit serta didinginkan secara alami sampai mencapai suhu kamar. Spesimen dibuat dalam bentuk silinder dengan 15 mm dan 30 mm. Pengujian yang dilakukan adalah pengamatan struktur mikro SEM, densitas, susut bakar massa dan *volume*, kekuatan tekan dan konduktivitas termal.

Dari hasil penelitan, disimpulkan bahwa densitas keramik berpori zirconia dengan PFA tepung beras turun dari 5,84 gr/cm<sup>3</sup> (100% zirconia) hingga 4,408 gr/cm<sup>3</sup> (50% zirconia – 50% tepung beras). Serupa dengan itu, nilai densitas relatif dan kekuatan tekan juga mengalami penurunan dari 98,99% (100% zirconia) hingga mencapai 74,71% (50% zirconia – 50% tepung beras) dan untuk nilai kekuatan tekan dari 81,01 MPa (100% zirconia) hingga mencapai 65,23 MPa (60% zirconia – 40% tepung beras). Nilai konduktivitas termal juga mengalami penurunan dari 3,67 W/m°C (100% zirconia) hingga 2,213 W/m°C (50% zirconia – 50 % tepung beras). Berbeda halnya dengan porositas yang mengalami kenaikan dari 1,0% (100% zirconia) hingga mencapai 25,28% (50% zirconia – 50% tepung beras).

Kata Kunci : Zirconia, *porous ceramics*, tepung beras, kekuatan tekan, konduktivitas termal, PFA (*Pore-Forming Agent*)

## ABSTRACT

Refractory is one of engineering materials that has the ability to work at a relatively high temperature. Therefore, the refractory is generally used in high-temperature operation. One form of advanced ceramics used as a refractory is a porous ceramic. This study uses zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ) as the ceramics and rice flour as the PFA (Pore-Forming Agent). The purpose of this research is to study the porosity, compressive strength and thermal conductivity of porous ceramic zirconia with PFA rice flour.

Zirconia and active rice flour are mixed with volume fraction 0, 10, 20, 30, 40, and 50% rice flour. The specimens was formed using uniaxial pressing double action with applied load of 10 MPa, sintered at a temperature of  $1450^\circ\text{C}$  with a heating rate of  $10^\circ\text{C} / \text{min}$  and held 120 minutes, then cooled naturally until it reached room temperature. Specimens were made in the form of a cylinder with the dimension  $\text{Ø}15\text{ mm}$  and  $\text{Ø}30\text{ mm}$ . This experiment includes observation of microstructure using stereo microscope and SEM, density, mass and volume shrinkage, compressive strength test and thermal conductivity test.

From the results of the research, it was concluded that the density of the porous ceramic zirconia with PFA rice flour decreased from  $5,84\text{ g} / \text{cm}^3$  (100% zirconia) to  $4,408\text{ g} / \text{cm}^3$  (50% zirconia - 50% of rice flour). Similarly, the value of the relative density and the compressive strength also decreased from 98,99% (100% zirconia) up to 74,71% (50% zirconia - 50% of rice flour). The value of the compressive strength of 81,01 MPa (100% zirconia ) dropped to 65,23 MPa (60% zirconia - 40% of rice flour). Thermal conductivity value also decreased from  $3,67\text{ W} / \text{m}^\circ\text{C}$  (100% zirconia) to  $2,213\text{ W} / \text{m}^\circ\text{C}$  (50% zirconia - 50% of rice flour). By contrast, the porosity increased from 1,0% (100% zirconia) up to 25,28% (50% zirconia - 50% of rice flour).

**Keywords:** Zirconia, porous ceramics, rice flour, compressive strength, thermal conductivity, PFA (Pore-Forming Agent)

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi mengalami peningkatan pesat di zaman sekarang. Kemajuan di berbagai disiplin ilmu membuktikan kemajuan peradaban kehidupan saat ini, tidak terkecuali pengembangan dalam bidang material. Bahan teknik atau *engineering materials* secara garis besar dapat dibedakan menjadi 4 kelompok, yaitu logam, polimer, keramik dan komposit. Menurut (Callister, 2007) bahan teknik dikelompokkan menjadi 6 kelompok yaitu *metal* atau logam, keramik, polimer, komposit, semikonduktor dan *biomaterials*. Pada bahan keramik, salah satu pengembangan yang menjadi perhatian adalah konstruksi *porous ceramic*.

Keramik berpori atau *porous ceramics* merupakan keramik yang mempunyai pori-pori dengan distribusi ukuran tertentu dan porositas yang relatif tinggi. Pada aplikasinya di masa kini, keramik berpori telah diproduksi untuk berbagai bidang pada industri seperti filtrasi logam cair, katalisis, isolasi temperatur tinggi (*refractory insulation*) dan filtrasi udara panas (*hot gas filtration*) (Studard dkk, 2006). Keramik dengan ukuran pori sekitar 10-800  $\mu\text{m}$  dapat digunakan sebagai filter, sedangkan keramik berpori dengan ukuran 0,1 nm dapat digunakan sebagai membran (Purbasari & Samakhi, 2005). Keramik berpori ini relatif lebih tahan terhadap perubahan suhu tinggi, korosi dan kontaminasi bahan lain, sehingga dapat digunakan sebagai media filter, antara lain air limbah, gas buang, penuangan logam cair (seperti timah) dan lainnya. Kualitas suatu produk keramik berpori sangat ditentukan oleh jenis, komposisi, ukuran partikel, dan suhu sinteringnya. Keramik dengan ukuran pori sekitar 10-800  $\mu\text{m}$  dapat digunakan sebagai filter, sedangkan keramik berpori dengan ukuran 0,1 nm dapat digunakan sebagai membran (Purbasari & Samakhi, 2005).

Keramik merupakan bahan padat anorganik yang bukan logam Menurut (Surdia & Saito, 1999). Keunggulan sifat fisis dari keramik yaitu memiliki titik lebur yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, isolator yang baik, konduktivitas

termal dan listrik yang rendah (Jacobs & Kilduff, 1985), namun di lain pihak, keramik juga mempunyai kekurangan yaitu getas dan mudah patah (Smallman & Bishop, 2002). Komponen dari bahan keramik terbuat dari bahan baku yang berbentuk butiran dan mengalami proses pencampuran (*mixing*), pengeringan, dan *sintering*. Pembuatan keramik dengan cara baru dilakukan melalui proses yang terkendali pada sifat-sifat fungsional dalam elektromagnetik, mekanik, optik, termal, biokimia dan sifat lainnya. Kekuatan dan kekerasan keramik dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk butiran serta jenis dan fasa batas butiran, temperatur pembakaran, cara pembentukan dan sejenisnya. Penambahan bahan campuran dapat memberi pengaruh yang besar terhadap kenaikan maupun penurunan kekuatannya. Bahan baku keramik seperti kaolin, kuarsa, *feldspar*, dan lempung (*clay*) serta campuran lain dapat dicampur dengan perbandingan tertentu, kemudian dicetak lalu di-*sinter* untuk menghasilkan keramik industri.

Menjawab kebutuhan ini, penelitian kali ini penulis membuat keramik berpori dengan metode *pore-forming agent* (PFA), yaitu bahan organik yang dicampur dengan bahan dasar keramik pada saat pembuatan *green body*. Bahan organik yang digunakan adalah tepung beras (*rice flour*). Dengan adanya penambahan tersebut diharapkan sifat porositas keramik meningkat, jumlah pori bertambah dan persebarannya merata pada seluruh bagian keramik. Zirconia ( $ZrO_2$ ) merupakan bahan keramik yang digunakan sebagai bahan utama di penelitian ini.

Pada penelitian ini dibuat berbagai komposisi penambahan material tepung beras (*rice flour*) mulai dari 0% hingga 50% fraksi volume tepung beras, pada material zirconia agar dapat diketahui sifat fisis, kekuatan tekan dan sifat konduktivitas termal pada seluruh komposisi tersebut. Bahan zirconia 3Y-TZP (*Tetragonal Zirconia Polycrystal Stabilized with 3% Yttria*) digunakan sebagai partikel utama. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat diketahui komposisi terbaik struktur keramik berporos dalam nilai kekuatan tekan dan sifat konduktivitas termalnya untuk dijadikan sebagai alternatif bahan refraktori, filtrasi, dan sebagainya.

## 1.2. Rumusan Masalah

Tugas akhir ini secara khusus meneliti pembuatan keramik berpori (*porous ceramics*) dengan *pore-forming agent* (PFA) tepung beras (*rice flour*), serta pengaruh porositas terhadap kekuatan tekan dan konduktivitas termal (*thermal conductivity*).

## 1.3. Batasan Masalah

Karena begitu luasnya ruang lingkup permasalahan yang dibahas, maka penulis membuat batasan masalah yang meliputi:

1. Zirconia yang digunakan yaitu produk *Goodfellow, UK*, dengan nomor seri ZR616010 dan rumus kimianya adalah  $ZrO_2$  dengan jenis 3Y-TZP (*Tetragonal Zirconia Polycrystal Stabilized with 3% Yttria*)
2. Densitas dari  $ZrO_2$  jenis 3Y-TZP adalah  $5,9 \text{ gr/cm}^3$  dengan ukuran partikel rata-rata yaitu  $0,1 - 2 \mu\text{m}$ .
3. Untuk membuat pori pada keramik digunakan tepung beras dengan dengan ukuran butiran sekitar  $0,15 - 0,3 \text{ mm}$  dan massa jenis sebesar  $0,8 \text{ gr/cm}^3$  (Fan dkk, 1997).
4. Metode yang digunakan untuk membuat *green body* adalah metode *uniaxial pressing* jenis *double action*
5. Tekanan yang digunakan saat kompaksi uniaksial adalah sebesar 10 MPa.
6. Fraksi volume tepung beras yang digunakan yaitu 0, 10, 20, 30, 40, 50% volume campuran.
7. Suhu sintering yang digunakan adalah  $1450^\circ\text{C}$ .

## 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui pengaruh fraksi volume PFA tepung beras (*rice flour*) terhadap porositas hasil *sinter* zirconia.
2. Mengetahui pengaruh fraksi volume PFA tepung beras (*rice flour*)

terhadap kekuatan tekan hasil *sinter* zirconia.

3. Mengetahui pengaruh fraksi volume PFA tepung beras (*rice flour*) terhadap konduktivitas termal (*thermal conductivity*) hasil *sinter* zirconia.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini secara umum adalah untuk menambah pengetahuan baru terutama dalam bidang material, khususnya tentang porositas, kekuatan tekan dan konduktivitas termal dari bahan keramik zirconia berpori dengan tepung beras (*rice flour*) sebagai *pore-Forming Agent* (PFA), yang dibuat dengan metode *powder metallurgy* dan dapat menjadi acuan pada penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Keramik berporos memiliki aplikasi yang sangat luas seperti isolasi termal, bahan refraktori hingga 1600°C, dan filtrasi. Hingga saat ini, pembentukan poros pada keramik dengan cara pembakaran *pore-forming agent* (PFA) sangat populer. Berbagai jenis *pore-forming agent* (PFA) seperti padi sekam, serbuk gergaji, sari pati, *poppy seed*, dan *polymethylmethacrylate* (PMMA) bisa diaplikasikan. Pada penelitian Li, dkk (2007), keramik alumina berporos dapat mencapai nilai konduktivitas termal 0,45 W/mK dengan porositas mencapai 70% dan ukuran poros 150 µm menggunakan padi sekam sebagai *pore-forming agent* (PFA).

Zirconia adalah bahan keramik yang sangat baik pada sifat mekanisnya. Bahan ini memiliki titik leleh yang tinggi, ketahanan korosi dan sifat mekanis yang baik. Zirconia memiliki modulus elastisitas yang tinggi dan ketahanan terhadap *thermal shock* pada 1000°C. Pengaplikasian zirconia pada sensor gas, material *furnace*, dan material konstruksi sangat diandalkan karena memiliki *foam refractory ceramics* (Svinka & Bula, 2008). Zirconia memiliki tiga bentuk kristalin yaitu *monoclinic* (*m*), *tetragonal* (*t*), dan *cubic* (*c*). Jika berada dalam suhu ruangan maka zirconia akan stabil di struktur *monoclinic* dan kemudian akan berubah menjadi struktur tetragonal pada suhu 1100°C. Pada suhu 2300°C akan menjadi struktur *cubic* seiring dengan proses pemanasan. Penambahan 3 mol% yttria bermanfaat untuk menghasilkan fase *t* yang stabil pada suhu ruang. Selain itu, yttria juga bermanfaat untuk mengurangi suhu transformasi fase *t-m* dari 1000°C hingga 550°C. Selain kekuatan mekanis yang tinggi, keramik zirconia juga digunakan karena sifat konduktivitas termalnya yang rendah, sehingga dapat digunakan sebagai material isolator (Patapy & Gey, 2012)

Nilai kekuatan tekan material keramik dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor dari proses pembuatannya, salah satunya adalah temperatur *sintering*. Dalam hal ini, temperatur *sintering* berpengaruh terhadap nilai porositas, penyusutan, serta struktur mikro keramik, sehingga secara langsung berpengaruh terhadap kekuatannya. Hu dan Wang (2010) melakukan penelitian tentang pengaruh temperatur

*sintering* terhadap kekuatan tekan keramik YSZ berpori. Serbuk zirconia dibentuk dengan metode pencetakan menggunakan bahan *tert-Butyl Alcohol* (TBA) dalam bentuk gel untuk menciptakan pori-pori pada zirconia. *Green body* yang terbentuk kemudian dilakukan proses *sintering* pada temperatur 1350, 1400, 1450, 1500, dan 1550°C dan ditahan selama dua jam. Pada spesimen kemudian dilakukan pengujian porositas, penyusutan linear, untuk mencari hubungannya terhadap kekuatan tekan. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan nilai porositas keramik YSZ menurun dari 77% pada temperatur *sintering* 1350°C menjadi 65% pada temperatur *sintering* 1550°C. Selain itu, didapatkan juga penyusutan linear bertambah dari 15,4% pada temperatur *sintering* 1350°C menjadi 31,8% pada temperatur *sintering* 1550°C. Nilai kekuatan tekan didapatkan bertambah drastis dari 3 MPa pada temperatur *sintering* 1350°C menjadi 27 MPa pada temperatur *sintering* 1550°C, sebagai dampak dari berkurangnya nilai porositas dan ukuran pori.

Perpindahan kalor pada material dapat dibedakan menjadi tiga yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan kalor konduksi, atau dikenal dengan perpindahan kalor difusi adalah aliran energi kalor pada benda padat dan cairan yang tidak mengalir. Perpindahan kalor ini disebabkan oleh adanya panas yang tidak setimbang atau biasa disebut *heat flux*. Dimana  $q$  adalah *heat flux* atau transfer kalor per satuan waktu (J/s) yang melewati arah normal terhadap luas permukaan ( $A$ ) ( $m^2$ ) yang terjadi dikarenakan perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) (K). Sedangkan  $k$  (W/K) adalah konstanta *thermal conductivity*. Konstanta tersebut adalah ukuran kemampuan material sebagai media aliran kalor dari permukaan yang lebih panas ke permukaan yang lebih dingin (Lienhard, 2008).

Menurut Callister (2007), nilai konduktivitas termal untuk keramik pada suhu ruangan berkisar antara 2 hingga 50 W/m-K. Penghamburan jeruji getaran akan semakin terlihat seiring dengan naiknya temperatur, oleh karena itu, sebagian besar nilai termal konduktivitas keramik akan semakin menurun dengan naiknya suhu. Porositas keramik memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap nilai konduktivitas termal. Apabila volume porositas meningkat maka akan menyebabkan turunnya nilai konduktivitas termal. Pada aplikasinya, keramik yang digunakan pada bagian isolasi kalor adalah keramik yang berpori-pori.

Terdapat dua macam metode pengujian perpindahan kalor yaitu *one-dimensional steady state* dan *multi dimensional steady state*. *Steady state* adalah kondisi dimana sistem tidak berubah atau stabil. *One- dimensional heat transfer* adalah apabila kalor berpindah hanya pada satu arah koordinat, yang diikuti dengan tidak adanya perbedaan suhu di kedua arah yang lain. *Multi dimensional* adalah apabila kalor berpindah ke dua atau lebih arah koordinat, yang diikuti dengan tidak adanya perbedaan suhu di arah ketiga. Tujuan dari perhitungan dengan menggunakan konduksi kalor adalah untuk menentukan nilai suhu tertentu pada suatu objek yang biasa ditulis dengan notasi  $T(x,y,z)$  (Dutta, 2004).

Beragam penelitian dalam pembuatan keramik berpori telah banyak dilakukan dengan berbagai macam bahan dan metode pembuatan. Penelitian dilakukan untuk mendapatkan karakter terbaik yang bisa dihasilkan oleh beragam kombinasi bahan pembentuk dan metode yang dipilih. Salah satu contoh penelitian yang pernah dilakukan oleh Sebayang, dkk (2007), yang mana penelitian ini menggunakan bahan dasar keramik *cordierite* dan *porous forming agent* (PFA) serbuk kayu. Preparasi serbuk *cordierite* dilakukan dengan mencampur/menggiling bahan baku: ( $MgCO_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ , dan  $SiO_2$ ) di dalam *ball mill* selama 48 jam. Air ditambahkan ke dalam *ball mill* sebanyak 1 : 1 (volume), dan batas maksimum tidak lebih dari  $\frac{2}{3}$  volume *ball mill*. Serbuk hasil penggilingan kemudian dikeringkan pada suhu  $110^\circ C$  selama 24 jam, diayak hingga lolos 200 *mesh* dan dikalsinasi pada suhu  $1200^\circ C$ . Hasil yang diperoleh dari proses ini berupa serbuk *cordierite* ( $2MgO.2Al_2O_3.5SiO_2$ ) dengan ukuran butir rata-rata sekitar  $7,78 \mu m$ . Selanjutnya serbuk *cordierite* tersebut dicampur masing- masing dengan 10, 15, 20, 25, dan 30% fraksi berat serbuk kayu (SK) yang telah digerus berukuran  $< 100 mesh$ , dibentuk menjadi benda uji dengan cara cetak tuang (*slip casting*), dan kemudian dilakukan *sintering* pada suhu  $1250^\circ C$ . Hasil karakterisasi keramik *cordierite* berpori menunjukkan bahwa harga densitas berbanding terbalik dengan penambahan serbuk kayu, yaitu berkisar antara  $0,75 - 1,17 g/cm^3$ , dan nilai porositas berbanding lurus dengan penambahan serbuk kayu: 58 – 63 %, kekuatan patah mengalami penurunan: 0,5 – 2 MPa, kekerasan (Hv): 0,3 – 1,8 GPa, dan koefisien ekspansi termal:  $(4 - 6) \times 10^{-6} ^\circ C^{-1}$ . Dari data pola difraksi sinar X

menunjukkan bahwa fasa minor adalah *mullite* (*orthorhombic*) dan *corundum* (*trigonal*). Sedangkan dari hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa keramik *cordierite* berpori mempunyai ukuran sekitar 10 – 100  $\mu\text{m}$ . Kondisi optimum adalah komposisi 20 % serbuk kayu (SK) dan suhu sintering 1250°C, dimana ukuran pori relatif seragam < 50  $\mu\text{m}$ .

Darwanto (2008), pada penelitiannya menggunakan kaolin sebagai bahan dasar keramik dan *pore-forming agent corn starch* (tepung jagung). Metode yang digunakan dalam pembuatan keramik berpori tersebut adalah metode PFA dengan cara mencampurkan serbuk kaolin dengan *corn starch* pada saat proses pembuatan *green body*. Variasi komposisi PFA *corn starch* adalah 0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% fraksi berat. *Sintering* dilakukan secara *pressureless* pada suhu 1450 °C selama 3,45 jam. Hasil dari penelitian didapatkan bahwa kaolin 0% berat *corn starch* yang di-sinter pada suhu 1450 °C (suhu optimum), dengan laju pemanasan 7°C /menit berubah fase menjadi, kekerasannya sebesar  $1347,4 \pm 137,3 \text{ kg/mm}^2$ , kekuatan bendungnya sebesar  $80,0 \pm 5,5 \text{ MPa}$ , dan *thermal conductivity*-nya menurun dengan bertambahnya fraksi berat tepung jagung pada campuran *green body*. Porositas spesimen naik dengan kenaikan persen berat *corn starch*. Pada penelitian Sun, dkk (2014) peningkatan nilai porositas pada keramik fiber berporos yang dibuat dengan metode *vacuum-molding* akan menurunkan nilai konduktivitas termal dari 0.18 W/mK (pada porositas 90%) menjadi 0.06 W/mK (pada porositas 73%).

Dalam penelitian terbaru Liu, dkk (2016), mengenai keramik berporos, *carbon black* (CB) dapat bekerja sebagai *pore-forming agent* dalam pembuatan keramik berporos *alumina*. Struktur poros (dalam hal ini ukuran poros, distribusi poros dan variasi ukuran poros) dianalisa dengan *Micro Image Analysis and Process System* (MIAPS) *software* dan *mercury intrusion porosimetry*. Nilai dari konduktivitas termal dan kekuatannya dianalisis dengan *grey relation theory*. Hasilnya menunjukkan bahwa porositas dan ukuran pori-pori meningkat seiring dengan meningkatnya presentase CB, dan nilai konduktivitas termalnya serta kekuatan menurun. Pori-pori < 2  $\mu\text{m}$  membantu meningkatkan kekuatan dan menurunkan nilai konduktivitas termalnya. Kemudian pori-pori berukuran > 14

$\mu\text{m}$  memiliki pengaruh yang sebaliknya. Pada variasi CB %wt dari 0 hingga 30, nilai porositas meningkat dari  $33,0 \pm 1,7 \%$  hingga nilai maksimal yaitu  $68,9 \pm 2,3\%$  (Tabel 2.1). Sedangkan nilai dari *bulk density* ( $\text{g/cm}^3$ ) menurun dari 2,65 hingga mencapai nilai minimum yaitu 1,3.

Tabel 2.1 Nilai Pengaruh Porositas terhadap Kekuatan Tekan (Liu, dkk 2016)

Sample no.	Porosity (%)	Stress at break, $\sigma_f$ (MPa)	Strain at break, $\epsilon$ (%)	Compressive strength (MPa)
C0	$33.1 \pm 1.7$	$16.0 \pm 1.2$	$0.138 \pm 0.008$	$93.1 \pm 2.5$
C1	$43.3 \pm 2.0$	$14.4 \pm 1.1$	$0.157 \pm 0.011$	$60.0 \pm 2.3$
C2	$48.2 \pm 1.5$	$11.6 \pm 0.8$	$0.163 \pm 0.015$	$43.4 \pm 2.5$
C3	$52.0 \pm 2.0$	$10.3 \pm 0.7$	$0.182 \pm 0.013$	$31.4 \pm 1.8$
C4	$57.5 \pm 1.9$	$8.4 \pm 0.5$	$0.198 \pm 0.025$	$29.0 \pm 1.6$
C5	$62.7 \pm 1.8$	$5.7 \pm 0.4$	$0.225 \pm 0.025$	$21.4 \pm 1.2$
C6	$68.9 \pm 2.3$	$2.7 \pm 0.3$	$0.272 \pm 0.035$	$9.7 \pm 1.3$

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Keramik

Keramik terdiri dari minimal dua elemen yang mana salah satunya adalah non-metal atau elemen padat *nonmetallic* dan elemen yang lain adalah metal atau non-metal yang lain (Barsoum, 2003). Keramik adalah senyawa campuran padat yang terbentuk dari pengaplikasian kalor atau kalor dan tekanan. Keunggulan dari sifat keramik terdapat pada sifat keras, tahan aus dan stabil pada temperatur tinggi. Kristalin padat non metal inorganik terbentuk dari proses geologis yang kompleks. Karakter keramik dari material tersebut sebagian besar ditentukan oleh struktur kristal dan komposisi kima dari bagian inti dan sifat serta jumlah dari mineral yang terkandung. Karakter mineralogis dari material keramik memiliki variasi yang cukup luas. Namun keramik juga memiliki kelemahan yang bersifat getas dan ketangguhan retaknya rendah (Widodo, 2010). Secara umum, keramik digolongkan dalam dua kelompok penggunaan, yaitu keramik tradisional dan keramik modern. Bahan dasar keramik tradisional biasanya dibuat dari mineral silikat seperti lempung, yang dikeringkan dan dibakar pada suhu antara 1200°C sampai dengan 1800°C agar menjadi keras (Smallman & Bishop, 2002). Produk dari keramik tradisional contohnya seperti tembikar. Bahan-bahan dasar berupa senyawa oksida keramik, nitride, karbida, dan boride sering digunakan pada keramik modern. Pada struktur mikro keramik modern, memperlihatkan hasil yang lebih halus dan lebih homogen dibandingkan keramik tradisional.

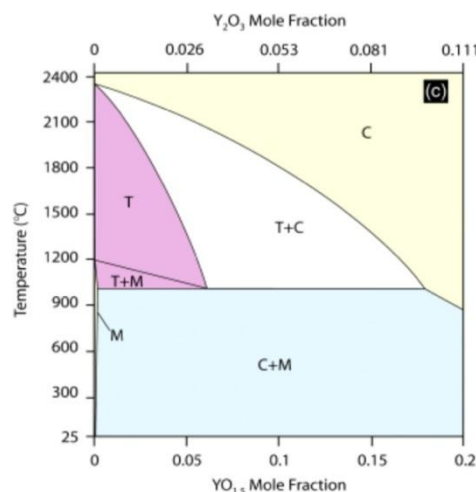
Tabel 3.1 *Properties and Application of Advanced Ceramics* (Barsoum, 2003)

<i>Property</i>	<i>Applications (Examples)</i>
<b>Thermal</b> Insulation Refractories Thermal conductivity	High temperature furnace linings for insulation (oxide fibers such as $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and $\text{ZrO}_2$ ) High temperature furnace linings for insulation and containment of molten metals and slags Heat sinks for electronic packages
<b>Electrical and dielectric</b> Conductivity Ferroelectricity Low-voltage insulators Insulators in electronic applications Insulators in hostile environments Ion-conducting Semiconducting Nonlinear I, V characteristics Gas-sensitive conduct	Heating elements for furnaces ( $\text{SiC}$ , $\text{ZrO}_2$ , $\text{MoSi}_2$ ) Capacitors (barium titanate based materials) Ceramics insulation (porcelain, steatite, forsterite) Substrates for electronic packaging and electrical insulators in general ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{AlN}$ ) Spark plugs ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Sensor and fuel cells ( $\text{ZrO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc) Thermistors and heating elements (oxides of Fe, Cu, Mn) Current stage protectors (Bi-doped $\text{ZnO}$ , $\text{SiC}$ ) Gas sensor ( $\text{SnO}_2$ , $\text{ZnO}$ )
<b>Magnetic and superconductive</b> Hard magnets Soft magnets Superconductivity	Ferrite magnets [ $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{O} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ] Transformer cores [ $(\text{Zn}, \text{M})\text{Fe}_2\text{O}_3$ , with $\text{M} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Mg}$ ]; magnetic tapes (rare-earth garnets) Wires and SQUID magnetometers ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ )
<b>Optical</b> Transparency Translucency and chemical inertness Nonlinearity IR transparency	Windows (soda-lime glasses), cables for optical communication (ultra pure silica) Heat and corrosion resistant materials, usually for Na lamps $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{MgO}$ Switching devices for optical computing ( $\text{LiNbO}_3$ ) Infrared laser windows ( $\text{CaF}_2$ , $\text{ScF}_2$ , $\text{NaCl}$ )
<b>Nuclear applications</b> Fission Fusion	Nuclear fuel ( $\text{UO}_2$ , $\text{UC}$ ), fuel cladding ( $\text{C}$ , $\text{SiC}$ ), neutron moderators ( $\text{C}$ , $\text{BeO}$ ) Tritium breeder materials (zirconates and silicates of Li, $\text{Li}_2\text{O}$ ), fusion reactor lining ( $\text{C}$ , $\text{SiC}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
<b>Chemical</b> Catalyst Anticorrosion Biocompatibility	Filters (zeolites); purification of exhaust gases Heat exchangers ( $\text{SiC}$ ), chemical equipment in corrosive environments Artificial joint prostheses ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
<b>Mechanical</b> Hardness High-temperature strength retention Wear resistance	Cutting tools ( $\text{SiC}$ whisker-reinforced $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) Stators and turbine blades, ceramic engines ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) Bearings ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

### 3.2 Zirconia ( $\text{ZrO}_2$ )

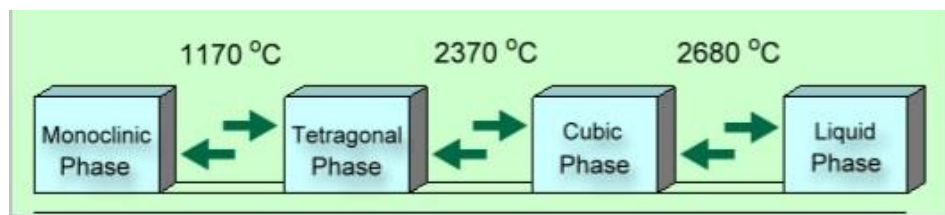
Keunggulan utama dari keramik zirconia adalah memiliki titik leleh yang tinggi yaitu  $2.680^\circ\text{C}$ , ketahanan korosi dan sifat mekanis yang baik. Zirconia memiliki modulus elastisitas yang tinggi dan ketahanan terhadap *thermal shock* pada  $1000^\circ\text{C}$ . Selain itu, zirconia juga memiliki *foam refractory ceramics* yang dapat diaplikasikan pada sensor gas, material *furnace*, dan material konstruksi (Svinka & Bula, 2008).

Menurut riset Chevalier, dkk (2009), Zirconia memiliki tiga bentuk kristalin yaitu *monoclinic* (*m*), *tetragonal* (*t*), dan *cubic* (*c*). Jika berada dalam suhu ruangan maka zirconia akan stabil di struktur *monoclinic* dan kemudian akan berubah menjadi struktur tetragonal pada suhu  $1100^\circ\text{C}$ . Pada suhu  $2300^\circ\text{C}$  akan menjadi struktur *cubic* seiring dengan proses pemanasan. Fase transformasi dari fase *m* ke fase *t* menghasilkan penambahan volume sebesar 4-5% yang kemudian menyebabkan retak dan kegagalan struktur pada hasil pemanasan. Penambahan 3 mol% yttria bermanfaat untuk menghasilkan fase *t* yang stabil pada suhu ruang. Selain itu, yttria juga bermanfaat untuk mengurangi suhu transformasi fase *t-m* dari  $1000^\circ\text{C}$  hingga  $550^\circ\text{C}$ . Gambar 3.1 menunjukkan diagram fase zirconia-yttria.



Gambar 3.1 Diagram fase zirconia-yttria (Chevalier dkk, 2009)

Gambar 3.2 menjelaskan zirconia murni yang memiliki kondisi kristal yang berbeda-beda, seperti fase kubus dan fase tetragonal pada suhu tinggi dan fase mono klinik pada suhu rendah. Ketika proses pendinginan mencapai suhu 1170°C, kristal pada zirconia berubah dari fase tetragonal menjadi fase monoklinik.



Gambar 3.2 Fase perubahan zirconia (*Fine Ceramics*, 2006)

Salah satu metode untuk menstabilkan fase *tetragonal* dan/atau *cubic* zirconia murni pada temperatur ruangan yang masih dipakai hingga sekarang adalah dengan menambahkan oksida misalnya calsia (CaO), magnesia (MgO), yttria (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dan ceria (CeO<sub>2</sub>). Penambahan salah satu dari oksida tersebut dalam jumlah kadar tertentu menghasilkan zirconia dengan tipe *microstructure* yang berbeda. Pada umumnya, keramik zirconia dapat diklasifikasikan dalam tiga struktur mikro, yaitu *Fully Stabilized Zirconia* (FSZ), *Partially Stabilized Zirconia* (PSZ), dan *Tetragonal Zirconia Polycrystals* (TZP).

PSZ merupakan zirconia yang berada dalam fase *tetragonal* dan sebagian *monoclinic*. Namun pada campuran ini terjadi, keramik tetap dapat terbentuk pada suhu ruangan hanya dengan fase tetragonal yang dapat disebut TZP (*Tetragonal Zirconia Polycrystals*). Salah satu perbedaan antara *Tetragonal Zirconia Polycrystals* (TZP) dengan *Partially Stabilized Zirconia* (PSZ) adalah dalam hal penstabilan fasa transformasi pada pemanasan yang terkendali pada suhu berbeda. *Tetragonal Zirconia Polycrystals* (TZP) ini adalah zirconia yang memerlukan senyawa tambahan untuk menjadi stabil. Salah satu keunikan dari struktur PSZ adalah dapat kembalinya fase *tetragonal* ke *monoclinic* saat keramik mengalami tegangan, yang biasa disebut sebagai *stress-induced phase transformation*.

Perubahan fase ini mirip dengan perubahan fase saat pendinginan tahap *sintering*, diikuti dengan penambahan volume sekitar 5%. Hal ini menjadi bersifat menguntungkan karena akan mencegah perambatan retak yang terjadi dengan adanya tekanan volumetrik ke daerah retak tersebut. Mekanisme ini disebut sebagai *toughening mechanism* (Piconi & Maccauro, 1999). PSZ (*Partially Stabilized Zirconia*) dapat juga didapatkan dengan mencampur  $ZrO_2$  dan  $Y_2O_3$ . Zirconia dalam bentuk FSZ berada dalam fase *cubic*. Unsur yang digunakan untuk menstabilkan zirconia dalam fase *cubic* pada temperatur ruangan adalah yttria, dengan konsentrasi besar yaitu di atas 8 mol%  $Y_2O_3$ .

Dibandingkan dengan *Full Stabilized Zirconia* (FSZ) yang terbentuk oleh 100% fase kubik, PSZ memiliki ketahanan patah dan kekuatan mekanis yang lebih baik. Nilai *fracture toughness* PSZ mencapai 9-11 MPa·m yang mana angka tersebut sama dengan tiga kali lipat *fracture toughness* alumina. Oleh sebab itu, zirconia PSZ mampu menutup kekurangan getasnya keramik dan membuka kesempatan aplikasi keramik dengan jangkauan yang lebih luas. PSZ dan TZP adalah dua jenis dari zirconia yang memiliki kekuatan dan ketahanan yang baik. Kedua jenis tersebut biasanya diaplikasikan pada komponen struktur yang dapat tahan aus dan memiliki kekuatan mekanis tinggi. Pada suhu ruangan, angka keausan PSZ dan TZP sama dengan 3-5 kali alumina. Namun, kekuatan mekanisnya akan lebih rendah pada suhu tinggi, dikarenakan alasan ini, PSZ dan TZP tidak diaplikasikan untuk lingkungan dengan struktur suhu tinggi. (*Fine Ceramics*, 2006).

### 3.3 Porous Ceramics

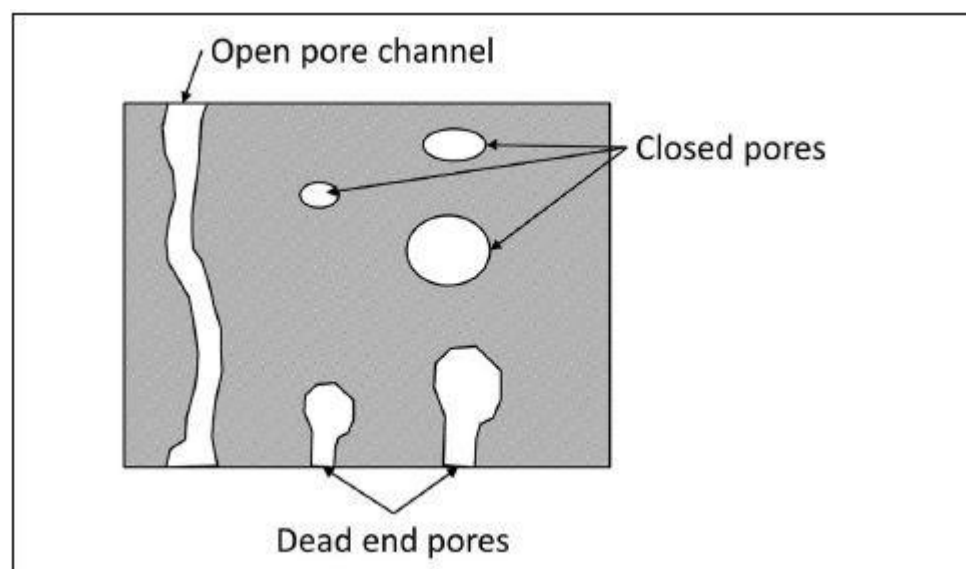
Keramik berporos memiliki aplikasi yang luas, seperti filter, insulasi panas atau akustik, konstruksi yang ringan, dan sebagainya. Karena tingginya nilai porositas, resistasi pada suhu tinggi, *pore interconnectivity* dan permeabilitasnya, poros keramik sebagai contoh dapat digunakan sebagai *exhaust filter* pada mesin diesel, filter atau sistem purifikasi pada industri kimia maupun pemrosesan logam.

*Porous ceramics* merupakan suatu pengembangan bahan keramik yang

berupa pembuatan rongga atau pori yang bertujuan antara lain sebagai *filter bearing*, *thermal insulation*, ataupun *acoustical insulation*. Keramik dengan ukuran pori 10 – 800  $\mu\text{m}$  dapat digunakan sebagai filter, sedangkan keramik dengan ukuran pori mencapai 0,1 nm dapat digunakan sebagai membran (Gregorova & Pabst, 2006)

Pengendalian porositas sangatlah penting pada pembuatan *porous ceramics*. Hal ini perlu dilakukan karena pada jenis keramik ini, semakin tinggi nilai porositas dari keramik tersebut maka nilai dari kekuatan mekanisnya akan menurun. Pengendalian porositas *porous ceramic* dapat dilakukan dengan memilih metode yang tepat pada pembentukan *porous ceramic*.

Metode PFA (*pore-forming agent*) hingga saat ini masih dapat diandalkan sebagai metode pengendalian nilai porositas, seperti pada penelitian Liu, dkk (2016) yang menggunakan bahan *carbon black* sebagai *pore-forming agent* yang dicampurkan alumina sebagai bahan keramik utama. Pada penelitian ini, PFA yang dipilih adalah tepung beras (*rice flour*) dan zirconia sebagai bahan utama keramik. Tepung beras yang memiliki titik leleh rendah akan meninggalkan pori-pori pada struktur keramik saat proses *sintering*.



Gambar 3.3 Skema tipe pori pada keramik ([www.rauschert.com](http://www.rauschert.com))

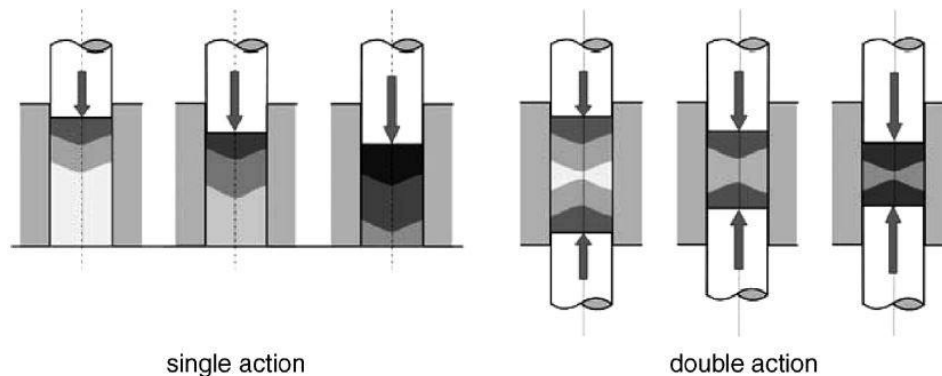
### 3.4 Metode *Uniaxial Pressing*

Metode *uniaxial pressing* adalah salah satu metode yang digunakan pada kompaksi. Salah satu metode kompaksi yang digunakan adalah *uniaxial pressing*. Metode ini terdiri dari proses kompaksi serbuk yang berada di rongga padat dengan cara mengaplikasikan tekanan dari satu arah sumbu dengan menggunakan satu *rigid punch* atau lebih. Macam-macam teknik *pressing* dibedakan oleh pergerakan dari seluruh cetakan. Metode *uniaxial* adalah suatu rangkaian teknik menekan yang terdiri dari *top punch*, *bottom punch*, dan cetakan.

Dalam sekali proses, tekanan pada *uniaxial pressing* diberikan melalui *top punch*, yang kemudian akan masuk kedalam ruangan berisi bubuk. Setelah proses kompaksi berlangsung, bagian *bottom punch* akan mendorong *green body* dari cetakan. Tahap atau kondisi awal dari kompaksi dikarakterisasi berdasarkan letak partikel. Selama tahap ini, partikel partikel akan kembali membentuk posisi untuk menjadi suatu gerombolan partikel. Partikel-partikel asli dapat mempertahankan hampir seluruh sifatnya, walaupun banyak energi yang hilang akibat friksi antara partikel dengan dinding cetakan. Pada tahap pertama, bentuk dan porositas awal partikel serbuk merupakan karakter yang penting ketika *sliding* dan deformasi plastis atau perpatahan dapat muncul. Pada umumnya, di tahap awal kompaksi bubuk akan bergerak di dalam cetakan dan mengurangi porositas. Ketika tekanan tinggi, partikel akan semakin dipaksa untuk merapat satu sama lain dan mengalami deformasi plastis yang dapat meningkatkan kontak antar partikel. Kenaikan massa jenis selama proses kompaksi terjadi diakibatkan oleh kontak antar partikel. Pembebanan yang berlangsung secara kontinyu, efek dari inersia akan membentuk massa jenis yang mendekati massa jenis tanpa porositas. Pada proses kompaksi, cacat internal khususnya retak internal sangat sering ditemui dikarenakan serbuk yang mengalir tidak merata pada beberapa bagian kompaksi. (Khadim, 2011).

Metode kompaksi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *double action pressing* atau metode tekanan dua arah sumbu, mengingat *uniaxial pressing* dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu, penekanan satu arah (*single-action pressing*) dan penekanan dua arah (*double-action pressing*).

Proses kompaksi menggunakan penekan (*punch*) atas dan bawah. Penting untuk memastikan permukaan cetakan halus, guna mengurangi gesekan antar serbuk dengan cetakan, serta menghindari keausan (*wear*) pada dinding cetakan serta penekan (*punch*). Penambahan pelumas pada dinding cetakan pada proses kompaksi dapat dilakukan guna mengurangi keausan dan mempermudah proses pengeluaran *green body* serta penekan (*punch*). Skema *uniaxial pressing* dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. *Uniaxial pressing single action pressing versus double action pressing* (Chen & Riedel, 2012)

### 3.5 Konduktivitas Termal (*Thermal Conductivity*)

Ada tiga jenis perpindahan kalor, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Pada keramik, perpindahan kalor yang terjadi hanya mencakup konduksi dan radiasi. Perpindahan kalor secara konduksi adalah mengalirnya energi kalor pada media seperti benda padat atau cair. Perpindahan kalor ini terjadi karena adanya panas yang tidak setimbang, dikenal dengan *heat flux*. Menurut Incropera (1981) konduksi dapat dihitung dengan Persamaan *fourier* sebagai berikut:

$$q = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Nilai  $q$  adalah *heat flux* atau transfer kalor per satuan waktu ( $W$ ) yang melewati arah normal terhadap luas permukaan ( $A$ ) ( $m^2$ ) yang terjadi dikarenakan perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) ( $K$ ). Sedangkan  $k$  ( $W/mK$ ) adalah konstanta *thermal conductivity*. Konstanta  $k$  menyatakan kemampuan material sebagai media aliran kalor dari permukaan yang bersuhu lebih tinggi ke lebih rendah (Leindhard, 2008). Gambar 3.10 menunjukkan proses perpindahan kalor secara konduksi.

Metode pengujian perpindahan kalor memiliki 2 jenis kondisi, yaitu *one-dimensional steady state* dan *multi dimensional steady state*. *One-dimensional steady state* adalah kondisi kalor berpindah pada satu arah koordinat, dan tidak ada perbedaan suhu di kedua arah lainnya. Sedangkan *multi dimensional steady state* menggambarkan kalor yang berpindah ke dua atau lebih arah koordinat, dan tidak adanya perbedaan suhu di arah ketiga. Kondisi *steady state* adalah sistem yang tidak berubah atau stabil. Notasi  $T(x,y,z)$  biasa digunakan untuk menunjukan nilai suhu tertentu pada arah tertentu.

Pada keramik, pembawa energi bagi konduktivitas termal adalah getaran fisi. Gelombang elastik ini dianggap sebagai partikel yang bergerak dengan kecepatan tinggi (Dhananjaya, 2011). Konduksi panas pada keramik menurut Ismunandar (2010), terjadi karena perambatan panas melibatkan transfer energi antar atom-atom yang bervibrasi. Gerakan antar atom akan menghasilkan gelombang yang bergerak dengan kecepatan cahaya yakni fonon. Penyebab dari keramik bukan menjadi konduktor panas yang baik adalah keramik amorf yang banyak mengandung cacat kristal, sehingga fonon selalu terhambur.

Pada spesimen tidak ada energi yang dibangkitkan atau perubahan energi dalam, sehingga kalor yang masuk akan sama dengan kalor yang dikeluarkan. Persamaan 3.2 (Holman, 1995) menjabarkan nilai konduktivitas tersebut.

$$q = -kcuA \frac{(T_h - T_{3a})}{\Delta X_{cu}} = -ksA \frac{(T_s - T_h)}{\Delta x_s} = -kcuA \frac{(T_{4a} - T_s)}{\Delta x_{cu}} \quad (3.2)$$

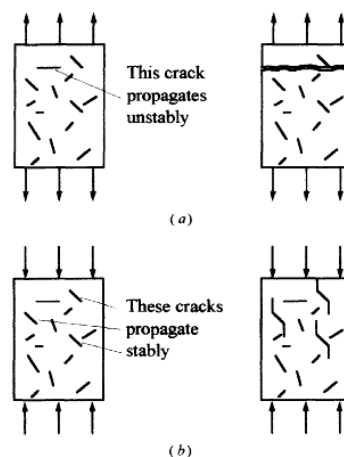
### 3.6 Pengujian Tekan

Pengujian tekan adalah salah satu pengujian yang sering dilakukan guna melihat sifat mekanis pada keramik. Pengujian tarik sulit dilakukan pada material getas (sebagai contoh keramik) karena ketidakstabilannya pada perambatan tegangan saat ujung retak melebihi nilai *critical value*. (Barsoum, 2003)

Pada pengujian tekan, spesimen akan mendapat gaya normal yang arah gayanya tegak lurus dengan bidang, atau searah dengan garis sumbu benda. Gaya normal tersebut akan menimbulkan tegangan normal, yang dapat diartikan sebagai intensitas gaya yang berkerja normal (tegak lurus) terhadap bidang pada suatu luasan area (Callister, 2007)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Fenomena yang biasa terjadi pada saat pengujian material getas keramik ini adalah perambatan retaknya pada retak yang melebihi nilai kritisnya. Pada beban pengujian tekan, retakan akan memuntir dari orientasi aslinya dan menyebar secara stabil sepanjang sumbu penekannya. Hasil dari fenomena ini adalah spesimen akan lebih cepat mengalami kehancuran daripada fraktur retak dan retakan terjadi secara cepat.

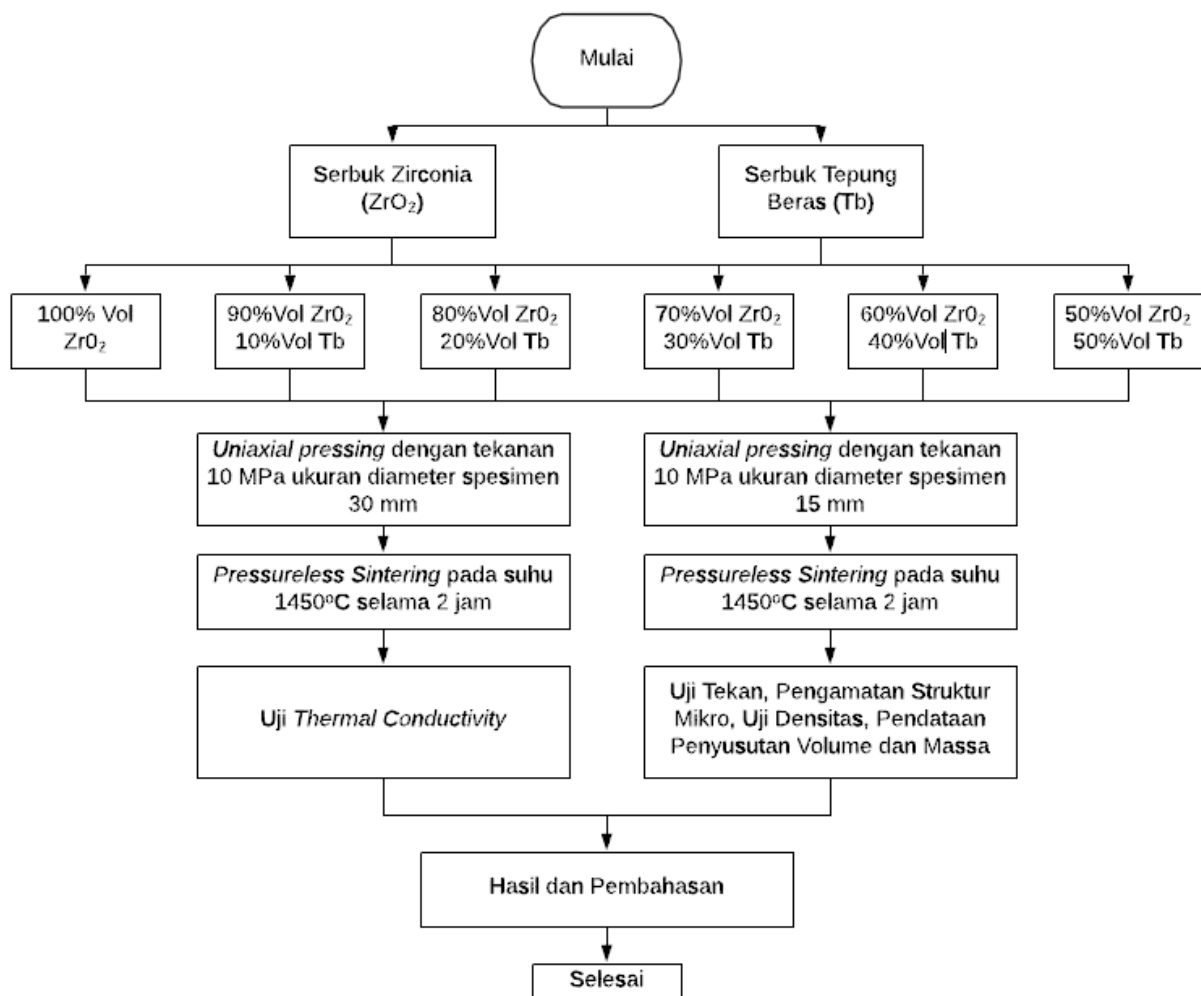


Gambar 3.5 (a) Perambatan retak saat pengujian tarik. (b) Perambatan retak saat pengujian tekan (Barsoum, 2003)

## BAB IV

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 4.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 4.1 Diagram Alir Penelitian

## 4.2 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di empat tempat, yaitu:

1. Laboratorium Bahan Teknik Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
2. Laboratorium Perpindahan Kalor dan Massa, Pusat Studi Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, untuk pengujian konduktivitas termal
3. Laboratorium SEM Badan Tenaga Nuklir Nasional, Tangerang Selatan, untuk pengujian SEM-EDX

## 4.3 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Material zirconia ( $ZrO_2$ ) jenis 3Y-TZP (*Tetragonal Zirconia Polycrystal Stabilized with 3% Yttria*) dengan ukuran partikel 0,1-2  $\mu m$  dengan seri ZR616010 dari *Goodfellow*, UK.
2. Tepung beras dengan dengan ukuran butiran sekitar 0,15 – 0,3 mm dan massa jenis sebesar 0,8  $gr/cm^3$  (Fan dkk, 1997)
3. *Mollases* atau sari tebu, sebagai perekat /*binder* pada tahap pembuatan *green body*.
4. Hg cair atau air raksa (densitas 13,6  $gr/cm^3$ ) sebagai media dalam pengujian densitas.

## 4.4 Alat Penelitian

1. Timbangan *digital* (*Satorious type* LCI 1201S) dan timbangan manual untuk mengetahui berat spesimen
2. *Sieving machine*, digunakan dalam penentuan distribusi ukuran PFA (*Pore-Forming Agent*) tepung beras (*rice flour*)
3. *Turbula mixer* (*Stuart scientific* UK), digunakan untuk proses *mixing* campuran

4. *Box furnace (Carbolite type RFH 16/3)*, digunakan untuk *sintering green body*
5. Bola-bola zirconia (*zirconia balls*) digunakan untuk membantu proses *mixing* serbuk zirconia dengan PFA serbuk tepung beras, agar serbuk tepung beras tersebar merata, digunakan pada *mixing* di mesin *Turbula mixer*
6. Mesin *Tarno Grocky type UPHG20 Japan* digunakan sebagai alat kompaksi dalam pencetakan *green body*
7. Kertas amplas grade 120, 220, 400, 600, 800, dan 1000 untuk menghaluskan permukaan spesimen
8. Cetakan/*die* ukuran diameter dalam 15 mm dan 30 mm digunakan dalam pencetakan *green body*
9. Sepasang *washer* tiap cetakan untuk ,engoptimalkan proses kompaksi.
10. Jangka sorong (*Mitutoyo*) digunakan dalam pengukuran dimensi spesimen
11. Mikroskop stereo (*Motic Digital Microscope*)
12. Alat uji tekan (*Tokyo testing machine*)
13. *Scanning Electron Microscope (SEM) - Energy Dispersive X-Ray Analyzer (EDX)* untuk pengamatan struktur mikro
14. *Heat Conduction Apparatus*, digunakan dalam pengujian konduktivitas termal

#### 4.5 Proses Pengukuran Diameter Serbuk Tepung Beras

Serbuk tepung beras diayak pada *sieving machine* atau mesin ayak selama 20 menit untuk mendapatkan distribusi ukuran diameter tepung beras. Dari hasil pengayakan didapatkan distribusi ukuran tepung beras adalah sebesar 0,053 – 0,429 mm

#### 4.6 Prosedur penelitian

- a. Mempersiapkan bahan baku spesimen terlebih dahulu, yaitu serbuk zirconia dan tepung beras, kemudian ditimbang dengan perbandingan campuran fraksi berat, yang dikonversi dari fraksi volume, yaitu:

Tabel 4.1 Tabel konversi fraksi volume ke fraksi berat tepung beras

No	% Volume		% Berat	
	ZrO <sub>2</sub>	Tb	ZrO <sub>2</sub>	Tb
1	100	0	100,00	0
2	90	10	98,70	1,30
3	80	20	97,12	2,88
4	70	30	95,16	4,84
5	60	40	92,67	7,33
6	50	50	89,39	10,60

- b. Mencampurkan masing-masing komposisi campuran dan dilakukan *dry mixing* (pencampuran kering) dengan alat *Turbula mixer* selama 60 menit.
- c. Campuran serbuk zirconia dan tepung beras ditimbang sesuai kebutuhan, kemudian dimasukkan ke dalam plastik (sebagai *container* sementara), yang mana dicampurkan pula *molasses* atau sari tebu (kadar 5% massa) sebagai media perekat serbuk zirconia dengan tepung beras.
- d. Campuran di masukkan ke dalam cetakan/*dies* sesuai dengan ukuran dimeter cetakan, untuk selanjutnya diperoleh *green body*.
- e. Mencetak spesimen silinder dengan diameter (d) spesimen = 15 mm, tebal (t) = 10-16 mm dan silinder diameter (d) spesimen = 30mm, tebal (t) = 6-10 mm dengan cara *uniaxial pressing* dengan jenis *double action pressing* menggunakan mesin *Tarno Grocky*

- dengan tekanan 10 MPa. Tekanan tersebut ditahan selama 10 menit untuk menghindari *spring back* pada *green body*.
- f. Melakukan *sintering green body* spesimen diameter 15 mm dan 30 mm pada suhu 1450° C di dalam *furnace* dengan *heating rate* 10° C / menit dan di tahan selama 2 jam setelah mencapai suhu yang dikehendaki kemudian didinginkan sampai temperatur ruang secara alami di dalam *furnace*.
  - g. Permukaan spesimen diampas/dihaluskan dengan ukuran *mesh* amplas 100, 220, 400, 600, 800 dan 1000.
  - h. Melakukan pengujian densitas (dengan metode Archimedes dengan media air raksa) dan porositas pada spesimen berdiameter 15 mm
  - i. Melakukan pengujian tekan pada spesimen silinder dengan diameter (d) = 15 mm dan tebal (t) = 10-16 mm sehingga didapatkan kekuatan tekan spesimen.
  - j. Melakukan pengamatan SEM untuk spesimen uji tekan (d = 15 mm, t = 10-18 mm)
  - k. Melakukan uji konduktivitas termal dengan spesimen silinder (d = 30 mm, tebal (t) = 6-10 mm).
  - l. Pengolahan data dan pembahasan.

## 4.7 Pengujian

### 4.7.1 Pengujian Densitas

Pengujian ini dilakukan dengan dasar hukum Archimedes yang menyatakan perbandingan antara berat sampel di udara ( $W_{udara}$ ) dengan perbedaan antara berat sampel di udara ( $W_{udara}$ ) dan berat sampel dalam fluida ( $W_{fluida}$ ) dikalikan dengan densitas dari fluida ( $\rho_{fluida}$ ), yang mengakibatkan adanya selisih volume cairan yang identik dengan volume sampel yang masuk dalam cairan (Barsoum, 2003). *Bulk density* dapat dihitung dengan Persamaan 4.1 berikut:

$$\rho_b = \frac{W_{udara}}{(W_{udara} - W_{fluida})} \times \rho_{fluida} \quad (4.1)$$

Densitas suatu komposit dapat diukur dengan menggunakan persamaan *rule of mixture* (Warren, 1991) yang dapat dilihat pada Persamaan 4.2.

$$\rho_t = \rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 \quad (4.2)$$

Setelah didapatkan nilai densitas teoritis ( $\rho_t$ ), maka nilai densitas relatif ( $\rho_{rel}$ ) dapat diketahui dengan membandingkan antara densitas aktual spesimen dengan densitas teoritis spesimen tersebut. Perhitungan densitas relatif dapat dinyatakan melalui Persamaan 4.3 sebagai berikut:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_b}{\rho_t} \times 100\% \quad (4.3)$$

#### 4.7.2 Pengujian Porositas

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah *volume* pori- pori yang dimiliki zat padat (*volume* kosong) dengan jumlah *volume* benda padat tersebut (ASTM D 695, 1992).

Perhitungan porositas dinyatakan melalui Persamaan (4.4) sebagai berikut:

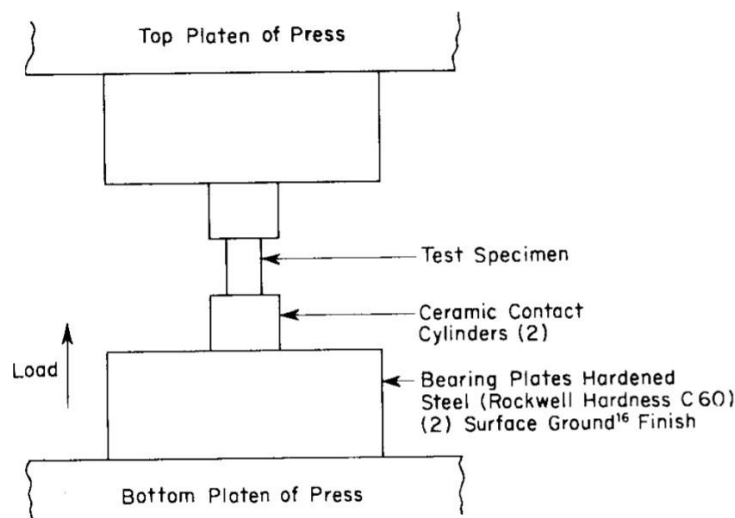
$$Porositas = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100\% \quad (4.4)$$

### 4.7.3 Pengujian Tekan

Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai kekuatan tekan dari spesimen uji. Kekuatan tekan adalah kemampuan suatu material untuk menahan beban yang akan mengurangi ukurannya, ketika batas maksimal tercapai spesimen akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk (patah/hancur). Pengukuran kekuatan tekan dapat dilakukan dengan memasukkan data yang di dapat dari mesin uji ke dalam kurva tegangan-regangan (*stress-strain*) dan juga dapat digunakan *standard* pengujian ASTM E 9 – 89 (1995). Persamaan 4.5 menunjukkan perhitungan kekuatan tekan.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.5)$$

Gambar 4.1 menunjukkan ilustrasi benda yang diuji, yang mana dikenai gaya pada kedua ujungnya.



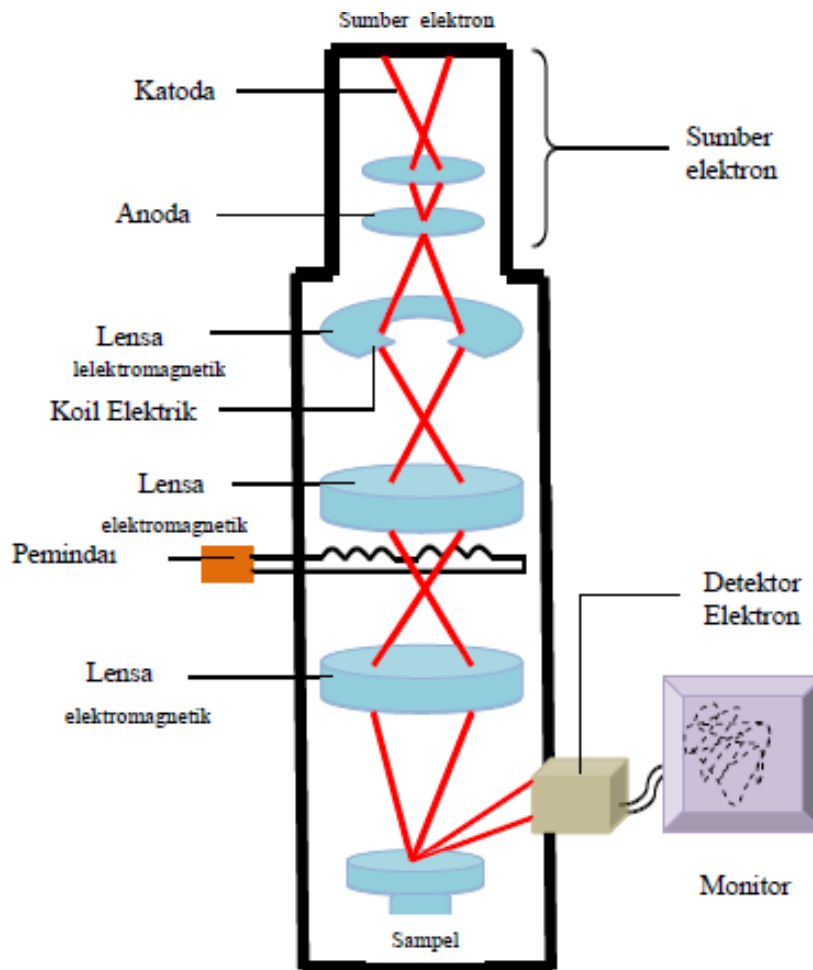
Gambar 4.2 Skema pengujian tekan (ASTM E 9-89, 1995)

#### 4.7.4 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) bertujuan untuk untuk mengetahui susunan partikel dan perubahan dari permukaan spesimen, khususnya akibat proses *sintering* dan variasi temperatur *sintering* (William, 1991). Keunggulan SEM terutama pada beragam sinyal yang dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron dengan sampel. Hasil dari pola refleksi dalam proses SEM ini memberikan informasi kepada kita berupa topologi, morfologi, komposisi, informasi mengenai kekristalan bahan.

Gambaran permukaan yang diperoleh merupakan gambaran topologi dengan semua tonjolan dan lekukan permukaan. Gambaran topologi ini diperoleh dari penangkapan elektron sekunder yang dipancarkan oleh sampel yang dilapisi konduktor sehingga berinteraksi dengan berkas elektron yang dapat memberi informasi mengenai struktur morfologi dan jenis unsur. Sinyal yang dihasilkan ditangkap oleh detektor kemudian direkam melalui monitor sehingga diperoleh gambaran topologi permukaan sampel.

Elektron yang dihasilkan dari proses SEM ini dihasilkan dari *electron gun*, elektron yang dipancarkan dari *electron gun* ini bersifat monokromatik. Pancaran elektron tersebut kemudian diteruskan pada anoda, pada proses ini elektron mengalami penyearahan menuju titik fokus, selain itu anoda pun berfungsi untuk membatasi (meng-eliminasi) pancaran elektron yang memiliki sudut hambur yang terlalu besar. Kemudian berkas elektron yang telah melewati anoda diteruskan menuju lensa magnetik, *scanning coils*, dan akhirnya elektron tersebut menembak *specimen*. Skema SEM ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.3 Skema kerja *Scanning Electron Microscope* (Goldstein, 1981).

#### 4.7.5 Susut Bakar

Susut bakar pada penelitian ini terdiri dari dua bagian, yaitu:

- Susut bakar volume, yaitu perbandingan perubahan volume spesimen sebelum dan sesudah di-*sinter* ( $\Delta V$ ) dengan volume spesimen sebelum di- *sinter* ( $V_0$ ), dinyatakan pada Persamaan 4.6 sebagai berikut:

$$\% \text{ Susut bakar volume} = \frac{V_o - V_t}{V_o} \times 100\% \quad (4.6)$$

- b. Susut bakar massa, yaitu perbandingan perubahan massa spesimen sebelum dan sesudah di-sinter ( $\Delta m$ ) dengan massa spesimen sebelum di-sinter ( $m_o$ ), dinyatakan pada Persamaan 4.7 sebagai berikut:

$$\% \text{ Susut bakar massa} = \frac{m_o - m_t}{m_o} \times 100\% \quad (4.7)$$

Susut bakar pada umumnya terjadi akibat hilangnya air ( $H_2O$ ) dari campuran pada *green body* karena penguapan pada proses *sintering* dan terjadinya reaksi zat aditif dalam keramik dan butiran kecil keramik menyatu aktif terhadap butiran besar, dan pada kasus ini hilangnya kandungan tepung beras juga menyebabkan penyusutan.

#### 4.7.6 Pengujian Konduktivitas Termal

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan spesimen keramik dalam mengalirkan kalor secara konduksi yang akan terlihat dari angka konduktivitas termalnya. Perpindahan kalor secara konduksi dapat terjadi apabila fluks energi panas  $q$  melalui penampang  $A$  pada arah  $x$ , dinyatakan dalam Persamaan 3.1 dimana  $dT/dx$  menyatakan gradien suhu dan  $k$  adalah nilai koefisien konduksi termal (Leinhard, 2008)

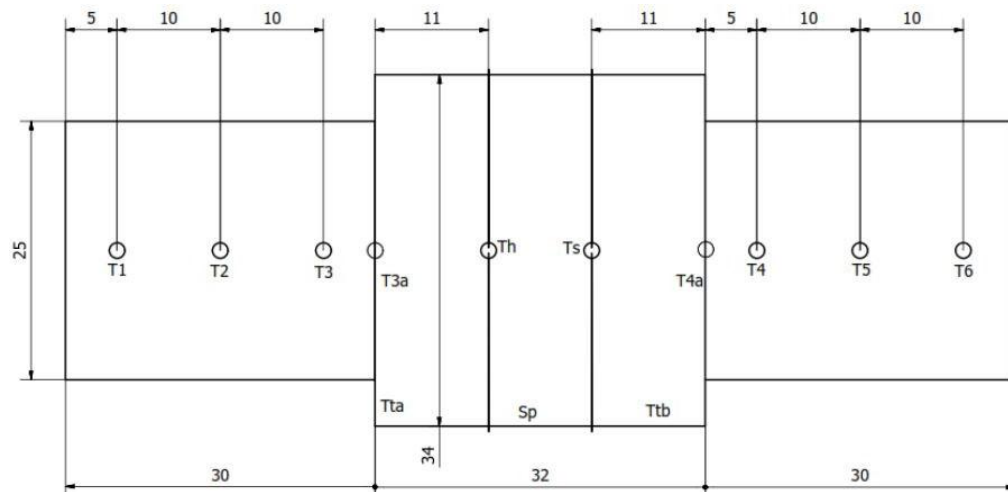
Nilai  $q$  sudah terlebih dahulu ditentukan, yaitu sebesar 10 Watt (Darwanto, 2008).  $A$  adalah luas penampang spesimen uji dan nilai  $\Delta T$

didapatkan dari alat uji.

$$q = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4.8)$$

Data yang dicari adalah suhu pada titik T1, T3 dan T4 – T6.

Gambar 4.3 menerangkan skema alat uji yang digunakan dalam pengujian.



Gambar 4.4 Skema alat uji konduktivitas termal (Yunitasari, 2016)

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

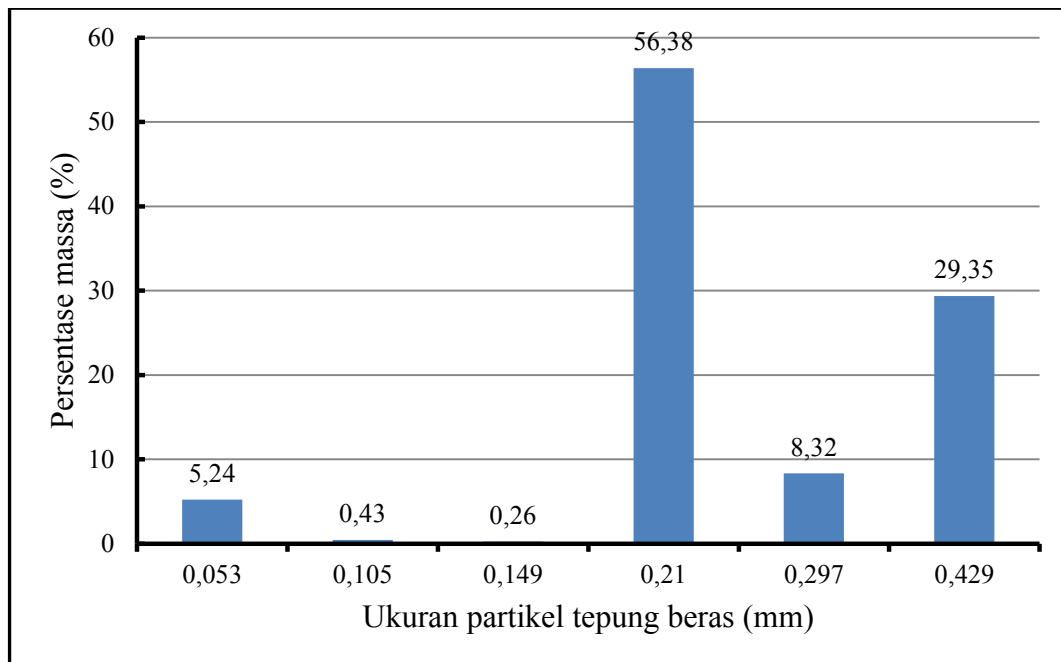
#### 5.1 Pengujian Densitas dan Porositas pada variasi komposisi campuran

##### 5.1.1 Distribusi Ukuran Serbuk Tepung Beras (*Rice Flour*)

Pada penelitian ini diperlukan adanya data distribusi ukuran tepung beras yang digunakan sebagai PFA (*Pore-Forming Agent*) pada keramik berpori. Data yang ditampilkan adalah perbandingan massa dari tepung beras dengan ukuran dari serbuk, dimana total massa dari serbuk yang diambil sebagai sampel adalah sebesar 50 gram dan ukuran serbuk dengan kuantitas tertinggi dilihat dari nilai massanya adalah serbuk dengan ukuran 0,429 mm. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan Gambar 5.1

Tabel 5.1 Data distribusi ukuran serbuk tepung beras

No	Ukuran (mm)	Massa (gr)	Persentase Massa(%)
1	0,053	2,620	5,24
2	0,105	0,219	0,44
3	0,149	0,133	0,27
4	0,210	28,191	56,38
5	0,297	4,162	8,32
6	0,429	14,675	29,35
Total		50,000	100



Gambar 5.1 Grafik distribusi ukuran serbuk tepung beras

### 5.1.2 Perhitungan Konversi Fraksi Volume Zirconia dan Tepung Beras pada *Green Body*

Dalam pembuatan *green body*, ukuran cetakan yang digunakan pada masing-masing pengujian berbeda. Pada pengujian tekan, densitas untuk variasi komposisi campuran dan struktur mikro digunakan cetakan silindris dengan *green body* yang dihasilkan mempunyai dimensi diameter sekitar 15 mm dan tebal 14-20 mm. Untuk pengujian konduktivitas termal digunakan cetakan silindris dengan dimensi diameter 30 mm dan tebal sekitar 4-9 mm.

Pada penelitian ini, spesimen dengan komposisi fraksi berat yang telah dikonversi dari variasi komposisi fraksi volume spesimen. Pada Tabel 5.3 menunjukkan konversi fraksi volume ke fraksi berat, dan untuk mempermudah perhitungan masing-masing komposisi dapat diberi penamaan seperti pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Penamaan komposisi spesimen uji

No	Komposisi Fraksi Volume	Kode
1	100% zirconia - 0% tepung beras	100Z
2	90% zirconia - 10% tepung beras	90Z10Tb
3	80% zirconia - 20% tepung beras	80Z20Tb
4	70% zirconia - 30% tepung beras	70Z30Tb
5	60% zirconia - 40% tepung beras	60Z40Tb
6	50% zirconia - 50% tepung beras	50Z50Tb

Fraksi Berat masing-masing zirconia dan tepung beras ditentukan dengan rumus konversi fraksi volume ke fraksi berat (Gibson, 1994), yaitu :

$$\%W_{Zr} = \left( \frac{\rho_Z \cdot \%V_Z}{\rho_Z \cdot \%V_Z + \rho_{Tb} \cdot \%V_{Tb}} \right) \quad (5.1)$$

Contoh perhitungan pada komposisi 90Z10Tb (90% zirconia - 10% tepung beras) untuk cetakan diameter 15 mm dan tebal 10 mm (volume = 1,767 cm<sup>3</sup>).

Diketahui:  $\rho_Z = 5,9 \text{ gr/cm}^3$   
 $\rho_{Tb} = 0,8 \text{ gr/cm}^3$  (Fan dkk, 1997)  
 $\%V_Z = 90\%$   
 $\%V_{Tb} = 10\%$

Perhitungan konversi fraksi volume ke fraksi berat variasi komposisi menjadi :

$$\%W_{Zr} = \left( \frac{\rho_{Zr} \cdot \%V_{Zr}}{\rho_{Zr} \cdot \%V_{Zr} + \rho_{Tb} \cdot \%V_{Tb}} \right)$$

$$\%W_{Zr} = \left( \frac{5,9 \cdot 90}{5,9 \cdot 90 + 0,8 \cdot 10} \right) = 98,69\%$$

Tabel 4.1 Tabel konversi fraksi volume ke fraksi berat spesimen

No	% Volume		% Berat	
	ZrO <sub>2</sub>	Tb	ZrO <sub>2</sub>	Tb
1	100	0	100,00	0
2	90	10	98,69	1,30
3	80	20	97,12	2,88
4	70	30	95,16	4,84
5	60	40	92,67	7,33
6	50	50	89,39	10,60

### 5.1.3 Uji Densitas dan Porositas pada Variasi Komposisi

Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan data *bulk density*, densitas relatif, porositas dari masing-masing komposisi campuran yang tertuang dalam spesimen terlebih dahulu dicetak menjadi *green body* dan di-sinter pada suhu *optimum*, yaitu 1450°C (Marpaung, 2016), kemudian ditahan selama 2 jam di udara dan diturunkan kembali ke suhu ruangan.

Dari pengujian didapatkan data *bulk density*, densitas relatif dan porositas yang tersaji masing-masing pada Tabel 5.4, 5.5, dan 5.6.

Contoh perhitungan :

1. *Bulk density* pada spesimen 90Z10Tb nomor 1

$$\begin{aligned}\text{Diketahui} \quad & W_{\text{udara}} = 8,51 \text{ gr/cm}^3 \\ & W_{\text{fluida}} = 8,06 \text{ gr/cm}^3 \\ & \rho_{\text{fluida}} = \rho_{\text{Hg}} = 13,595 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

Perhitungan *bulk density* menjadi :

$$\begin{aligned}\rho_b &= \frac{W_{\text{udara}}}{(W_{\text{udara}} - W_{\text{fluida}})} \times \rho_{\text{fluida}} \\ \rho_b &= \frac{8,067}{(8,067 - (-11,179))} \times 13,595 = 5,7 \text{ gr/cm}^3\end{aligned} \quad (4.1)$$

2. Densitas relatif spesimen 90Z10Tb nomor 1

$$\begin{aligned}\text{Diketahui} \quad & \rho_b = 5,7 \text{ gr/cm}^3 \\ & \rho_t = 5,9 \text{ gr/cm}^3 \text{ (zirconia)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{rel}} &= \frac{\rho_b}{\rho_t} \times 100\% \\ &= \frac{5,7}{5,9} \times 100\% = 96,61 \%\end{aligned} \quad (4.3)$$

### 3. Porositas pada spesimen 90Z10Tb nomor 1

Diketahui  $\rho_b = 5,7 \text{ gr/cm}^3$   
 $\rho_t = 5,9 \text{ gr/cm}^3$  (zirconia)

$$\begin{aligned} \text{Porosity} &= \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{5,7}{5,9}\right) \times 100\% = 3,38\% \end{aligned} \quad (4.4)$$

Tabel 5.4. Hasil perhitungan *bulk density* pada tiap komposisi spesimen

Fraksi volume Tb (%)	0	10	20	30	40	50
<i>Bulk density</i> (gr/cm <sup>3</sup> )	5,84	5,68	5,35	4,99	4,69	4,4

Tabel 5.5 Hasil perhitungan densitas relatif pada tiap komposisi spesimen

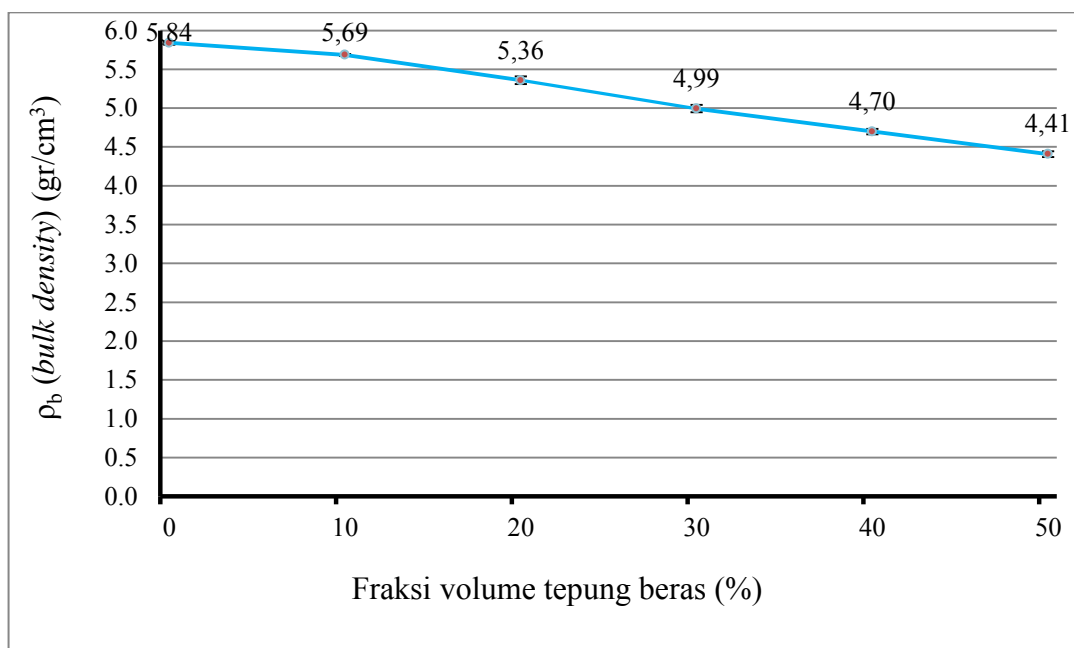
Fraksi volume Tb (%)	0	10	20	30	40	50
Densitas relatif rata- rata (%)	98,99	96,38	90,83	84,64	79,64	74,71

Tabel 5.6. Hasil perhitungan porositas pada tiap komposisi spesimen

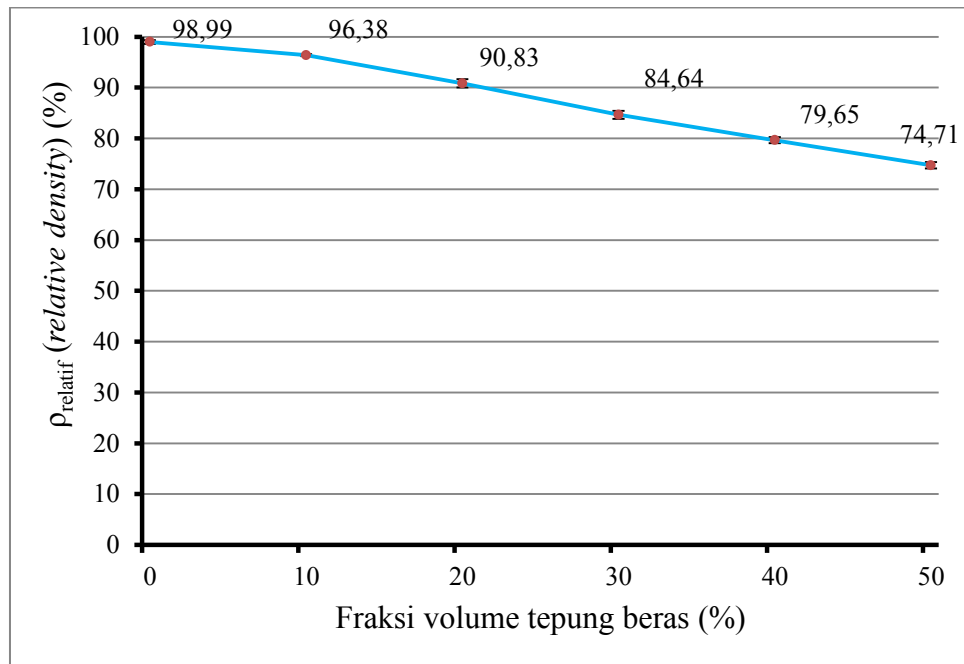
Fraksi volume Tb (%)	0	10	20	30	40	50
Porositas (%)	1,008	3,61	9,16	15,35	20, 5	25,28

Dari uraian hasil pengukuran dan perhitungan, dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya fraksi volume tepung beras yang berperan sebagai pembentuk pori mengakibatkan nilai *bulk density* dan densitas relatif spesimen mengalami penurunan (Gambar 5.2 dan 5.3). Komposisi 50Z50Tb memiliki nilai *bulk density* dan densitas relatif terendah yaitu

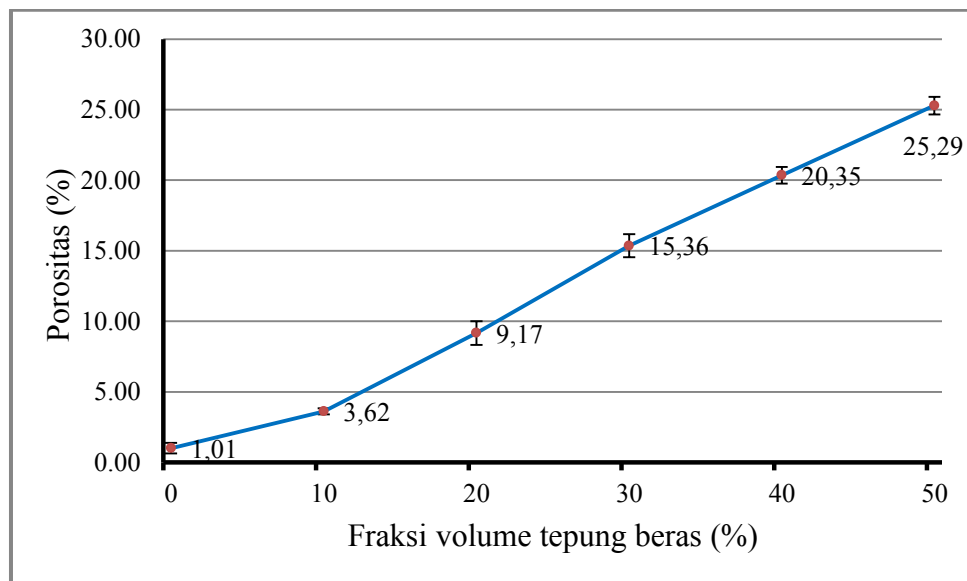
masing-masing sebesar 4,4 gr/cm<sup>3</sup> dan 74,71 %. Sejalan dengan itu, pada Gambar 5.4, porositas spesimen mengalami *trend* naik dengan porositas tertinggi dimiliki oleh spesimen dengan komposisi 50Z50Tb dengan nilai sebesar 25,28 %. Hal ini disebabkan oleh semakin renggangnya ikatan antar partikel oleh semakin banyaknya pori yang ditinggalkan serbuk tepung beras pada saat proses *sintering*.



Gambar 5.2. Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap nilai *bulk density* spesimen pada setiap komposisi



Gambar 5.3. Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap nilai densitas relatif spesimen pada setiap komposisi



Gambar 5.4. Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap nilai porositas spesimen pada setiap komposisi

## 5.2 Pengujian Penyusutan Volume

Setelah dilakukan pembentukan *green body*, masing-masing spesimen tersebut diukur volumenya kemudian di-sinter pada suhu 1450° C dan ditahan selama 2 jam di udara. Selama proses *sintering*, terdapat kandungan air, tepung beras dan material lain yang menguap dan terdensifikasi sehingga terjadilah penyusutan volume. Tujuan utama dari uji penyusutan volume adalah untuk mengetahui seberapa besar penyusutan yang terjadi pada masing-masing komposisi spesimen. Besarnya penyusutan volume diperoleh dari perbandingan pengurangan volume akhir dengan volume awal sebelum proses *sintering*. Penyusutan volume spesimen dapat dilihat pada Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Data susut *volume* komposisi 90Z10Tb

Nomor Spesimen	Diameter (mm)		Tebal (mm)		Volume (mm <sup>3</sup> )	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir
1	15,1	11,6	15,9	13,6	2,84	1,43
2	15	11,7	16,3	13,6	2,87	1,46
3	15	11,5	16,1	13,95	2,84	1,44

Contoh perhitungan pada spesimen 90Z10Tb (10 % volume tepung beras) yang di-sinter pada suhu 1450°C

$$\text{penyusutan volume} = \frac{v_o - v_t}{v_o} \times 100\% \quad (4.6)$$

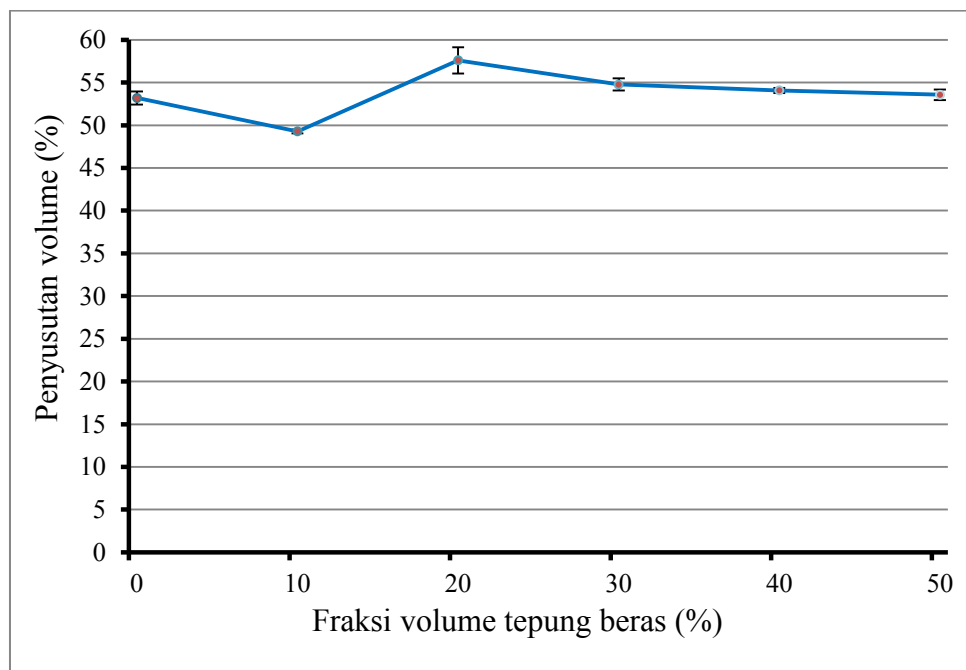
$$\text{penyusutan volume 1} = \frac{2,84 - 1,43}{2,845907} \times 100\% = 49,52 \%$$

$$\text{penyusutan volume 2} = \frac{2,87 - 1,46}{2,87} \times 100\% = 49,23 \%$$

$$\text{penyusutan volume 3} = \frac{2,84 - 1,44}{2,84} \times 100\% = 49,07 \%$$

$$\text{rata-rata penyusutan volume} = \frac{49,52 + 49,23 + 49,07}{3} = 49,27 \%$$

Hasil pengujian penyusutan *volume* ditunjukkan pada Gambar 5.5. Pada Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa grafik penyusutan *volume* cenderung fluktuatif. Tepung beras meninggalkan pori/lubang pada saat spesimen melewati proses sintering dengan ukuran pori yang cenderung lebih kecil dibanding ukuran serbuknya. Inilah yang menyebabkan penyusutan *volume* spesimen tidak berbanding lurus dengan kenaikan fraksi volume tepung beras. Nilai penyusutan *volume* yang terkecil terjadi pada spesimen dengan komposisi 90% zirconia - 10% tepung beras yaitu sebesar  $(49,28 \pm 0,22)\%$  sedangkan nilai penyusutan *volume* terbesar terjadi pada spesimen dengan komposisi 80% zirconia - 5% tepung beras yaitu sebesar  $(57,99 \pm 1,53)\%$ .



Gambar 5.5. Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap penyusutan volume spesimen

### 5.3 Pengujian Penyusutan Massa

Setelah dilakukan pembentukan *green body*, masing-masing *specimen* tersebut diukur massanya kemudian di *sinter* pada suhu 1450°C dan ditahan selama 2 jam. Selama proses *sintering*, terdapat kandungan air, serbuk tepung beras dan material lain yang menguap dan terdensifikasi sehingga terjadilah penyusutan massa. Tujuan utama dari uji penyusutan massa adalah untuk mengetahui seberapa besar penyusutan yang terjadi pada masing-masing komposisi spesimen pada suhu *sintering* 1450 °C. Besarnya penyusutan massa diperoleh dari perbandingan pengurangan massa dengan massa awal sebelum proses *sintering*. Penyusutan volume spesimen dapat dilihat pada Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Data susut massa komposisi 90Z10Tb

Nama SPesimen	Nomor Spesimen	Massa (gr)	
		Awal	Akhir
90Z10Tb	1	8,51	8,06
	2	8,79	8,03
	3	8,72	8,06

Contoh perhitungan pada spesimen 90Z10Tb yang di-sinter pada suhu 1450°C.

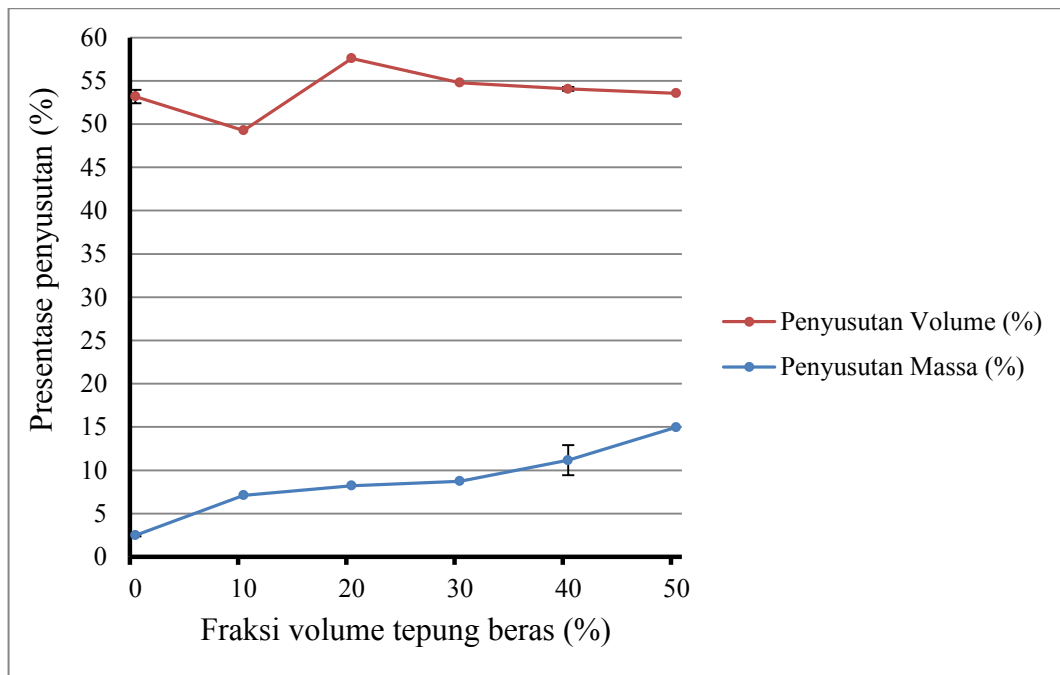
$$\text{Penyusutan massa} = \frac{m_o - m_t}{m_o} \times 100\% \quad (4.7)$$

$$\text{Penyusutan massa 1} = \frac{8,51 - 8,06}{8,51} \times 100\% = 5,21 \%$$

$$\text{Penyusutan massa 2} = \frac{8,79 - 8,03}{8,79} \times 100\% = 8,63 \%$$

$$\text{Penyusutan massa 3} = \frac{8,72 - 8,06}{8,72} \times 100\% = 7,48 \%$$

$$\begin{array}{lcl} \text{rata-rata penyusutan} & & \\ \text{massa} & = & \frac{5,21 + 8,63 + 7,48}{3} = 7,11 \% \end{array}$$

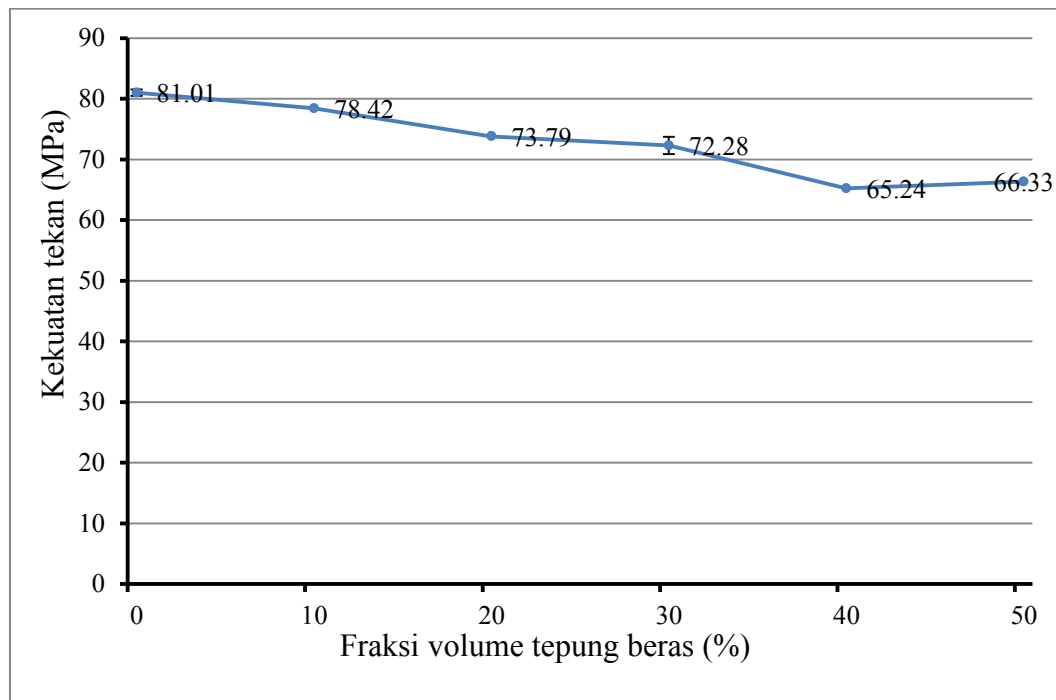


Gambar 5.6. Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap penyusutan massa & volume spesimen

Pada Gambar 5.6 dapat dibandingkan penyusutan massa dan volume terhadap variasi volume tepung beras. Penyusutan massa cenderung memiliki kenaikan seiring penambahan volume tepung beras yang dicampurkan. Berbeda dengan penyusutan volume yang cenderung fluktuatif. Nilai penyusutan massa terbesar dari hasil pengujian terjadi pada material 50Z50Tb (50% zirconia % 50% tepung beras) sebesar  $14,97 \pm 1,92$  %. Penyusutan massa pada komposisi ini tergolong rendah karena berat tepung beras pada campuran sangat kecil setelah dikonversi dari fraksi volume, yang terdekomposisi pada saat *sintering* ditambah dengan menguapnya air dan senyawa lain yang mungkin terperangkap, yang mengakibatkan rendahnya angka susut massa spesimen.

#### 5.4 Pengujian Tekan

Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan beban tekan secara bertahap dan konsisten sampai spesimen patah. Gambar 5.7 menunjukkan hasil pengujian.



Gambar 5.7. Pengaruh fraksi volume tepung beras terhadap kekuatan tekan ( $\sigma$ ) spesimen

Dari Gambar 5.7 dapat kita lihat bahwa fraksi volume tepung beras mempengaruhi kekuatan tekan spesimen pada semua komposisi. Semakin besar persen volume tepung beras pada spesimen, maka spesimen akan semakin getas/rapuh, yang disebabkan oleh semakin rendahnya kekuatan tekan spesimen. Dalam hal ini pori-pori pada spesimen menyebabkan munculnya konsentrasi tegangan, dimana konsentrasi tegangan terjadi pada daerah-daerah yang dimensinya berubah drastis, misalnya di sekitar lubang/pori, *fillet*, *discontinuity*, dan lain-lain (Beer dkk, 2006). Selain itu, semakin banyaknya pori-pori menyebabkan pengurangan luasan penampang spesimen. Hal inilah yang merupakan penyebab dari turunnya nilai kekuatan tekan spesimen. Dari hasil

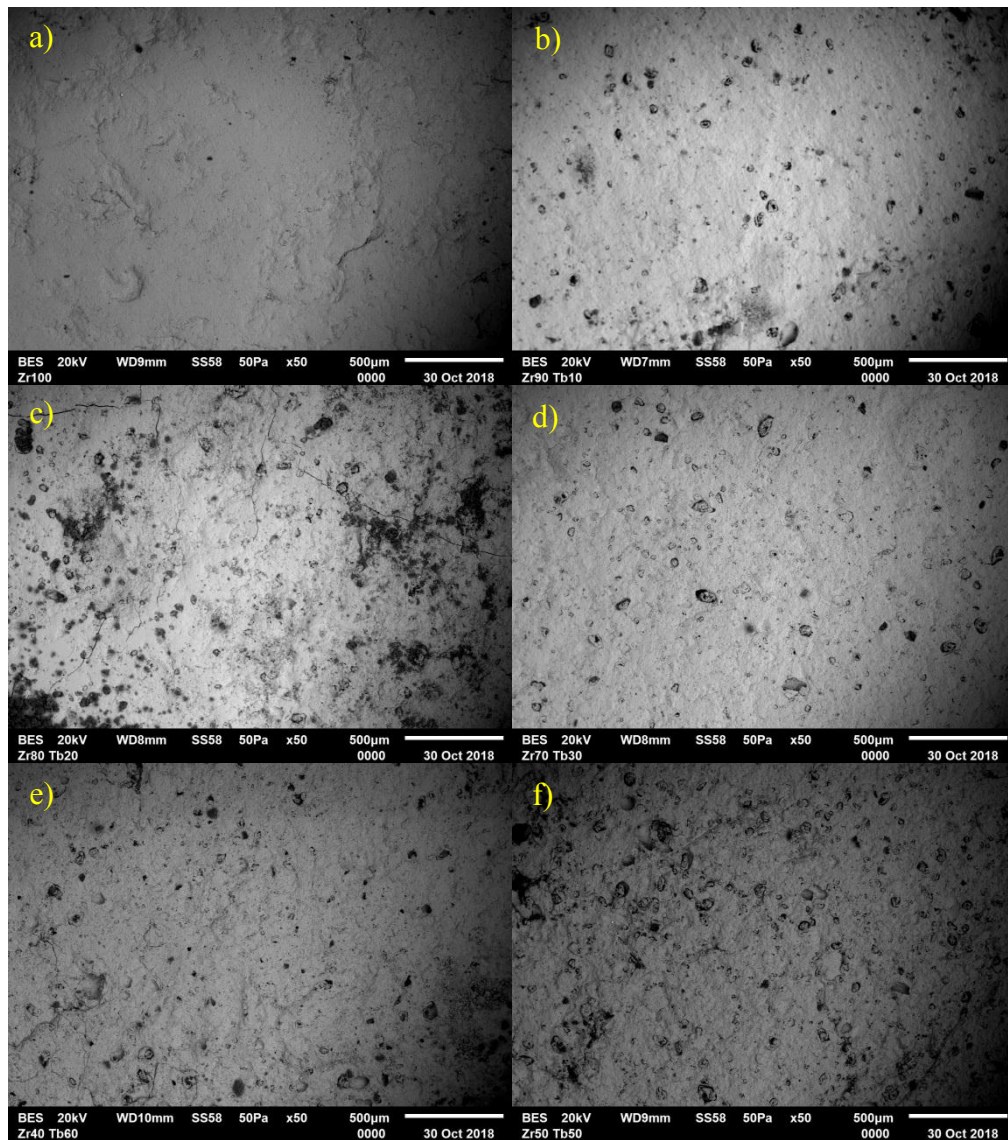
pengujian terlihat bahwa nilai rerata kekuatan tekan ( $\sigma$ ) tertinggi dimiliki oleh spesimen 100Z (100% zirconia – 0% tepung Beras) yaitu  $81,02 \pm 0,54$  MPa dan nilai rerata kekuatan tekan ( $\sigma$ ) terkecil dimiliki oleh 60Z40Tb (60% zirconia – 40% tepung beras) dengan nilai  $65,23 \pm 0,55$  MPa.

## 5.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

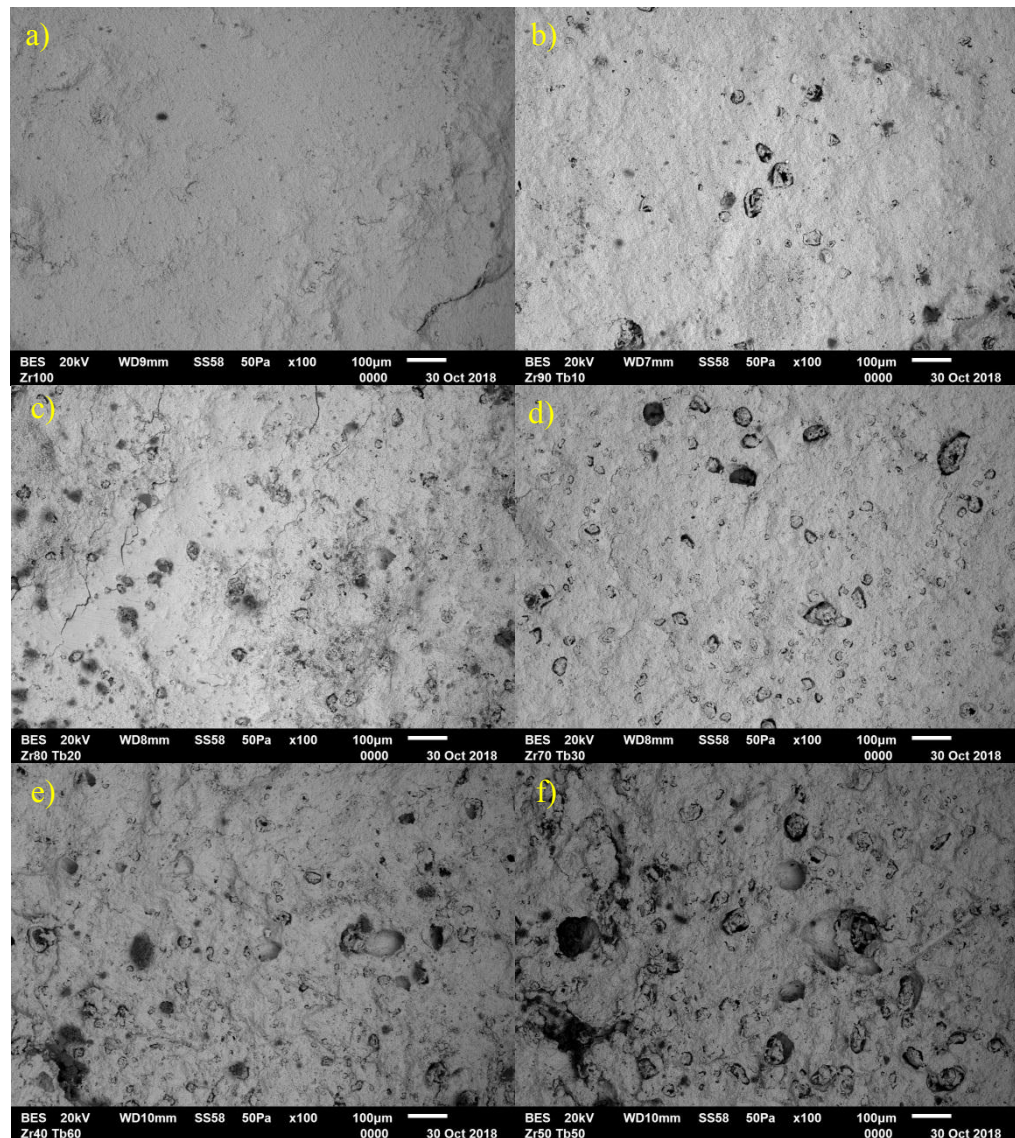
Pengamatan ini menggunakan foto *scanning* SEM melintang spesimen utuh sebagai media untuk mendapatkan citra dari bahan PFA (*Pore-Forming Agent*) tepung beras.

Pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui bentuk dan ukuran partikel. Foto/citra permukaan spesimen keramik berpori menggunakan foto *scanning* SEM melintang spesimen utuh menunjukkan ukuran pori dan persebarannya, dengan komposisi campuran pada spesimen 0, 10, 20, 30, 40, 50 fraksi volume tepung beras. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa serbuk tepung beras dapat digunakan sebagai bahan pembentuk pori. Semakin besar fraksi volume tepung beras, maka porositas semakin besar terlihat dari banyaknya lubang yang terbentuk akibat serbuk tepung beras yang terbakar pada saat proses *sintering*. Selain itu, juga terlihat bahwa semakin besar fraksi volume tepung beras, maka ukuran pori juga semakin besar akibat penggabungan serbuk tepung beras.

Pada Gambar 5.8 dan 5.9 menunjukkan persebaran pori-pori pada penampang melintang spesimen utuh dengan persebaran 50 dan 100 kali saat pengambilan gambar, dan Gambar 5.10 menunjukkan ukuran pori-pori yang terbentuk.

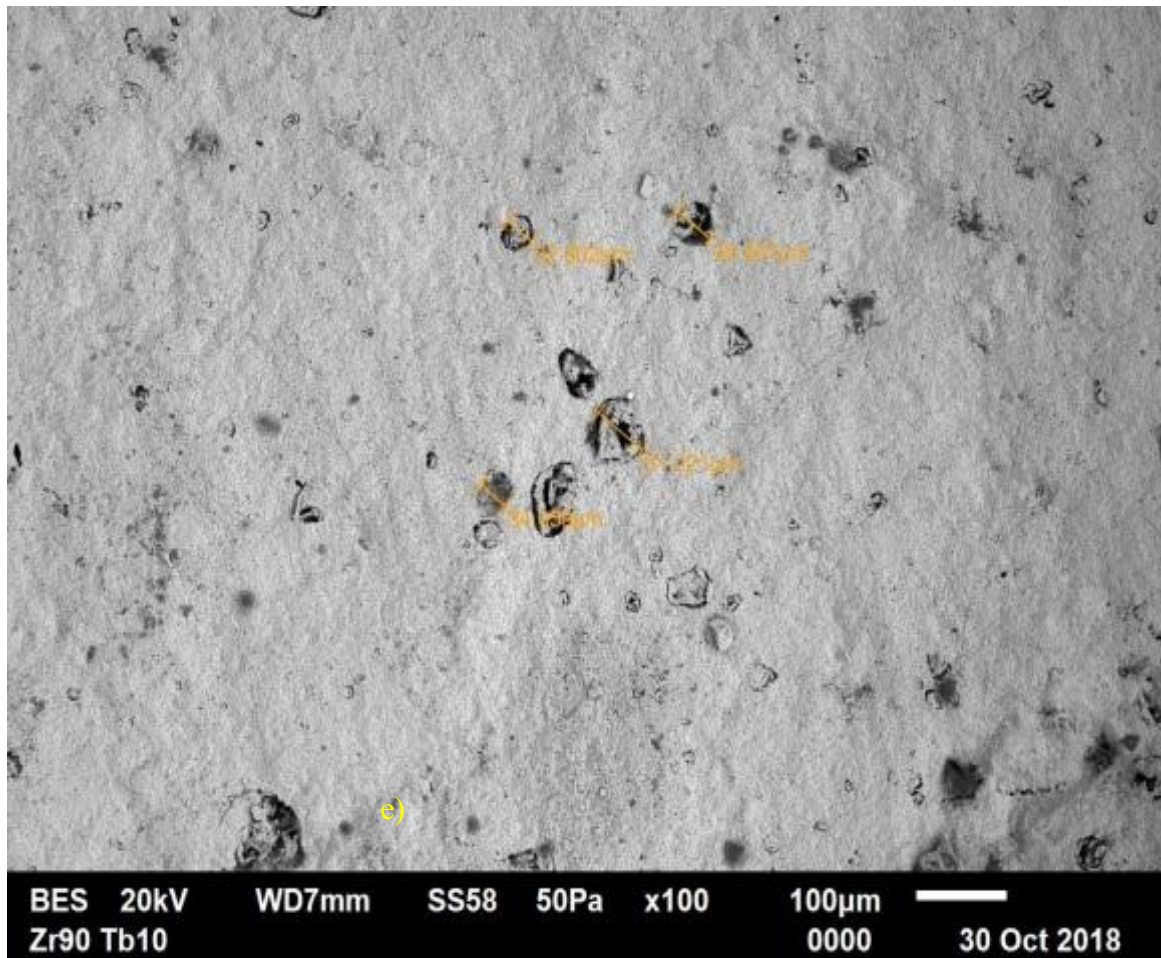


Gambar 5.8. Citra hasil pengamatan permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan variasi fraksi (%) volume tepung beras (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40%, (f) 50%

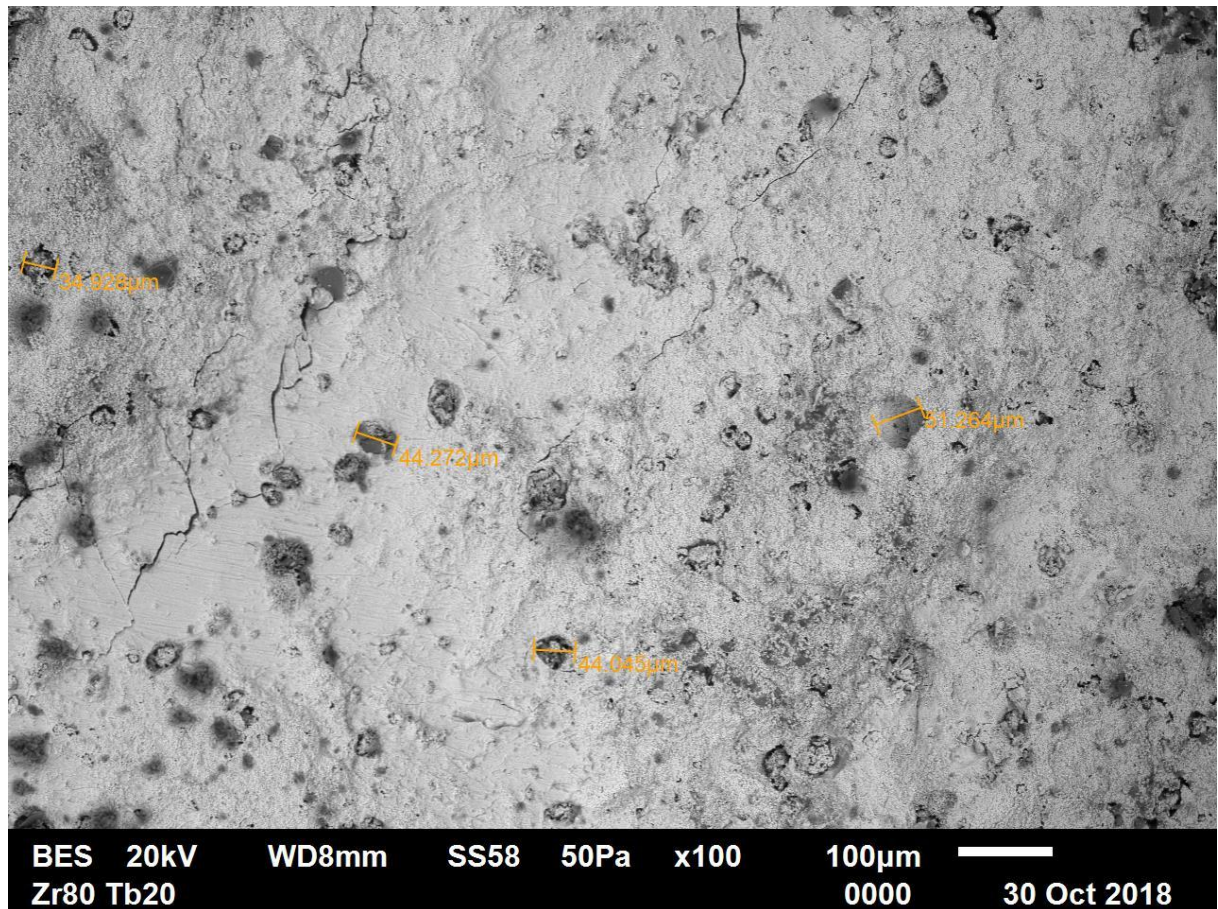


Gambar 5.9. Citra hasil pengamatan permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan variasi fraksi (%) volume tepung beras (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40%, (f) 50%

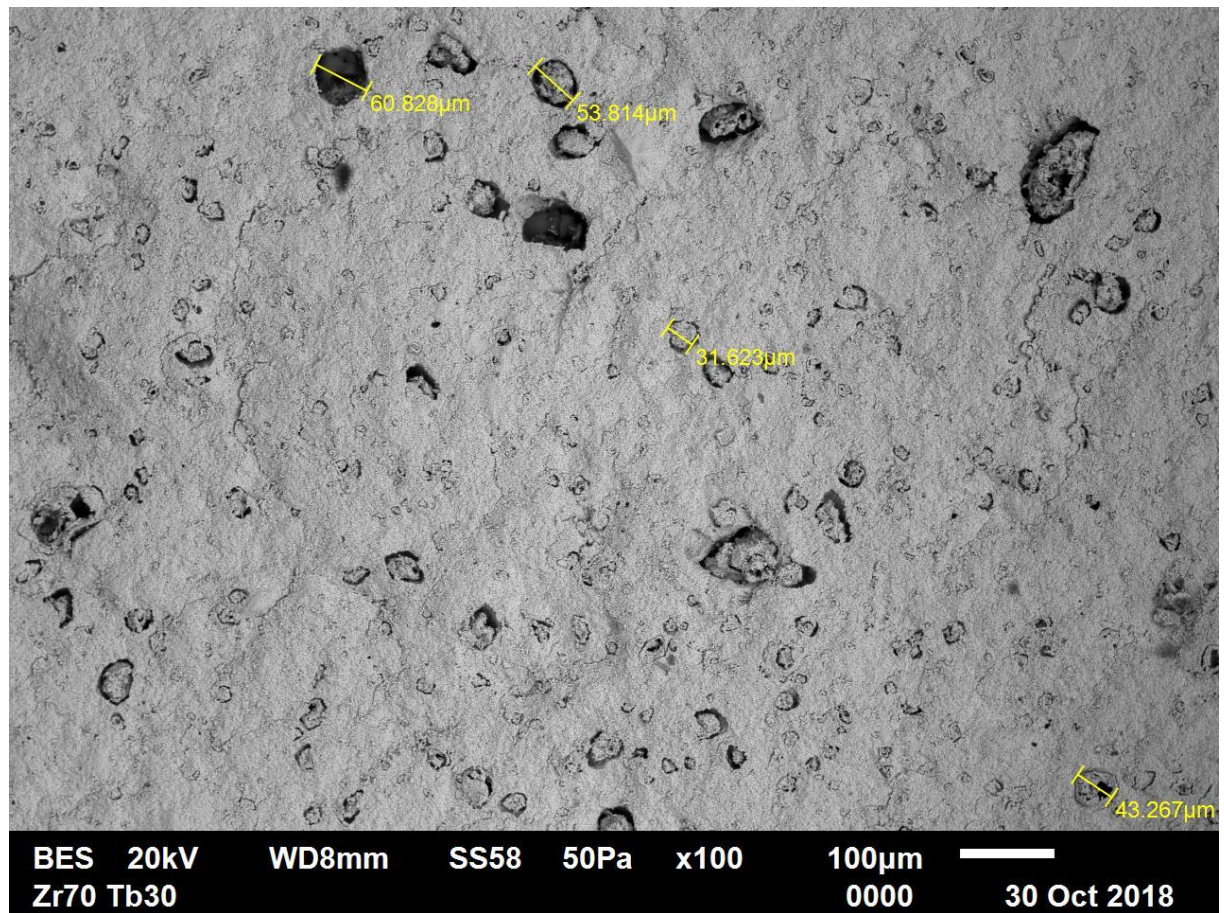
a)



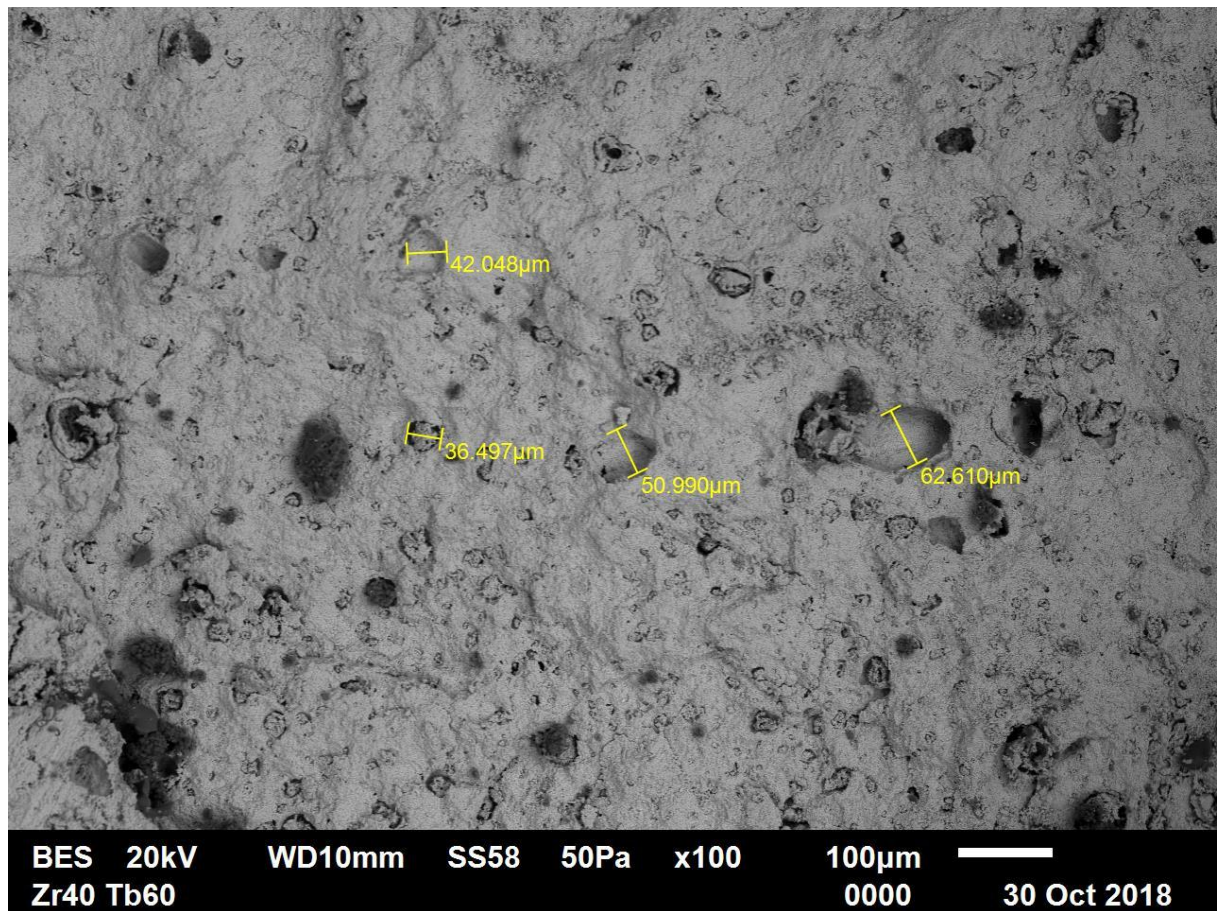
Gambar 5.10 Ukuran pori pada permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan fraksi volume tepung beras 10 %



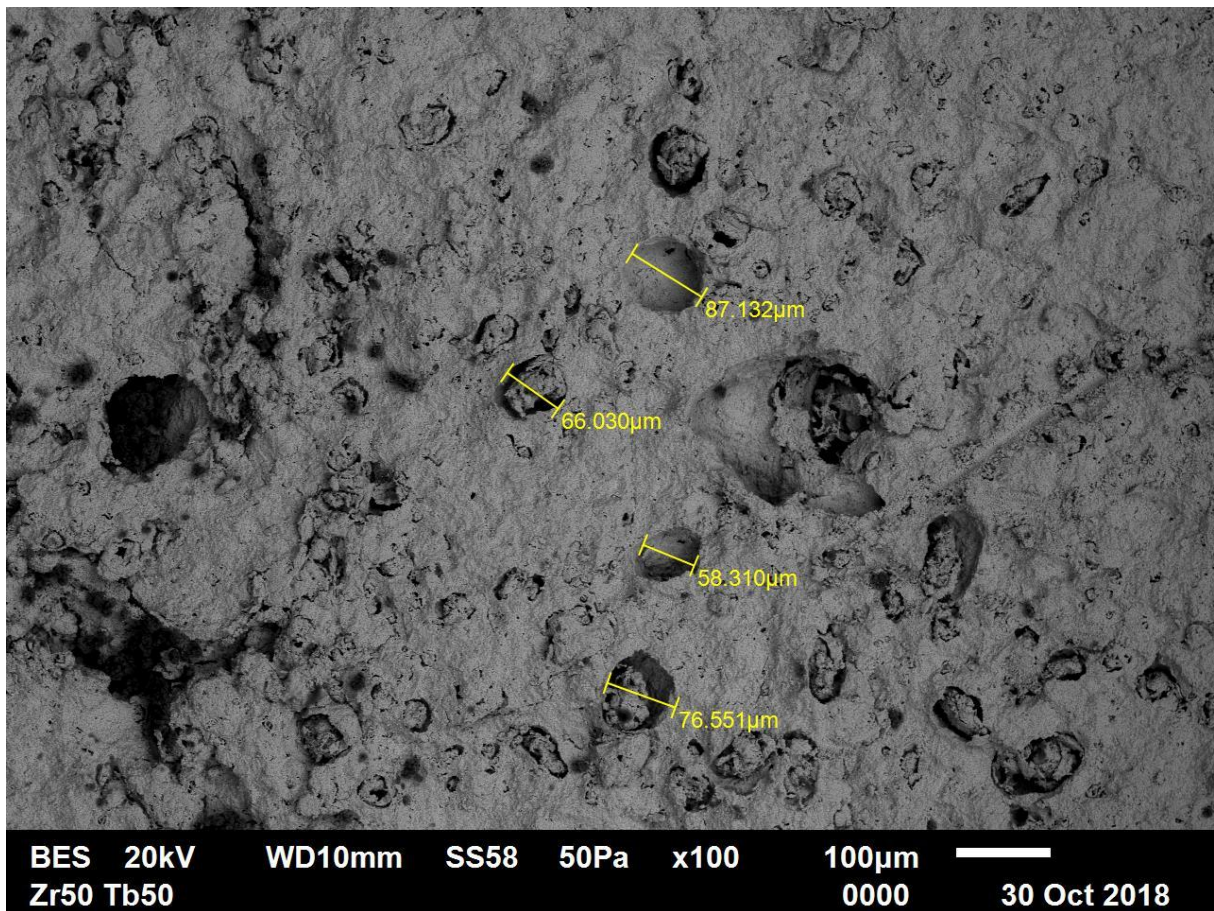
Gambar 5.11 Ukuran pori pada permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan fraksi volume tepung beras 20 %



Gambar 5.12 Ukuran pori pada permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan fraksi volume tepung beras 30 %



Gambar 5.13 Ukuran pori pada permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan fraksi volume tepung beras 40 %



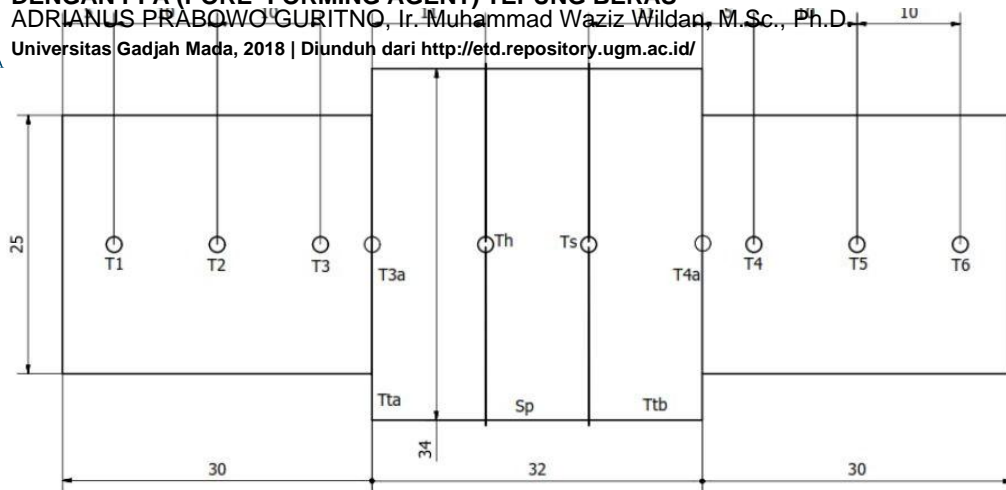
Gambar 5.14 Ukuran pori pada permukaan keramik berpori dengan foto citra SEM dengan fraksi volume tepung beras 50 %

## 5.6 Hasil Uji *Thermal Conductivity*

Dari pengambilan data yang telah dilakukan, perlu dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai  $T_h$ ,  $T_s$ , dan konduktivitas termal. Berikut contoh hasil pengambilan data dan perhitungan pada spesimen 90Z10Tb pada suhu sintering 1450°C.

Tabel 5.9. Hasil pengambilan data spesimen 90Z10Tb

No	Posisi Titik	Suhu pengukuran pada masing-masing titik (°C) pada waktu ke (menit)						
		120	130	140	150	160	170	180
1	$T_1$	88,5	88,7	89	89,1	89,6	89,8	89,9
2	$T_2$	82,3	82,5	82,8	83	83,3	83,5	83,6
3	$T_3$	83,4	83,6	83,9	84,1	84,4	84,6	84,7
4	$T_{3a}$	73	73,2	73,5	73,85	73,85	74,05	74,15
5	$T_h$	72,62	72,82	73,12	73,47	73,47	73,67	73,77
6	$T_s$	35,38	35,83	36,28	36,38	36,58	36,78	36,88
7	$T_{4a}$	35	35,45	35,9	36	36,2	36,4	36,5
8	$T_4$	36,6	36,8	37,2	37,3	37,6	37,8	37,9
9	$T_5$	35	35,3	35,6	35,7	35,9	36,1	36,2
10	$T_6$	35	35,2	35,4	35,5	35,7	35,9	36



Gambar 4.3 Skema alat uji konduktivitas termal (Yunitasari, 2016)

Contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai T3a dengan menggunakan turunan persamaan diatas menjadi :

$$q = -k_{cu}A \frac{(T_h - T_{3a})}{\Delta x_{cu}} = -k_{sp}A_{sp} \frac{(T_s - T_h)}{\Delta x_{sp}} = -k_{cu}A \frac{(T_{4a} - T_s)}{\Delta x_{cu}} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} -k_{cu}A \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_{2-1}} &= -k_{cu}A \frac{(T_{3a} - T_2)}{\Delta x_{3a-2}} \\ \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_{2-1}} &= \frac{(T_{3a} - T_2)}{\Delta x_{3a-2}} \\ \frac{(T_2 - T_1)}{10} &= \frac{(T_{3a} - T_2)}{15} \\ 15 \cdot (T_2 - T_1) &= 10 \cdot (T_{3a} - T_2) \\ 15T_2 - 15T_1 &= 10T_{3a} - 10T_2 \\ 10T_{3a} &= \frac{(25T_2 - 15T_1)}{10} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Dengan menggunakan data Tabel 5.9 pada waktu 180 menit, Persamaan 5.3 menjadi

$$T_{3a} = \frac{25T_2 - 15T_1}{10}$$

$$T_{3a} = \frac{25 \times 83,6 - 15 \times 89,9}{10}$$

$$T_{3a} = 74,15^\circ\text{C}$$

Dengan nilai  $T_{3a}$  maka dapat digunakan untuk menghitung nilai  $T_h$  dengan menggunakan Persamaan 5.2

$$q = -k_{cu}A \frac{(T_h - T_{3a})}{\Delta x_{cu}} = -k_sA \frac{(T_s - T_h)}{\Delta x_s} = -k_{cu}A \frac{(T_{4a} - T_s)}{\Delta x_{cu}} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} q &= -k_{cu}A \frac{(T_h - T_{3a})}{\Delta x_{cu}} \\ q(\Delta x_{cu}) &= -k_{cu}A (T_h - T_{3a}) \\ T_h &= T_{3a} - \frac{q(\Delta x_{cu})}{k_{cu}A} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Diketahui :

$$\begin{aligned} q &= 10 \text{ watt} \\ k_{cu} &= 381,339 \text{ W/m}^\circ\text{C} \text{ ( Holman, 1995)} \\ \Delta x_{cu} &= 0,011 \text{ m (Tebal tembaga } T_{ta} \text{ dan } T_{tb}) \\ A &= 9,3482 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (Luas penampang tembaga } T_{ta} \text{ dan } T_{tb}) \end{aligned}$$

Dengan memasukkan semua data yang ada pada Persamaan 5.4, didapatkan nilai  $T_h$  seperti pada hitungan di bawah berikut

$$Th = 74.15 - \frac{(10 \times 0,011)}{381,339 \times 9,3482 \times 10^{-4}}$$

$$Th = 74,15 - 0,38$$

$$Th = 73,77 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai  $T_{4a}$  dengan menggunakan turunan

Persamaan 5.2 menjadi :

$$\begin{aligned} -k_{cu}A \frac{(T_6 - T_5)}{\Delta x_{6-5}} &= -k_{cu}A \frac{(T_5 - T_{4a})}{\Delta x_{5-4a}} \\ \frac{(T_6 - T_5)}{\Delta x_{6-5}} &= \frac{(T_5 - T_{4a})}{\Delta x_{5-4a}} \\ \frac{(T_6 - T_5)}{10} &= \frac{(T_5 - T_{4a})}{10} \\ 15 \cdot (T_6 - T_5) &= 10 \cdot (T_5 - T_{4a}) \\ 15T_6 - 15T_5 &= 10T_5 - 10T_{4a} \\ 10T_{4a} &= 25T_5 - 15T_6 \\ 10T_{4a} &= \frac{25T_5 - 15T_6}{10} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Dengan menggunakan data Tabel 5.9, Persamaan 5.5 menjadi

$$\begin{aligned} T_{4a} &= \frac{25T_5 - 15T_6}{10} \\ T_{4a} &= \frac{25 \times 36,2 - 15 \times 36}{10} \\ T_{4a} &= 36,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Dengan nilai  $T_{4a}$  maka dapat digunakan untuk menghitung nilai  $T_s$  dengan menggunakan Persamaan

$$\begin{aligned} q &= -k_{cu}A \frac{(T_{4a} - T_s)}{\Delta x_{cu}} \\ q(\Delta x_{cu}) &= -k_{cu}A (T_{4a} - T_s) \\ T_s &= T_{4a} + \frac{q(\Delta x_{cu})}{k_{cu}A} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Dengan memasukkan semua data yang ada pada Persamaan 5.6, didapatkan nilai  $T_s$  seperti pada hitungan di bawah berikut

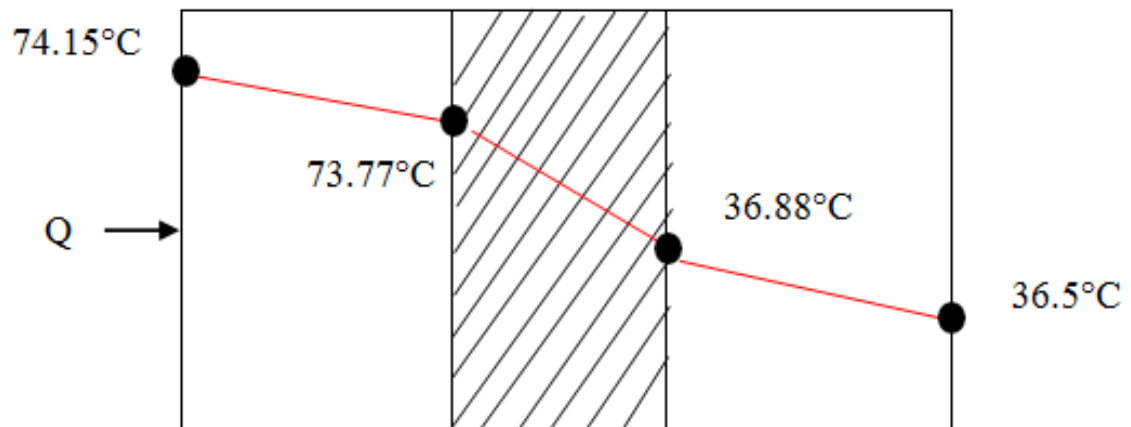
$$\begin{aligned} T_s &= T_{4a} + \frac{q(\Delta x_{cu})}{k_{cu}A} \\ T_s &= 36,5 + 0,38 \\ T_s &= 36,88 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan untuk mencari nilai konduktivitas termal dengan menggunakan Persamaan 3.1

$$\begin{aligned} q &= \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \\ q &= -k_{sp}A_{sp} \frac{(T_s - T_h)}{\Delta x_{sp}} \\ k_{sp} &= \frac{q\Delta x_{sp}}{A_{sp}(T_h - T_s)} \end{aligned} \quad (5.7)$$

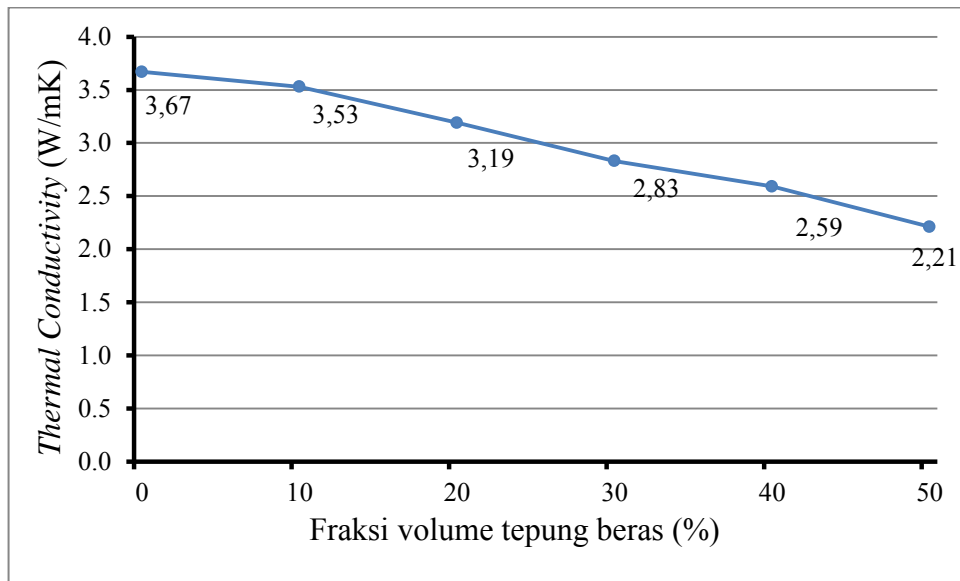
Dengan menggunakan dan mengambil data-data spesimen pada Tabel 5.9 yang kemudian dimasukkan ke Persamaan 5.7, didapatkan nilai  $k_{sp}$  sebagai berikut

$$k_{sp}=3,522 \text{ W/mK}$$



Gambar 5.11 Plot gradien suhu yang terjadi pada ketiga material pada spesimen 90Z10Tb yang telah mengalami konduksi selama 180 menit

Dari grafik pada Gambar 5.9 bahwa, persen volume tepung beras mempengaruhi nilai konduktivitas termal spesimen. Semakin besar fraksi volume serbuk mengakibatkan semakin menurunnya nilai konduktivitas termal spesimen. Bahan keramik berpori terdiri dari bahan padatan (*solid phase*) dan pori/lubang. Pori/lubang tersebut berisi udara (*air*) yang mana berbentuk *gas phase*. Nilai konduktivitas termal udara dapat diabaikan (hampir mendekati nol) jika dibandingkan dengan *solid phase* (Barsoum, 2003). Oleh karena itu, semakin banyak pori/lubang yang dimiliki oleh suatu bahan keramik berpori dengan *volume* yang sama, maka nilai konduktivitas termal nya akan semakin turun. Nilai konduktivitas termal terendah dimiliki oleh spesimen 50Z50Tb dengan nilai sebesar 2,21 W/m°C dan nilai konduktivitas termal tertinggi dimiliki oleh spesimen 100Z dengan nilai konduktivitas termal sebesar 3,67 W/m°C.



Gambar 5.12 Nilai konduktivitas termal dengan variasi fraksi volume tepung beras

## BAB VI

### KESIMPULAN

#### 6.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan pada keramik berpori zirconia dengan PFA (*Pore-Forming Agent*) tepung beras dengan komposisi 100% sampai 50% fraksi volume zirconia dan 0% sampai 50% fraksi volume tepung beras, maka dapat disimpulkan :

1. Nilai porositas spesimen keramik berpori zirconia dengan PFA (*Pore-Forming Agent*) tepung beras yang di-*sinter* pada suhu 1450°C mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya fraksi volume serbuk tepung beras, dari 1,0% (100 %vol zirconia) menjadi 25,29% (50 %vol zirconia 50 %vol tepung beras)
2. Nilai kekuatan tekan spesimen keramik berpori zirconia dengan PFA (*Pore- Forming Agent*) tepung beras yang di-*sinter* pada suhu 1450°C mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya fraksi volume serbuk tepung beras, dari 81,01 MPa (100 %vol zirconia) menjadi 65,23 Mpa (60 %vol zirconia 40 %vol tepung beras)
3. Nilai konduktivitas termal spesimen keramik berpori zirconia dengan PFA (*Pore- Forming Agent*) tepung beras yang di-*sinter* pada suhu 1450°C mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya fraksi volume serbuk tepung beras, dari 3,67 W/m°C (100 %vol zirconia) menjadi 2,21 W/m°C (50 %vol zirconia 50 %vol tepung beras).

#### 6.2 Saran

Beberapa saran yang ingin saya ajukan agar penelitian mengenai keramik berpori (*porous ceramics*) dapat lebih baik dan maju adalah :

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan perhitungan fraksi volume bahan PFA (*Pore-Forming Agent*) dengan persentase porositas yang dihasilkan

2. Perlu dilakukan penelitian lebih detil mengenai teknik *mixing* bahan keramik dengan PFA yang lebih tepat untuk mendapatkan struktur pori yang memiliki jarak homogen.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih dalam mengenai fluktuasi dari penyusutan *volume* pada spesimen keramik berpori.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D. 695, 1992, *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM E. 9-89, 1995, *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Barsoum, W., 2003, *Fundamentals of Ceramics*, CRC Press, USA.
- Beer, F., Johnston, J.R.E., & Dewolf, J., 2006, *Mechanics of Material 4th Edition*, New York: McGraw-Hill.
- Callister W., 2007, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7<sup>th</sup> edn, John Wiley and Sons Inc., Canada.
- Chen, W., & Riedel, R., 2012, *Ceramics Science and Technology*, Vol.3 : Synthesis and Processing 1st ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Chevalier, J., Gremillard, L., Virkar, A.V., Clarke, D.R., 2009, The Tetragonal-Monoclinic Transformation in Zirconia: Lessons Learned and Future Trends, *Journal of American Ceramic Society*, vol. 9, pp. 1901 – 1920.
- Darwanto, 2008, Studi Sifat Fisis, Mekanis, dan Konduktivitas Termal pada Keramik Kaolin Berpori yang Dibuat dengan PFA (Pore-Forming Agent) Corn Starch, *Skripsi S1 Jurusan Teknik Mesin dan Industri UGM, Yogyakarta*.
- Dhanajaya, Y, 2011, Pengaruh Thermal Shock terhadap Thermal Conductivity pada Keramik Zirconia, *Skripsi S1 Departemen Teknik Mesin dan Industri UGM, Yogyakarta*.
- Dutta, P., 2004, *Heat and Mass Transfer*, IISC, Bangalore.
- Fahrenholtz, G, William, 2004, *Ceramics Sintering*, ASME, Missouri.
- Fan, J., Siebenmorgen, T. J., Gartman, T.R., Gardisser, D.R., 1997, Bulk Density of Long- and Medium-Grain Rice Varieties as Affected by Harvest and Conditioned Moisture Contents, *Trans, ASAE* 2:254 - 258.
- Gibson, R., 1994, *Principle of Composite Material Mechanics*, Detroit, Michigan: Departement of Mechanical Engineering Wayne State

University.

- Goldstein, J., 1981, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Plenum Press.
- Gregorova, E., & Pabst, W., 2006, Porous Ceramic Prepared using Poppy Seed as a Pore-Forming Agent, *Journal of Science Direct, CERI-2448*, 1-4.
- Holman, JP 1995, *Perpindahan Kalor*, Edisi Enam, Erlangga, Jakarta.
- Hu, L., & Wang, C., 2010, Effect of Sintering Temperature on Compressive Strength of Porous Yttria-Stabilized Zirconia Ceramics, *Ceramics International*, vol.36, pp. 1697 – 1701.
- Incropera, F., 1981, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, New York.
- Ismunandar (Kimia ITB), Keramik kimi@net – <http://www.kimianet.lipi.go.id>, Di akses pada tanggal 7 November 2018 pukul 20.00.
- Jacobs, & Kilduff, 1985, *Engineering Material Technology, Structure, Processing, Properties and Selection 3rd ed*, U.S.A: Prentice-Hall International Inc.
- Kadan,R.S., Bryant, R.J., & Pepperman, A.B., 2003, Functional Properties of Extruded Rice Flours, *Journal of Food Science*, Vol.68, 1670
- Liendhard, H., 2008, *A Heat Transfer Textbook: 3rd Edition*, Phlogiston Press, Massachusetts .
- Liu, J., Li, Y., Sang, S., 2016. Effects of Pore Structure on Thermal Conductivity and Strength of Alumina Porous Ceramics using Carbon Black as Pore-Forming Agent, *The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, China*.
- Marpaung, F., 2016, Studi Porositas, Kekuatan Tekan Dan Konduktivitas Termal Pada Keramik Berpori Yang Dibuat Dengan PFA (Pore-Forming Agent) Serbuk Ragi Kering Aktif, *Skripsi S1 Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta*.
- Patapy, C., Gey, N., 2012, Mechanical Behavior Characterization of High Zirconia Fused-Cast Refractories at High Temperature: Influence of The Cooling Stage on Microstructural Changes, *Journal of the European Ceramic Society, France* .

- Piconi, C., & Maccauro, G., 1999, Zirconia as Ceramic Biomaterial, *Biomaterials*, Vol. 20, pp. 1- 25.
- Purbasari, A., dan Samakhi, T., 2005, Pengembangan Produk Keramik Berpori dengan Proses Ekstrusi pada Skala Laboratorium, *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, Vol.4 No. 2, 227-233.
- Sebayang, P., Muljadi, Ginting, M., & S.K.D., 2007, Pengaruh Penambahan Serbuk Kayu Terhadap Karakteristik Keramik Cordierite Berpori Sebagai Bahan Filter Gas Buang. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, Vol. 7, No. 1.
- Smallman, R.E., & Bishop, R.J., 2002, *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*, Erlangga, Jakarta.
- Studard, A., Gonzenbach, U., Tervoort, E., & Gauckler, L, 2006, Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review, *Journal of the American ceramics Society*, 1771-1789.
- Sun dkk, 2014, Thermal Properties of Highly Porous Fibrous Ceramics, *Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing, China*
- Surdia, T., & Saito, S., 1992, *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Svinka, V., & Bula, G., 2008, *Zirconia Containing Refractory Foam Ceramics*, European Social Fond, Latvia.
- Toko Fine Ceramics, 2006, *Zirconia Technical Data*, UK.
- Warren, R, 1991, *Ceramic Matrix Composites*, Chapman & Hall, New York U.S.A.
- Widodo, 2010, Densitas dan Kekuatan Bending pada Material Komposit Fly-Ash MgO, *Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Semarang*.
- William, C., 1991, *Firing of Sintering (Densifications) of Ceramic*. New York, *ASM International Publisher*, Vol. 4.
- Yunitasari, D., 2016, Studi Pengujian Thermal Conductivity dan Fracture

Toughness pada Komposit Keramik Silika/Zirconia, *Skripsi* s-1  
*Departemen Teknik Mesin dan Industri UGM. Yogyakarta.*

## Lampiran

### Lampiran 1. Hasil perhitungan penyusutan volume

SPESIMEN		DIAMETER (mm)		TINGGI (mm)		VOLUME (cm <sup>3</sup> )		PENYUSUTAN VOLUME (%)	RATA-RATA PENYUSUTAN VOLUME (%)	STD. DEVIASI PV
SERI	KODE	AWAL	AKHIR	AWAL	AKHIR	AWAL	AKHIR			
100Z	1	15.1	11.7	20.5	15.9	3.669251	1.708593	53.43484079	53.18608555	0.785856881
	2	15	11.5	20.3	15.95	3.585488	1.655869	53.81746032		
	3	15	11.6	20	15.95	3.5325	1.684792	52.30595556		
90Z10Tb	1	15.1	11.6	15.9	13.6	2.845907	1.436563	49.52179908	49.27700635	0.227731768
	2	15	11.7	16.3	13.6	2.878988	1.461438	49.23779141		
	3	15	11.5	16.1	13.95	2.843663	1.448237	49.07142857		
80Z20Tb	1	15.1	11	16.1	12.5	2.881704	1.187313	58.79825473	57.59964993	1.530252215
	2	15	11.1	17	13	3.002625	1.257358	58.12470588		
	3	15	11.6	16.4	12.1	2.89665	1.278118	55.87598916		
70Z30Tb	1	15.2	11.7	16.4	12.6	2.974409	1.353979	54.47905758	54.77711907	0.715415496
	2	15.1	11.6	16.45	12.75	2.94435	1.346777	54.25892508		
	3	15.2	11.6	17.05	13	3.092297	1.373185	55.59337455		
60Z40Tb	1	15.2	11.7	15.3	11.9	2.774906	1.278758	53.91707064	54.07023148	0.293543861
	2	15.1	11.75	15.1	11.5	2.702717	1.246359	53.88494492		
	3	15.2	11.7	15.4	11.85	2.793043	1.273385	54.40867888		
50Z50Tb	1	15.2	11.6	13.3	10.5	2.412173	1.109111	54.02026534	53.56781232	0.620883666
	2	15.1	11.7	13.5	10.6	2.416336	1.139062	52.85996228		
	3	15.2	11.6	14	11.1	2.53913	1.172489	53.82320934		

## Lampiran 2. Hasil perhitungan penyusutan massa

SPESIMEN		MASSA (gr)			PENYUSUTAN MASSA (%)	RATA-RATA PENYUSUTAN MASSA (%)	STD. DEVIASI PM
SERI	KODE	AWAL	AKHIR	Raksa			
100Z	1	10.168	9.898	13.251	2.655389457	2.495945618	0.143299051
	2	10.177	9.935	13.139	2.377910976		
	3	10.063	9.816	13.001	2.454536421		
90Z10Tb	1	8.511	8.067	11.179	5.216778287	7.112105992	1.7382447
	2	8.793	8.034	11.213	8.631866257		
	3	8.721	8.068	11.241	7.487673432		
80Z20Tb	1	6.901	6.34	9.891	8.129256629	8.216293964	0.183222837
	2	7.068	6.496	10.001	8.092812677		
	3	7.31	6.694	10.134	8.426812585		
70Z30Tb	1	7.652	7.013	12.127	8.350757972	8.739943788	0.363326437
	2	7.751	7.069	11.982	8.798864663		
	3	7.905	7.188	12.552	9.070208729		
60Z40Tb	1	6.88	6.086	11.619	11.54069767	11.1536063	0.335930051
	2	6.784	6.039	11.29	10.9817217		
	3	6.948	6.188	11.782	10.93839954		
50Z50Tb	1	5.85	5.043	10.653	13.79487179	14.9714237	1.919308839
	2	5.957	5.127	10.572	13.93318785		
	3	6.063	5.021	10.452	17.18621145		

Lampiran 3. Hasil Perhitungan *Bulk Density*, Densitas Relatif dan Porositas Spesimen Uji Tekan

SPESIMEN		ρ bulk (gr/cm <sup>3</sup> )	Rata-Rata	Porosity	Rata-Rata Porosity	Deviasi	ρ rel (%)	Rata rata ρ rel	Deviasi
SERI	Kode								
100Z	1	5.815058966	5.840540941	1.439678545	1.007780663	0.376401267	98.56032145	98.9922193	0.376401267
	2	5.855768397		0.749688181			99.25031182		
	3	5.85079546		0.833975262			99.16602474		
90Z10Tb	1	5.70046763	5.686631353	3.381904582	3.616417747	0.20879793	96.61809542	96.3835823	0.20879793
	2	5.676853536		3.782143464			96.21785654		
	3	5.682572893		3.685205195			96.3147948		
80Z20Tb	1	5.312303617	5.359163969	9.960955652	9.166712385	0.829381234	90.03904435	90.8332876	0.829381234
	2	5.35525247		9.233008981			90.76699102		
	3	5.409935821		8.306172521			91.69382748		
70Z30Tb	1	4.983113898	4.993901004	15.54044241	15.3576101	0.81345231	84.45955759	84.6423899	0.81345231
	2	5.046370269		14.46830052			85.53169948		
	3	4.952218845		16.06408737			83.93591263		
60Z40Tb	1	4.674927986	4.699196082	20.76393243	20.35260878	0.595386266	79.23606757	79.6473912	0.595386266
	2	4.739477177		19.66987836			80.33012164		
	3	4.683183083		20.62401554			79.37598446		
50Z50Tb	1	4.369571865	4.408095934	25.93945991	25.28650959	0.614214427	74.06054009	74.7134904	0.614214427
	2	4.441505828		24.7202402			75.2797598		
	3	4.413210108		25.19982868			74.80017132		



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

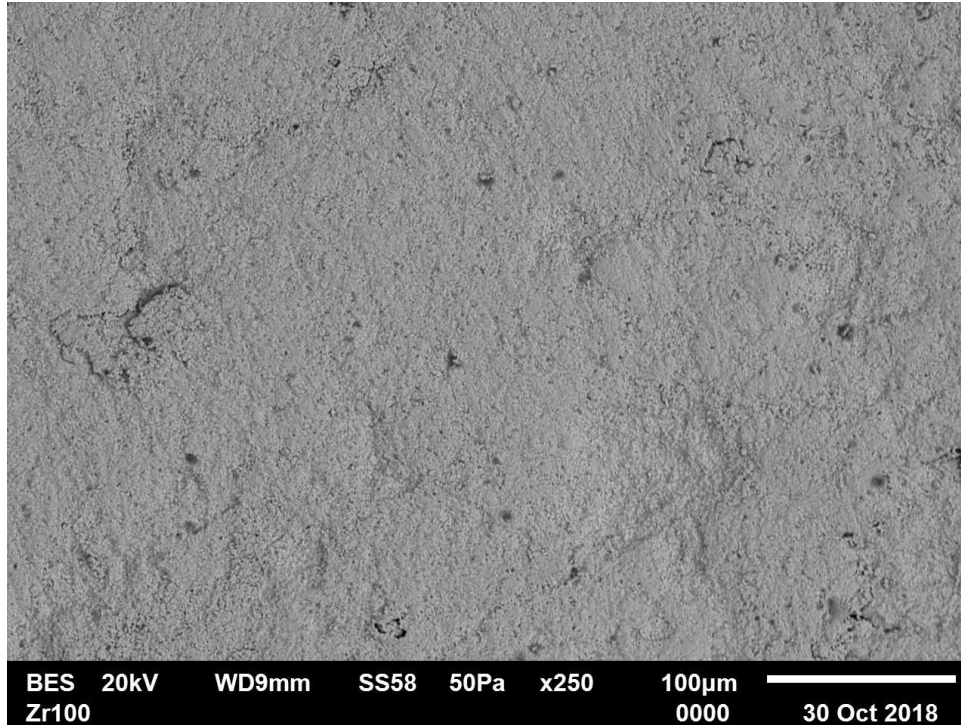
STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL PADA KERAMIK ZIRCONIA  
BERPORI YANG DIBUAT

DENGAN PFA (PORE- FORMING AGENT) TEPUNG BERAS

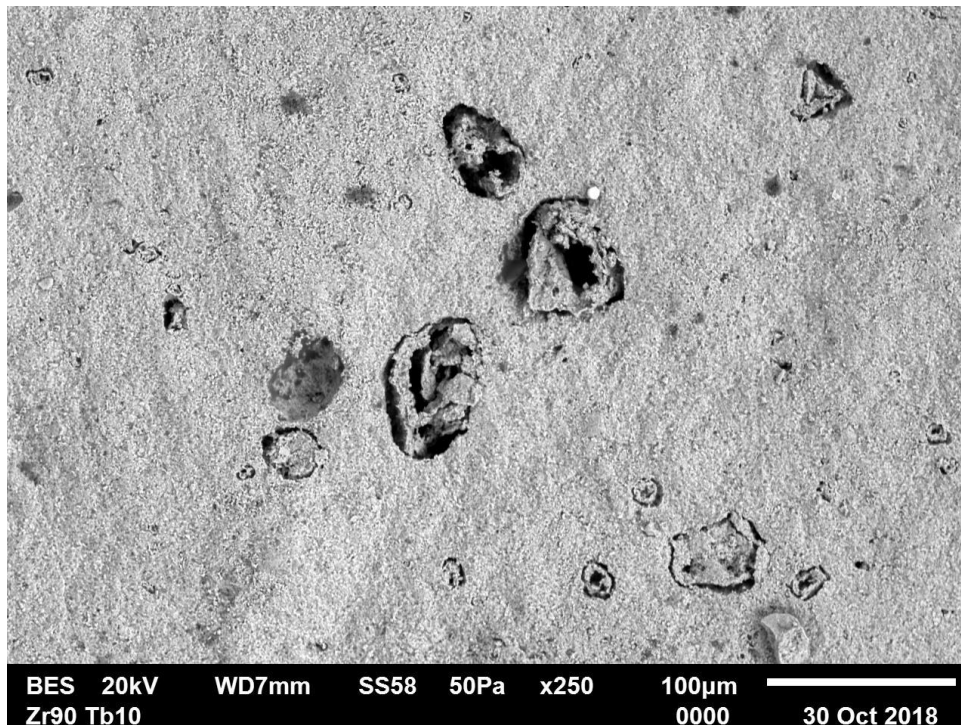
ADRIANUS PRABOWO GURITNO, Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2018 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran 4. Hasil foto SEM 0%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 5. Hasil foto SEM 10%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

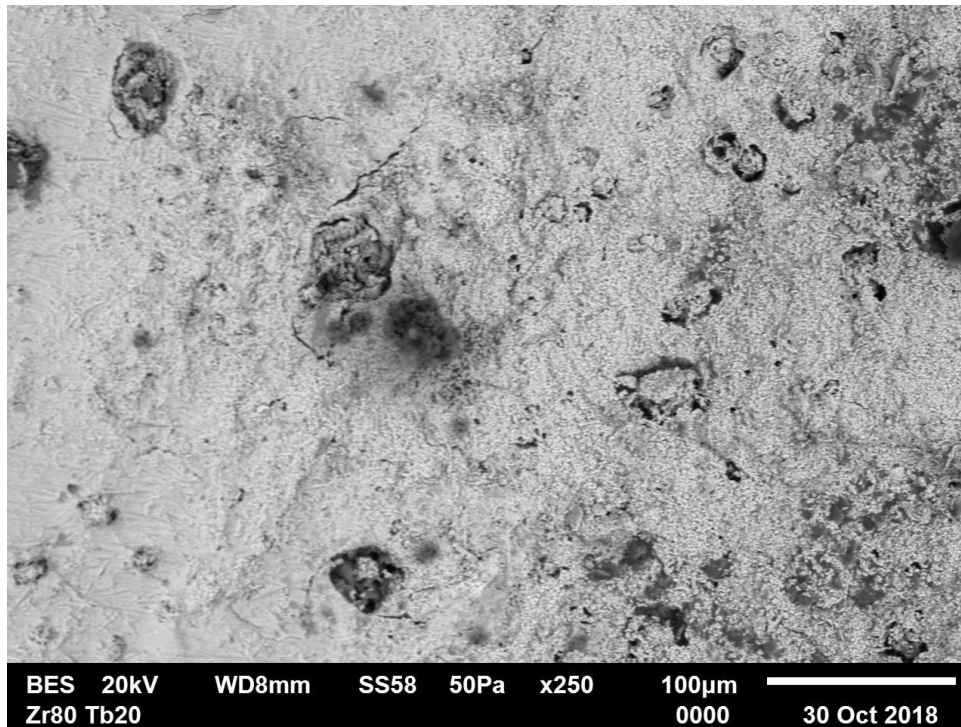
STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL PADA KERAMIK ZIRCONIA  
BERPORI YANG DIBUAT

DENGAN PFA (PORE- FORMING AGENT) TEPUNG BERAS

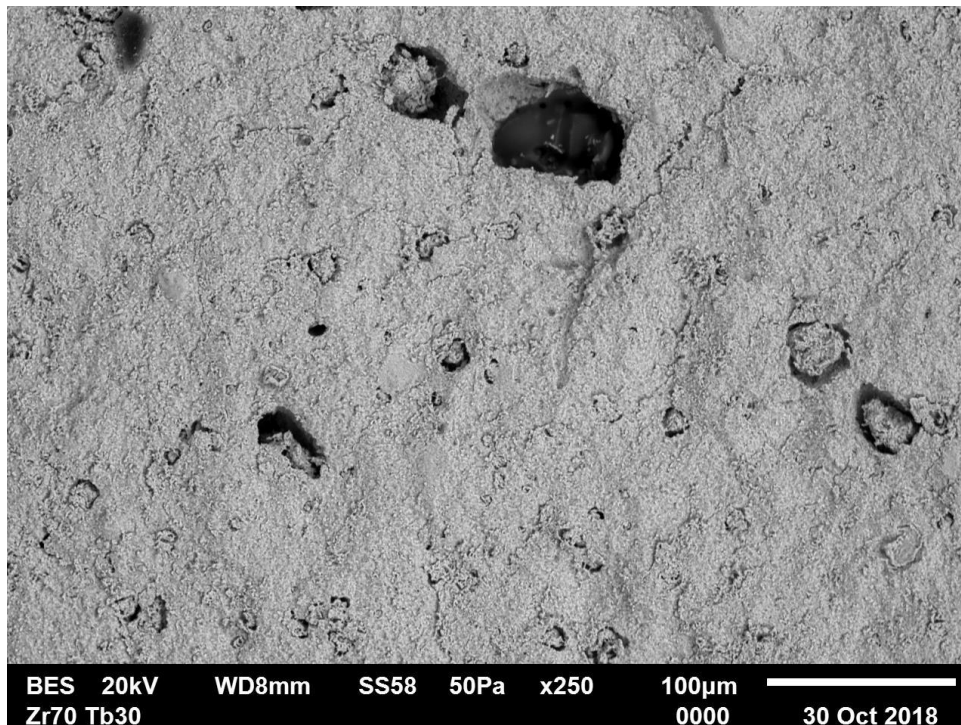
ADRIANUS PRABOWO GURITNO, Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2018 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran 6. Hasil foto SEM 20%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 7. Hasil foto SEM 30%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

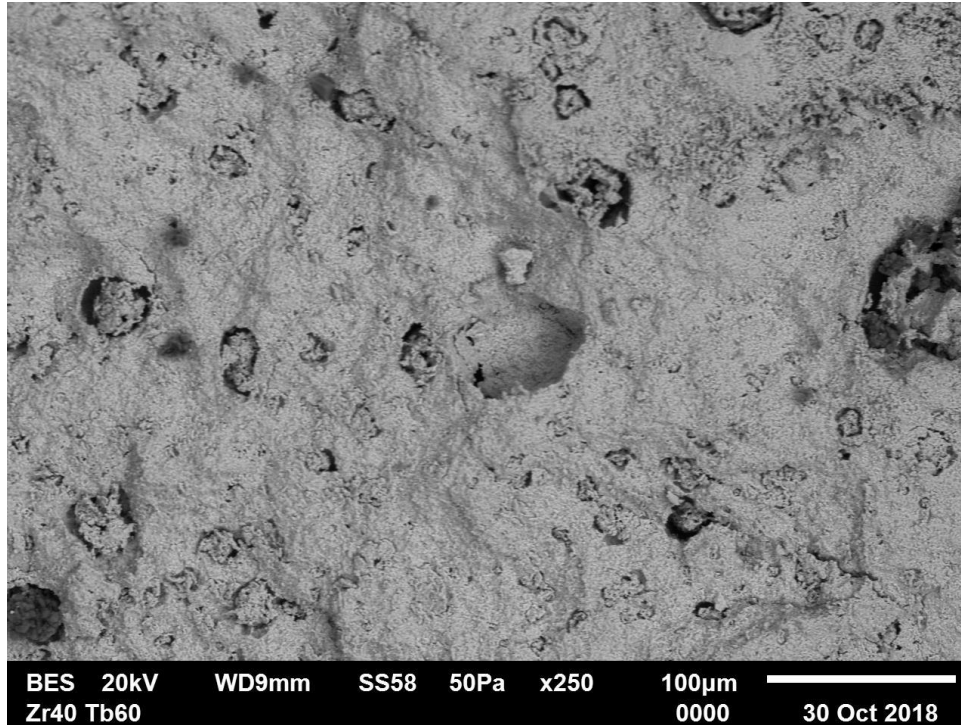
STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL PADA KERAMIK ZIRCONIA  
BERPORI YANG DIBUAT

DENGAN PFA (PORE- FORMING AGENT) TEPUNG BERAS

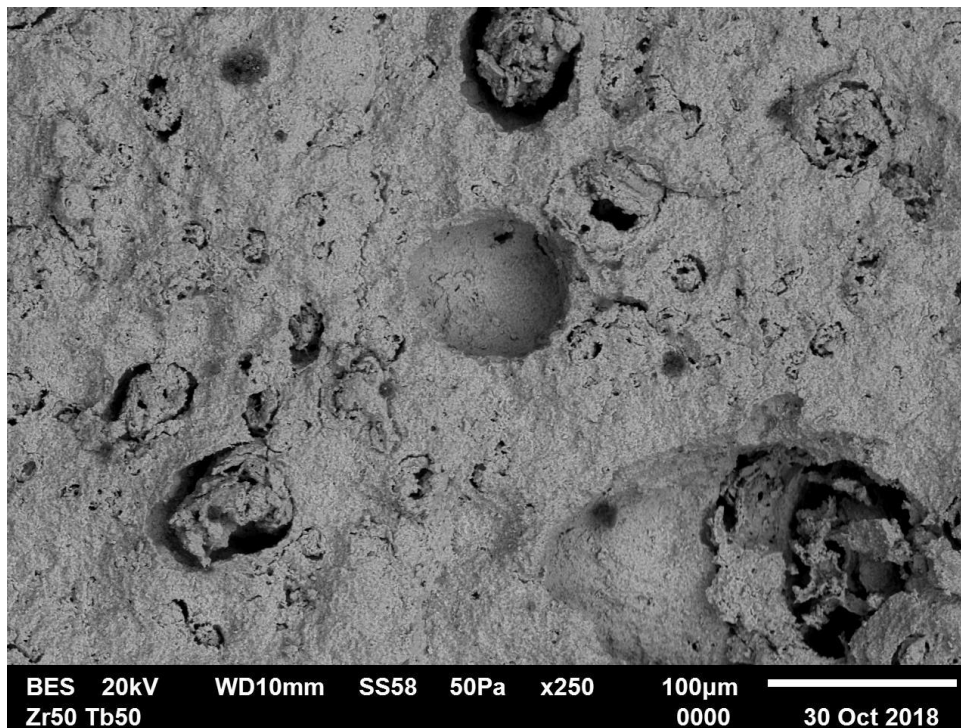
ADRIANUS PRABOWO GURITNO, Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2018 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran 8. Hasil foto SEM 40%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 9. Hasil foto SEM 50%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

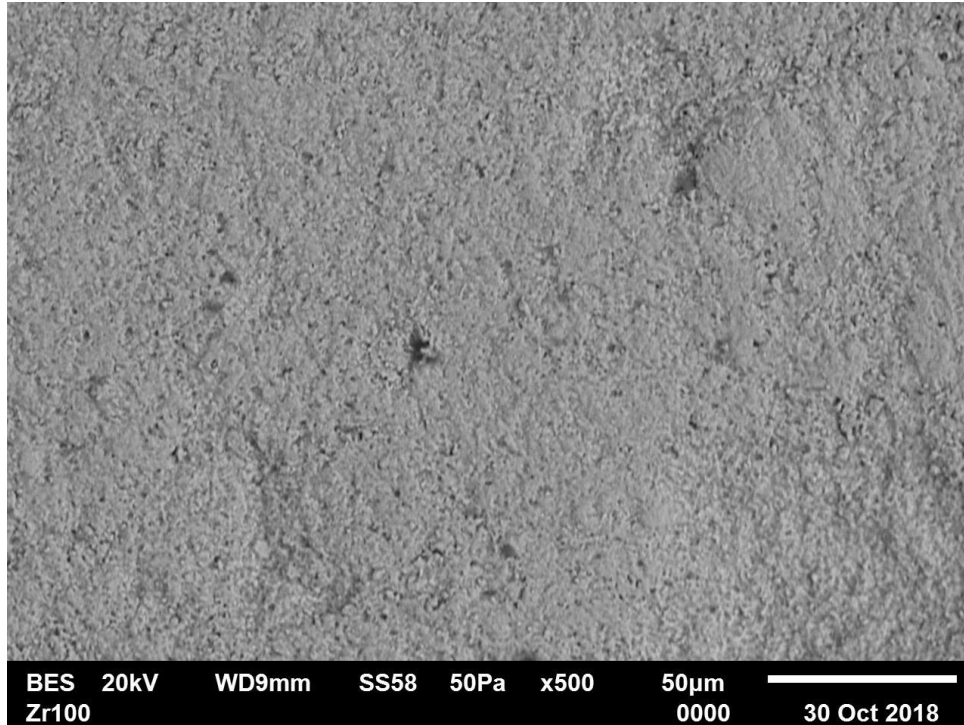
STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL PADA KERAMIK ZIRCONIA  
BERPORI YANG DIBUAT

DENGAN PFA (PORE- FORMING AGENT) TEPUNG BERAS

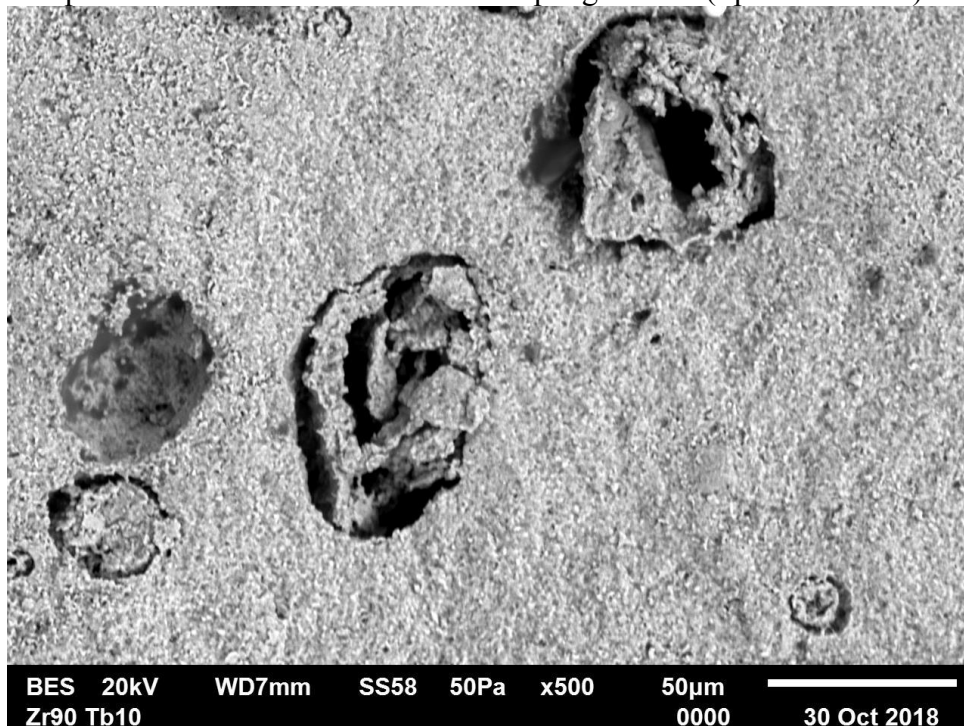
ADRIANUS PRABOWO GURITNO, Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2018 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran 10. Hasil foto SEM 0%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 11. Hasil foto SEM 10%Vt tepung beras d (Spesimen Utuh)





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

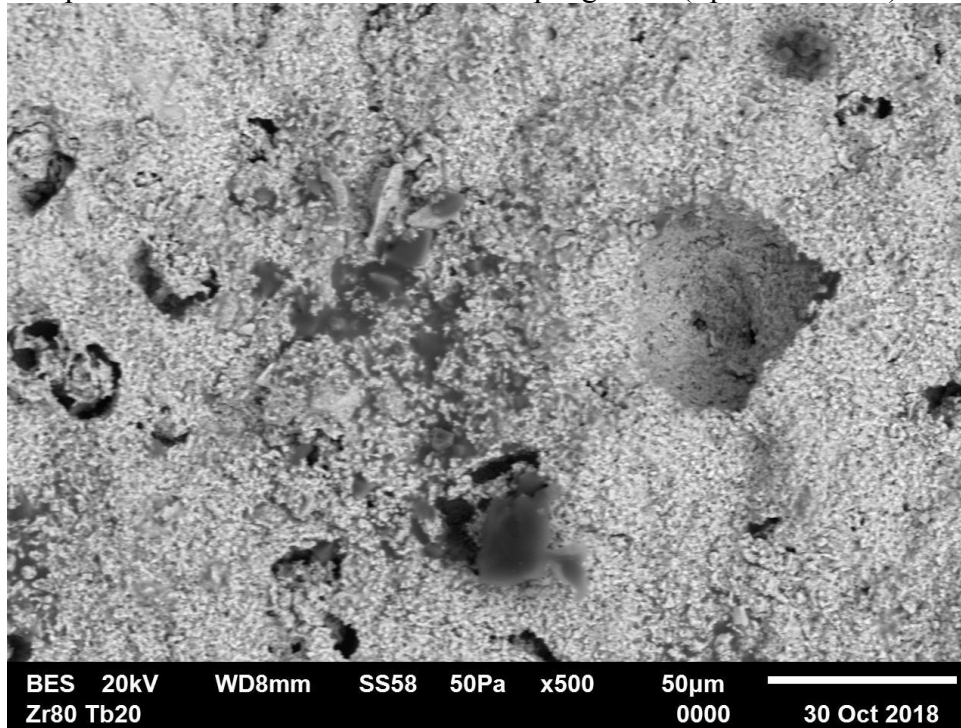
STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL PADA KERAMIK ZIRCONIA  
BERPORI YANG DIBUAT

DENGAN PFA (PORE- FORMING AGENT) TEPUNG BERAS

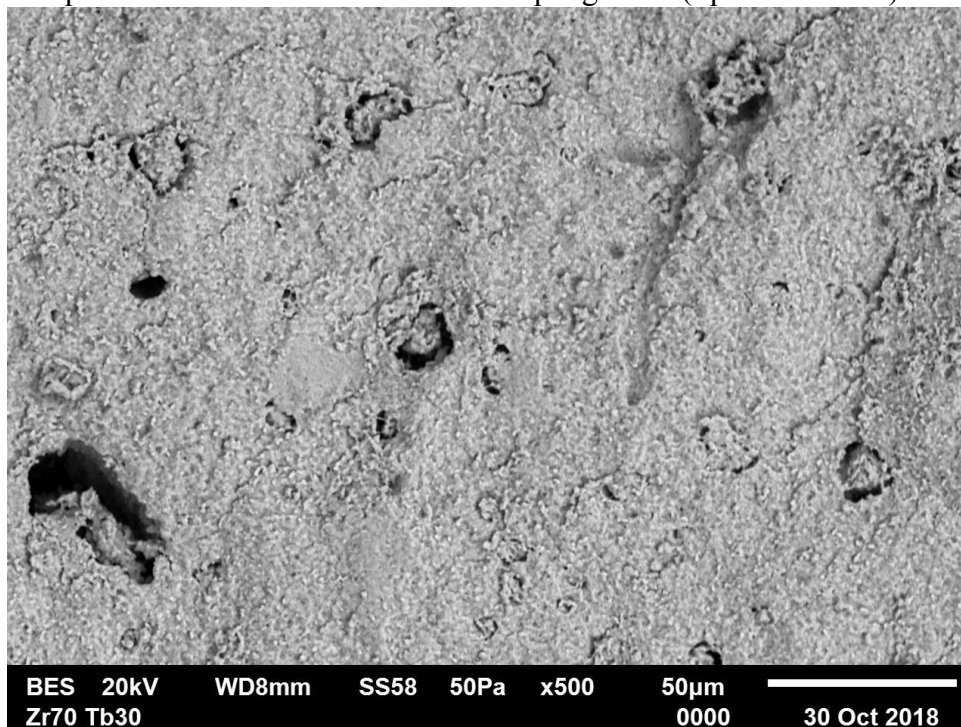
ADRIANUS PRABOWO GURITNO, Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2018 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran 12. Hasil foto SEM 20%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 13. Hasil foto SEM 30%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

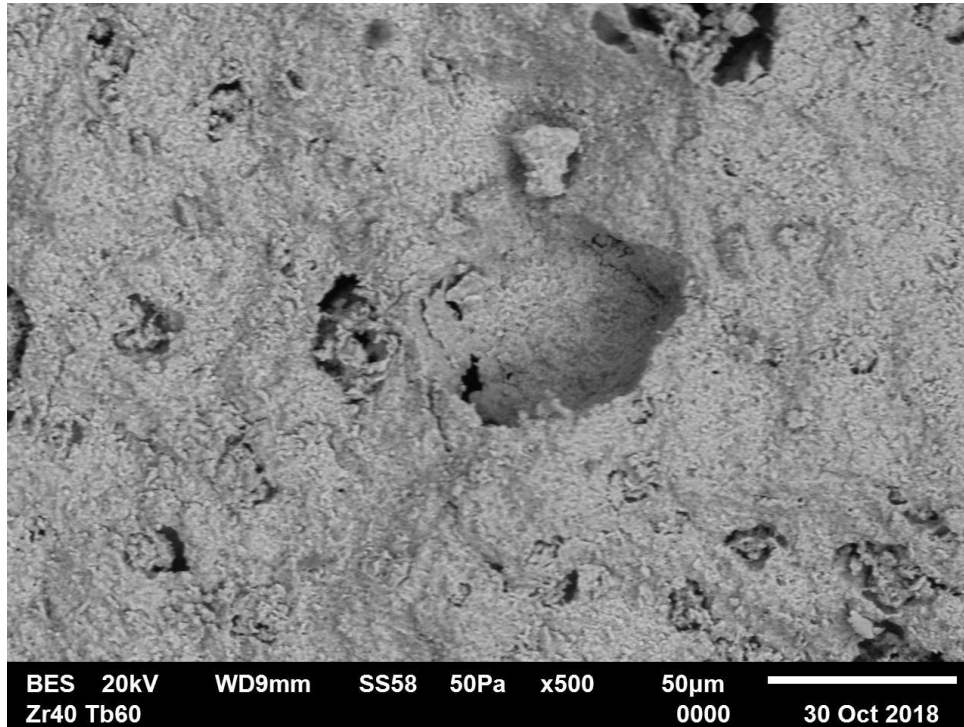
STUDI POROSITAS, KEKUATAN TEKAN, DAN KONDUKTIVITAS TERMAL PADA KERAMIK ZIRCONIA  
BERPORI YANG DIBUAT

DENGAN PFA (PORE- FORMING AGENT) TEPUNG BERAS

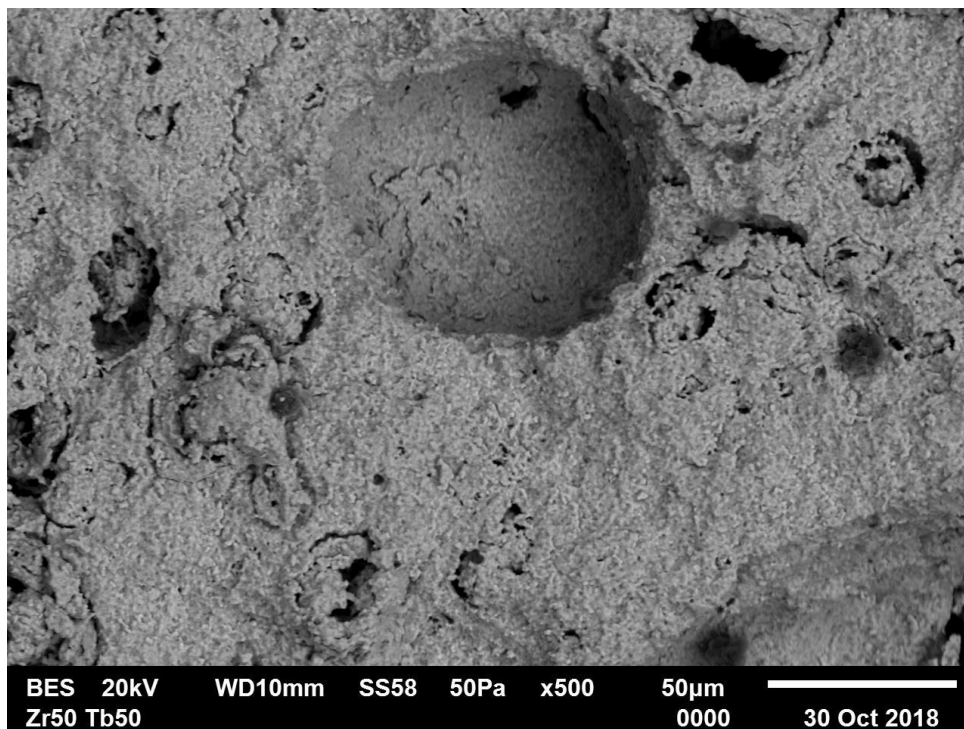
ADRIANUS PRABOWO GURITNO, Ir. Muhammad Waziz Wildan, M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2018 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran 14. Hasil foto SEM 40%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 15. Hasil foto SEM 50%Vt tepung beras (Spesimen Utuh)



Lampiran 16. Hasil perhitungan pengujian tekan

SPESIMEN		Diameter (mm)	Luas Penampang (m <sup>3</sup> )	F Alat(N)	F Aktual (N)	P (Mpa)	STD Deviasi	Rata Rata (Mpa)
SERI	Kode							
100Z	1	11.7	0.000107459	4327	8654	80.53330281	0.545920514	81.01071337
	2	11.5	0.000103816	4199	8398	80.8929238		
	3	11.6	0.00010563	4310	8620	81.60591349		
90Z10Tb	1	11.6	0.00010563	4216	8432	79.82610935	1.423862551	78.42428809
	2	11.7	0.000107459	4216	8432	78.46739188		
	3	12.5	0.000122656	4721	9442	76.97936306		
80Z20Tb	1	11	0.000094985	3500	7000	73.69584671	0.169307518	73.79139755
	2	11.1	9.67199E-05	3578	7156	73.98688067		
	3	11.6	0.00010563	3892	7784	73.69146527		
70Z30Tb	1	11.7	0.000107459	3988	7976	74.22389915	1.887402519	72.28479131
	2	11.6	0.00010563	3812	7624	72.17673834		
	3	11.6	0.00010563	3721	7442	70.45373645		
60Z40Tb	1	11.7	0.000107459	3527	7054	65.64385464	0.553031944	65.2360553
	2	11.75	0.000108379	3501	7002	64.60657472		
	3	11.7	0.000107459	3517	7034	65.45773653		
50Z50Tb	1	11.6	0.00010563	3542	7084	67.06453494	1.023432623	66.32869069
	2	11.7	0.000107459	3501	7002	65.15994757		
	3	11.6	0.00010563	3526	7052	66.76158955		

Lampiran 17. Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 50% fraksi volume tepung beras

Suhu pada masing-masing titik pada waktu pengukuran t menit (°C)																			
T°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
T <sub>1</sub>	26.2	41.6	55.1	64.4	70.3	75	77.2	80.1	82.3	83.4	84.8	85.3	85.7	86.4	86.5	87.6	87.7	87.8	88.1
T <sub>2</sub>	26.1	40.2	52.8	61.4	66.9	70.6	73.5	76	78	79.4	80.3	81	81.4	81.8	82.4	83.1	83.3	83.6	83.7
T <sub>3</sub>	25.8	39	51.3	60.2	65.7	69.8	72.8	75.6	77.6	79.1	80.2	80.8	81.3	81.7	82.2	82.9	83.1	83.4	83.5
T <sub>3a</sub>	25.95	38.1	49.35	56.9	61.8	64	67.95	69.85	71.55	73.4	73.55	74.55	74.95	74.9	76.25	76.35	76.7	77.3	77.1
T <sub>h</sub>	25.57	37.72	48.97	56.52	61.42	63.62	67.57	69.47	71.17	73.02	73.17	74.17	74.57	74.52	75.87	75.97	76.32	76.92	76.72
T <sub>4a</sub>	26	27.2	27.7	28.5	29.45	30.15	30.9	31.5	32.25	32.75	33.4	33.55	34.15	34.35	34.9	35.1	35.3	35.85	
T <sub>s</sub>	26.38	27.58	28.08	28.88	29.83	30.53	31.28	31.88	32.63	33.13	33.78	33.93	34.53	34.73	35.28	35.48	35.68	36.23	
T <sub>4</sub>	26.2	27.4	28	29	30.4	31.2	32	32.8	33.5	34.1	34.5	35.2	35.4	35.6	35.9	36.3	36.6	36.9	36.8
T <sub>5</sub>	26	27.2	27.7	28.5	29.3	30	30.6	31.2	31.8	32.3	32.8	33.1	32.1	33.7	33.9	34.3	34.5	34.7	34.8
T <sub>6</sub>	26	27.2	27.7	28.5	29.2	29.9	30.4	31	31.5	32	32.4	32.8	33.4	33.4	33.6	33.9	34.1	34.3	34.1

T <sub>h</sub> -T <sub>s</sub>	0.81	10.14	20.89	27.64	31.59	33.09	36.29	37.59	38.54	39.89	39.39	40.24	44.04	39.99	39.60	40.69	40.84	41.24	40.49
ΔSp (mm)	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97
D (mm)	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6
A (mm <sup>2</sup> )	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2	437.2
k (W/mK)	112.10	8.95	4.35	3.29	2.87	2.74	2.50	2.42	2.36	2.28	2.31	2.26	2.06	2.27	2.29	2.23	2.22	2.20	2.24

Lampiran 18. Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 40% fraksi volume tepung beras

Suhu pada masing-masing titik pada waktu pengukuran t menit (°C)																			
T°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
T <sub>1</sub>	26.3	41.7	55.3	64.5	70.2	74.4	77.5	80.1	82.2	83.6	84.6	85.3	85.8	86.4	86.7	87.6	87.7	88	88.2
T <sub>2</sub>	26.1	40.3	52.9	61.5	66.9	70.6	73.5	76	78	79.4	80.3	81	81.4	81.8	82.4	83.1	83.3	83.6	83.7
T <sub>3</sub>	25.7	39	51.3	60.2	65.7	69.8	72.8	75.6	77.6	79.1	80.2	80.8	81.3	81.7	82.2	82.9	83.1	83.4	83.6
T <sub>3a</sub>	25.8	38.2	49.3	57	61.95	64.9	67.5	69.85	71.7	73.1	73.85	74.55	74.8	74.9	75.95	76.35	76.7	77	76.95
T <sub>h</sub>	25.42	37.82	48.92	56.62	61.57	64.52	67.12	69.47	71.32	72.72	73.47	74.17	74.42	74.52	75.57	75.97	76.32	76.62	76.57
T <sub>4a</sub>	26	27.2	27.55	28.75	29.45	30.15	30.9	31.5	32.25	32.75	33.4	33.55	33.65	34.15	34.85	34.9	35.1	35.3	35.5
T <sub>s</sub>	26.38	27.58	27.93	29.13	29.83	30.53	31.28	31.88	32.63	33.13	33.78	33.93	34.03	34.53	35.23	35.28	35.48	35.68	35.88
T <sub>4</sub>	26.3	27.4	28.3	29.4	30.4	31.2	32	32.8	33.5	34.1	34.5	35	35.4	35.6	35.9	36.3	36.6	36.7	36.9
T <sub>5</sub>	26	27.2	27.7	28.6	29.3	30	30.6	31.2	31.8	32.3	32.8	33.1	33.5	33.7	34.1	34.3	34.5	34.7	34.9
T <sub>6</sub>	26	27.2	27.8	28.5	29.2	29.9	30.4	31	31.5	32	32.4	32.8	33.4	33.4	33.6	33.9	34.1	34.3	34.5

Th-Ts	0.96	10.24	20.99	27.49	31.74	33.99	35.84	37.59	38.69	39.59	39.69	40.24	40.39	39.99	40.34	40.69	40.84	40.94	40.69
ΔSp (mm)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
D (mm)	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6
A (mm <sup>2</sup> )	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9	400.9
k (W/mK)	109.12	10.23	4.99	3.81	3.30	3.08	2.92	2.79	2.71	2.65	2.64	2.60	2.59	2.62	2.60	2.57	2.56	2.56	2.57

Lampiran 19. Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 30% fraksi volume tepung beras

Suhu pada masing-masing titik pada waktu pengukuran t menit (oC)																			
T°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
T1	27.4	52	62.1	68.3	72.7	76.9	79.9	81.5	83.6	85.3	86.6	87.7	88.5	88.9	89	89.1	89.4	89.6	89.8
T2	27	48.1	58.5	64	68.1	72	74.4	76.4	78.4	79.8	81	81.6	82.2	82.4	82.7	82.9	83.2	83.4	83.5
T3	26.4	47.3	58	63.6	67.9	72.2	74.9	77.1	79.3	80.7	82	82.7	83.4	83.6	83.9	84.1	84.4	84.6	84.7
T3a	26.4	42.25	53.1	57.55	61.2	64.65	66.15	68.75	70.6	71.55	72.6	72.45	72.75	72.65	73.25	73.6	73.9	74.1	74.05
Th	26.02	41.87	52.72	57.17	60.82	64.27	65.77	68.37	70.22	71.17	72.22	72.07	72.37	72.27	72.87	73.22	73.52	73.72	73.67
T4a	27.05	27.55	28.3	29.25	29.7	30.75	31.45	32.25	33.15	33.65	34.25	34.65	35	35.45	35.9	36	36.2	36.4	36.5
Ts	27.43	27.93	28.68	29.63	30.08	31.13	31.83	32.63	33.53	34.03	34.63	35.03	35.38	35.83	36.28	36.38	36.58	36.78	36.88
T4	26.9	27.6	28.6	29.5	30.4	31.4	32.2	33.1	34.2	34.7	35.4	35.9	36.4	36.6	37	37.1	37.4	37.6	37.7
T5	26.9	27.4	28.3	29.1	29.7	30.6	31.3	32.1	33	33.5	34.1	34.5	35	35.3	35.6	35.7	35.9	36.1	36.2
T6	26.8	27.3	28.3	29	29.7	30.5	31.2	32	32.9	33.4	34	34.4	35	35.2	35.4	35.5	35.7	35.9	36

Th-Ts	1.41	13.94	24.04	27.54	30.74	33.14	33.94	35.74	36.69	37.14	37.59	37.04	36.99	36.44	36.59	36.84	36.94	36.94	36.79
$\Delta Sp$ (mm)	4.53	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
D (mm)	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46
A (mm <sup>2</sup> )	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0	432.0
k (W/mK)	74.36	7.47	4.33	3.78	3.39	3.14	3.07	2.91	2.84	2.80	2.77	2.81	2.82	2.86	2.85	2.83	2.82	2.82	2.83

Lampiran 20. Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 20% fraksi volume tepung beras

T°C	Suhu pada masing-masing titik pada waktu pengukuran t menit (oC)																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
T1	27.1	51	62.2	68.2	72.8	77.1	79.8	81.8	83.9	85.3	86.8	87.7	88.5	88.7	89	89.1	89.6	89.8	89.9
T2	27.2	48.2	58.7	64.1	68.2	72.1	74.5	76.5	78.5	79.9	81.1	81.7	82.3	82.5	82.8	83	83.3	83.5	83.6
T3	26.4	47.2	58	63.6	67.9	72.2	74.9	77.1	79.3	80.7	82	82.7	83.4	83.6	83.9	84.1	84.4	84.6	84.7
T3a	27.35	44	53.45	57.95	61.3	64.6	66.55	68.55	70.4	71.8	72.55	72.7	73	73.2	73.5	73.85	73.85	74.05	74.15
Th	26.97	43.62	53.07	57.57	60.92	64.22	66.17	68.17	70.02	71.42	72.17	72.32	72.62	72.82	73.12	73.47	73.47	73.67	73.77
T4a	26.9	27.4	28.3	29.25	29.7	30.75	31.45	32.25	33.15	33.65	34.25	34.65	35	35.45	35.9	36	36.2	36.4	36.5
Ts	27.28	27.78	28.68	29.63	30.08	31.13	31.83	32.63	33.53	34.03	34.63	35.03	35.38	35.83	36.28	36.38	36.58	36.78	36.88
T4	27.1	27.8	28.8	29.7	30.6	31.6	32.4	33.3	34.4	34.9	35.6	36.1	36.6	36.8	37.2	37.3	37.6	37.8	37.9
T5	26.9	27.4	28.3	29.1	29.7	30.6	31.3	32.1	33	33.5	34.1	34.5	35	35.3	35.6	35.7	35.9	36.1	36.2
T6	26.9	27.4	28.3	29	29.7	30.5	31.2	32	32.9	33.4	34	34.4	35	35.2	35.4	35.5	35.7	35.9	36

Th-Ts	0.31	15.84	24.39	27.94	30.84	33.09	34.34	35.54	36.49	37.39	37.54	37.29	37.24	36.99	36.84	37.09	36.89	36.89	36.89
ΔSp (mm)	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65
D (mm)	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4
A (mm <sup>2</sup> )	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9	393.9
k (W/mK)	380.83	7.45	4.84	4.23	3.83	3.57	3.44	3.32	3.24	3.16	3.14	3.17	3.17	3.19	3.20	3.18	3.20	3.20	3.20



## Lampiran 21. Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 10% fraksi volume tepung beras

T°C	Suhu pada masing-masing titik pada waktu pengukuran t menit (oC)																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
T1	31.1	48.9	60	68.5	74.2	77.8	81	83.4	85.3	87.1	88.5	89.6	90.6	91.2	91.7	92.1	92.1	91.6	91.6
T2	31	46.6	56.7	64.5	69.4	73.4	76	77.7	79.4	80.8	81.9	82.7	83.6	84.1	84.4	84.8	84.8	84.4	84.4
T3	30.6	45.7	55.8	64	69.3	72.7	76.5	78.5	80.3	81.9	83.1	84	84.9	85.5	85.9	86.3	86.4	85.9	85.9
T3a	30.85	43.15	51.75	58.5	62.2	66.8	68.5	69.15	70.55	71.35	72	72.35	73.1	73.45	73.45	73.85	73.85	73.6	73.6
Th	30.47	42.77	51.37	58.12	61.82	66.42	68.12	68.77	70.17	70.97	71.62	71.97	72.72	73.07	73.07	73.47	73.47	73.22	73.22
T4a	28.55	28.75	29.35	30.5	32.65	32.85	33.5	34.15	35	35.7	36.15	36.85	37	37.3	37.75	37.7	37.9	38.25	38.25
Ts	28.93	29.13	29.73	30.88	33.03	33.23	33.88	34.53	35.38	36.08	36.53	37.23	37.38	37.68	38.13	38.08	38.28	38.63	38.63
T4	28.9	29.3	30.1	31.4	32.6	33.5	34.7	35.5	36.2	37.1	37.6	38.1	38.5	38.8	39.1	39.3	39.5	39.6	39.6
T5	28.7	28.9	29.5	30.5	32.5	32.4	33.2	34	34.7	35.4	36	36.4	36.7	37	37.3	37.4	37.6	37.8	37.8
T6	28.8	29	29.6	30.5	32.4	32.1	33	33.9	34.5	35.2	35.9	36.1	36.5	36.8	37	37.2	37.4	37.5	37.5

Th-Ts	1.54	13.64	21.64	27.24	28.79	33.19	34.24	34.24	34.79	34.89	35.09	34.74	35.34	35.39	34.94	35.39	35.19	34.59	34.59
$\Delta Sp$ (mm)	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
D (mm)	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45
A (mm <sup>2</sup> )	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6
k (W/mK)	80.42	9.08	5.72	4.55	4.30	3.73	3.62	3.62	3.56	3.55	3.53	3.57	3.50	3.50	3.54	3.50	3.52	3.58	3.58

Lampiran 22. Hasil perhitungan pengujian konduktivitas termal 0% fraksi volume tepung beras

Suhu pada masing-masing titik pada waktu pengukuran t menit (oC)																			
T°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
T1	31	49	61	68.3	74.2	78	81.2	83.5	85.5	87.3	88.7	89.4	90.6	92	92	91.5	92	91.5	91.5
T2	29.9	47	56.7	64.5	69.4	73.4	76	77.7	79.4	80.8	81.9	82.7	83.6	84.7	84.7	84.3	84.7	84.3	84.3
T3	29	45.8	55.9	65	69.3	72.7	76.5	78.5	80.2	81.8	83.1	84	84.9	86.2	86.3	85.8	86.3	85.8	85.8
T3a	28.25	44	50.25	58.9	62.2	66.5	68.2	69	70.25	71.05	71.7	72.65	73.1	73.75	73.75	73.5	73.75	73.5	73.5
Th	27.87	43.62	49.87	58.52	61.82	66.12	67.82	68.62	69.87	70.67	71.32	72.27	72.72	73.37	73.37	73.12	73.37	73.12	73.12
T4a	28.85	29	29.5	30.5	32.8	32.85	33.5	34.15	34.85	39.9	36.15	36.85	37	37.6	37.8	38.15	37.8	38.15	38.15
Ts	29.23	29.38	29.88	30.88	33.18	33.23	33.88	34.53	35.23	40.28	36.53	37.23	37.38	37.98	38.18	38.53	38.18	38.53	38.53
T4	28.8	29.4	30.2	31.4	32.6	33.5	34.8	35.5	36.5	37.2	37.6	38.1	38.5	39.2	39.4	39.5	39.4	39.5	39.5
T5	28.7	29	29.5	30.5	32.5	32.4	33.2	34	34.7	35.4	36	36.4	36.7	37.3	37.5	37.7	37.5	37.7	37.7
T6	28.6	29	29.5	30.5	32.3	32.1	33	33.9	34.6	32.4	35.9	36.1	36.5	37.1	37.3	37.4	37.3	37.4	37.4

Th-Ts	1.36	14.24	19.99	27.64	28.64	32.89	33.94	34.09	34.64	30.39	34.79	35.04	35.34	35.39	35.19	34.59	35.19	34.59	34.59
$\Delta Sp$ (mm)	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10
D (mm)	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
A (mm <sup>2</sup> )	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4	397.4
k (W/mK)	94.36	9.01	6.42	4.64	4.48	3.90	3.78	3.76	3.70	4.22	3.69	3.66	3.63	3.63	3.65	3.71	3.65	3.71	3.71

### Lampiran 23. Alat penelitian



Box furnace (CarboliteRHF 16/3)



Universal Testing Machine



Digital balance (Sartorius type LC 1201 S)



Tarno Grocky type UPHG20 Japan



Mixer



Mesin uji konduktivitas termal

Lampiran 24. *Green body* hasil kompaksi



Lampiran 25. Spesimen uji konduktivitas termal hasil *sintering*



Lampiran 26. Spesimen uji tekan hasil *sintering* (20% Zr -80 %Tb)



















