

**SIFAT MEKANIK KOMPOSIT KERAMIK BERPENGUAT *FLY*
ASH DAN SERAT WOVEN/SiC SEBAGAI PELAPIS PIPA *SLURRY*
*TRANSPORT***

(Tesis)

Oleh

Beny Hartawan
1825021002



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

SIFAT MEKANIK KOMPOSIT KERAMIK BERPENGUAT *FLY ASH* DAN SERAT *WOVEN/SiC* SEBAGAI PELAPIS PIPA *SLURRY* *TRANSPORT*

Oleh

BENY HARTAWAN

Pada sistem perpipaan *slurry transport* pada PLTU, pipa digunakan untuk mendistribusikan *fly ash* sisa pembakaran batu bara, sehingga pipa menjadi lebih abrasif yang berdampak pada sistem operasi. Pelapisan pada internal pipa baja dengan komposit dilakukan sehingga dapat menambah usia pakai pipa. Komposit keramik dengan matrik kaolin diberikan penguat *fly ash*, *carbon black* (CB), serat karbon dan gelas, serta serat SiC. Ukuran serbuk sebesar 100 μm , dengan pencampuran serbuk selama 90 menit. Pada serat karbon dan gelas dengan susunan serat *woven* dan serat SiC acak. Pembentukan sampel menggunakan metode uniaksial pada tekanan 25 MPa. Selanjutnya sintering pada suhu 1100 °C, ditahan selama 2 jam. Pengujian yang dilakukan meliputi, uji TG/DTA, densitas dan porositas, uji keausan, kekuatan tekan dan SEM.

Hasil penelitian menunjukkan pada komposit berpenguat serat karbon dan gelas dengan susunan serat *woven* tidak dapat digunakan karena serat tidak tahan terhadap temperatur sintering kaolin yang tinggi. Akibat temperatur sintering yang rendah menyebabkan nilai densitas rendah dan porositas tinggi, serta komposit memiliki nilai spesifik abrasi yang tinggi. Pada komposit berpenguat serat SiC dengan orientasi serat acak menunjukkan nilai densitas yang meningkat dan porositas menurun seiring dengan kenaikan suhu sintering. Nilai densitas tertinggi sebesar 17,23 gr/cm^3 sampel KS dan densitas terendah sebesar 16,02 gr/cm^3 sampel KCB. Densitas yang rendah pada sampel KCB akibat tanpa adanya penguat serat. Serta nilai porositas terendah yaitu 4,64 % pada sampel KCBS dan porositas tertinggi yaitu 5,76 % pada sampel KFS. Pada uji keausan, nilai spesifik abrasi terendah yaitu $3.52 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ pada sampel KCBS dan nilai spesifik abrasi tertinggi yaitu $16.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ pada sampel KFS. Untuk nilai uji kekuatan tekan terendah yaitu 4.58 kgf/mm^2 pada sampel KCB dan nilai kekuatan tekan tertinggi yaitu 12.42 kgf/mm^2 pada sampel KCBS. Penambahan serat SiC dan *carbon black* (CB) dapat meningkatkan ketahanan aus serta kekuatan tekan pada komposit. Hasil foto SEM menunjukkan semakin merata ukuran maupun bentuk butir yang seragam diiringi jumlah pori yang semakin sedikit mengindikasikan sampel tersebut memiliki efek kekuatan yang besar dibuktikan dari hasil uji pada sampel KCBS.

Kata kunci: komposit keramik, kaolin, *fly ash*, *carbon black* (CB), serat karbon dan gelas *woven* dan serat SiC.

ABSTRACT

MECHANICAL PROPERTIES OF FLY ASH REINFORCED CERAMIC COMPOSITES AND WOVEN/SiC FIBER AS SLURRY TRANSPORT PIPE COATING

By

BENY HARTAWAN

In the slurry transport piping system at the PLTU, the pipe is used to distribute fly ash left over from coal combustion, so that the pipe becomes more abrasive which has an impact on the operating system. The internal coating of the steel pipe with ceramic composite is carried out so that it can increase the service life of the pipe. Ceramic composites with kaolin matrix are reinforced with fly ash, carbon black (CB), carbon and glass fiber, and SiC fiber. The size of the powder was 100 μm , with powder mixing for 90 minutes. In carbon and glass fiber with the arrangement of woven fiber and random SiC fiber. Formation of the sample using the uniaxial method at a pressure of 25 MPa. Then sintered at a temperature of 1100 $^{\circ}\text{C}$, held for 2 hours. Tests carried out include, TG/DTA test, density and porosity, wear test, compressive strength and SEM.

The results showed that carbon and glass fiber reinforced composites with woven fiber composition could not be used because the fibers could not withstand high kaolin sintering temperatures. Due to the low sintering temperature, the density values are low and the porosity is high, and the composite has a high specific abrasion value. In SiC fiber-reinforced composites with random fiber orientation, the density value increases and the porosity decreases with increasing sintering temperature. The highest density value was 17.23 gr/cm^3 KS sample and the lowest density was 16.02 gr/cm^3 KCB sample. The low density of the KCB sample is due to the absence of fiber reinforcement. And the lowest porosity value is 4.64 % in the KCBS sample and the highest porosity is 5.76 % in the KFS sample. In the wear test, the lowest specific abrasion value is $3.52 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ KCBS samples and the highest specific abrasion was $16.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ KFS samples. Then in the lowest value of 4.58 kgf/mm^2 KCB samples and the highest compressive strength test of 12.42 kgf/mm^2 KCBS samples. The addition of SiC fiber and carbon black (CB) can increase the wear resistance and compressive strength of the composite. The results of the SEM photo show that the size and shape of the grains are uniform and the number of pores is getting smaller, indicating that the sample has a large strength effect, as evidenced by the results of the KCBS sample test.

Keywords: ceramic composite, kaolin, fly ash, carbon black (CB), carbon fiber and glass woven and SiC fiber.

**SIFAT MEKANIK KOMPOSIT KERAMIK BERPENGUAT *FLY ASH*
DAN SERAT *WOVEN/SiC* SEBAGAI PELAPIS PIPA *SLURRY*
*TRANSPORT***

Oleh

BENY HARTAWAN

(Tesis)

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

**Pada
Program Pasca Sarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCA SARJANA MAGISTER TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

Judul Tesis : SIFAT MEKANIK KOMPOSIT KERAMIK
BERPENGUAT *FLY ASH* DAN SERAT
WOVEN/SiC SEBAGAI PELAPIS PIPA
SLURRY TRANSPORT

Nama Mahasiswa : **Beny Hartawan**

NPM : 1825021002

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



1. Komisi Pembimbing

Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.
NIP. 197108171998021003

Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197008122001121001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.
NIP. 197108171998021003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.

Anggota Penguji : Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji Utama I : Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji Utama II : Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Jr. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 197509282001121002

3. Direktur Pasca Sarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.
NIP. 197104151998031005

Tanggal Lulus Ujian Tesis: 23 April 2022

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul "**Sifat Mekanik Komposit Keramik Berpenguat *Fly Ash* dan Serat *Woven/SiC* Sebagai Pelapis Pipa *Slurry Transport***" adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara tidak sesuai etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiatisme.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan saksi yang diberikan kepada saya; saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 23 April 2022

Yang Membuat,



Beny Hartawan
Beny Hartawan
NPM. 1825021002

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Beny Hartawan, lahir pada tanggal 24 Mei 1995 di Fajar Baru, Kecamatan Jati Agung, Lampung Selatan. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Wahid dan Ibu Sumiyati.

Penulis memulai pendidikan formal pada tahun 2001 di SDN 1 Fajar Baru dan lulus pada tahun 2006, kemudian melanjutkan ke SMP AL-HUDA dan lulus pada tahun 2009. Penulis melanjutkan ke Sekolah Menengah Kejuruan di SMKN 2 dan lulus pada tahun 2012.

Tahun 2012 penulis diterima sebagai mahasiswa Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui Program Studi Sarjana (S1). Selama menjadi mahasiswa Teknik Mesin penulis aktif di beberapa organisasi internal kampus diantaranya sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dan BEM U KBM Unila. Tahun 2015 Penulis melaksanakan kerja praktek di PT. Garuda Bumi Perkasa (GBP). Penulis mengambil konsentrasi di bidang Material dan telah melakukan penelitian dengan judul “Analisis Pengaruh Perlakuan Panas *Artificial Aging* Pada Aluminium Paduan (Al-Mg-Si) yang Dicor Ulang Terhadap Sifat Mekanis”. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada tanggal 22 Februari 2018.

Tahun 2018 penulis melanjutkan studi Pasca Sarjana melalui Program Studi S2 Teknik Mesin Universitas Lampung dan mengambil bidang konsentrasi rekayasa material. Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik Penulis melakukan penelitian yang berjudul **“Sifat Mekanik Komposit Keramik Berpenguat *Fly Ash* dan Serat *Woven/Sic* Sebagai Pelapis Pipa *Slurry Transport*”** di bawah bimbingan Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. dan Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D.

Pada tanggal **23 April 2022** Penulis telah menyelesaikan tesis dan telah melaksanakan sidang tesis.

Motto

Pendidikan bukanlah proses mengisi wadah yang kosong. Pendidikan adalah proses menyalakan api pikiran. (B. Yeats)

Kegagalan dan kesalahan mengajarkan untuk mengambil pelajaran dan menjadi yang lebih baik.

*Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan, maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras dan hanyalah kepada-Nya lah kamu berharap.
(Q.S. Asy-Syarh (94): (6-8))*

PERSEMBAHAN

*Dengan segala kerendahan hati kupersembahkan karya kecilku ini
untuk orang-orang yang aku sayangi:*

Bapak dan Ibu Tercinta

*Atas segala pengorbanan, kesabaran, keikhlasan, doa, cinta dan kasih
sayangnya*

Sebagai motivasi untuk segera menyelesaikan Tesis

Adikku

Bagus Hartawan

Atas segala perhatian, doa dan dukungannya

Keluarga Besar Penulis

***Teman-teman Seperjuangan, Magister Teknik Mesin
Angkatan 2018***

***Almamater Tercinta
Universitas Lampung***

SANWACANA

Assalamualaikum wr.wb.

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT, yang senantiasa mencurahkan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan menyusunnya menjadi sebuah karya ilmiah yang berjudul “Sifat Mekanik Komposit Keramik Berpenguat *Fly Ash* dan Serat *Woven/SiC* Sebagai Pelapis Pipa *Slurry Transport*”. Karya ilmiah ini merupakan salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung. Sholawat serta salam tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi panutan serta membawa umat manusia dari kegelapan menuju dunia yang terang benderang.

Limpahan rasa hormat, cinta, dan kasih sayang tiada tara kepada ibu Sumiyati dan bapak Wahid yang telah mendidik dan membesarkan dengan penuh cinta dan kasihnya dan yang selalu memberikan doa disetiap langkah untuk keberhasilan Penulis. Kepada keluarga dan saudara yang selama ini telah banyak memberikan doa, perhatian, kasih sayang, semangat dan dukungannya, semoga Allah SWT senantiasa mengumpulkan kita semua dalam kebaikan dan ketaatan kepada-Nya.

Terimakasih setinggi-tingginya penulis sampaikan dengan segala kerendahan hati kepada:

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa mencurahkan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik pada Prodi Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung.

Tesis dengan judul “Sifat Mekanik Komposit Keramik Berpenguat *Fly Ash* dan Serat *Woven/SiC* Sebagai Pelapis Pipa *Slurry Transport*” dapat diselesaikan berkat dukungan, bantuan dan doa dari semua pihak.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyajian Tesis. Menyadari hal ini, maka dengan segala kerendahan hati penulis akan menerima kritik maupun saran yang bersifat membangun yang tentunya akan lebih mendorong kemajuan penulis dikemudian hari.

Bandar Lampung, 23 April 2022

Penulis,

Beny Hartawan

1. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penulisan tesis;
2. Bapak Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing kedua, yang telah menyediakan waktu serta mengarahkan saya dalam penyusunan tesis;
3. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji utama. Terimakasih atas saran-saran serta masukannya dalam penyempurnaan penulisan tesis.
4. Bapak Prof. Dr. Sugiyanto, M.T. selaku dosen penguji kedua. Terimakasih untuk masukannya dalam penyempurnaan penulisan tesis.
5. Seluruh Dosen maupun Staf Program Studi Magister Teknik Mesin, baik berupa materi perkuliahan, teladan dan motivasi selama penulis melaksanakan studi;
6. Staf administrasi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung;
7. Teman-teman Magister Teknik Mesin angkatan 2018; Mas Agung Wibowo, Zaenal Arifin, Opi Sumardi, Mas Ambar Pambudi, Mas Wisnu Wardana, Pak Ruli Einsten, Pak Andriyanto, dan Pak Agung Nugroho semoga kebersamaan dan persaudaraannya dapat berlanjut diluar kampus.
8. Semua pihak baik yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tesis.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan, masih banyak terdapat kesalahan serta kekurangan. Menyadari hal tersebut dengan segala kerendahan hati penulis akan menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca, yang

tentunya akan lebih mendorong kemajuan penulis dikemudian hari. Semoga tesis ini dapat berguna bagi penulis khususnya dan pembaca. Akhir kata penulis ucapkan banyak terimakasih.

Wasalamualaikum wr.wb.

Bandar Lampung, 23 April 2022
Penulis,

Beny Hartawan

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian	5
1.3. Batasan Masalah	5
1.4. Manfaat Penelitian	6
1.5. Sistematika Penulisan Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Sistem perpipaan <i>slurry transport</i>	9
2.2. Keramik	11
2.3. Komposit	12
2.3.1. Klasifikasi penguat komposit	13
2.4. <i>Fly ash</i>	15
2.4.1. Klasifikasi <i>fly ash</i>	17
2.5. Kaolin	18
2.6. <i>Carbon black</i> (CB)	18
2.7. Serat gelas.....	19
2.8. Serat karbon.....	20
2.9. <i>Silicon carbide</i> (SiC)	21
2.10. Metalurgi serbuk.....	22
2.10.1. Pencampuran serbuk.....	23
2.10.2. Kompaksi (<i>compaction</i>)	24
2.10.3. Sintering.....	24
2.11. Pengujian TG/DTA	26
2.12. Pengujian densitas dan porositas	27
2.13. Pengujian kekerasan	28
2.14. Pengujian keausan	32

2.15. Pengujian tekan	34
2.16. <i>Scanning electron microscopy</i> (SEM).....	34

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian.....	36
3.2. Bahan Penelitian.....	36
3.3. Peralatan Penelitian	40
3.4. Komposisi Penelitian.....	45
3.5. Pabrikasi Sampel	46
3.6. Pengujian Sampel	48
3.7. Diagram Alir Penelitian.....	57

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data hasil penelitian.....	59
4.1.1. Pengujian TG/DTA.....	59
4.1.2. Pengujian Densitas	61
4.1.3. Pengujian Porositas.....	61
4.1.4. Pengujian Keausan	62
4.1.5. Pengujian Tekan	63
4.1.6. SEM	63
4.2. Komposit berpenguat serat <i>woven</i>	66
4.2.1. TG/DTA.....	66
4.2.2. Densitas	68
4.2.3. Porositas.....	69
4.2.4. Keausan	70
4.3. Komposit berpenguat serat SiC acak.....	72
4.3.1. Densitas	72
4.3.2. Porositas.....	74
4.3.3. Keausan	75
4.3.4. Kekuatan Tekan.....	77
4.3.5. Pengamatan Permukaan dengan SEM.....	81

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	85
5.2. Saran	86

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Sistem pipa <i>slurry transport</i>	9
2. Pipa <i>slurry transport</i>	10
3. Keramik pelapis pipa <i>slurry transport</i>	11
4. <i>Fly ash</i> pada PLTU Bukit Asam, Palembang	37
5. Kaolin Bangka Belitung	38
6. Serat karbon <i>woven</i> (anyaman).....	38
7. Serat E-gelas <i>woven</i> (anyaman).....	39
8. Serat <i>silicon carbide</i> (SiC)	40
9. Cetakan pengujian, (a). uji keausan (b). uji kekuatan tekan	41
10. Mesin Analysette 3 Pro	41
11. Timbangan digital Blanco i-2000.....	42
12. <i>Mixer</i> HM - 620.....	43
13. Mesin <i>hydraulic hand pump</i> SPH-1200	43
14. <i>Furnace</i> Lenton model UAF 14/5	44
15. Kaolin kalsinasi (metakaolin).....	46
16. Serbuk kaolin, metakaolin, <i>fly ash</i> dan <i>carbon black</i> 100 μm	47
17. Mesin Mettler Tuledo TGA/SDTA851	49
18. Mekanisme uji keausan	53
19. Mesin uji keausan Ogoshi tipe OAT-U	53
20. Mesin UTM kapasitas 100kN	54

21.	Mesin SEM JEOL JSM-6390A	56
22.	Diagram Alir Penelitian	58
23.	Kurva TG/DTA pada kaolin.....	59
24.	Kurva TG/DTA pada <i>fly ash</i>	60
25.	Kurva TG/DTA pada serat karbon	60
26.	Foto SEM pada sampel KS pembesaran 100, 20, 10 dan 2 μm	64
27.	Foto SEM pada sampel KFS pembesaran 100, 20, 10 dan 2 μm	65
28.	Foto SEM pada KCB pembesaran 100, 20, 10 dan 2 μm	65
29.	Foto SEM pada KCBS pembesaran 100, 20, 10 dan 2 μm	66
30.	Grafik hasil uji densitas komposit berpenguat serat <i>woven</i>	68
31.	Grafik hasil uji porositas komposit berpenguat serat <i>woven</i>	70
32.	Spesifik abrasi pada komposit berpenguat serat <i>woven</i>	71
33.	Grafik hasil uji densitas komposit berpenguat serat SiC.....	73
34.	Grafik hasil uji porositas komposit berpenguat serat SiC	75
35.	Grafik spesifik abrasi pada komposit berpenguat serat SiC	76
36.	Grafik kekuatan tekan pada komposit berpenguat serat SiC.	79
37.	Kurva <i>load vs displacement</i> komposit berpenguat serat SiC 1.....	79
38.	Kurva <i>load vs displacement</i> komposit berpenguat serat SiC 2.....	80
39.	Kurva <i>load vs displacement</i> komposit berpenguat serat SiC 3.....	80
40.	Foto SEM pada sampel KS pembesaran 2 μm	81
41.	Foto SEM pada sampel KFS pembesaran 2 μm	81
42.	Foto SEM pada sampel KCB pembesaran 2 μm	82
43.	Foto SEM pada sampel KCBS pembesaran 2 μm	82

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi dan klasifikasi <i>fly ash</i>	16
2. Komposisi kimia kaolin	18
3. <i>Properties</i> serat E-gelas	20
4. <i>Properties</i> serat karbon	21
5. <i>Properties</i> serat SiC	21
6. Skala pengujian kekerasan <i>rockwell</i>	31
7. Data <i>laboratory test result fly ash</i> pada PLTU Bukit Asam	37
8. Spesifikasi serat karbon <i>woven</i> (anyaman).	38
9. Spesifikasi serat E-gelas <i>woven</i> (anyaman).	49
10. Spesifikasi serat <i>silicon carbide</i> (SiC)	40
11. Spesifikasi mesin Analysette 3 Pro	41
12. Spesifikasi timbangan digital Blanco i-2000	42
13. Spesifikasi <i>mixer</i> HM-620	43
14. Spesifikasi mesin <i>hydraulic hand pump</i> SPH-1200	44
15. Spesifikasi <i>furnace</i> Lenton model UAF 14/27.....	44
16. Komposisi penelitian.....	45
17. Spesifikasi mesin Mettler Tuledo TGA/SDTA851	49
18. Spesifikasi pengujian densitas	51
19. Spesifikasi mesin keausan Ogoshi tipe OAT-U	53
20. Spesifikasi mesin UTM kapasitas 100kN	55

21.	Spesifikasi mesin SEM JEOL JSM-6390A	56
22.	Densitas komposit berpenguat serat <i>woven</i>	61
23.	Densitas komposit berpenguat serat SiC	61
24.	Porositas komposit berpenguat serat <i>woven</i>	61
25.	Porositas komposit berpenguat serat SiC	62
26.	Spesifik abrasi komposit berpenguat serat <i>woven</i>	62
27.	Spesifik abrasi komposit berpenguat serat SiC	62
28.	Kekuatan tekan komposit berpenguat serat SiC.....	63

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tingkat kebutuhan pipa baja pada industri *power plant*, minyak dan gas, konstruksi maupun industri lainnya mengalami peningkatan, seiring dengan berkembangnya perindustrian nasional (Kementerian Perindustrian, 2014). Pipa merupakan sarana transportasi tak bergerak yang berfungsi mendistribusikan fluida, baik dalam bentuk padat, cair maupun gas. Dalam aplikasinya, sistem perpipaan selalu terjadi kerugian energi. Kerugian energi tersebut dapat diakibatkan oleh gesekan fluida dengan dinding pipa, perubahan luas penampang, sambungan, dan katup. Sebagai contoh pada sistem perpipaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) memiliki sistem konstruksi yang kompleks. Sistem tersebut dirancang agar dapat beroperasi baik pada beban yang besarnya tetap maupun berubah menurut fungsi waktu. Hal tersebut dikarenakan fluida yang didistribusikan berupa uap air bertekanan dan bertemperatur tinggi, sehingga dapat memicu terjadinya kegagalan pipa.

Sistem perpipaan pada PLTU memiliki bagian yang disebut dengan sistem pipa *slurry transport*. Pipa tersebut digunakan untuk mendistribusikan *fly ash* sisa pembakaran batu bara. Sistem pendistribusian *fly ash* ditransfer dari *economizer hopper* menuju silo menggunakan sistem penanganan pneumatik yang melalui sistem pipa *slurry transport*. Selanjutnya *fly ash* ditransportasikan ke bagian ujung silo pada daerah pembuangan setelah dikondisikan (PT. PLN Persero, 2015). Dimana *fly ash* yang didistribusikan masih bertemperatur tinggi yang dapat berpengaruh terhadap bagian internal pipa menjadi lebih abrasif. Sehingga berdampak pada pipa menjadi mudah bocor akibat gesekan dengan *fly ash* yang

didistribusikan. Kerusakan pipa terutama terjadi pada daerah sambungan pipa yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan dan berdampak pada sistem operasi, keselamatan pekerja dan penurunan umur pakai pada sistem pipa *slurry transport*.

Kegiatan pada PLTU sebagai penyumbang energi listrik menyisakan jumlah limbah yang besar setiap tahunnya. Berdasarkan data energi listrik per jenis energi primer Indonesia, diproyeksikan penggunaan batubara mencapai 56.91 % pada tahun 2016 dan mengalami kenaikan sebesar 2.15 % pada tahun 2017 yaitu mencapai 59.06 % (Kementerian ESDM, 2016). Peningkatan penyediaan energi listrik melalui pembangunan PLTU, berkorelasi dengan peningkatan jumlah limbah *fly ash* yang dihasilkan. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009, *fly ash* yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara dikategorikan sebagai Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang dapat menjadi masalah lingkungan.

Jumlah yang besar dari limbah *fly ash*, memungkinkan tingkat kebutuhan pipa akan mengalami peningkatan akibat kerusakan. Berdasarkan hal tersebut *fly ash* dimanfaatkan sebagai material penyusun komposit yang digunakan untuk pelapis pipa dengan teknologi komposit. Komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih penyusun, sehingga diperoleh kombinasi sifat fisik dan mekanis yang lebih baik dari material penyusunnya (Asfarizal dkk., 2016). Material komposit memiliki keunggulan pada bidang rekayasa dan industri, serta tuntutan penggunaan material yang ekonomis, sifat mekanik yang baik dan tahan terhadap korosi, sehingga komposit dapat menjadi material alternatif selain logam. Seiring dengan perkembangannya, komposit secara signifikan telah dapat menggantikan peran material konvensional dalam produk. (Kharisma dan Subaer, 2018)

Penelitian *fly ash* Bukit Asam dilakukan Karo-karo dan Sembiring, (2009) melaporkan bahwa peningkatan densitas dan kekerasan, diikuti penurunan

porositas seiring dengan kenaikan suhu sintering. Peningkatan kekerasan tersebut terjadi hingga suhu sintering 1300 °C. Disamping itu, dari hasil analisis struktur *fly ash* didominasi oleh SiO_2 yang menurun seiring kenaikan sintering dan struktur pendukung CaSiO_3 , $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, FeSiO_4 dan MgSiO_3 semakin meningkat dengan kenaikan sintering, diikuti tingkat homogenitas dengan distribusi ukuran butir dan pori-pori semakin kecil. Hamzah dkk., (2015) melaporkan dengan meningkatnya fraksi berat *fly ash* dan temperatur sintering dapat meningkatkan kekuatan impak dan bending. Kekuatan impak sebesar 1,27 J dan kekuatan bending tertinggi pada fraksi berat *fly ash* 75 % pada suhu sintering 1200 °C sebesar 53,04 MPa.

Falah dkk., (2020); Abdullah dkk., (2009) melaporkan penambahan kaolin dan karbon aktif dapat meningkatkan kekuatan keramik. Kekuatan keramik tertinggi diperoleh pada penambahan karbon dengan fraksi rendah atau sekitar 0,05 – 0,1 w/w. Penambahan fraksi karbon lebih lanjut di atas nilai tersebut akan kembali mengalami penurunan kekuatan. Hal tersebut disebabkan penambahan karbon yang berlebih, berakibat pada munculnya ikatan baru, yaitu ikatan antar karbon yang sifatnya lebih lemah dibandingkan ikatan antar *clay* dan ikatan antar *clay*-karbon. Kekuatan keramik juga dipengaruhi oleh tinggi suhu pembakaran dan lama waktu tahan, dimana semakin tinggi suhu pembakaran akan semakin meningkatkan kekuatan keramik dan waktu tahan yang lebih lama dari 2 jam dapat menurunkan kekuatan keramik, diduga akibat hilangnya karbon atau mengalami penguapan akibat pembakaran.

Secara mekanik keramik memiliki keunggulan dalam kekerasan dan ketahanan panas yang baik, namun memiliki kekuatan lentur yang relatif rendah. Sehingga untuk meningkatkan sifat mekaniknya dilakukan dengan cara menambahkan serat. Serat digunakan sebagai penguat yang berperan agar material memiliki kekuatan lentur, ketangguhan dan kekuatan tarik yang tinggi (Jingkun *et al.*, 2015; Rustan *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2014).

Aspek lain yang juga menentukan adalah orientasi dan karakteristik dari serat yang memiliki ketangguhan serta ketahanan panas yang baik.

Penelitian Jaber, (2017) melaporkan penambahan serat gelas bermanfaat dalam menurunkan suhu pembakaran dan dapat mempercepat densifikasi melalui peningkatan difusivitas batas butir. Serta peningkatan persentase pada serat gelas yang tinggi dapat meningkatkan sifat ketangguhan. Kemudian Papargyris, *et al.* (2014) melaporkan perbandingan penambahan serat karbon dan kaolin pada suhu sintering 1200 °C - 1300 °C. Pada hasil SEM menunjukkan ikatan antarmuka yang lemah antara serat karbon dan kaolin dengan penambahan serat, yang berakibat terjadinya *pull out* dan nilai regangan kritis yang meningkat. Akan tetapi, hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai ketangguhan jauh lebih besar bila dibandingkan tanpa adanya penambahan serat.

Rathnakar and Shivanand, (2013) melaporkan penambahan serat karbon yang terlalu banyak dapat menyebabkan terjadinya retakan. Hal tersebut disebabkan serat karbon merupakan penyerap panas yang tinggi, sehingga seiring dengan kenaikan temperatur akan menyebabkan stress termal antara matriks dan agregat. Selanjutnya, Lin, *et al.* (2008) melaporkan penambahan serat karbon memiliki penguatan yang besar dan efek ketangguhan yang tinggi pada saat persentase serat karbon dan pada peningkatan serat karbon yang tinggi efek penguatan dan ketangguhan mengalami penurunan. Hal tersebut disebabkan kerusakan pada serat, akibat pembentukan tegangan geser yang tinggi antar serat.

Selain berperan sebagai material keramik serat SiC juga dapat berperan sebagai material semikonduktor dan penguat komposit yang memiliki sifat fisik dan kimia yang baik seperti, tingginya tingkat kekerasan, titik leleh, temperatur dekomposisi, dan konduktivitas termal (Avincola, *et al.* 2017; Su, *et al.* 2016). Penelitian Wang, *et al.* (2008) melaporkan penambahan serat SiC dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada persentase serat SiC 15-20 %. Kekerasan mikro pada daerah yang dekat dengan serat meningkat hingga mendekati kekerasan serat SiC.

Peningkatan sifat mekanik komposit keramik didasarkan pada struktur serat dan mekanisme ketangguhan penambahan serat menghasilkan komposit yang kuat. Untuk kebutuhan industri, khususnya sebagai pelapis pipa *slurry transport*, dimana hal tersebut membutuhkan material yang memiliki ketahanan aus, dan kekuatan tekan, dan tahan terhadap temperatur tinggi dilingkungan yang korosif. Penambahan serat karbon/gelas pola anyaman dan serat SiC acak, sebagai perbandingan untuk meningkatkan sifat mekanik keramik. Serta, penambahan *fly ash* sebagai penguat juga dapat dimungkinkan menambah nilai kekerasan dalam upaya mengurangi akumulasi limbah *fly ash*. Komposit keramik berpenguat *fly ash*, dan serat karbon/gelas dan SiC dapat menjadi solusi alternatif permasalahan yang terjadi pada pipa *slurry transport* serta dapat menambah usia pakai pipa.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian komposit keramik berpenguat *fly ash* dan serat *woven*/SiC adalah sebagai berikut:

1. Membuat komposit keramik sebagai pelapis pipa *slurry transport*.
2. Menguji ketahanan aus dan kekuatan tekan komposit keramik.
3. Mengetahui mekanisme kegagalan mikrostruktur menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM).
4. Menganalisa pengaruh penambahan serat terhadap ketahanan aus dan kekuatan tekan.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah terkait persiapan, pabrikasi, pengujian, dan hasil yang diperoleh yaitu sebagai berikut:

1. Menggunakan serbuk kaolin, metakaolin, *fly ash*, dan *carbon black* (CB) seri N220.

2. Serat karbon dan gelas dengan susunan *woven*, dan serat SiC dengan orientasi acak.
3. Ukuran masing-masing serbuk sebesar 100 μm .
4. Tekanan kompaksi sebesar 25 MPa.
5. Temperatur sintering 800 °C pada komposit berpenguat serat *woven*, dan 1100 °C pada komposit berpenguat serat SiC.
6. Pelapisan dilakukan pada pipa *slurry transport* hanya bagian internalnya dan pengaplikasiannya mengikuti standar operasional PLTU Bukit Asam, Palembang.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian komposit keramik berpenguat *fly ash* dan serat *woven*/SiC adalah sebagai berikut:

1. Sebagai alternatif pemanfaatan *fly ash* untuk penguat komposit keramik yang diaplikasikan pada pipa.
2. Membuat komposit keramik dengan teknologi komposit agar dapat menekan biaya yang dikeluarkan untuk *maintenance* maupun pembelian pipa baru akibat kerusakan yang terjadi pada pipa *slurry transport*.
3. Menambah pengetahuan bagi dunia pendidikan, mengenai pemanfaatan kaolin sebagai matrik dan *fly ash*, serat karbon dan gelas *woven*, serta serat SiC sebagai penguat komposit.
4. Meningkatkan wawasan peneliti khususnya pada komposit keramik.

1.5. Sistematika Penulisan Penelitian

Sistematika penulisan dalam penyusunan laporan penelitian adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang dasar-dasar teori mengenai hal-hal yang berkaitan dalam penelitian seperti; sistem perpipaan *slurry transport*, keramik, komposit, *fly ash*, kaolin, *carbon black* (CB), serat gelas, serat karbon, serat *silicon carbida* (SiC), metalurgi serbuk, pengujian TG/DTA (*thermogravimetric analysis/ differential thermal analysis*), pengujian kekerasan, pengujian keausan, pengujian tekan dan *scanning electron microscopy* (SEM).

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan metode dan uraian tahapan-tahapan yang dilakukan seperti; tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan penelitian, komposisi penelitian, pabrikasi sampel, pengujian sampel (pengujian TG/DTA, densitas, porositas, keausan, tekan, *scanning electron microscopy* (SEM), dan diagram alir penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan data hasil pengujian seperti; pengujian TG/DTA, densitas, porositas, keausan, kekuatan tekan dan SEM. Selanjutnya menganalisa data sesuai jenis pengujian dan melakukan pembahasan berdasarkan data yang diperoleh.

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan kesimpulan hasil analisa dan pembahasan data pengujian. Serta memberikan saran yang dapat dijadikan masukan atau referensi untuk

pengembangan penelitian selanjutnya khususnya pada komposit keramik sebagai pelapis pipa.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan sumber studi literatur yang menjadi referensi penulis dalam melakukan penyusunan laporan penelitian.

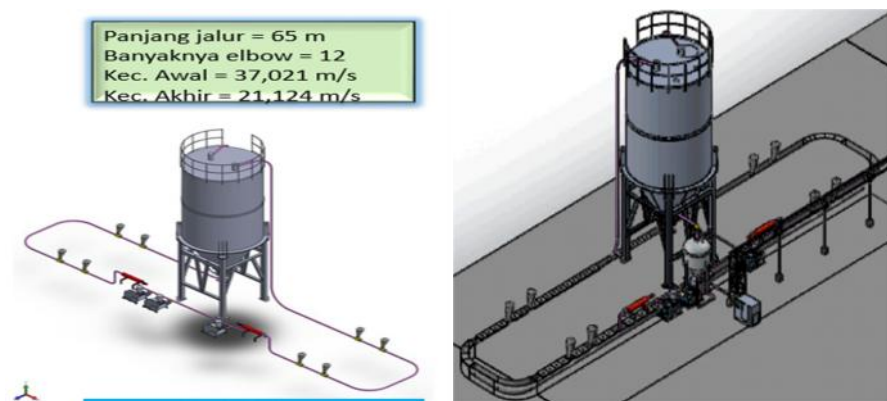
LAMPIRAN

Memuat data-data hasil yang diperoleh dalam penelitian sebagai pelengkap dan pendukung penulis dalam laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Perpipaan *Slurry Transport*

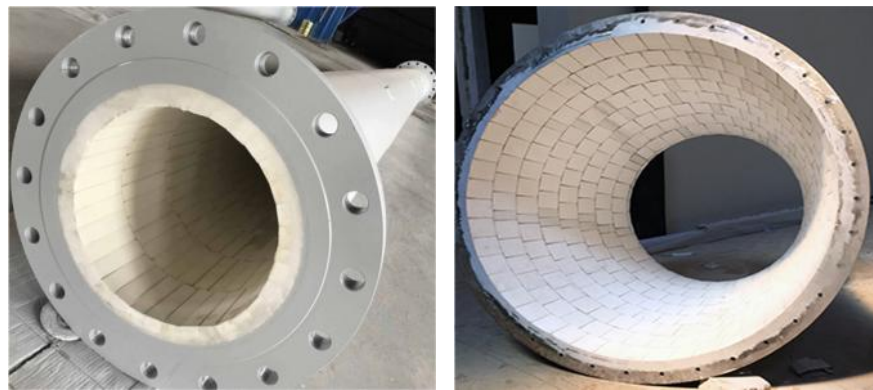
Sistem perpipaan *slurry transport* merupakan sistem perpipaan yang digunakan untuk mendistribusikan *fly ash* sisa pembakaran batu bara pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Sistem penanganan *fly ash* ditransfer dari *economizer hopper*, melalui *gas hopper* dan *ESP hopper* menuju *fly ash silo* dengan menggunakan penanganan sistem pneumatik. Pada sistem *fly ash hopper* dilengkapi dengan sistem pneumatik untuk penanganan *fly ash* yang didistribusikan menuju *fly ash silo* yang disebut dengan sistem perpipaan *ash transfer*. Selanjutnya *fly ash* akan ditransportasikan pada ujung silo menggunakan pipa *slurry transport* dan dilakukan pembuangan pada daerah pembuangan akhir setelah *fly ash* dikondisikan. *Fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batubara pada PLTU sebesar 5 % dari jumlah batubara yang digunakan untuk setiap operasi. (PT. PLN Persero, 2015)



Gambar 1. Sistem pipa *slurry transport*.

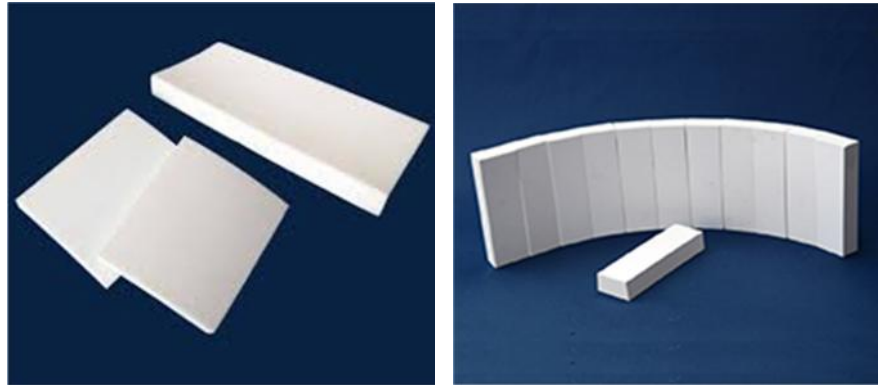
Sistem perpipaan *slurry transport* pada PLTU Bukit Asam memiliki panjang jalur 65 meter, *elbow* sebanyak 12 buah dan dari hasil pengukuran pipa *slurry transport* pada saat operasi masih bertemperatur

sekitar 200 °C – 280 °C. Aliran *slurry* dalam pipa memiliki karakter yang tergantung pada beberapa faktor seperti, ukuran dan distribusi partikel, konsentrasi padatan, tingkat turbulensi dan lain-lain. Dalam sistem perpipaan *slurry* harus memiliki kecepatan tertentu sehingga tidak terjadi pengendapan dalam pipa. Selain itu, hal yang harus diperhatikan pada aliran *slurry* adalah masalah keausan abrasif yang berakibat penipisan dinding internal pipa. Adanya keausan abrasi menyebabkan menurunnya sifat mekanik pipa yang dapat menyebabkan kebocoran pipa yang berdampak pada terhambatnya sistem operasi.



Gambar 2. Pipa *slurry transport*.

Pengendalian terhadap keausan abrasif dilakukan sebagai upaya untuk mencegah terjadinya kebocoran. Dimana pada sistem pipa tersebut digunakan menyalurkan material yang mengandung resiko terhadap sistem operasi. Pada bagian internal pipa dapat dilapisi dengan material keramik. Pelapisan tersebut dimaksudkan untuk melindungi pipa dari keausan akibat interaksi *fly ash* dengan dinding pipa. Material keramik tersebut akan berpengaruh pada kemampuan pipa dalam menerima beban gesek, tahan terhadap temperatur tinggi dan dapat menekan biaya *maintenance* ataupun penggantian pipa akibat kerusakan.



Gambar 3. Keramik pelapis pipa *slurry transport*.

2.2. Keramik

Keramik merupakan kombinasi yang berisikan sedikitnya sebuah logam dan non logam atau kombinasi dari dua unsur non logam yang dibentuk dari aplikasi panas dan tekanan. Material keramik memiliki keunggulan pada temperatur cair yang tinggi, tahan terhadap korosi, konduktivitas termal dan koefisien muai panas yang rendah. Keramik menurut fungsinya dapat diklasifikasikan pada bidang industri, keramik dikelompokkan sebagai gerabah, lempung keras (bata, pipa keramik), bahan tahan api, gelas dan keramik rekayasa. (Nurzal dan Siswanto, 2012)

Karakteristik ikatan senyawa pada keramik memiliki ikatan ionik dan ikatan kovalen, yang menyebabkan sifat-sifatnya berbeda dengan logam. Umumnya fasa keramik memiliki struktur kristalin, sehingga ikatan ionik menyebabkan keramik memiliki stabilitas tinggi. Selain itu keramik memiliki titik lebur yang tinggi dibandingkan logam atau bahan organik lainnya dan tahan terhadap perubahan kimia. Pada intensitas termal yang tinggi keramik dapat menghantar listrik walaupun konduktivitas termalnya lebih rendah dibandingkan dengan logam (Imran dkk., 2013). Keramik merupakan material komposit dengan sifat mekanik yang lebih baik dari pada super *alloy*, namun keramik memiliki sifat rapuh (*brittle*), sama halnya pada jenis keramik konvensional. Pada prinsipnya keramik terbagi menjadi 2 yaitu keramik tradisional dan keramik teknologi. Keramik tradisional merupakan keramik yang dibuat menggunakan bahan dasar

seperti, lempung, *feldspar* dan silika. Keramik tradisional menggunakan bahan-bahan bersifat amorf. Produk keramik tradisional seperti bahan pecah belah, kebutuhan rumah tangga dan industri. Selanjutnya, keramik teknologi merupakan keramik dalam pabrikasinya menggunakan oksida-oksida logam seperti, Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO . Dalam pembentukan material keramik memiliki beberapa tahapan dalam proses pembentukannya yaitu pembentukan *glass*, pengintian dan pertumbuhan kristal.

2.3. Komposit

Komposit pada umumnya terdiri dari dua unsur, yaitu serat sebagai pengisi (*filler*) dan pengikat serat atau matrik (Sunardi dkk., 2015). Konsep utama dari material komposit adalah material dibentuk dengan menambahkan penguat kedalam matrik. Penguat adalah material utama yang menentukan karakteristik mekanik komposit. Sedangkan matrik berfungsi untuk melindungi dan mengikat penguat. Penguat berbentuk partikel atau serbuk dapat meningkatkan nilai kekerasan dan tahan aus, sedangkan penguat berupa serat dapat meningkatkan ketangguhan.

Tujuan dari material komposit adalah sebagai upaya memperbaiki sifat mekanik ataupun sifat-sifat tertentu yang spesifik, memudahkan dalam desain manufaktur, dan menjadikan material yang lebih ringan. Komposit memiliki karakteristik yang ditentukan berdasarkan material pembentuk menurut *rule of mixture* sehingga perbandingan yang diperoleh lebih proporsional. Komposit dirancang dan diproduksi untuk diaplikasikan pada kinerja tinggi dan ringan. Berdasarkan material penyusunnya, komposit dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu:

1. Penguat

Penguat merupakan bagian utama komposit yang berfungsi sebagai penahan beban atau kontak dari luar. Syarat terbentuknya material komposit yaitu adanya ikatan antara matrik dan penguat. Kualitas ikatannya dipengaruhi oleh beberapa hal seperti ukuran partikel,

massa jenis, komposisi, waktu pencampuran, serta temperatur pemanasan (*sintering*).

2. Matrik

Matrik merupakan penyusun komposit yang paling dominan mengikat penguat. Dalam hal ini matrik berfungsi sebagai penghantar beban yang diterima serat, serta memberikan kekakuan, melindungi dari kerusakan eksternal, meneruskan atau memindahkan bidang geser antara serat dan matrik, sehingga matriks dan serat saling berhubungan erat. Pembuatan komposit membutuhkan ikatan permukaan yang kuat antara serat dan matriks, selain itu matriks harus mempunyai kesesuaian secara kimia agar reaksi yang terjadi antar matriks dan serat semakin kuat.

2.3.1. Klasifikasi Penguat Komposit

Berdasarkan penguatnya, komposit dibagi menjadi tiga yaitu sebagai berikut:

1. Komposit partikel (*particulate composites*) diklasifikasikan menjadi dua yaitu komposit partikel besar (*large particle composite*) merupakan material komposit yang interaksi matrik dan partikelnya tidak dapat diperbaiki pada tingkat atom atau molekuler (Callister, 2009). Sebagian besar komposit partikel besar fasa partikelnya akan lebih kaku dibandingkan matriksnya. Tinggi rendahnya sifat mekanik komposit bergantung dari ikatan antara matriks dan partikel. Partikel memiliki banyak geometri dan dimensi yang hampir sama dari setiap partikelnya. Partikel yang kecil dan merata diseluruh matrik akan menghasilkan komposit partikel yang optimum.

Fraksi volume dari matrik dan partikel akan mempengaruhi perilaku komposit partikel besar. Peningkatan sifat mekanik

dapat dilakukan dengan meningkatkan kandungan partikel. Secara matematis modulus elastisitas berdasarkan besar fraksi volume matrik dan partikel.

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \dots \dots \dots (1)$$

dan,

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \dots \dots \dots (2)$$

Persamaan *rule of mixture* digunakan untuk memprediksi modulus elastisitas antara batas atas dan batas bawah. Dimana E adalah modulus elastisitas, V adalah fraksi volume baik partikel ataupun matrik dan *c*, *m*, *p* adalah komposit, matriks, dan partikel.

Kemudian komposit penguatan dispersi (*dispersion strengthened composite*). Pada komposit tersebut kekuatan yang ditingkatkan dapat dicapai dari partikel yang sangat kecil pada fase terdispersi yang menghambat gerakan dislokasi. Partikel yang digunakan lebih kecil dengan diameter antara 0,01 dan 0,1 μm , interaksi partikel dan matrik yang menyebabkan penguatan tingkat atom atau molekuler (Callister, 2009). Penguatan terdispersi dipilih untuk tidak reaktif dengan fasa matrik sehingga penguatan dipertahankan pada suhu sintering tinggi dan periode waktu penahanan yang lama.

2. Komposit serat (*fibrous composites*) memiliki tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan material dengan kekuatan tinggi dan memiliki modulus elastisitas yang baik, akan tetapi perbedaan kekuatan dipengaruhi oleh ikatan antar muka antara serat dan matriks. Adapun posisi serat dapat bersifat kontinyu maupun acak tergantung pada pengaplikasian material tersebut. Komposit serat kontinyu dibuat secara laminasi atau susunan

serat yang kontinyu dalam orientasi yang berbeda untuk mendapatkan kekuatan yang diinginkan.

Serat dapat menghasilkan material komposit dengan kekuatan tinggi. Semakin kecil diameter dan fleksibilitas serat yang baik akan meningkatkan nilai kekuatannya, namun selain diameter kandungan dalam serat juga berpengaruh pada sifat mekanik. Komposit serat kontinyu umumnya sedikit acak sejajar yang dapat mengurangi kekuatan dan modulus elastisitasnya. Kemudian serat diskontinyu umumnya jauh lebih murah jika dibandingkan dengan serat kontinyu. Oleh sebab itu komposit dengan serat kontinyu digunakan hanya bila memerlukan kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Sedangkan, diskontinyu merupakan komposit dengan menggunakan serat pendek.

3. Komposit struktural diklasifikasi menjadi dua yaitu komposit lapis (*laminates composites*) merupakan komposit yang tersusun atas dua lapisan atau lebih yang tergabung menjadi satu. Pada setiap lapisnya memiliki karakteristik sifat yang berbeda. Sebagai contoh komposit lapis seperti bimetal, pelapisan logam, kaca yang dilapisi, komposit lapis serat. Selanjutnya yaitu komposit *sandwich (sandwich structure)* merupakan komposit yang tersusun atas lembaran yang terikat pada busa ringan atau inti. *Sandwich structure* memiliki kelenturan yang tinggi, rasio kekakuan yang juga tinggi dan secara luas digunakan dalam struktur *aerospace*.

2.4. Fly Ash

Fly ash merupakan material hasil pembakaran batubara pada PLTU. Pada proses pembakaran tersebut akan menghasilkan *bottom ash* dan *fly ash*. *Bottom ash* adalah partikel yang tertinggal dan dikeluarkan dari tungku pembakaran. Sedangkan *fly ash* adalah partikel sisa pembakaran yang

terbawa gas buang. *Fly ash* umumnya didefinisikan sebagai hasil pembakaran batubara pada PLTU yang berbentuk partikel-partikel halus. Komponen utama *fly ash* adalah silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), sisanya adalah karbon, kalsium, magnesium dan belerang. Sebagai hasil dari proses pembakaran, sifat-sifat *fly ash* juga ditentukan oleh komposisi dan sifat-sifat mineral pengotor dalam batubara serta proses pembakarannya. Pada proses pembakaran batubara, titik leleh abu akan jauh lebih tinggi dari temperatur pembakaran. Dari kondisi tersebut akan memperoleh abu dengan tekstur butiran yang halus. Ukuran partikel *fly ash* batubara bituminous berukuran $< 0,075$ mm dan kerapatan berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m^3 serta luas area spesifiknya dari 170 hingga 1000 m^2/kg . (Rommel dkk., 2015)

Faktor yang berpengaruh terhadap sifat fisik, kimia maupun teknis *fly ash* adalah jenis batubara, kemurnian, tingkat penghancuran, pemanasan, dan metode yang digunakan dalam penyimpanan atau penimbunan. Berdasarkan peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009, berisikan tentang acuan baku mutu dalam pengelolaan limbah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), *fly ash* dikategorikan sebagai limbah B3. Hal tersebut disebabkan dalam partikel *fly ash* terkandung oksida logam berat yang dapat mencemari lingkungan. Adapun komposisi dan klasifikasi *fly ash* sebagai berikut:

Tabel 1. Komposisi dan klasifikasi *fly ash*. (Widyaningsih dkk., 2012)

Komposisi (%)	Bituminus	Subbitumins	Lignit
SiO_2	20 – 60	40 – 60	15 – 45
Al_2O_3	5 – 35	20 – 30	20 – 25
Fe_2O_3	10 – 40	4 – 10	4 – 15
CaO	1 – 12	5 – 30	15 – 40
MgO	0 – 5	1 – 6	3 – 10
SO_3	0 – 4	0 – 2	0 – 10
Na_2O	0 – 4	0 – 2	0 – 6

K ₂ O	0 – 3	0 – 4	0 – 4
LOI	0 – 15	0 -3	0 – 5

Fly ash pada umumnya dibuang pada penampungan akhir dalam area industri. Penanganan *fly ash* batubara masih terbatas dibandingkan dengan jumlah limbah yang dihasilkan pada setiap operasinya. Atas dasar permasalahan tersebut pemanfaatan *fly ash* terus kembangkan guna meningkatkan nilai ekonomis dan dapat mengurangi dampak terhadap pencemaran lingkungan. Beberapa contoh pemanfaatan *fly ash* yaitu sebagai campuran beton atau pengganti semen pada pembuatan roster, bahan keramik serta adsorben.

2.4.1. Klasifikasi *Fly Ash*

Menurut ASTM C618 *fly ash* dikalsifikasikan dengan type F dan C. Perbedaan tersebut ada pada banyaknya calsium, silika, aluminium dan kadar besi. Meskipun type F dan type C memiliki perbedaan yang sangat ketat ditandai dengan penggunaanya guna memenuhi spesifikasi standar ASTM C618. Namun istilah tersebut kebanyakan digunakan berdasarkan daerah atau asal produksi batubara atau kadar CaO.

Pada *fly ash* type F diproduksi dari tungku pembakaran batubara bituminous. Dimana *fly ash* memiliki sifat *pozzolanic*, sehingga untuk mendapatkan sifat *cementitious* pada *fly ash* type F harus dilakukan dengan penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen. *Fly ash* dengan type F memiliki nilai kadar kapur atau CaO <10 %. Selanjutnya, *fly ash* type C diproduksi dari pembakaran batubara subbituminous. Dimana selain mempunyai sifat *pozolanic* *fly ash* type C juga memiliki sifat *selfcementing* yaitu kemampuan mengeras apabila bereaksi dengan air dan sifat tersebut timbul tanpa penambahan CaO.

2.5. Kaolin

Berdasarkan data Kementerian ESDM Tahun 2017, kepulauan Bangka Belitung merupakan daerah yang memiliki potensi yang besar akan cadangan kaolin di Indonesia diperkirakan produksi kaolin mencapai 1.068.377.264 ton. Penggunaan kaolin banyak dimanfaatkan dalam bidang industri keramik, kertas, karet, dan tinta maupun cat. Kaolin merupakan mineral lempung yang memiliki komposisi terbesar berupa kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Partikel kaolin berupa lembaran heksagonal dengan diameter berkisar antara 0.05 μm hingga 10 μm . Mineral kaolin terjadi dari proses pelapukan dan hidrotermal alterasi batuan beku *felspartik* dan mika. (Astutiningsih *et al.*, 2018)

Tabel 2. Komposisi kimia kaolin. (Akmal dkk., 2018)

Sampel	Si	Al	Fe	Ti	Zr	Zn	Ni	Ga
Kaolin	57.6	37.2	3.82	1.23	0.1	0.04	0.04	0,02

Struktur kristal kaolin terdiri atas pasangan lapisan lembaran silika tetrahedral dan alumina oktahedral. Pasangan lapisan lembaran tersebut bergabung melalui atom oksigen sebagai satu kesatuan melalui ikatan hidrogen antar oksigen dari silika dan oksigen hidroksil dari alumina. Ketebalan tiap lapisan tersebut berkisar 0.72 nm. Kaolin memiliki nilai kapasitas tukar kation yang relatif rendah yaitu 3 - 15 meq/100g, dan luas permukaan spesifik yang tidak lebih dari 20 m^2/g . (Okoye *et al.*, 2015)

2.6. Carbon Black (CB)

Carbon black (CB) merupakan bentuk komersial dari karbon padat yang dimanufaktur pada proses sangat terkontrol untuk memproduksi agregat khusus rekayasa dari partikel karbon yang beragam ukuran partikel, agregat, porositas, dan *surface chemistry*. *Carbon black* (CB) pada umumnya mengandung 95 % karbon murni, dan sedikit jumlah oksigen, hidrogen dan nitrogen. Pada proses manufaktur partikel *carbon black* terbentuk pada *range* ukuran 10 nm hingga 500 nm. Partikel *carbon black*

menyatu membentuk agregat seperti rantai yang menentukan struktur *grade* dari masing masing *carbon black*.

Pasar *carbon black* (CB) di Indonesia terus meningkat diperkirakan konsumsi karbon hitam untuk industri pada tahun 2016 diperkirakan 55.000 ton. Penggunaan *carbon black* pada berbagai jenis material guna meningkatkan sifat fisik, elektrik, dan optikalnya. Penggunaan paling besar *carbon black* adalah sebagai *reinforcement* dan penambahan performa pada produk ban. Pada campuran *rubber*, elastomer alami dan sintetik dicampur dengan karbon hitam, elemen sulfur, minyak dan berbagai bahan kimia organik, kemudian dipanaskan untuk menghasilkan produk *vulcanized rubber* dengan *range* yang luas. Pada aplikasi ini *carbon black* memberikan *reinforcement* dan meningkatkan ketahanan *tear-strength*, konduktifitas yang baik.

2.7. Serat Gelas

Serat gelas banyak digunakan sebagai penguat pada komposit berbasis termoplastik. Hal ini karena serat gelas memiliki keseimbangan antara sifat yang dihasilkan dan *cost* yang rendah. Serat gelas dapat dicirikan dengan modulus dan kekuatan yang tinggi, elongasi, stabilitas termal yang baik dan tahan terhadap korosi (Sathishkumar *et al.*, 2014). Serat gelas merupakan material anorganik yang digunakan sebagai bahan penguat dalam material komposit. Keunggulan serat gelas terletak pada ratio (perbandingan) dan *performance* biaya produksi rendah, serta produksi yang sederhana. Berdasarkan penggunaannya, serat gelas diklasifikasikan menjadi empat yaitu:

1. Serat E gelas merupakan serat yang umum digunakan sebagai penguat, karena memiliki kekuatan tarik yang tinggi sekitar 3.445 GPa dan modulus elastis 72.3 GPa. Komposisi serat gelas E berupa kalsium, aluminium hidroksida, borosilikat, pasir silika, dan memiliki kandungan alkali yang rendah. Serat gelas memiliki sifat

ketangguhan yang baik, akan tetapi serat gelas merupakan material yang cukup getas.

Tabel 3. *Properties* serat E-gelas. (Sathishkumar *et al.*, 2014)

Jenis Serat	Serat E-Gelas
Densitas (gr/cm^3)	2.58
<i>Tensile Strength</i> (GPa)	3.445
<i>Young Modulus</i> (GPa)	72.3
<i>Elongation</i> (%)	4.8
<i>Passion Ratio</i>	0.2

2. Serat S gelas terdiri dari silikon dioksida, alumunium trioksida, dan magnesium oksida. Kekuatan serat S gelas lebih tinggi dari serat E gelas. Kekuatan tarik serat S gelas mencapai 4,890 GPa dan modulus elastisnya 86,9 GPa. Penggunaa serat S gelas banyak digunakan untuk peralatan militer dan *aeroapace*.
3. Serat D gelas banyak digunakan pada produksi aplikasi atau pembuatan peralatan elektronik. Hal ini disebabkan serat D gelas memiliki karakteristik dielektrik yang baik.
4. Serat C gelas memiliki kekuatan yang lebih rendah dari serat gelas E. Namun serat C gelas memiliki sifat tahan terhadap korosi, sifat modulus yang tinggi, dan lebih tahan terhadap suhu tinggi. Sehingga harga serta C gelas relatif lebih mahal dari serat E gelas.

2.8. Serat Karbon

Dalam perkembangan penggunaan serat karbon banyak digunakan untuk aplikasi penerbangan, produk olahraga dan kebutuhan industri. Serat karbon memiliki keunggulan sifat ketahanan fatik, ketangguhan terhadap beban patah dan sifat *elastic recovery* yang baik. Sebagai material anorganik, serat karbon tidak responsif terhadap kelembaman, atmosfir, pelarutan basa dan *weak acid* pada suhu ruang.

Tabel 4. *Properties* serat karbon. (Rahmani *et al.*, 2014)

Jenis serat	Serat karbon
<i>Tensile strength (MPa)</i>	2550
<i>Tensile modulus (GPa)</i>	135
<i>Elongation (%)</i>	2.1
<i>Density (g/cm³)</i>	180
<i>Carbon content (%)</i>	93

Berbeda dengan logam, serat karbon dan material penyusun komposit disebut sebagai material anisotropik. Anisotropik merupakan sifat propertis dari material yang dipengaruhi oleh persentase berat dan pola pada serat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kekuatan serat karbon bergantung pada komposisi maupun bentuk serat.

2.9. Serat *Silicon Carbide* (SiC)

Serat *silicon carbide* (SiC) adalah bahan gerabah non-oksida yang memiliki sifat fisik dan senyawa yang baik seperti kekerasan tinggi, konduktivitas termal, titik lebur, dekomposisi yang tinggi. Serat SiC merupakan salah satu strategi pendukung dalam inovasi komposit. Selain fortifikasi dengan (*particulate reinforcement*) dan penguatan serat. Sebagai bahan gerabah non-oksida, serat SiC memiliki aplikasi signifikan dalam perangkat keras, semikonduktor, peralatan mesin dan lainnya.

Tabel 5. *Properties* serat SiC. (Suarsana dan Sunu, 2015)

Jenis Serat	SiC <i>whisker</i>
<i>Crystal Type</i>	Beta (<i>Polytype</i>)
Diameter, μm	0.45-0.65
<i>Length, μm</i>	5-80
Densitas (g/cm ³)	3.2
<i>Free Carbon, wt %</i>	0.05-0.3
Silika, wt %	0.35-0.75

2.10. Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk adalah proses pengembangan serbuk yang dilakukan penekanan terhadap serbuk tersebut dalam cetakan dan panaskan di bawah suhu luluh. Terjadinya pencampuran antar partikel tersebut disebabkan mekanisme transportasi masa akibat difusi atom antar permukaan partikel. Teknik metalurgi serbuk memberikan kontrol yang teliti terhadap komposisi dan pemanfaatan kombinasi yang tidak dapat dibuat oleh campuran yang berbeda. Standar metalurgi serbuk adalah melalui pemadatan serbuk yang dipanaskan di bawah suhu pelunakan. Tahap awal dalam metalurgi serbuk adalah pencampuran serbuk secara homogen. Setelah bahan pengikat dicampur, selanjutnya proses kompaksi dan sintering yang bertujuan untuk meningkatkan kontak ikatan antar serbuk.

Dalam produksi serbuk ada beberapa cara. Untuk cara pertama yaitu *decomposition* yang terjadi pada bahan yang mengandung komponen logam. Bahan akan menguraikan komponennya setiap kali dipanaskan pada suhu yang cukup tinggi. Interaksi ini meliputi senyawa logam dan *reducing agent*. selanjutnya cara kedua yaitu proses atomisasi logam cair, bahan cair dapat dibuat menjadi serbuk dengan menuangkan bahan cairan melalui nozzel yang dialiri air bertekanan, sehingga butiran kecil terbentuk. Cara ketiga yaitu *electrolytic deposition*, serbuk dibuat melalui siklus elektrolisis. yang biasanya memberikan bubuk yang sangat reseptif dan rapuh. Akibatnya, bahan hasil akhir harus diberikan perlakuan tempering khusus. Butiran yang dihasilkan dari *electolitic deposits* adalah dendritik. Cara yang keempat yaitu *mechanical processing of solid materials*, pembuatan serbuk dengan cara menghancurkan bahan dengan ball milling atau dengan interaksi disintegrasi dengan penghancuran mekanis.

Utamanya karakteristik serbuk meliputi ukuran serbuk, distribusi ukuran serbuk, bentuk serbuk, berat jenis, mampu alir (*flowability*) dan mampu tekan.

1. Ukuran serbuk

Strategi untuk menentukan ukuran serbuk yaitu dengan pengayakan atau pengukuran mikroskopik. Kehalusan berkaitan erat dengan ukuran butir. Faktor ini dihubungkan dengan daerah kontak antar permukaan, butiran-butiran kecil memiliki porositas yang kecil dan lebar serta kontak antar permukaan sangat besar sehingga penyebaran antar permukaan juga tinggi untuk semakin besar dan kompaktibilitasnya.

2. Distribusi ukuran dan kemampuan Alir

Distribusi ukuran partikel menentukan jumlah partikel dengan ukuran standar dalam serbuk. Dampak apropriasi pada *flowability* dan porositas produk sangat besar. *Flowability* merupakan karakteristik yang menggambarkan aliran serbuk dan kapasitas untuk menempati ruang cetakan.

3. Sifat kimia

Sifat kimia pada dasarnya menyangkut pada kemurnian serbuk, jumlah oksida dan zat komponen penyusun lainnya. Dalam metalurgi serbuk, diharapkan tidak akan ada respon substansi antara matriks dan penguat.

4. Kompresibilitas

Kompresibilitas adalah proporsi volume serbuk dengan volume material yang dipadatkan. Nilai ini berbeda-beda dan dipengaruhi oleh dispersi ukuran dan bentuk butir, kekuatan tekan bergantung pada kompresibilitas.

5. Kapasitas sintering

Sintering adalah metode yang terlibat dengan pengikatan partikel melalui interaksi pemanasan 0,7 - 0,9 dari suhu maksimum.

2.10.1. Pencampuran Serbuk

Pencampuran serbuk dilakukan dengan memadukan bahan dengan bahan yang berbeda untuk memberikan sifat fisik dan mekanik yang lebih baik. Pencampuran dimungkinkan dengan

siklus kering (*dry blending*) dan interaksi basah (*wet blending*). Pelumas dapat ditambahkan untuk lebih mengembangkan sifat alir serbuk. Binder ditambahkan untuk meningkatkan *green strenghtnya* seperti polimer termoplastik.

2.10.2. Kompaksi (*Compaction*)

Kompaksi adalah cara paling umum untuk membentuk serbuk dengan mekanisme penekanan setelah serbuk dimasukkan ke dalam cetakan. Siklus pemadatan pada umumnya dilakukan dengan tekanan satu arah atau dua arah. Dalam dorongan satu arah, pendorong atas bergerak ke bawah. Sedangkan pada dua arah, tekanan atas dan bawah saling menekan secara bersamaan dengan arah berlawanan. Material yang dihasilkan pada interaksi metalurgi serbuk sangat ditentukan pada proses kompaksi yaitu membentuk serbuk dalam cetakan dengan kekuatan besar.

Semakin tinggi pemadatan akan berat jenis hingga kondisi optimum. Penekanan diatas batas maksimum tidak akan memberi pengaruh signifikan terhadap kenaikan massa jenis. Penekanan pada serbuk dilakukan agar serbuk dapat saling menempel sebelum mengembang ikatan dengan sistem sintering. Dalam proses pembuatan suatu paduan dengan metalurgi serbuk, terikatnya serbuk sebagai akibat *interlocking* antar permukaan, interaksi adesi-kohesi, dan difusi antar permukaan. Siklus dispersi dapat terjadi selama sistem sintering. Material yang dikeluarkan dari *pressing* disebut bahan kompak mentah, telah menyerupai produk akhir, akan tetapi kekuatannya masih rendah.

2.10.3. Sintering

Sintering adalah proses untuk membuat produk dari serbuk yang dilakukan setelah dilakukan penekanan, kemudian dipanaskan di bawah titik cairnya sehingga partikel-partikel tersebut saling mengikat. Proses sintering padatan terjadi karena terbentuk ikatan

antar partikel. Panas membuat partikel tetap bersama dan kecukupan respons tekanan permukaan meningkat. Sistem sintering membuat bersatunya partikel dan efektivitas reaksi tegangan meningkat. Selama interaksi ini batas butir terbentuk, yang merupakan fase yang mendasari rekristalisasi. Demikian juga gas yang menguap dan temperatur sintering umumnya berada di bawah titik cair serbuk utama selama proses sintering terjadi perubahan dimensi baik berupa ekstensi atau penyusutan bergantung pada bentuk dan ukuran dispersi serbuk, komposisi, metode sintering dan tekanan.

Sistem sintering dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu sintering fasa padat dan sintering fasa cair. Sintering fasa padat merupakan proses sintering yang diselesaikan pada suhu yang telah ditentukan sebelumnya, di mana semua bahan tetap berada di fasa padat. Metode menghilangkan porositas dilakukan melalui pertukaran massa. Dengan asumsi dua partikel digabung dan dipanaskan pada suhu tertentu, kedua partikel ini akan terikat bersama dan akan membentuk *neck*. Pertumbuhan butir disebabkan oleh perpindahan yang meliputi evaporasi, kondensasi, dan difusi. Tahap-tahap *sintering* dapat dibagi menjadi tiga, yaitu tahap pertama (*initial stage*) terjadi tahap kedua (*intermediate stage*) dan tahap ketiga (*final stage*).

Setelah dilakukan proses *sintering* terhadap sample yang sebelumnya telah dilakukan proses kompaksi maka ikatan antar serbuk akan semakin kuat. Ekspansi dalam *holding* setelah sistem sintering adalah karena munculnya necking dengan tujuan agar porositas berkurang dan material menjadi lebih kompak. Untuk situasi ini ukuran serbuk juga mempengaruhi kompaktibilitas, semakin kecil ukuran serbuk, semakin kecil porositas dan semakin luas daerah kontak permukaan antara butiran.

Sistem sintering dalam metalurgi serbuk memegang peranan yang cukup penting dalam menentukan sifat akhir dari produk yang akan dihasilkan. Sistem sintering itu sendiri dicirikan sebagai perlakuan panas untuk mengikat partikel menjadi koheren, memberikan desain yang kuat melalui transport massa yang biasa terjadi dalam skala atom. Ikatan yang terbentuk akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan energi dari sistem.

2.11. Pengujian TGA/DTA (*Thermogravimetric Analysis/ Differential Thermal Analysis*)

Thermogravimetric analysis (TGA) didasari pada perubahan berat akibat dari proses pemanasan. *Thermogravimetric analysis* (TGA) merupakan teknik pengukuran variasi massa (kehilangan massa, emisi uap, dan penambahan massa atau fraksi gas) sampel yang mengalami perubahan temperatur dalam lingkungan yang terkontrol. Teknik analisa pada TGA dapat digunakan untuk menentukan kemurnian sampel, gejala dekomposisi, dan kinetik kimia. *Differential thermal analysis* (DTA) merupakan teknik analisis termal yang menggunakan perbedaan temperatur sampel dan referensi untuk menganalisis perubahan sifat kimia dan fisika. Analisa DTA didasarkan pada perubahan kandungan panas akibat perubahan temperatur dan titrasi termometrik. Dalam DTA panas diserap atau diemisikan oleh sistem kimia bahan yang dilakukan dengan pembanding yang inert, karena suhu keduanya ditambahkan dengan laju yang konstan.

Salah satu dari kegunaan DTA adalah untuk mengetahui perubahan yang terjadi berupa pelepasan panas (*eksoterm*) dan penyerapan panas (*endoterm*), dimana peristiwa ini menunjukkan adanya peristiwa yang terjadi pada materiak yang diuji. Sedangkan pada TGA biasanya digunakan riset dan pengujian untuk menentukan karakteristik material seperti polymer, untuk menentukan penurunan temperatur, kandungan material yang diserap, komponen anorganik maupun organik didalam

material, dekomposisi bahan, dan residu bahan pelarut. TGA juga sering digunakan untuk kinetika korosi pada oksidasi temperatur tinggi. Adapun komponen utama pada pengujian TGA/DTA terdiri dari termokopel, wadah sampel, *furnace*, program temperatur, dan sistem perekam. Termokopel yang terdapat pada sampel uji dan pembanding berfungsi untuk menjamin sebuah distribusi panas yang merata.

2.12. Pengujian Densitas dan Porositas

Densitas merupakan massa dari setiap satuan luas volume. Semakin tinggi densitas maka akan semakin besar juga massa setiap volumenya. Densitas merupakan kepadatan dari suatu zat menggunakan persamaan berupa perbandingan massa benda dengan volumenya, dapat pula dengan menggunakan prinsip Archimedes yaitu berat sebuah benda adalah sama dengan berat air yang dipindahkan. Untuk hasil densitas didapatkan menggunakan persamaan teoritis dengan standar ASTM C373-88, seperti pada persamaan 3 berikut:

$$\rho_b = \frac{M_k}{M_b - (M_g - M_t)} \times \rho_{\text{air}} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

ρ_b = Densitas sampel (gr/cm³)

Φ = Porositas (%)

M_k = Massa sampel kering (gr)

M_b = Massa sampel basah (gr)

M_g = Massa sampel didalam air (gr)

M_t = Massa tali penggantung (gr)

Pengujian porositas bertujuan agar dapat mengetahui porositas yang terbentuk pada sampel. Pengujian porositas merupakan kelanjutan dari pengujian densitas yang dilakukan dengan prinsip Archimedes sesuai standar ASTM C373-88, dengan cara menghitung densitas aktual dan

densitas secara teoritis, selanjutnya dihitung menggunakan persamaan 4 dan 5 sehingga diperoleh nilai porositas.

$$\rho_{\text{teoritis}} = (\rho_1 \times \%V_1) + (\rho_2 \times \%V_2) + (\rho_n \times \%V_n) \dots \dots \dots (4)$$

$$\Phi = \frac{(\rho_{\text{teoritik}} - \rho_{\text{aktual}})}{\rho_{\text{teoritik}}} \times 100\% \dots \dots \dots (5)$$

2.13. Pengujian Kekerasan

Kekerasan material dapat didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap tekanan dari material yang lebih keras. tekanan tersebut dapat berupa komponen penggoresan, refleksi atau indentasi material yang lebih keras terhadap lapisan permukaan luar (Yuwono, 2009). Berdasarkan mekanisme penekanan, pengujian keras terbagi menjadi 3 yaitu sebagai berikut

1. Metode Gores

Metode gores saat ini belum banyak digunakan dalam bidang metalurgi dan material maju, namun masih sering digunakan dalam bidang mineralogi. Teknik ini dipresentasikan oleh Friedrich Mohs yang memisahkan kekerasan bahan berdasarkan skala, yang kemudian dikenal sebagai skala Mohs. Skala dapat bervariasi dari 1 untuk kekerasan paling rendah, hingga 10 untuk nilai kekerasan tinggi, sama halnya pada indentor intan. Metode ini memiliki kelemahan berupa ketidakakuratan nilai kekerasan material. Pada kekerasan mineral yang diuji dengan metode lain dapat ditentukan nilainya hanya berkisar antara 1 sampai 9, sedangkan nilai dari 9 sampai 10 memiliki jangkauan yang besar.

2. Metode Elastik (*Rebound*)

Metode elastik atau pantul kekerasan material alat *scleroscope* yang mengukur tinggi pantulan pemukul/*hammer* dengan berat tertentu yang dijatuhkan dari ketinggian pada permukaan luar material. Tinggi pantulan */rebound* yang dihasilkan mewakili kekerasan material.

Semakin tinggi pantulan yang ditunjukkan oleh dial pada alat pengukur, maka semakin tinggi kekerasan pada sampel uji.

3. Metode Indentasi

Pengujian metode indentasi dilakukan dengan penekanan material dengan indenter sebagai daya tekan dan waktu penahanan yang telah ditentukan sebelumnya. Kekerasan material ditentukan pada luas area indentasi. Hal ini bergantung pada jenis indenter dan pengujianya. Berdasarkan prinsipnya pengujian kekerasan dengan metode indentasi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

a. Metode *Brinell*

Metode Brinell pertama kali diperkenalkan oleh J.A. Brinell. Uji kekerasan brinell diselesaikan menggunakan bola baja yang dipadatkan dengan beban dan ruang waktu tertentu. Efek lanjutan dari penekanan adalah jejak berbentuk, yang pengukurannya harus ditentukan di bawah lensa mikroskop khusus pengukur jejak.

Prosedur standar pengujian membutuhkan bola baja dengan $D = 10 \text{ mm}$ dan Beban (P) = 3000 kg untuk pengujian logam besi, atau 500 kg untuk logam non-ferrous. Untuk logam besi waktu indentasinya sekitar 10 detik sedangkan untuk logam nonferrous sekitar 30 detik. Angka kekerasan brinell dapat dihitung dengan persamaan 6 berikut:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

HB = Angka kekerasan *Brinell*

P = Beban yang diberikan (Kgf)

D = Diameter indenter (mm)

d = Diameter lekukan (mm)

Pengaturan beban dan waktu indentasi setiap material dapat pula ditentukan oleh karakteristik alat pengujian. Nilai kekerasan dinotasikan dengan HB tanpa penambahan angka di belakangnya. Hal ini menyatakan kondisi pengujian standar dengan indenter bola baja 10 mm, beban 3000 kg selama 1 sampai 15 detik.

b. Metode *Vickers*

Pengujian metode *vickers* digunakan indenter intan berbentuk piramida bersudut 136°. Prinsip pengujian *vickers* sama dengan metode *brinell*, walaupun jejak yang dihasilkan metode *vickers* berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Panjang diagonal diukur dengan skala pada mikroskop pengukur jejak. Alat pengujian kekerasan *vickers* terdiri dari mesin, unit uji, unit dudukan indenter dan lensa, landasan pengujian, serta unit kontrol dan komputer.

Estimasi kekerasan *vickers* secara manual, berdasarkan standar ISO yang disesuaikan dengan alat dan material uji. Perhitungan kekerasan *vickers* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 7 berikut:

$$HV = \frac{(1.854)P}{d^2} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan :

HV = Kekerasan *vickers*

P = Pembebanan (Kgf)

d = Panjang diagonal indentasi (mm)

c. Metode *Rockwell*

Berbeda dengan *Brinell* dan *Vickers*, pada metode *rockwell* nilai kekerasan material tidak sepenuhnya ditentukan dari diagonal jejak yang dihasilkan. kekerasan *rockwell* merupakan pengujian kekerasan dengan pembacaan langsung (*direct-reading*). Metode *Rockwell* umumnya digunakan dalam industri karena pertimbangan

praktis. Variasi beban dan indetor yang digunakan membuat metode ini memiliki banyak jenisnya. Indentor dari baja yang diperkeras berbentuk bola dan ada juga yang berbentuk kerucut intan. Indentor bola mempunyai ukuran diameter 1,588, 3,175, 6,350 dan 12,70 mm. Sedangkan beban yang tersedia adalah 10, 60, 100 dan 150 kg. Metode yang paling umum dadalah *rockwell B* dengan indentor bola baja berdiameter 1/4 inci dan beban 100 kg dan *rockwell C* dengan indentor intan dengan beban 150 kg.

Table 6. Skala pengujian kekerasan *rockwell*. (Yuwono, 2009)

Skala	Major load (kg)	Type of indentor	Typical materials tasted
A	60	Diamond cone	Extremely hard materials, tungstem carbides, etc.
B	100	1/4"ball	Medium hard materials, low and medium-carbon steels, brass, bronze, etc.
C	150	Diamond cone	Hardened steels, hardened and tempered alloys.
D	100	Diamond cone	Case-hardened steel
E	100	1/8" ball	Cast orin, aluminium and mangnesium alloys
F	60	1/16"ball	Annealed brass and copper
G	150	1/16"ball	Beryllium copper, phosphor, bronze, etc
H	60	1/8" ball	Aluminium sheet
K	150	1/8" ball	Cast iron, aluminium alloys
L	60	1/4 ball	Plastic and soft metals such as lead
M	100	1/4"ball	Same as L scale
P	150	1/4"ball	Same as L scale
R	60	1/2" ball	Same as L scale
S	100	1/2" ball	Same as L scale
V	150	1/2" ball	Same as L scale

2.14. Pengujian Keausan

Keausan dicirikan sebagai hilangnya material secara progresif dengan ukuran tertentu dari suatu permukaan, sebagai perkembangan relatif antara lapisan luar material dan permukaan yang berbeda. Keausan bukan merupakan sifat esensial dari material, melainkan reaksi material terhadap kontak permukaan. Umumnya kebanyakan material dapat mengalami keausan disebabkan mekanisme yang berbeda. Estimasi uji keausan dilakukan untuk memperoleh nilai keausan spesifik yang dapat dihitung menggunakan persamaan 8.

$$V = \frac{W}{x} = \frac{Bb^3}{12 r x} \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:

V = Laju keausan (mm³/mm)

b = Lebar jejak (mm)

B = Tebal piringan pengaus (mm)

r = Jari-jari piringan pengaus (mm)

P = Beban (kg)

x = Jarak luncur (m)

Adapun jenis-jenis keausan yang dapat terjadi pada material adalah sebagai berikut:

1. Keausan adhesif

Terjadi ketika kontak permukaan dari sedikitnya dua bahan menimbulkan perletakan satu sama lain dan akhirnya terjadi pelepasan permukaan material. Mekanisme keausan adhesif terjadi karena adanya daya tarik antara logam. Hal ini karena adanya pergerakan, maka terjadi patah pada daerah yang lemah dengan erosi atau kontak antara permukaan, yang menyebabkan bagian yang bergabung dengan lapisan luar material yang lebih keras terpotong-potong oleh puncak kekerasan disekitarnya.

2. Keausan abrasif

Keausan abrasif adalah keausan yang terjadi ketika partikel keras (kekerasan) dari suatu material meluncur pada lapisan luar material lain yang lebih ringan, sehingga menyebabkan infiltrasi atau pemotongan material tersebut. Tingkat keausan pada hal ini tidak sepenuhnya ditentukan oleh degree of freedom dari partikel keras. Misalnya, partikel pasir silika akan menghasilkan keausan yang lebih tinggi saat menempel pada permukaan seperti amplas, daripada saat berada dalam sistem *slurry*. Dalam kasus utama, partikel dapat ditarik ke dalam sepanjang permukaan dan menyebabkan geseran singkat partikel sehingga tersebut mungkin hanya berputar tanpa efek abrasi.

3. Keausan lelah

Keausan lelah adalah mekanisme yang relatif berbeda dibandingkan dua mekanisme sebelumnya, khususnya dalam hal interaksi permukaan. Pada keausan adhesive maupun abrasif hanya melibatkan satu interaksi sementara pada keausan lelah. Permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak mikro(t_1). Retakan tersebut akhirnya menyatu (t_2) dan menyebabkan pengelupasan material (t_3). Tingkat keausan sangat bergantung pada tingkat pembebanan

4. Keausan oksidasi

Keausan oksidasi sering disebut sebagai keausan korosi. Pada tingkat dasar, komponen ini dimulai dengan adanya perubahan kimiawi dibagian permukaan yang disebabkan faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini akan menghasilkan perkembangan lapisan pada tingkat superfisial dengan berbagai sifat dari material induknya. Akibatnya, lapisan permukaan material akan mengalami keausan yang berbeda. Selanjutnya hal ini akan menyebabkan putusnya titik interaksi antara lapisan permukaan dan bahan induk yang pada akhirnya seluruh lapisan permukaan akan tercabut.

2.15. Pengujian Tekan

Pengujian tekan merupakan pengujian *destructive test* yang berbanding terbalik dengan uji tarik. Pada uji tarik arah kedua gaya menjauhi ujung material. Sedangkan pada tegangan tekan arah kedua gaya saling mendekati material. Kekuatan tekan adalah nilai tegangan uniaksial yang mempunyai modulus kegagalan pada saat pengujian. Regangan akibat beban tekan akan menyebabkan penyusutan sehingga diameter material akan menjadi lebih besar akibat beban tekan. Tegangan akibat beban tekan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 9.

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan:

σ = Tegangan normal (N/mm²)

F = Beban tekan (N)

A = Luas penampang (mm)

Regangan akibat beban statik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 10 berikut.

$$\epsilon = \frac{L_i - L_o}{L_o} \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

E = Regangan akibat beban tekan statik

L_i = Perubahan panjang akibat beban tekan (mm)

L_o = Panjang penampang mula-mula (mm)

2.16. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning electron microscope merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang mampu menghasilkan resolusi tinggi dari gambar permukaan sampel. Oleh karena itu gambar yang dihasilkan mempunyai

karakteristik secara kualitatif dalam dua dimensi karena menggunakan elektron sebagai pengganti gelombang cahaya serta berguna untuk menentukan permukaan sampel. Material yang dikarakterisasi berupa lapisan tipis yang memiliki ketebalan 20 μm dari permukaan. Gambar topografi permukaan berupa tonjolan, lekukan dan ketebalan lapisan tipis penampang melintangnya. Prinsip kerja dari alat pengujian SEM adalah menggunakan berkas elektron yang dipantulkan dengan energi yang tinggi untuk menggambarkan bentuk permukaan dari material berupa susunan kristal. Pengujian dilakukan dengan cara sampel diletakan pada SEM *specimen holder* dengan ditempelkan menggunakan *carbon double tipe* dengan bagian penampang lintang (*cross section*) mengarah vertikal keatas atau pada lensa obyektif.

Pengujian SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dalam skala mikro dan nano, hasil uji SEM akan didapatkan gambar dengan pembesaran yang tinggi mencapai 500x pembesaran. Komponen utama dari alat *scanning electron microscopy* yaitu lensa elektromagnetik yang digunakan untuk memfokuskan berkas elektron menjadi sebuah titik kecil, kemudian *scan* menggunakan *scan coil* dengan frekuensi pada permukaan material. Sumber elektron yang menyediakan berkas elektron yang memiliki energi monokromatik dan *imaging detector* yang berfungsi untuk mengubah sinyal elektron.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian

Adapun tempat penelitian dalam pabrikan komposit keramik berpenguat *fly ash* dan serat *woven/SiC* adalah sebagai berikut:

1. Persiapan alat dan bahan, serta pabrikan dilakukan di Laboratorium Komposit, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
2. Pengujian keausan dilakukan di Laboratorium Uji Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia, Depok.
3. Pengujian kekuatan tekan dilakukan di Balai Penelitian Teknologi Mineral – BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.
4. Pengujian TG/DTA dan SEM (*scanning electron microscopy*) dilakukan di UPT. Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT), Universitas Lampung.

3.2. Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam pabrikan komposit keramik adalah sebagai berikut:

1. *Fly Ash*

Fly ash yang digunakan berasal dari PLTU Bukit Asam, Palembang. Dari hasil SYS Laboratorium Tekmira Bukit Asam menunjukkan bahwa *fly ash* yang berasal dari PLTU Bukit Asam Palembang merupakan *fly ash* dengan kelas C, karena memiliki kandungan *silicon dioxide* (SiO_2) sebesar 60,04 %.

Tabel 7. Data *laboratory test result fly ash* pada PLTU Bukit Asam, Palembang.

LABORATORY TEST RESULTS							
Job Number : 1711611			Date : August 10, 2017				
Customer : PLTU BUKIT ASAM			Attention : Mr. Ginanjar			Position:	
Lab. Sample	Customer Sample ID	Matrix	Date Sampled	Time Sampled	Date Received	Time Received	Interval Analysis
1711611-1/2	Fly Ash	Solid	-	-	24/07/2017	14:00	24/07 to 08/08
NO.	TEST DESCRIPTION	RESULT	UNIT	METHOD			
	Main Oxide						
1	Silicon Dioxide, SiO ₂	60.04	%	ICP			
2	Aluminium Oxide, Al ₂ O ₃	2.19	%	ICP			
3	Ferric Oxide, Fe ₂ O ₃	4.99	%	ICP			
4	Calcium Oxide, CaO	1.60	%	ICP			
5	Magnesium Oxide, MgO	1.26	%	ICP			
6	Sulfur TriOxide, SO ₃	0.32	%	ICP			
7	Sodium Oxide, Na ₂ O	0.23	%	ICP			
8	Pottasium Oxide, K ₂ O	0.04	%	ICP			
9	LOI	4.28	%	ICP			

**** Accreditation KAN LP-S16-IDN**

** Accreditation KAN LP-S16-IDN

Adapun gambar *fly ash* pada PLTU Bukit Asam, Palembang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. *Fly ash* pada PLTU Bukit Asam, Palembang.

2. Kaolin

Kaolin yang digunakan berasal dari Kabupaten Bangka Belitung.. Adapun gambar kaolin ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Kaolin Bangka Belitung.

3. Serat karbon woven (anyaman)

Serat karbon woven (anyaman) yang digunakan adalah *Carbon fiber fabric*. Adapun gambar dan spesifikasi serat karbon ditunjukkan pada gambar 6 dan tabel 8.



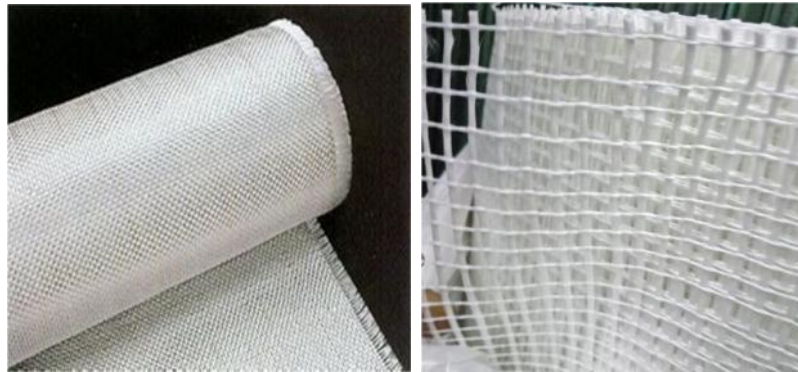
Gambar 6. Serat karbon woven (anyaman).

Tabel 8. Spesifikasi serat karbon woven (anyaman).

Jenis Serat	<i>Woven Carbon Fiber Fabric</i>
<i>Density (gr/cm³)</i>	1.81
<i>Tensile Strength (MPa)</i>	4137
<i>Elongation at Break (%)</i>	1.5
<i>Tensile Modulus (GPa)</i>	242
<i>Carbon, C (%)</i>	95
<i>Areal weight (gr/m²)</i>	960
<i>Contruction</i>	<i>Plain ot twill weave</i>

4. Serat gelas woven (anyaman)

Serat gelas yang digunakan adalah jenis serat *E-glasss woven roving*. Adapun gambar dan spesifikasi serat gelas ditunjukkan pada gambar 7 dan tabel 9.



Gambar 7. Serat E-gelas woven (anyaman).

Tabel 9. Spesifikasi serat E-gelas woven (anyaman).

Jenis Serat	<i>Glass Fiber Woven</i>
<i>Density (gr/cm³)</i>	2.18
<i>Tensile strength (MPa)</i>	260
<i>Elongation at Break (%)</i>	1.6
<i>Modulus of elastisity (GPa)</i>	15.5
<i>Flexural strength (MPa)</i>	320
<i>Flexural modulus (MPa)</i>	190
<i>Compressive strength (MPa)</i>	190

5. Serat *silicon carbide* (SiC)

Serat yang digunakan adalah serat *silicon carbide whisker* komersial, dengan diameter $\approx 0.5 \mu\text{m}$, dan panjang $\approx 40 \mu\text{m}$. Adapun gambar dan spesifikasi serat *silicon carbide* (SiC) ditunjukkan pada gambar 8 dan tabel 10.



Gambar 8. Serat *silicon carbide* (SiC).

Tabel 10. Spesifikasi serat *silicon carbide* (SiC).

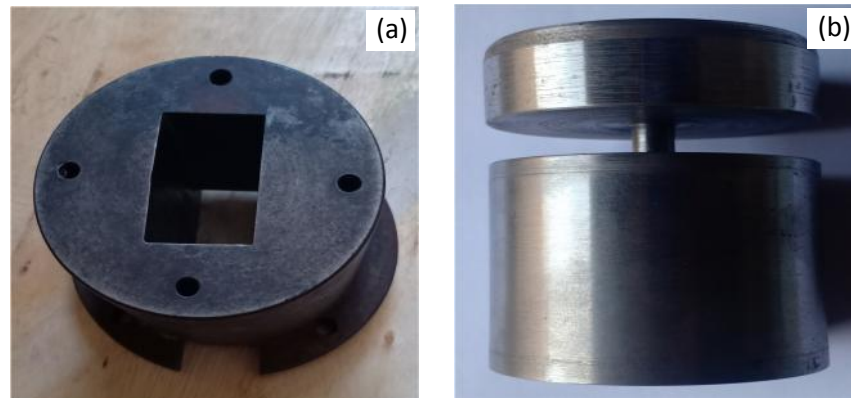
Jenis Serat	SiC Whisker
<i>Crystal Type</i>	Beta (<i>polytype</i>)
<i>Diameter (μm)</i>	0.45-0.65
<i>Length (μm)</i>	5-80
<i>Density (gr/cm^3)</i>	3.10
<i>Melting point ($^{\circ}\text{C}$)</i>	2797
<i>Modulus of Elasticity (GPa)</i>	420
<i>Compressive Strength (MPa)</i>	345

3.3. Peralatan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan dalam pabrikasi komposit keramik adalah sebagai berikut:

1. Cetakan

Bentuk cetakan disesuaikan dengan standar ASTM G 99-95 untuk pengujian aus dan standar ASTM C 773-88 untuk pengujian tekan. Bahan yang digunakan untuk membuat cetakan adalah baja karbon sedang. Masing-masing cetakan terdiri dari beberapa bagian yang memiliki fungsi dan kegunaan masing-masing. Adapun bentuk cetakan ditunjukkan pada gambar 9 .



Gambar 9. Cetakan pengujian, (a). uji keausan dan (b). uji kekuatan tekan.

2. Mesin Pengayak

Mesin pengayak (*siever*) digunakan untuk mendapatkan tingkat kehalusan pada serbuk. Ukuran serbuk yang digunakan pada penelitian sebesar $100\ \mu\text{m}$, menggunakan mesin Analysette 3 Pro. Berikut gambar dan spesifikasi mesin Analysette 3 Pro ditunjukkan gambar 10 dan tabel 11.



Gambar 10. Mesin Analysette 3 Pro.

Tabel 11. Spesifikasi mesin Analysette 3 Pro

Jenis Mesin	Analysette 3 Pro
<i>Sieving action</i>	<i>Two-dimensional</i>
Berat maks. <i>Siever</i>	3 kg
Amplitudo	0.1 – 3 mm
<i>Amplitudo control</i>	<i>Automatic</i>

Diameter <i>siever</i>	100 mm, 200 mm or 8"
<i>Electrical detail</i>	100-240 V/1~, 50-60 Hz, 50 watt
Berat <i>siever</i>	21 kg/ 26 kg
Dimensi w x d x t	37 x 40 x 20 cm

3. Timbangan Digital

Timbangan digunakan untuk mengetahui berat dari masing- masing komposisi. Timbangan yang digunakan adalah Blanco i-2000. Gambar dan spesifikasi Blanco i-2000 ditunjukkan gambar 11 dan tabel 12.



Gambar 11. Timbangan digital Blanco i-2000.

Tabel 12. Spesifikasi timbangan digital Blanco i-2000.

Jenis Timbangan	Blanco i-2000
Akurasi	0.1 gram
Kapasitas max.	1000 gram
Daya	2x AAA Baterai
<i>Power indication</i>	Low-batt
Dimensi timbangan	130 mm x 109 mm x 20 mm
Berat timbangan	275 gram

4. Mixer/ Pengaduk

Mixer digunakan sebagai media pencampur serbuk penyusun komposit. *Mixer* yang digunakan adalah HM-620. Berikut gambar dan spesifikasi *mixer* ditunjukkan gambar 12 dan tabel 13.

Gambar 12. *Mixer* HM-620.Tabel 13. Spesifikasi *mixer* HM-620.

Jenis Mesin	<i>Mixer</i> HM-620
Daya	190 watt
<i>Voltage</i>	220 Volt/ 50 Hz
Dimensi <i>mixer</i>	21 cm x 10 cm x 17 cm
<i>Accessories</i>	2 pencampur dan pengaduk
<i>Made in</i>	China

5. Mesin *Press* Hidraulik

Mesin *press* hidraulik yang digunakan adalah *hydraulic hand pump* SPH-1200 kapasitas 20 ton. Berikut gambar dan spesifikasi mesin *press* hidraulik ditunjukkan gambar 13 dan tabel 14.

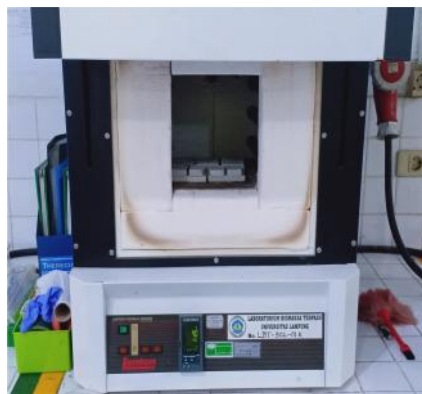
Gambar 13. Mesin *hydraulic hand pump* SPH-1200.

Tabel 14. Spesifikasi mesin *hydraulic hand pump* SPH-1200.

Jenis Mesin	<i>Hydraulic Hand Pump</i> SPH-1200
<i>Pressure rating</i>	700 kg/cm ² (10.000 psi)
<i>Usable oil cap</i>	1200 c.c R 22
<i>Hydraulic oil</i>	R 22 atau SAE 10#
Dimensi, p x l x t	22 cm x 60 cm x130 cm
Kapasitas	20 Ton

6. Tungku Pemanas

Tungku pemanas (*furnace*) yang digunakan adalah Lenton Model UAF 14/27. Berikut gambar dan spesifikasi *furnace* ditunjukan gambar 14 dan tabel 15.

Gambar 14. *Furnace* Lenton model UAF 14/27.Tabel 15. Spesifikasi *furnace* Lenton model UAF 14/27.

Jenis <i>Furnace</i>	Lenton Model UAF 14/27
Temperatur maximum	1500 °C.
<i>Max. continuous temperatur</i>	1450 °C.
<i>Dimensions</i> (h x w x d)	870 x 715 x 860 mm
<i>Max. operating power</i>	12.0
<i>Chamber capacity</i> (kW)	27.0
<i>Net weight</i> (kg)	110

3.4. Komposisi Penelitian

Adapun komposisi penelitian dalam pabrikan sampel adalah sebagai berikut:

Tabel 16. Komposisi penelitian.

No	Sampel	Komposisi (% wt.)						Press (MPa)	Sinter (°C)	Holding Time (menit)
		K	MK	FA	CB	woven	SiC			
1.	KCF	80	-	-	-	20	-	25	800	120
2.	KFCF	60	-	20	-	20	-			
3.	MKFCF	-	60	20	-	20	-			
4.	KGF	80	-	-	-	20	-			
5.	KFGF	60	-	20	-	20	-			
6.	MKFGF	-	60	20	-	20	-			
7.	KS	80	-	-	-	-	20		1100	
8.	KFS	60	-	20	-	-	20			
9.	KCB	90	-	-	10	-	-			
10.	KCBS	70	-	-	10	-	20			

Keterangan:

- KCF Kaolin 80 % + Serat karbon 20 %
- KFCF Kaolin 60 % + *Fly ash* 20 % + Serat karbon 20 %
- MKFCF Metakaolin 60 % + *Fly ash* 20 % + Serat karbon 20 %
- KGF Kaolin 80 % + Serat gelas 20 %
- KFGF Kaolin 60 % + *Fly ash* 20 % + Serat gelas 20 %
- MKFGF Metakaolin 60 % + *Fly ash* 20 % + Serat gelas 20 %
- KS Kaolin 80 % + Serat SiC 20 %
- KFS Kaolin 60 % + *Fly Ash* 20 % + Serat SiC 20 %
- KCB Kaolin 90 % + Karbon Hitam 10 %
- KCBS Kaolin 70 % + Karbon Hitam 10 % + Serat SiC 20 %

3.5. Pabrikasi Sampel

Adapun tahapan yang dilakukan dalam proses pabrikasi komposit adalah sebagai berikut:

1. Kalsinasi kaolin

Kalsinasi kaolin menjadi metakaolin pada temperatur 800 °C ditahan selama 3 jam. Metakaolin merupakan mineral hasil dehidroksilasi pada kaolin.



Gambar 15. Kaolin kalsinasi (metakaolin).

2. Pengayakan serbuk

Pengayakan serbuk menggunakan mesin Analysette 3 Pro. Pengayakan dilakukan secara bertingkat dari nomor ukuran pengayak besar hingga ukuran pengayak kecil yaitu 100 μm . Hal ini bertujuan agar tidak terjadi penumpukan serbuk, sehingga pengayakan relatif lebih cepat. Ukuran masing-masing serbuk yang digunakan dalam penelitian seperti kaolin, metakaolin, *fly ash*, *carbon black* (CB) yaitu 100 μm .



Gambar 16. Serbuk kaolin, metakaolin, *fly ash*, dan *carbon black* (CB) 100 μm .

3. Selanjutnya, timbang campur sesuai komposisi penelitian. Campurkan selama 90 menit. Tambahkan serat SiC dan campurkan hingga merata. Sedangkan, komposit berpenguat serat *woven* diberikan penambahan larutan NaOH 5 %.
4. Setelah serbuk merata, masukan serbuk dan serat *woven* kedalam cetakan dengan cara penyusunan diawal dan diakhiri dengan serat *woven*. Masing-masing sampel terdiri dari 4 lapisan serat *woven* (serat karbon dan gelas).
5. Untuk komposit berpenguat serat SiC. Setelah dicampur hingga merata, kemudian masukan kedalam cetakan.
6. Selanjutnya yaitu kompaksi. Kompaksi dilakukan dengan tekanan uniaksial sebesar 25 MPa, tahan selama 10 menit. Adapun langkah-langkah dalam tahapan kompaksi adalah sebagai berikut:
 - a. Memasang bagian penekan atas cetakan pada mesin *hydraulic hand pump* SPH-1200.

- b. Atur kepresisian cetakan dengan penekan atas pada mesin.
 - c. Mengencangkan kunci penahan pompa hidrolik. lalu pompa secara kontinyu hingga tekanan 25 MPa, ditahan selama 10 menit.
 - d. Setelah itu, membuka kunci penahan pompa hidrolik dan melepaskan bagian bawah cetakan.
 - e. Pompa kembali secara perlahan hingga spesimen keluar dari cetakan.
7. Kemudian, sintering. Temperatur sintering yang digunakan pada komposit berpenguat serat *woven* yaitu 800 °C dan pada komposit berpenguat serat SiC yaitu 1100 °C, ditahan selama 2 jam dengan kenaikan temperatur sintering 5 °C/menit.
 8. Setelah selesai, siapkan sampel sesuai standar uji.

3.6. Pengujian Sampel

Setelah fabrikasi selesai. Selanjutnya melakukan pengujian TG/DTA, densitas dan porositas, ketahanan aus dan tekan, serta SEM.

1. Pengujian TG/DTA

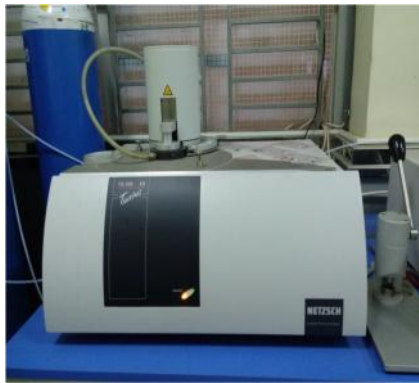
Pada pengujian TG/DTA sesuai standar ASTM D 1131-98. Mesin yang digunakan pada pengujian yaitu Mettler Tuledo TGA/SDTA851. Stabilitas termal diamati pada rentang temperatur 25 °C - 1000 °C, dengan laju pemanasan 10 °C/menit. Penggunaan atmosfer nitrogen pada laju alir 50 mL/min, dan pan platina sebagai wadah/tempat material uji.

Adapun langkah-langkah dalam pengujian TG/DTA adalah sebagai berikut:

1. Melakukan persiapan seperti, menghidupkan komputer, mesin Mettler Tuledo TGA/SDTA851 dan membuka tuas pada tabung nitrogen.

2. Kemudian masukan serbuk (kaolin, *fly ash*) dan serat karbon pada wadah pan platina masing-masing dengan bantuan pinset.
3. Berikutnya, memprogram temperatur dan waktu pemanasan, kecepatan alir dan jenis aliran. Jalankan program dengan cara mengklik start.
4. Tunggu hingga selesai pemanasan dan diamkan hingga temperatur ruang.

Adapun mesin uji TG/DTA dan spesifikasi ditunjukkan pada gambar 17 dan tabel 17.



Gambar 17. Mesin Mettler Tuledo TGA/SDTA851.

Tabel 17. Spesifikasi Mesin Mettler Tuledo TGA/SDTA851

Jenis Mesin	Mettler Tuledo TGA/SDTA851 ^e
<i>Temperature range</i>	<i>Room temperature -1100 C/1600 °C</i>
<i>Temperature accuracy</i>	$\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SF), $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LF1100) $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LF1600)
<i>Heating rate, Room temperature -1100</i>	5 min (SF), 8 min (LF1100), 10 min (LF1600)
<i>Cooling rate</i>	20 min (SF), 22 min (LF1100), 25 min (LF1600)
<i>SDTATM resolution</i>	0.005 °C
<i>SDTATM sensor type</i>	<i>RTyp thermocouple (Pt-Pt/Rh 13 %)</i>
<i>Scanning rate</i>	<i>Max. 10 values per second</i>

2. Pengujian Densitas

Pengujian densitas menggunakan prinsip Archimedes sesuai standar ASTM C373-88. Air sebagai media perendaman dengan densitas 0.997 gr/cm^3 . Menggunakan tali penggantung dengan panjang 25 cm dan massa tali sebesar 0,15 gr.

Adapun tahapan yang dilakukan dalam pengujian densitas adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penimbangan sampel kering (M_k) sebanyak 3 kali pengukuran.
2. Letakan gelas ukur yang telah terisi air diatas timbangan digital. Lalu masukan sampel yang sudah diikat dengan tali penggantung, tunggu selama 1 jam. Sehingga memperoleh berat sampel didalam air (M_g).
3. Melakukan penimbangan sampel basah (M_b), sebanyak 3 kali pengukuran.
4. Melakukan penimbangan massa tali penggantung (M_t), dilakukan sebanyak 3 kali.
5. Setelah memperoleh hasil uji, kemudian melakukan perhitungan menggunakan persamaan 11.

$$\rho = \frac{M_k}{M_b - (M_g - M_t)} \times \rho_{\text{air}} \dots\dots\dots(11)$$

Keterangan:

ρ_b = Densitas sampel (gr/cm^3)

M_k = Massa sampel kering (gr)

M_b = Massa sampel basah (gr)

M_g = Massa sampel didalam air (gr)

M_t = Massa tali penggantung (gr)

ρ_{air} = Massa jenis air (gr/cm^3)

Tabel 18. Spesifikasi pengujian densitas.

Jenis Timbangan	<i>Superior Mini Digital Platform Scale</i>
<i>Accuracy weight</i>	1000 g x 0.01 g
Kapasitas max.	1000 gram
P Tali	25 cm
m Tali	0.15 gram
Jenis cairan	Air
ρ air	0.997 gr/cm ³
Vol. Air	300 ml

3. Pengujian Porositas

Pengujian porositas bertujuan untuk mengetahui porositas yang terbentuk pada sampel dengan perkiraan perhitungan nilai densitas teoritis dan densitas aktual atau densitas rata-rata. Porositas diperoleh dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan 12 dan 13.

$$\rho_{\text{teoritis}} = (\rho \times \%V) \dots\dots\dots (12)$$

$$\Phi = \frac{(\rho_{\text{teoritik}} - \rho_{\text{aktual}})}{\rho_{\text{teoritik}}} \times 100\% \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan:

Φ = Porositas (%)

P = Densitas teoritis (gr/cm³)

V = Presentase volume sampel

4. Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan menggunakan metode Ogoshi dimana sampel uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek akan mengakibatkan kontak antar dua permukaan yang berulang-ulang, sehingga material uji akan terkikis, kemudian melakukan pengukuran dengan mikroskop ukur. Pengujian keausan sesuai standar ASTM G 99-95 dengan beban (P) =

3.16 kg, jarak luncur (x) 100 m, kecepatan = 1.97 m/s, tebal piringan/cincin pengaus (B) = 3 mm, diameter piringan pengaus (d) = 30 mm. Bahan piringan/cincin pengaus yaitu material SKD 11 Hardness 55-60 HRC.

Tahapan yang dilakukan dalam uji keausan adalah sebagai berikut:

1. *Setting* kecepatan (v); beban (P) dan tebal piringan (B) pada mesin Ogoshi tipe OAT-U.
2. Memasang sampel uji pada *sample holder*.
3. Hidupkan mesin uji keausan dan tunggu hingga selesai. Setelah itu keluarkan sampel uji dari *sample holder*.
4. Mengukur lebar jejak yang terabrasi (b), dengan menggunakan mikroskop pengukur jejak. Besarnya volume material yang terabrasi (W), dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$W = \frac{Bb^3}{12r} \dots\dots\dots(14)$$

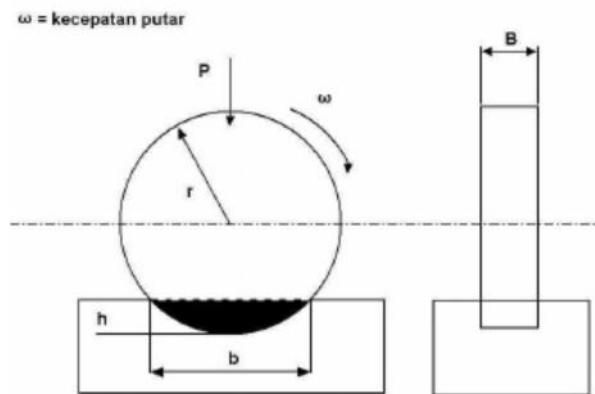
Laju keausan dalam spesifik abrasi dapat ditentukan sebagai perbandingan volume terabrasi (W) dengan jarak luncur (x).

$$V = \frac{W}{x} = \frac{Bb^3}{12rx} \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan:

- V = Laju keausan (mm³/mm)
 b = Lebar jejak (mm)
 B = Tebal piringan/ cincin pengaus (mm)
 r = Jari-jari piringan pengaus (mm)
 P = Beban (kg)
 x = Jarak luncur (m)

Adapun mekanisme dan mesin uji keausan serta spesifikasi ditunjukkan pada gambar 18, 19 dan tabel 19.



Gambar 18. Mekanisme uji keausan.



Gambar 19. Mesin uji keausan Ogoshi tipe OAT-U.

Tabel 19. Spesifikasi mesin uji keausan Ogoshi tipe OAT-U.

Jenis Mesin	Ogoshi Tipe OAT-U
<i>Sliding distance</i>	100. 000 mm
<i>Dimensions</i>	550 x 280 x 950 mm
<i>Power</i>	2.0 Kw
<i>Weight</i>	250 kg

5. Pengujian Tekan

Pengujian tekan sesuai dengan standar ASTM C 773–88. Menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) kapasitas 100kN. Tahapan yang dilakukan dalam pengujian tekan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan persiapan seperti memasang zig, menghidupkan mesin UTM kapasitas 100kN.
2. Memasukan sampel uji pada zig yang telah terpasang pada mesin.
3. Atur pada posisi sampel pada bagian tengah zig. Kemudian atur zig bagian atas hingga menyentuh permukaan sampel. Pastikan kembali hingga benar-benar presisi.
4. Melakukan uji tekan pada kecepatan pembebanan 1,0 mm/menit.
5. Tunggu hingga spesimen mengalami kegagalan. Lakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut.

$$\sigma_T = \frac{P}{A_o} \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan:

σ_T = Tegangan tekan (Kgf/mm²)

P = Beban tekan (Kgf)

A_o = Luas penampang mula-mula (mm²)

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \dots\dots\dots(17)$$

Keterangan:

l_1 = Panjang setelah pembebanan (mm)

l_0 = Panjang penampang mula-mula (mm)

Adapun mesin uji tekan dan spesifikasi ditunjukkan pada gambar 20 dan tabel 21.



Gambar 20. Mesin UTM kapasitas 100kN.

Tabel 21. Spesifikasi mesin UTM kapasitas 100kN.

Jenis Mesin	ZME-1009E
<i>Certification</i>	ISO/ASTM/CE
<i>Capacity</i>	100Kn
<i>Effective measuring range</i>	<i>Force from 0.2% to 100%</i>
<i>Tester resolution</i>	1/200000
<i>Effective tensile spsce</i>	1000, 1200, 1400mm
<i>Accuracy</i>	1 grade/0.5 grade
<i>Effective testing width</i>	400mm
<i>Testing speed</i>	<i>From 0.001 to 100mm/min</i>

6. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

Obesrvasi *scanning electron microscopy (SEM)* dilakukan pada sampel setelah uji keausan. Adapun langkah dalam melakukan pengujian SEM adalah sebagai berikut:

1. Polishing pada sampel uji agar memperoleh permukaan yang agar dapat meningkatkan kualitas hasil foto SEM.
2. Letakkan sampel pada *specimen holder* dengan *double sticky tip*.
3. Lalu masukkan sampel dalam *specimen chamber* untuk melakukan observasi sebelum dilakukan foto SEM.
4. Foto SEM dilakukan pada perbesaran 100x, 500x, 1000x dan 5000x.
5. Setelah selesai, kemudian melakukan analisa hasil foto SEM.

Adapun gambar dan spesifikasi mesin yang digunakan dalam uji SEM ditunjukkan pada gambar 21 dan tabel 21.



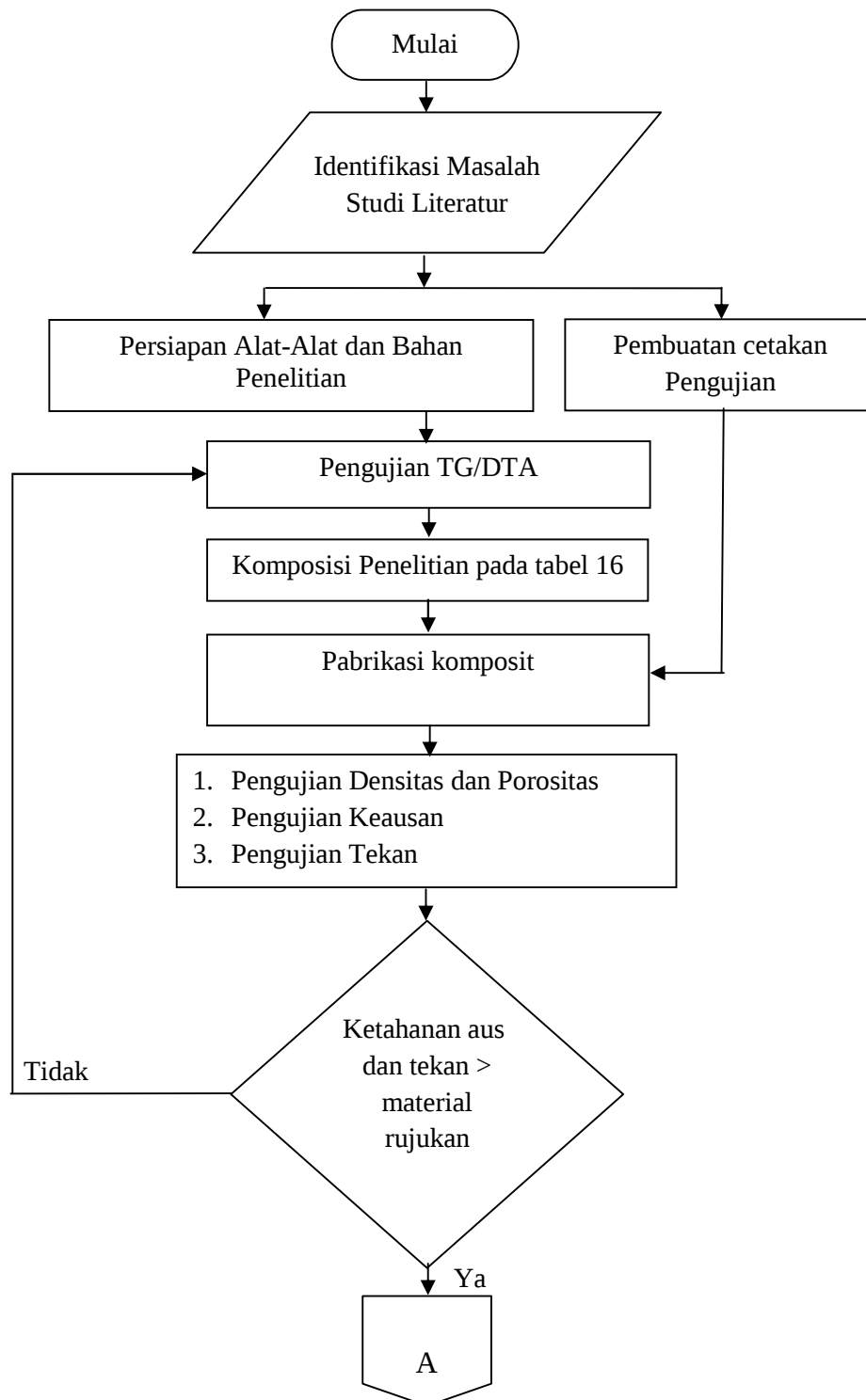
Gambar 21. Mesin SEM JEOL JSM-6390A.

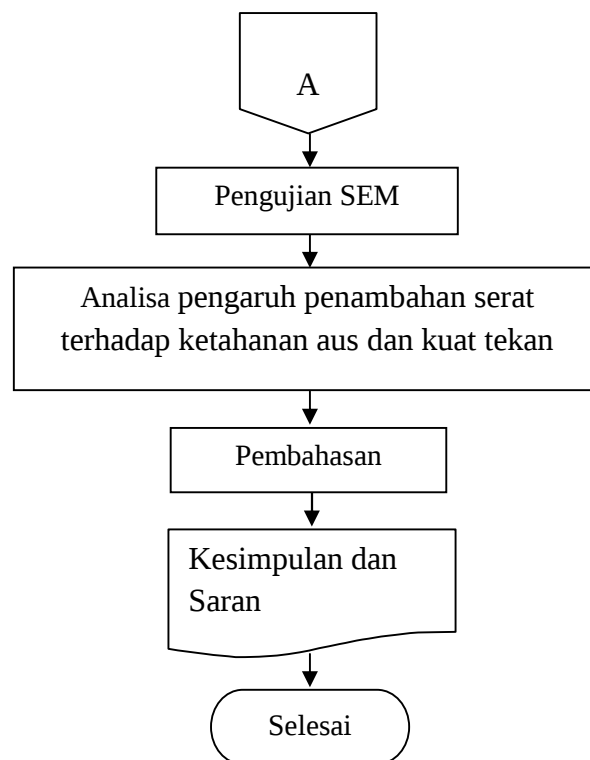
Tabel 21. Spesifikasi mesin SEM JEOL JSM-6390A.

Jenis Mesin	<i>Analytical Scanning Electron Microscope</i>
Type Mesin	JEOL JSM-6390A
Resolusi	3.0 nm(30Kv)
Pembesaran	X5 to 300,000
Filament	<i>Pre-centered W hairpin filament</i>
Lensa objektif	<i>Super conical lens</i>

3.7. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian mulai dari persiapan, pabrikasi, pengujian, analisa data serta pembahasan dan kesimpulan.





Gambar 22. Diagram alir penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian komposit keramik berpenguat *fly ash* dan serat *woven*/SiC sebagai pelapis pipa adalah sebagai berikut:

1. Pada komposit berpenguat serat karbon dan gelas dengan susunan *woven* tidak dapat digunakan karena serat tidak tahan terhadap temperatur sintering kaolin yang tinggi. Akibat temperatur sintering yang rendah menyebabkan nilai densitas yang rendah dan kenaikan nilai porositas, serta komposit memiliki nilai spesifik abrasi yang tinggi.
2. Pada komposit berpenguat serat SiC dengan orientasi serat acak. Hasil uji menunjukkan peningkatan nilai densitas seiring dengan kenaikan suhu sintering. Densitas tertinggi pada komposit berpenguat serat SiC sebesar 17,23 gr/cm³ sampel KS. Untuk densitas terendah sebesar 16,02 gr/cm³ sampel KCB. Densitas yang rendah pada sampel KCB akibat tanpa adanya penguat serat.
3. Hasil uji porositas terendah sebesar 4,64 % pada sampel KCBS dan porositas tertinggi sebesar 5,76 % pada sampel KFS. Dalam hal ini, temperatur sintering yang tinggi berpengaruh terhadap hasil uji densitas dan porositas.
4. Hasil uji keausan dengan nilai spesifik abrasi terendah sebesar 3.52×10^{-6} mm³/mm sampel KCBS. Untuk nilai spesifik abrasi tertinggi sebesar 16.25×10^{-6} mm³/mm sampel KFS.
5. Hasil uji ketahanan tekan terendah sebesar 4.65 Kgf/mm² sampel KCB. Untuk nilai tertinggi sebesar 12.47 Kgf/mm² sampel KCBS.
6. Hasil foto SEM menunjukkan semakin merata ukuran maupun bentuk butir yang seragam diiringi jumlah pori yang semakin sedikit

mengindikasikan sampel tersebut memiliki efek ketangguhan yang besar. Dibuktikan hasil uji ketahanan aus dan tekan sampel KCBS.

5.1.2. Saran

Adapun saran dari penelitian komposit keramik berpenguat *fly ash* dan serat *woven/SiC* sebagai pelapis pipa adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai variasi penambahan *carbon black* (CB) dan serat SiC sebagai penguat komposit.
2. Perlu dilakukan perlakuan terhadap serat sebagai penguat komposit, sehingga dapat memiliki efek ketangguhan yang besar.
3. Penggunaan temperatur sintering sebaiknya dapat divariasikan, sehingga dapat diketahui batasan maksimum ketangguhan komposit.
4. Perlu dilakukan pengujian seperti kekerasan, *fracture toughness*, maupun uji lainnya agar dapat membuktikan ketangguhan komposit yang diaplikasikan sebagai pelapis pipa *slurry transport*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Sonya, A.D., Nuryadin, B.W., Marully, A.R., Khairuddin, dan Khairurrijal. 2009. Sintesis Keramik Berbasis Komposit *Clay*-Karbon dan Karakterisasi Kekuatan Mekaniknya. Institut Teknologi Bandung. ISSN 1979-0880. *J. Nano Saintek*. Vol. 2, No. 2. hlm. 82-88.
- Akmal, J., Zuhendri, H., Su'udi, A., and Hidayatullah, T. 2018. Study of Carbon Fiber and Sulfur Reinforced Geopolymers Composite for Train's Brake Blocks. Teknik Mesin, Universitas Lampung. *Prosiding SNTTM XVII*. hlm. 149-154.
- Annual Book of ASTM C373–88. 2006. *Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. ASTM International, Pennsylvania 19428-2959, United States. 3 p.
- Annual Book of ASTM C773 – 88. 1999. *Standard Test Method for Compressive (Crushing) Strength of Fired Whiteware Materials*. ASTM, West Conshohocken, PA 19428-2959. 5 p.
- Annual Book of ASTM G99 – 95a. 2000. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. Standard Test Method for Wear Testing With a Pin-on-Disk*. ASTM, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 6 p.
- Asfarizal, Junaedi, S., and Irhamsyah, A. 2016. The Characteristics of Coconut Fiber Based Composites and Sugar Fiber-Based Composites. Department of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Padang. ISSN: 2089–4880: 6(1). p. 24-31.
- Astutiningsih, S., Irwin, M., Banjarnahor, and Zakiyuddin, A. 2018. Characterization and Fabrication of Metakaolin Using Pulau Bangka Kaolin. Department of Metallurgical and Materials Engineering. *E3S Web of Conferences* 67, 03021. p. 2-5.
- Avincola, V.A., K. Fitzgerald, D. Kinay, and Steinbrueck, M. 2017. High-Temperature Tests of Silicon Carbide Composite of GFR Cladding Under GFR Conditions. IYNC2016, Hangzhou, China. *Energy Procedia*, 127. p. 320–328.

- Bell, J. L., Driemeyer, Patrick, E., and Kriven, Waltraud, M. 2013. Formation of Ceramics from Metakaolin-Based Geopolymers: Part II. K-Based Geopolymers. *J. Am. Ceramic Soc.*, 92. p. 607–615.
- Callister, W.D. 2009. *Material Science end Engineering an Introduction*. Seven Edition. Departemen of Metallurgical Engineering The University Of Utah. Inc. John Willey and Sons. 975 p.
- Falah, H.M., Budi, A.S., dan Indrasari, W. 2020. Pengaruh Penambahan Kaolin dan Karbon Aktif Terhadap Kekerasan pada Teko Teh Poci. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2020*, Vol. IX. hlm. 83-85.
- Hamzah, M. S., Sam, A., Sofian dan Hidayat, N. 2015. Kekuatan Bending dan Impak Komposit Clay/Fly ash untuk Aplikasi Fire Brick. Universitas Tadulako Indonesia. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM)*. hlm. 3-5.
- Hidayat, D., dan Rahmat, D.W. 2012. Sifat Fisik dan Kekuatan Bending pada Komposit Feldspar-Kaoline Clay. Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang. *J. Saintekno*, Vol. 9 No. 2. hlm. 89-93.
- Imran, A.I., Salimin, A., Kadir, L.O., dan Munandri, M. 2013. Analisa Porositas dan Kekuatan Bending Keramik Matriks Komposit Berbahan Dasar Tanah Liat dan Pasir Lokal. Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo. *SNT2BKL*, ISSN: 978-602-71928-1-2. hlm. 2-4.
- Jaber, H. A., 2017. Study The Effect of Glass and Carbon Fiber on The Firebrick Properties. University of Teknologi Baghdad, Iraq. *Engineering and Technology Journal*, Vol. 35, Part A, No. 4. p. 391-398.
- Jingkun, Y., Peigang H., Dechang J., Xu L., Shu Y., Delong C., Zhihua Y., Xiaoming D., Shengjin W., and Yu, Z. 2015. SiC Fiber Reinforced Geopolymer Composites part 1: short SiC fiber. *Jurnal Ceramics International*. p. 124-127.
- Karo-karo, P., dan Sembiring, S. 2009. Karakteristik Abu Hasil Pembakaran Batubara Bukit Asam Sebagai Bahan Keramik. FMIPA, Universitas Lampung. *Jurnal Ilmu Dasar*, Vol. 9 No. 2. hlm. 127-134.
- Kementerian ESDM. 2016. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN Persero, Tahun 2016 s.d Tahun 2025*. Kebayoran Baru, Jakarta. 915 hlm.
- Kementerian ESDM. 2017. *Kajian Potensi Mineral Ikutan pada Pertambangan Timah*. Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya

Mineral. ISBN: 978-602-0836-28-7. 111 hlm.

Kementrian Lingkungan Hidup. 2009. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8, Tahun 2009, Tentang Pengelolaan Limbah Pada Pembangkit Listrik*. Jakarta. 312 hlm.

Kementerian Perindustrian, 2014. *Profil Indusri Baja Nasional Tahun 2014*. Jakarta. 35 hlm.

Kharisma, N. A., dan Subaer. 2018. Pengembangan Komposit Serat Karbon-Geopolimer Berbasis Metakaolin Sebagai Material Refraktori. Universitas Negeri Makassar. ISSN: 2548-6373. JSPF Jilid 14. hlm. 67-73.

Lin, T., D. Jia, M. Wang, P. He, and D. Liang. 2008. Effects of Fibre Content on Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Carbon Fibre Reinforced Geopolymer Matrix Composites. *Institute for Advanced Ceramics, Harbin Institute of Technology*, Vol. 32, No. 1. p. 77–81.

Nurzal, dan Siswanto, O. 2012. Pengaruh *Wet Pressing* dan Suhu Sintering Terhadap Densitas dan Kekerasan *Vickers* pada Manufactur Keramik Lantai. Institut Teknologi Padang. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 1, No. 2. hlm. 2-5.

Okoye, F.N., Durgaprasad, J., and Singh, N.B. 2015. Mechanical Properties of Alkali Activated Fly ash/Kaolin Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 98. p. 685-691.

Papargyris, A., Papagyri, S., A. Botis, and Liakata, A. 2014. Mechanical Properties of Carbon Fibre Kaolin Matrix Composites. Technological Educational Institute. *Materials Advances in Science and Technology*, Vol. 45. p. 1450-1455.

PT. PLN Persero, *Unit Induk Pembangunan VIII*. 2015. Rencana Pengembangan Unit 4 (300-400 MW) PLTU 3, Banten. 99 hlm.

Rahmani, Hossein R. S., Najafi, H. M., and Ashori, A. 2014. Mechanical Performance of Epoxy/Carbon Fiber Laminated Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol. 33 (8). p. 733–740.

Rathnakar, G., and Shivanand H. K. 2013. Fibre Orientation and Its Influence on The Flexural Strength of Glass Fibre and Graphite Fibre Reinforced Polymer Composites. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 2. p. 56-57.

Rommel, E., Kurniawati, D., dan Pradibta, A.P. 2015. Improvement of The Physical Properties and Reactivity of Fly ash as Cementitious on Concrete.

Universitas Muhammadiyah Malang. *International Journal of Science and Research (IJSR)* ISSN: 2319-7064. Vol. 5 Issue 8. p. 1765–1767.

- Rustan, M., S. Junaedi, dan A. Irhamsyah, 2015. Pengaruh Nanopartikel Zno (Seng Oksida) Terhadap Kuat Tekan Geopolimer Metakaolin. Universitas Negeri Makassar. ISSN 1858-330X, *JSPF Jilid 11 No. 3*. hlm. 286–291.
- Sathishkumar, T.P., Satheeshkumar, S., and Naveen, J. 2014. Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol. 33 (13). p. 33-35.
- Savetlana, S., Lubis, A., Aditya, L., Irfan, M., Siadari, D., Efendi, G., Yusuf, M., Jefri, H. 2020. Fly Ash/Phenolic Resin Composite for Brake Pad Application: Fabrication, Materials and Thermal Properties. University of Lampung. *Composites Theory and Practice* 20 : 3-4. ISSN: 2299-128X. p. 95-101.
- Savetlana, S., Zulhendri, Sukmana I., and Saputra, F.A. 2017. The Effect of Carbon Black Loading and Structure on Tensile Property of Natural Rubber Composite. University of Lampung. *Materials Science and Engineering* 223, 012009. p. 3-8.
- Su, J., B. Gao, Z. Chen, J. Fu, J. An, W. Peng, X. Zhang, X. Wang, L. Huo, K., and P.K. Chu. 2016. Large-Scale Synthesis and Mechanism of β -SiC Nanoparticles from Rice Husks by Low-Temperature Magnesiothermic Reduction. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(12). p. 6600-6607.
- Suarsana, K., dan Sunu, P.W. 2015. Studi Eksperimen Pembuatan Komposit Metal Matrik Aluminium Penguat SiC Wisker dan Al_2O_3 Partikel sebagai Material Alaternatif. Universitas Udayana. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM XIV)*, Banjarmasin. hlm. 2-5.
- Sunardi, Fawaid, M., Rasyid, F., dan Noor, M. 2015. Variasi Campuran Fly Ash Batubara untuk Material Komposit. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. *Jurnal Teknik Mesin Untirta*. ISSN 2407-7852, Vol. I No. 1. hlm. 94-97.
- Suthee, W., Faisal, A.N., Darunee, W., and Patthamaporn, T. 2017. Characterisation and Properties of Geopolymer Composites. Part 2: Role of Cordieritemullite Reinforcement. *Ceramics International*, Vol. 43, Issue 18. p. 16055-16062.

- Wang, H., Z. Rui, H. Xing, W. Chang-An, and H. Yong. 2008. Characterization of a Powder Metallurgy SiC/Cu-Al Composite. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, Issues 1–3. p. 43-48.
- Widyaningsih, S., Ely S., dan Tien, S. 2012. Karakterisasi Abu Terbang PLTU Cilacap untuk Menurunkan Kesadahan Air di Desa Darmakardenan, Kecamatan Ajibarang, Kabupaten Banyumas. Fakultas Sains dan Teknik UNSOED. Molekul, Vol. 6. No. 1. hlm. 35–39.
- Yuwono, A. H. 2009. *Karakterisasi Material Pengujian Merusak (Destructive Testing)*. Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. 55 hlm.
- Zhang, H.Y., Venkatesh, K., Cao, L., Shu-liang, Q. 2014. Fiber Reinforced Geopolymers for Fire Resistance Applications. South China University of Technology, Guangzhou. *Procedia Engineering* 71. p. 153–158.