

PENGARUH TEMPERATUR, WAKTU PENAHANAN DAN FRAKSI VOLUME SINTERING KOMPOSIT SERBUK SILIKA – PVC TERHADAP AKURASI DIMENSI

S. Riyadi

e-mail: dignifo_riyadi@yahoo.co.id

Program Studi Teknik Mesin,
Fakultas Teknik
Universitas Wijaya Putra Surabaya,

A. E. Tontowi

e-mail: menaet@ugm.ac.id

Teknik Mesin dan Industri,
Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta,

Pengembangan alat deposisi dengan komposit serbuk Silika-PVC dengan proses sintering untuk cast molding merupakan teknologi yang tepat untuk memberikan solusi alternatif terhadap teknologi lain yang terbatas akibat harga mesin atau proses yang masih relatif tinggi dalam pengaplikasiannya diantaranya SLS. Dengan proses sintering komposit serbuk Silika-PVC dengan variabel fraksi volume diharapkan menghasilkan suatu produk dengan kekuatan tarik yang optimum untuk aplikasi selanjutnya. Faktor densitas, porositas, mikrostruktur dan lain-lain merupakan faktor yang sangat penting dalam proses sintering serbuk. Penelitian ini bertujuan untuk optimalisasi pengaruh fraksi volume PVC proses sintering komposit serbuk Silika-PVC terhadap kekuatan tarik. Material utama yang digunakan adalah serbuk Silika dan PVC sebagai pengikat dengan fraksi volume Silika-PVC 90-10, 80-20, 70-30, 60-40 dan 50-50 %. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik optimum diperoleh sebesar 2,99 MPa, pada waktu sintering 3 jam, temperatur sintering 120 °C dan fraksi volume PVC 50%.

Kata kunci: fraksi volume, sintering, komposit serbuk silika-pvc, akurasi dimensi, kekuatan tarik

PENDAHULUAN

Teknologi *rapid prototyping* merupakan teknologi yang dapat digunakan untuk memecahkan problem kompleksitas geometri dalam proses produksi (Das dkk., 1998). Dalam proses ini, sering kali digunakan material berbentuk *Solid Freeform Fabrication* (SFF), yang merupakan bentuk tipikal untuk aplikasi proses-proses *layer manufacturing* sehingga dapat menghasilkan bentuk geometri kompleks. Dengan teknologi ini pula dimungkinkan untuk membuat profil *interior porous* tiga dimensi pada bagian tertentu. Secara umum dalam proses ini pembuatan produk tiga dimensi dilakukan dengan mensintering serbuk material dengan menggunakan panas bergerak yang dibangkitkan oleh system laser (SLS) (Kumar, 2003).

Proses *direct laser sintering* pada pasir Silika akan memudahkan proses lelehnya, sehingga terjadi ikatan pada permukaannya, selanjutnya terjadi ikatan antar partikel. Pembekuan menyebabkan peningkatan terhadap densitas. Karena hal itulah dimungkinkan proses *direct laser sintering* pada pasir Silika dapat digunakan untuk aplikasi cetakan untuk pengecoran logam (Tang dkk., 2003). Namun dalam kenyataannya, teknologi ini masih sangat terbatas dalam pengaplikasiannya, akibat harga mesin atau proses yang masih relatif tinggi (Kumar, 2003).

Dengan melihat metoda kerja proses SLS, solusi alternatif yang dapat dikembangkan untuk menekan harga mesin/proses adalah dengan mengembangkan

alat penata deposisi material serbuk, dimana material serbuk yang digunakan adalah campuran antara serbuk PVC yang berfungsi sebagai matrik dan pasir Silika sebagai serbuk induknya. Pengembangan alat penata deposisi serbuk tersebut diharapkan bisa membuat *mold casting* atau *part* antara serbuk Silika dan PVC setelah dilakukan sintering. Aplikasi *mold casting* dari proses ini adalah untuk *investment casting*.

Proses *investment casting* biasanya menggunakan model dari wax, tetapi dalam proses ini digantikan dengan serbuk Silika yang melimpah di alam. Sedangkan cetakan terjadi dari hasil *mixing* serbuk Silika dan PVC. Serbuk serbuk PVC ini berfungsi sebagai pengikat, dan selanjutnya dilakukan *sintering*. Hasil akhir *sintering* didapat cetakan, yang selanjutnya digunakan untuk proses pengecoran. Pada *investment casting* dengan *lost wax*, dalam prosesnya cetakan keramik dibuat dengan dengan mengorbankan model wax (O'donnchadha dan Tansey, 2004).

Penelitian ini merupakan pengembangan alat deposisi komposit serbuk Silika-PVC untuk memecahkan problem kompleksitas geometri dengan proses yang murah yaitu proses *sintering*, tetapi dengan menggunakan teknologi SLS yaitu 3D-CAD, sehingga penelitian sangat penting untuk dilakukan. Variabel proses *sintering* komposit serbuk Silika-PVC adalah temperatur, waktu penahanan dan fraksi volume, diharapkan menghasilkan suatu produk *sintering* yang

kompleks dengan akurasi dimensi dan kekuatan tarik yang optimum

Dari latar belakang yang telah di uraikan diatas dapat diambil beberapa perumusan masalah:

1. Apakah deposisi campuran serbuk dengan fraksi volume, temperatur dan waktu *sintering* mendapatkan produk *sintering* dengan akurasi dimensi yang optimum.
2. Apakah deposisi campuran serbuk dengan fraksi volume, temperatur dan waktu *sintering* mendapatkan produk *sintering* dengan kekuatan tarik yang optimum.

Penelitian ini tidak lepas dari kondisi alat penata deposisi serbuk yang masih dalam proses pengembangan, maka perlu adanya pembatasan masalah yaitu:

1. Proses pendeposisian partikel serbuk Silika dan PVC dilakukan secara manual.
2. Pengukuran dimensi akurasi dimensi pada bagian dalam diacu dari dimensi cetakan deposisi pada bagian luar.

Manfaat dari penelitian ini untuk mendapatkan informasi tentang akurasi dimensi dan kuat tarik deposisi serbuk Silika dan PVC yang optimal.

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengukur akurasi dimensi produk *sintering* komposit serbuk silica-PVC terhadap temperatur, waktu penahanan dan fraksi volume
2. Untuk mengukur kekuatan tarik produk *sintering* komposit serbuk silica-PVC terhadap temperatur, waktu penahanan dan fraksi volume

TINJAUAN PUSTAKA

Pengaruh temperatur, waktu *sintering* dan fraksi volume *matrik* material serbuk proses deposisi dengan metode *sintering* telah banyak diteliti, hasilnya menunjukkan adanya mekanisme ikatan serbuk berpengaruh pada densitas, porositas dan sifat mekanis.

Dengan proses *selective laser sintering* material serbuk menunjukkan, pengaruh temperatur dan waktu yang proporsional proses *sintering* serbuk *polymer* kristalin: nylon-12 dan nylon-11 akan terjadi perubahan porositas (Childs and Tontowi, 2001). Pada *sintering* material serbuk Neat Nylon 6 dan % 5 wt clay *nanoparticle polyamide* menunjuk pengaruh temperatur dan waktu *sintering* akan meningkatkan densitas dan cenderung menurun apabila waktu *sintering* melebihi batas leleh materialnya (Kim and Creasy, 2004).

Densitas akan meningkat terhadap pengaruh inklusi senyawa Al_2O_3 pada permukaan pasir Silika. Dengan proses *direct laser sintering* pengaruh temperatur lelehnya menyebabkan terjadi ikatan dan proses pembekuan permukaan antar ikatan partikel Silika (Tang, 2003).

Pengaruh fraksi volume *matrik* antara Cu-SCuP pada *direct laser sintering* terhadap densitas, menun-

jukkan bahwa mekanisme ikatan dipengaruhi oleh fraksi volume SCuP berpengaruh pada densitas dan sifat mekanis. Semakin meningkat rasio fraksi volume campuran serbuk *matrik*, densitas akan meningkat dan struktur serbuk akan menjadi padat. Sedangkan sifat mekanis akan naik jika rasio fraksi volume *matrik* semakin tinggi. Tetapi juga bisa akan menyebabkan penurunan sifat mekanisnya karena porositas yang tinggi (Zhu dkk., 2004).

Proses *sintering* merupakan proses pemadatan material serbuk dengan cara membentuk ikatan batas butir antar serbuk penyusunnya (Fayed and Otter, 1997). Ikatan antar butir tersebut terjadi akibat pemanasan dengan atau tanpa penekanan sebelumnya. Temperatur *sintering* diatur dibawah temperatur leleh dari partikel penyusunnya. Proses pemanasan biasanya dilakukan selama 1 hingga 1000 menit (Shimosaka dkk, 2003).

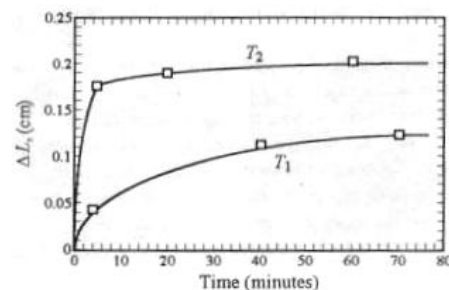
1. Mixing Serbuk

Proses *mixing* atau pencampuran serbuk, dengan komposisi fraksi volume yang tepat akan didapat hasil yang optimum. Sebagai contoh ukuran campuran % fraksi volume dua material serbuk, yaitu: Cu-SCuP dengan rasio 90:10, 75:25, 65:35, 60:40, 45: 55,30:70 (Zhu dkk., 2004).

Dalam penelitian ini ukuran campuran fraksi volume serbuk silica-PVC yang digunakan adalah sebagai berikut: 90-10, 80-20, 70-30, 60-40 dan 50-50. Proses *mixing* dengan peralatan *roller mixing* dan waktu proses *mixing* 1 jam.

2. Akurasi Dimensi

Dalam proses *sintering* terjadi pereduksian volume atau penyusutan volume *pores* ketika proses *sintering* dilakukan, juga terjadi aktivasi *thermal* material di dalam massa serbuk atau kompak *porous*, penurunan pada permukaan khusus diiringi dengan peningkatan kontak partikel dan perubahan geometri rongga/*pores* (Thummler dan Oberacker, 1993), Tahapan dalam proses *sintering* merupakan suatu interval perubahan geometri dimana ukuran rongga/*pores* akan menurun (Barsoum, 1997). Gambar 1 menerangkan kurva aksial *shrinkage* sebagai fungsi waktu:



Gambar 1. Tipikal kurva aksial *shrinkage* selama proses *sintering* sebagai fungsi waktu

Akurasi dimensi dapat diasumsikan suatu penyusutan, karena terjadi suatu perubahan volume.

Dimensi pada X, Y, Z dan Volume setelah *sintering*:

$$\frac{V_N}{V_o} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

dengan; V_o : volume mula-mula (mm^3), V_N : volume setelah dilakukan *sintering* (mm^3) (Conesa dkk, 2004). Penyusutan serbuk selama *sintering* dapat dapat diketahui dengan reduksi volume:

$$C = \frac{V_o - V_N}{V_o} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

dengan; C: penyusutan serbuk, V_o : volume mula-mula (mm^3), V_N : volume setelah dilakukan *sintering* (mm^3) (Conesa dkk, 2004).

3. Densitas dan Porositas

Densitas dapat diukur dengan rasio masa per volume spesimen menggunakan prinsip:

$$\rho = \frac{w}{V} \dots\dots\dots(3)$$

dengan; ρ : densitas spesimen (gr/cm^3), w: berat spesimen (gr), V: volume spesimen (cm^3) (Gieck, 2000).

Untuk pengukuran densitas aktual komposit, diukur dengan persamaan hukum Archimedes yaitu:

$$\rho_{actual} = \frac{W_{udara}}{W_{udara} - W_{fluida}} \rho_{fluida} \dots\dots\dots(4)$$

dengan; ρ_{actual} : densitas aktual (gr/cm^3), W_{udara} : berat di udara (gr), W_{fluida} : berat di dalam fluida (gr), ρ_{fluida} : densitas fluida (gr/cm^3) (Barsoun, 1997).

Untuk densitas hasil *mixing* proses *sintering* menggunakan prinsip *rule of mixture* :

$$\rho_c = \rho_m v_m + \rho_f v_f \dots\dots\dots(5)$$

dengan; ρ_c : densitas komposit/teoritis (gr/cm^3), ρ_m : densitas matrik (gr/cm^3), ρ_f : densitas partikel penguat (gr/cm^3), v_m : % volume matrik, v_f : % volume partikel penguat. Sedangkan untuk mengukur porositas menggunakan persamaan:

$$\text{Porositas} = 1 - \frac{\rho_{actual}}{\rho_{theoritis}} \dots\dots\dots(6)$$

dengan; ρ_{actual} : densitas aktual (gr/cm^3), $\rho_{theoritis}$: densitas komposit/teoritis (gr/cm^3)

4. Kekuatan Tarik

Untuk mengukur kuat mekanik diinterpretasikan dengan kekuatan tarik. Kekuatan tarik spesimen berdasarkan *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (ASTM D638 type IV^B), kekuatan tarik dihitung membagi beban maksimum dengan *original minimum area* penampang lintang spesimen. Hasil perhitungan ditunjukkan dalam Pascal.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(7)$$

dengan; σ : kekuatan tarik (Pa), P: beban maksimum (N), A: Luas penampang (m^2)

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk menentukan parameter optimum proses *sintering* ini adalah:

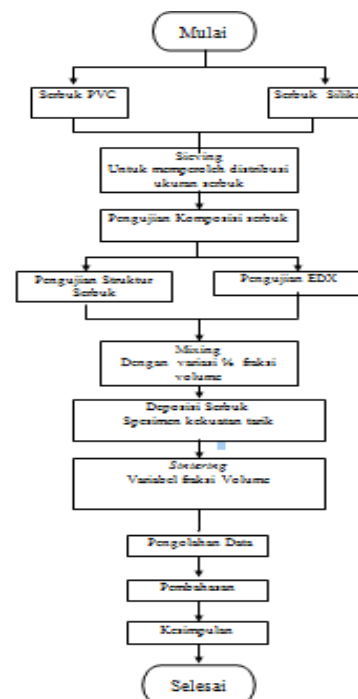
1. Serbuk PVC (yang ada dipasaran dinamai serbuk penimbul kertas)
2. Serbuk Pasir Silika.

Alat Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan peralatan: alat *sieving* +GF+ tipe PSA, alat timbangan Mettler P1210 dan Sartorius, *mixing*, peralatan untuk deposisi serbuk, *furnace* Memmert, mikroskop optis Olympus, alat uji tarik CE Pearson Panke *Equipment*, Calliper, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan XRD, dan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Rancangan Penelitian

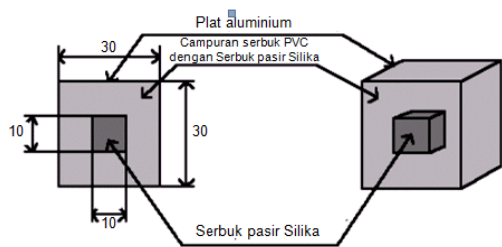
Kegiatan penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 2 dibawah ini:



Gambar 2. Diagram alir proses penelitian

Proses pengujian diawali dengan proses *sieving* serbuk PVC dan Pasir Silika. Hal ini dilakukan untuk memperoleh distribusi ukuran *mesh* partikel yang diinginkan yaitu: antara < 0.053 sampai 0.210 – 0.297 mm untuk PVC. Sedangkan serbuk pasir Silika berdiameter antara <0.053 mm sampai 0.210 – 0.297 mm. Selanjutnya proses pencampuran serbuk PVC dan pasir Silika, dan deposisi campuran serbuk. Kemudian

penataan letak spesimen akurasi dimensi seperti pada Gambar 3. dibawah ini:

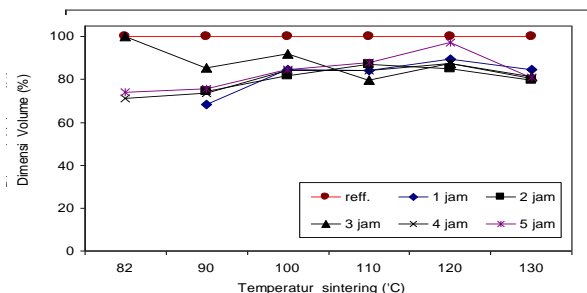


Gambar 3. Penataan letak spesimen akurasi dimensi dimana serbuk Silika terletak ditengah campuran serbuk PVC dan Silika

Gambar 3. menunjukkan Dimensi Volume akhir optimum yang terjadi sebesar 98,89% pada temperatur *sintering* 82°C waktu *sintering* 1 jam dan fraksi volume PVC 10%.

2. Pengaruh waktu *sintering* terhadap akurasi dimensi luar

Akurasi volume dimensi luar optimum terhadap waktu *sintering* terjadi pada variabel temperatur dan fraksi volume PVC 10%, dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

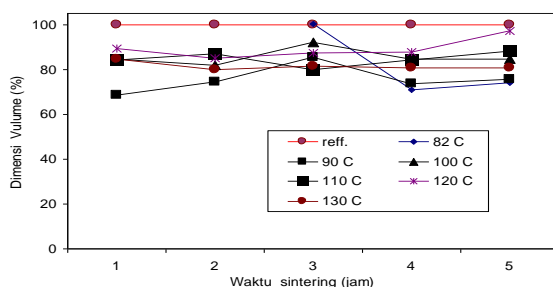


Gambar 4. Pengaruh waktu *sintering* terhadap akurasi Volume dimensi luar pada fraksi volume PVC 10%

Gambar 4. menunjukkan Dimensi Volume akhir optimum yang terjadi sebesar 98,89% pada waktu *sintering* 1 jam, temperatur *sintering* 82°C dan fraksi volume PVC 10

5. Pengaruh waktu *sintering* terhadap akurasi dimensi dalam

Akurasi volume dimensi dalam terhadap waktu *sintering* dengan variabel temperatur dan fraksi volume, dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

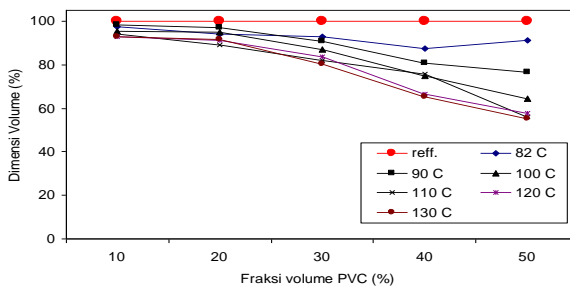


Gambar 5. Pengaruh fraksi volume PVC terhadap akurasi Volume dimensi luar dengan waktu *sintering* 1 jam

Gambar 5. menunjukkan dimensi volume akhir optimum yang terjadi sebesar 98,89% pada fraksi volume 10%, temperatur *sintering* 82°C dan waktu *sintering* 1 jam

Pengaruh fraksi volume PVC terhadap akurasi dimensi luar

Akurasi volume dimensi luar optimum terhadap fraksi volume PVC terjadi pada variabel temperatur dan waktu *sintering* 1 jam, dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

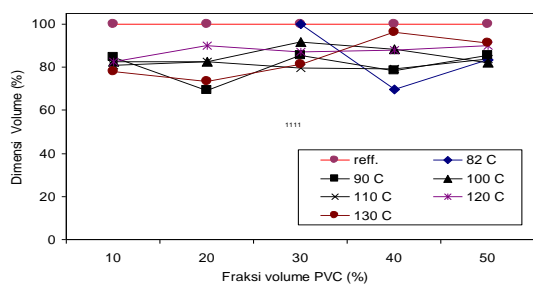


Gambar 6. Pengaruh temperatur *sintering* terhadap akurasi volume dimensi dalam

Gambar 6. menunjukkan adanya penyusutan pada temperatur *sintering* 82-130°C dengan fraksi volume PVC 30%. Dimensi dalam volume optimum yang terjadi sebesar 100,17% pada temperatur *sintering* 82°C, waktu *sintering* 3 jam dan fraksi volume PVC 30%.

4. Pengaruh temperatur *sintering* terhadap akurasi dimensi dalam

Akurasi volume dimensi dalam terhadap temperatur dengan variabel waktu *sintering* dan fraksi volume, dapat dilihat grafik di bawah ini:



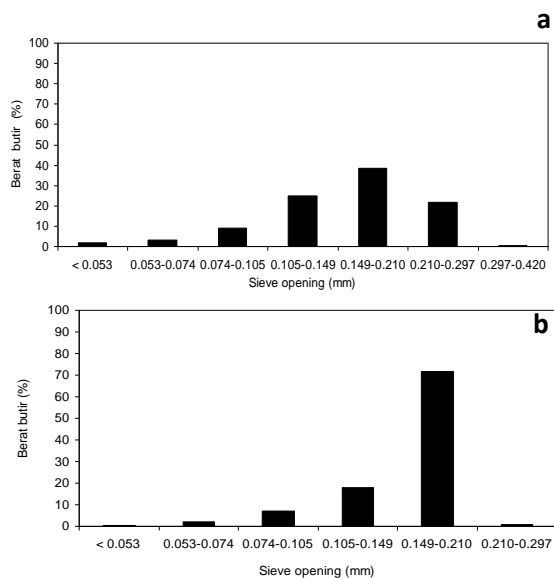
Gambar 7. Pengaruh waktu sintering terhadap akurasi volume dimensi dalam

Gambar 7. menerangkan adanya penyusutan Volume pada waktu sintering 1-5 jam dengan fraksi volume PVC 30%. Dimensi dalam Volume optimum yang terjadi sebesar 100,17% pada waktu sintering 3 jam, temperatur sintering 82°C dan fraksi volume PVC 30%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Distribusi Ukuran Serbuk

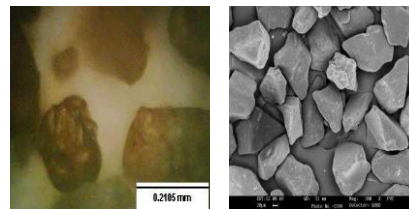
Evaluasi distribusi ukuran serbuk ditentukan dengan aturan masukan serbuk, yang dilakukan dengan secara periodik. Untuk analisis ukuran partikel diperlukan peralatan alat sieving yang terdiri dari: timbangan, pengetar, ayakan/saringan, sikat pembersih ayakan dan pengatur waktu. Distribusi ukuran serbuk didapat dengan metode penyaringan. Metode penyaringan ini merupakan cara yang paling mudah untuk mendapatkan distribusi ukuran serbuk. Ada 3 sampel yang masing-masing beratnya 100 g untuk dilakukan proses sieving selama 10 menit. Distribusi ukuran serbuk dijabarkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan persentase berat serbuk pada masing-masing ukuran sieve (Baker dan Herrman, 2002). Adapun data dari hasil proses penyaringan baik serbuk PVC (Gambar 8a.) dan pasir Silika (Gambar 8b). di bawah ini



Gambar 8. a). Distribusi ukuran serbuk Silika dan b). Distribusi ukuran serbuk PVC

B. Hasil Pengujian Mikro Serbuk

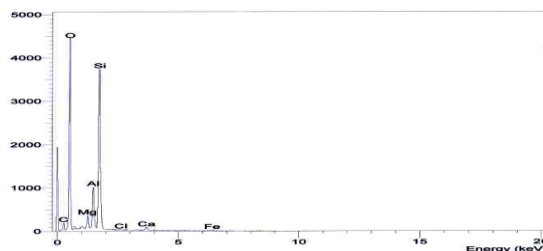
Dari hasil pengujian mikro serbuk dengan pengamatan pada mikroskop optis, dapat dilihat bentuk dan ukuran serbuk Silika. Pada serbuk Silika pada permukaannya cenderung berbentuk rounded lihat Gambar 9a. Sedangkan pengambilan gambar hasil pengujian mikro serbuk dengan SEM, dapat dilihat bentuk dan ukuran PVC. Untuk serbuk PVC cenderung berbentuk polygonal dan angular seperti pada Gambar 9b.



Gambar 9. a). Serbuk murni serbuk Silika dengan pengujian mikroskop optik b). Serbuk murni PVC dengan pengujian SEM

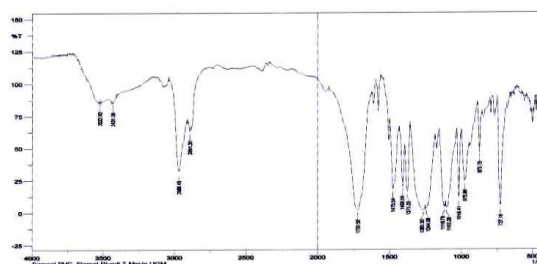
C. Hasil Pengujian Serbuk dengan EDX dan FTIR

Pengujian Energy Dispersive X-Ray (EDX) dilakukan untuk analisa elemen penyusun material serbuk. Dari pengujian ini didapat grafik yang berupa puncak-puncak suatu unsur yang terdapat dalam sampel uji. Gambar 10 menunjukkan komponen utama dari sampel uji serbuk Silika adalah senyawa SiO₂, Al₂O₃, MgO, serta unsur-unsur C, Ca, Cl dan Fe.



Gambar 10. Grafik pola pengujian EDX serbuk Silika

Untuk mengetahui lebih jelas elemen unsur penyusun partikel serbuk PVC, dilakukan karakterisasi Fourier Transform Infra Red Spectrophotometer (FTIR), yang hasilnya berupa gugus-gugus fungsional suatu sampel. Gambar 11. menerangkan adanya gugus fungsional vinil, dan unsur-unsur NH, ikatan C-H, CH₂ dan Cl



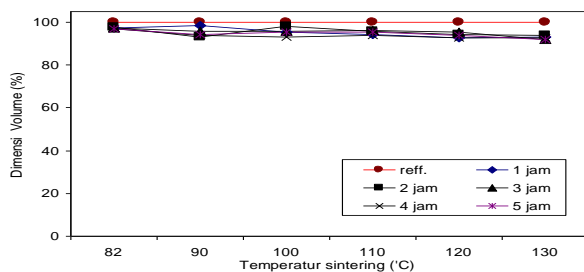
Gambar 11. Grafik pola pengujian FTIR serbuk PVC

D. Analisa Hasil Pengujian Akurasi Dimensi

1. Pengaruh temperatur *sintering* terhadap akurasi dimensi luar

Akurasi dimensi luar merupakan penyusutan dimensi karena pengaruh temperatur *sintering*, waktu *sintering* dan fraksi volume PVC. Penyusutan dimensi luar diukur berdasarkan Volume.

Akurasi volume dimensi luar optimum terhadap temperatur terjadi pada variabel waktu *sintering* 1 jam dan fraksi volume PVC 10%, dapat dilihat pada gambar 8. grafik di bawah ini:



Gambar 8. Pengaruh temperatur *sintering* terhadap akurasi Volume dimensi luar

KESIMPULAN

Dari penelitian ada beberapa kesimpulan yang diperoleh:

1. Dimensi volume luar optimum yang terjadi sebesar 98,89% pada fraksi volume PVC 10%, temperatur *sintering* 82⁰C dan waktu *sintering* 1 jam, pada dimensi pada bagian volume dalam optimum yang terjadi sebesar 100,17% pada waktu *sintering* 3 jam, temperatur *sintering* 82⁰C dan fraksi volume PVC 30%.
2. Peningkatan fraksi volume serbuk PVC, temperatur *sintering* dan waktu *sintering* akan menyebabkan densitas meningkat setelah dilakukan *sintering*. Densitas optimum yang terjadi sebesar 1,633gr/cm³ fraksi volume PVC 50%, temperatur *sintering* 120⁰ C dan waktu *sintering* 4 jam. Porositas menurun, porositas optimum yang terjadi sebesar 4,33 % fraksi volume PVC 50%, waktu *sintering* 4 jam dan temperatur *sintering* 120⁰C.

DAFTAR PUSTAKA

- Baker, S. and Herrman, T., 2002, *Evaluating Particle Size*, MF-2051, pp 1-6
- Barsoum, M.W., 1997, *Fundamentals of Ceramics*, 1st Edition, McGraw-Hill, Singapore
- Child, T. H.C. and Tontowi, A. E., 2001, *Selective Laser Sintering of a Crystalline and a glass-filled crystalline polymer: experiments and simulations*, ImechE, Vol. 215, pp. 1481-1495
- Conesa, C., Saleh, K., Thomas, A., Guigon, P. and Guillot, N., 2004, *Characterization of Flow of Powder Coatings Used in the Automotive Industry*, KONA, pp 94-106
- Das, S., Wohler, M., Beaman, J.J. and Bourell, D.L., 1998, *Producing Metal Part with Selective Laser Sintering/Hot Isostatic Pressing*, JOM, pp.17-20.
- Fayed, M. E. and Otten, L., 1997, *Handbook of Powder Science and Technology*, 2nd Edition, Chapman and Hall – ITP, New York
- Gieck, K., 2000, *Kumpulan Rumus Teknik*, 4th Edition, Pradnya Paramita, Jakarta
- Harper, C.A., 1996, *Handbook of plastics, elastomers and composites*, 3rd Edition, McGraw-Hill, USA
- Kingery, W.D., Bowen, H.K. and Uhlmann, D.R., 1975, *Introduction to Ceramic*, 2nd, John Wiley and Sons
- Kim, J. and Creasy, T.S., 2004, *Selective laser sintering characteristics of nylon 6/clay-reinforced nanocomposite*, Material Characterisation , Polymer Testing 23: 629–636
- Kumar, S., 2003, *Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach*, JOM, pp. 43-47
- Shimoska, A., Ueda, Y., Shirakawa, Y. and Hidaka, Y., 2003, *Sintering Mechanism of Two Sphere Forming a Homogeneous Solids Solubility Neck*, KONA, No. 21
- Tang, Y., Fuh, J.Y.H., Loh, H.T., Wong, Y.S., and Lu, L., 2003, *Direct laser sintering of silica sand*, Elsevier, Material and Design, pp 623-629
- Thummler, F. and Oberacker, R., 1993, *An Introduction to Powder Metallurgy*, Book 490, The Institute of Materials, London
- Zhu, H.H., Lu, L., and Fuh J.Y.H., 2004, *Influence of matrix's liquid volume fraction on direct laser sintering of metallic powder*, Materials Science and Engineering A 371: 170–177