

# STUDI VARIASI SUHU TERHADAP KUAT MEKANIK SAMBUNGAN ANTARA BAJA DENGAN TEMBAGA PADA PROSES *FURNACE BRAZING*

**Bambang Waluyo Febriantoko**

Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani PO BOX 1 Pabelan Surakarta 57102

E mail : bambangwf@gmail.com

## ABSTRAK

*Aplikasi furnace brazing digunakan pada pembuatan mold/dies dengan metode laminated steel tooling. Kekuatan sambungan antara logam induk dengan logam pengisi (filler) merupakan permasalahan yang utama. Kekuatan ini tergantung dari material logam induk, material logam pengisi, suhu proses brazing, tekanan proses dan metode brazing. Penelitian ini menyelidiki variasi suhu proses furnace brazing antara logam induk baja mild steel dengan logam pengisi tembaga.*

*Metode penyambungan antara mild steel dengan baja dilakukan dengan menggunakan jig untuk memberi tekanan selama proses brazing. Jig berikut dengan spesimen uji tarik, uji geser, dan uji belah dilakukan pemanasan didalam furnace serta didinginkan dengan perlahan setelah mencapai suhu penelitian. Pengujian mekanis dilakukan dengan mesin Universal Testing Machine.*

*Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi suhu brazing akan didapatkan kekuatan yang semakin naik, namun suhu maksimum tergantung dari titik leleh logam pengisi.*

**Kata kunci :** *Brazing, Kuat Mekanik, Baja, Tembaga*

## PENDAHULUAN

Penyambungan pada logam dengan logam lain dilakukan dengan banyak cara, diantaranya dengan las, lem, solder, baut, paku keling dan brazing. Brazing salah satu cara penyambungan yang banyak dilakukan untuk menyambung plat tipis yang tidak mungkin digunakan metode las. Pada pembuatan dies/*mold* dengan metode rapid prototyping dengan menggunakan cara *Laminated Steel Tooling* (LST) maupun layer manufacturing brazing banyak memegang peranan yang penting. Metode LST menggunakan plat baja yang disusun tiap layer dengan menggunakan brazing maupun lem untuk menyambung tiap layer plat. Kekuatan sambungan antara baja dan tembaga sebagai logam pengisi inilah yang

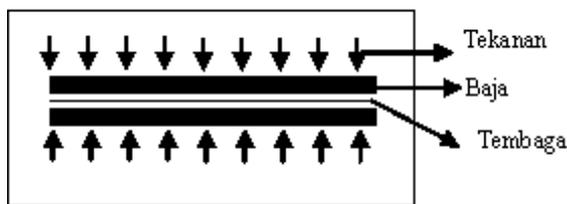
akan dibahas pada penelitian ini dengan memvariasikan suhu pada proses brazing didalam *furnace*.

## TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam usaha untuk mengaplikasikan pendinginan *conformal*, laminasi brazing bahan Aluminium yang dilakukan dengan memberikan *filler* ditengahnya dan diberi tekanan selama pemanasan pada suhu 610°C selama 1 jam telah terjadi *diffusion bonding* yang erat sehingga air pendingin tidak masuk ke dalam *mold* (Himmer dkk, 1999). Uji coba pada bahan *mild steel* dilakukan oleh peneliti dengan cara metode brazing *mild steel* dan Tembaga pada suhu 1110°C

dengan waktu tahan di dalam furnace selama 30 menit (Wimpeny dkk, 2003). Bryden dkk, (2001) melakukan brazing bahan *mild steel* dengan *filler* Ag-Cu-Zn-Sn pada tekanan 1,7 MPa dengan suhu 720°C. Yoon & Na (2003), melakukan penelitian pembuatan Rapid Lami-nated Tooling dengan membandingkan proses brazing dengan solder mendapatkan bahwa metode brazing mempunyai kekuatan yang lebih tinggi.

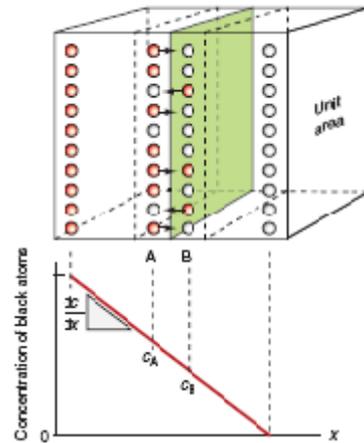
Brazing merupakan metode penyambungan dua logam dengan menggunakan *filler* pengisi dengan cara pemanasan dibawah suhu *melting* logam pengisinya. Proses brazing dilakukan dengan ciri: komposisi logam *filler* pengisi untuk brazing selalu berbeda dengan komposisi logam induk, kekuatan sambungan brazing ini selalu dibawah kekuatan logam induk, *melting point* dari *filler* brazing selalu lebih rendah dari logam induk, metode perekatan dari dua logam ini dengan cara difusi atom (De Garmo dkk, 1984).



Metode perekatan ini dapat dilihat pada Gambar 1, *filler* pengisi berada ditengah dan dijepit oleh logam induk. Tekanan diberikan pada kedua sisi dan dilakukan pemanasan di dalam *furnace* beserta dengan jignya.

Pemanasan dengan temperatur yang tepat akan menjaga kualitas brazing, temperatur terlalu tinggi membuat *filler* meleleh, jika temperatur terlalu rendah maka kekuatan sambungan akan menurun (Wimpeny dkk, 2003).

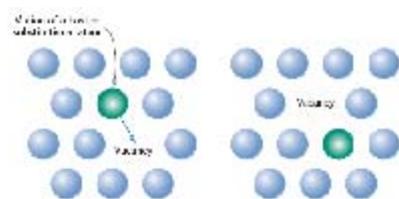
Difusi merupakan perpindahan atom dari satu tempat ke tempat lainnya. Tipe dari difusi material solid yaitu : *self diffusion* dan *interdiffusion*. *Self diffusion* adalah perpindahan atom pada satu jenis bahan. *Interdiffusion* adalah perpindahan atom antara dua atau lebih jenis bahan yang berbeda.



**Gambar 2 Mekanisme interdiffusion, (Ashby, 2007)**

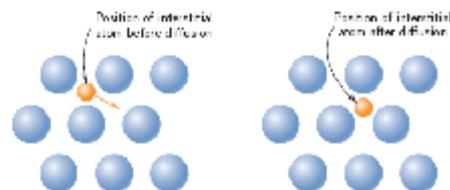
Mekanisme terjadinya difusi terbagi oleh: difusi *vacancy* dan difusi *interstitial*.

Difusi *Vacancy* adalah mekanisme perpindahan atom karena ada kekosongan tempat. Kekosongan ini akan diisi oleh atom yang lain, seperti pada Gambar 3



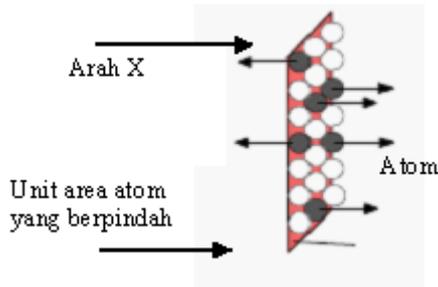
**Gambar 3 Mekanisme difusi Vacancy (Callister, 2007)**

Difusi *interstitial* adalah mekanisme perpindahan atom karena gerakan atom didalam rongga atom, diilustrasikan pada Gambar 4.



**Gambar 4 Mekanisme difusi Interstitial (Callister, 2007)**

Pemodelan teori difusi berdasarkan oleh jumlah flux yang berdifusi ke logam lain. Flux dapat dijelaskan pada Gambar 5, yaitu perpindahan atom persatuan luas.



**Gambar 5 Mekanisme perpindahan atom**

Persamaan perhitungan flux (J) adalah

$$J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \text{ atau } \left[ \frac{\text{atom}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (1)$$

dengan J adalah flux, A adalah luas area yang terdifusi.

Perhitungan fluk difusi (J) menurut persamaan dari hukum Fick's pertama kondisi satu dimensi adalah :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

dengan D merupakan koefisien difusi,  $\frac{dC}{dx}$

merupakan gradien konsentrasi bahan (massa / volume dibagi dengan jarak).

Hubungan antara koefisien difusi dengan temperatur digunakan persamaan :

$$D = D_0 \exp \left( - \frac{Q}{RT} \right) \quad (3)$$

dengan  $D_0$  adalah pre exponential dari bahan, Q adalah energi aktivasi, R merupakan konstanta gas, dan T adalah temperatur.

Hubungan antara kekuatan sambungan dengan difusi yang terjadi dipengaruhi oleh jumlah flux (jumlah atom per satuan luas). Sedangkan tegangan tarik ( $\sigma$ ) pada kekuatan sambungan adalah :

(4)

dengan P adalah gaya tarik, A adalah luas area penyambungan.

Sehingga semakin besar jumlah flux dari filler yang terdifusi ke dalam logam induknya maka akan semakin besar pula tegangan tariknya.

Untuk tegangan geser ( $\delta$ ) pada kekuatan sambungan dapat dirumuskan :

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (5)$$

dengan P adalah gaya geser, A adalah luas area penyambungan

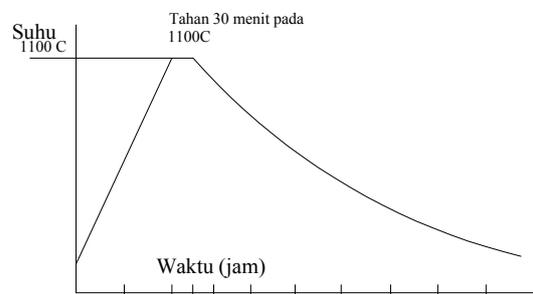
Sedangkan tegangan tarik ( $\delta$ ) karena pembelahan (*cleavage*) pada kekuatan sambungan adalah :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

dengan P adalah gaya tarik yang mengakibatkan pembelahan, A adalah luas area penyambungan.

## METODE PENELITIAN

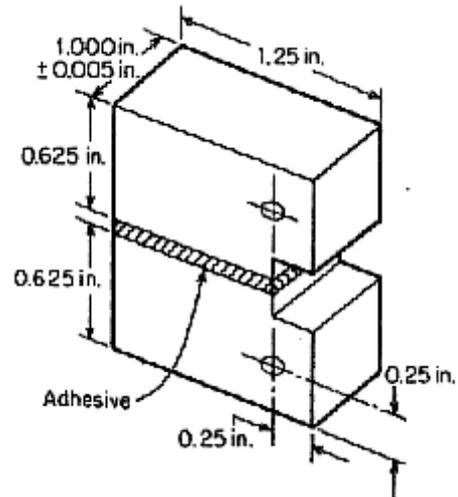
Perekatan brazing dilakukan dengan menggunakan jenis filler sesuai pada Tabel 1 yaitu Tembaga. Kondisi variabel ketiga jenis proses brazing dapat dilihat pada Tabel 1. Brazing pada filler Tembaga proses penyambungannya diberi tekanan 1,7 MPa (Bryden, 2001) di dalam jig. Jig beserta dengan spesimen dipanaskan pada furnace dengan variasi suhu 1000°C, 1050°C, 1100°C ditahan selama 30 menit (Wimpenny, 2003) dan didinginkan perlahan di dalam furnace (lihat Gambar 10). Setiap variasi suhu digunakan spesimen sebanyak 5 buah, kemudian dilakukan pengujian tarik, geser dan belah.



**Gambar 6 Grafik perlakuan brazing Tembaga 1100° C dalam furnace**

**Tabel 1 Variabel perekatan brazing**

	Jenis <i>Filler</i>
	Tembaga
Suhu (°C) pemanasan	1000, 1050, 1100
Waktu tahan	30 menit
Tebal <i>filler</i>	0,17 mm
Tekanan pres	1,7 MPa
Metode penghalusan permukaan	Kertas gosok ukuran 120 - 1000



**Gambar 8 Bentuk spesimen uji belah (cleavage) ASTM D1062 (Harper, 1996)**

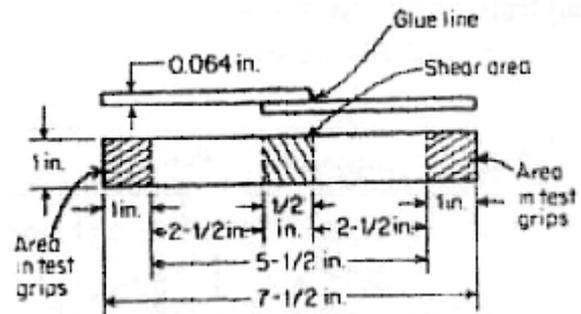
## BAHAN DAN SPESIMEN

### 1. Bahan

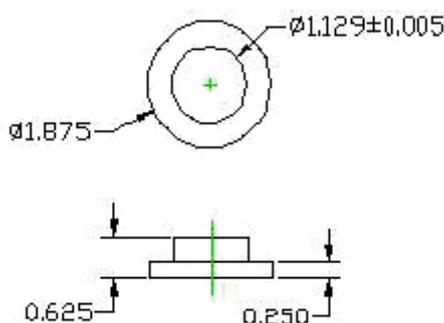
Material yang digunakan sebagai basis laminasi menggunakan *mild steel* dengan ukuran sesuai Gambar 7, Gambar 8, Gambar 9. Hasil uji komposisi kimia pada material adalah 98,52 Fe, 0,473 C, 0,55 Mn, 0,232 Si. Bahan perekat (*filler*) yang digunakan adalah tembaga dengan komposisi 99%.

### 2. Spesimen

Pembentukan spesimen untuk uji tarik mengacu pada standart ASTM D897 dengan bentuk sesuai Gambar 7, untuk uji belah (*cleavage*) mengacu pada standart ASTM D1062 dengan bentuk sesuai Gambar 8, untuk uji geser sesuai dengan standart ASTM D1002 sesuai dengan Gambar 9. Standar uji ini mengacu pada pengujian *adhesive bonding* karena akan dibandingkan dengan hasil pengujian penyambungan lem epoxy.



**Gambar 9 Bentuk spesimen uji geser ASTM D1002 (Harper, 1996)**



**Gambar 7 Bentuk spesimen uji tarik ASTM D897 (Material Testing Technology Co, 2003.)**

### 3. Alat Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan peralatan :

1. *Universal Testing Machine* merk Shimadzu Servo Pulser kapasitas 20 ton di Laboratorium Teknik Mesin UGM
2. *Furnace* merk Thermolyne dengan suhu maksimum 1400°C di Laboratorium Teknik Kimia UMS
3. Alat pres & jig buatan sendiri
4. Torsi meter merk Britool kapasitas 70 N/m digunakan untuk mengatur tekanan pada jig

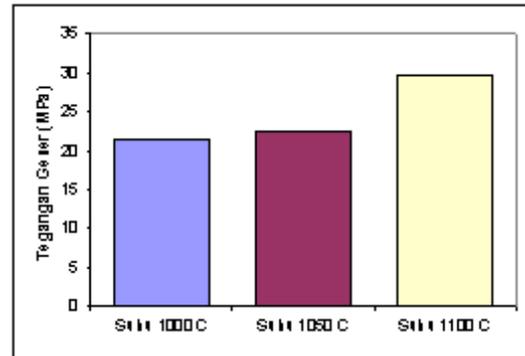


Gambar 10 Furnace

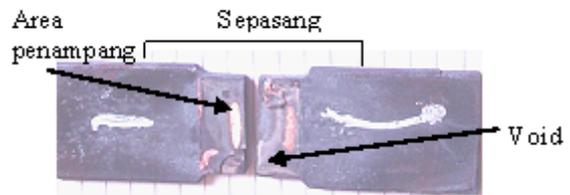


Gambar 11 Jig

bahwa semakin tinggi suhu akan didapatkan luas penampang bidang kontak semakin besar.



Gambar 12 Diagram batang pengujian geser brazing



Gambar 13 Penampang uji geser suhu 1000C

## HASIL PENELITIAN

### 1. Pengujian Geser

Hasil pengujian geser metode brazing dapat dilihat di Gambar 12. Hasil pengujian geser brazing *filler* Tembaga lokal suhu *furnace* 1000°C sebesar 21,39 MPa, suhu 1050°C sebesar 22,56 MPa, dan suhu 1100°C sebesar 29,61 MPa. Hasil Patahan berupa patah getas. Pada pengujian ini didapatkan hasil tertinggi pada *filler* Tembaga pada suhu 1100°C dengan kekuatan sebesar 29,61 MPa. Bryden (2001) melakukan laminasi *mild steel* ketebalan 1,6 mm dengan *filler* Ag 56, Cu 22, Zn 17, Sn 5% pada 720°C didapatkan kekuatan geser sebesar 28,75 MPa.

Bentuk penampang potong pada Gambar 13, 14, dan 15 setelah pengujian, terdapat perbedaan luas penampang potong. Pada Gambar 15 luas bidang penampang lebih besar dari gambar sebelumnya, hal ini menunjukkan



Gambar 14 Penampang uji geser suhu 1050

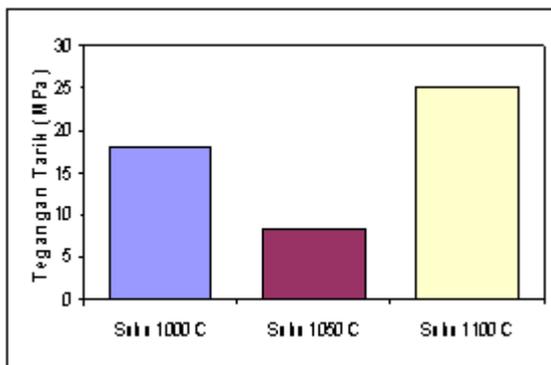


Gambar 15 Penampang geser suhu 1100°C

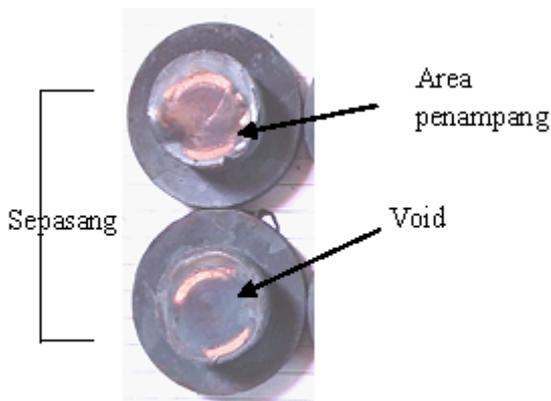
## 2. Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik metode brazing dapat dilihat di Gambar 16. Hasil pengujian tarik brazing *filler* Tembaga lokal suhu *furnace* 1000°C sebesar 17,91 MPa, suhu 1050°C sebesar 8,4 MPa, dan suhu 1100°C sebesar 25,16 MPa.

Pengujian tarik brazing Tembaga didapatkan hasil tertinggi pada variasi suhu 1100°C, terdapat penurunan yang signifikan antara hasil pada suhu 1000°C dan 1050°C. Penurunan ini dapat disebabkan oleh bidang kontak permukaan yang tidak rata antara *filler* dan logam induk.

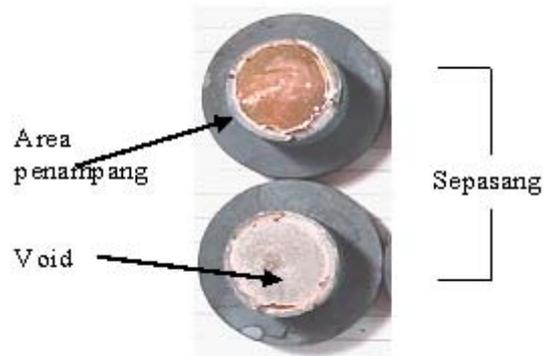


**Gambar 16** Diagram batang pengujian tarik brazing

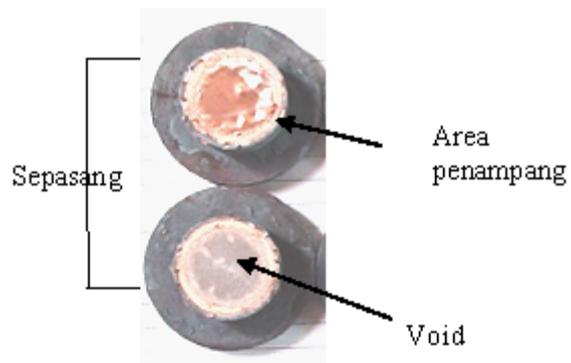


**Gambar 17**  
Penampang uji tarik suhu 1000 °C

Penampang potong pada Gambar 4.19, setelah dilakukan pengujian pada suhu 1100°C terlihat bahwa luas bidang potong lebih besar dari yang lainnya. Gambar 17 penampang potong



**Gambar 18**  
Penampang uji tarik suhu 1050 °C



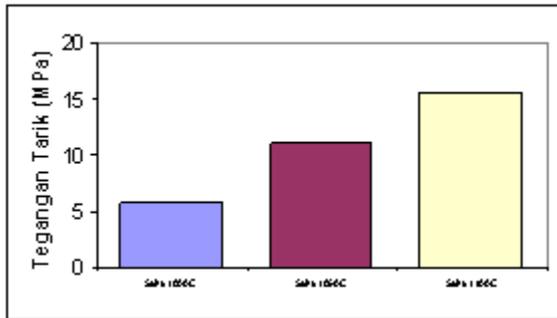
**Gambar 19**  
Penampang uji tarik suhu 1100 °C

dari yang lainnya. Gambar 17 penampang potong suhu 1000°C lebih besar dibandingkan suhu 1050°C yang diikuti pula dengan naiknya kekuatan tariknya, hal ini dapat disebabkan masalah kerataan permukaan.

## 3. Pengujian Belah (*Cleavage*)

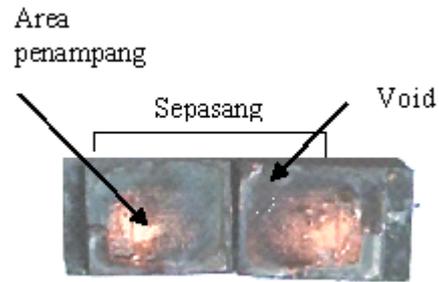
Hasil pengujian belah metode brazing dapat dilihat di Gambar 20. Hasil pengujian belah brazing *filler* Tembaga lokal suhu *furnace* 1000°C sebesar 5,75 MPa, suhu 1050°C sebesar 11,05 MPa, dan suhu 1100°C sebesar 15,67 MPa. Hasil patahan berupa patah getas.

Pengujian belah dengan *filler* Tembaga didapatkan hasil tertinggi pada suhu 1100°C sebesar 15,6 MPa (pada Gambar 20). Nilai kekuatan brazing *filler* Tembaga naik seiring dengan naiknya suhu pada *furnace* proses brazing.

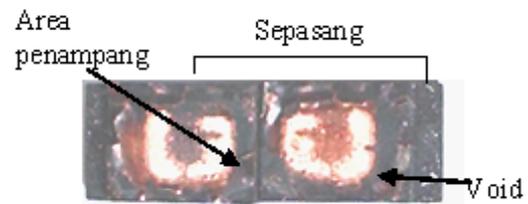


**Gambar 20** Diagram batang pengujian belah brazing

Penampang uji belah dapat dicermati pada Gambar 21, Gambar 22, Gambar 23. Disini terdapat perbedaan luas area kontak permukaan pada variasi berbagai suhu. Pada suhu 1000°C kontak permukaan lebih kecil dibandingkan dengan suhu 1100°C yang mempunyai luas bidang kontak yang lebih besar.



**Gambar 22**  
Penampang uji belah suhu 1050°C



**Gambar 23**  
Penampang uji belah suhu 1100°C



**Penampang uji belah suhu 1000°C**

## KESIMPULAN

Kekuatan mekanis pada sambungan baja dengan baja menggunakan tembaga sebagai logam perantara didapatkan pengaruh suhu terhadap kekuatan sambungan, semakin tinggi suhu brazing akan semakin kuat sambungannya. Suhu maksimum proses brazing sampai 1100°C.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bryden, B.G., Pashby, I.R., 2001, Hot Platen Brazing to Produce Laminated Steel Tooling, *Journal of Material Processing Technology* 110 206-210
- Bryden, B.G., Pashby, I.R., Wimpenny, D.I., Adams, C., 2000, Laminated Steel Tooling in Aerospace Industry, *Material and Design* 21 403-408
- De Garmo, P., Black, J.T., Kohser, R.A., 1984, *Materials and Processes in Manufacture*, Seventh Edition, Maxwell Macmillan
- Himmer, T., Nakagawa, T., Anzai, M., 1999, Lamination of Metal Sheets, *Computer in Industry* 39 27-33
- Mueller, B. dan Kochan, D., 1999, Laminated Object Manufacturing for Rapid Tooling and Pattermaking in Foundry Industry, *Computers in Industry* 39 47-53

- Muller, H. dan Sladojevic, J. 2001, Rapid tooling approaches for Small lot Production of Sheet metal parts, *Journal of Material Processing Technology* 115 97-103
- Rabinkin, A., Wenski, E., Ribaud, A., 1998, Brazing Stainless Steel Using a New MBF-Series of Ni-Cr-B-Si Amorphous Brazing Foils, *Welding Research Supplement*, P 66s-75s.
- Wimpenny, D.I., Bryden, B., Pashby, I.R., 2003, Rapid Laminated Tooling, *Journal of Material Processing Technology* 138 214-218
- Ashby M., Shercliff H., Cebon D., 2007, *Material Engineering Science Processing and Design*, Butterwoth-Heinemann, UK
- Callister W.D., 2007, *Material Science & Engineering*, Seventh Edition, John Willey & Sons
- Yoon S. H., Na S.J., 2003, Rapid Lamination Tooling by Brazing & Soldering Process, *Journal Of Manufacturing Process*, Volume 5 No 2

# PENGUJIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DENGAN POSISI PELAT PHOTOVOLTAIC HORIZONTAL

**Sartono Putro**

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Kotak Pos 1 Pabelan Surakarta  
sartono\_putro@ums.ac.id

## ABSTRAK

*Indonesia merupakan negara yang banyak memiliki pulau serta pegunungan, ada sejumlah daerah merupakan daerah terpencil yang tidak mendapatkan pasokan energi listrik PT PLN Persero. Untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik di daerah tersebut dapat menggunakan sumber energi alternatif tenaga surya sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penggunaan energi surya menjadi energi listrik menggunakan sel surya banyak dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh lingkungan terhadap kinerja PLTS.*

*Photovoltaic yang digunakan dalam pengujian ini type 50-110-210 buatan PT. LEN Bandung. Pengujian PLTS dilakukan di Desa Ngiringin, Kecamatan Selogiri, Kabupaten Wonogiri dengan melakukan pengukuran terhadap kelembaban udara, temperatur, kecepatan angin, arah angin, arus dan tegangan keluaran sel surya. Pengukuran dilakukan pada pukul 07:00-17:00 WIB dengan selang waktu 20 menit.*

*Hasil pengujian PLTS didapatkan bahwa temperatur lingkungan berbanding lurus dengan arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya, temperatur lingkungan berbanding terbalik dengan kelembaban udara. Sedangkan besarnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh sel surya relatif stabil, untuk pengaruh kecepatan angin dalam pengujian ini tidak memiliki dampak terhadap kinerja sel surya. Daya listrik maksimal yang dihasilkan sel surya pukul 11:00-13:00 WIB memiliki prosentase rata-rata harian modul surya sebesar 50,94%.*

**Kata Kunci:** *PLTS, Photovoltaic, Kelembaban Udara, Kecepatan Angin*

## PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang banyak sekali memiliki pulau serta pegunungan, ada sejumlah daerah merupakan daerah terpencil yang tidak mendapat pasokan energi listrik PT PLN Persero. Untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik di daerah tersebut dapat menggunakan sumber energi alternatif tenaga surya sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

*Photovoltaic* (sel surya) merupakan piranti yang dapat mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi surya adalah sumber energi yang dapat diperbaharui (renewable energi resources) yang sangat potensial. Energi surya dapat menghasilkan daya hingga 156.486 MW, jumlah yang lebih besar jika dibandingkan dengan sumber energi terbarukan yang lainnya. Indonesia merupakan negara yang terletak dalam jalur

khatulistiwa yang sepanjang tahun mendapatkan cahaya matahari yang berlimpah.

Pemanfaatan energi surya sebagai PLTS sangat diminati dan mulai dikembangkan diseluruh pelosok negeri dengan melakukan banyak sekali penelitian serta pengujian. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan energi surya sebagai PLTS. Faktor-faktor yang mempengaruhi pengoptimalan energi surya menjadi energi listrik yaitu: pengaruh cuaca, kelembaban, temperatur, posisi sel surya serta arah angin yang terdapat pada permukaan sel surya. Apabila ada yang menutupi lapisan luar sel surya, maka cahaya yang akan diterima oleh semi konduktor akan berkurang dan akan berimbas secara langsung terhadap proses konversi energi.

Penelitian mengenai efektifitas sel surya terhadap perubahan kecepatan angin, kelembaban, temperatur dan arah angin sangat diperlukan. Hasil penelitian diharapkan didapatkannya referensi mengenai kemampuan sel surya dalam menghasilkan energi listrik.

## TINJAUAN PUSTAKA

Rotib (2007), mengemukakan bahwa pemanfaatan energi cahaya matahari pada setiap zaman semakin meningkat seiring dengan pengetahuan yang kita dapatkan. Salah satu pemanfaatan energi cahaya matahari adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang memanfaatkan energi foton cahaya matahari menjadi energi listrik. Indonesia sendiri, sebuah negara yang dilewati oleh garis khatulistiwa dan menerima panas matahari yang lebih banyak daripada negara lain, mempunyai potensi yang sangat besar untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga surya sebagai alternatif batubara dan diesel sebagai pengganti bahan bakar fosil, yang bersih, tidak berpolusi, aman dan persediaannya tidak terbatas.

Adapun prinsip kerja sel surya dijelaskan oleh Sungkar (2006), bahwa sel surya (photo-voltaic cell) bekerja dengan menangkap sinar matahari oleh sel-sel semikonduktor untuk diubah menjadi energi listrik. Sel-sel ini termuat dalam panel-panel yang ukurannya dapat disesuaikan dengan keperluannya, apakah untuk rumah

tangga, perkantoran atau pembangkit listrik sekala besar. Hal yang sama dikemukakan oleh Rhazio (2007), bahwa sel surya merupakan komponen vital yang terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi arus listrik DC.

Sementara itu Yushardi (2002), menjelaskan bahwa pada pagi hari pukul 6.00 WIB tingkat kelembaban besar yaitu 88% dan terjadi pengembunan sambil menurunkan partikel-partikel padatan akibat polusi kendaraan bermotor dan industri ke permukaan bumi, sehingga pada saat ini kondisi atmosfer mempunyai kebeningan yang tinggi dan langit biru. Fenomena tersebut mengakibatkan pada pagi hari yang cerah pukul 9.00 WIB sel surya memiliki efisiensi terbesar yaitu dengan efisiensi 10%. Pada siang hari partikel partikel padatan akibat pulusi kembali ke angkasa, dengan meningkatnya temperatur udara gerakan partikel semakin hebat, sehingga meningkatkan hamburan radiasi surya yang masuk ke bumi. Hal ini mengakibatkan difusi ratio membesar dimana jumlah radiasi difusi lebih besar radiasi langsung, dan efisiensi sel surya pada pukul 12.00 WIB adalah sebesar 9%, lebih rendah dari pada pagi hari. Pada sore hari akibat terjadi penguapan pada siang hari dan semakin meningkatnya partikel padatan polusi di udara, sehingga indeks kecerahan terendah dimana tampak banyak awan. Selain itu radiasi surya global sangat kecil, sehingga pada sore hari sekitar pukul 17.00 WIB dengan efisiensi 3%, kemampuan sel surya menurun secara drastis.

## Landasan Teori

Pudjanarsa dan Nursuhud (2006), menyatakan, dengan mengambil sifat pancaran benda hitam suhu permukaan matahari dapat dihitung menggunakan rumus radiasi Stefan Boltzman:

$$\text{Daya radiasi surya per } m^2 = \sigma \times T_m^4 \dots\dots\dots (1)$$
$$\sigma = 5,76 \times 10^{-80} W / m^2 K^4$$

$$\text{Daya radiasi surya total} = 4\pi R_m^4 \times \sigma T_m^4 \dots\dots\dots (2)$$

$$T_m = (R_{bm} / R_m)^{1/2} \times (S / \sigma) = 5527^\circ C \dots\dots\dots (3)$$

dengan,  
 $R_m$  = jari-jari matahari

$R_{bm}$  = jarak antara bumi matahari  
 $S$  = rapat radiasi matahari

Culp (1996), mengemukakan bahwa bumi bergerak mengelilingi matahari dalam suatu orbit yang berbentuk elips.

Waktu matahari rata-rata =  
 [waktu standar setempat + {derajat timur dari meridian standar  $\times$  (4menit)}] .....(6)

Waktu surya nyata = Waktu matahari rata-rata + persamaan waktu .....(7)

Sudut-sudut penting dalam perhitungan energi surya meliputi:

1. Sudut garis lintang L
2. Sudut deklinasi  $\delta$
3. Sudut jam H

Sudut-sudut diatas dapat dihitung sebagai berikut:

$$\sin \hat{a}_1 = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta$$

$$\sin \hat{a}_1 = \dots\dots\dots(8)$$

Harga  $\hat{a}_1$ ,  $\hat{a}_1$  didapatkan dari tabel posisi matahari dan jumlah pancaran. Adapun intensitas radiasi normal langsung pada suatu hari yang jernih dapat ditaksir dengan persamaan:

$$I_{DN} = Ae^{-(B/\sin \hat{a})} \dots\dots\dots(9)$$

dengan:

A = Isolasi ekstraterrestrial nyata  
 B = Koefisien kepunahan atmosfer

Arus energi surya total pada permukaan bumi dari setiap orientasi dan kemiringan dengan sudut insiden adalah:

$$I_{Te} = I_{DN} \cos \theta + I_{DS} + I_R \dots\dots\dots(10)$$

dengan:

$I_{DN} \cos \theta$  = komponen surya langsung  
 $I_{DS}$  = komponen difusi iradiasi surya

$I_R$  = radiasi gelombang pendek.

$$I_{DS} = C \times I_{DN} \times F_{SS} \dots\dots\dots(11)$$

dengan:

C = Angka perbandingan antara difusi dengan radiasi surya langsung yang jatuh pada permukaan.

$$F_{SS} = \frac{1 + \cos \beta_2}{2}$$

Energi listrik yang dihasilkan modul surya:

$$\dots\dots\dots(12)$$

$$P = V \times I \dots\dots\dots(13)$$

dengan:

f = efisiensi *photovoltaic*

A = luas modul surya

$\cos \hat{a}$  = Sudut datang matahari terhadap bidang horizontal

V = tegangan listrik

I = arus listrik

## METODE PENELITIAN

### Bahan dan Alat

Bahan pemelitan adalah cahaya matahari untuk menguji kinerja sel surya dalam mengkonversi menjadi energi listrik yang dilakukan pada:

1. Lokasi: Dukuh Ngeringin No. 17 RT 02/VII Desa Keloron Wonogiri dengan letak geografis 7,8° LS, 110,2° BT.
2. Tanggal: 7-16 Desember 2007.

Alat penelitian meliputi:

1. Modul sel surya 50 Wp tipe 50-110-210.
2. Pengukur waktu, arloji.
3. *Multimeter* Sanwa DT-830B.
4. *Amperemeter* Heles CR-52.
5. *Anemometer* AM-4203.
6. *Humidymeter*.

Tahapan percobaan dilakukan sebagai berikut:

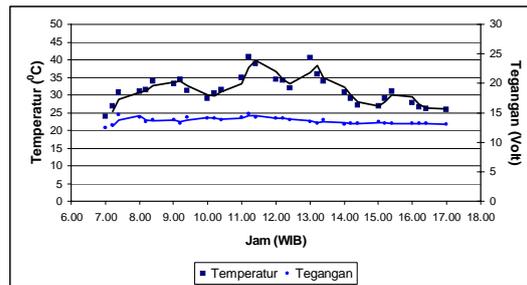
1. Pastikan semua instalasi PLTS terpasang dengan baik dan benar.
2. Pengukuran kelembaban udara
3. Pengukuran temperatur lingkungan.

- Pengukuran kecepatan angin dan arah angin.
- Pengukuran tegangan dan arus listrik keluaran dari modul surya.
- Pengukuran dilakukan dengan interval waktu 20 menit mulai pukul 07.00-07.00 WIB.

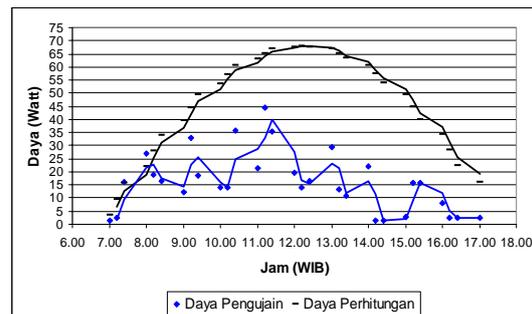
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan sepuluh kali pada kondisi cuaca yang berbeda yaitu: cuaca cerah, berawan, dan hujan. Pada pembahasan ini ditampilkan satu hasil penelitian untuk masing-masing kondisi cuaca.

#### Kondisi cerah

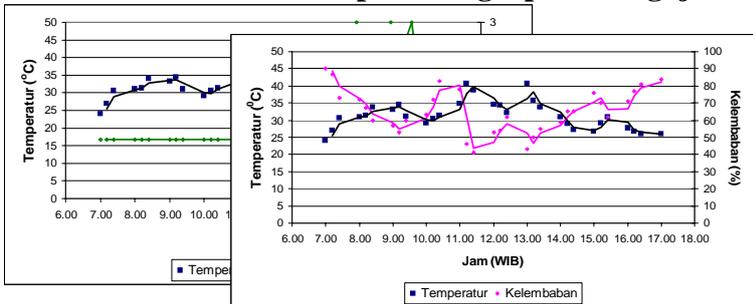


Gambar 4 Hubungan Temperatur Terhadap Tegangan Listrik pada Pengujian I

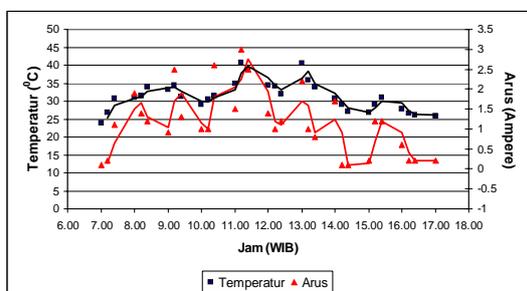


Gambar 5 Daya Hasil Pengujian dengan Daya Perhitungan Teoritis pada Pengujian I.

Gambar 1. Perubahan Temperatur dan Kecepatan Angin pada Pengujian I

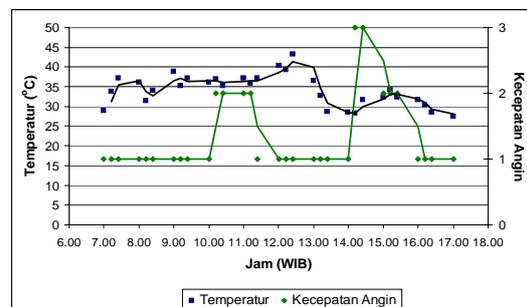


Gambar 2. Perubahan Temperatur dan Kelembaban pada Pengujian I

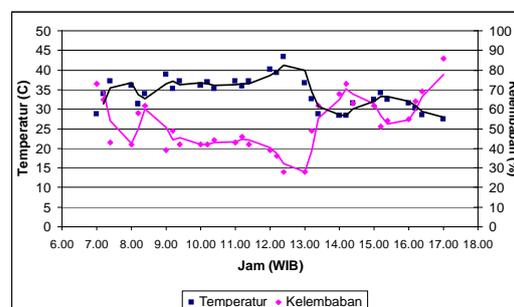


Gambar 3. Hubungan Temperatur Terhadap Arus Listrik pada Pengujian I

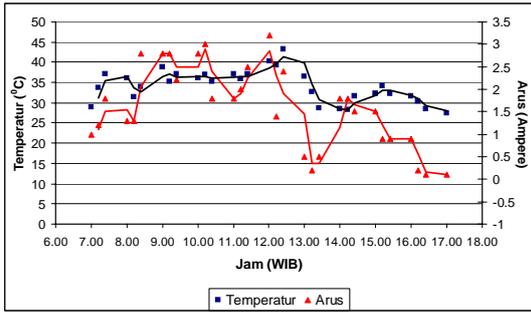
#### Kondisi mendung



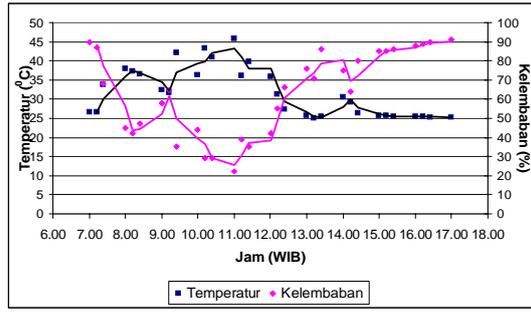
Gambar 6. Perubahan Temperatur dan Kecepatan Angin pada Pengujian III



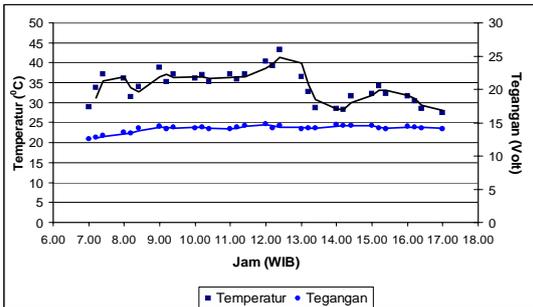
Gambar 7. Perubahan Temperatur dan Kelembaban pada Pengujian III



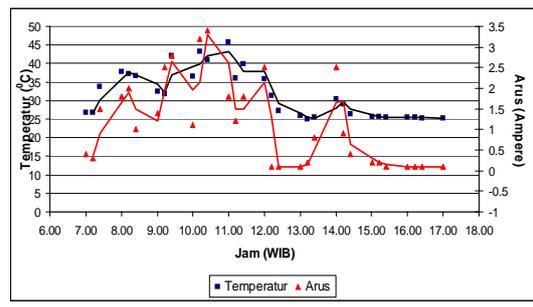
**Gambar 8. Hubungan Temperatur Terhadap Arus Listrik pada Pengujian III**



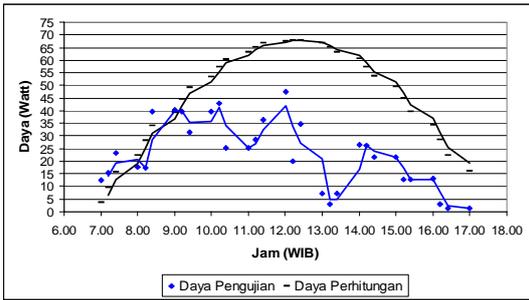
**Gambar 12 Perubahan Temperatur dan Kelembaban pada Pengujian V**



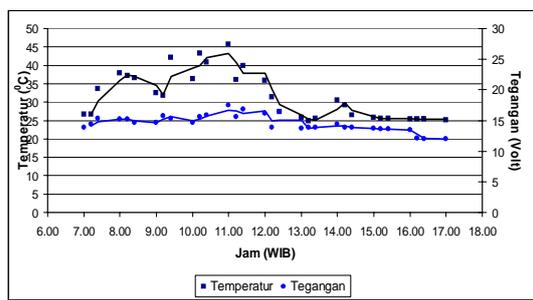
**Gambar 9 Hubungan Temperatur Terhadap Tegangan Listrik pada Pengujian III**



**Gambar 13 Hubungan Temperatur Terhadap Arus Listrik pada Pengujian V**

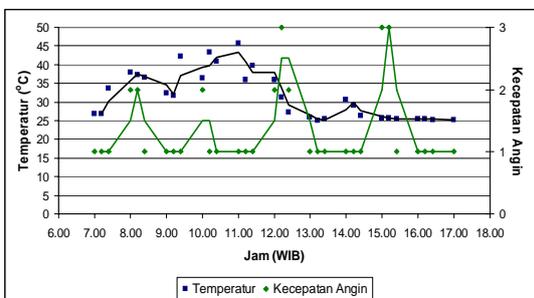


**Gambar 10 Daya Hasil Pengujian dengan Daya Perhitungan Teoritis pada Pengujian III.**

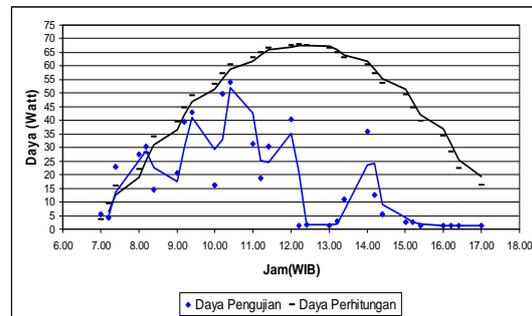


**Gambar 14 Hubungan Temperatur Terhadap Tegangan Listrik pada Pengujian V**

**Kondisi Hujan**



**Gambar 11. Perubahan Temperatur dan Kecepatan Angin pada Pengujian V**



**Gambar 15 Daya Hasil Pengujian dengan Daya Perhitungan Teoritis pada Pengujian V.**

Grafik hubungan kecepatan angin terhadap temperatur pada Gambar 1, Gambar 6, dan Gambar 11 menunjukkan bahwa pola kecepatan angin selama waktu pengujian tidak memiliki kesamaan. Adapun pola perubahan temperatur memiliki kesamaan yaitu memiliki puncak pada pukul 11.00 s.d. 13.00 WIB. Temperatur akan terus menurun setelah pukul 13.00 WIB. Fenomena ini sesuai dengan jarak antara surya dan bumi pada pukul 12.00 WIB memiliki jarak yang terpendek, sehingga energi radiasi surya yang diterima permukaan bumi besar. Hubungan kelembaban dengan temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 2, Gambar 7 dan Gambar 12 menunjukkan hubungan berbanding terbalik. Pada kondisi temperatur rendah kelembaban tinggi sedangkan pada temperatur yang tinggi akan menguapkan kelembaban udara.

Gambar 3, Gambar 8, dan Gambar 13 menunjukkan bahwa besarnya arus listrik berbanding lurus dengan temperatur lingkungan. Kondisi ini terjadi pada cuaca cerah, berawan dan hujan. Ini berarti temperatur lingkungan merupakan faktor yang mempengaruhi keluaran arus listrik modul surya. Adapun tegangan listrik keluaran modul surya tidak dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti ditunjukkan pada Gambar 4, Gambar 9, dan Gambar 14. Daya listrik yang merupakan perkalian tegangan dan arus hasil penelitian dan perhitungan teoritis menunjukkan kemampuan kinerja atau efisiensi modul surya.

## SIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan pada pembangkit listrik tenaga surya dengan posisi plat sel surya tipe 50-110-210 yang dipasang horizontal, maka dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur akan mempengaruhi kelembaban udara, semakin tinggi Temperatur udara maka kelembaban akan semakin rendah. Terlihat bahwa temperatur yang tinggi dengan kelembaban udara yang rendah akan menghasilkan arus listrik yang besar dan pada kelembaban yang tinggi pada temperatur yang rendah akan menghasilkan arus listrik yang rendah. Kecepatan angin dan arah angin tidak berpengaruh terhadap kinerja sel surya sedangkan hubungan antara kecepatan angin dan temperatur tidak berpengaruh terhadap kinerja sel surya.
2. Pada pengamatan yang dilakukan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan posisi plat *photovoltaic* yang dipasang horizontal memiliki kestabilan dalam tegangan sedangkan arus yang dihasilkan modul surya relatif berubah-ubah. Arus terbesar yang di hasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ini didapatkan pada pukul 11.00-13.00 WIB dan hubungan antara daya hasil penelitian dan daya hasil perhitungan memiliki kecenderungan yang sama dengan prosentase rata-rata adalah sebesar 50,94%. Dalam hal ini daya teoritis menggunakan asumsi langit cerah yang tidak terdapat partikel yang merefleksikan radiasi matahari serta tidak memperhitungkan jenis sel surya yang digunakan sehingga terjadi perbedaan daya yang cukup besar dan pada dasarnya daya maksimal yang dapat dihasilkan sel surya sebesar 50 Watt.

## PERSANTUNAN

Terimakasih kepada Bapak Agung Nur Muntaha, S.T. dan Saudara Amin Sholikin atas kerjasamanya dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

Culp. Jr, AW., 1991, *Prinsip-Prinsip Konversi Energi*, Erlangga, Jakarta.

Pudjanarsa, A., Nursuhud, D., 2006, *Mesin Konversi Energi*, Penerbit Andi, Yogyakarta.

- Rhazio, 2007, *Pembangkit Listrik Tenaga Surya*, Institut Sains & Teknologi, Jakarta. <http://rhazio.wordpress.com>., maret 2008
- Rotib, Widy, 2001. *Aplikasi Sel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif; Dimensi Vol 4 No. 1 Juni 2001*, Institute for Science and Technology Studies (ISTECS), Jepang. Diakses tanggal 20 september 2007 di istecs. [http://istecs.org/Publication/Dimensi/dim\\_vol4no1\\_juni2001.pdf](http://istecs.org/Publication/Dimensi/dim_vol4no1_juni2001.pdf)
- Sungkar, R., 2007, *Energi Surya*. Diakses 20 September 2007 di Griya Asri. [http://griya-asri.com/index2.php?option=com\\_content&do\\_pdf=1&id=168](http://griya-asri.com/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=168)
- Yushardi, 2002, *Pengaruh Faktor Metereologi Terhadap Pola Efisiensi Tiap Jam harian Pada Modul Sel Surya*. Diakses tanggal 01-10-2007 di tumoutou. [http://www.tumoutou.net/702\\_05123/yushardi.DOC](http://www.tumoutou.net/702_05123/yushardi.DOC)

# PEMANFAATAN PEGAS DAUN BEKAS SEBAGAI BAHAN PENGGANTI MATA POTONG (*PUNCH*) PADA ALAT BANTU PRODUKSI MASSAL (*PRESS TOOLS*)

**Fatahul Arifin**

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang  
Jalan Srijaya Negara, Palembang 30139  
Telp.(0711)353414 Fax. (0711)355918  
Email: farifinus@polisriwijaya.ac.id, fatahul\_arifin@lycos.com

**Wijianto**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan Kartasura Sukoharjo  
E-mail : wijianto@ums.ac.id

## ABSTRAK

*Pengembangan teknologi di bidang material sangatlah pesat sekarang ini, hal ini terlihat dari banyaknya penggunaan material logam khususnya di industri produksi massal dengan spesifikasi tertentu, seperti baja tahan karat, baja karbon tinggi, dan baja perkakas. Pada industri kecil seperti pembuatan ring, panci, tutup botol, komponen kompor dan lain-lain sering menggunakan material tersebut sebagai bahan untuk membuat alat bantu yang disebut dengan Press Tools. Pada press tool ini banyak digunakan baja karbon tinggi atau baja perkakas sebagai mata potong (punch), tetapi seiring mahal dan sulitnya material-material tersebut membuat para pelaku industri kecil mengalami kerugian yang besar untuk pembuatan alat bantu produksi. Untuk itu melalui penelitian ini penulis mengadakan percobaan di laboratorium terhadap bahan pegas daun bekas. Percobaan dilakukan empat tahap pengujian yaitu uji komposisi, uji tarik, uji kekerasan, dan uji struktur mikro. Pada uji komposisi material pegas daun bekas mempunyai kadar 0,6627 % Carbon (C), 0,7304%, Mangan (Mn), 0,0240% Belerang (S), 0,0257% Phosphor (P). Kekuatan tarik pegas daun bekas adalah 1332,5 kg/mm<sup>2</sup>. Kekerasan dilakukan dengan uji kekerasan Rockwell C maka hasil dari ujinya adalah 52.5 HRC. Pada uji struktur mikro terdapat unsur martensit dan austenit. Pada akhirnya hasil percobaan laboratorium dibandingkan dengan data yang ada pada literatur maka material pegas daun bekas ini dapat digunakan untuk bahan pengganti mata potong pada alat bantu produksi massal.*

**Kata Kunci:** *Pegas daun bekas, Mata potong, Press Tools*

## PENDAHULUAN

Sekarang ini banyak industri yang bergerak di bidang produksi massal menggunakan material logam yang berasal dari baja dengan spesifikasi tertentu seperti baja perkakas, baja tahan karat, dan baja karbon tinggi. Untuk pemilihan material

itu dapat dilakukan dengan melihat dari sifat-sifat yang dimiliki oleh material tersebut, seperti keunggulan operasional. Oleh karena itu perlu suatu pengembangan material sebagai cara menentukan apakah struktur dan sifat-sifat material optimum agar dapat tercapai daya tahan maksimum.

Pada industri kecil seperti pembuatan ring, panci, tutup botol, komponen kompor, dan lain-lain banyak menggunakan alat bantu produksi yang disebut *press tools*. Pada alat bantu produksi ini terdapat dua bagian penting yaitu mata potong (*punch*) dan landasan (*die*). Baja perkakas dan baja karbon tinggi adalah bahan yang banyak dipakai untuk pembuatan punch. Ditinjau dari segi kualitas memang baja perkakas dan baja karbon tinggi sangat baik dipakai untuk pembuatan punch. tetapi harganya sangatlah mahal dan sulit didapat di pasaran. Oleh karena itu, para pelaku bisnis mencari bahan pengganti dengan biaya yang murah dan mempunyai sifat-sifat yang hampir sama dengan baja perkakas.

Salah satu hal yang terpenting untuk pemilihan bahan pengganti ini adalah dengan meninjau dari struktur dan sifat-sifat material yang optimum supaya daya tahan keausan dan dapat diaplikasikan untuk berbagai kondisi operasional, untuk itu penulis memilih dan melakukan pengujian bahan pegas daun bekas sebagai bahan pengganti alat potong, dikarenakan bahan ini murah harganya, mudah didapat dan tak kalah pentingnya adalah pemanfaatan kembali bahan yang sudah tidak bermanfaat menjadi bahan yang bernilai ekonomis yang tinggi.

Pengujian bahan pegas daun bekas ini dilakukan untuk mengetahui apakah bahan pegas daun ini layak untuk menjadi bahan pengganti baja perkakas pada alat bantu produksi massal baik itu ditinjau dari struktur mikro, maupun dari sifat mekanis bahan pegas daun bekas ini.

Adapun tujuan yang diharapkan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi di setiap siklus perlakuan pada bahan pegas daun bekas dan mengetahui sifat mekanis dari bahan ini serta melakukan perbandingan guna memutuskan bahwa bahan pegas daun bekas ini memang layak untuk dijadikan bahan pengganti baja perkakas.

Dalam kaitannya dengan pengujian ini ada beberapa hal yang dapat menjadi rumusan masalah yaitu Apakah pegas daun bekas ini layak sebagai bahan alternatif pengganti alat potong pada alat bantu produksi massal atau tidak, untuk itu perlu dilakukan uji komposisi, uji tarik, uji

kekerasan untuk mengetahui bahan pegas daun termasuk dalam jenis baja yang mana.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan acuan dalam pemilihan material pengganti baja perkakas dengan biaya yang murah dan mempunyai spesifikasi dan kualitas yang hampir sama dengan bahan standard, sehingga dapat membantu dunia industri kecil tanpa mempengaruhi kualitas dan kuantitas produk.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Pengertian Press Tool

*Press Tool* adalah peralatan yang mempunyai prinsip kerja penekanan dengan melakukan pemotongan dan pembentukan. Peralatan ini digunakan untuk membuat produk secara massal dengan produk keluaran yang sama dalam waktu yang relatif singkat.

### Klasifikasi Press Tool

*Press Tool* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam menurut proses pengerjaan yang dilakukan pada landasan, yaitu: *simple tool*, *compound tool* dan *progressive tool*.

#### A. Simple Tool

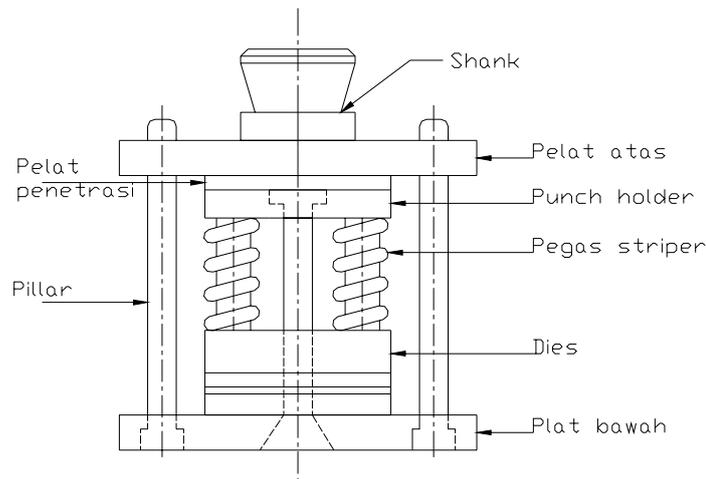
*Simple Tool* adalah jenis dari *press tool* yang paling sederhana, dimana hanya terjadi satu proses pengerjaan dan satu *station* dalam satu alat. Pemakaian jenis *simple tool* ini mempunyai keuntungan dan kerugian.

Keuntungan *simple tool*:

1. Dapat melakukan proses pengerjaan tertentu dalam waktu yang singkat, karena konstruksinya sederhana.
2. Harga alat relatif murah.

Kerugian *simple tool*:

1. Hanya mampu melakukan proses-proses pengerjaan untuk produk yang sederhana sehingga untuk jenis pengerjaan yang rumit tidak dapat dilakukan oleh jenis *press tool* ini.
2. Proses pengerjaan yang dapat dilakukan hanya satu jenis saja.



**Gambar 1. Simple Tool**

**Gambar 2. Compound Tool**

### **B. Compound tool**

Pada *press tool* jenis ini, dalam satu penekanan pada satu *station* terdapat lebih dari satu pengerjaan, dimana proses pengerjaannya dilakukan secara serentak. Pemakaian jenis *compound tool* ini juga mempunyai keuntungan dan kerugian.

Keuntungan *compound tool*

1. Dapat melakukan beberapa proses pengerjaan dalam waktu yang bersamaan pada *station* yang sama.
2. Kerataan dan kepresisian dapat dicapai.
3. Hasil produksi yang dicapai mempunyai ukuran yang lebih teliti.

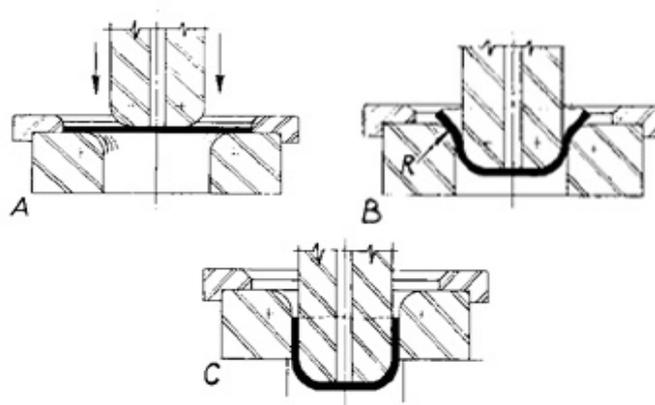
Kerugian *compound tool*:

1. Konstruksi landasan menjadi lebih rumit.
2. Terlalu sulit untuk mengerjakan material yang tebal.
3. Dengan beberapa proses pengerjaan dalam satu *station* menyebabkan perkakas cepat rusak.

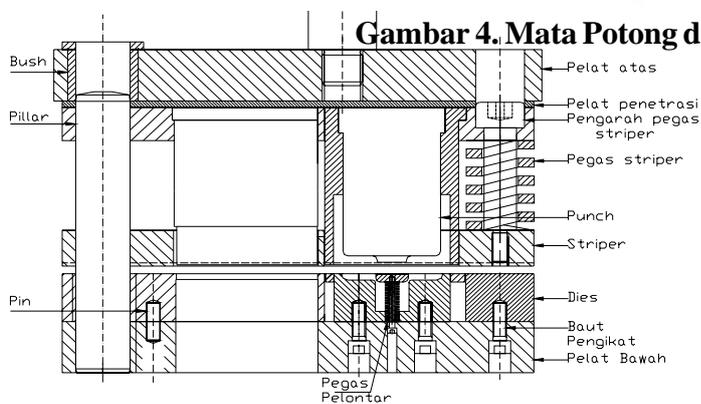
### **C. Progressive Tool**

*Progressive Tool* merupakan peralatan tekan yang menggabungkan sejumlah operasi pemotongan atau pembentukkan lembaran logam pada dua atau lebih *station* kerja, selama setiap langkah kerja membentuk suatu produk jadi.

**Gambar 3. Progressive Tool**



**Gambar 4. Mata Potong dan Landasan**



1. Ukuran alat lebih besar bila dibandingkan *simple tool* dan *compound tool*.
2. Biaya perawatan besar.
3. Harga relatif lebih mahal karena bentuknya rumit

Semua proses yang terjadi pada *Press Tool* melibatkan dua komponen penting yaitu: mata potong dan landasan.

Mata potong merupakan bagian yang bergerak ke bawah untuk meneruskan gaya dari tenaga sehingga material produk tertekan dan membentuk mata potong disesuaikan dengan bentuk akhir yang diinginkan dari proses produksi. Posisi dari mata potongnya tidak selalu di atas tergantung dari

jenis landasan yang digunakan. Bahan mata potong harus cukup keras, juga memiliki keuletan dan ketahanan terhadap pengaruh gesekan saat pembentukan, dan bahan yang biasa digunakan seperti amutit.

Landasan merupakan komponen utama yang berperan dalam menentukan bentuk akhir dari benda kerja, bentuk dan ukurannya bervariasi sesuai dengan bentuk akhir yang diinginkan,

kontruksi landasan harus mampu menahan gerakan, gaya geser serta gaya mata potong. Pada landasan terdapat radius tertentu yang berfungsi mempermudah reduksi benda saat proses berlangsung, lebih jauh lagi dengan adanya jari-jari diharapkan tidak terjadi sobek pada material produk yang akan dibentuk.

### Jenis Baja Karbon

Menurut komposisi kimianya baja karbon dapat klasifikasikan menjadi tiga yaitu; Baja karbon rendah dengan kadar karbon 0,05 % - 0,30% C, sifatnya mudah ditempa dan mudah di kerjakan pada proses permesinan. Penggunaannya untuk komposisi 0,05 % - 0,20 % C biasanya untuk bodi mobil, bangunan, pipa, rantai, paku keeling, sekrup, paku dan komposisi karbon 0,20 % - 0,30 % C digunakan untuk roda gigi, poros, baut, jembatan, bangunan.

Baja karbon menengah dengan kadar karbon 0,30 % - 0,60 %, kekuatannya lebih tinggi dari pada baja karbon rendah. Sifatnya sulit untuk dibengkokkan, dilas, dipotong. Penggunaan untuk kadar karbon 0,30 % - 0,40 % untuk batang penghubung pada bagian automotif. Untuk kadar karbon 0,40 % - 0,50 % digunakan untuk rangka mobil, *crankshafts*, *rails*, ketel dan obeng. Untuk kadar karbon 0,50 % - 0,60 % digunakan untuk palu dan eretan pada mesin.

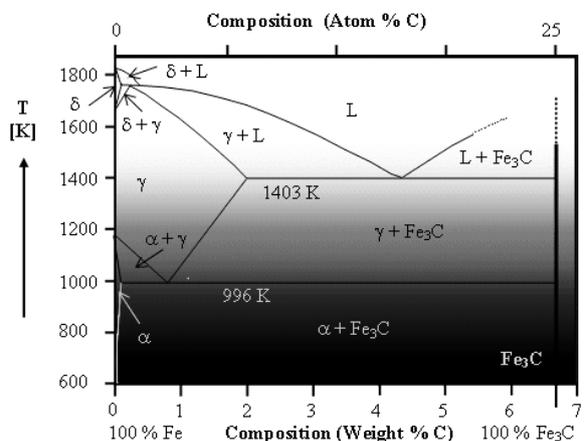
Baja karbon tinggi baja ini untuk pembuatan baja perkakas. Sifatnya sulit dibengkokkan, dilas dan dipotong. Kandungan 0,60 % - 1,50 % C, kegunaan untuk pembuatan obeng, palu tempa, meja pisau, rahang ragum, mata bor, alat potong, mata gergaji.

Baja paduan yang diklasifikasikan menurut kadar karbonnya dibagi menjadi: baja paduan rendah jika elemen paduannya  $d' < 2,5$  %, baja paduan sedang jika elemen paduannya 2,5 – 10 %, baja paduan tinggi jika elemen paduannya  $> 10$  % .Selain itu baja paduan dibagi menjadi dua golongan yaitu baja paduan khusus dan *high speed steel (HSS)*. Baja Paduan Khusus yaitu baja jenis ini mengandung satu atau lebih logam-logam seperti *nickel*, *chromium*, *manganes*, *molybdenum*, *tungsten* dan *vanadium*. Dengan menambahkan logam tersebut ke dalam baja maka baja

paduan tersebut akan merubah sifat-sifat mekanik dan kimianya seperti menjadi lebih keras, kuat dan ulet bila dibandingkan terhadap baja karbon.

HSS (*Self Hardening Steel*) yaitu baja yang kandungan karbon 0,70 % - 1,50 %. kegunaan baja ini untuk membuat alat-alat potong seperti mata bor, pahat bubut, dan pahat milling. Disebut HSS karena alat potong yang dibuat dengan material tersebut dapat dioperasikan dua kali lebih cepat dibanding dengan baja karbon. Sedangkan harga dari HSS besarnya dua sampai empat kali daripada karbon.

Baja Perkakas (*Tool Steel*), dan sifat-sifat yang harus dimiliki oleh baja perkakas adalah tahan pakai, tajam atau mudah diasah, tahan panas, kuat dan ulet.



Keterangan :  $\delta$  = ferit , struktur bcc  
 $\gamma$  = austenit, struktur fcc  
 $\alpha$  = ferit  $\alpha$ , struktur bcc  
 $Fe_3C$  = Sementit

**Gambar 5. Diagram Fase Fe-Fe<sub>3</sub>C (Structure Micro.Co.Id, 2007)**

### METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah pegas daun bekas yang ditemui dipasaran yaitu pasar barang bekas di Palembang. Untuk mengetahui komposisi dari pegas daun bekas dilakukan uji komposisi dan dicarikan literature yang sama yang menerangkan tentang jenis material yang mirip dengan pegas daun bekas.

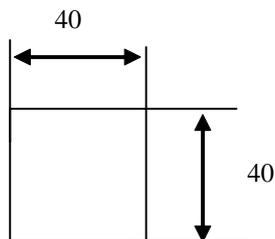
### Alat dan bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Sample pegas daun bekas yang ada di pasaran
- X-Ray Spectograf (alat uji komposisi)
- WP 310 Universal-Werkstoff-Prufgerat 50 kN (alat uji tarik)
- Universal Hardness Tester (Alat uji kekerasan)
- Mikroskop uji struktur mikro material logam
- Alat pengamplas dan polishing
- Bahan kimia yang digunakan DP-Spray dan larutan etsa (Oxalid acid)

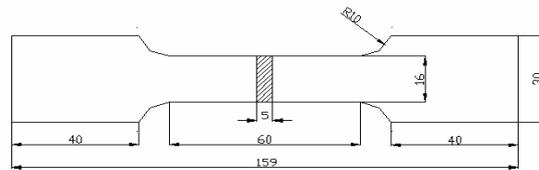
### Persiapan Benda Uji

- a. Persiapan benda uji untuk uji komposisi  
Uji komposisi dilakukan pada pegas daun bekas, yaitu dengan jalan memotong material yang dibeli di pasaran dengan ukuran panjang 40 mm dan lebar 40 mm seperti pada gambar 6. Kemudian di haluskan bagian yang diuji.



Gambar 6. Benda Uji untuk Uji Komposisi

- b. Persiapan benda uji untuk uji tarik material seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Benda Uji untuk Uji Tarik

- c. Persiapan benda uji untuk uji kekerasan  
Benda uji kekerasan diambil dari material langsung dari bahan uji.
- d. Persiapan benda uji untuk uji struktur mikro  
Dalam pembuatan material uji struktur mikro ini hendaknya material dipotong dengan memperhatikan temperatur agar struktur mikro di dalam benda uji tidak berubah pada saat dilakukan pemotongan. Setelah itu benda uji di celupkan ke dalam larutan etsa yang telah disiapkan.

### DATA DAN ANALISA PENELITIAN

#### A. Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat dalam benda/material uji. Dalam pengujian ini alat yang digunakan adalah Thermo ARL (*Applied Research Laboratories*) Type-3560 Des. Hasil yang diperoleh dari pengujian material dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi.

No.	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Fe
1.	0,6650	0,7352	0,0253	0,0242	0,0964	0,0399	0,0014	97.3947
2.	0,6603	0,7255	0,0262	0,0238	0,0965	0,0404	0,0012	97.4202
<b>Jumlah</b>	1,3253	1,4607	0,0515	0,0480	0,1929	0,0813	0,0026	194.815
<b>Rata-rata</b>	0,6657	0,7304	0,0257	0,0240	0,0964	0,0401	0,0013	97.4075

Berdasarkan pengujian pada tabel 1, komposisi bahan bekas pegas daun yang telah diuji jika dibandingkan dengan standar yang ada,

termasuk kedalam jenis Baja AISI 1064 menurut standar Amerika (ASTM) yaitu baja karbon tinggi.

## B. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan sebanyak 2 kali benda uji yang hasil percobaan terlihat seperti pada Tabel 3.

**Tabel 3. Hasil Pengujian Tarik**

	Specimen		
	1	2	Rata-Rata
Kekuatan Tarik (N/mm <sup>2</sup> )	1307,86	1357,14	1332,5

## C. Pengujian Kekerasan

Dalam pengujian ini menggunakan satu spesimen uji, pengujian dilakukan pada 5 titik. Pengujian kekerasan ini menggunakan pengujian Rockwell C.

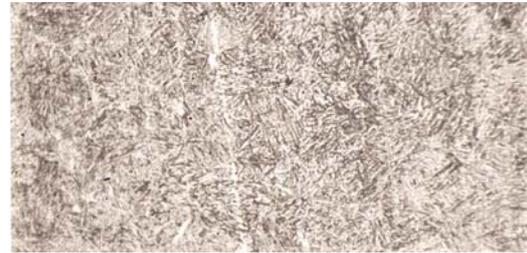
**Tabel 4. Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell C**

No	Tingkat Kekerasan (kg / mm <sup>2</sup> )	Indentor	Waktu (s)	Beban (kg)
1	48.5	Kerucut intan	15	100
2	55.5	Kerucut intan	15	100
3	56.5	Kerucut intan	15	100
4	54.5	Kerucut intan	15	100

Dari tabel 4 maka dapat ditentukan bahwa tingkat kekerasan material berdasarkan pengujian Rockwell berkisar antara 48,5–56,5 HRC.

## D. Pengujian *Metallography*

Pengujian ini dilakukan untuk melihat struktur mikro pada logam pegas daun bekas.



**Gambar 8. Struktur Mikro Material Pegas Daun Bekas dengan Pembesaran 400X**

Pada gambar 8 terlihat jelas adanya unsur martensit dan autenit yang membuat pegas daun bekas ini keras dan tangguh.

## KESIMPULAN

Dari penjelasan diatas maka dapat disimpulkan bahwa material pegas daun bekas yang didapat di pasaran ini mempunyai komposisi 0,6627 % Carbon (C), 0,7304% Manganese (Mn), 0,0240% Belerang (S), 0,0257% Phosphor (P), dan baja ini merupakan baja karbon tinggi bila menurut ASTM adalah AISI 1064 dengan kekuatan tarik 1332,5 N/mm<sup>2</sup>. Dari pengujian kekerasan didapat bahwa material ini mempunyai tingkat kekerasan Rockwell 48,5 – 56.5 HRC. Setelah dilihat dari struktur mikro pada bahan bekas pegas daun ini mengandung martensit dan austenit. Dan bila dilihat dari semua data diatas maka bahan bekas pegas daun ini dapat direkomendasikan sebagai material pengganti mata potong.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alok Nayer. 2002. *The Steel Handbook*. Mc Graw-Hill, New York
- Budiarto, SST. 2001. *Press Tool 3*. Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung.
- Budinski K. G. and Budinski M. K., 1999. *Engineering Material Properties and Selection*, 6<sup>th</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey
- Callister, William D. 2003. *Materials Science and Engineering an Introduction*. Sixth Edition. Singapore: John Wiley & Son, Inc.

Lukens, Robert.P, 1982. *Annual Book Of ASTM Standar Metallography II*. USA

....., Standard AISI.

....., Standard ASSAB.

[www.efunda.com](http://www.efunda.com) diakses 15 Juli 2007

[www.strukturmikro.co.id](http://www.strukturmikro.co.id) diakses 1 Juli 2007

[www.stainless steel.com](http://www.stainless steel.com) diakses 16 Juni 2007

# STUDI PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* DENGAN ELEKTRODA TEMBAGA

**Patna Partono, Tri Widodo Besar Riyadi**

Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani PO BOX 1 Pabelan Surakarta 57102

## ABSTRAK

*Electrical Discharge Machining (EDM) dewasa ini makin banyak digunakan di industri manufaktur khususnya untuk menangani permesinan material yang sangat keras dan tidak dapat dilakukan dengan metode permesinan tradisional. Dalam proses EDM, pahat elektroda akan mengikis material benda kerja sesuai dengan bentuk pahatnya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel arus terhadap laju pengikisan material (material removal rate), diameter pemotongan, keausan elektroda, dan kekasaran permukaan. Penelitian dilakukan menggunakan elektroda tembaga dan benda kerja baja ST-37.*

*Hasil penelitian menunjukkan bahwa besar arus yang digunakan sangat mempengaruhi kualitas permukaan hasil proses EDM. Dengan naiknya arus maka akan seiring dengan bertambahnya laju pemakanan material benda kerja, dimensi celah antara elektroda dan benda kerja, keausan elektroda dan kekasaran permukaan benda kerja.*

**Kata-kata kunci:** EDM, arus, tembaga

## PENDAHULUAN

Teknologi EDM dewasa ini makin banyak digunakan di industri manufaktur untuk proses permesinan material yang sangat kuat dan keras seperti *tool steel* dan *advance material* (super alloys, keramik, dan komposit matrik) dengan menghasilkan produk yang mempunyai kepresisian yang tinggi, bentuk yang rumit, dan kualitas permukaan yang baik.

EDM merupakan proses permesinan, dimana pahatnya yang berupa elektroda akan mengikis material benda kerja sesuai dengan bentuk pahatnya (D.F. Dauw, et al., 1990). Proses EDM dilakukan dengan sebuah sistem yang mempunyai dua komponen pokok yaitu mesin dan power supply. Mesin mengendalikan pahat elektroda yang bergerak maju mengikis material benda kerja dan menghasilkan serangkaian loncatan bunga api listrik yang berfrekuensi

tinggi (*spark*). Loncatan bunga dihasilkan dari pembangkit *pulse* antara elektroda dan material benda kerja, yang keduanya dicelupkan dalam cairan dielektrik, akan menimbulkan pengikisan material dari material benda kerja dengan erosi panas atau penguapan (D.Brink, www.edmtt.com).

Dalam proses permesinan dengan EDM, pelelehan dan penguapan material benda kerja mendominasi proses pengikisan material, dan meninggalkan *crater* yang tipis pada permukaan benda kerja. Dalam EDM tidak ada proses kontak dan gaya pemotongan antara pahat dan material benda kerja. Hal ini mengakibatkan tidak adanya tegangan mekanis, *chatter*, dan problem getaran seperti yang pasti terjadi pada proses permesinan tradisional.

Kekurangan pada proses dengan EDM adalah bahwa laju pengikisan material benda

kerja atau *material removal rate* (MRR) pada operasi EDM lebih lambat dibandingkan metode permesinan tradisional yang menghasilkan *chips* secara mekanis. Dalam EDM, laju pengikisan material sangat tergantung dari faktor-faktor seperti besarnya arus *pulse* di setiap muatan, frekuensi muatan, material elektrode, material benda kerja dan kondisi flushing dielektrik. Akurasi dimensi pemotongan menjadi hal yang sangat penting pada aplikasi *aerospace*, dan juga pada industri manufaktur pada pembuatan *mold & die*, dan pengecoran *dies*. Karena EDM tidak menimbulkan tegangan mekanik selama proses maka akan menguntungkan pada manufaktur benda kerja dengan bentuk yang rumit (C.H. Kahng, K.P. Rajurkar, 1977).

Kerusakan elektroda yang berupa pengikisan dapat terjadi selama proses operasi EDM ketika elektroda (sebagai *tool/pahat*) ter-erosi sebagai akibat loncatan bunga api. Dengan makin tingginya frekuensi bunga api maka laju erosi akan makin meningkat yang pada akhirnya akan menghasilkan laju pengikisan material benda kerja yang lebih tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variabel arus listrik terhadap kualitas permukaan hasil permesinan, yaitu laju pengikisan material (*material removal rate*), diameter pemotongan, keausan elektroda, dan kekasaran permukaan.

## TINJAUAN PUSTAKA

Penelesuran terhadap penelitian yang pernah dilakukan di bidang EDM telah mengungkapkan bahwa beberapa penelitian telah dilakukan pada beberapa aspek di bidang EDM pada baja karbon dengan sedikit variasi pada material pahat. Soni dan chakraverti (1985, 1990, 1991) telah melakukan penelitian pada *electrical discharge machining* pada *chromium die steel* untuk mengamati pengaruh mekanis pada permukaan yang dimesin dengan muatan listrik, laju pemindahan material, laju keausan pahat, dan juga mempelajari pengaruh sifat elektroda pada kualitas permukaan. George dan Venkatesh (1980) meneliti kondisi permesinan yang optimum pada *5 Cr die steel*. Sementara itu *cemented carbide* merupakan material yang sangat

banyak diperlukan di pasaran sebagai *insert* pada pahat, tetapi material ini sangat sulit dimesin dan sulit dibentuk. Akan tetapi dengan proses EDM penanganan terhadap material ini dapat dengan mudah dilakukan. Pandey dan Jillani (1987) juga mempelajari karakteristik material *cemented carbide*. Raman dkk (1997) melakukan perbaikan pada karakteristik permesinan grade GT-20 dari *cemented carbide* dengan EDM, dengan menggunakan elektroda tembaga dan campuran tembaga-tungsten.

Arthur dkk (1996) menyimpulkan bahwa EDM telah memungkinkan *tool steel* di-*heat treatment* sampai mencapai kekerasan maksimal sebelum EDM, sehingga dapat menghindari permasalahan variasi dimensi yang sering terjadi setelah proses perlakuan panas. Jeswani (1978) membuat analisis terhadap karakteristik mekanis dari bunga api pada permukaan yang dimesin terhadap laju pengikisan material benda kerja, keausan elektroda, dan kualitas permukaan.

Untuk mengetahui kecepatan pemakanan material atau *Material Removal Rate* (MRR), maka perhitungan dilakukan dengan rumus berikut:

$$MRR = \frac{Volume(mm^3)}{Waktu(min)} \dots\dots\dots[1]$$

Dengan:

Volume = panjang x lebar x tinggi

Waktu = Waktu proses EDM (min)

Untuk mengetahui keausan pahat, maka penelitian dilakukan dengan mengukur massa elektroda yang hilang selama proses, yang merupakan selisih massa sebelum dan setelah digunakan. Perhitungan dilakukan dengan rumus berikut:

$$M_{aus} = \frac{\Delta M}{T} = \frac{M_1 - M_2}{T} \dots\dots\dots[2]$$

Keterangan:

$M_1$  = Massa elektroda sebelum proses

$M_2$  = Massa elektroda setelah proses

“M” = Massa elektroda yang hilang selama proses

T = Waktu selama proses EDM (min)

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan mesin EDM yang terdapat di lab jurusan Teknik Mesin UMS, merk Chamer tType 75 MH (MP) buatan Taiwan seperti terlihat pada gambar 1. Elektroda yang digunakan adalah tembaga yang dimesin dengan ukuran panjang 50 mm dan lebar 15 mm dan tebal 10 mm. Elektroda dihaluskan permukaannya dulu dan ditimbang agar dapat diketahui keausan yang terjadi setelah proses permesinan. Gambar 2 adalah material elektroda sebelum digunakan untuk proses EDM. Benda kerja yang digunakan adalah baja ST-37 dengan pertimbangan ketersediaan.



**Gambar 1. Mesin EDM**



**Gambar 2. Elektroda sebelum proses**

Sebelum proses permesinan dimulai, terlebih dahulu harus dicek keadaan mesin yang dipakai baik kondisi power supply, instalasi filter, generator, dan cairan dielektrikum yang digunakan. Jika keadaan filter kurang baik sebaiknya dibersihkan terlebih dahulu atau

diganti saja karena peranan filter sangat vital didalam penyediaan dielektrikum selama proses berlangsung.

Benda kerja yang telah dipersiapkan kemudian dicekam pada baut pengikat yang ada pada meja mesin yang berfungsi sebagai pendukung jalannya proses permesinan. Setelah benda kerja tercekam pada baut pengikat dengan kencang, maka langkah selanjutnya yaitu memasang elektroda pada pencekam elektroda pada mesin EDM, dan selanjutnya melakukan penyetingan posisi agar supaya elektroda dan benda kerja lurus atau center. Setelah mendapatkan posisi antara benda kerja dan elektroda yang sesuai maka langkah selanjutnya adalah mengatur laju kedalaman mesin dengan kedalaman 5 mm pada pembacaan jarum skala milimeter.

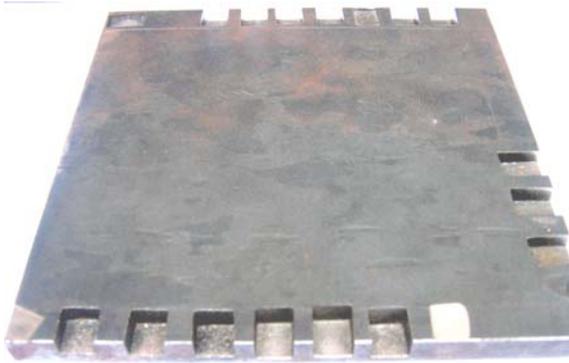
Setelah penyetingan awal selesai maka hal yang harus dilakukan untuk langkah berikutnya yaitu menetapkan besarnya pulse on dan off time, dimana dalam penelitian ini besarnya pulse on dan off time adalah konstan. Langkah berikutnya adalah menentukan besarnya arus pemakaian, penyetelan besarnya naik turunnya elektroda, penyetelan besar kecilnya motor servo yang berhubungan dengan kekuatan jalannya permesinan, pengaturan cairan dielektrikum. Pada penelitian ini, ada 5 variasi arus yang digunakan yaitu 26.5A, 25A, 18A, 12.5A, dan 6A.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini adalah data hasil penelitian terhadap proses EDM yang menggunakan material elektroda tembaga, benda kerja ST-37, dengan memvariasikan besarnya arus listrik yang digunakan.

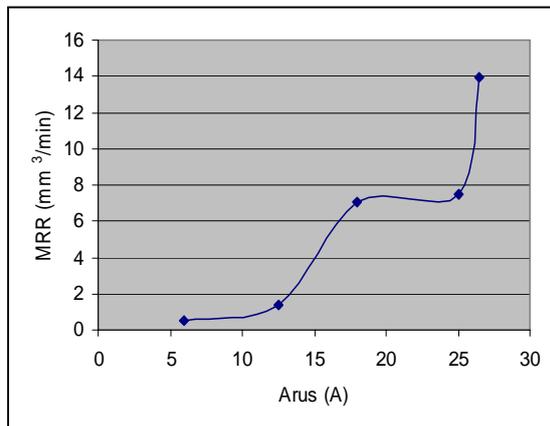
### a). Hubungan Arus terhadap Laju Pemakanan Material Benda Kerja

Untuk mengetahui pengaruh perubahan arus terhadap kecepatan pemakanan proses permesinan EDM, maka penelitian dilakukan dengan mengukur volume spesimen benda kerja hasil proses permesinan EDM. Gambar berikut menunjukkan material benda kerja (ST-37) setelah mengalami proses EDM.



**Gambar 3. Material benda kerja setelah proses**

Gambar 4 berikut adalah grafik hasil perhitungan *material removal rate* berdasarkan hasil penelitian.



**Gambar 4. Hubungan perubahan arus terhadap laju pemakanan material**

Gambar 4 menunjukkan hasil penelitian hubungan perubahan arus terhadap laju pemakanan material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara umum dengan bertambahnya arus maka laju pemakanan material akan semakin besar. Bertambahnya laju pengikisan material dengan adanya kenaikan arus adalah merupakan fakta dimana energi dari loncatan bunga api listrik yang makin besar sehingga akan menyebabkan bertambahnya aksi pelelehan dan penguapan material, dan akhirnya juga menyebabkan gaya dorong yang makin besar pada celah antara material dan elektroda.

b). Hubungan Arus terhadap Dimensi Celah Pemotongan

Dari data hasil penelitian maka dapat dibuat grafik dimensi celah terhadap perubahan arus pada elektroda tembaga. Untuk dimensi celah yang akan dibandingkan hanya dimensi celah lebar (mm) saja.

**Gambar 5. Hubungan perubahan arus terhadap dimensi celah antara benda kerja dan elektroda**

Dapat dilihat gambar 5 di atas bahwa terdapat nilai celah dimensi lebar (mm) yang cukup besar. Semakin besar arus maka akan menghasilkan celah yang cukup besar pula. Timbulnya celah yang kecil disebabkan karena pada arus rendah akan menghasilkan erosi yang kecil pula. Energi dari loncatan bunga api listrik pada arus yang rendah akan menghasilkan *crater* yang terbentuk pada benda kerja juga sedikit sehingga juga akan menghasilkan dimensi yang lebih akurat. Celah akan bertambah besar seiring dengan bertambahnya arus tetapi hanya sampai batas tertentu. Jadi besarnya celah tergantung dari besarnya tegangan antara benda kerja dan elektroda. Celah yang baik adalah celah yang kecil dan konsisten sehingga akan menghasilkan dimensi benda dengan ukuran yang akurat.

c). Hubungan Arus terhadap keausan elektroda

Untuk mengetahui keausan pahat, maka penelitian dilakukan dengan mengukur massa elektroda yang hilang selama proses, yang

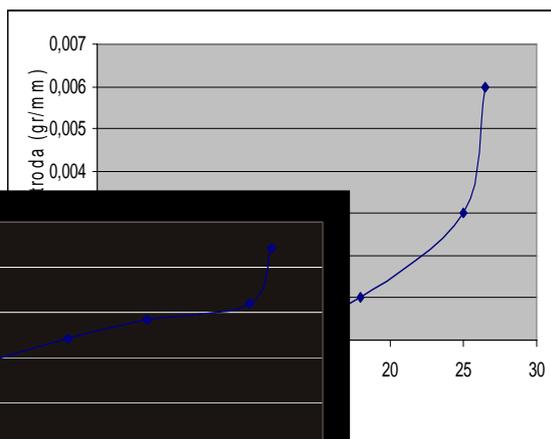
merupakan selisih massa sebelum dan setelah digunakan. Gambar 6 menunjukkan material elektroda yang telah mengalami pengikisan setelah digunakan pada proses permesinan.

tinggi akan mempunyai keausan yang lebih kecil. Keausan pada elektroda terutama disebabkan karena energi dari elektron, pengaruh panas, getaran mekanik yang dihasilkan oleh partikel-partikel logam dan ketidak-sempurnaan struktur mikro dari material elektroda.

d). Hubungan perubahan Arus terhadap kekasaran permukaan (*surface roughness*)

Pengukuran kekasaran permukaan benda kerja hasil proses permesinan EDM dilakukan dengan alat *Surfcorder SE 1700*. Data hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 5.6 berikut ini.

**Gambar 6. Material elektroda yang aus**



**rubahan arus elektroda**

hubungan pengaruh arus terhadap keausan elektroda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa makin tinggi arus maka keausan elektroda juga akan makin meningkat, tetapi dengan elektroda tembaga dapat dikatakan mempunyai keausan yang cukup kecil. Pada proses EDM elektron sebagai ion negatif akan menyerang/menabrak permukaan elektroda dan menimbulkan energi yang cukup besar pada permukaan elektroda, sehingga material elektroda yang mempunyai titik leleh

**Gambar 8. Grafik hubungan perubahan Arus terhadap kekasaran permukaan**

Gambar 8 menunjukkan hubungan pengaruh arus terhadap kekasaran permukaan. Dengan naiknya arus maka akan menghasilkan kekasaran permukaan yang besar pula. Tetapi dapat dilihat bahwa nilai kekasaran permukaan benda kerja cukup rendah jika dibandingkan dengan kenaikan arus. Hal ini menunjukkan bahwa proses EDM dapat dikatakan bisa menghasilkan kualitas permukaan yang baik. Kekasaran yang tinggi disebabkan karena pengikisan material yang menyebabkan besarnya *crater* yang terjadi. Kekasaran permukaan yang rendah terjadi pada arus yang rendah. Proses permesinan EDM ditandai dengan melelehnya kembali partikel pada permukaan, perubahan struktur mikro, terjadinya tegangan sisa, *microcrack*, dan pengumpulan kandungan karbon. Lama pulse ON dapat

digunakan untuk memperbaiki ketebalan permukaan benda kerja, tetapi masalah ini belum diteliti.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian maka dapat diperoleh keterangan bahwa dengan proses permesinan EDM, perubahan arus akan mempengaruhi proses EDM, dimana dengan bertambahnya arus akan menyebabkan kenaikan laju pemakanan material atau bertambahnya ukuran *crater*, peningkatan dimensi celah pemotongan, bertambahnya keausan material elektroda dan keka-

saran permukaan (*surface finish*). Untuk menghasilkan kualitas permukaan yang baik dan dengan proses permesinan yang cepat maka terdapat tantangan untuk menentukan besar nilai arus yang optimum yang sesuai dengan kebutuhan.

## PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih atas terselesainya penelitian ini kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM), Jurusan Teknik Mesin, dan Laboratorium Manufaktur/Produksi Universitas Muhammadiyah Surakarta

## DAFTAR PUSTAKA

- Dauw D.F., et al., 1990, Surface topography investigations by fractal analysis of spark eroded electrically conductive ceramics, *Ann. CIRP* 39 (1) 161–165.
- Brink D., EDM: Principles of Operation, EDM Technology Transfer. <http://www.edmtt.com>, diakses tahun 2007.
- Kahng C.H., Rajurkar K.P., 1977, Surface characteristics behavior due to rough and fine cutting by EDM, *Ann. CIRP* 26 (1) 77.
- Soni J.S., Chakraverti G., 1985, Effect of electrode material properties on surface roughness and dimensional accuracy in electro-discharge machining of high carbon high chromium die steel, *J. Inst. Eng. (India)*–PR 76, 46–51.
- Soni J.S., Chakraverti G., 1990, Physico-mechanical effect on electrodischarge machined surface of high carbon high chromium die steel, *J. Inst. Eng. (India)* 71 (PR-1) 19.
- Soni J.S., Chakraverti G., 1991, Investigative study on metal removal rate and wear ratio in EDM of high carbon high chromium die steel, *J. Inst. Eng. (India)* 71 (Pt AS2) 32.
- George V., Venkatesh V.C., 1980, Investigations on optimum machining conditions for electro-discharge machining of 5 Cr die steel, in: *Proceedings of the Ninth AIMTDR Conference, IIT, Kanpur*, 327 pp.
- Pandey P.C., Jilani S.T., 1987, Electrical machining characteristics of cemented carbides, *Wear* 116, 77.
- Raman K.S., Gupta H.R., Singal A.R., Das P.K., Saha P., Mishra P.K., 1997, EDMing of GT-20 grade of carbide, in: *Proceedings of the 17<sup>th</sup> AIMTDR Conference, REC, Warangal*, pp. 290–294.

Arthur A., Dickens P.M., Cobb R.C., 1996, Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes, *Rapid Prototyping* 2 (1) 4–12.

Jeswani M.L., 1978, Roughness and wear characteristics of spark eroded surfaces, *Wear* 51, 227.

# PROSES SINTESIS DAN KARAKTERISASI FTIR HIDROKSIAPATIT DARI GIPSUM ALAM KULON PROGO

Joko Sedyono<sup>a</sup> dan Alva Edy Tontowi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>. Teknik Mesin, Sekolah Pasca Sarjana UGM dan Teknik Mesin UMS

<sup>b</sup>. Teknik Mesin dan Industri UGM

e-mail: mas.joko@ymail.com

## ABSTRAK

Hidroksiapatit (HAp)  $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$  telah dipergunakan secara luas dalam bidang kedokteran dan kedokteran gigi sebagai bahan substitusi tulang/gigi, hal ini karena komposisi dan strukturnya sama sebagaimana kandungan tulang/gigi. Tetapi HAp yang ada di Indonesia masih import. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat bahan biokeramik hidroksiapatit dari gipsum alam Kulon Progo (KPNG) kemudian mengkarakterisasi dengan pengujian FTIR.

Sintesa HAp dilakukan dengan teknik Hydrohermal Microwave dengan mereaksikan antara KPNG ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) dengan diamonium hidrogen fosfat  $[(NH_4)_2HPO_4]$ . Kemudian hasil reaksinya dianalisa dengan pengujian FTIR dan dibandingkan dengan HAp 200 Jepang sebagai pembanding.

Dari hasil analisa didapat pola-pola FTIR hidroksiapatit hasil reaksi menyerupai HAp 200 Jepang dan HAp SRM 2910.

**Kata Kunci:** gipsum alam Kulon Progo, hidroksiapatit, FTIR

## PENDAHULUAN

Kerusakan jaringan tubuh oleh berbagai kelainan, maupun penyakit, yang dapat menyebabkan kecacatan struktur yang akan menimbulkan gangguan fungsi tubuh, memerlukan restorasi untuk mengembalikan fungsi organ tubuh dengan sempurna. Penambahan atau penggantian jaringan merupakan salah satu rangkaian upaya memperbaiki kecacatan struktur tubuh.

Hidroksiapatit  $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$  telah dipergunakan secara luas dalam bidang kedokteran dan kedokteran gigi sebagai bahan substitusi tulang, hal ini karena kandungan mayoritas tulang/gigi adalah hidroksiapatit (HAp). Dunia kedokteran Indonesia telah mengaplikasikan HAp, tetapi HAp yang ada di Indonesia masih import, padahal sangat berpotensi memproduksi sendiri HAp mengingat Indonesia adalah penghasil gipsum alam yang cukup potensial

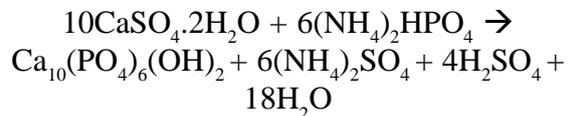
(misalnya di Kulon Progo Jogjakarta) untuk dikembangkan sebagai bahan baku pembuatan hidroksiapatit.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mensintesa hidroksiapatit (*Kulon Progo Hydroxyapatite/KPHAp*) dari serbuk gipsum alam Kulon Progo ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) yang direaksikan dengan diamonium hidrogen fosfat  $[(NH_4)_2HPO_4]$  dengan metode hidrotermal menggunakan *microwave* kemudian dilakukan karakterisasi dengan pengujian FTIR (*Fourier Transform-Infra Red spectroscopy*).

## TINJAUAN PUSTAKA

Furuta dkk. (1998) mensintesa hidroksiapatit dari reaksi antara gipsum *mold waste* 5 x 10 x 20 mm dengan 40 ml 0,5 M larutan diamonium hidrogen fosfat dengan cara *hydrothermal treatment (conventional-hydrothermal)* pada

suhu 50 – 100°C dan dipelajari sifat-sifatnya. Di sini dia mengembangkan novel proses untuk mempersiapkan HAp monolith langsung dari gipsum waste dengan kristalisasi *in situ* dengan menggunakan reaksi kimia berikut:



Diperoleh konversi gipsum ke HAp (100%) pada suhu 50°C dalam waktu 15 hari dan 100°C dalam 2 hari.

Katsuki dkk. (1999) mensintesa HAp dengan *microwave*. Sintesa HAp diperoleh dari reaksi antara serbuk gipsum (0,5 gr) dan 40 ml 0,5 M larutan diamonium hidrogen fosfat pada suhu 100°C selama 0,5 – 120 menit dalam Teflon menggunakan sebuah *microwave digestion system*. Kemudian hasilnya dicuci dengan air murni, lalu dikeringkan pada suhu di bawah 50°C. Untuk mengetahui pengaruh *microwave*, juga dilakukan reaksi yang sama dengan cara *conventional-hydrothermal*. Dengan cara *microwave* diperoleh konversi gipsum ke HAp (100%) dalam waktu 5 menit, sedangkan dengan *conventional-hydrothermal* membutuhkan waktu 8 hari. Jadi lebih cepat menggunakan system *microwave* daripada *conventional-hydrothermal*.

Nasution (2006) mereaksikan serbuk kalsit [kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ )] Gunung Kidul dengan larutan 0,5 M trisodium fosfat ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) Wako Chemical Co., Japan untuk membuat hidroksiapatit (HAp). Prosesnya dengan perlakuan hidrotermal *microwave* pada suhu 100°C. Setelah itu HAp hasil reaksi dikalsinasi pada suhu 800°C lalu dilakukan serangkaian pengujian. Dihasilkan hidroksiapatit yang pola FTIR-nya cukup mendekati hidroksiapatit komersial HAp 200 Wako Jepang, tetapi masih mengandung kalsit.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Rancangan Penelitian

Penelitian ini akan dijalankan secara eksperimental laboratoris.

### Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk gipsum alam Kulon Progo (*Kulon Progo Natural Gypsum/KPNG*) [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ], butiran *diammonium hydrogen phosphate* (DHP), dan aquades. Kemudian sebagai pembanding digunakan gipsum murni, HAp 200 Jepang dan HAp SRM 2910 (*Standard Reference Material* dari *National Institute of Standards and Technology, USA*).

### Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa alat yaitu: blender, timbangan mekanik, gelas beker, gelas ukur, gelas labu, batang pengaduk, *microwave*, kertas saring, kertas pH, alat *sieving*, timbangan digital, dan mesin uji FTIR.

### Jalannya Penelitian

#### 1. Alur penelitian

Alur penelitian diperlihatkan pada Gambar 1.

#### 2. Pembuatan serbuk KPNG

Untuk membuat serbuk KPNG dilakukan tahapan sebagai berikut (Sedyono dkk., 2007):

- Melakukan penggalian di daerah Kulon Progo, Jogjakarta
- Membersihkan dan memisahkan batuan gipsum dari tanah dan kalsit
- Membuat serbuk dengan menggunakan blender
- Sieving* halus.

#### 3. Karakterisasi dan analisa data serbuk KPNG

Untuk mengetahui apakah yang diperoleh itu adalah gipsum maka dilakukan karakterisasi dengan menggunakan FTIR, lalu dibandingkan dengan gipsum murni ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Hal ini dilakukan supaya tidak keliru dengan material lain yang mirip gipsum (misalnya kalsit).

#### 4. Pembuatan KPHAp

Proses sintesa KPHAp dilakukan dengan cara sebagai berikut (Sedyono dkk., 2007):

- Menimbang DHP dengan timbangan mekanik untuk membuat larutan dengan konsentrasi 0,5 M

- b. Menimbang serbuk gipsum Kulon Progo untuk dicampur dengan larutan tersebut, dengan perbandingan 5 gr serbuk dan 400 ml larutan DHP
- c. Larutan tersebut lalu dimasukkan ke dalam *microwave* dan dipanaskan (proses hidrotermal) pada suhu 100°C selama 30 menit
- d. Larutan lalu dicuci dengan menggunakan aquades sekaligus disaring dengan menggunakan kertas saring beberapa kali sampai pH netral,
- e. Kemudian serbuk dikeringkan dengan *microwave*.

**5. Karakterisasi dan analisa data serbuk KPnAp**

Untuk mengetahui apakah yang dihasilkan itu hidroksiapatit dan sejauh mana pola FTIR yang

didapat, maka dilakukan karakterisasi dengan menggunakan FTIR, lalu membandingkannya dengan HAp 200 (Jepang), dan HAp SRM 2910.

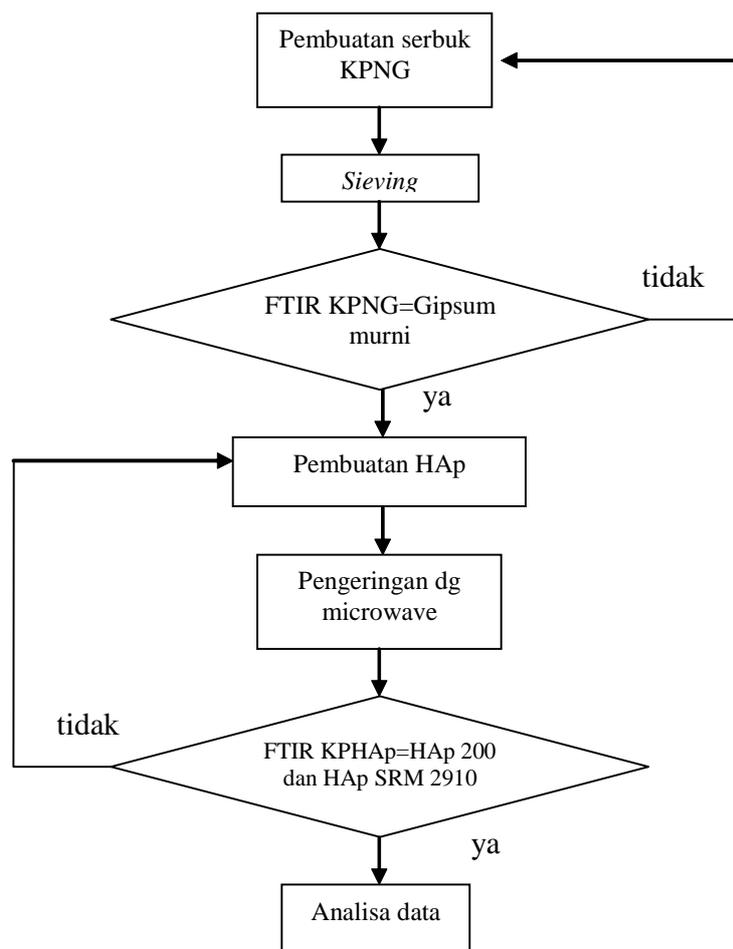
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil Karakterisasi FTIR**

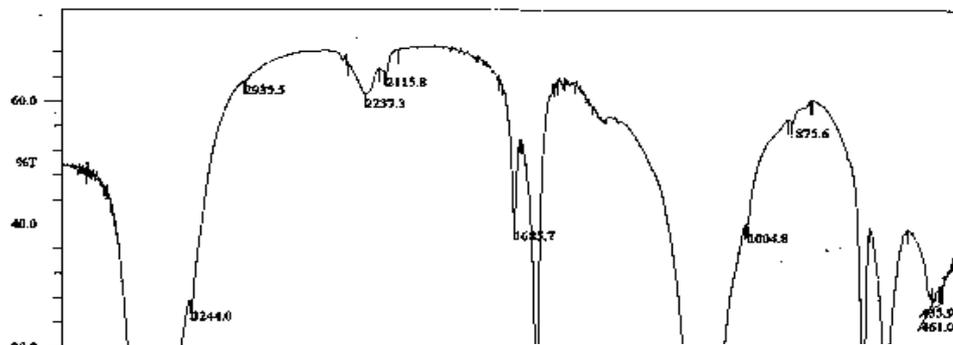
Hasil karakterisasi FTIR ditampilkan pada Gambar 2 dan Gambar 3, masing-masing untuk gipsium dan hidroksiapatit.

**1. Pembahasan**

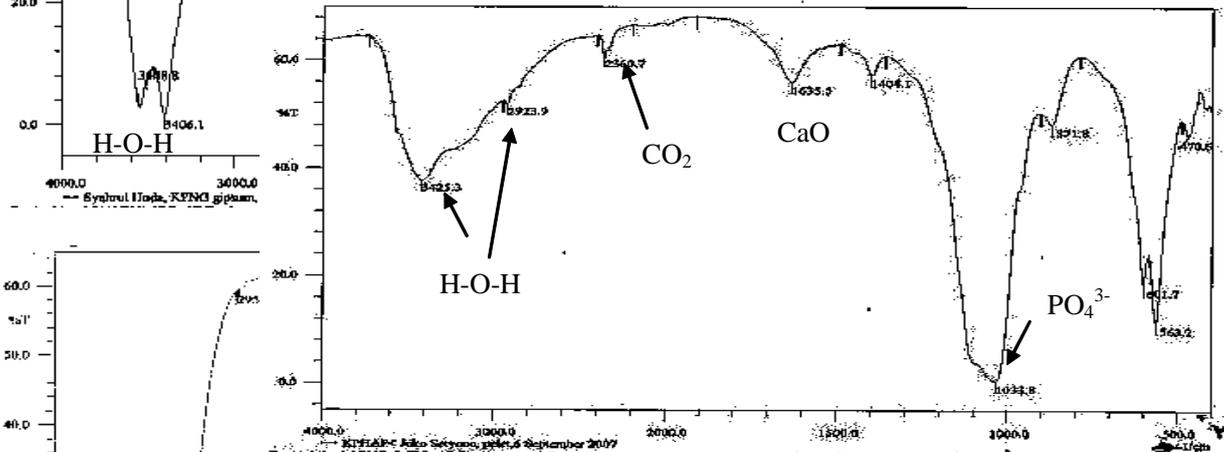
Gambar 2 menunjukkan pola-pola FTIR yang sama antara KPnG (a) dengan gipsium murni (pembanding) (b) produk komersial yang ada di pasaran yang memiliki tingkat pro analisis (PA). Pola FTIR menunjukkan *peak-peak* dengan intensitas yang sangat kuat pada peak 11,777°, 29,258°, dan 23,521°.



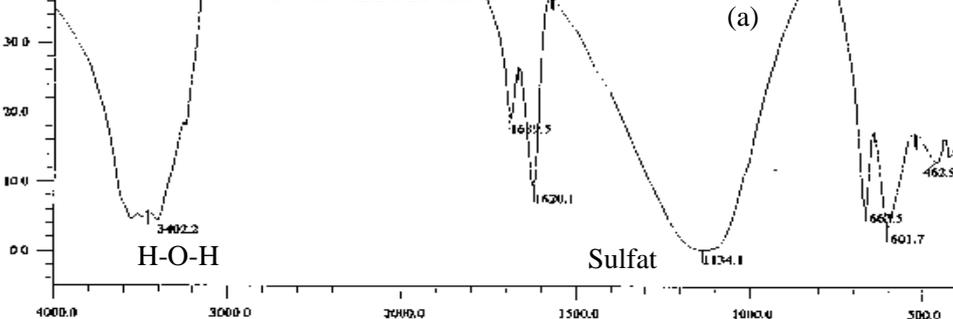
**Gambar 1. Alur penelitian**

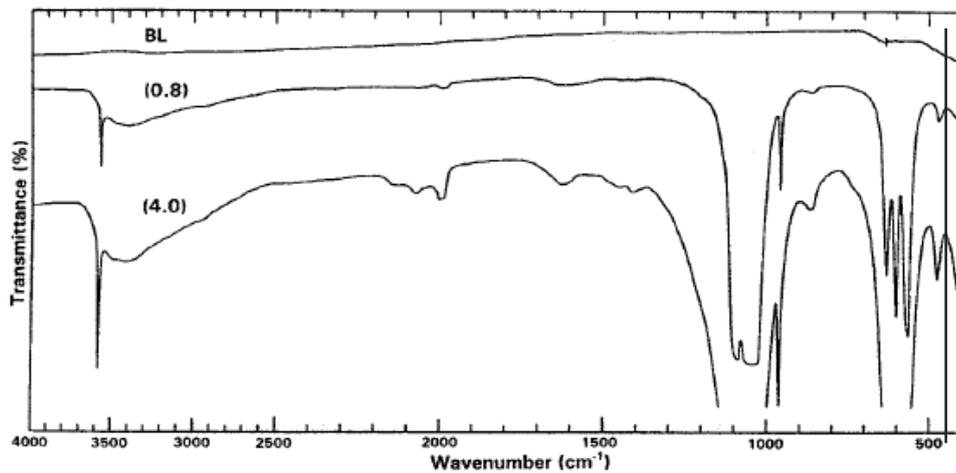


murni

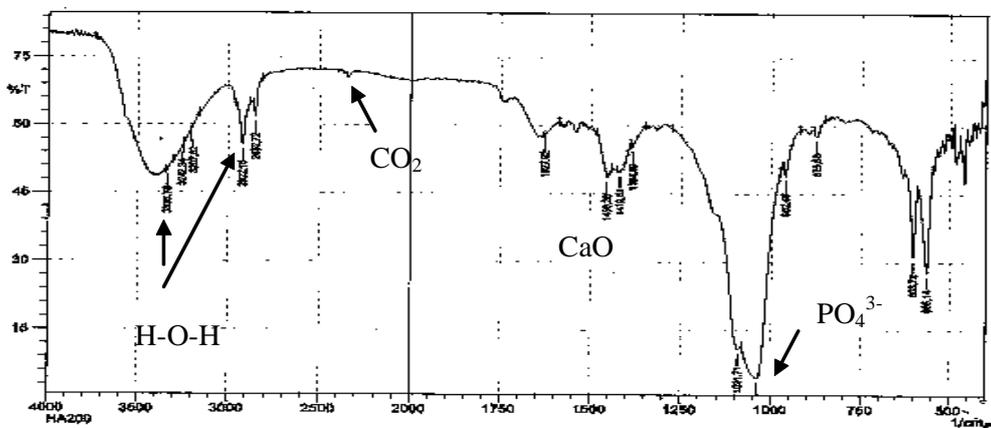


(a)





(b)



(c)

**Gambar 3. Pola FTIR (a) KPHAp, (b) HAp SRM 2910, dan (c) HAp 200**

Dari sini diyakini bahwa material yang digunakan sebagai bahan baku adalah benar-benar gipsum, dengan kemungkinan tingkat kemurnian  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (kalsium sulfat dihidrat) pada KPNG yang tinggi yang sangat mendekati gipsum murni komersial.

Gambar 3 menunjukkan memperlihatkan pola FTIR (a) KPHAp, (b) HAp SRM 2910, dan (c) HAp 200. Dari gambar ini nampak adanya kemiripan pola FTIR KPHAp dengan HAp 2910 dan HAp 200. Spektra inframerah dari KPHAp menunjukkan adanya ikatan molekul hidrogen pada bilangan gelombang  $3425,3 \text{ cm}^{-1}$  dan  $2923,9 \text{ cm}^{-1}$ . Spektra inframerah yang menunjukkan adanya ikatan molekul hidrogen terjadi pada bilangan gelombang  $3412,08 \text{ cm}^{-1}$  dan  $3145,90 \text{ cm}^{-1}$  yang

ditandai dengan adanya vibrasi gugus fungsi dari H-O-H (Pramatarove, 2005). Sedangkan menurut Pattanayak dkk. (2005) ikatan OH terdapat pada vibrasi gelombang  $3400$  dan  $630 \text{ cm}^{-1}$ .

Ikatan gugus fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) merupakan intensitas yang paling tinggi nampak pada bilangan gelombang yakni  $563,2 \text{ cm}^{-1}$  dan  $601,7 \text{ cm}^{-1}$  dan  $1033,8 \text{ cm}^{-1}$ . Menurut Sasikumar (2006) intensitas yang paling tinggi merupakan ikatan gugus fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) yang ditandai dengan vibrasi *bending* dan *stretching* dari P-O yang terdapat pada bilangan gelombang  $503,21 \text{ cm}^{-1}$ ,  $603,72 \text{ cm}^{-1}$ , dan  $1026,13 \text{ cm}^{-1}$ . Sedangkan menurut Pattanayak dkk. (2005) ikatan gugus fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) paling kuat dengan vibrasi *stretching* terdapat pada bilangan interval

gelombang 1000–1150  $\text{cm}^{-1}$  dan medium pada bilangan gelombang 960  $\text{cm}^{-1}$ . Untuk vibrasi *bending* diamati pada 560–610  $\text{cm}^{-1}$ .

Gugus fungsi senyawa fase Ca–O ditemukan dalam struktur ini yang ditandai dengan vibrasi pada gelombang 1404,1  $\text{cm}^{-1}$ –1635,5  $\text{cm}^{-1}$ . Gugus fungsi senyawa fase Ca–O ditemukan pada vibrasi gelombang 1400  $\text{cm}^{-1}$ –1700  $\text{cm}^{-1}$  (Pattanayak dkk., 2005).

Ikatan  $\text{CO}_2$  memiliki intensitas yang sangat rendah muncul pada bilangan gelombang 2360,7  $\text{cm}^{-1}$ . Bilangan gelombang 2300  $\text{cm}^{-1}$  yang merupakan ikatan  $\text{CO}_2$  memiliki intensitas yang sangat rendah yang diindikasikan berasal dari udara luar (Fernandes dkk., 2000).

Terbentuknya fasa hidroksiapatit pada KP HAp yang menyerupai HAp 200 komersial kemungkinan disebabkan oleh tingginya tingkat kemurnian dari senyawa kalsium sulfat dihidrat pada KPNG dan diamonium hidrogen fosfat (DHP) Merck Jerman (95%), sehingga ketika direaksikan dengan perlakuan hidrotermal dengan menggunakan microwave dapat menyebabkan lebih mudah dan semakin cepat

terbentuk ikatan antara unsur kalsium dan fosfat menjadi hidroksiapatit dan energi pembentukan yang sangat efisien (Khrisna dkk., 2002).

## KESIMPULAN

Dengan menggunakan kalsium sulfat dihidrat Kulon Progo Jogjakarta yang direaksikan dengan diamonium hidrogen fosfat dengan metode hidrotermal dapat dihasilkan biokeramik hidroksiapatit [ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ] yang mirip dengan produk hidroksiapatit impor. Hal ini ditandai dengan hasil karakterisasi FTIR. Ini semakin memperkuat kenyataan sebagaimana hasil karakterisasi XRD yang telah dipublikasikan sebelumnya (Sedyono dkk., 2007). Dan hal ini merupakan peluang bagi kita untuk mengembangkan sendiri hidroksiapatit di dalam negeri.

## PERSANTUNAN

Ucapan terima kasih ditujukan kepada pemerintah dalam hal ini melalui Dirjen Dikti dalam program TPSDP dan Universitas Muhammadiyah Surakarta atas dukungannya dalam pelaksanaan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Fernandes, F., Mauro, C. dan Laranjeira, M., 2000, *Calcium Phosphate Biomaterials from Marine Algae Hydrothermal Synthesis and Characterisation*, Quimica Nova, pp 441-446.
- Furuta, S., Katsuki, H., Komarneni, S., 1998, *Porous Hydroxyapatite Monoliths from Gypsum Waste*, *J Mater Chem* 8: 2803-6
- Katsuki, H., Furuta, S., Komarneni, S., 1999, *Microwave Versus Conventional-Hydrothermal Synthesis of Hydroxyapatite Crystals from Gypsum*, *J Am Ceram Soc* 82 (8):2257-9
- Krishna, D.S.R., Chatanya, C.K., Seshadri, S.K., dan Kumar, T.S.S., 2002, *Flourinated Hydroxyapatite by Hydrolysis Under Microwave Irradiation*, *Trends Biomater. Artif. Organs*. Vol. 16(1), pp 15-17
- Nasution, D.A., 2006, *Fabrikasi serta Studi Sifat Mekanis dan Fisis Biokeramik Hidroksiapatit (HAp) dari Kalsit Gunung Kidul*, Tesis S-2, Sekolah Pasca Sarjana UGM, Jogjakarta.
- Pattanayak, D.K., Divya, P., Upadhyay, S., Prasad, R.C., Rao, B.T. dan Mohan, T.R.R., 2005, *Synthesis and Evaluation of Hydroxyapatite Ceramics*, *Trends Biomater. Artif. Organs*, Vol 18 (2), January 2005.

- Pramatarove, L., 2005, *Hydroxyapatite Growth Induced by Native Extracellular Matrix Deposition on Solid Surface*, European Cells and Materials, Vol. 9, pp 9-12.
- Sasikumar, S., 2006, *Low Temperature Synthesis of Nanocrystalline Hydroxyapatite from Egg Shells by Combustio Method*, Trends Biomater. Artif. Organs, Vol. 19(2), pp 70-71.
- Sedyono, J., Tontowi, A.E. dan Ana, I.D., 2007, *Fabrikasi dan karakterisasi XRD Hidroksiapatit dari Gypsum Alam Kulon Progo*, Prociding Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri ke-13 UGM Jogjakarta.

# 2D ELASTICITY ANALYSIS WITH BOUNDARY ELEMENT METHOD

**Supriyono**

Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Muhammadiyah University of Surakarta.  
Email: supriyono@ums.ac.id

## ABSTRACT

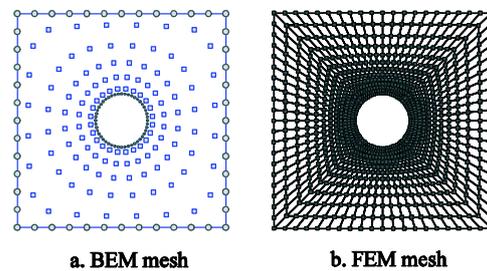
*In this paper, a boundary element method for 2D elasticity analysis is presented. The formulations are also presented. Numerical integration is applied to solve the boundary integral equation obtained from the formulation. Quadratic isoparametric elements are used to represent the variation of a variable along an element. Several examples are presented to demonstrate the validity and the accuracy of the method.*

**Keywords:** *elasticity-numerical integration-isoparametric element-boundary element method.*

## Introduction

In general, there are three popular numerical methods used in practical problems, the Finite Difference Method (FDM), the Finite Element Method (FEM) and the Boundary Element Method (BEM). FDM and FEM are called domain methods as the discretization of the domain is required. On the other hand, the BEM (Brebbia, 1984) is known as a boundary type method. The most interesting feature of the Boundary Element Method (BEM) is that only the boundary of the model needs to be discretized, thus the dimensionality of the problem is reduced by one. It means that for two-dimensional problems, only the line-boundary of the domain needs to be discretized into elements, and for three-dimensional problems only the surface of the problem need to be discretized (see Fig. 1). Further advantages can be found in the continuous modelling of the interior and usually a coarser discretization is needed compared to Finite Element Method meshes. The BEM's applicability at present is not as wide ranging as FEM, however the method has become established as an effective alternative to

FEM in several important areas of engineering analysis.



**Figure 1. BEM vs FEM mesh in 2D**

The BEM formulations can be divided into two different but closely related categories. The first and perhaps the most popular is the so-called direct formulation, in which the unknown functions appearing in the formulation are actual physical variables of the problem. In elasticity these unknown functions are the displacement and traction fields. The other approach is called the indirect formulation, in which unknown functions are represented by fictitious source densities. Once these source densities are found, the values

of the physical parameters can be obtained by simple integrations.

The fundamentals of the BEM can be traced back to classical mathematical formulations by Betti (1872), Somigliana (1886), Fredholm (1903), and Mikhilin (1957). The works by Fredholm and Mikhilin were for potential problems, whereas the works of Betti and Somigliana dealt with elasticity problems. The development of the formulations in the context of boundary integral equation is due to Jaswon (1963), Massonnet (1965), Hess and Smith (1967), Rizzo (1967) and Cruse (1969). Cruse was the first one who introduced three-dimensional elastostatics in boundary element method. The work of Lachat and Watson (1976) is perhaps the most significant early contribution towards BEM becoming an effective numerical technique. They developed an isoparametric formulation similar to those used in the FEM and demonstrated that BEM can be used as an effective tool for solving problems with complex configuration. Since these early contributions of the BEM, much progress has been made in many different applications. Several authors have written text books on BEM, such as Aliabadi (2001), Brebbia (1992), Banerjee(1992), Becker (Becker1992), and Wrobel (2001).

This paper presents the application of BEM to two dimensional (2D) elastostatic problems. Throughout this paper, the cartesian tensor notation is used, with the Latin indices varying from 1 to 2.

### Displacement and Stress Integral Equations

Applications BEM in solid mechanics are based on the Somigliana's identities. Somigliana's identity for displacements in 2D elasticity problems states that the displacements at any points  $X'$  [ $u_i(X')$ ] belonging to domain ( $X' \in V$ ) to the boundary values of displacement [ $u_j(x)$ ] and traction [ $t_j(x)$ ] can be expressed as (Aliabadi, 2001):

$$u_i(X') = \int_S U_{ij}(X', x) t_j(x) dS - \int_S T_{ij}(X', x) u_j(x) dS \quad (1)$$

where,  $U_{ij}(X', x)$  and  $T_{ij}(X', x)$  are called fundamental solutions representing a displace-

ment and a traction in the  $j$  direction at point  $x$  due to a unit point force in the  $i$  direction at point  $X'$ . These fundamental solutions can be found in Aliabadi (2001).

Equation (1) is valid for any source points within domain ( $X' \in V$ ), in order to find solutions on the boundary points, it is necessary to consider the limiting process as  $X' \rightarrow x' \in S$ . The limiting process can be found in many text book, for examples Aliabadi (2001), Brebbia (1992), Banerjee(1992), Becker (Becker1992), and Wrobel (2001). After limiting process, boundary displacement integral equations can be expressed as

$$C_{ij}(x') u_j(x') = \int_S U_{ij}(x', x) t_j(x) dS - \int_S T_{ij}(x', x) u_j(x) dS \quad (2)$$

where,  $C_{ij}(x')$  is free term that is  $C_{ij}(x') = \frac{1}{2} (\delta_{ij} + \nu_{ij}(x'))$ , for smooth boundary the free term is 0.5.

The Somigliana's identity for stresses can be expressed as

$$\sigma_{ij}(X') = \int_S U_{ijk}(X', x) t_k(x) dS - \int_S T_{ijk}(X', x) u_k(x) dS \quad (3)$$

where,  $U_{ijk}(X', x)$ ,  $T_{ijk}(X', x)$  are called fundamental solutions and can be found in the same text book as mentioned above.

As equation (1), equation (3) is valid for any source points within domain ( $X' \in V$ ), to find stresses on the boundary, two methods are available. The first commonly called as *indirect approach* relies on using recovered boundary tractions and displacements obtained from the BEM solutions using equation (2). The tangential strains are calculated by differentiation of equation (2) and then the strains are converted by Hooke's law and Cauchy's formula to have the stresses. The second method is called *direct approach*. The stresses can be obtain by limiting process of equation (3) as  $X' \rightarrow x' \in S$ . This method is complicated and will include hypersingular integral due to the limiting process. The first approach is the most pupolar and economical. The details of the formulations of the first approach can be found in Aliabadi (2001).

## Discretization and System of Equation

In order to solve equation (2), a numerical method is implemented as analytic solution is almost impossible due to complexity of the equation. The boundary  $S$  is discretized into  $N_e$  using quadratic isoparametric elements as can be seen in Figure 2.

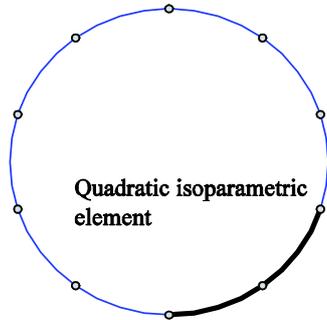


Figure 2. Discretization

In this formulation, boundary parameter  $x_j$ , the unknown boundary values of displacements  $u_j$  and tractions  $t_j$  are approximated using interpolation function, in following manner:

$$\begin{aligned} x_j &= \sum_{\alpha=1}^3 N_{\alpha}(\xi) x_j^{\alpha} \\ u_j &= \sum_{\alpha=1}^3 N_{\alpha}(\xi) u_j^{\alpha} \\ t_j &= \sum_{\alpha=1}^3 N_{\alpha}(\xi) t_j^{\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

The shape functions  $N_{\alpha}$  are defined as

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2} \xi (\xi - 1) \\ N_2 &= (1 - \xi)(1 + \xi) \\ N_3 &= \frac{1}{2} \xi (\xi + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

Substituting equation (4) and equation (5) into equation (2), one gets (the integrations on the boundary  $S$ ):

$$\begin{aligned} \int_S T_{ij}(x', x) u_j(x) dS &= \sum_{n=1}^{N_e} \sum_{\alpha=1}^3 u_j^{\alpha} \int_{-1}^1 T_{ij}(x', x(\xi)) N_{\alpha}(\xi) J^n(\xi) d\xi \\ \int_S U_{ij}(x', x) p_j(x) dS &= \sum_{n=1}^{N_e} \sum_{\alpha=1}^3 t_j^{\alpha} \int_{-1}^1 U_{ij}(x', x(\xi)) N_{\alpha}(\xi) J^n(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (6)$$

where,  $N_e$  is the number of elements on the boundaries  $S$  and  $J^n$  is the Jacobian transformations.

After discretization and point collocation on the boundary the equations (6) can be written in the matrix form as

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} \quad (7)$$

where  $[H]$  and  $[G]$  are the well-known boundary element influence matrices.  $\{u\}$ ,  $\{t\}$ , are the displacement and the traction rate vectors on the boundary.

After imposing boundary condition, equations (7) can be written as

$$[A]\{x\} = \{f\} \quad (8)$$

where,  $[A]$  is the system matrix,  $\{x\}$  is the unknown vector and  $\{f\}$  is the vector of prescribed boundary values.

In similar way, the stress integral equations of equations (3) can be presented in matrix form as

$$[\sigma] = [G]\{t\} - [H]\{u\} \quad (9)$$

At this point, it can be seen that the stresses at internal points are calculated using equation (9) after the boundary values of displacements and tractions are found from equation (8).

## Examples

In order to show the accuracy and the validity of the method presented above, examples are shown as follows:

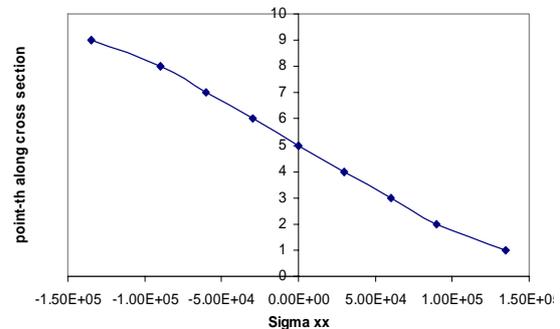
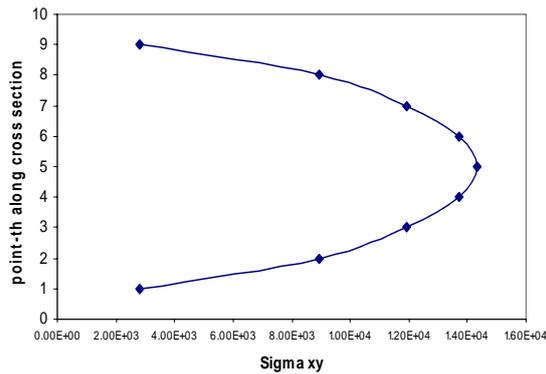
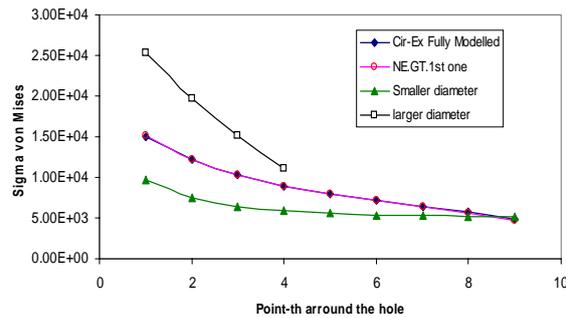


Figure 3. Distribution of normal stress along the cross section of cantilever beam



**Figure 4. Distribution of shear stress along the cross section of cantilever beam**



**Figure 5. Stress distribution of circular excavation plate due to tension (The points was taken in the y direction along side the diameter of the hole)**

### Conclusion

Some points can be drawn from the presentation above:

1. The most interesting feature of BEM is reducing dimensionality of the problem by one.
2. The discretization technique of BEM is the same as FEM discretization.
3. BEM has become established as an effective alternative to FEM in several important areas of engineering analysis..

### REFERENCES

- Aliabadi, M.H., The Boundary Element Method, vol II: application to solids and structures, Chichester, Wiley (2001).
- Banerjee, P.K., The Boundary Element Method in Engineering, McGraw-Hill, New York (1992).
- Becker, A., The Boundary Element Method in Engineering, McGraw-Hill, London (1992).
- Betti, E., Teoria dell'elasticita', Il Nuovo Cimento, 7-10, (1872).
- Brebbia, C.A., Dominguez, J., Boundary Elements, an Introductory Course, 2nd edition, Computational Mechanics Publication, Southampton, McGraw-Hill Book Company, New York, (1992).
- Cruse, T.A., Numerical solutions in three-dimensional elastostatics, International Journal of Solids and Structures, 5, 1259-1275, (1969).
- Fredholm, I., Sur une classe d'equations fonctionelles, Acta Mathematica, 27, 365-390, (1903).
- Hess, J.L., and Smith, A.M.O., calculation of potential flows about arbitrary bodies, Progress in Aeronautical Sciences, 8, Pergamon Press, (1967).
- Jaswon, M.A., Integral equation method in potential theory, I, Proceeding of the Royal Society of London, Series A, 275, 23-32, (1963).
- Lachat, J.C., Watson, J.O., Effective numerical treatment of boundary integral equations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 10, pp.991-1005, (1976).

- Massonnet, C.E., Numerical use of integral procedure, In Stress Analysis, Chapter 10, 198-235, Wiley, London, (1965).
- Mikhilin, S.G., Integral Equation, Pergamon Press, London, (1957).
- Rizzo, F.J., An integral equation approach to boundary-value problems of classical elastostatics, Quarterly Journal of Applied Mathematics, 25, 83-95, (1967).
- Somigliana, C., Sopra l'equilibrio di un corpo elastico isotropo, Il Nuovo Cimento, serie III, vol.20, 81-185,(1886).
- Wrobel, L.C., The Boundary Element Method, vol I: applications in thermo-fluids and acoustics, Chichester, Wiley (2001).