

## PENGUKURAN POROSITAS BAHAN KERAMIK MENGUNAKAN METODA ULTRASONIK

Amoranto Trisnobudi<sup>1</sup>, Rusli Anggra Kusuma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Ultrasonik  
Laboratoria Fisika Bangunan dan Akustik  
Jurusan Teknik Fisika ITB  
Jalan Ganesha 10 Bandung, 40132  
E-mail : [amoranto@tf.ac.id](mailto:amoranto@tf.ac.id)

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro  
Universitas Kristen Maranatha  
Jalan Prof. Soeria Soemantri Bandung, 40164

### Abstract

The porosity of porous materials such as rocks and ceramics are usually measured by a conventional method. First the material under test is dried in the oven and its weight is measured. Then it is soaked into the water until saturated and its weight is measured again. Its porosity is calculated from the difference between the wet and the dry weight. So this conventional measurement of porosity is not practical and also takes long time. This paper deals with the results of the research about the application of ultrasonic method in measuring the porosity of ceramic materials. The basic of this method is the large difference between the velocity of ultrasonic waves in the air (340 m/s) and in the ceramic material with zero percent porosity (2500 m/s). In this research we placed an ultrasonic transducer as transmitter on one side of the ceramic sample and another ultrasonic transducer as the receiver on the other side. If the ceramic sample have a high porosity it means that there are more voids inside so that the ultrasonic wave takes more time to propagate through the sample therefore the average velocity is slower. So the measurement of this wave velocity can be used to determined its porosity.

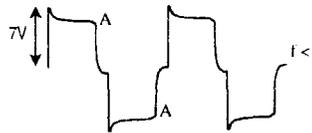
The electronic apparatus used in this research consist of a transmitter, a detector, a counter, an interface circuits and a personal computer beside the ultrasonic transducers. Beside there also a seven segment display showing the propagation time of the ultrasonic wave. First the apparatus is calibrated by 12 ceramic samples with known porosity. From this calibration test we have obtained the empiric equation between the ceramic porosity  $P$  in % and the ultrasonic velocity  $V$  in km/s, i.e.  $P = 13.89 V^2 - 67.32 V + 87.58$ . Then we use this empirical equation to measure the porosity of 6 another ceramic samples and obtain the results with maximum error of 2.6 %.

**KEYWORDS:** ultrasonic method, wave velocity, porosity measurement, ceramic materials

### Abstrak

Porositas bahan berpori seperti batu-batuan dan keramik biasanya diukur dengan metoda konvensional. Mula-mula bahan berpori yang sedang diuji dikeringkan di dalam oven dan beratnya diukur. Kemudian dicelupkan ke dalam air sampai jenuh dan beratnya diukur lagi. Porositasnya dihitung dari perbedaan berat pada keadaan kering dan basah ini. Jadi pengukuran porositas dengan metoda konvensional ini tidak praktis dan juga memerlukan waktu yang lama. Makalah ini akan membahas hasil-hasil penelitian mengenai aplikasi metoda ultrasonik untuk menentukan porositas bahan keramik. Dasar dari metoda ini adalah adanya perbedaan yang besar antara kecepatan gelombang ultrasonik di udara dan di dalam bahan keramik tanpa porositas. Dalam penelitian ini sebuah transduser ultrasonik berfrekuensi 200 KHz yang bertindak sebagai pemancar dipasang pada salah satu sisi dari sampel keramik dan sebuah transduser lain yang bertindak sebagai penerima dipasang pada sisi yang lain. Bila sampel keramik ini mempunyai porositas yang tinggi, maka ini berarti terdapat rongga udara yang lebih besar dan gelombang ultrasonik memerlukan waktu yang lebih lama selama menjalar di dalam sampel keramik sehingga kecepatan rata-ratanya lebih rendah. Jadi pengukuran dari kecepatan gelombang ini dapat digunakan untuk menentukan porositasnya. Perangkat elektronik yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari rangkaian transmiter, detektor, pencacah, rangkaian antarmuka dan komputer pribadi. Selain itu terdapat juga sebuah penampil tujuh ruas yang menunjukkan waktu tempuh dari gelombang ultrasonik. Mula-mula perangkat ini dikalibrasi dengan 12 sampel keramik yang sudah diketahui porositasnya. Dari kalibrasi ini diperoleh persamaan empiris antara porositas keramik dalam % dan kecepatan gelombang ultrasonik dalam km/s, yaitu  $P = 13.89 V^2 - 67.32 V + 87.58$ . Kemudian persamaan empiris ini digunakan untuk menentukan porositas dari 6 sampel keramik lain dan diperoleh hasil dengan kesalahan maksimum sebesar 2.6 %.

**KEYWORDS:** metoda ultrasonik, kecepatan gelombang, pengukuran gelombang, bahan keramik



Gambar 2(b). Tegangan Pemagnetan Terdistorsi oleh medan magnet dari luar.

Menurut teori perubahan tegangan dari gambar 2a ke gambar 2b akan diperoleh jika permeabilitas relatif dari corenya  $\geq 4000$ . Untuk itu dalam perencanaan digunakan acuan rumus seperti pada persamaan berikut.[1]

$$\mu_s = \frac{2\pi L}{N^2 \mu_0 t \ln(b/a)} \quad (1)$$

dengan:

- L = Induktansi (H)
- $\mu_s$  = permeabilitas relatif core
- $\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa (H/m)
- N = jumlah lilitan
- T = tebal core
- A = jari-jari dalam core
- B = jari-jari luar core

Jika  $\mu_s \geq 4000$ , kemudian dibuat lilitan sekunder 2 s/d 4 kali lilitan primer, sehingga diperoleh tegangan output.

Secara teoritis, untuk membuat distorsi core maka dibutuhkan arus saturasi dengan rumus sebagai berikut [1] :

$$I_{sat} = \frac{B_{max}}{N \cdot \mu_0 \cdot \mu_s} \cdot I_{min} \quad (2)$$

dengan .

- $I_{sat}$  = arus saturasi
- $B_{mas}$  = medan magnet saturasi/max
- $I_{min}$  = lingkaran dalam dari core

Arus saturasi ini akan diperoleh dengan cara mengubah-ubah frekuensi, jika arus saturasi sudah tercapai maka frekuensi tersebut adalah frekuensi saturasi (dari percobaan diperoleh sebesar 50 Hz). Pada penelitian ini diperlukan 2 buah sensor karena output yang diinginkan adalah 8 arah mata angin.

## 2.2. Oscillator

Untuk oscillator digunakan IC 4069UB, dengan frekuensi 3KHz. Output dari oscillator diinputkan pada frekuensi divider diperoleh frekuensi 50 Hz. Sinyal dari oscillator tersebut dihubungkan ke lilitan primer sensor X dan Y.

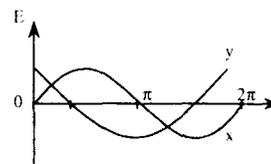
Tegangan output sensor sangat kecil sehingga masih diperlukan penguat AC.

## 2.3. Amplifier AC

Amplifier yang diharapkan adalah amplifier yang memiliki derajat kestabilan yang tinggi, untuk itu digunakan penguat AC. Untuk mempertahankan karakteristik core sensor maka digunakan buffer pada amplifiernya. Sedangkan penguatan amplifier tersebut sebesar 13 kali. Komponen yang digunakan LM 2902 dan output dari amplifier digunakan LM 2902 dengan menggunakan IC 4052B kemudian diinputkan pada LPF. LM 2902 tidak mempunyai tegangan offset. Untuk itu diperlukan tegangan offset tiruan.

## 2.4. Processor

Berdasarkan jumlah sensor (2 buah) maka output dari amplifier akan diperoleh 2 buah sinyal X dan Y berupa sinyal sinusoida, seperti gambar dibawah ini:



Gambar 3. Sinyal Output Sensor

Processor ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal digital yang merupakan kombinasi X, Y, X+Y dan X-Y. Sebagai komparatormya digunakan 74LS86, yang tegangan outputnya sebesar 5V. Tegangan ini disesuaikan dengan rangkaian pengubah 3 ke 8 digit. Komponen yang digunakan adalah 74HC138. Output dari processor akan ditampilkan pada LED sebagai indikator 8 arah mata angin.

## 3. Hasil Diskusi

### 3.1. Spesifikasi Sensor

Core sensor dibuat dengan menggunakan toroida tipe FT-50  $\neq$  75 dengan induktansi L = 1,478 mH dan  $\mu_s = 6725,54$ . Toroida tersebut kemudian diberi lilitan primer dengan kawat enamel yang berdiameter 0,3 mm sebanyak 20 lilitan dan lilitan sekunder berdiameter 0,1 mm sebanyak 60 lilitan, dengan lilitan sekunder dililitkan pada sebuah kertas bohl yang dilingkarkan pada lilitan primer.

### 3.2. Output Sensor

Kumparan primer sensor diberi tegangan input sebesar 5,2 V dengan  $f = 52$  Hz yang diperoleh dari oscillator. Tegangan output dari sisi sekunder berupa tegangan sinus (tidak murni).

### 3.3. Decoder (Processor)

Dari hasil eksperimen digunakan 3 to 8 line decoder 74HC138, sehingga cukup diperlukan 2 buah sensor X dan Y dengan output gelombang sinus masing-masing berbeda fase  $90^\circ$  tetap. Oleh dekoder tegangan output tersebut diubah menjadi logika 0 dan 1 dengan range tegangan 0 s/d 5 Volt. Proses pada dekoder dapat ditampilkan pada tabel kebenaran sebagai berikut.

Tabel 1. Tabel Kebenaran.

Posisi Sensor		Input			LED yang menyala	Arah yang ditunjuk
X	Y	C	B	A		
$0^\circ$	$90^\circ$	0	0	0	$Y_0$	N
$315^\circ$	$45^\circ$	0	0	1	$Y_1$	NE
$270^\circ$	$0^\circ$	0	1	0	$Y_2$	E
$225^\circ$	$315^\circ$	0	1	1	$Y_3$	SE
$180^\circ$	$270^\circ$	1	0	0	$Y_4$	S
$135^\circ$	$225^\circ$	1	0	1	$Y_5$	SW
$90^\circ$	$180^\circ$	1	1	0	$Y_6$	W
$45^\circ$	$135^\circ$	1	1	1	$Y_7$	NW

### 3.4. Indikator arah

Sebagai indikator penunjuk 8 arah mata angin digunakan LED. LED akan menyala jika kondisi low atau logika 0 dan arah yang ditunjuk sesuai tabel kebenaran. Arah yang ditunjuk akan berubah setiap pergeseran sensor sebesar  $45^\circ$ .

### 4. Kesimpulan

1. Sensor dibuat dari toroida tipe FT- 50  $\neq$  75 dengan kawat enamel berdiameter 0,3 mm dan permeabilitas relatif  $\mu_r = 6725,54$ .
2. Untuk memperoleh 8 arah mata angin, diperlukan 2 buah sensor X dan Y. Masing-masing sensor dipasang tetap  $90^\circ$  satu sama lain.
3. Frekuensi kerja sensor sama dengan frekuensi saturasi pada tegangan pemagnetan yaitu 50 Hz.
4. Pergeseran fase hanya akan terdeteksi setiap putaran  $45^\circ$  ke kiri dan ke kanan.

### Daftar Pustaka

1. Takamoto K., "Electromagnetic Field Measurement", Toranjisuta Gijutsu, April 1992, pp. 296-309.
2. John R. Reitz and Frederick J. Milford, "Foundation of Electromagnetis Theory", Addison-Wessley Publishing Company, Inc., Palo Alto-London.
3. John D. Krauss, " Electromagnetic", Mc Graw-Hill International Book Company, Third Edition.
4. Charles H, Roth Jr, " Fundamental of Logic Design", Info Access Distributor, PTE, Ltd.
5. The Semiconductor Data Library", Motorola Inc., 1975, series A volume V.

## 1. Pendahuluan

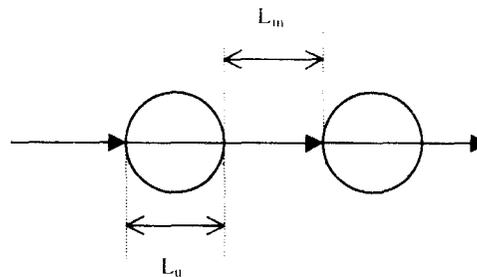
Pengukuran porositas secara konvensional [1] dari bahan-bahan berpori seperti batu-batuan, keramik dan juga polimer biasanya memerlukan waktu yang lama dan tidak praktis. Seperti kita ketahui porositas biasanya ditentukan dengan cara menimbang berat sampel bahan berpori pada saat kering (setelah dimasukkan ke dalam oven) dan pada saat jenuh air (setelah direndam dalam air). Kadang-kadang proses pengeringan dan perendaman ini memerlukan waktu berjam-jam bahkan berhari-hari. Dengan mengetahui rapat massa udara dan rapat massa air serta perbedaan berat pada saat kering dan basah, maka porositasnya dapat dihitung. Proses pengeringannya biasanya dapat dilakukan dengan lebih cepat dibandingkan proses perendamannya. Hal ini disebabkan karena sebelum air dapat memasuki rongga-rongga di dalam bahan berpori, terlebih dahulu udaranya harus ditarik keluar menggunakan pompa vakum. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk menentukan porositas dari suatu bahan berpori adalah dengan menggunakan metoda ultrasonik. Pengukuran porositas dengan metoda ultrasonik ini dilakukan dengan memanfaatkan ketergantungan kecepatan gelombang ultrasonik terhadap besarnya porositas dari bahan berpori yang dilaluinya. Jadi dengan mengukur kecepatannya porositas suatu bahan berpori dapat ditentukan. Di bawah ini akan dibahas mengenai teori yang mendasari metoda ultrasonik ini, perangkat elektronik yang digunakan dan hasil-hasil yang telah diperoleh.

## 2. Teori

Dasar dari pengukuran porositas dengan menggunakan metoda ultrasonik adalah karena adanya perbedaan yang besar antara kecepatan gelombang ultrasonik di dalam padatan, cairan dan gas [2]. Sebagai contoh, kecepatan gelombang ultrasonik di udara adalah hanya 340 m/s sedangkan di dalam bahan keramik dapat mencapai sebesar 2500 m/s. Jadi makin besar porositasnya (banyak rongga-rongga udara di dalamnya), maka makin kecil kecepatannya. Perlu disampaikan disini bahwa metoda ultrasonik ini dapat dilakukan baik pada bahan berpori dalam keadaan kering maupun dalam keadaan jenuh air (kecepatan di dalam air adalah 1500 m/s). Berbeda halnya dengan metoda konvensional dimana harus dilakukan penimbangan berat pada kedua keadaan tersebut. Bahan keramik yang digunakan dalam

penelitian ini dianggap berada dalam keadaan kering dimana semua rongga berisi udara.

Porositas suatu bahan berpori didefinisikan sebagai perbandingan volume rongga udara yang ada di dalamnya terhadap volume totalnya. Dalam penelitian ini, sampel-sampel bahan keramik yang digunakan dianggap sebagai bahan berpori dimana rongga-rongga udaranya mempunyai volume yang seragam seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Oleh karena itu perbandingan volume udara terhadap volume keramik dianggap sama dengan perbandingan panjang bagian yang berisi udara terhadap panjang keramik.



Gambar 1. Perambatan gelombang ultrasonik di dalam bahan berpori

Gelombang ultrasonik yang diradiasikan akan merambat lurus sepanjang bahan berpori melalui rongga-rongga udara ( $L_u$ ) dan bahan keramik tanpa porositas yang biasa disebut matriks ( $L_m$ ). Oleh karena itu waktu tempuh di dalam bahan berpori merupakan jumlah waktu tempuh total di udara dan di dalam matriks. Masing-masing waktu tempuh ini diperoleh dari masing-masing panjang dibagi kecepatannya. Seperti yang telah disebutkan di atas bahwa porositas bahan berpori dianggap sama dengan perbandingan panjang udara terhadap panjang total sehingga akan diperoleh Persamaan 1 di bawah ini [3].

$$P = \left( \frac{V_m V_u}{V_m - V_u} \right) \frac{1}{V} - \left( \frac{V_u}{V_m - V_u} \right) \quad (1)$$

dimana :

- P = porositas
- $V_m$  = kecepatan di dalam matriks
- $V_u$  = kecepatan di udara
- V = kecepatan di dalam keramik

14	50,60	53,90	6,52
15	50,10	53,50	6,79
16	50,20	53,75	7,07
17	50,10	53,85	7,48
18	50,10	54,25	8,28

Sebenarnya konstanta-konstanta pada persamaan di atas sudah dapat ditentukan asalkan kecepatan di udara dan di dalam matriks sudah diketahui. Persoalannya adalah sulit untuk mendapatkan bahan matriksnya, bahan keramik dengan porositas nol. Oleh karena itu dalam penelitian ini, hubungan antara porositas bahan keramik dan kecepatannya akan dicari secara empiris, yaitu dikalibrasi menggunakan sampel-sampel bahan keramik yang sudah diketahui porositasnya.

### 3. Sampel Bahan Keramik

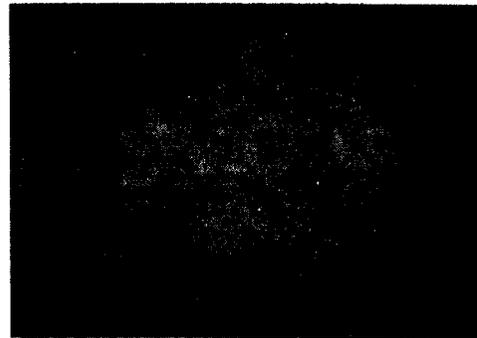
Sampel-sampel bahan keramik berbentuk silinder setebal 15 mm sebanyak 18 buah yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dan diukur porositasnya menggunakan metoda konvensional di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Industri Keramik, Jalan Jend. A. Yani No. 392 Bandung 40272. Sebagian dari sampel-sampel bahan keramik ini (12 buah) akan digunakan untuk kalibrasi seperti yang ditunjukkan foto pada Gambar 2. Sisanya sebanyak 6 buah akan digunakan untuk pengujian. Hasil-hasil pengukuran porositas pada sampel-sampel bahan keramik yang diperoleh dengan menggunakan metoda konvensional dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran porositas dengan metoda konvensional

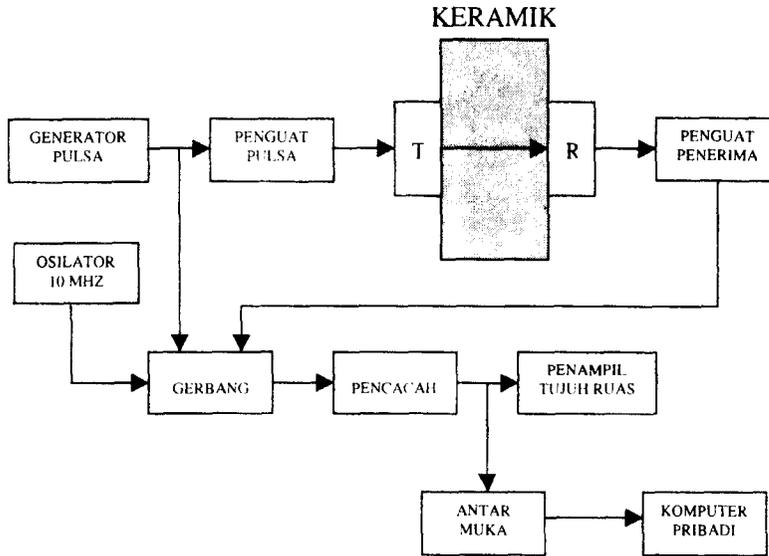
No.	Barat Kering [gram]	Berat Basah [gram]	Porositas [%]
1	50,70	53,70	5,92
2	49,95	52,95	6,01
3	50,50	53,55	6,04
4	50,20	53,25	6,07
5	50,40	53,55	6,25
6	50,80	54,00	6,30
7	50,10	53,30	6,39
8	50,30	53,55	6,46
9	50,20	53,55	6,67
10	50,20	53,60	6,77
11	50,00	53,95	7,90
12	50,25	54,64	8,74
13	50,40	53,50	6,15

### 4. Diagram Blok Pengukuran

Perangkat elektronik [4] yang dipakai dalam penelitian ini mempunyai blok diagram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Generator pulsa menghasilkan pulsa-pulsa sempit dengan durasi 0.4  $\mu$ S dan frekuensi perulangan 1 KHz. Pulsa-pulsa ini digunakan untuk membuka gerbang sehingga pencacah sudah mulai menghitung. Selain itu karena amplitudanya masih terlalu kecil (5 V), pulsa-pulsa ini diteruskan ke penguat pulsa sehingga mempunyai amplituda sebesar 125 V agar mampu mengaktifkan transduser pemancar. Pulsa-pulsa listrik ini akan diubah menjadi gelombang ultrasonik oleh transduser pemancar yang merambat di dalam bahan keramik dan sampai ke transduser penerima dimana gelombang ultrasonik ini akan diubah kembali menjadi pulsa-pulsa listrik. Oleh karena amplitudanya kecil sekali, maka sebelum diteruskan ke detektor pulsa-pulsa ini diperkuat terlebih dahulu oleh penguat penerima. Detektor kemudian akan menutup gerbang sehingga pencacah akan berhenti menghitung. Hasil perhitungan waktu tempuh ini akan disimpan di komputer melalui rangkaian antarmuka dan juga ditampilkan pada penampil tujuh ruas. Waktu tempuh yang diperoleh ini kemudian digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang ultrasonik.



Gambar 2. Sampel-sampel bahan keramik yang digunakan untuk kalibrasi



Gambar 3. Blok diagram pengukuran porositas bahan

### 5. Hasil Pengukuran dan Pembahasan

Dari hasil-hasil perhitungan kecepatan gelombang ultrasonik pada 12 sampel pertama yang ditunjukkan pada Tabel 1 diperoleh kurva kalibrasi seperti terlihat pada Gambar 4.

Tabel 1. Hasil perhitungan kecepatan pada 12 sampel bahan keramik untuk kalibrasi

No.	Porositas [%]	Kecepatan [km/s]
1	5,92	2473,21
2	6,01	2459,82
3	6,04	2447,78
4	6,15	2356,92
5	6,25	2311,87
6	6,30	2289,29
7	6,39	2266,46
8	6,46	2233,80
9	6,67	2182,14
10	6,77	2166,69
11	7,90	2061,93
12	8,74	1980,72

untuk pengukuran selanjutnya. Dari hasil pengujian pada 6 buah sampel yang kedua diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 atau yang diperlihatkan pada Gambar 5 dimana kesalahan maksimumnya adalah 2,6 %.

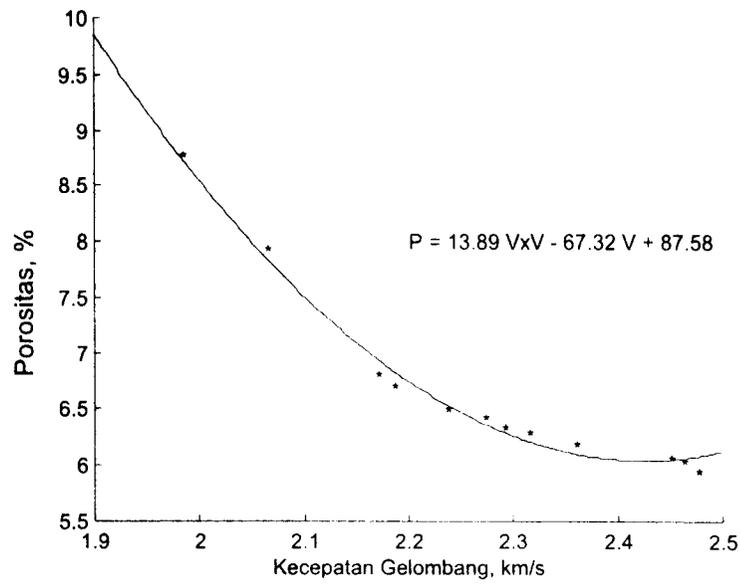
Tabel 2. Hasil pengujian pada 6 sampel

No	Kecepatan [km/s]	Porositas [%]	
		Pengukuran	Sebenarnya
13	2378,78	6,06	6,07
14	2200,70	6,71	6,52
15	2161,54	7,04	6,79
16	2124,50	7,27	7,07
17	2085,94	7,55	7,48
18	2031,56	8,20	8,28

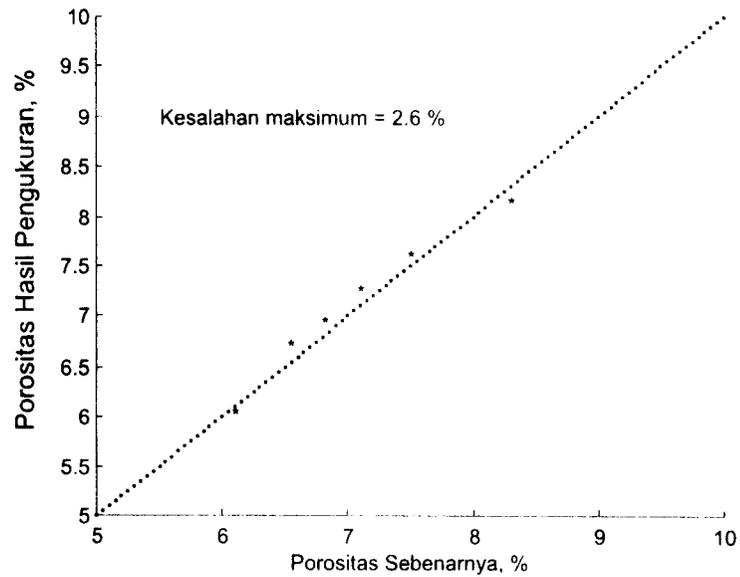
Persamaan empiris antara porositas dan kecepatan pada gambar ini adalah :

$$P = 13,89 V^2 - 67,32 V + 87,58 \quad (2)$$

Persamaan ini kemudian disimpan di dalam suatu program komputer yang akan dipakai



Gambar 4. Kurva kalibrasi yang diperoleh dari 12 buah sampel bahan keramik



Gambar 5. Hasil pengujian pada 6 buah sampel bahan keramik

## 6. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian mengenai aplikasi metoda ultrasonik ini adalah :

1. Metoda ultrasonik bisa dipakai sebagai cara alternatif untuk memperkirakan porositas bahan keramik yang dapat dilakukan dengan lebih cepat dan praktis.
2. Hubungan antara porositas bahan keramik dan kecepatan gelombang ultrasonik yang diperoleh adalah :

$$P = 13,89 V^2 - 67,32 V + 87,58$$

3. Kesalahan maksimum yang terjadi pada saat pengujian adalah 2.6 %.

Saran-saran yang dapat dikemukakan adalah :

1. Perlu dilakukan kalibrasi lebih lanjut dengan menggunakan sampel-sampel bahan keramik yang lebih banyak lagi agar diperoleh persamaan empiris yang lebih baik.
2. Perlu dilakukan pengukuran porositas pada bahan-bahan keramik lain dan juga yang mempunyai rentang porositas yang lebih lebar.
3. Perangkat elektronik yang telah dibuat sebaiknya disempurnakan misalnya dengan menggunakan serpih tunggal agar tidak menggunakan komputer pribadi.

### Daftar Pustaka

- [1] J.W. Amyx, D.M. Bass and R.L. Whiting, "Petroleum Reservoir Engineering", McGraw-Hill Book Company, New York, 1960.
- [2] J. and H. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials", Springer-Verlag, New York, 1977.
- [3] Amoranto T. dan N. Ardhana, "Aplikasi metoda ultrasonik untuk menentukan porositas bahan resin akrilik yang digunakan sebagai bahan pembuat dasar geligi tiruan", Pertemuan Ilmiah Sains dan Materi, Serpong, Oktober 1996.
- [4] R.A . Kusuma, "Pengukuran Porositas Keramik dengan menggunakan Gelombang Ultrasonik". Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Maranatha.