METODA ULTRASONIK UNTUK MENENTUKAN ARAH KRISTAL TUNGGAL BERSTRUKTUR KUBIK

Amoranto Trisnobudi, Benny Sugiharto

Laboratorium Ultrasonik, Jurusan Teknik Fisika FTI-ITB
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132
Telp. (022) 2504424, Fax. (022) 2504424
e-mail : amoranto@tf.itb.ac.id

Ringkasan

Arah dari suatu kristal tunggal dapat ditentukan dengan menggunakan difraksi sinar-x. Penentuan arah kristal ini dapat juga dilakukan dengan menggunakan metoda ultrasonik. Dalam metoda ini, suatu gelombang ultrasonik dirambatkan ke dalam kristal dan kecepatannya diukur. Dari hasil pengukuran kecepatan akan dapat ditentukan arah kristalnya. Makalah ini akan membahas hasil-hasil penelitian mengenai penentuan arah kristal tunggal berstruktur kubik menggunakan gelombang ultrasonik. Ada dua metoda yang digunakan, yaitu metoda grafis dan metoda komputer. Kedua metoda ini menggunakan data yang sama, yaitu data kecepatan pada semua arah yang mungkin yang telah terlebih dahulu dihitung berdasarkan teori gelombang dan teori elastisitas. Pada metoda pertama, data ini disimpan sebagai beberapa grafik, sedangkan pada metoda kedua, data ini disimpan sebagai basis data di dalam suatu program komputer. Setelah dicoba pada bahan alumunium untuk arah-arah kristal [311], [331], [661], [631] dan [611] diperoleh hasil yang sama untuk kedua metoda dimana metoda komputer dapat dilakukan dengan lebih cepat dibandingkan dengan metoda grafis.

Abstract

Single crystal direction can be determined by x-ray diffraction. The determination of this crystal direction can also be carried out by using ultrasonic method. In this method the ultrasonic wave velocity propagating through the crystal is measured. From this velocity measurement then the crystal direction can be determined. This paper deals with the results of a research about the direction determination of cubic single crystal using ultrasonic wave. There are two methods used, namely graphical method and computer method. These two methods used the same data, i.e. velocity data for all possible direction that has been calculated based on the wave and elasticity theory. In the first method, the data are stored as several graphics whereas in the second method they are stored as database in a computer program. These two methods have shown the same results in aluminum for crystal directions [311], [331], [661], [631] and [611] where the computer method can be carried out quicker than the graphical method.

Keywords : *Single cubic crystals, crystal directions, ultrasonic methods*

1. PENDAHULUAN

Bahan polikristal adalah bahan yang mempunyai sifat yang sama untuk semua arah. Berbeda halnya dengan bahan monokristal atau kristal tunggal yang sifat-sifatnya lain untuk arah yang berbeda seperti misalnya sifat mekanik, listrik dan optik. Bila kita ingin memanfaatkan suatu bahan kristal tunggal untuk suatu keperluan tertentu, misalnya sebagai sensor untuk mengukur suatu besaran fisis, bahan kristal tunggal ini harus dipotong pada arah tertentu agar diperoleh hasil yang maksimal. Sebagai contoh, bila kita ingin menggunakan bahan kuarsa untuk mengukur vibrasi atau tekanan, maka bahan tersebut harus dipotong menurut sumbu-x (*x-cut*) yang biasa disebut dengan sumbu mekanik. Bila kita ingin mempelajari sifat-sifat listriknya, maka bahan tersebut harus dipotong menurut sumbu-y yang biasa disebut sebagai sumbu listrik. Bahan kuarsa ini memang merupakan bahan piezoelektrik yang mempunyai baik sifat listrik maupun sifat mekanik yang saling berhubungan [1]. Bahan kuarsa ini mempunyai struktur kristal tetragonal dimana sumbu z-nya merupakan sumbu optik. Dengan demikian arah kristal harus diketahui terlebih dahulu sebelum dipotong untuk suatu keperluan tertentu.

Arah-arah dari suatu kristal tunggal dapat ditentukan dengan sinar-x, yaitu dengan mengamati peristiwa difraksi yang terjadi apabila sinar-x diradiasikan ke dalam kristal tunggal tersebut. Biasanya pengamatan dilakukan dengan mengubah-ubah arah sudut datang sampai diperoleh intensitas maksimum. Peristiwa ini sering disebut sebagai difraksi Bragg [2]. Perangkat yang digunakan umumnya berukuran besar dan harganya mahal. Selain itu sampel bahan yang akan diuji perlu dipersiapkan dengan hati-hati agar diperoleh hasil yang maksimal. Cara lain yang lebih praktis dan dapat dipakai untuk menentukan arah kristal tunggal adalah dengan menggunakan metoda ultrasonik. Metoda ini memanfaatkan ketergantungan besarnya kecepatan gelombang ultrasonik di dalam suatu bahan anisotropik terhadap arah yang dilaluinya. Selain itu, besarnya kecepatan gelombang ultrasonik ini juga dipengaruhi oleh sifat-sifat elastik dari bahan kristal yang dilaluinya. Suatu kristal tunggal berstruktur kubik mempunyai tiga konstanta elastisitas yang bebas, yaitu c_{11}, c_{44} dan c_{12}. Oleh karena itu, dengan mengukur kecepatan gelombang ultrasonik pada tiga arah yang berbeda, ketiga konstanta elastisitas tersebut dapat ditentukan. Sebaliknya, untuk menentukan suatu arah kristal, maka diperlukan tiga jenis gelombang ultrasonik yang dirambatkan pada arah tersebut. Untuk menentukan arah kristal ini, ada dua buah metoda ultrasonik yang dapat digunakan, yaitu metoda grafis dan metoda komputer. Kedua metoda ini dilakukan dengan terlebih dahulu mengetahui besarnya kecepatan dari ketiga jenis gelombang tersebut di atas. Dalam makalah ini dilakukan simulasi pengukuran dari kecepatan-kecepatan gelombang longitudinal, gelombang transversal cepat dan gelombang transversal lambat. Hasil simulasi ini digunakan untuk menentukan arah dari kristal yang sedang ditinjau. Hasil penentuan berbagai arah kristal dengan menggunakan kedua metoda ini kemudian dibandingkan.

2. DASAR TEORI

2.1. Persamaan Gelombang Elastik [3]

Dari persamaan gerak Newton dapat diturunkan Persamaan (1) di bawah ini yang dinyatakan dengan notasi tensor :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i'}{\partial t^2} \qquad (1)$$

dengan :

σ_{ij} = tensor tegangan
x_j = jarak
ρ = rapat massa
u_i = perpindahan partikel
t = waktu
i,j,k = arah x, y dan z

dimana suku sebelah kiri menyatakan gaya per satuan volume sedangkan suku sebelah kanan adalah perkalian antara massa per satuan volume dan percepatan. Dari hukum Hooke untuk bahan elastik linier dapat diturunkan hubungan antara tegangan dan regangan seperti terlihat pada Persamaan (2) di bawah ini :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl} \qquad (2)$$

dengan :

c_{ijkl} = konstanta elastisitas orde dua
ε_{kl} = tensor regangan

Tensor regangan ini didefinisikan sebagai :

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k}\right] \qquad (3)$$

Oleh karena tensor tegangan dan regangan keduanya simetris, maka akan diperoleh hubungan antara tensor tegangan dan perpindahan partikel yang dapat disederhanakan menjadi Persamaan (4) :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\frac{\partial u_k}{\partial x_l} \qquad (4)$$

Bila persamaan terakhir ini dimasukkan ke dalam Persamaan (1), maka akan diperoleh Persamaan (5) yang merupakan persamaan gelombang elastik di dalam bahan anisotropik.

$$c_{ijkl}\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \qquad (5)$$

Untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial ini, misalkan perpindahan partikel dinyatakan sebagai :

$$u_i(x_k, t) = A_o \alpha_i \exp j(\omega t - k l_m x_m) \qquad (6)$$

dengan :

A_o = amplituda vektor perpindahan
α_i = cosinus-cosinus arah dari vektor perpindahan
= α, β dan γ

ω = frekuensi sudut
= $2\pi f$
f = frekuensi
k = bilangan gelombang
= ω/v
v = kecepatan gelombang
l_m = cosinus-cosinus arah dari normal bidang gelombang
= l, m dan n

Bila vektor perpindahan ini disubsitusikan ke dalam Persamaan (5) dan dengan menggunakan fungsi kroneker delta δ_{ik}, maka diperoleh Persamaan (7) :

$$(c_{ijkl}l_l l_m - \rho v^2 \delta_{ik})\alpha_k = 0 \qquad (7)$$

Untuk menyederhanakan penulisan diperkenalkan parameter $\lambda_{ik} = c_{ijkl}\, l_l l_j$ yang bila digunakan perubahan dari notasi tensor ke notasi matrik :

$11 \rightarrow 1 \quad 22 \rightarrow 2 \quad 33 \rightarrow 3$
$23 \rightarrow 4 \quad 31 \rightarrow 5 \quad 12 \rightarrow 6$

akan diperoleh Persamaan (8), yaitu komponen dari λ_{ik} :

$\lambda_{11} = l^2c_{11} + m^2c_{66} + n^2c_{55} + 2mnc_{56} + 2nlc_{15} + 2lmc_{16}$
$\lambda_{22} = l^2c_{66} + m^2c_{22} + n^2c_{44} + 2mnc_{24} + 2nlc_{46} + 2lmc_{26}$
$\lambda_{33} = l^2c_{55} + m^2c_{44} + n^2c_{33} + 2mnc_{34} + 2nlc_{35} + 2lmc_{45}$
$\lambda_{12} = l^2c_{16} + m^2c_{26} + n^2c_{45} + mn(c_{46}+c_{25}) + nl(c_{14}+c_{56}) + lm(c_{12}+c_{56}) = \lambda_{12}$
$\lambda_{13} = l^2c_{15} + m^2c_{46} + n^2c_{35} + mn(c_{45}+c_{36}) + nl(c_{13}+c_{55}) + lm(c_{14}+c_{56}) = \lambda_{13}$
$\lambda_{23} = l^2c_{56} + m^2c_{24} + n^2c_{34} + mn(c_{44}+c_{23}) + nl(c_{36}+c_{45}) + lm(c_{25}+c_{46}) = \lambda_{32}$

Agar persamaan gelombang dapat diselesaikan, maka determinan dari koefisien α_k pada Persamaan (7) harus nol, atau :

$$\begin{vmatrix} \lambda_{11} - \rho v^2 & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} - \rho v^2 & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \qquad (9)$$

Komponen-komponen λ_{ik} pada Persamaan (8) dan persyaratan determinan pada Persamaan (9) inilah yang akan digunakan untuk menentukan arah kristal dari kristal tunggal berstruktur kubik yang akan dibahas di bawah ini.

2.2. Kristal Tunggal Berstruktur Kubik

Kristal tunggal berstruktur kubik seperti alumunium, nikel dan silikon hanya mempunyai tiga konstanta elastisitas yang bebas, yaitu :

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{22} = c_{33} \\ c_{12} &= c_{21} = c_{13} = c_{31} = c_{23} = c_{32} \\ c_{44} &= c_{55} = c_{66} \end{aligned} \qquad (10)$$

sedangkan c_{ij} yang lain adalah nol, sehingga komponen-komponen dari λ_{ik} menjadi lebih sederhana, yaitu :

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &= l^2c_{11} + (m^2 + n^2)c_{44} \\ \lambda_{22} &= m^2c_{11} + (l^2 + n^2)c_{44} \\ \lambda_{33} &= n^2c_{11} + (l^2 + m^2)c_{44} \\ \lambda_{12} &= \lambda_{21} = lm(c_{12} + c_{44}) \\ \lambda_{13} &= \lambda_{31} = ln(c_{12} + c_{44}) \\ \lambda_{23} &= \lambda_{32} = mn(c_{12} + c_{44}) \end{aligned} \qquad (11)$$

Dari Persamaan (9) dapat ditunjukkan bahwa akan terdapat tiga kecepatan v yang memenuhi dan ini merupakan harga eigen (skalar) dari persamaan tersebut yang langsung dapat dihitung bila rapat massa ρ dan parameter λ_{ik} diketahui. Untuk menentukan vektor perpindahannya yang merupakan vektor eigen dari persamaan tersebut, harus digunakan Persamaan (7) yang ditulis dalam bentuk matriks, yaitu :

$$\begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \rho v^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \qquad (12)$$

atau

$$\begin{aligned} \alpha\lambda_{11} + \beta\lambda_{12} + \gamma\lambda_{13} &= \alpha\rho v^2 \\ \alpha\lambda_{21} + \beta\lambda_{22} + \gamma\lambda_{23} &= \beta\rho v^2 \\ \alpha\lambda_{31} + \beta\lambda_{32} + \gamma\lambda_{33} &= \gamma\rho v^2 \end{aligned} \qquad (13)$$

Sebagai rangkuman dari dasar teori, di bawah ini akan diberikan beberapa contoh. Bila jenis kristalnya diketahui (rapat massa dan konstanta elastisitasnya sudah tertentu), maka parameter λ_{ik} untuk gelombang tertentu (l, m dan n) dapat dihitung dari Persamaan (11). Hasilnya kemudian digunakan untuk menentukan ketiga kecepatan v_1, v_2 dan v_3 dari Persamaan (9). Selanjutnya arah vektor perpindahan (α, β dan γ) untuk setiap kecepatan ditentukan dari Persamaan (13). Hubungan antara arah gelombang dan arah vektor perpindahan menentukan jenis gelombang yang menjalar.

Bila $\alpha = l$, $\beta = m$ dan $\gamma = n$, maka gelombangnya merupakan gelombang longitudinal murni sedangkan bila $\alpha\, l + \beta\, m + \gamma\, n = 0$, maka gelombangnya merupakan gelombang transversal murni. Bila tidak memenuhi kedua persyaratan ini, maka gelombangnya merupakan gelombang sembarang. Sebagai ilustrasi di bawah ini diberikan hasil-hasil analisis untuk arah kristal [100], [110] dan [111] seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Untuk kristal kubik umumnya terdapat satu gelombang longitudinal dan dua gelombang transversal. Gelombang longitudinal mempunyai kecepatan yang paling tinggi v_1. Gelombang transversal yang lebih cepat kecepatannya v_2 lebih besar atau sama dengan gelombang transversal yang lebih lambat v_3.

Sesuai dengan judul makalah, maka yang ingin ditentukan justru arah kristalnya sehingga perlu diketahui terlebih dahulu ketiga kecepatan gelombangnya Hal ini dapat dilakukan dengan dua cara, yang satu secara grafis dan yang satu lagi dengan simulasi pada program komputer yang akan dijelaskan di bawah ini.

3. METODOLOGI

Seperti yang telah disebutkan di atas, bila jenis kristal kubik sudah diketahui misalnya alumunium [4] dengan :

$\rho = 2700\ kg/m^3$
$c_{11} = 108{,}2\ GPa$
$c_{12} = 61{,}3\ GPa$
$c_{44} = 28{,}5\ GPa$

maka untuk suatu arah kristal tertentu ketiga kecepatan gelombangnya dapat dihitung. Bila perhitungan ini dilakukan untuk semua arah kristal yang mungkin, maka kita mempunyai suatu bank data mengenai kecepatan gelombang sebagai fungsi dari arah kristal. Selanjutnya bank data ini akan dipergunakan untuk hal sebaliknya, yaitu menentukan arah kristal bila kecepatan gelombangnya sudah diukur atau diketahui. Bagaimana cara memanfaatkan bank data inilah yang dibahas di dalam makalah ini.

Ada dua cara yang bisa dilakukan, yaitu memakai beberapa grafik yang sudah ada atau menggunakan suatu program komputer yang sengaja dirancang khusus untuk keperluan ini.

Tabel 1.a. Kecepatan Gelombang pada Arah [100]

$l = 1$ $m = 0$ $n = 0$				
Kecepatan	α	β	γ	Jenis Gelombang
$\sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}}$	1	0	0	Longitudinal, v_1
$\sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}}$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	Transversal Cepat, v_2
$\sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}}$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	Transversal Lambat, v_3

Tabel 1.b. Kecepatan Gelombang pada Arah [110]

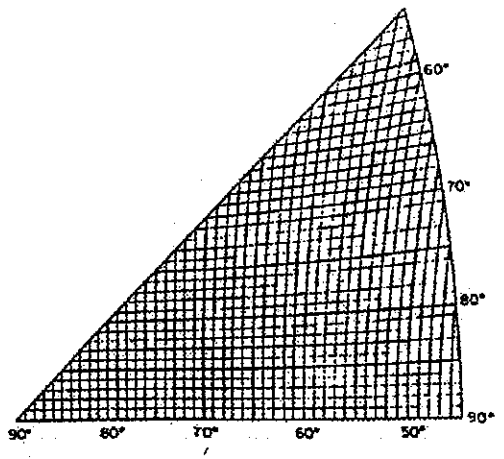
$l = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $m = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $n = 0$				
Kecepatan	α	β	γ	Jenis Gelombang
$\sqrt{\frac{c_{11}+c_{12}+2c_{44}}{2\rho}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	v_1
$\sqrt{\frac{c_{11}-c_{12}}{2\rho}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	v_2
$\sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}}$	0	0	1	v_3

Tabel 1.c. Kecepatan Gelombang pada Arah [111]

$l = \frac{1}{\sqrt{3}}$ $m = \frac{1}{\sqrt{3}}$ $n = \frac{1}{\sqrt{3}}$				
Kecepatan	α	β	γ	Jenis Gelombang
$\sqrt{\frac{c_{11}+2c_{12}+4c_{44}}{3\rho}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	v_1
$\sqrt{\frac{c_{11}-c_{12}+c_{44}}{3\rho}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	v_2
$\sqrt{\frac{c_{11}-c_{12}+c_{44}}{3\rho}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	v_3

3.1. Metoda Grafis

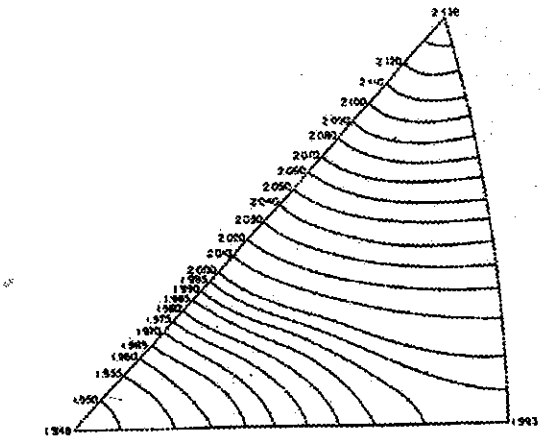
Grafik pertama yang digunakan adalah apa yang disebut sebagai segitiga stereografik standar seperti terlihat pada Gb. (1). Semua arah kristal yang mungkin sudah tercakup di dalam segitiga ini dimana absis mendatarnya merupakan sudut yang menentukan cosinus arah m dan absis vertikal melengkungnya menyatakan sudut yang menentukan cosinus arah n sedangkan cosinus arah l dapat dihitung dari hubungan $l^2 + m^2 + n^2 = 1$. Grafik yang lain juga menggunakan segitiga stereografik standar, tetapi sekarang yang digambarkan adalah kurva-kurva dengan perbandingan v_1/v_2, v_1/v_3 dan v_2/v_3 yang sama seperti terlihat pada Gb. (2), Gb. (3) dan Gb. (4). Untuk menentukan arah kristal, cukup digunakan dua dari ketiga grafik terakhir ini. Di bawah ini diberikan contoh yang menggunakan Gb. (2) dan Gb. (3). Misalkan diketahui v_1, v_2 dan v_3 masing-masing adalah sebesar 6400 m/s, 3100 m/s dan 3185 m/s. Setelah dihitung diperoleh v_1/v_2 dan v_1/v_3 masing-masing sebesar 2,065 dan 2,010. Kemudian cari garis v_1/v_2 yang sesuai pada grafik kedua dan garis v_1/v_3 yang sesuai pada grafik ketiga. Kedua garis ini selanjutnya digambarkan pada grafik pertama sehingga berpotongan pada satu titik seperti terlihat pada Gb. (5). Dari titik perpotongan ini diperoleh m = cos 73° = 0,301 dan n = cos 72° = 0,292 sehingga l = 0,905. Jadi diperkirakan arah yang paling sesuai adalah [311]. Dengan cara yang sama untuk empat arah yang lain diperoleh titik-titik potong a, b, c dan d seperti yang ditunjukkan pada Gb. (6). Hasil kelima arah ini dapat dilihat pada Tabel 2.



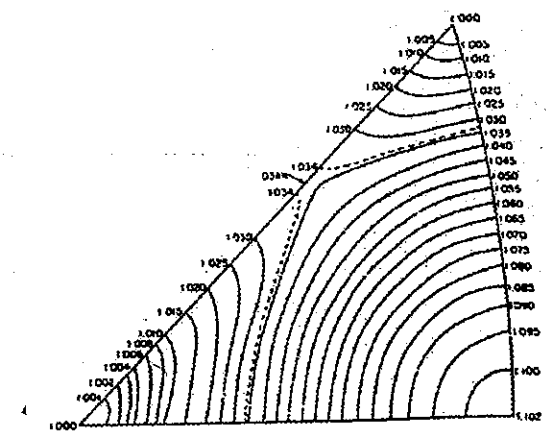
Gambar 1 Segitiga stereografik standar [3]

Tabel 2. Hasil Pengukuran dengan Metoda Grafis

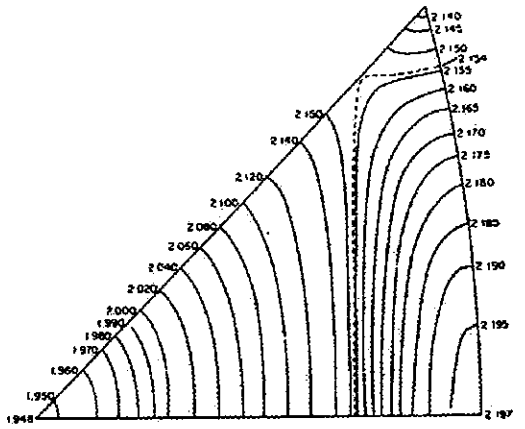
Kristal tunggal alumunium						
Arah	$\frac{v_1}{v_2}$	$\frac{v_1}{v_3}$	l	m	n	Arah Kristal
I	2,065	2,010	0,905	0,301	0,292	[311]
II	2,189	2,028	0,687	0,688	0,233	[331]
III	2,197	2,003	0,703	0,701	0,122	[661]
IV	2,106	1,992	0,883	0,446	0,148	[631]
V	1,988	1,969	0,946	0,165	0,165	[611]



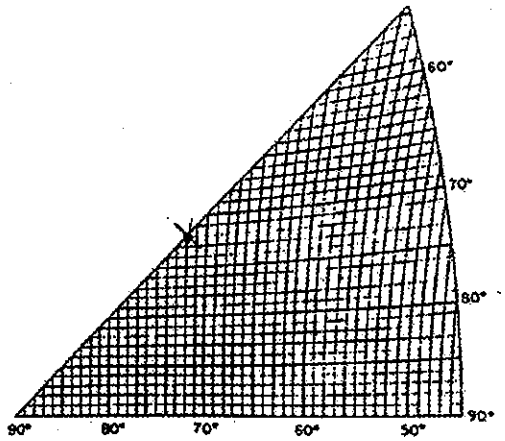
Gambar 2 Kurva V_1/V_2 untuk kristal alumunium [3]



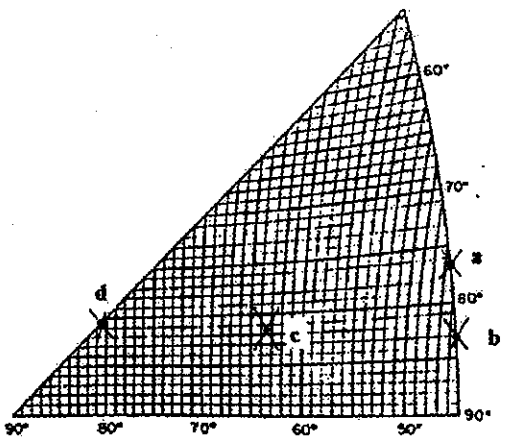
Gambar 3 Kurva V_1/V_3 untuk kristal alumunium [3]



Gambar 4 Kurva V_2/V_3 untuk kristal alumunium [3]



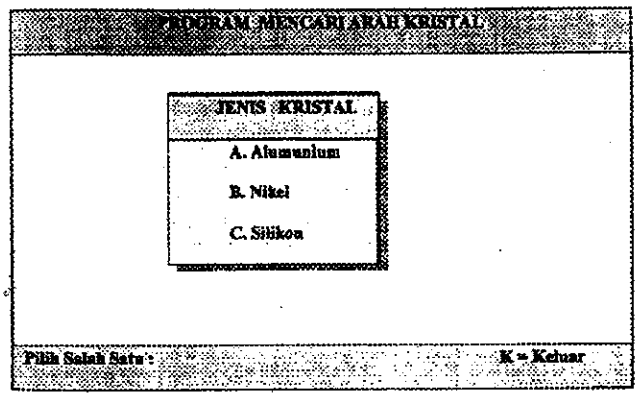
Gambar 5 Titik potong arah I pada segitiga stereografik standar [5]



Gambar 6 Titik potong arah II s/d V pada segitiga stereografik standar [5]

3.2. Metoda Simulasi Komputer

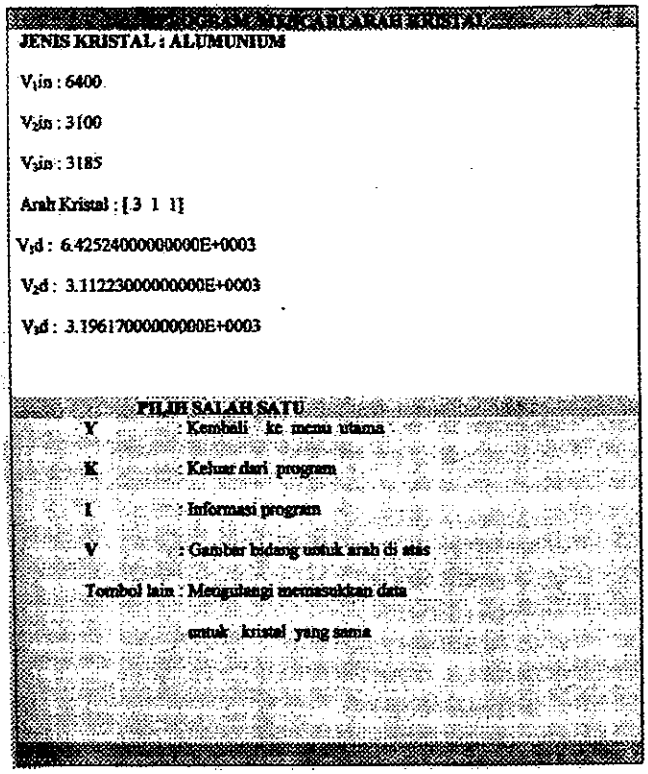
Dalam penelitian ini telah dibuat suatu paket program simulasi untuk menentukan arah pada kristal tunggal berstruktur kubik dengan menggunakan gelombang ultrasonik. Program simulasi ini dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman Turbo Pascal versi 7.0, sedangkan pembuatan basis data kecepatan-kecepatan gelombang ultrasonik untuk berbagai arah dan jenis kristal dilakukan dengan menggunakan Matlab versi 4.2. Tampilan utama dari program simulasi ini digunakan untuk memilih jenis kristal seperti yang ditunjukkan pada Gb.(7). Sesudah memilih jenis kristal, misalnya alumunium, kemudian hasil pengukuran kecepatan-kecepatan gelombang ultrasonik dimasukkan pada tampilan selanjutnya seperti yang ditunjukkan pada Gb.(8). Program komputer ini akan menampilkan arah kristal yang dicari. Selain itu, ditampilkan pula nilai kecepatan-kecepatan yang ada dalam basis data yang nilainya paling dekat dengan nilai kecepatan-kecepatan yang telah dimasukkan. Bila diinginkan selanjutnya dapat juga ditampilkan gambar bidang dari arah kristal yang telah ditentukan seperti yang ditunjukkan pada Gb.(9). Diagram alir dari program komputer ini dapat dilihat pada Gb. (10). Pada Tabel 3 ditunjukkan perbandingan hasil penentuan arah-arah pada kristal alumunium antara metoda grafis dan metoda simulasi komputer. Terlihat disini bahwa hasilnya tidak jauh berbeda.



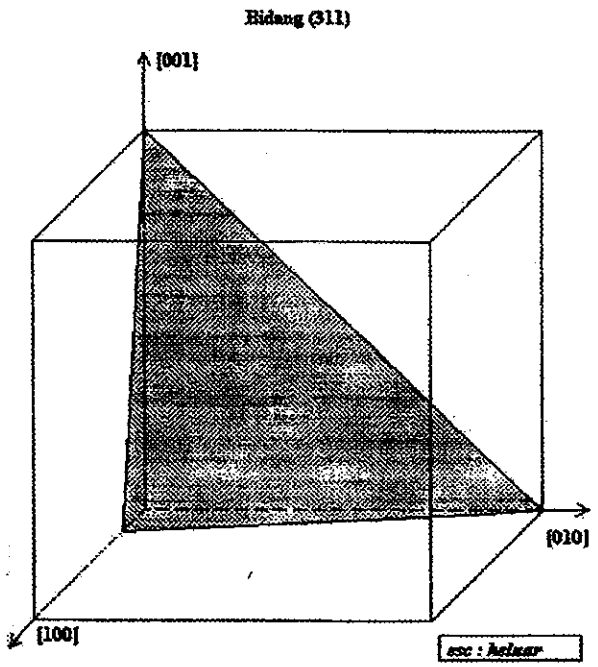
Gambar 7. Tampilan utama untuk memilih jenis kristal

Tabel 3. Perbandingan Hasil Penentuan Arah Kristal

Arah	Metoda Grafis			Metoda Simulasi Komputer		
	l	*m*	*n*	*l*	*m*	*n*
I [311]	0,905	0,301	0,292	0,904	0,302	0,302
II [331]	0,687	0,688	0,233	0,688	0,688	0,229
III [661]	0,703	0,701	0,122	0,702	0,702	0,117
IV [631]	0,883	0,466	0,148	0,885	0,442	0,147
V [611]	0,946	0,165	0,165	0,973	0,162	0,162



Gambar 8. Tampilan untuk memasukkan hasil pengukuran kecepatan dan menentukan arah kristal



Gambar 9 Tampilan gambar arah kristal yang telah ditentukan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian dan simulasi yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu :

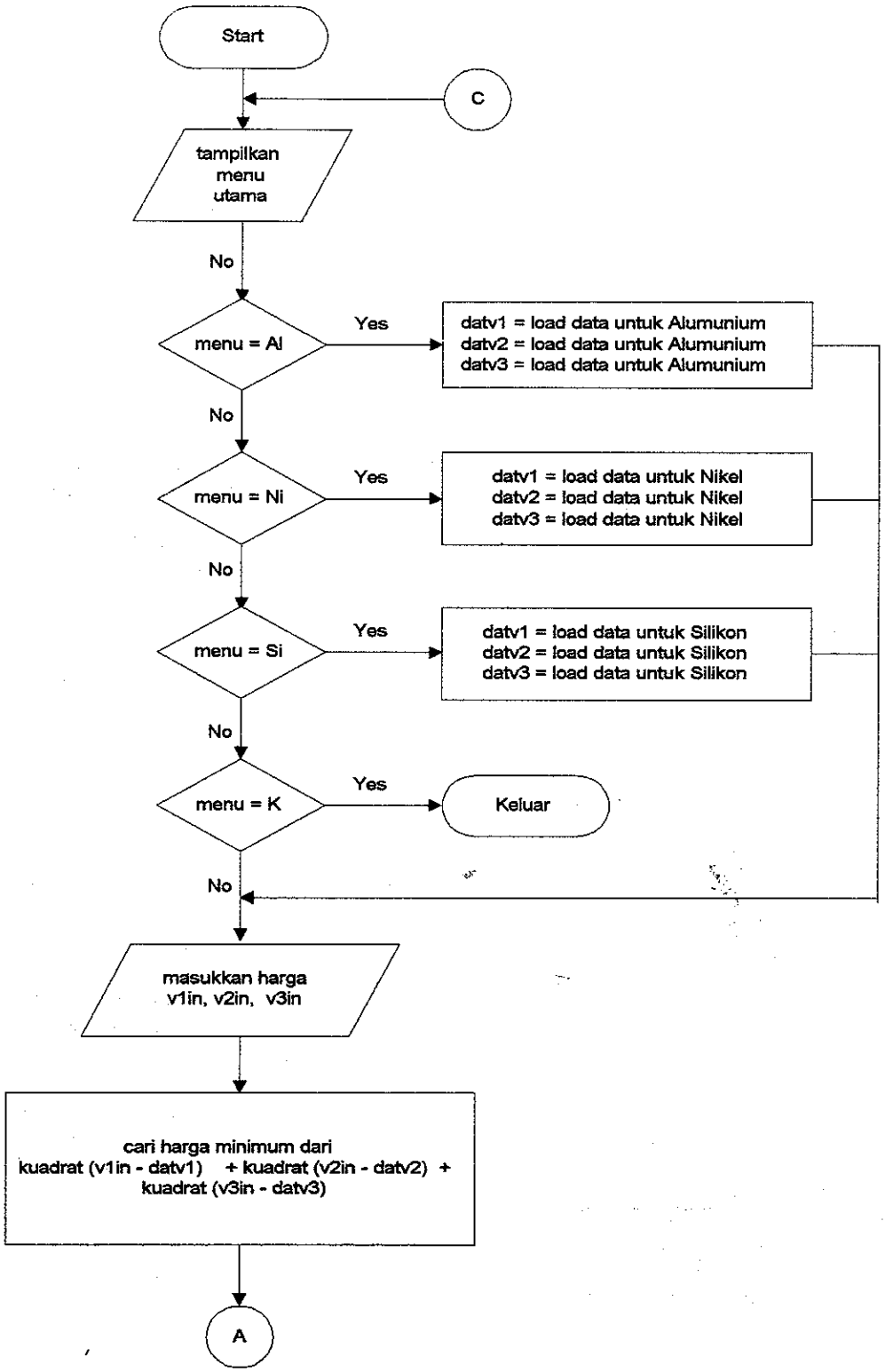
1. Arah kristal dari kristal tunggal berstruktur kubik dapat ditentukan dengan mengetahui kecepatan-kecepatan gelombang ultrasonik yang melewati kristal.
2. Kosinus-kosinus arah yang diperoleh dengan metoda simulasi komputer hampir sama dengan yang didapat dari metoda grafis sehingga indeks Miller untuk kedua metoda adalah sama.
3. Metoda simulasi komputer relatif lebih cepat dan mudah bila dibandingkan dengan metoda grafis.

Penelitian untuk menentukan arah kristal ini dapat dilanjutkan lagi, antara lain :

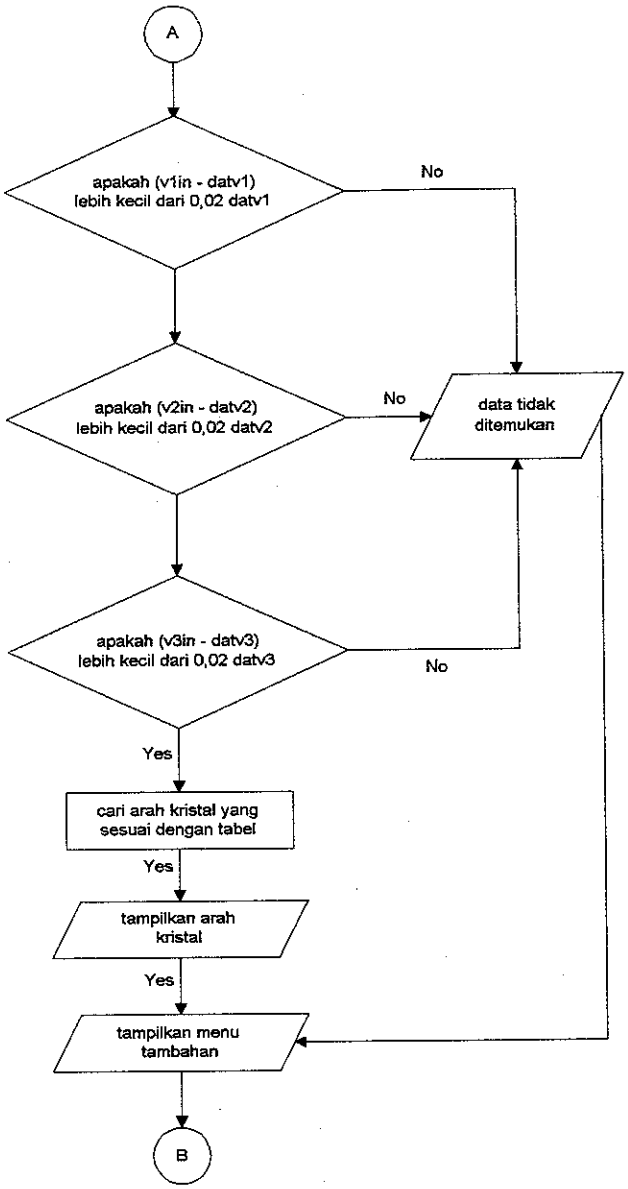
1. Menggunakan data kecepatan gelombang ultrasonik yang didapatkan dari pengukuran kecepatan yang sebenarnya, tidak lagi menggunakan data simulasi seperti yang dilakukan dalam penelitian ini.
2. Mempertinggi ketelitian dengan menambah basis data untuk arah-arah yang lebih banyak dan toleransi yang lebih kecil.
3. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk struktur kristal yang lain seperti heksagonal dan tetragonal.

DAFTAR PUSTAKA

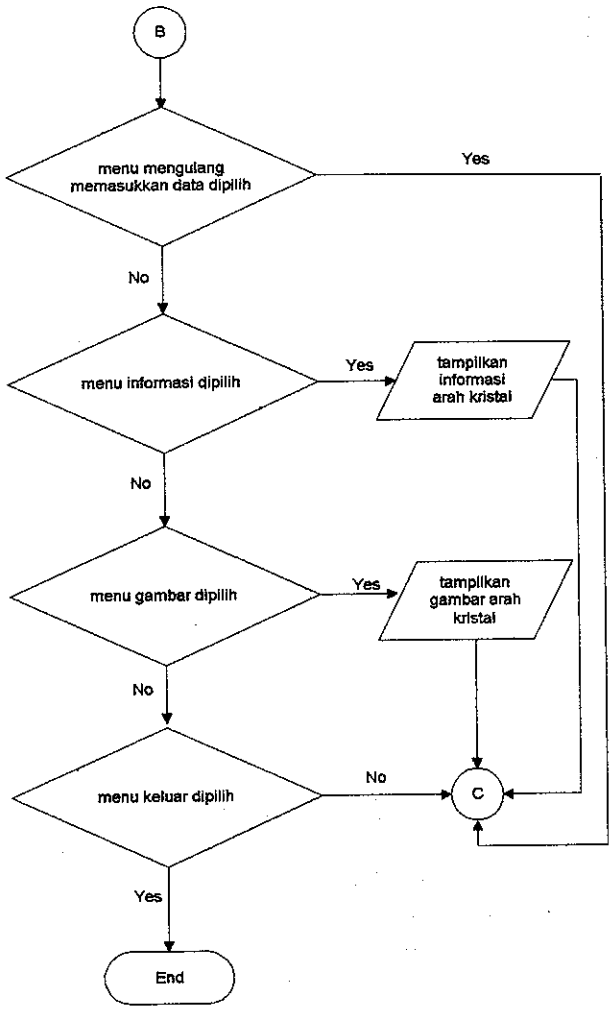
1. L.E. Kinsler and A.R. Frey, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, New York, (1962).
2. B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley, USA, (1967).
3. R.E. Green, Ultrasonic Investigation of Mechanical Properties, Academic Press, New York, (1973).
4. R. Truel, C. Elbaum and B.B. Chick, Ultrasonic Methods in Solid State Physics, Academic Press, New York, (1969).
5. B. Sugiharto, Simulasi Penentuan Arah Kristal pada Kristal Tunggal Berstruktur Kubik Menggunakan Gelombang Ultrasonik, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika ITB, (1998).



Gambar 10. Diagram alir program



Gambar 10. Diagram alir program (lanjutan)



Gambar 10. Diagram alir program (lanjutan)