

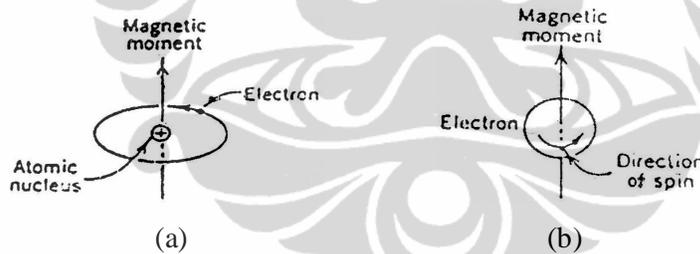
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Momen Magnet

Sifat magnetik makroskopik dari material adalah akibat dari momen momen magnet yang berkaitan dengan elektron-elektron individual. Setiap elektron dalam atom mempunyai momen magnet yang berasal dari dua sumber. Yang pertama berasal dari gerakan elektron mengelilingi inti. Elektron yang mengelilingi inti ini dapat dianggap sebagai loop arus kecil, yang menghasilkan medan magnet yang kecil pula, dan mempunyai momen magnet sepanjang sumbu rotasinya yang disebut sebagai momen magnet orbital. Hal ini diilustrasikan secara skematik pada Gambar 2.1.a. Sumber kedua berasal dari perputaran elektron mengelilingi sumbunya yang menghasilkan momen magnet spin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.b.

Momen magnet spin memiliki dua arah yaitu up dan down. Karena itu setiap elektron dalam atom memiliki momen magnet orbital dan momen magnet spin.



Gambar 2.1. momen magnet yang berhubungan dengan (a) orbit elektron
(b) perputaran elektron terhadap sumbunya [1]

2.2. Klasifikasi Material Magnet

Berdasarkan sifat kemagnetannya, material magnet dapat di klasifikasikan kedalam diamagnetisme, paramagnetisme dan ferromagnetisme[3].

Diamagnetisme adalah gejala kemagnetan suatu bahan, dimana jika suatu bahan diberikan medan magnet luar H , maka akan terinduksi dengan adanya perubahan elektron orbital yang disebabkan oleh medan magnet luar. Besarnya momen magnet induksi sangat kecil dan arahnya kebalikan dari medan magnet

luar. Material diamagnetik mempunyai susceptibilitas yang sangat kecil (dalam orde 10^{-5}) dan negatif.

Paramagnetisme adalah gejala kemagnetan suatu bahan, dimana jika bahan tersebut diberikan medan magnet luar, maka momen magnet pada bahan tersebut tersejajarkan pada arah medan magnet yang diberikan. Nilai susceptibilitasnya sangat kecil (dalam orde 10^{-5}) dan positif.

Ferromagnetisme adalah gejala terjadinya penyejajaran momen momen magnet pada suatu material karena diberikan medan magnet luar. Akan tetapi didalam ferromagnetisme terdapat interaksi pertukaran (*exchange coupling*) diantara atom atom berdekatan. Sehingga momen momen magnet dapat tersejajarkan dalam derajat penyejajaran yang tinggi. Material ferromagnetik memiliki susceptibilitas dengan nilai yang besar dan positif.

2.3. Klasifikasi *soft* dan *hard* magnetik material

Klasifikasi secara sederhana dari material ferromagnetik berdasarkan koersivitasnya dapat dibedakan menjadi dua yakni *soft* magnetik material dan *hard* magnetik material. Untuk material yang mempunyai nilai koersivitas yang tinggi disebut sebagai *hard* magnetik material sedangkan untuk material yang mempunyai nilai koersivitas yang rendah disebut sebagai *soft* magnetik material

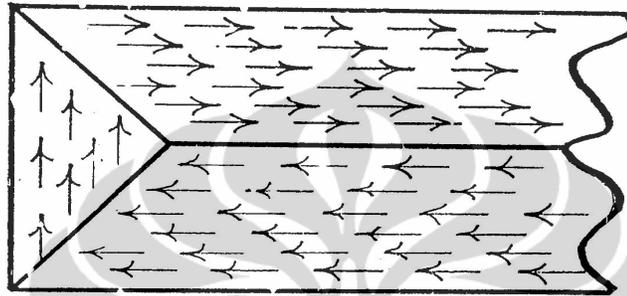
Untuk *hard* magnetik material adalah material yang mempunyai nilai koersivitas diatas 10 kA/m sedangkan untuk *soft* magnetik material adalah material yang mempunyai nilai koersivitas dibawah 1 kA/m.

Dalam bidang electromagnet besi lunak (*soft iron*) sangat banyak digunakan, koersivitasnya mempunyai nilai 80 A/m.

2.4. Domain

Bahan ferromagnetik terdiri dari bagian bagian kecil dimana tiap-tiap bagian memiliki arah momen momen magnet yang searah, bagian-bagian ini disebut domain. Momen-momen magnet tiap domain yang searah ini dikatakan telah termagnetisasi jenuh. Magnetisasi merupakan penjumlahan dari seluruh momen magnet persatuan volume. Menurut teori Weiss [2,5], jumlah momen magnet tiap domain berkisar antara 10^{12} sampai 10^{15} .

Domain-domain terdekat dibatasi oleh batas domain atau dinding domain. Dinding domain terdiri dari sederet momen magnet dengan orientasi 0° sampai 180° . Untuk material ferromagnetik terdiri dari banyak domain dimana tiap domain memiliki arah magnetisasi tertentu seperti terlihat pada Gambar 2.2. Bila bahan belum dimagnetisasi, maka jumlah vektor magnetisasi seluruh domain adalah nol.



Gambar 2.2 Domain dan dinding domain [2]

Magnetisasi merupakan salah satu karakteristik dari suatu material magnetik dan secara mikroskopis tergantung dari jumlah momen-momen magnet, dengan persamaan:

$$M = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Dengan :

M = Magnetisasi (A/m)

m = Vektor momen magnet (A/m^2)

V = Volume (m^3)

Bila seluruh momen magnet memiliki orientasi yang sama, maka dapat dikatakan sebagai magnetisasi jenuh (*saturation magnetization*).

2.5. Kurva Histerisis

Karakteristik suatu material ferromagnetik dapat dilihat dari bentuk kurva histerisis yang menggambarkan hubungan antara medan magnet luar, induksi magnet dan magnetisasi dengan persamaan:

$$B = \mu_o (H + M) \quad (2.2)$$

Dengan :

B = Induksi magnet (Tesla)

H = Medan magnet luar (A/m)

M = Magnetisasi (A/m)

μ_o = Permeabilitas ruang hampa

karena :

$$J = \mu_o M \quad (2.3)$$

Dengan J merupakan Polarisasi dalam satuan Tesla

Maka persamaan (2.2) menjadi :

$$B = \mu_o H + J \quad (2.4)$$

Kurva histerisis memiliki 2 tipe berbeda, yaitu:

1. B terhadap H (B vs H), loop histerisis disebut loop B-H
2. J terhadap H (J vs H), loop histerisis disebut loop J-H

Kedua jenis loop histerisis tersebut dapat dilihat pada gambar

Perlu diperhatikan bahwa polarisasi magnet, J , dari bahan ferromagnetik tidak selalu berbanding lurus terhadap pengaruh medan magnet luar. Material mula-mula belum termagnetisasi, sehingga dimulai dari titik asal dan kemudian bertambah. Polarisasi dalam magnet mula-mula bertambah agak terhambat karena berkenaan dengan nukleasi magnetisasi. Dalam hal ini pertambahan polarisasi magnet berkenaan dengan pergerakan dinding domain dalam butir kristal sampai tercapai butir dengan domain tunggal dan akhirnya polarisasi magnet menjadi konstan pada medan magnet tertentu. Pada saat ini polarisasi mencapai nilai maksimum, yaitu telah mencapai tingkat saturasi, J_s atau polarisasi total. Pada keadaan ini seluruh momen magnet telah terorientasi searah dengan medan magnet luar. Jadi apa yang terjadi dalam proses ini adalah suatu rotasi polarisasi terhadap arah medan magnet luar.

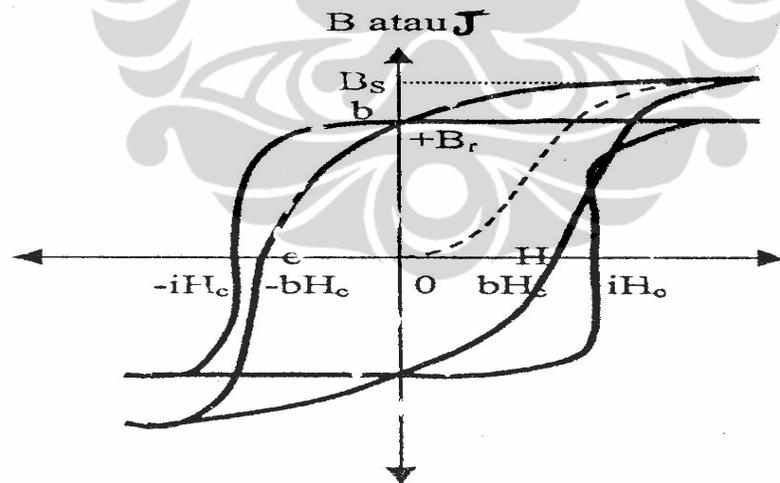
Dari keadaan saturasi, saat medan magnet luar H direduksi menjadi nol, ternyata kurva tidak kembali seperti semula tetapi memiliki fluks magnet sisa. Fluks magnet yang tersisa saat $H = 0$ ini disebut sebagai remanen. Pada keadaan ini, sebagian momen-momen magnet tidak kembali ke orientasi sebelum diberi medan luar H , sehingga material termagnetisasi sebagian.

Proses dilanjutkan dengan membalik arah medan magnet luar, dan terus ditambah sehingga dicapai nilai fluks magnet B menjadi nol. Nilai medan arah balik H pada saat $B = 0$ disebut koersivitas. Koersivitas pada loop B - H disebut koersivitas normal sedangkan pada loop J - H disebut koersivitas intrinsik. Pada keadaan ini, orientasi seluruh momen magnet kembali acak.

Medan arah balik kemudian direduksi menuju nol dan dicapai nilai remanen arah balik, $-B_r$. Proses dilanjutkan dengan medan luar positif sehingga dicapai nilai koersivitas positif H_c dan terus menuju titik magnetisasi saturasi.

Dari bentuk kurva histeresis tersebut kita dapat membedakan antara soft magnetik dan hard magnetik. *Soft* magnetik memiliki nilai koersivitas dan remanen yang kecil, sehingga bentuk kurva sangat pipih. Sedangkan untuk *hard* magnetik memiliki nilai koersivitas dan remanen yang cukup besar.

Bentuk kurva histeresis magnet permanen terlihat pada gambar 2.3. B_r ditentukan pada titik b dan koersivitas pada titik c . Kurva kuadran kedua menentukan besarnya nilai energi produk maksimum $(BH)_{max}$



Gambar 2.3 Kurva Histeresis [2]

2.6. Energi Produk Maksimum $(BH)_{max}$

Energi produk dari suatu material magnetik memegang peranan yang sangat penting terutama penggunaan magnet itu sendiri untuk keperluan industri.

Energi produk menyatakan jumlah energi yang tersimpan dalam magnet persatuan volume. Nilai energi produk sangat dipengaruhi oleh remanen, koersivitas dan bentuk kurva histerisis. Makin ideal bentuk kurva histerisis, nilai energi produk akan semakin tinggi [2,7].

Energi produk dalam hubungannya dengan kurva histerisis adalah luas pada kuadran II kurva tersebut sehingga dari persamaan (2.4)

$$(BH) = \mu_o H^2 + JH$$

Nilai maksimum dari (BH) dapat diperoleh dengan syarat $[\partial(BH) / \partial H] = 0$

$$\frac{\partial(BH)}{\partial H} = 2\mu_o H + J$$

Sehingga

$$H_c = -\frac{J_s}{2\mu_o} \quad (2.5)$$

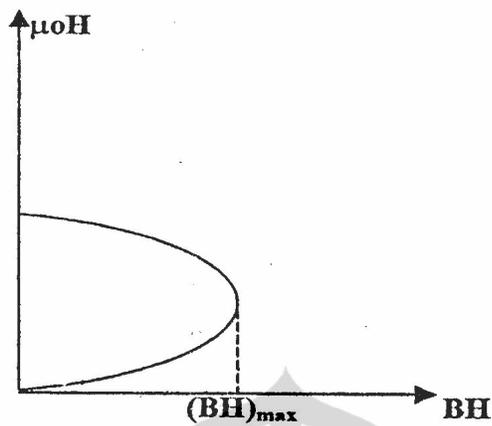
Persamaan (2.5) merupakan nilai medan arah balik yang diperlukan untuk membalik arah polarisasi J.

Maka nilai

$$BH_{max} = \mu_o \left[-\frac{J_s}{2\mu_o} \right]^2 + J \left[-\frac{J_s}{2\mu_o} \right]$$

$$BH_{max} = \frac{J_s^2}{4\mu_o} \quad (2.6)$$

Perlu diperhatikan bahwa nilai teoritis energi produk seperti persamaan (2.6) hanya berlaku untuk magnet permanen yang memiliki loop histerisis ideal dan seolah-olah tidak tergantung kepada lebar atau pipihnya loop histerisis. Dengan perkataan lain nilai $(BH)_{max}$ semata-mata ditentukan oleh nilai J_s . Hal yang sesungguhnya tidaklah demikian. Sebagai ilustrasi misal bahan ferromagnet Fe, memiliki $J_s = 2,2$ T, berdasarkan persamaan (2.6) Fe akan memiliki nilai teoritik [3] $(BH)_{max} = 962,9$ kJ/m³. Namun dalam kenyataan $(BH)_{max}$ untuk Fe mendekati nol, karena Fe termasuk *soft* magnetik. Oleh karena itu besarnya nilai $(BH)_{max}$ sesungguhnya harus diturunkan dari kurva kuadran II loop histerisis yang diperoleh secara eksperimen. Kurva $(BH)_{max}$ dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Kurva (BH) Vs μ_0H [2]

Nilai-nilai koersivitas, remanen dan energi produk beberapa alloy magnetik dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Parameter kemagnetan beberapa bahan feromagnet [2]

Material	Composition	Remanence (T)	Coercivity (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)
Steel	99% Fe, 1% C	0.9	4	1.59
36Co Steel	36% Co, 3.75% W, 5.75% Cr, 0.8% C	0.96	18.25	7.42
Alnico 2	12% Al, 26% Ni, 3% Cu, 63% Fe	0.7	52	13.5
Alnico 5	8% Al, 15% Ni, 24% Co, 3% Cu, 50% Fe	1.2	57.6	40
Alnico DG	8% Al, 15% Ni, 24% Co, 3% Cu, 50% Fe	1.31	56	52
Ba Ferrite	BaO·6Fe ₂ O ₃	0.395	192	28
PtCo	77% Pt, 23% Co	0.645	344	76
Remalloy	12% Co, 17% Mo, 71% Fe	1.0	18.4	9
Vicalloy	13% V, 35% Fe, 52% Co	1.0	36	24
Samarium-cobalt	SmCO ₅	0.9	696	160
Neodymium-iron-boron	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.3	1120	320

Tabel 2.2 Parameter kemagnetan Fe-Al dan Fe-Si [2]

% Al or Si ^{a)}	dc magnetic properties			
	μ_{20}^d	μ_{max}	H_c (Oe)	B_r (G)
1.0 Al	2041	20 214	0.329	14 101
0.94 Si	860	14 780	0.442	14 140
3.0 Al	1923	12 815	0.450	13 741
2.81 Si	1720	17 440	0.192	–
5.0 Al	2381	12 625	0.329	10 153
4.8 Si	1410	17 160	0.201	7410
8.0 Al	513	3461	0.550	3242
6.4 Si	1720	28 860	0.147	11 310
8.0 Al ^{c)}	1140	50 900	0.269	10 900
6.4 Al ^{c)}	1390	66 940	0.197	12 100

^{a)} Annealed at 1000°C in hydrogen

^{b)} $H = 30$ Oe

^{c)} Magnetic anneal at 1.7 Oe

^{d)} $B = 20$ G

2.7. Difraksi Sinar X Pada Kristal

Difraksi adalah gejala khusus dari hamburan, apabila gelombang yang terhambur berinterferensi menguatkan maka fasenya sama, hal ini terjadi jika gelombang mempunyai jarak lintasan yang sama atau berbeda sebesar kelipatan bulat panjang gelombang (ordenya sama). Persamaan yang berlaku adalah sebagai berikut

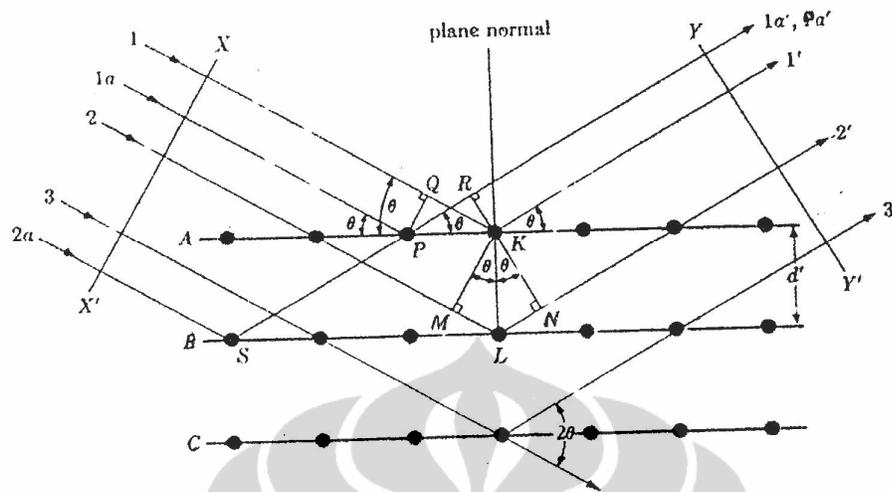
$$2 d \sin\theta = n \lambda \quad (2.7)$$

Persamaan ini dikenal dengan hukum Bragg dimana

d = jarak antar bidang

θ = sudut difraksi

n = bilangan bulat



Gambar 2.5 Difraksi sinar X oleh kristal [12]

Von Laue, tahun 1912, berpendapat jika Kristal tersusun oleh celah yang diakibatkan kisi atom, dan sinar X merupakan gelombang electromagnet yang memiliki panjang gelombang yang berorde sama dengan celah tersebut, maka memungkinkan sebuah Kristal untuk mendifraksikan sinar X.

2.7.1. Intensitas difraksi sinar X

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi intensitas difraksi sinar X yaitu faktor struktur (F_{hkl}), faktor multiplisitas (p), faktor polarisasi Lorentz ($Lpol$), faktor absorpsi ($A(\theta)$) dan faktor temperatur. Intensitas dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut

$$I = |F_{hkl}|^2 \cdot p \cdot (Lpol) \cdot A(\theta) \cdot e^{-2M} \quad (2.8)$$

2.7.2. Faktor Struktur

Dari beberapa faktor diatas, faktor struktur merupakan faktor utama yang mempengaruhi intensitas difraksi. Hal ini disebabkan karena dari data intensitas eksperimen XRD, besar faktor struktur dicari dan dibutuhkan untuk mengetahui posisi relative atom. Faktor struktur dipengaruhi oleh faktor struktur atomik (f_n) yang linier dengan berat atom (Z). Besar dari faktor struktur dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut

$$F_{hkl} = \sum_{n=1}^n f_n e^{2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)} \quad (2.9)$$

Dengan u_n, v_n, w_n adalah posisi atom

2.7.3. Faktor Multisiplitas

Faktor Multisiplitas (p) didefinisikan sebagai faktor yang mengakibatkan kemungkinan duplikasi dari bidang atom yang indeks Millernya memiliki jarak antar atom (d -spacing) yang sama. Faktor multiplisitas (p) bergantung pada system Kristal. Atau dengan kata lain, faktor multiplisitas dapat dikatakan sebagai bidang atom yang memiliki jarak antar atom yang sama.

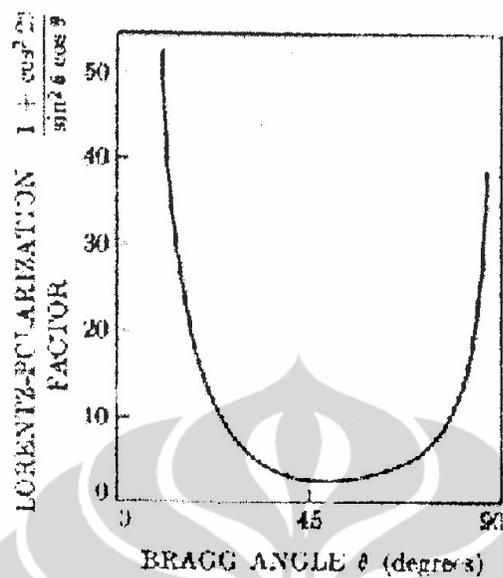
Kesamaan ini juga dipengaruhi oleh sistem dari kristal. Sebagai contoh pada kristal kubik, bidang 100 akan sama dengan bidang 001, sedang pada kristal tetragonal, bidang 100 tidak sama dengan bidang 001. Faktor multiplisitas besarnya berbanding lurus dengan besar intensitas pada bidang atom.

2.7.4. Faktor Polarisasi Lorentz

Intensitas refleksi dipengaruhi juga oleh faktor trigonometri, besar faktor tersebut besarnya sesuai dengan persamaan sebagai berikut

$$\text{Faktor Polarisasi Lorentz} = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \quad (2.10)$$

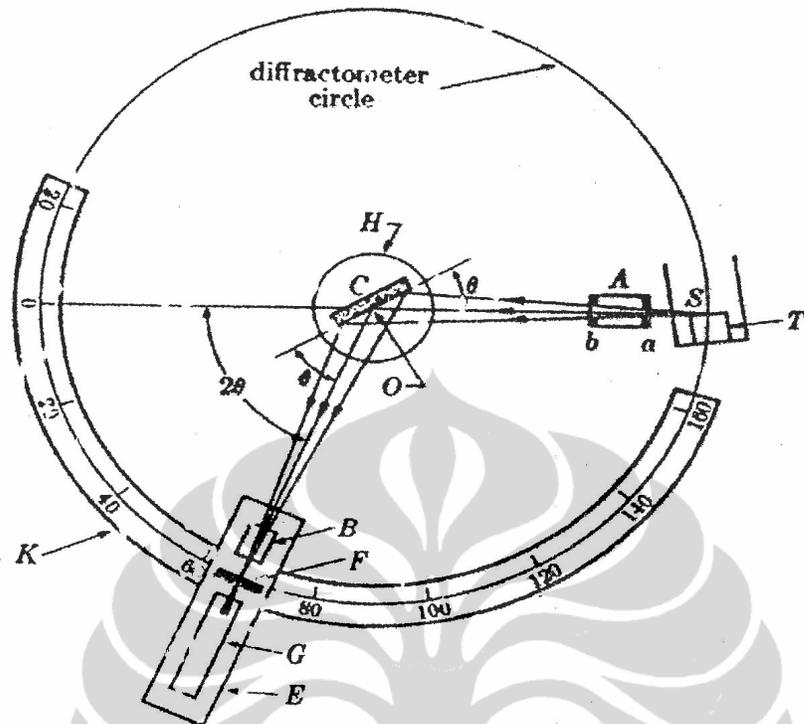
Nilai dari faktor polarisasi Lorentz merupakan fungsi dari sudut. Efek dari faktor geometri ini adalah mengecilkan intensitas refleksi pada sudut menengah dibandingkan pada awal atau akhir sudut. Kurva perbandingan antara faktor polarisasi dengan sudut Bragg dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai faktor polarisasi Lorentz mempunyai nilai minimum pada sudut 49 derajat



Gambar 2.6. Faktor polarisasi Lorentz [12]

2.7.5. Faktor Absorpsi

Faktor lain yang juga mempengaruhi intensitas difraksi adalah faktor absorpsi. Karena pada penelitian ini digunakan Difraktometer sinar-X (XRD) maka besar dari A merupakan fungsi dari sudut difraksi, sehingga faktor absorpsinya dapat dilambangkan dengan $A(\theta)$. Dengan metode difraktometer $A(\theta)$ dapat dibuat bernilai sama untuk setiap sudut refleksi dengan meletakkan sampel pada bidang datar yang berputar sebesar θ dan detektor berputar sebesar 2θ .



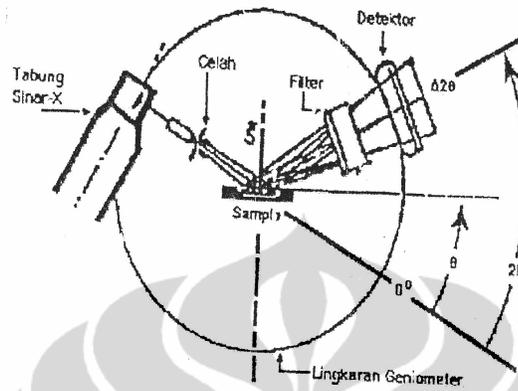
Gambar 2.7. Sudut difraksi pada difraktometer [12]

2.8. Difraktometer Sinar-X (X-Ray Diffractometer)

Pengukuran sampel yang digunakan sebagai penelitian ini diukur menggunakan difraktometer sinar-X. Metode pengukuran dengan menggunakan difraktometer dapat menentukan konstanta kisi dan sistem kristal.

Pada alat difraktometer, sinar X yang terdifraksi langsung oleh tabung pendeteksi (detektor) yang dihubungkan dengan alat analitik yang mencatat besarnya harga intensitas yang terdifraksi sebagai kurva output. Skema alat ini dapat dilihat pada Gambar 2.8 Permukaan dari sampel yang akan diuji dikenai oleh sinar X divergen dari radiasi yang monokromatis. Sampel kemudian diputar setengah kecepatan sudut putaran celah penerima, sehingga terjadi suatu sudut konstan antara sinar datang dan sinar yang dipantulkan. Celah penerima berada di depan detektor pada tabung detektor yang ikut bergerak pula. Pada bagian belakang biasanya terdapat celah hamburan untuk memastikan bahwa detektor hanya menerima radiasi dari bagian sampel yang diterangi oleh berkas sinar

utama. Intensitas yang terdifraksi dari berbagai sudut direkam dalam suatu grafik terhadap sudut 2θ .



Gambar 2.8 Skema difraktometer [12]