

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab kedua ini akan dijelaskan secara detail mengenai serat optik, *fiber coupler*, logam besi dan besi tuang, ekspansi termal dan *X-Ray Flourescent* (XRF). Pada bagian serat optik nantinya juga akan dijelaskan skema penyusun dari serat optik tersebut dan struktur serat optik serta profil indeks biasnya, dimensi *core* dan *cladding* serta perambatan sinar pada serat optik. Pada *fiber coupler* akan dijelaskan skema *fiber coupler* berstruktur simetri 2 x 2 dari bahan serat optik dengan metode *fused*. Pada bab ini juga akan dipaparkan secara jelas mengenai logam yang digunakan yaitu logam besi dan besi tuang serta pengertian dan penjelasan dari ekspansi termal yang dialami logam akibat perubahan temperatur yang diberikan. Selain itu, logam juga akan diuji *X-Ray Flourescent* (XRF) untuk diketahui komposisi unsur penyusun logamnya. Penjelasan mengenai *X-Ray Flourescent* (XRF) ini juga akan diulas secara detail pada akhir bab ini.

2.1 Serat optik

Serat optik adalah sebuah media transmisi gelombang cahaya yang terbuat dari bahan silika atau plastik berbentuk silinder. Serat optik terdiri dari bagian inti (*core*) yang dikelilingi oleh bagian yang disebut selubung (*cladding*). Bagian terluar dari serat optik disebut jaket (*coating*) yang berfungsi sebagai pelindung. Bagian *core* merupakan jalur utama

pemanduan gelombang cahaya yang mempunyai indeks bias terbesar n_1 . Sedangkan bagian *cladding* mempunyai indeks bias n_2 , yang nilainya sedikit lebih rendah daripada n_1 (Keiser, 1991). Skema bagian yang menyusun serat optik diperlihatkan pada Gambar 2.1.

Gambar 2.1. Skema bagian penyusun serat optik (Keiser, 1991)

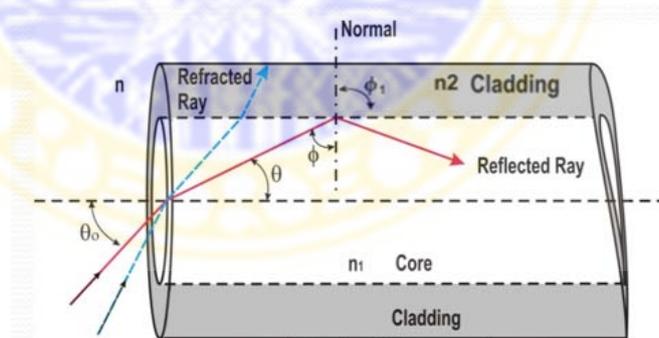
Berdasarkan struktur indeks bias bahan bagian *core*, serat optik terbagi menjadi dua jenis yaitu serat optik *step-index* dan serat optik *graded-index*. Serat optik *step-index*, bagian *core* mempunyai nilai indeks bias yang seragam, sedangkan serat optik *graded-index* bagian *core* mempunyai nilai indeks bias yang menurun secara gradual dari sumbu serat sampai ke bidang batas *cladding*. Berdasarkan jumlah moda gelombang yang terpandu, serat optik dibedakan menjadi dua yaitu serat optik moda tunggal (*singlemode*) dan moda jamak (*multimode*). Disebut *singlemode* jika hanya satu moda gelombang yang dapat dipandu dan *multimode* jika moda gelombang yang terpandu lebih dari satu (Suematzu, 1982). Perbandingan struktur serat optik *multimode step-index* dan *graded-index* serta profil indeks biasnya diperlihatkan pada Gambar 2.2.

Gambar 2.2. Struktur serat optik *multimode*, *step-index*, *graded-index* serta profil indeks biasanya (Keiser, 1991).

Secara umum, serat optik terbuat dari bahan gelas silika atau plastik. Dimensi *core* dan *cladding* untuk serat optik *multimode* dari bahan gelas seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 2.2. Untuk serat optik dari bahan plastik atau POF (*Plastic Optical Fiber*) umumnya *multimode* dengan dimensi *core* dan *cladding* berbeda dari serat optik berbahan gelas. POF mempunyai dimensi *core* jauh lebih besar dari pada *cladding*, khususnya untuk POF berdiameter *core* besar atau *large core optical fiber*. Perbedaan dimensi *core* dan *cladding* antara serat optik dari bahan gelas dan POF diperlihatkan pada Gambar 2.3

Gambar 2.3. Dimensi *core* dan *cladding* serat optik dari bahan (a) gelas *singlemode* dan *multimode* (b) POF *multimode*

Mekanisme pemanduan gelombang cahaya dalam serat optik berdasar pada prinsip pemantulan total pada bidang batas *core* dan *cladding* yang sesuai dengan hukum Snellius. Untuk memudahkan pemahaman mekanisme pemanduan gelombang cahaya dalam serat optik *step-indeks*, digunakan teori sinar dalam mendeskripsikan perambatan muka gelombang cahaya seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Sketsa perambatan sinar pada serat optik *step-index*.

Penerapan hukum Snellius dilakukan pada proses pemantulan dan pembiasan sinar pada bidang batas antara dua medium yang berbeda. Sinar yang datang dari medium rapat (n_1) ke medium kurang rapat (n_2) akan

dibiaskan menjauhi garis normal. Pada bidang batas antara *core* dan *cladding* dalam Gambar 2.4, jika sudut ϕ diperbesar secara gradual maka pada sudut tertentu sinar akan dirambatkan pada bidang batas kedua medium yaitu bidang batas *core* dan *cladding* (sinar tidak dibiaskan pada *cladding*). Sudut ϕ pada keadaan tersebut dinamakan sudut kritis yang dilambangkan dengan ϕ_c . Dengan menggunakan hukum Snellius diperoleh nilai sudut ϕ_c seperti berikut :

$$\begin{aligned} n_1 \sin \phi_c &= n_2 \sin \phi_1 && \text{dengan } \phi_1 = 90^\circ \text{ sehingga} \\ n_1 \sin \phi_c &= n_2 \sin 90^\circ \\ \sin \phi_c &= \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \\ \phi_c &= \text{arc sin} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan n_1 dan n_2 menunjukkan indeks bias *core* dan indeks bias *cladding*. Dalam ungkapan sudut θ melalui hubungan $\theta = \pi/2 - \phi$, maka sudut kritisnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\theta_c = \text{arc cos} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.2)$$

Untuk nilai sudut $\theta_c < \theta$ dalam Gambar 2.4, tidak ada sinar yang dibiaskan kedalam selubung, sehingga seluruh sinar akan terpandu dalam *core* serat optik.

Untuk mengetahui sudut sinar masukan pada bagian *core* serat optik agar sinar dapat terpandu, diterapkan hukum Snellius pada bidang batas antara *core* dan udara. Agar sinar dapat terpandu, maka sudut $\theta = \theta_c$ dan $\theta_0 = \theta_{0max}$ dengan demikian persamaan hukum Snellius menjadi :

$$n \sin \theta_{0 \max} = n_1 \sin \theta_c \quad (2.3)$$

dengan n adalah indeks bias udara yang nilainya 1. Berdasarkan persamaan (2.2), $\sin \theta_c = \frac{1}{n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ sehingga persamaan (2.3) menjadi persamaan berikut :

$$\sin \theta_{0 \max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) menunjukkan hubungan antara sudut masukan sinar dengan indeks bias ketiga medium yang berinteraksi. Hubungan tersebut dinyatakan sebagai tingkat numeris atau NA (*numerical aperture*), sehingga nilai NA serat optik dapat ditulis sebagai berikut.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.5)$$

Didefinisikan beda indeks bias antara *core* dan selubung (Δ) menurut persamaan :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (2.6)$$

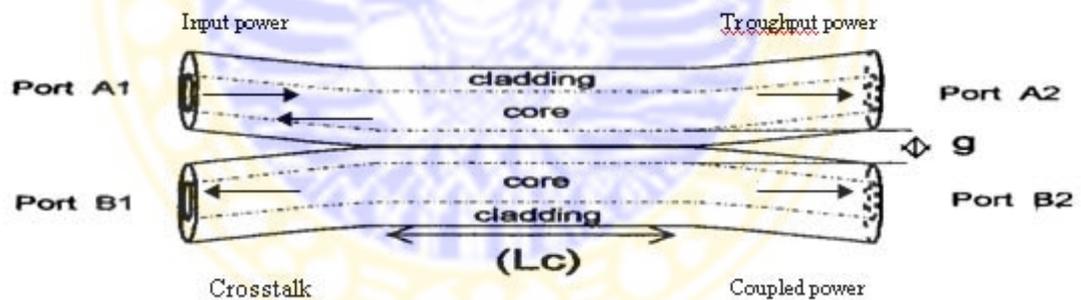
Perbedaan nilai n_1 dan n_2 sangat kecil, sehingga nilai Δ juga kecil, dengan demikian persamaan (2.6) dapat ditulis :

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.7)$$

Nilai Δ berkisar 1 % sampai 3 % untuk serat optik *multimode* dan 0,2 % sampai 1 % untuk serat optik *singlemode* (Keiser, 1991). Nilai NA untuk serat optik *step-index* berkisar antara 0,2 – 0,5, serat optik *graded-index* di sekitar 0,2 (Hoss, 1993). Untuk serat optik *step-index multimode* dari bahan plastik berdiameter *core* besar, nilai NA antara 0,3 – 0,5 (Krohn, 2000).

2.2 Fiber Coupler

Fiber coupler adalah divais optik yang berfungsi sebagai pembagi daya optik (*power divider*). *Fiber coupler* dapat dibuat dari serat optik *multimode* dengan cara menggabungkan (*fused*) kedua buah serat optik tersebut dengan panjang lintasan kopling dan lebar gap tertentu. *Fiber coupler* yang demikian disebut *fiber coupler* struktur simetri 2 x 2 yang mempunyai empat port. Serat optik *multimode* dipilih karena gejala *evanescent* yaitu penetrasi gelombang pada daerah selubung cukup besar untuk moda-moda orde tinggi, sehingga transfer daya optik antara serat optik cukup tinggi (Allard, 1990). Skema *fiber coupler* struktur simetri 2 x 2 dari bahan serat optik dengan metode *fused* diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. *Fiber coupler* struktur simetri 2x2 berbahan serat optik dengan metode *fused* (Fernando, 2007).

Prinsip kerja dari *fiber coupler* ini adalah jika port A1 bertindak sebagai port masukan, dengan mengambil analogi teori moda terkopel untuk pandu gelombang planar *singlemode*, maka sebagian berkas cahaya akan terkopel menuju port keluaran B2 dengan rasio kopling (*ratio coupling*)

tertentu saat melewati daerah interaksi kopling sepanjang L_c . Berkas cahaya yang tidak terkopel akan keluar menuju port A2. Rasio kopling ditentukan oleh panjang daerah interaksi kopling (L_c) dan lebar gap antar *core* serat optik (g) yang digabungkan. Akibat struktur penggabungan serat optik, sebagian kecil berkas cahaya dipantulkan menuju port A1 dan B1. Rasio daya optik berkas cahaya pantulan yang menuju port B1 terhadap daya optik masukan disebut *Crosstalk*. Proses kopling berkas cahaya diantara kedua serat optik menyebabkan rugi (*losses*) akibat struktur *fiber coupler*. Rugi tersebut adalah rugi keluaran atau *excess loss* yaitu fraksi daya optik keluaran terhadap daya optik masukan dan rugi sisipan atau *insertion loss* yaitu fraksi daya optik pada port keluaran B2 terhadap daya optik masukan.

Parameter-parameter *fiber coupler* sebagai devais optik yang perlu diketahui adalah *coupling ratio* (CR), *insertion loss* (L_{ins}), *excess loss* (L_e) dan *crosstalk* (C_c). Dengan mengacu pada gambar 2.5, parameter-parameter tersebut dituliskan dalam persamaan-persamaan sebagai berikut.

$$CR = \frac{P_{B2}}{(P_{A2} + P_{B2})} \quad (2.8)$$

$$L_{ins} = 10 \log \left[\frac{P_{any\ sin\ gleoutput}}{P_{input}} \right] \quad (2.9)$$

$$L_e = 10 \log \left[\frac{P_{A1}}{P_{A2} + P_{B2}} \right] \quad (2.10)$$

$$C_t = 10 \log \left[\frac{P_{B1}}{P_{A1}} \right]$$

(2.11)

Jika daya pada port A2 sama dengan daya port B2, maka nilai $CR=0,5$, disebut coupler 3 dB (Fernando, 2007).

2.3 Logam Besi dan Besi Tuang

2.3.1 Logam Besi

Penggunaan besi dan baja meliputi 95 % dari penggunaan seluruh produksi didunia dan satu-satunya logam yang memenuhi persyaratan teknis maupun ekonomis. Diperkirakan, besi telah dikenal manusia sejak tahun 1200 SM. Di beberapa bidang, penggunaannya sudah mulai disaingi oleh logam bukan besi dan bahan baku bukan logam (Rahmat Saptono,2008).

Ferro (Besi) merupakan unsur logam yang pada tabel periodik dikelompokkan dalam logam transisi. Besi (Fe) memiliki nomor atom 26 yang berarti mempunyai tingkat ionisasi Fe^{2+} dengan memiliki 2 elektron konduksi dengan massa dan jari-jari atom masing-masing 55,845(2) g/mol dan 156 pm (Wikipedia, 2010). Secara ekonomis, besi mempunyai nilai yang tinggi karena logam ini paling banyak dan paling beragam penggunaannya diantaranya kelimpahan besi di bumi yang cukup besar, pengolahannya relatif mudah dan murah serta mempunyai sifat-sifat yang menguntungkan dan mudah untuk dimodifikasi. Namun, logam Fe hampir

tidak pernah digunakan untuk aplikasi rekayasa dalam keadaan murni karena keterbatasan sifat-sifat mekaniknya.

2.3.2 Besi Tuang

Besi tuang adalah paduan berbasis besi dengan kadar karbon tinggi, yaitu 2% – 4% dengan kadar Si 0,5% – 3%. Logam Fe dan (*alloy*) paduan-nya paling banyak dan luas aplikasinya di bidang rekayasa karena kemampuannya untuk langsung dibentuk menjadi bentuk akhir (*net shape*) atau mendekati bentuk akhir (*near net shape*) melalui proses solidifikasi (*solidification*) atau pengecoran (*casting*). Logam besi sebagian besar diperoleh melalui serangkaian proses pemurnian dan reduksi biji besi. Melalui proses ini diperoleh lelehan besi mentah (*pig iron*) yang masih mengandung pengotor-pengotor, terutama karbon, silikon, mangan, sulfur dan fosfor. Paduan berbasis besi (*ferrous alloy*) yang paling banyak digunakan untuk aplikasi rekayasa adalah paduan besi-karbon dengan kandungan karbon tertentu beserta unsur-unsur paduan lainnya.

Paduan berbasis besi karbon yang juga penting adalah besi tuang atau besi tuang (*cast iron*), yaitu besi dengan kadar karbon lebih dari 2,11% hingga 4 – 6%. Besi tuang diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan struktur mikro dan sifat-sifatnya, antara lain :

a. Besi tuang kelabu (*grey cast iron*)

Adalah besi tuang dengan kadar silikon yang tinggi (>2% Si) membentuk grafit dengan mudah sehingga Fe_3C tidak terbentuk. Karbon di dalam besi tuang berbentuk lamel-lamel grafit pada waktu

membeku. Lamel-lamel itu berbentuk dedaunan dan patahan. Karena lamel-lamel grafit yang terlihat kecil dan berwarna patahan kelabu, maka disebut besi tuang kelabu. Besi tuang kelabu sangat rendah keuletannya karena adanya serpihan karbon, akan tetapi dengan adanya serpihan-serpihan ini besi tuang kelabu merupakan peredam getaran yang baik.

b. Besi tuang putih (*White cast iron*)

Dengan kadar silikon yang rendah dan kecepatan pendinginan yang tinggi, karbon di dalam besi tuang pada waktu pembekuan tidak bisa dipisahkan menjadi karbon bebas sehingga menjadi grafit dan bersenyawa dengan besi yang disebut sementit. Permukaan patahannya akan terlihat berwarna putih karena adanya lamel-lamel grafit. Sifat besi tuang putih sangat keras, getas, dan tahan aus.

c. Besi tuang ulet atau nodular (*ductile or nodular cast iron*)

Grafit yang terdapat di dalam logam berbentuk bulatan sehingga disebut besi tuang nodular. Hal ini terjadi bila ditambahkan magnesium pada cairan besi tuang. Dibandingkan dengan grafit yang mempunyai bentuk serpihan seperti daun, grafit berbentuk bulat atau mempunyai derajat konsentrasi tegangan yang sangat kecil, sehingga kekuatan besi tuang menjadi lebih baik. Sifat besi tuang nodular mempunyai keuletan yang baik, ketahanan korosi dan ketahanan panas yang baik. Unsur yang membuat bentuk fasa grafit dalam besi tuang nodular menjadi bulat selain Mg adalah Ce, Na, K, Li, Ba, dan

Sr. Tetapi berdasarkan alasan pertimbangan harga dipilih unsur magnesium yang lebih menguntungkan.

d. Besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*)

Besi tuang mampu tempa digolongkan menjadi besi tuang mampu tempa perapian putih dan besi tuang mampu tempa perapian hitam. Besi tuang perapian putih mempunyai kandungan silikon yang rendah dan belerang yang tinggi. Besi tuang perapian hitam mempunyai kandungan silikon yang tinggi dan belerang yang rendah. Besi tuang perapian putih dibuat dengan proses penghilangan karbon pada besi tuang putih, sehingga kulitnya berubah menjadi ferrit dan struktur dalamnya terdiri dari matrik perlit dengan karbon yang bulat. Besi tuang perapian hitam dibuat dengan melunakkan besi tuang putih tetapi sementit terurai menjadi ferit dan grafit sehingga patahannya terlihat hitam.

2.4 Ekspansi Termal

2.4.1 Ekspansi Linear

Tinjau sebuah benda berbentuk balok berukuran L , M , dan N pada suatu temperatur T . Jika temperatur balok itu naik menjadi $T + dT$ ukuran balok itu menjadi $(L + dL)$, $(M + dM)$, dan $(N + dN)$. Pada kebanyakan zat, perubahan relatif atau fraksional dari ukuran-ukuran panjang benda itu sama, artinya

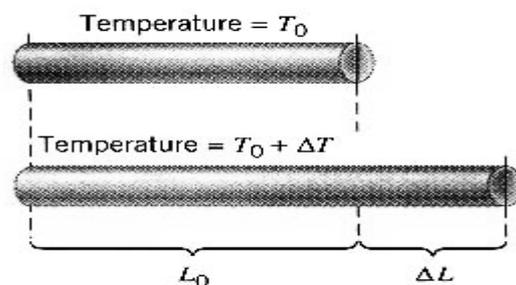
$$\frac{dL}{L} = \frac{dM}{M} = \frac{dN}{N} \quad (2.12)$$

kita definisikan koefisien ekspansi linear α suatu zat sebagai perubahan fraksional dari panjangnya persatuan perubahan temperturnya. Bila dimensi panjangnya L , maka

$$\alpha = \frac{dL/L}{dT} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (2.13)$$

$$dL = \alpha L dT \quad (2.14)$$

Koefisien muai panjang atau koefisien ekspansi linear suatu bahan berhubungan dengan daya tahan bahan tersebut terhadap perubahan temperatur secara mendadak, semakin rendah koefisien muai panas suatu bahan semakin tinggi daya tahan bahan tersebut dalam menerima perubahan temperatur secara mendadak. Setiap bahan yang dipanaskan akan mengalami pertambahan ukuran karena pemuaian. Pertambahan ukuran pada arah satu dimensi bisa disebut sebagai pertambahan panjang, pada arah dua dimensi dinyatakan sebagai pertambahan luas. Pertambahan panjang pada arah tiga dimensi dinyatakan sebagai pertambahan volume. Besar pertambahan panjang akibat kenaikan suhu masing-masing bahan berbeda bergantung koefisien muai panjang dari bahan tersebut.

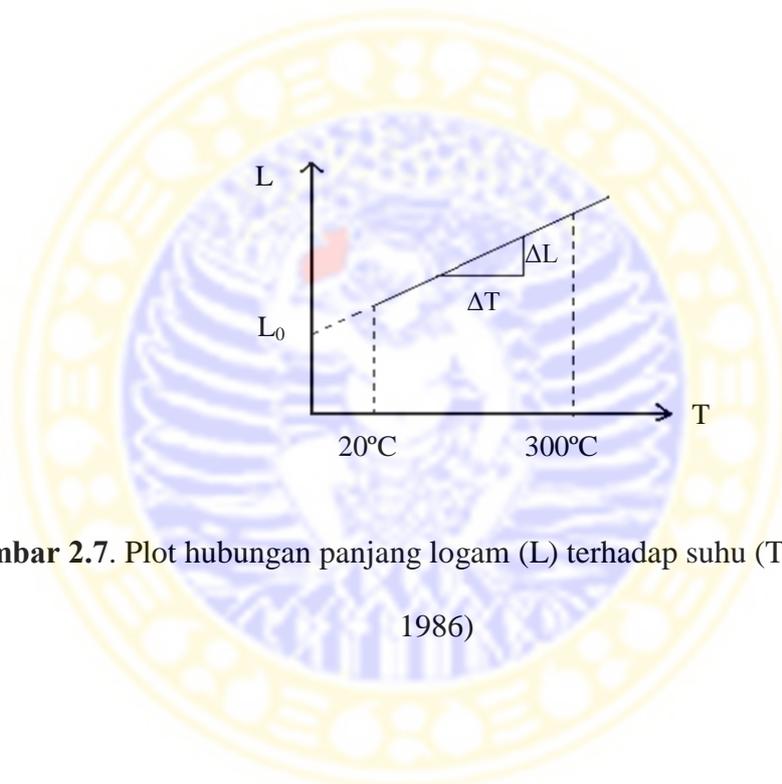


Gambar 2.6. Pertambahan panjang logam akibat perubahan suhu

(Alwar,2008).

Pemuaian yang lazim dialami oleh bahan yang mengalami pemanasan ditimbulkan oleh peningkatan getaran termal atom-atom. Pendekatan menghasilkan hubungan pertambahan panjang $\frac{\Delta L}{L_0}$ sebanding dengan kenaikan suhu Δt menghasilkan, sehingga persamaan (2.40) menjadi

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta t \quad (2.15)$$



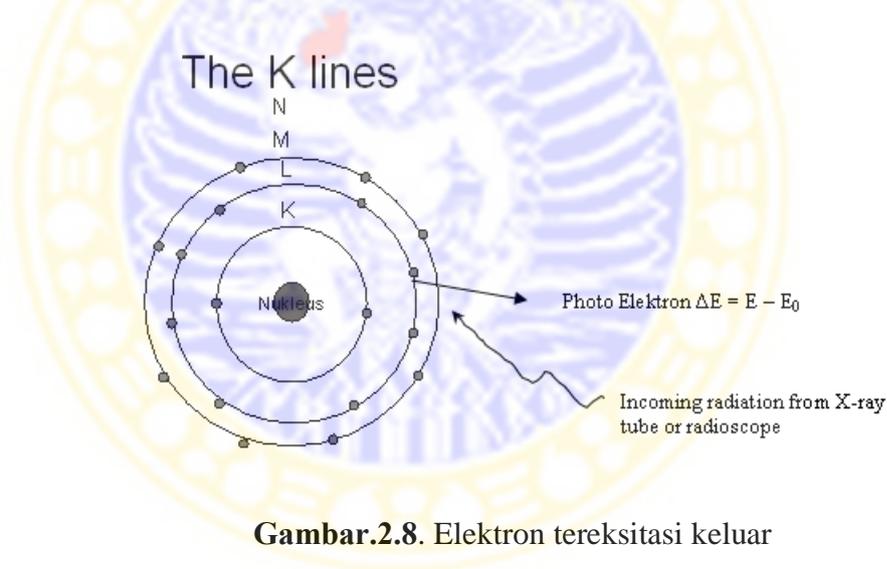
Gambar 2.7. Plot hubungan panjang logam (L) terhadap suhu (T) (Meiners, 1986)

Atom-atom suatu bahan tidak bergetar pada suhu 0°C (-273 K), pada keadaan seperti ini, atom-atom menduduki keadaan dengan energi terendah diantara tetangga-tetangganya. Bila suhu naik peningkatan energi memungkinkan atom-atom bergetar dengan jarak antar atom yang lebih besar dan kecil, hal ini mengakibatkan muai panas karena jarak rata-rata antar atom membesar.

2.5 X-Ray Fluorescence (XRF)

Ketika *x-ray* primer tereksitasi dari *x-ray tube* atau radioaktif menabrak sampel, *x-ray* dapat diserap oleh atom atau disebarkan pada seluruh permukaan material. Proses dimana *x-ray* diserap oleh atom dengan mentransfer seluruh energinya ke elektron yang paling dalam dinamakan *photoelectric effect*. Prinsip kerja XRF dapat dijelaskan sebagai berikut :

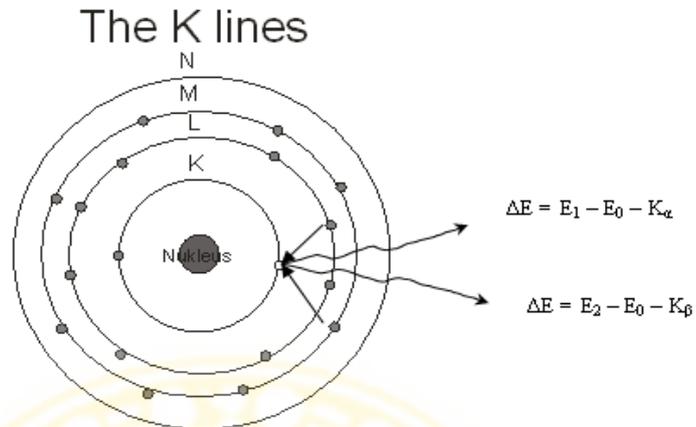
1. Selama proses jika *x-ray* mempunyai energi yang cukup maka elektron akan terlempar dari kulitnya yang lebih tereksitasi, menciptakan *vacancy* pada kulitnya , ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar.2.8. Elektron tereksitasi keluar

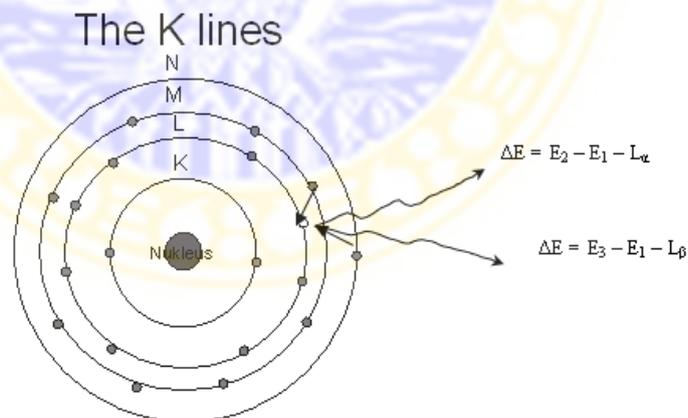
2. *Vacancy* itu mengakibatkan kondisi yang tidak stabil pada atom. Untuk menstabilkan kondisi maka elektron dari luar ditransfer untuk menutupi *vacancy* tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9. Misalnya elektron dari kulit L dan M mengisi kekosongan yang ada. Pada proses perpindahan tersebut energi dibebaskan karena adanya perpindahan dari kulit yang memiliki energi lebih tinggi (L/M) kedalam kulit yang memiliki energi paling rendah (K). Emisi yang

dikeluarkan oleh setiap material memiliki karakter khusus.



Gambar.2.9. Pengisian kekosongan elektron

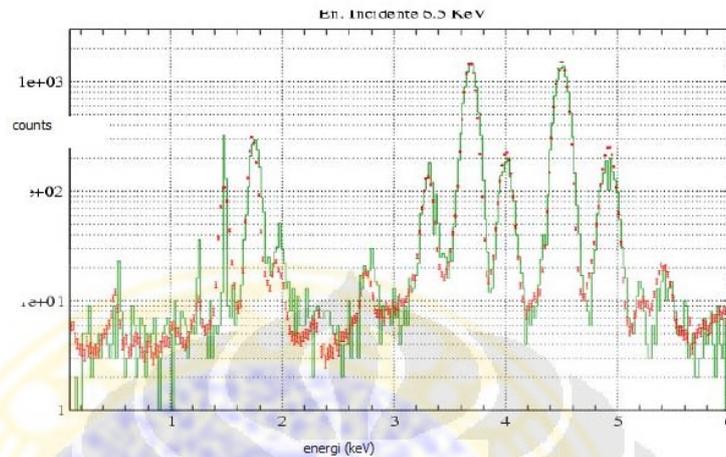
3. Proses tersebut memberikan karakteristik dari *x-ray*, yang energinya berasal dari perbedaan energi ikatan antar kulit yang berhubungan. *X-ray* yang dihasilkan dari proses ini disebut “*X-Ray Flourecence*” atau XRF (Gambar 2.10).



Gambar 2.10. Pelepasan energi

4. Proses untuk mendeteksi dan menganalisa *X-Ray* yang dihasilkan disebut “*X-ray Flourecence analysis*”.
5. Karena spektrum *X-ray* maka pada saat penyinaran suatu material

akan didapatkan *multiple peak* pada intensitas yang berbeda, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11. Contoh hasil *XRF*

6. Karakterisasi *x-ray* yang ditandai oleh K,L,M, atau N untuk menunjukkan kulit asalnya. Model yang lain yaitu alfa, beta, atau gamma dibuat untuk menandai *x-ray* yang berasal dari elektron transisi dari kulit yang lebih tinggi.
7. $K\alpha$ dihasilkan dari transisi elektron dari kulit L ke K dan *x-ray* $K\beta$ dihasilkan dari transisi elektron dari M menuju kulit K, dll.

Metoda *x-ray* banyak digunakan untuk menentukan komposisi elemen dari material. Karena metode ini cepat dan tidak merusak sampel metode ini dipilih untuk penggunaan pada aplikasi lapangan dan proses produksi pada industri untuk mengontrol material. Berdasarkan penggunaannya, *x-ray* dapat dihasilkan tidak hanya dari *x-ray* primer tapi juga sumber eksitasi primer yang lain seperti partikel α , proton atau elektron energi tinggi.