

**PUSAT PENGAJIAN KEJURUTERAAN  
MEKANIK  
UNIVERSITI SAINS MALAYSIA**

**LAPORAN PROJEK TAHUN AKHIR**

**ANALISIS RETAK DALAM PAKEJ ELEKTRONIK:  
PENENTUAN ORIENTASI DAN SUDUT RETAK**

*Disediakan Oleh*

**SAIFUL NIZAM BIN JASNI**

**NO MATRIK: 50811**

**FEBRUARI 2001**

**Disertasi Ini Dikemukakan Kepada  
Universiti Sains Malaysia  
Sebagai Memenuhi Sebahagian Daripada Syarat Keperluan Untuk  
Pengijazahan Dengan Kepujian  
SARJANA MUDA KEJURUTERAAN  
(KEJURUTERAAN MEKANIK)**

## ***PENGHARGAAN***

Bersyukur kehadiran Ilahi kerana dengan keizinan dan limpah kurniaNya maka dapatlah saya menyiapkan projek tahun akhir ini. Sekalung penghargaan buat penyelia utama saya iaitu En Abdus Samad bin Mahmud di atas segala nasihat dan tunjuk ajar yang telah diberikan membolehkan saya menerokai dunia “Pakej Elektronik” sepanjang kajian ini dilakukan. Tidak dilupakan juga kepada Prof. Madya M.S. Pascricha di atas kesudian beliau untuk menjadi penyelia kedua di dalam kajian ini.

Tidak dilupakan buat keluarga yang tercinta terima kasih di atas sokongan yang diberikan. Buat Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik yang telah memberikan kesempatan dan ruang kepada kami menggunakan peralatan di Makmal Komputer bagi menjalankan analisis yang diperlukan serta staf teknikal yang turut berjaga malam untuk memastikan kajian ini dapat disudahkan, terima kasih diucapkan. Akhir sekali kepada rakan-rakan seperjuangan yang banyak membantu, hanya Tuhan yang boleh membalas jasa kalian.

# KANDUNGAN

	Mukasurat	
<b>PENGHARGAAN</b>		i
<b>KANDUNGAN</b>		ii
<b>SENARAI RAJAH DAN JADUAL</b>		v
<b>SENARAI SIMBOL DAN SINGKATAN</b>		vii
<b>ABSTRAK</b>		ix
<b>ABSTRACT</b>		xi
<b>CHAPTER SUMMARY</b>		xiii
<b>Bab 1: PENGENALAN</b>		
<b>1.1 Pempakejan Elektronik</b>		1
<b>1.2 Objektif</b>		3
<b>1. Bab 2: KAJIAN ILMIAH</b>		
<b>2.1 Pakej</b>		4
1.1.1. Single In-Line Package (SIP)		4
1.1.2. Dual In-Line Package (DIP)		5
1.1.3. Cip Carrier		5
1.1.4. Pin Grid Array (PGA)		5
1.1.5. Small Outline		5
1.1.6. Quad Flat Package (QFP)		6
<b>2.2 Perkembangan Teknologi Pakej</b>		6
<b>2.3 Kajian Ke Atas Pakej</b>		9
<b>2.4 Kegagalan Pakej</b>		9
<b>2.5 Lokasi Dan Arah Perambatan Retak</b>		10
<b>2.6 Penghitungan Nilai G Dan K</b>		12
<b>2.7 Ringkasan Kajian</b>		12

<b>2. Bab 3: TEORI DAN PENDEKATAN</b>	
<b>2.1. Mod Mekanik Kepatahan</b>	14
<b>2.2. Konsep Retak</b>	16
<b>2.3. Pendekatan</b>	18
<b>2.4. Kadar Pelepasan Tenaga Terikan</b>	20
<b>2.5. Faktor Keamatan Tegasan</b>	23
<b>2.6. Jenis Orientasi Retak</b>	28
<b>3. Bab 4: PEMODELAN UMUM</b>	
<b>4.1 Analisis Yang Dijalankan</b>	29
<b>4.2 Kaedah MCCI</b>	30
<b>4.3 Penggunaan Perisian IDEAS</b>	32
4.3.1 Pemodelan	32
4.3.2 Analisis	33
4.3.3 Pascaproses	33
<b>3.1. Kemampuan Komputer Yang Diguna</b>	33
<b>3.2. Analisis Model Umum</b>	34
3.2.1. Analisis Tegasan Ke Atas Model Tanpa Retak Secara 3D	36
3.2.2. Analisis Tegasan Ke Atas Model 2D Tanpa Retak	37
3.2.3. Analisis Terma Ke Atas Pakej Dalam Keadaan 2D	39
3.2.4. Analisis Tegasan Retak Di Pusat	41
3.2.5. Analisis Tegasan Retak Sisi	43
3.2.6. Analisis Tegasan Terma	45
3.2.7. Rumusan	47

**BAB 5: ANALISIS KE ATAS PAKEJ**

<b>5.1</b>	<b><i>Pemodelan Pakej</i></b>	48
<b>5.2</b>	<b><i>Pasca Proses</i></b>	58
<b>5.3</b>	<b><i>Keputusan dan Perbincangan</i></b>	61
<b>5.4</b>	<b><i>Rumusan</i></b>	70
<b>5.5</b>	<b><i>Cadangan pakej masa depan</i></b>	71

## SENARAI JADUAL DAN RAJAH

### **RAJAH**

- Rajah 2.1 Model QFP dan keratan rentasnya.*
- Rajah 2.2 Perkembangan teknologi pakej.*
- Rajah 2.3 Jenis retak yang dikaji.*
- Rajah 3.1 Mekanisma yang berlaku dalam pakej sewaktu retak berlaku.*
- Rajah 3.2 Fenomena rambatan retak dalam pakej..*
- Rajah 3.3 Kecacatan eliptik pada permukaan plat.*
- Rajah 3.4 Retak tajam pada satu plat terhingga.*
- Rajah 3.5 Variasi tenaga terserap dan terbebas berpandukan panjang retak..*
- Rajah 3.6 Variasi tegasan sepanjang satah-x.*
- Rajah 3.7 Beberapa konfigurasi retak.*
- Rajah 3.8 Jenis retak yang biasa berlaku.*
- Rajah 4.1 Nod nod di hujung retak.*
- Rajah 4.2 Model 2D yang dianalisa.*
- Rajah 4.3 Tegasan ke atas model secara 3D*
- Rajah 4.4 Tegasan tanpa retak bagi model 2D*
- Rajah 4.5 Model bagi analisis terma*
- Rajah 4.6 Model analisis retak di pusat*
- Rajah 4.7 Model analisis retak di bahagian sisi*
- Rajah 4.8 Model analisis terma bagi keadaan retak*
- Rajah 5.1 Dimensi serta ukuran pakej yang hendak dikaji*
- Rajah 5.2 Keadaan pakej yang hendak dianalisa*

- Rajah 5.3*     *Gambarajah pakej yang telah di jaringkan..*
- Rajah 5.4*     *Gambarajah model dalam tegasan yang telah siap dianalisa.*
- Rajah 5.5*     *Nilai G melawan sudut puding bagi retak jenis I*
- Rajah 5.6*     *Nilai G melawan sudut puding bagi retak jenis II*
- Rajah 5.7*     *Nilai G melawan sudut puding bagi retak jenis III*

## **JADUAL**

- Jadual 4.1*     *Analisis tegasan dan terikan tanpa retak 3D.*
- Jadual 4.2*     *Analisis terikan dan tegasan bagi model 2D.*
- Jadual 4.3*     *Analisis termal ke atas pakej 2D.*
- Jadual 5.1*     *Spesifikasi bahan yang digunakan dalam pakej.*
- Jadual 5.2*     *Nilai bagi G melawan sudut puding bagi retak jenis I.*
- Jadual 5.3*     *Nilai bagi G melawan sudut puding bagi retak jenis II*
- Jadual 5.4*     *Nilai bagi G melawan sudut puding bagi retak jenis III*

## SENARAI SIMBOL DAN SINGKATAN

### *SIMBOL*

$\varphi$	Sudut Punding, dalam unit darjah
$\sigma_{\infty}$	Tegasan normal pada sempadan geometri infiniti
$U_T$	Tenaga keseluruhan bahan
$U_0$	Tenaga awal bahan
$U_e$	Tenaga anjal bahan ( <i>elastic energy</i> )
$G$	Kadar pembebasan tenaga terikan ( <i>strain energy release rate</i> )
$E$	Modulus Young
$\nu$	Nisbah Poison
$a$	Panjang retak
$\Delta a$	Panjang anjakan ataupun sesaran retak
$m$	Unit panjang, meter
$K$	Faktor keamatan tegasan
$\alpha$	Pekali pengembangan terma ( <i>coefficient of thermal expansion, CTE</i> )



## ***SINGKATAN***

BGA	<i>Ball grid array</i>
CTE	Pekali pengembangan termal ( <i>Coefficient of thermal expansion</i> )
DIP	<i>Dual in-line Package</i>
FEA	Analisis unsur terhingga ( <i>finite element analysis</i> )
IC	Litar bersepadu ( <i>integrated circuit</i> )
LEFM	Mekanik kepatahan anjal lurus ( <i>Linear elastic fracture mechanic</i> ).
MCCI	Kamiran tutupan retak terubah suai ( <i>Modified crack closure integral</i> ).
PCB	Papan litar bercetak ( <i>printed circuit board</i> )
PLCC	<i>Plastic leaded chip carrier</i>
QFP	<i>Quad flat package</i>
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i>
SMT	Teknologi pemasangan permukaan ( <i>surface mounting technology</i> )

## ***ABSTRAK***

Fenomena retak dalam pakej elektronik merupakan satu perkara yang amat serius dan membimbangkan. Fenomena ini merupakan salah satu faktor utama kegagalan dalam pakej dan mengakibatkan kerugian yang besar baik dari sudut pengguna mahupun pengeluar. Kejadian retak pada pakej akan mengakibatkan sesuatu pakej itu gagal dalam menjalankan fungsinya dengan berkesan. Oleh itu dalam kajian yang akan dijalankan tumpuan utama akan diberikan dalam menganalisa kejadian retak dalam pakej. Tumpuan khusus akan diberikan dalam mengkaji kecenderungan retak untuk berlaku dan merambat berpandukan sudut.

Dalam kajian yang akan dijalankan, analisis utama yang akan dibuat ialah mengkaji nilai kadar pelepasan tenaga terikan  $G$  dan faktor keamatan tegasan  $K$ . Dua parameter ini merupakan parameter utama yang dapat menjelaskan fenomena perambatan retak dengan jelas. Penganalisan parameter ini akan dilakukan dengan menggunakan pendekatan konsep mekanik kepatahan anjal lurus (*LEFM*) yang telah dibangunkan oleh Griffith dan Irwin. Analisa nilai  $K$  dan  $G$  akan dilakukan dengan menggunakan kaedah kiraan MCCI yang mana beberapa bacaan penting akan diperolehi berpandukan simulasi yang telah dijana.

Objektif utama yang ingin dicapai dalam analisa ini ialah untuk mendapatkan nilai atau trend yang menggambarkan kecenderungan berlakunya rembatan retak berpandukan nilai sudut. Nilai ini dapat diperolehi hasil dari graf nilai  $G$  yang diplot melawan sudut puding. Nilai  $G$  akan dikira menggunakan kaedah MCCI yang mana data utama akan diperolehi hasil dari kajian simulasi menggunakan IDEAS. Analisa kemudian akan dibandingkan dengan kajian yang telah dilakukan oleh para pengkaji terdahulu. Ini adalah penting bagi menentukan ketepatan analisa yang dijalankan.

Dalam analisis ini, perisian IDEAS Master Series 6A akan digunakan sebagai perisian utama dalam menyelesaikan model yang hendak dikaji. Penggunaan IDEAS dalam penyelesaian yang dilakukan terdiri dari beberapa peringkat iaitu peringkat pemodelan, penganalisan dan peringkat pascaproses. Dalam analisis ini IDEAS akan melakukan analisa unsur terhingga FEA dalam menyelesaikan model yang telah dibuat. Harus diingatkan penyelesaian yang dilakukan dalam analisa ini adalah berbetuk '*linear statik*' dan dalam keadaan mantap atau '*steady state*'.

**CRACK ANALYSIS IN ELECTRONIC PACKAGING:  
DETERMINATION OF ANGLE AND THE ORIENTATIONS  
OF THE CRACK.**

***ABSTRACT***

Crack phenomenon on electronic packaging is very serious and very threatening situation. These phenomenon is one of the main factor for common cause of failure on electronic packages. This failure are the primary contributor for a very huge losses suffer by the manufacturer and consumer alike. The presence of crack on electronic packages will cause the package to failed during its operation. In this analysis the main focus will be given to analyze the crack phenomenon on packages and the main subject is to focus on the tendency of a crack to propagate with respect to angle applied.

The main parameter that will be consider here will be the value of  $G$  (*strain energy released rate*) and  $K$  (*stress intensity factor*). This two parameter is the main factor that could explained the behavioral nature of crack. This parameter will be analyze using a linear elastic fracture modulus (LEFM) concept develop by Griffith and Irwin. The value of  $K$  and  $G$  will be analyze using the method of MCCI (*modified closed closure integral*) on which a few primary data will be abstract from the result obtained from simulation.

The main objective to be achieve in this analysis is, to obtained a trend that reflect the crack tendency to happened with respect to the angle applied. This can be observe as a result from the graft plotted between the value of  $G$  with respect to the kink angle. The  $G$  value will be

computed using an MCCI approach on which the primary data are obtained from the simulation result.

In this analysis, IDEAS Master Series 6A will be used as the main software to solve the model that has being made. There are three stages on using IDEAS and those are, modeling, analyzing and finally step involved pre processing. In the analysis IDEAS will be used to conduct a finite element method on solving the model. It must be made clear here that the solution done are in the form of linear static and with in a steady state condition.

# Chapter summary

## *Crack Analysis On Electronic Packaging: Determination Of*

### *The Angle And The Orientation Of The Crack*

#### *Summary*

The first chapter provides some brief introduction about packaging its function and problem faced in the packaging industries. This chapter also mentioned the objective and target to achieve from the analysis and it also include the approach that I will used in solving the problem.

The second chapter covers. The literature surveys of this related area. Its highlights in much more detail what is electronic package and what are the type of package available today, such as Single in Line Package (SIP), Dual In line Package (DIP), Chip Carrier, Pin Grid Array, Small Outline and Quad flat Package. a brief discussion on each type of this package and its function are mentioned here. It is specified in this chapter that the Quad Flat Package is the model used in this analysis. this chapter also mentions about the most recent development of electronic packaging and its evolution since a few decades ago. Other thing that will be concerned in this chapter is the failure of the package due to crack and what are the main factors that cause and influence it. A more specific analysis was done on the crack propagation due to the kink angle. It must be made cleared that a crack location is something that is unpredictable and very difficult to locate unless an experiment is carried out. It is however possible to simulate the condition of the crack by way of finite element analysis (FEA). The main parameters that will be concerned here are the value of strain energy released rate (G) and Stress intensity factor (K) on which this two parameter are the main parameter that could

explain the behavioral nature of the crack. In this analysis these two parameter will be used to estimate and explained the most likely propagation angle.

Chapter three explains in detail all type of cracks that usually occurs in material and its orientations of the crack in it. On this chapter also it will be explaining the approach used and what are the theory behind it. This analysis use the LEFM (Linear Elastic fracture Modulus) concept for consideration. There are two ways of preliminary analysis done which are using the analytical approach and simulation approach to get the value of G and K. It must be made clear that the crack behavior analyzed here is it possible propagation angle, where its location and length are defined. The main purpose of this analysis is to determine the tendency of the crack to happen with respect to the kink angle  $\phi$ . This could be determined by comparing the value of the strain energy released rate (G) with the angle. It is guesstimated that when the value of G is maximum crack is most likely to propagate at this kink angle.

Chapter four concern about simple analysis on few established geometries shape model (rectangle) using the method of analytical and simulation approach. The purpose of this approached is to proof that the concept of LEFM and MCCI application are justified and reliable.

Analytical approach can only be carried at in a simple type geometry part and if the parts are too complicated this algorithm/analytical approach would become almost impossible and very difficult to apprehend. On the other hand by using the method of FEA the problem could be solve accurately and efficiently.

QFP (Quad Flat Package) is a hybrid package and has many parts and component and very complex. Therefore the simulation approach is the best available method to use. To simplify has the analysis, simulation of the model in FEA was carried out in two dimensions without sacrificing its accuracy. The software IDEAS Master Series was used as the main software to simulate the model and generate the data. The result that obtained contain only the basic data to be used in the approach of MCCI (modified crack closure integral) method. MCCI method is the preferred method used to calculate the value of G and K. Some of the analysis carried out doing on these basic shape models are: simple stress analysis on 3D model, simple stress analysis on 2D model, Thermal analysis, stress analysis with crack on centered and stress analysis with crack at side edge.

The results obtained suggest that the analysis done through 3D or 2D the result is almost similar and the error produces by comparing to the using analytical and simulation approach is almost negligible.

Chapter five is the main focus of this analysis. Here all the steps done starting from the modeling of the package to the simulation will be briefly explained. Beside that this chapter also contains all the results and iterations that have been done. This chapter also contains few grafts plotted using the data obtained. The graft plotted show how the value of G varies with the angles applied (refer page 60, 62 and 64.).



In this analysis three type of crack condition will be studied (refer page 11). When the value of  $G$  reaches maximum with respect to the kink angle it is said that the crack will have the highest tendency to propagate. The first type (*jenis I*) will have the tendency to form crack at the angle of  $15^0$  to  $45^0$ . second type (*jenis II*) from  $-30^0$  to  $-70^0$  and finally the third type (*jenis III*) will have the tendency to propagate at  $15^0$  to  $-30^0$ . this can be seen from the graph plotted in page 60-64.

# BAB 1

## PENGENALAN

### *1.1 Pempakejan Elektronik*

Pempakejan amat penting dalam sesuatu alatan elektronik. Tanpa pempakejan sesuatu komponen itu mungkin akan mengalami kesukaran untuk berfungsi dan memainkan peranannya dengan berkesan. Tujuan utama mengapa pempakejan diperkenalkan adalah bertujuan untuk melindungi bahagian dalam cip, membuang haba yang berlebihan, menyokong bahagian dalam cip dan bermacam-macam lagi. Pempakejan ke dalam cip ada menimbulkan beberapa masalah, masalah yang dimaksudkan merupakan kegagalan bahagian pakej itu sendiri setelah beroperasi melindungi bahagian dalam cip. Sejak beberapa tahun kebelakangan ini analisis berkaitan kegagalan pakej telah berkembang dengan pesatnya. Perkembangan ini didorong oleh perkembangan dalam industri mikroelektronik yang semakin canggih dan mantap. Sebelum tahun 1980 an kegagalan pakej bukanlah satu isu utama yang diberikan perhatian. Ini kerana pada waktu itu komponen mikroelektronik yang dihasilkan adalah bersaiz besar dan tidak mudah mengalami kegagalan, namun senario ini telah mula berubah diawal tahun 90 an [Louise T. Manzione]. Perubahan ini berlaku selaras dengan trend perkembangan industri elektronik dunia yang bersaing dalam menghasilkan produk elektronik yang bersaiz kecil, ringkas, mudah dibawa dan dikendalikan. Trend penghasilan produk elektronik yang kecil ini telah memaksa banyak syarikat untuk menghasilkan satu komponen mikroelektronik yang kecil dan padat agar dapat dimuatkan ke dalam produk pelanggan mereka. Seperti yang tersedia

maklum, semakin kecil produk atau komponen yang dihasilkan semakin mudah ia untuk mengalami kegagalan. Oleh itu pihak pengeluar telah mula menjalankan analisis terperinci bagi mengatasi masalah kegagalan yang berlaku dalam pakejan elektronik. 2 masalah utama yang sering menjadi faktor kegagalan dalam pakej elektronik ialah retak dan lekang. Retak dan lekang merupakan dua fenomena yang terjadi ke atas pakej sewaktu ia didedahkan dalam satu kitar suhu yang berubah ubah yang sering berlaku dalam persekitaran pakej diletakkan. Akibat dari tindakan ini pakej biasanya akan mengalami kegagalan dalam sela masa tertentu bergantung kepada pendedahan yang telah dialami. Kemajuan dalam teknologi kajian bahan dan teknik pembuatan telah memungkinkan penghasilan pakej yang lebih berkualiti yang mampu memberikan rintangan terhadap kegagalan.

Laporan ini akan menerangkan segala aspek kegagalan pakej secara retak yang biasa terjadi. Di sini tumpuan khusus akan diberi dalam menentukan kecenderungan retak untuk berlaku berpandukan sudut serta orientasi yang dikenakan. Laporan ini juga akan menyatakan pendekatan yang akan digunakan dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi, dalam konteks ini pendekatan berpandukan konsep mekanik anjal lurus (*LEFM*) akan digunakan, konsep ini akan diterangkan dengan lebih lanjut dalam bab yang akan datang. Selain dari itu laporan ini juga akan menyentuh serba sedikit tentang penggunaan perisian IDEAS Master Series 6A dalam menyelesaikan masalah secara simulasi. Beberapa pemodelan umum akan dilakukan menggunakan perisian ini bagi menunjukkan pendekatan simulasi yang digunakan adalah tepat dan bagaimana keputusan yang diperolehi dapat dibanding secara analitik untuk menguji ketepatan analisis yang dijalankan.

## ***1.2 Objektif***

Tujuan sebenar dalam menjalankan analisis ini adalah untuk memenuhi keperluan syarat pengijazahan universiti yang mensyaratkan agar kesemua pelajar tahun akhir menjalankan satu projek sebelum mereka diijazahkan, namun begitu, projek yang dilakukan ini merupakan satu pendedahan awal yang dapat diberikan kepada pelajar dalam menjayakan sesuatu projek. Tajuk projek tahun akhir yang akan dijalankan ini adalah “Analisis retak dalam pakej elektronik: penentuan orientasi dan sudut retak”. Objektif utama yang ingin dicapai dalam analisis yang dijalankan adalah seperti berikut :

- Mengenal pasti jenis pakej elektronik yang ada dan mengetahui fungsi pakej dalam industri mikroelektronik.
- Menganalisa kegagalan pakej yang diakibatkan oleh retak.
- Mengetahui bagaimana konsep mekanik kepatahan diaplikasikan ke dalam analisis yang dijalankan.
- Menganalisa parameter yang mempengaruhi keretakan pakej, iaitu nilai G dan K.
- Mempelajari pengaplikasian penggunaan kaedah kamiran tertutup MCCI dalam mengira nilai G.
- Mempelajari kaedah simulasi dan pemodelan menggunakan perisian IDEAS Master Series 6A.

# BAB 2

## Kajian Ilmiah

### 2.1 Pakej

Pakej elektronik merupakan pakej yang biasanya terdiri dari satu komponen kerangka modulu (*lead frame*), pendawaian litar (*wire bonding*), dan beberapa komponen tambahan lain yang mungkin terdapat pada pakej bergantung kepada jenis dan rekaan pakej yang dihasilkan. Antara pakej yang biasa diperhatikan ialah:

- 1). Single-in-line package
- 2). Dual-in-line package
- 3). Chip carrier
- 4). Pin grid array
- 5). Small Outline
- 6). Quad flat package

#### 2.1.1 Single-In-Line Package (SIP)

Pakej ini biasanya dikenali sebagai SIP, ia menggunakan satu rangkaian kerangka yang memanjang dari satu bucu ke bucu. Pada kebiasaanya kerangka pakej ini adalah dari jenis '*through hole*' dan ia akan diletakkan di atas papan litar bercetak '*PCB*'

### *2.1.2 Dual-In-Line Package (DIP)*

Pakej jenis ini merupakan rekaan pakej yang amat popular. Dalam pakej ini kerangka yang digunakan adalah memanjang sepanjang satu garis lurus dari dua bucu badanya. Pada kebiasaannya pakej jenis ini adalah berbentuk segiempat yang mana kerangka berada pada semua sisinya. Kebanyakan DIP dihasilkan menggunakan kaedah 'through hole' namun kaedah SMT 'surface mount' juga dapat digunakan dalam proses penghasilannya.

### *2.1.3 Cip Carrier*

Pakej ini mempunyai kerangka modulu di setiap sisi, model ini biasanya digunakan kerana kesesuaiannya dalam mengendalikan 'high-pin-count device'. Terdapat dua jenis 'cip carrier' iaitu *leaded cip carrier*, dan *leadless cip carrier*.

### *2.1.4 Pin Grid Array (PGA)*

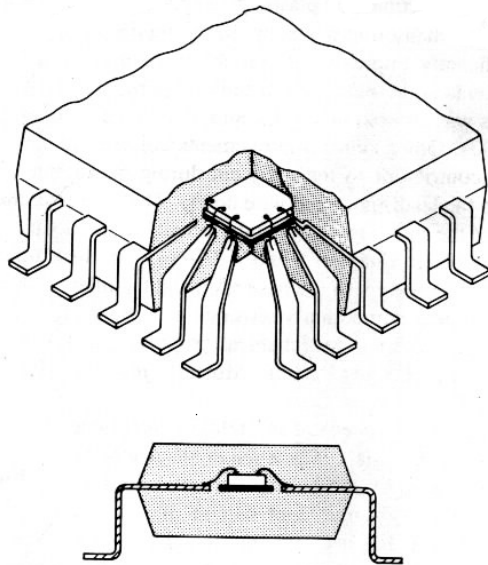
Ia merupakan salah satu jenis *cip carrier* namun di dalamnya terdapat beberapa konfigurasi yang berlainan dari yang telah dinyatakan di atas. Apa yang berlainan tentang PGA adalah kedudukan kerangka pakej yang tidak hanya terletak pada bucu pakej.

### *2.1.5 Small Outline*

Pakej jenis ini biasanya dipanggil samada SO, SOP atau SOIC. Apa yang membezakan ia dengan pakej yang lain ialah, ia mempunyai satu 'footprint' [*manzione*] yang agak kecil pada papan litur.

### 2.1.6 Quad Flat Package(QFP)

QFP merupakan satu pakej yang mempunyai 'pitch' yang sangat halus dan ia merupakan satu versi LCC berbadan nipis. Ia mempunyai struktur kerangka yang mengelilingi bahagian tepi pakej. Jarak antara kerangka biasanya tidak melebihi 0.05 inci berbanding dengan PLCC [Louise.T.Manzione]. Terdapat 2 jenis QFP iaitu yang terdiri dari plastik atau seramik. Gambarajah di bawah menunjukkan satu model QFP dan keratan rentasnya. Model ini akan digunakan sebagai model kajian yang dilakukan.



Rajah 2.1: Model QFP dan keratan rentasnya

## 2.2 Perkembangan Teknologi Pakej

Trend penggunaan litar bersepadu (IC) berkembang dengan pesatnya dalam dunia pada masa kini. Ini dapat diperhatikan dengan trend penggunaan litar bersepadu IC dalam komponen elektrik dan elektronik yang mana ia digunakan secara meluas

dalam hampir setiap peralatan elektronik yang ada. Trend perkembangan ini dijangkakan akan terus bersemarak dalam beberapa dekad yang akan datang jika dilihat dari kajian semasa yang dijalankan oleh para penyelidik di seluruh dunia dalam memajukan industri pakej. Beberapa dekad yang lalu telah menyaksikan perkembangan teknologi pakej yang amat mendadak hasil dari kajian yang telah dijalankan.

Tahun 70-an menyaksikan penggunaan teknologi '*through hole*' dalam pakej elektronik diaplikasikan. Senario ini telah berubah di sekitar awal 80-an yang memperlihatkan penggunaan teknologi '*surface mount*' dalam menghasilkan pakej. Tahun 90 an pula menyaksikan perubahan dalam penggunaan kerangka modulu yang terdiri dari '*parameter leaded*' kepada '*ball grid array*' selain dari itu perubahan juga dicatatkan dalam kaedah penggunaan dawai-dalaman "*wire bonded*" dan "*die attached*" kepada "*tape bonding*" dan "*flip chip*" Rajah 2.2 menunjukkan trend perkembangan teknologi pakej beberapa dekad yang lalu.





## ***2.3 Kajian Ke Atas Pakej***

Penghasilan pakej elektronik biasanya dilakukan dalam beberapa peringkat. Secara umumnya ia terdiri dari 3 peringkat iaitu penghasilan wafer silika yang mengandungi litar bersepadu, Penggabungan beberapa komponen IC seperti cip, pad cip, pendawaian, kerangka modulu dan epoksi dalam satu pakej dan pemasangan IC dan komponen elektronik lain kedalam ke atas papan litar bercetak (*printed circuit board PCB*) sebelum dipasangkan ke dalam peralatan elektrik dan elektronik.

Proses penghasilan pakej tidak begitu banyak mengalami kesukaran di awal tahun 70-an dan tahun 80-an, ini kerana pada waktu itu pakej yang dihasilkan adalah besar dan mudah untuk difabrikasi. Namun permulaan tahun 90-an telah menyaksikan perkembangan teknologi pakej yang berkembang dengan begitu mendadak, disekitar tahun ini penghasilan komponen elektronik bersaiz kecil telah mula diperkenalkan dan ini telah memaksa para pengeluar untuk menghasilkan cip dan pakej yang mempunyai saiz yang kecil. Disebalik perkembangan ini, masalah telah mula dihadapi oleh para pengeluar dalam memfabrikasi pakej yang dikehendaki. Masalah yang dihadapi oleh para pengeluar adalah kegagalan yang berlaku ke atas pakej. Kegagalan paling ketara sewaktu pempakejan dilakukan adalah yang disebabkan oleh retak dan lekang yang berlaku di dalam pakej akibat dari saiz pakej yang terlalu kecil. Saiz yang kecil ini telah membuatkan sebarang bentuk kegagalan yang bersifat minor pada pakej yang bersaiz besar berkeadaan kritikal pada pakej yang bersaiz kecil.

## ***2.4 Kegagalan Pakej***

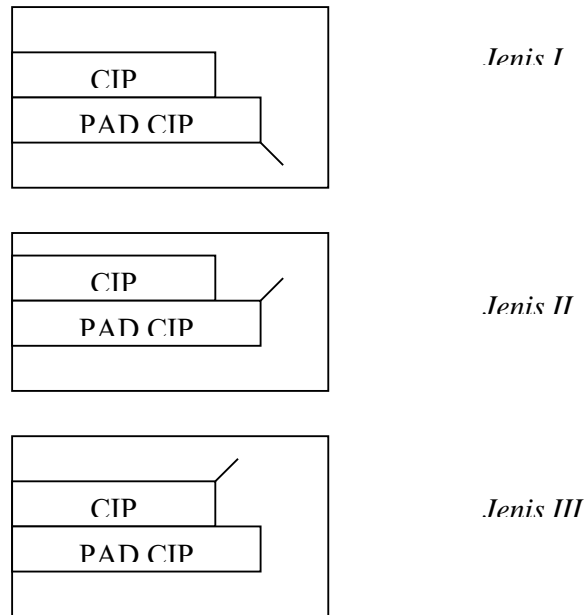
Kelekangan antara dua muka merupakan satu masalah umum yang biasa diperhatikan dalam satu komponen hibrid. Dalam kajian yang dijalankan, model QFP yang

digunakan boleh didefinisikan sebagai satu komponen hibrid. Oleh itu kegagalan berbentuk lekang akan menjadi satu faktor utama kegagalan bagi komponen ini. Kelekangan yang terhasil di dalam pakej akan mengakibatkan ia untuk merambat dengan lebih panjang lagi dan ini akan mengakibatkan proses keretakan untuk berlaku. Pada kebiasaanya kelekangan yang dihasilkan dalam pakej adalah disebabkan oleh tekanan higro kelembapan yang terjadi sewaktu proses 'solder reflow' dilakukan. Dalam proses ini pakej akan didedahkan kepada suhu yang mencecah 215<sup>0</sup>C dan akibat dari proses ini lembapan yang tersimpan di dalam bahan perekat antara muka akan mengembang dan akan mengaruhkan tegasan yang mengakibatkan kelekangan. Dalam kajian yang dijalankan pakej akan didedahkan kepada suhu yang berubah-ubah antara -55<sup>0</sup>C hingga ke 150<sup>0</sup>C ini bagi menggalakkan proses kitaran tegasan terma untuk berlaku. Tujuan utama bagi langkah yang hendak dijalankan adalah untuk meggalakkan perambatan lekang dan retak supaya terjadi.

## ***2.5 Lokasi Dan Arah Perambatan Retak***

Mengenal pasti lokasi lekang dan retak merupakan satu perkara yang amat sulit dan sukar. Ini kerana tempat berlakunya kejadian lekang adalah ditentukan oleh kejadian tegasan higro yang terbentuk. Terdapat pelbagai kombinasi dan kemungkinan dimana berlakunya kejadian lekang ini. Oleh itu kejadian retak dan lekang ini hanya dapat ditentukan dengan menggunakan alatan ujikaji seperti " *scanning electron microscopy*", dan " *X-ray analysis*". Walaupun begitu keadaanya ramalan menggunakan unsur terhingga masih dapat digunakan dalam menganalisa kejadian retak seperti yang telah dikemukakan oleh Lee dan Earmme. Dalam analisa yang akan dijalankan 3 jenis kejadian retak akan dikaji iaitu retak *jenis I* yang terjadi dari lanjutan kelekang

yang terbentuk di bawah bucu pad, *jenis II* yang terbentuk di bucu atas pad cip dan *jenis III* yang terjadi di bucu bahagian atas cip. Arah kecenderungan akan diramal menerusi simulasi dengan memplotkan nilai kadar pembebasan tenaga terikan,  $G$  berbanding sudut punding  $\phi$ , sudut  $\phi$  diramalkan sebagai arah perambatan retak bilamana  $G$  mencecah maksimum.



*Rajah 2.3 : Jenis retak yang dikaji*

## ***2.6 Penghitungan Nilai G Dan K Menerusi Simulasi.***

Nilai G dan K merupakan dua parameter utama yang dapat menerangkan kejadian retak yang terjadi. K merupakan singkatan bagi faktor keamatan tegasan dan G pula merupakan singkatan bagi nilai kadar pembebasan tenaga terikan. Kedua-dua faktor ini saling berkaitan antara satu sama lain dalam menerangkan keadaan retak yang terjadi. Perkaitan antara kedua-dua parameter ini dihubungkan melalui persamaan berikut,  $K = \sqrt{GE}$  persamaan ini hanya sah digunakan bagi bahan yang bersifat isotropik dan berada dalam keadaan anjal lurus pada tegasan satah.

Dalam kajian yang dijalankan perhitungan nilai G dan K akan dibuat dengan menggunakan 2 cara iaitu dengan menggunakan kaedah analitik dan simulasi. Kaedah penyelesaian menggunakan kaedah analitik hanya terhad kepada penyelesaian yang mempunyai bentuk geometri yang mudah sahaja. Dalam kajian yang dijalankan bentuk pakej yang hendak dikaji berbentuk agak kompleks yang terdiri dari satu komponen hibrid. Analisa bagi kajian yang dijalankan akan dilakukan menggunakan kaedah simulasi yang mana penyelesaian akan dibuat dengan menggunakan kaedah MCCI.

## ***2.7 Ringkasan Kajian***

Daripada kajian yang telah dilakukan didapati pakej plastik yang digunakan dalam pempakejan komponen elektronik terdedah kepada pelbagai jenis dan bentuk kegagalan yang ada. Dalam kajian ini bentuk kegagalan secara patah yang diakibatkan oleh lekang dan retak akan diberi tumpuan khusus dimana segala faktor penyebab kegagalan pakej secara ini akan diberi tumpuan secara intensif.

Dalam analisa yang akan dijalankan pendekatan konsep secara mekanik kepatahan anjal lurus akan digunakan sebagai pendekatan dalam menyelesaikan model yang hendak dikaji dan dalam kajian yang dijalankan juga skop analisis hanya akan dihadkan dalam lingkungan teori mekanik kepatahan anjal lurus (*LEFM*). Dalam konteks ini ia bermaksud penyelesaian ke atas model pakej yang hendak dikaji akan dilakukan secara anjal lurus (*linear elastic*) dan berada dalam keadaan mantap (*steady state*).

Dalam menerangkan konsep kejadian retak yang terjadi, dua parameter utama akan diperkenalkan, iaitu nilai  $G$  (*strain energy release rate*) dan  $K$  (*stress intensity factor*). Kedua-dua parameter merupakan parameter yang dapat menjelaskan kejadian keretakan pada pakej. Nilai  $G$  dan  $K$  boleh diperolehi hasil dari pengiran secara analitik ataupun secara simulasi. Dalam kajian yang dijalankan nilai  $K$  dan  $G$  akan diperolehi dengan menggunakan kaedah simulasi dimana model yang hendak dikaji akan dimodelkan menggunakan perisian IDEAS Master Series 6A yang terdapat dalam makmal pusat pengajian. Dalam analisis ini model yang hendak dihasilkan ialah satu model pakej dari jenis QFP. Model ini akan dianalisa menggunakan kaedah unsur terhingga (*finite element analysis*) di dalam perisian IDEAS. Keputusan yang diperolehi hasil dari analisa ini akan digunakan dalam mengira nilai  $G$  dan  $K$ .

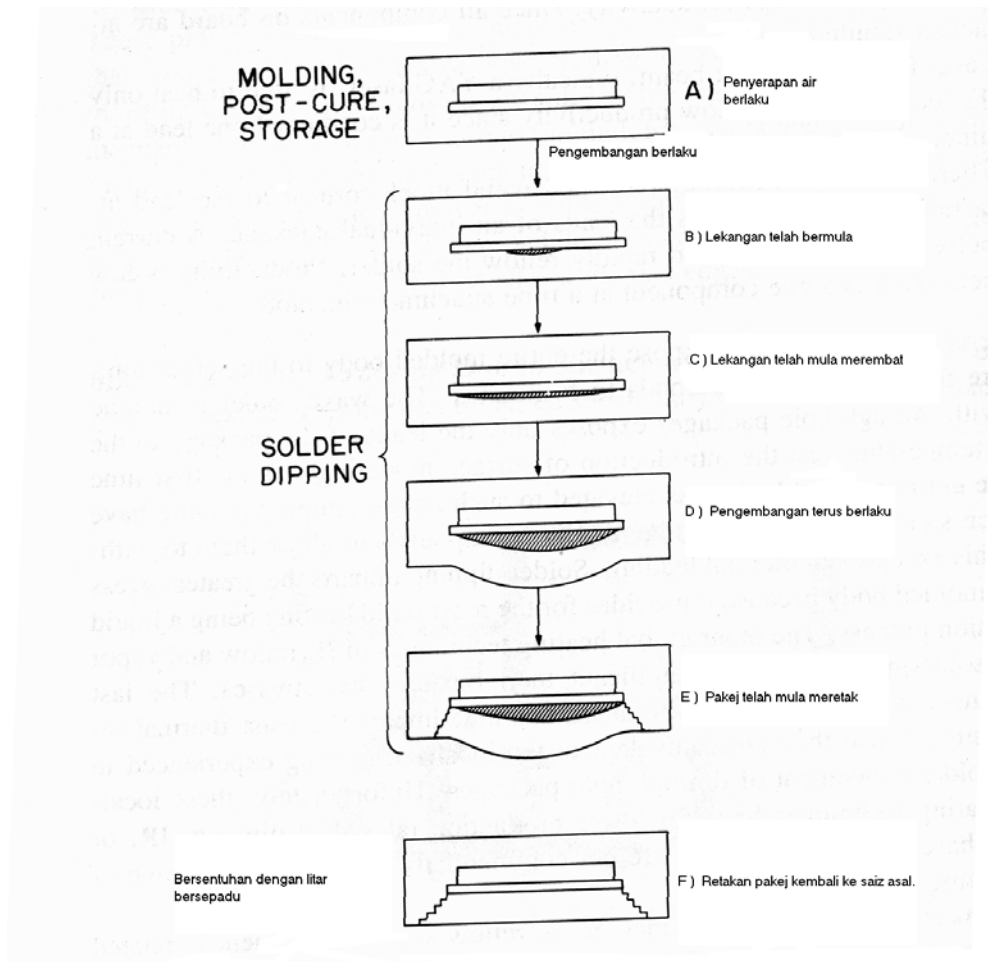
# BAB 3

## Teori Dan Pendekatan

### *3.1 Mod Mekanik Kepatahan Pakej*

Tekanan higro-kelembapan yang terjadi ke atas pakej ketika suhu tinggi akan mengakibatkan kelekangan. Ini dikaitkan dengan kadar kandungan kelembapan yang terperangkap dalam pakej sewaktu proses pembuatannya. Ketika proses “*solder reflow*” dilakukan, pakej akan dipanaskan hingga mencecah suhu 200 °C, ini seterusnya menggalakkan terjadinya pengembangan kelembapan yang ada, yang mana akan mencetuskan tegasan dalam bahan. Tegasan ini terjadi apabila terdapat sebahagian daripada molekul air yang wujud secara “*Cluster*” di dalam pakej mengembang apabila suhu terjana. Pengembangan ini akan mengakibatkan wujudnya tegasan dalaman di dalam pakej. Gambarajah 3.1 menjelaskan kesan yang telah dimaksudkan seperti di atas.

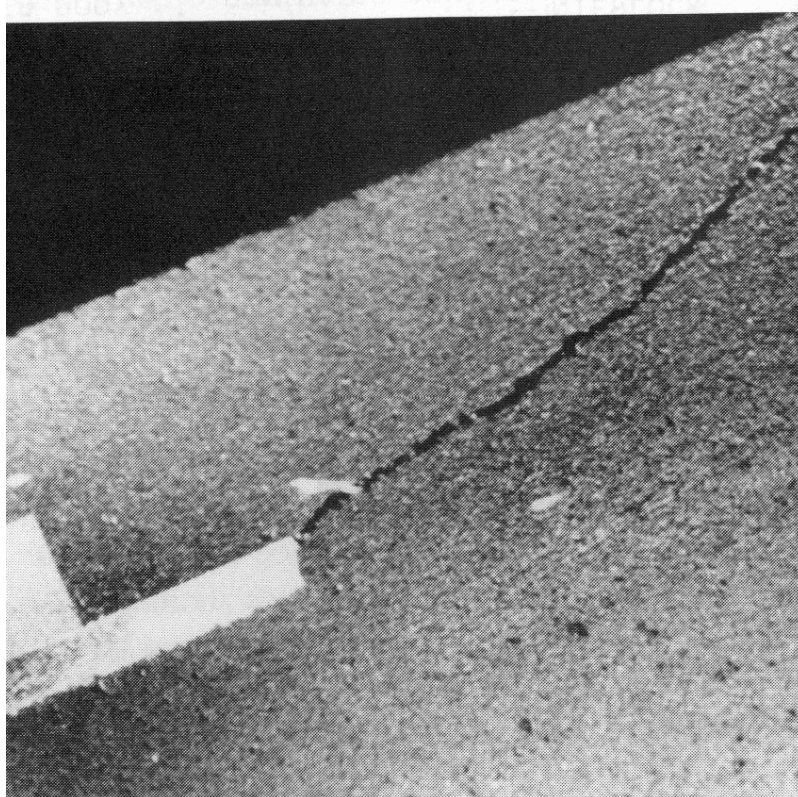
Secara asasnya pakej elektronik terdiri dari komponen hibrid. Oleh itu masalah kelekangan merupakan bukan satu fenomena yang baru. Satu komponen hibrid merupakan komponen pakej yang terdiri beberapa jenis bahan yang dicantumkan sewaktu proses membuatnya. Ketelitian dan kepersisan yang tinggi amat diperlukan sewaktu pembuatan komponen pakej. Sebarang jenis kecacatan yang ada mungkin mengakibatkan kegagalan pakej pada peringkat awal



Rajah 3.1 : Mekanisma yang berlaku dalam pakej sewaktu retak berlaku.

Pendedahan pakej pada kitar suhu yang berterusan akan menggalakkan perambatan lekang berikutan teraruhnya kitaran tegangan terma yang tinggi diantara muka komponen. Pada kebiasaannya ujian kitaran suhu (*Temperture cycle test*), lingkungan suhu  $-55^{\circ}\text{C}$  hingga  $65^{\circ}\text{C}$  diambil. Dari pemerhatian yang diamati didapati satu rambatan retakan yang tidak stabil akan terjadi, ini akan memudaratkan pakej dan seterusnya mengakibatkan kegagalan. Rajah 3.2 menunjukkan contoh bagaimana kegagalan pakej berlaku secara retak.





*Rajah 3.2: contoh fenomena rambatan retak pada pakej*

### **3.2 Konsep Retak**

Retak boleh ditaksirkan sebagai permulaan perambatan titik dimana terdapat tumpuan tegasan yang bertindak pada kawasan itu. Kebanyakan komponen atau struktur yang dihasilkan telah terdapat kecacatan kecil pada peringkat awal pembuatannya. kecacatan yang terbentuk tidak dapat dielakkan walaupun kaedah pembuatan yang amat teliti dilakukan. Memandangkan masalah ini sukar diatasi, cara terbaik untuk mereka satu produk atau komponen yang tidak akan menanggung beban pada kawasan

yang mempunyai kecenderungan untuk berlakunya retak, dalam konteks ini rekaan direka untuk mengelakkan kawasan yang mempunyai bucu yang tajam. Ini kerana kawasan berbucu yang tajam akan menghasilkan titik tumpuan tegasan yang mana akan menggagalkan komponen. Selain dari itu kaedah kawalan juga sangat baik dipraktikkan, memandangkan kawalan adalah lebih baik dari pencegahan disamping ia menjimatkan.

Konsep ketidakstabilan retak telah mula dimenifestasikan sejak awal tahun 1930-an hingga ke pertengahan 1950 an. Ini memandangkan banyaknya penggunaan besi berkarbon rendah pada sekitar tempoh ini. Begitu banyak struktur seperti kapal, jambatan dan tangki yang gagal secara tiba-tiba yang mana masalah utama menunding ke arah kegagalan secara retak. Sepanjang tempoh ini, kajian dalam bidang retak berkembang dengan pesatnya hasil kajian dari pakar-pakar pengkajinya. Dalam tempoh ini juga konsep kegagalan yang diakibatkan oleh tumpuan tegasan pada lekuk “*notch*” dan suhu rendah telah mula dikenalpasti sebagai faktor utama kegagalan bahan.

Walaupun begitu, konsep kemampuan sesuatu bahan menyerap tenaga masih belum dikenalpasti sebagai faktor pendorong utama dalam menerangkan perambatan arah retak. Kecacatan sesuatu bahan sewaktu pembuatannya juga tidak dapat dikenalpasti sebagai pendorong mikro yang menjana keretakan pada waktu itu. Hanya awal beberapa dekad ini sahaja masalah ini telah mula dikenalpasti.

Sepanjang tempoh 40 tahun yang lepas, dapat diperhatikan perkembangan kejuruteraan bahan yang begitu mendadak. Penggunaan aloi berkekuatan tinggi telah mula diaplikasikan dalam industri. Seseengah dari bahan ini didapati amat mudah

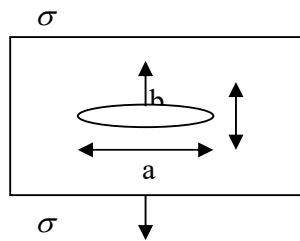
dipengaruhi oleh ketidakstabilan retak yang akhirnya mengakibatkan pengurangan sifat ketegaran bahan tersebut. Sehubungan dengan itu pembangunan teori mekanik kepatahan anjal lurus (*L.E.F.M*) diperkenalkan disamping kaedah pengujian yang efektif dalam mengukur rintangan retak sesuatu bahan. Konsep LEFM diperkenalkan memandangkan teori yang ada pada masa itu tidak dapat menyelesaikan pertanyaan mengapa sesuatu bahan itu gagal pada keadaan tegasan yang kurang dari yang sepatutnya. Persoalan telah diselesaikan oleh Griffith dan perbincangan lanjut akan dilakukan dalam bab selepas ini.

### **3.3 Pendekatan**

Pendekatan yang akan digunakan dalam menjalankan analisis masih dalam lingkungan konsep mekanik kepatahan anjal lurus yang dibangunkan oleh Griffith pada peringkat awal kerjanya "*fundamental of fracture machanic*". Beliau telah menyelesaikan perkara asas mengapa kebanyakan bahan gagal pada peringkat awal, sebelum mencapai takat kekuatan maksimum tarikan antara atom yang sepatutnya. Beliau menyimpulkan bahawa bagi apa jua jenis bahan yang digunakan, pasti akan terdapat kewujudan kecacatan kecil yang akan mengurangkan kekuatan sesuatu bahan. Tempat dimana terdapatnya kawasan retak ini akan menyebabkan terdapatnya kawasan tumpuan tegasan yang bertindak lebih tinggi dari kawasan yang lain. Keadaan ini tidak dapat dikira atau dihitung dengan menggunakan kaedah tegasan elastik lurus, dimana faktor tumpuan tegasan  $K$  ditentukan. Ini memandangkan kecacatan yang berbentuk eliptikal mempunyai faktor tumpuan tegasan yang didefinisikan sebagai :

$$K_t = 1 + 2\left(\frac{a}{b}\right)$$

Daripada persamaan yang telah diperhatikan di atas, apabila  $b$  menghampiri kosong kawasan kecacatan bahan akan menjadi retak disebabkan oleh nilai maksimum yang diperolehi. Pada  $b$  bersamaan sifar  $K_I$  akan menghampiri infiniti, ini memandangkan bahawa apabila berlaku keretakan, bahan seolah olah tidak mampu bertahan dan akan gagal secara sepenuhnya. Konsep ini bertentangan dengan apa yang diperhatikan oleh Griffith, beliau telah membangunkan satu konsep yang menerangkan bagaimana satu keretakan yang stabil mampu wujud dalam sesuatu bahan. Beliau merumuskan bahawa, retak hanya akan mengalami ketidakstabilan jika terdapat pertambahan dalam jarak retak yang diakibatkan oleh lebih tenaga yang dilepaskan berbanding dengan yang mampu diserap pada permukaan retak.



*Rajah 3.3 : kecacatan eliptikal pada permukaan plat*

Berdasarkan idea yang berasaskan alasan yang kukuh, Irwin berpendapat, L.E.F.M telah berjaya mendekati penyelesaian secara analitikal terhadap konsep mekanik kepatahan. Ia telah berjaya mengaitkan taburan kegagalan yang terdapat pada bucu retak dengan parameter seperti tegasan nominal yang dikenakan ke atas satu struktur yang memberikan kesan terhadap saiz, bentuk dan orientasi keretakan. Ini telah membolehkan satu perwakilan unsur kepatahan bahan dibuat berdasarkan ungkapan satu parameter.

Secara amnya terdapat dua jenis pendekatan yang digunakan dalam terma tersebut iaitu:

- i). Tenaga
- ii). Faktor keamatan tegasan .

### ***3.4 Kadar Pelepasan Tenaga Terikan.***

Untuk satu keadaan retak sepanjang  $2a$  di dalam satu jasad yang mempunyai lebar terhingga, tenaga permukaan  $U_s$  yang terjana di dalam bahan diakibatkan oleh retak boleh diungkapkan seperti dibawah.

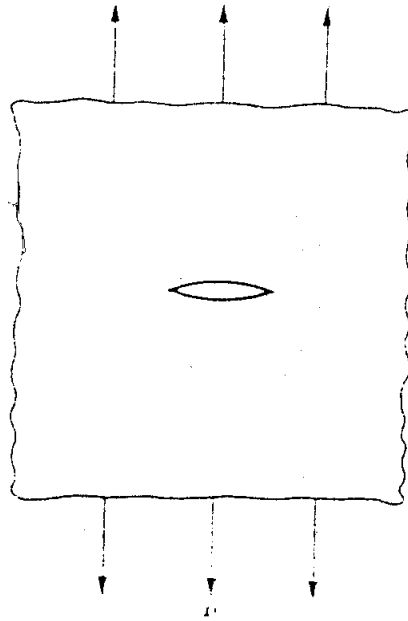
$$U_s = 2aG \text{-----}(1)$$

Daripada konsep tenaga terikan elastik yang telah diperkenalkan, nilai tenaga yang telah dilepaskan, yang diakibatkan oleh pembentukan keretakan boleh diungkapkan sebagai.

$$U_e = \frac{1}{2} \int \sigma(x) \cdot \Delta(x, a) dx \text{-----}(2)$$

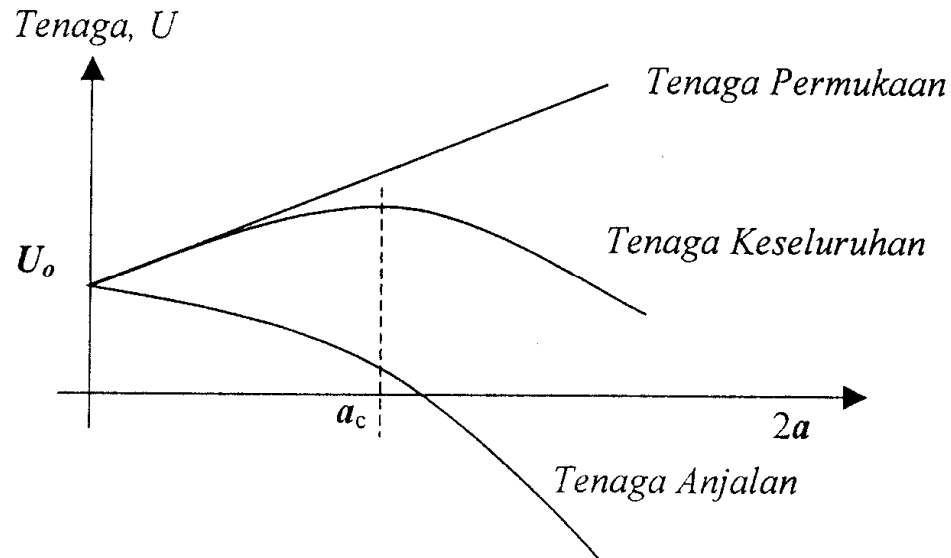
Dari persamaan di atas  $\sigma(x)$  bersamaan taburan tegasan dikawasan berlakunya retak dan  $\Delta(x, a)$  mewakili jarak bukaan retak secara menegak. Disini dapat ditunjukkan, bagi satu bukaan retak sepanjang  $2a$  dalam satu plat lebar terhingga (Raj 3.4) nilai tenaga terikan dapat diungkapkan sebagai:

$$U_e = \frac{\Pi \sigma^2 a^2}{4e} (1 + \nu)(k + 1) \text{-----(3)}$$



*Rajah 3.4: Retak tajam pada satu plat terhingga*

Dalam persamaan di atas  $\nu$  mewakili nisbah poisson dan  $k = (3 - 4\nu)$  bagi terikan satah dan  $(3-\nu)/(1+\nu)$  untuk tegasan satah. Jadi untuk tenaga permukaan yang tersimpan dalam sesuatu bahan, nilai tenaga yang dilepaskan sewaktu penjanaan jarak retak bersamaan dengan jarak retak kuasa dua. Ini dapat diilustrasikan seperti dalam rajah 3.5.



Rajah 3.5: Variasi tenaga terserap dan terbebas yang terjana berpandukan panjang retak

Tenaga bersih yang terjana sewaktu berlakunya retak dapat diungkapkan secara matematik sebagai hasil tambah tenaga permukaan  $U_s$  dan tenaga yang dilepaskan  $U_e$ . Menurut Griffith pada dasarnya, antara satu keretakan yang stabil dan yang tidak hanya berlaku apabila terdapat pertambahan dalam jarak retak yang menyebabkan lebih banyak tenaga dibebaskan berbanding dengan yang mampu diserap oleh bahan. Secara algoritmanya konsep ini bermakna apabila terdapat pertambahan panjang retak secara menyeluruh, tenaga perunit anjakan retak akan menjadi negatif. Dalam konteks ini keadaan kritikal akan berlaku apabila  $\frac{du}{da} = 0$  yang mana ia berlaku pada titik A seperti rajah 3.5. Di sini jarak retak kritikal  $a_c$  diperolehi dari persamaan 1 hingga 3 maka

$$\frac{d}{da} \left( 2aG_c - \frac{\Pi \sigma^2 a^2}{4E} (1+\nu)(k+1) = 0 \right)$$

$$2G_c = \frac{2\Pi \sigma^2 a}{4E} (1+\nu)(k+1)$$

Ini dapat diringkaskan sebagai:

$$(EG_c)^{\frac{1}{2}} = \sigma(\Pi a)^{\frac{1}{2}} \text{-----(4)(tegasan satah)}$$

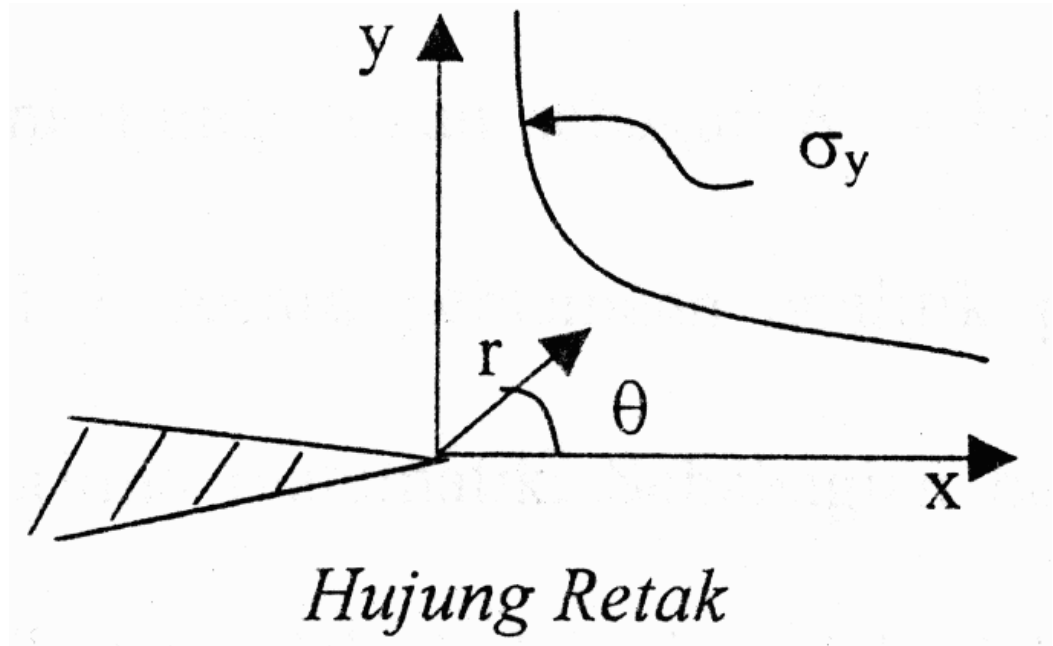
$$\left( \frac{EG_c}{(1-\nu^2)} \right) = \sigma(\Pi a)^{\frac{1}{2}} \text{-----(5) (terikan satah)}$$

Persamaan di atas merupakan satu ekspresi satu keadaan retak yang berlaku secara pantas. Harus diingatkan bahawa  $G_c$  ialah unsur bahan yang merujuk kepada kadar pelepasan tenaga terikan kritikal (*critical energy realese rate*), ketegaran atau lanjutan daya ke atas retak dan ia mempunyai unit  $\text{j/m}^2$ . Nilai yang tinggi bermakna sesuatu bahan itu mempunyai rintangan yang lebih untuk menahan perambatan retak. Contoh bahan yang memiliki rintangan retak yang tinggi ialah kuprum (Copper), yang mempunyai nilai  $G_c$  menghampiri  $10000 \text{ kJ/m}^2$  yang lebih tinggi berbanding dengan kaca yang hanya mempunyai nilai  $0.01 \text{ kJ/m}^2$ .

### **3.5 Faktor Keamatan Tegasan**

Walaupun Griffith merupakan orang pertama yang memperkenalkan konsep L.E.F.M, rangkuman kajian beliau hanya meliputi kajian ke atas bahan yang rapuh sahaja. Irwin merupakan orang yang bertanggungjawab memperkembangkan konsep L.E.F.M, ke atas unsur logam. Beliau mengkaji kesemua persamaan yang telah diterbitkan ke atas tegasan di dalam kawasan retak yang bersifat eliptik di dalam medium plat yang besar seperti yang ditunjukkan dalam rajah 3.6.





Rajah 3.6 : Variasi tegasan sepanjang satah-x

Persamaan terbitan untuk taburan tegasan elastik pada kawasan retak adalah seperti berikut.

$$\sigma_x = \frac{K}{(2\Pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left\{ 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right\}$$

$$\sigma_y = \frac{K}{(2\Pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left\{ 1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right\}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{(2\Pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_z = -\frac{2\nu K}{(2\Pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{satah terikan})$$

$$\sigma_z = 0$$