

ANALISIS PENGARUH BILANGAN PENDULU KEDAP PROSES ELEKTROSADURAN BINGKAI PENDULU MENGUNAKAN KAEDAH UNSUR TERHINGGA

Z. M. Ripin
T. B. Hoo
A. B. Abdullah

Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik
Universiti Sains Malaysia Kampus Kejuruteraan
14300 Nibong Tebal, SPS, Penang
Tel: 04-5937788 Samb. 6302
Fax: 04-5941025
E-mail: mezaidi@eng.usm.my

ABSTRAK

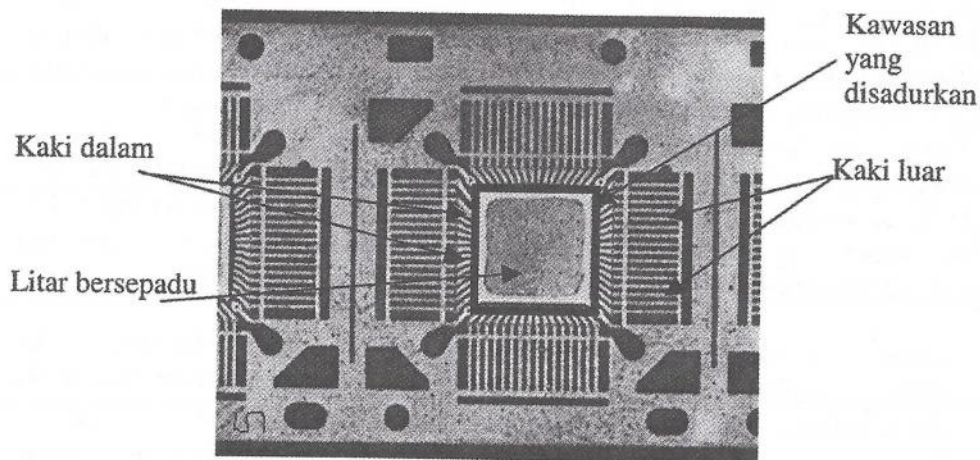
Bingkai pendulu merupakan komponen penting di dalam litar bersepadu (IC). Geometri yang disadur dan saiz enapan yang terbentuk di atas bingkai pendulu ditentukan oleh kedap getah yang mengawal proses elektrosaduran dengan menentukan kawasan mana yang menerima elektrolit. Kedap ini yang terdiri daripada dua komponen iaitu kedap atas yang diperbuat daripada getah berasaskan silikon (dimetyl silicone) dan kedap bawah yang diperbuat daripada bahan sepan yang dibalut oleh satu lapisan nipis getah berasaskan silikon. Pada keadaan tertentu, berlaku kebocoran yang terhasil di dalam bentuk resipan dan jujuh yang menyebabkan kecacatan permukaan. Ini dipercayai berlaku akibat aliran elektrolit yang terlepas menerusi celah yang wujud di antara pendulu dan kedap. Aliran keluar ini akan menyebabkan proses saduran di luar kawasan yang telah ditetapkan. Oleh itu kepentingan untuk memahami proses pembentukan celah dan interaksi celah dengan bilangan pendulu perlu diketahui. Analisis kaedah unsur terhingga dua dimensi telah dilakukan menggunakan model bahan Mooney-Rivlin untuk getah dan model bahan Blatz-Ko bagi bahan sepan. Analisis sentuh digunakan bagi menentukan luas sentuhan dan kawasan yang tidak bersentuh dikira sebagai celah di antara pendulu. Beberapa turutan beban yang digunakan di dalam analisis ini memantau pengurangan saiz celah dengan beban yang dikenakan. Beberapa nilai bilangan pendulu digunakan di dalam analisis bagi menentukan kesan bilangan pendulu terhadap pembentukan celah. Keputusan yang diperolehi menunjukkan bahawa luas celah menjadi semakin kecil apabila beban meningkat dengan kecenderungan untuk mengecil secara lebih pantas bagi bilangan pendulu yang sedikit. Saiz celah maksimum sentiasa berlaku pada celah dalaman yang pertama dan terakhir. Saiz celah maksimum digunakan sebagai ukuran prestasi kedap, dan bila diplotkan melawan beban menunjukkan pengurangan luas celah dengan peningkatan beban. Keputusan ini menunjukkan bilangan pendulu adalah parameter penting yang mempengaruhi celah.

Kata kunci: Elektrosaduran, kedap, kaedah unsur terhingga, elastomer, getah silikon.

1.0 PENGENALAN

Peningkatan penggunaan dan permintaan terhadap teknologi maklumat telah menggalak serta meningkatkan usaha penghasilan dan rekabentuk litar bersepadu.

Satu daripada komponen asas yang amat penting dalam litar bersepadu ialah bingkai pendulu di mana ia berfungsi sebagai logam penyambung dalaman yang membentuk rangkaian tapak logam asas. Rajah 1 menunjukkan bingkai pendulu yang mempunyai 64 pendulu di sekelilingnya. Proses penghasilan bingkai pendulu melibatkan empat peringkat dimulai dengan proses hentakan atau punaran, diikuti oleh proses elektropenyaduran sebagai proses utama, proses *taping* dan diakhiri dengan proses *downset* yang menyebabkan bahagian yang disadur akan berada di bawah sedikit daripada kedudukan asalnya.



Rajah 1 Bingkai pendulu dengan 64 kaki pendulu di sekelilingnya

Dalam proses elektrosaduran, masalah yang dihadapi adalah berkaitan dengan prestasi kedap yang melibatkan celah atau bukaan yang mungkin wujud antara kedap muka dan pad tekanan, dan juga ubah bentuk kedap. Ini mengakibatkan kedap tidak dapat mewujudkan pengadang yang sempurna untuk menghalang cecair elektrolit mengalir keluar daripada kawasan yang ditentukan. Justeru, masalah seperti resipan dan jujuhan akan berlaku. Selain itu tekanan juga menyebabkan ubah bentuk tingkap atau bukaan pada kedap, yang akan mengakibatkan bentuk liputan saduran yang terhasil tidak mengikut spesifikasi. Fokus utama kerja ini adalah untuk menyiasat kelakuan atau corak perubahan saiz celah dan perubahan luas tingkap kedap, terhadap bilangan pendulu, geometri kedap dan pad tekanan di mana saiz celah yang dikesan dari analisis boleh dikaitkan dengan resipan. Analisis dilakukan dengan menggunakan kaedah unsur terhingga.

Objektif kajian ini adalah untuk membuat pemodelan dua dimensi kedap getah yang digunakan di dalam proses elektrosaduran.

2.0 SOROTAN LITERATUR

Secara amnya, kedap boleh ditakrif sebagai suatu perkakas yang digunakan untuk menutup laluan cecair atau gas antara dua permukaan [1]. Bagi proses elektrosaduran, kerangka pendulu kedap yang unggul akan menutupi bingkai pendulu dan hanya akan membenarkan kawasan yang terdedah sahaja disadurkan. Untuk proses elektrosaduran, kedap perlu beroperasi dalam keadaan tekanan positif, persekitaran kimia yang menghakis (elektrolit Argentum sianida digunakan bagi kes elektropenyaduran yang dikaji) dan suhu yang tinggi (melebihi 70°C). Malah kedap untuk kegunaan industri semikonduktor perlu dihasilkan pada kejutuan geometrinya yang tinggi. Terdapat tiga kelas kedap iaitu kedap dinamik, kedap separa-dinamik dan kedap statik. Kedap yang digunakan dalam proses elektropenyaduran adalah dari jenis kedap separa dinamik.

Getah atau elastomer merupakan suatu bahan unik, walaupun wujud dalam bentuk pepejal, kelakuannya menyamai kelakuan cecair dari segi sifat isipadunya yang kekal hampir tidak berubah, apabila ia mengalami ubah bentuk besar [2]. Model juzuk yang memperihalkan tegasan-terikan dan hubungan yang lain bagi bahan hiperelastik boleh dibahagikan menurut dua jenis yang utama [3]:

1. *Kaedah berasaskan fenomenologikal tak varian*; Hubungan juzuk fenomenologikal biasanya mempertimbangkan ungkapan tenaga terikan W , dalam sebutan regangan utama λ_1 , λ_2 dan λ_3 dengan subskrip 1, 2 dan 3 menunjukkan arah regangan utama. Perumusan Mooney-Rivlin menggunakan fungsi tenaga terikan [3]:

$$W = C_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3\right) \quad (1)$$

dengan

$$\begin{aligned} \lambda_1, \lambda_2 \text{ dan } \lambda_3 &= \text{Regangan utama} \\ &= \frac{\text{Panjang Awal}}{\text{Panjang Akhir}} \end{aligned}$$

dan C_1 dan C_2 merupakan parameter yang memperihalkan kelakuan bahan hiperelastik.

Fungsi ini pada asalnya diterbitkan oleh Mooney dan kemudiannya diubahsuai oleh Rivlin untuk menghasilkan bentuk yang lebih umum.

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2)$$

- dengan, C_{ij} = pemalar yang dipadan dengan data eksperimen
 i, j = integer yang dipilih sembarangan
 I_1 = $\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$
 I_2 = $\lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$

nilai i dan j yang dipilih akan menentukan darjah persamaan (2). Pemilihan nilai i dan j yang besar akan menyukarkan kerja memadankan data eksperimen untuk mendapat pemalar yang berkaitan.

Ogden [4] pula mencadangkan fungsi tenaga terikan dalam bentuk

$$W = \sum_n \left[\mu_n \alpha_n^{-1} \left(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3 \right) \right] \quad (3)$$

- dengan, μ_n dan α_n = pemalar yang dipadan secara eksperimen
 n = integer yang dipilih sembarangan

Semua teori fenomenologikal yang dibincangkan sehingga ini mempunyai kekurangan dari segi hubungan fizikal terus kepada mekanisme ubah bentuk. Untuk mengatasinya pendekatan yang lebih fleksibel perlu digunakan.

2. *Pendekatan statistik mekanik*; Model statistik yang dibangunkan oleh Arruda dan Boyce [5] berjaya memodelkan kelakuan bahan elastomerik dalam sebarang ubah bentuk. Hubungan tegasan-terikan model Arruda-Boyce ditakrif sebagai :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nK\Theta}{3} \sqrt{N} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\lambda_{rantai}}{\sqrt{N}} \right) \left(\frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\lambda_{rantai}} \right) \quad (4)$$

dengan,

- $\frac{nK\Theta}{3}$ = C_R = modulus getah
 n = ketumpatan rantai
 K = pemalar Boltzmann
 Θ = suhu mutlak
 $\mathcal{L}^{-1}(\beta)$ = salingan fungsi Langevin

$$\begin{aligned}
 &= 3\beta + \frac{9}{5}\beta^3 + \frac{297}{175}\beta^5 + \frac{1539}{875}\beta^7 + \frac{126117}{67375}\beta^9 + \dots \\
 \lambda_{rantai} &= \frac{r_{rantai}}{r_o} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2)^{1/2} \tag{5}
 \end{aligned}$$

Model yang telah dibangun oleh Arruda dan Boyce berjaya dipadankan serta membuat ramalan yang tepat dengan membuat perbandingan dengan keputusan eksperimen [6]. Boleh dikatakan semua model yang telah dibincangkan setakat ini mempunyai keupayaan untuk memodelkan ciri-ciri dan ubah bentuk bahan elastomerik. Akan tetapi, kebanyakan model, terutamanya model yang mengambil pendekatan fenomenologikal, gagal untuk memperihalkan tindakbalas bahan getah dalam keadaan ubah bentuk yang berlainan tanpa mengubah parameter model tersebut [3 dan 7].

3.0 METODOLOGI

Pendekatan yang diambil dalam usaha untuk menyiasat kelakuan kedap dalam operasi elektropenyaduran boleh dibahagikan kepada beberapa peringkat seperti berikut.

3.1 Penentuan Parameter dan Jenis Model Juzuk Kedap

Sebelum sebarang analisis unsur terhingga dapat dijalankan ke atas kedap getah, persamaan atau model juzuk bahan getah mesti ditentukan terlebih dahulu. Ujikaji perlu dijalankan terlebih dahulu untuk mendapatkan pemalar atau parameter yang berkaitan bagi model juzuk Arruda-Boyce. Kelebihan utama model Arruda-Boyce ialah parameternya tidak bergantung kepada jenis atau arah ubah bentuk yang dialami, justeru hanya satu jenis ujikaji perlu dijalankan untuk memodelkan bahan getah yang dikaji. Jenis ujikaji serta cara menjalankannya dilakukan mengikut cadangan Arruda dan Boyce [5]. Persamaan (4) dipadankan dengan data eksperimen yang diperolehi untuk mendapatkan parameter atau pemalar yang berkaitan.

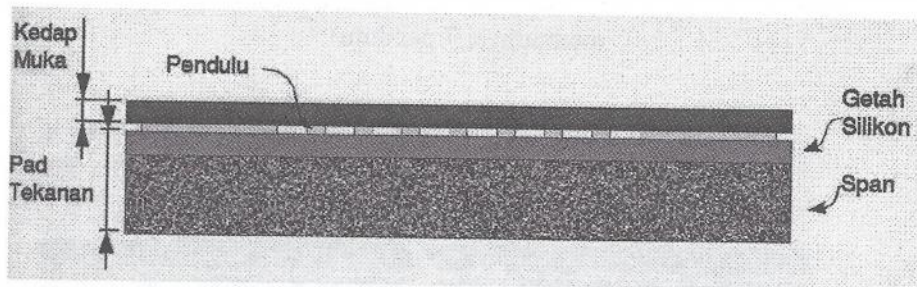
3.2 Pembinaan Model

Secara fizikalnya, model ini terdiri daripada dua bahan, iaitu kuprum dan getah silikon. Setelah isipadu model awal ini dijanakan dalam aturcara ANSYS 5.6, isipadu ini disirat dengan unsur-unsur yang berkenaan. Selain daripada unsur untuk menyirat bahan pada model, model juga perlu disiratkan dengan unsur sentuh. Unsur sentuh ini mampu mengesan kawasan yang bersentuhan pada

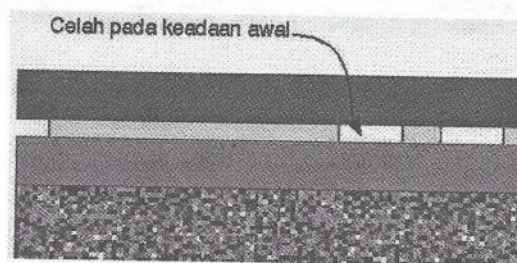
keadaan awal atau kawasan yang bersentuh. Kedap getah silikon disirat dengan unsur hiperelastik dua dimensi (*Hyper56* 4 nod) dan plat kuprum disirat dengan unsur dua dimensi, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Bahagian yang ternaik dalam plat kuprum mewakili kehadiran satu pendulu. Permukaan bawah kedap dan permukaan atas plat kuprum yang dijangka akan bersentuhan antara satu sama lain disirat dengan unsur sentuh (*Contal174* dan *Targe170* 4 nod). Penggunaan unsur sentuh ini juga membenarkan permodelan geseran mengikut hukum *Coulomb* mudah. Dalam penyediaan ini, unsur hiperelastik dua dimensi (*Hyper56*) telah menggunakan model jujuk Mooney-Rivlin untuk mewakili kelakuan fizikal bahan elastomerik.

Model ini dianalisis dan kesan pembebanan disiasat. Kekangan simetri dikenakan pada dua satah bahagian sisi model (rujuk Rajah 3). Nod pada permukaan bawah plat kuprum dikekang sepenuhnya pada semua darjah kebebasan. Nod pada permukaan atas kedap pula dikekang dalam arah anjakan x dan z , serta digandingkan dalam arah y . Kekangan arah x , z dan gandingan arah y ini mewakili keadaan fizikal yang mana kedap dilekatkan pada suatu plat tegar.

Proses pembebanan dibahagikan kepada dua peringkat. Pada peringkat pertama, suatu beban tekanan menegak dikenakan secara meningkat pada kedap dari arah atas. Tekanan menegak ini mewakili tekanan yang dikenakan pada kedap getah ke atas bingkai pendulu. Pembebanan peringkat kedua pula melibatkan gabungan pembebanan menegak dan pembebanan tekanan sisi. Tekanan menegak yang dikenakan pada peringkat pertama kekal malar, dengan suatu tekanan sisi atau mengufuk dikenakan secara meningkat, yang mana mewakili tekanan hidrostatik cecair elektrolit.



Rajah 2 Model 2D bagi menyiasat kesan bilangan pendulu

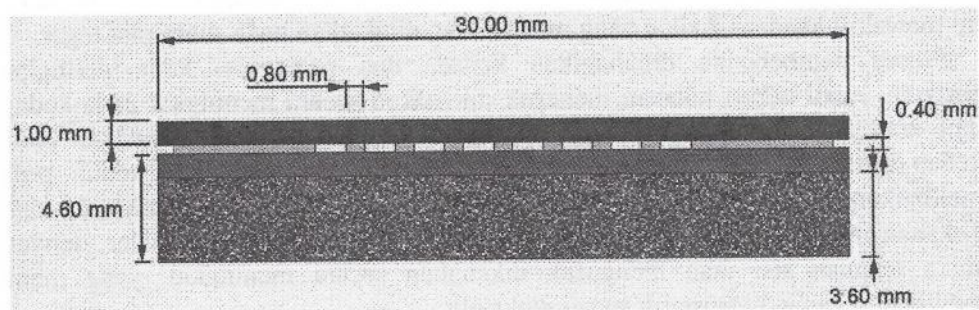


Rajah 3 Kehadiran celah pada keadaan awal

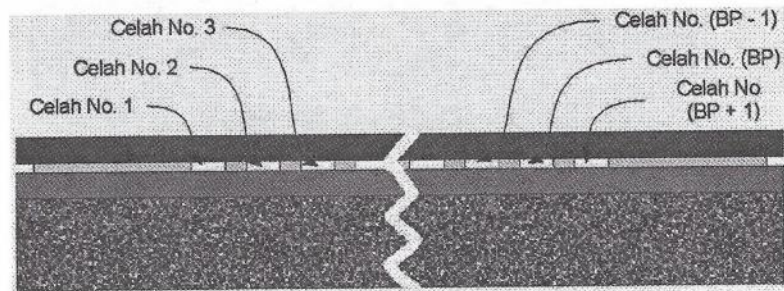
3.3 Analisis

Bilangan pendulu atau kepadatan pendulu (dalam sebutan bilangan per unit jarak) mempengaruhi kelakuan atau pembentukan celah antara kedap muka, bingkai pendulu dan pad tekanan. Kehadiran unsur hiperelastik (getah) dan unsur sentuh yang tak lurus mengakibatkan analisis 3D bagi elastomer akan mengambil masa yang panjang [8]. Oleh itu, model 2D telah digunakan untuk menjimatkan masa penyelesaian.

Suatu model am yang telah digunakan ditunjukkan dalam Rajah 4. Rajah 5 jelas menunjukkan kehadiran celah pada keadaan awal. Ukuran model am yang digunakan ditunjukkan dalam Rajah 6. Suatu bilangan atau bilangan pendulu ditempatkan di antara kedap muka dan pad tekanan, dan dalam rajah ini, bilangan pendulu ialah 7. Model dengan 4 pendulu hingga ke 10 pendulu telah dibina, dianalisis dan keputusannya dibincangkan dalam bahagian seterusnya.



Rajah 4 Geometri bagi suatu model am (model yang ditunjukkan di sini mempunyai 7 pendulu)



Rajah 5 Penomboran celah-celah awal.

Model dengan bilangan pendulu dibina dengan mengekalkan geometri kedap, pad tekanan, tebal dan lebar celah. Maka, bilangan pendulu yang lebih banyak juga bermakna ketumpatan pendulu (bilangan pendulu per unit jarak) yang lebih tinggi. Celah-celah ini dinomborkan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5, di mana BP mewakili bilangan pendulu.

Kedua-dua unsur yang bersentuhan dengan pendulu dibina dengan bahan getah silikon yang bersifat hiperelastik, dengan merujuk kepada kedap yang digunakan dalam proses elektropenyaduran sebenar. Kedap muka dibina dengan satu lapisan atau kepingan getah silikon, manakala pad tekanan pula dibina dengan dua lapisan; lapisan atas dibina dengan getah silikon manakala lapisan bawah dibina dengan span. Komponen bahan getah disirat dengan unsur hiperelastik Mooney-Rivlin (*Hyper56* 4 nod) dan komponen span disirat dengan unsur hiperelastik *Blatz-Ko* (*Hyper84* 4 nod) [10]. Pemalar Mooney-Rivlin dan sifat-sifat bahan yang digunakan untuk pemodelan kelakuan unsur hiperelastik *Hyper56* disenaraikan dalam Jadual 1. Unsur *Blatz-Ko* (*Hyper84*) merupakan satu-satunya unsur yang mampu memodelkan getah jenis span yang boleh mampat. Kawasan antara permukaan bawah kedap muka, permukaan atas pad tekanan, dan permukaan luar pendulu yang bersentuh atau berpotensi untuk bersentuh disirat dengan unsur sentuh permukaan ke permukaan 2D (*Conta171* dan *Targe169* 2 nod).

Jadual 1 Ciri bahan yang digunakan bagi model berserta pemalar Mooney-Rivlin

Kedap	
Bahan	Getah Silikon
Modulus Young, E	2.83 MPa
Nisbah Poisson,	0.49
Pemalar Mooney-Rivlin	
C_1	0.1915
C_2	-0.03043

Nilai-nilai pemalar Mooney-Rivlin yang digunakan ditunjukkan dalam Jadual 1. Nilai-nilai ini diperolehi daripada pepadanan data dengan data eksperimen daripada ujian pemampatan ke atas spesimen.

3.4 Keputusan Analisis

Analisis menggunakan perisian *ANSYS 5.6*, setakat ini tidak mempertimbangkan ubah bentuk atau tindakbalas yang dialami oleh bingkai pendulu dan bentuk celah yang terbentuk dalam proses elektropenyaduran. Untuk menyiasat bentuk celah sebenar dalam proses elektropenyaduran, analisis model lengkap perlu dijalankan. Akibat kehadiran unsur hiperelastik dan unsur sentuh yang bersifat tak-lurus, masa penyelesaian bergantung kuat kepada bilangan unsur yang terlibat dalam model tersebut [9]. Justeru itu, saiz atau bilangan unsur yang terlibat dalam model ini harus dihadkan. Pendekatan memudahkan model telah diambil. Model yang dibina telah dimudahkan dengan mengabaikan bahagian atau mengurangkan bilangan komponen yang terlibat dalam model tersebut.

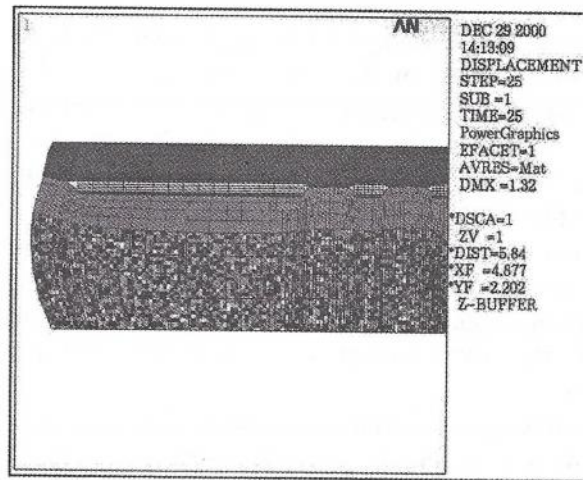
Akan tetapi, pada masa yang sama, model ini harus juga mempunyai keupayaan untuk mewakili kelakuan kedap dan bingkai pendulu dalam proses elektropenyaduran yang sebenar.

4.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

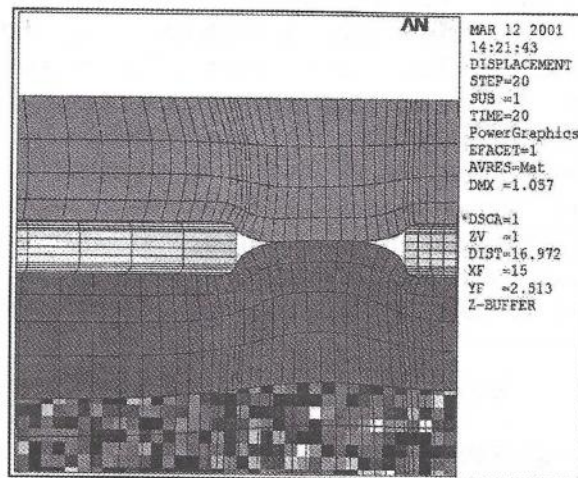
Berdasarkan keputusan yang diperolehi daripada model unsur terhingga yang dibincangkan setakat ini, isipadu celah dapat dikurangkan dengan peningkatan tekanan menegak. Isipadu celah ini tidak mempunyai luas keratan rentas yang sekata, dengan luas celah yang paling kecil terletak di hujung atau sisi kedap getah. Tekanan menegak ini juga mengakibatkan peningkatan luas terkedap. Selain itu kadar penurunan isipadu dan luas celah terhadap peningkatan beban tekanan menegak mencadangkan bahawa suatu saiz celah yang minimum akan sentiasa wujud tanpa mengambilkira betapa tinggi tekanan dikenakan pada kedap. Kesimpulan ini disokong oleh fenomena had regangan yang dibincangkan oleh Allport dan Day [3] dan juga Arruda dan Boyce [5]. Had regangan ini menyebabkan bahan elastomer mempunyai suatu had ubah bentuk. Jika beban berlebihan yang dikenakan ke atas bahan ini apabila ubah bentuk telah mencapai had regangan, beban ini akan menyebabkan bahan ini gagal (koyak atau rekah). Keputusan juga membuktikan bahawa tekanan sisi yang mewakili tekanan hidrostatik cecair elektrolit menyebabkan pengurangan celah luas dan peningkatan luas terkedap. Kesan ini menjadi lebih ketara jika magnitud tekanan menegak akhir adalah rendah.

Pada peringkat akhir pembebanan tekanan ke atas kedap muka, kedap dan pad tekanan mengalami ubah bentuk. Kedap muka dipaksa untuk bersentuh dengan pad tekanan, justeru mengurangkan saiz celah yang wujud antara mereka. Matlamat yang unggul ialah untuk menghapuskan kewujudan celah ini, tetapi seperti yang dijangkakan berdasarkan keputusan sebelum ini, celah tidak mungkin dihapuskan. Rajah 6(b) yang menunjukkan pandangan dibesarkan dari Rajah 6(a) jelas menunjukkan celah yang masih lagi wujud antara kedap dan pad tekanan.

Perubahan saiz celah sepanjang pembebanan tekanan ke atas kedap diukur dengan menggunakan luas celah yang terbentuk. Rajah 7 menunjukkan graf perubahan jumlah luas celah diplot melawan beban yang dikenakan bagi model-model yang mempunyai bilangan pendulu 4 hingga ke bilangan pendulu 10. Keputusan dengan jelas menunjukkan bahawa kadar pengurangan jumlah luas celah dengan peningkatan beban semakin meningkat dengan pengurangan bilangan pendulu. Dalam kata lain, jumlah luas celah berkurangan dengan lebih cepat pada model dengan bilangan pendulu yang lebih sedikit. Pada peringkat akhir pembebanan tekanan, model dengan bilangan pendulu yang paling sedikit mempunyai jumlah luas celah yang terkecil dan model dengan bilangan pendulu paling banyak mempunyai jumlah luas celah yang terbesar.



(a)



(b)

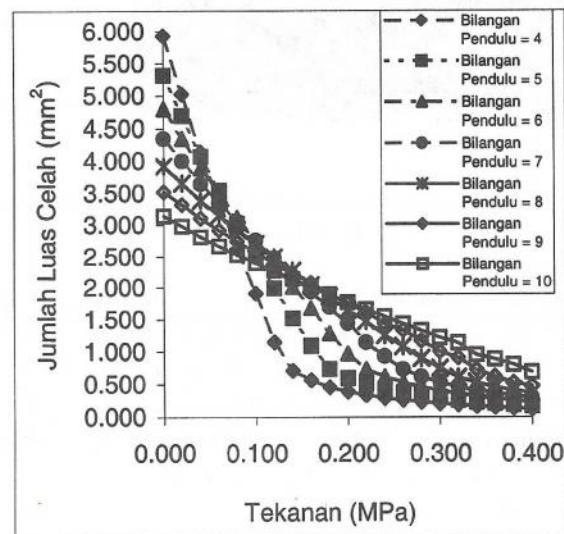
Rajah 6 (a) Model am yang terubah bentuk, (b) Celah wujud antara kedap muka dan pad tekanan

Fenomena yang ditunjukkan dalam Rajah 8(b) dapat diterangkan dengan mempertimbangkan aliran bahan dalam kedap dan pad tekanan apabila kedap muka ditekan pada pendulu. Memandangkan bahan elastomer mempunyai sifat tak boleh mampat atau hampir tak boleh mampat [3, 5 dan 7], bahan dalam kedap dan pad tekanan akan dipaksa mengalir ke dalam celah apabila beban tekanan dikenakan pada kedap muka. Kelakuan bahan elastomer yang "mengalir dan tak boleh mampat" ini setara dengan cecair [9].

Rajah 8 (a) menunjukkan suatu pandangan yang dibesarkan bagi model 2D yang digunakan. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8(b), apabila kedap ditekan pada pendulu, bahan dalam kedap dan pad tekanan dipaksa mengalir samada keluar, menurun (bagi bahan kedap) dan menaik (bagi bahan pad

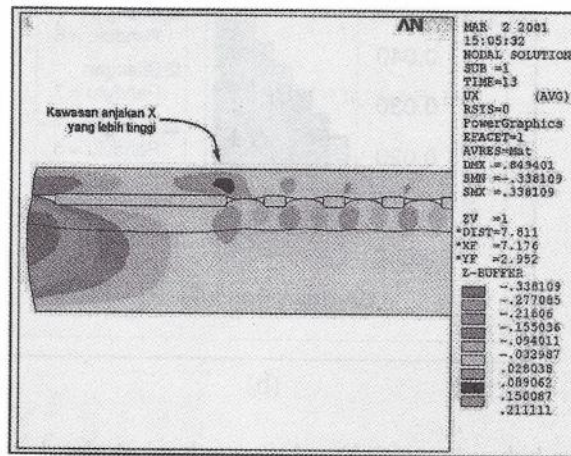
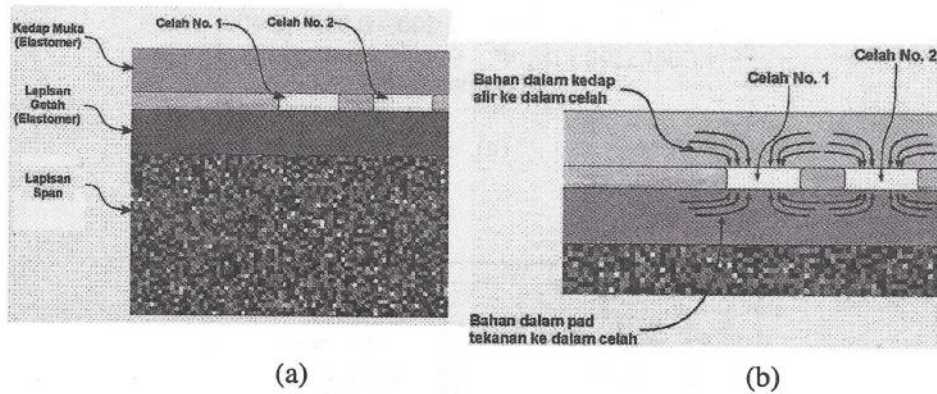
tekanan) untuk menutup atau mengecilkan celah antara kedap dan pad tekanan. Sumber untuk aliran bahan ini datangnya dari kawasan di sekeliling celah tersebut. Jelasnya celah sisi (pertama dan terakhir) mempunyai paling banyak bahan (kawasan sebelah kirinya) untuk mengalir ke dalam celah. Ini mengakibatkan celah no. 1 mempunyai saiz yang paling kecil. Lebih bahan mengalir ke dalam celah yang berasal dari bahagian kiri celah no. 1, menyebabkan bahan di sekitar bahagian kanan celah no. 1 berkecenderungan untuk mengalir ke dalam celah no. 2. Kesan yang sama juga bertindak pada celah yang seterusnya. Ini mengakibatkan celah di bahagian tengah mempunyai kurang bahan (elastomer) untuk alir masuk atau ubah bentuk ke dalamnya, menyebabkan saiz celah lebih besar.

Rajah 8(c) menunjukkan anjakan unsur model dalam arah x (arah mendatar) dapat mengesahkan penerangan aliran bahan. Aliran bahan dari kawasan sebelah kiri celah no. 1 dapat dilihat dari anjakan x yang lebih tinggi pada kawasan tersebut. Rajah ini juga menunjukkan bahawa anjakan x semakin berkurangan apabila kedudukan celah semakin jauh dari celah no. 1. Ini juga dapat ditakrifkan sebagai aliran bahan ke dalam celah semakin berkurangan, apabila celah menjauhi celah no. 1. Justeru, celah pertama dan terakhir akan lebih kecil berbanding dengan celah-celah yang lain. Taburan yang tidak sekata ini jelas dikesan pada peringkat pembebanan awal. Pada peringkat akhir pembebanan (0.280 – 0.400 MPa), taburan luas celah menjadi lebih sekata. Celah dengan luas yang maksimum akan menentukan prestasi sesuatu kedap, maka luas celah maksimum bagi model dengan bilangan pendulu yang berbeza diplot melawan beban tekanan yang dikenakan seperti di tunjukkan dalam Rajah 9(a).

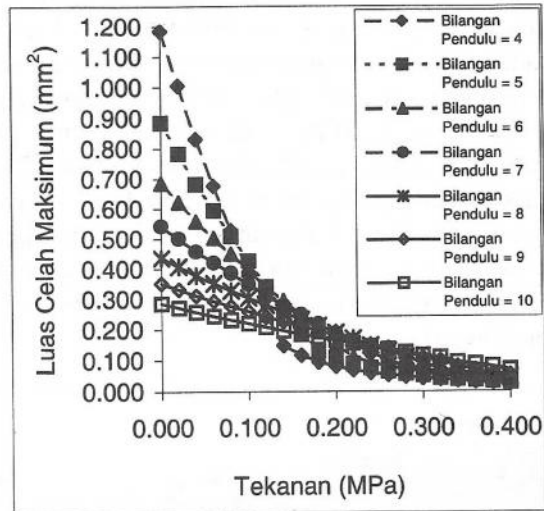


Rajah 7 Perubahan jumlah luas celah bagi pelbagai bilangan pendulu diplotkan melawan tekanan yang dikenakan

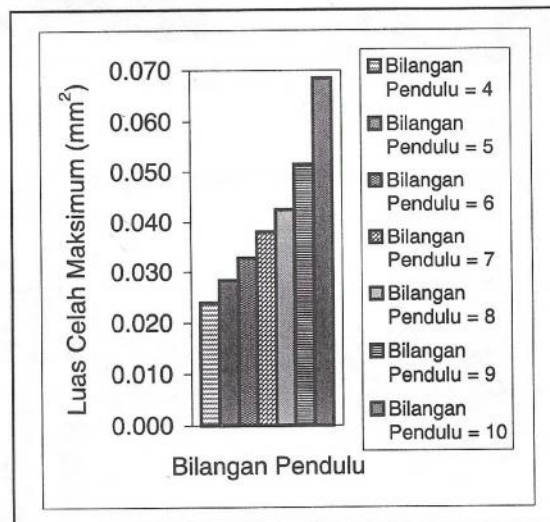
Seperti yang dinyatakan dalam perbincangan sebelum ini, luas celah maksimum awal adalah lebih besar pada model dengan bilangan pendulu yang lebih kecil. Perubahan luas celah maksimum mempunyai kelakuan yang sama dengan perubahan jumlah luas celah. Pada peringkat akhir pembebanan, model dengan bilangan pendulu yang paling rendah akan mempunyai saiz atau luas celah maksimum yang terkecil. Rajah 9(b) menunjukkan taburan luas celah maksimum bagi model dengan bilangan pendulu berbeza pada tekanan 0.625 MPa. Taburan ini menunjukkan perubahan atau sifat yang sama dengan taburan jumlah luas celah, iaitu jurang perbezaan luas celah maksimum antara model dengan bilangan pendulu yang berlainan menjadi semakin besar apabila bilangan pendulu semakin meningkat.



Rajah 8 (a) Pandangan dibesarkan model 2D bersama celah awal yang digunakan untuk menyiasat kesan bilangan pendulu,
 (b) aliran bahan dalam kedap muka dan pad tekanan ke dalam celah,
 (c) kontur yang menunjukkan anjakan arah x (arah mendatar)



(a)



(b)

- Rajah 9 (a) Perubahan luas celah maksimum bagi model dengan bilangan pendulu yang berlainan diplotkan lawan tekanan yang dikenakan,
 (b) Taburan luas celah maksimum bagi model dengan bilangan pendulu = 4 hingga bilangan pendulu = 10

5.0 KESIMPULAN

Keputusan analisis dua dimensi ini membawa kepada beberapa kesimpulan berkaitan kesan bilangan pendulu terhadap pembentukan celah. Kesimpulan yang diperolehi ialah:

1. Model dengan bilangan pendulu yang kurang mempunyai kadar pengurangan jumlah luas celah yang lebih tinggi. Ini mengakibatkan model dengan bilangan pendulu yang lebih sedikit mempunyai jumlah luas yang lebih kecil pada peringkat akhir proses pembebanan yang disiasat (0.625 MPa).
2. Beza jumlah luas celah meningkat dengan penambahan bilangan pendulu. Luas celah maksimum juga menunjukkan corak perubahan yang setara dengan jumlah luas celah.
3. Taburan luas celah pada kedudukan yang berlainan adalah tidak sekata. Pada peringkat pertengahan proses pembebanan, luas celah maksimum wujud pada celah yang berada di kedudukan tengah model dan ini dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan aliran bahan dalam kedap dan pad tekanan. Taburan luas celah ini menjadi lebih sekata dengan peningkatan beban tekanan. Luas celah maksimum ini menunjukkan corak perubahan yang setara dengan jumlah luas celah.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik, Universiti Sains Malaysia Kampus Kejuruteraan atas kerjasama dan sokongan yang diberikan dan juga kepada Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar di atas tajaan projek ini melalui geran IRPA (163450).

RUJUKAN

1. Greene, Tweed & Co. 1997, "*The Right Seal: Your Guide to Sealing in Semiconductor Processing*", Greene, Tweed & Co., USA.
2. Mark, J. E. dan Erman, B., 1992, "*Elastomeric polymer networks*", Prentice-Hall, New Jersey.
3. Allport, J. M. dan Day, A. J., 1996, "*Statistical mechanics material model for the constitutive modeling of elastomeric compounds*", Journal of Mechanical Engineering Science, Part C, ms. 575-585.
4. Ogden, R. W., 1972, "*Large deformation isotropic elasticity - on the correlation of theory and experimental for incompressible rubberlike solids*", Proc. R. Soc. Lond., A326, ms 565-584.
5. Arruda, E. M. dan Boyce, M. C., 1993, "*A three-dimensional constitutive model for the large stretch behaviour of rubber elastic materials*", J. Mech. Phys. Solids, 41(2), ms 389-412.

6. Treloar, L. R. G., 1944, Trans. Faraday Soc., 40, ms 59
7. Akron, Przbylo, P. A. dan Arruda, E. M, 1998, "*Experimental investigation and modelling of incompressible elastomers during non-homogeneous deformation*", Rubber Chemistry and Technology, 71(4), ms 730.
8. Peter Kohnke, 1999, *ANSYS Theory Reference: Release 5.6*. Southpointe: ANSYS. Inc, ms 4-1 – 4-50.
9. Keene, R. dan Prior, A, 1997, "*Analysis of axisymmetric elastomeric components subjected to asymmetric loading*", Plastic, Rubber and Composites Processing and Applications, 26(3), ms 123-128.