

KAJIAN MENGENAI KESAN SUHU, KEPEKATAN LARUTAN KOH DAN TEMPOH PUNARAN TERHADAP PEMBENTUKAN KEADAAN POTONG BAWAH PENJURU DIAFRAM BERALUN SILIKON

Norhayati Soin^{1*} dan Burhanuddin Yeop Majlis²

¹Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur,
²Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN),
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi
Selangor Darul Ehsan, Malaysia

*Corresponding author: norhayatisoin@um.edu.my

Abstrak: Artikel ini membentangkan hasil kajian simulasi mengenai kesan suhu dan kepekatan larutan kalium hidroksida (KOH) ke atas keadaan potong bawah penjuru yang terhasil pada struktur-struktur penjuru cembung diafram beralun silikon berorientasi (100). Diafram yang terlibat dalam kajian ini dihasilkan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik dengan larutan KOH sebagai larutan pemunat. Kerja-kerja simulasi telah dijalankan dengan menggunakan perisian proses punaran anisotropik Intellisuite. Berdasarkan geometri struktur penjuru cembung terpunar dan kemunculan satah-satah baru silikon, keadaan potong bawah penjuru didapati lebih ketara dengan peningkatan suhu dan penurunan kepekatan KOH.

Kata kunci: potong bawah penjuru, punaran anisotropik, diafram beralun

Abstract: This paper presents the results of simulation study on the effect of the temperature and concentration of the kalium hydroxide (KOH) etchants on the corner-undercutting phenomenon with respect to the formation of the silicon (100) corrugated diaphragm using KOH anisotropic etching. The Intellisuite process simulation software has been used in this study. Based on the geometrical etched structure of the convex corners and the emergent of the new silicon planes, the convex corner-undercutting phenomenon is found to be much more pronounced with increasing temperature and decreasing concentration of the KOH etchants.

Keywords: anisotropic etching, corner undercutting, corrugated diaphragm

1. PENGENALAN

Punaran anisotropik ke atas silikon merupakan suatu proses yang penting untuk merealisasikan struktur-struktur MEMS dalam tiga dimensi seperti pembentukan diafram-diafram untuk sensor tekanan [1]. Walau bagaimanapun,

kaedah punaran ini mempunyai satu keburukan yang agak serius, iaitu pembentukan keadaan potong bawah penjuru pada struktur reka bentuk yang terdiri daripada penjuru-penjuru cembung di atas wafer silikon dan tanpa sebarang pampasan penghasilan suatu struktur berpenjuru cembung yang sempurna adalah amat merumitkan [2].

Berdasarkan kajian terdahulu, struktur-struktur yang terbentuk pada penjuru cembung yang terpunar didominasi oleh satah-satah punaran pantas [3]. Walau bagaimanapun, kebanyakan hasil kajian terdahulu telah bersetuju menerima satah-satah silikon (411) sebagai satah-satah punaran pantas yang terbentuk pada struktur-struktur penjuru cembung terpunar [3].

Kajian mengenai kesan suhu dan kepekatan larutan KOH ke atas keadaan potong bawah penjuru bagi diafram beralun silikon yang dihasilkan menerusi proses punaran anisotropik adalah penting untuk menentukan keadaan punaran yang sesuai bagi pembentukan diafragma beralun silikon yang sempurna tanpa mengalami keadaan potong bawah penjuru yang amat ketara.

Objektif kajian ini adalah untuk mengkaji secara simulasi kebersandaran pembentukan keadaan potong bawah penjuru bagi diafram beralun silikon terhadap suhu dan kepekatan larutan KOH. Pencirian keadaan potong bawah penjuru ini ditentukan dengan pengukuran jumlah penjuru yang terpunar dari arah 45° ke satah permukaan rata (100), $U_{\langle 100 \rangle}$ dan dari arah $\langle 110 \rangle$, $U_{\langle 110 \rangle}$. Ini meliputi pengenalanpastian satah-satah silikon yang baru muncul pada struktur-struktur penjuru cembung yang terpunar.

2. PERISIAN SIMULASI PUNARAN ANISOTROPIK INTELLISUITE

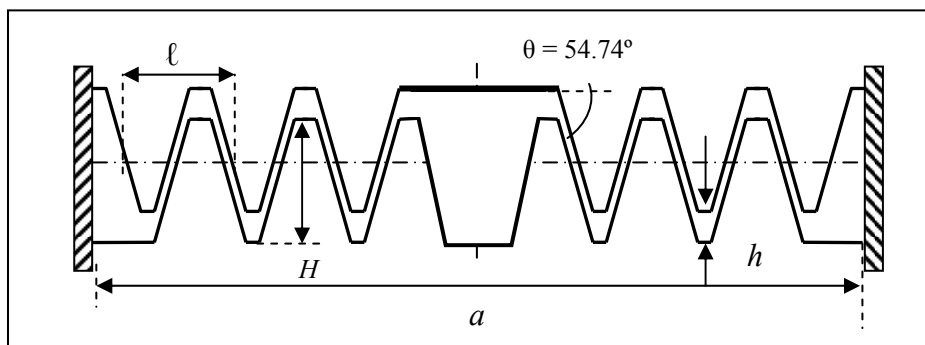
Kajian simulasi ini dijalankan dengan menggunakan perisian reka bentuk terbantu komputer (CAD) IntelliSuite. Perisian ini mampu menyediakan kemudahan simulasi yang mempunyai ketepatan yang tinggi untuk peranti-peranti MEMS daripada kategori- yang berlainan prinsip operasinya (mekanik, elektrostatik dan elektromagnetik) dan seterusnya menghasilkan kemunculan gambaran secara grafik untuk peranti yang telah melalui proses punaran secara simulasi [4].

Perisian ini merupakan suatu perisian bersepadu yang kompleks dan boleh membantu pereka bentuk dalam mengoptimumkan peranti MEMS dengan memberi capaian kepada pangkalan data pengilangan dengan membenarkan mereka untuk memodelkan keseluruhan turutan pengilangan suatu peranti serta

seterusnya mensimulasi ciri-ciri untuk mendapatkan hasil simulasi secara visual tanpa menggunakan kemudahan pengilangan yang sebenar [4].

3. STRUKTUR DIAFRAM

Struktur diafram yang terlibat dalam kajian ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Diafram tersebut adalah berbentuk segi empat dan bersaiz 7.2×7.2 mm serta mempunyai corak alunan berbentuk segi empat sepusat. Jumlah alunan yang terdapat di atas diafram tersebut adalah sebanyak tiga. Struktur-struktur alunan tersebut akan direalisasikan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik. Parameter struktur diafram beralun tersebut adalah seperti yang disenaraikan dalam Jadual 1.



Rajah 1: Pandangan keratan rentas untuk diafram beralun silikon

Jadual 1: Parameter bagi struktur diafram beralun silikon

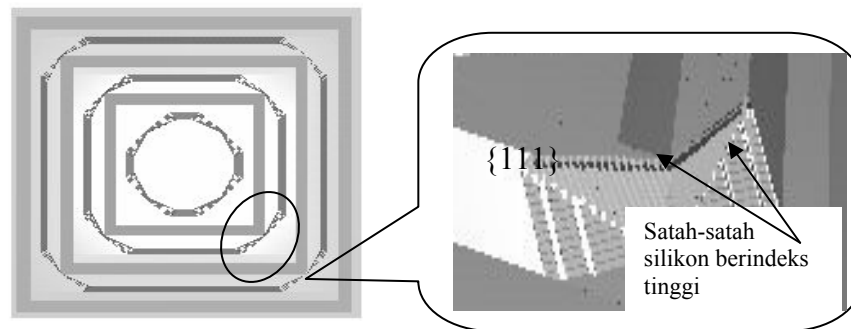
Parameter	Simbol	Nilai
Panjang sisi	a	7.2 mm
Tebal diafram	h	284 μm
Dalam alunan	H	216 μm
Jarak alunan	l	584 μm
Sudut di antara satah (100) dan dinding tepi	θ	54.74°

4. ANALISIS CIRI-CIRI KEADAAN POTONG BAWAH PENJURU

Bahagian ini membincangkan tentang ciri-ciri keadaan potong bawah penjuru yang terbentuk pada penjuru-penjuru cembung reka bentuk diafram beralun yang diperolehi daripada kerja-kerja simulasi. Pencirian keadaan potong

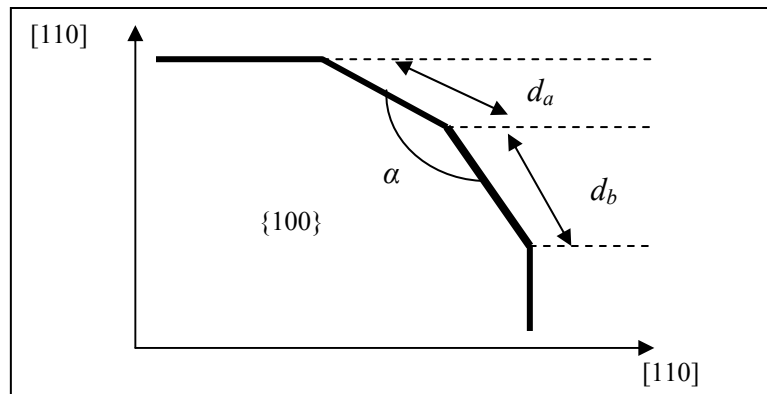
bawah penjuru tersebut termasuklah mengenal pasti kemunculan satah-satah silikon yang baru pada penjuru-penjuru cembung semasa proses punaran, jumlah keadaan potong bawah penjuru yang berlaku pada arah 45° kepada satah permukaan rata (100) dan arah $\langle 110 \rangle$ serta menentukan bagaimana parameter-parameter penting dalam proses punaran seperti suhu dan kepekatan larutan KOH mempengaruhi pembentukan keadaan potong bawah penjuru tersebut.

Rajah 2 menunjukkan pandangan atas hasil simulasi diafram beralun silikon jenis-n dan berorientasi (100) pada kepekatan larutan KOH 20% dan suhu 80°C . Daripada rajah tersebut, kesemua penjuru cembung yang terbentuk adalah tidak sempurna dan pandangan yang diambil dari dekat untuk salah satu penjuru cembung juga boleh dilihat. Merujuk kepada keadaan potong bawah penjuru yang terhasil ini, penjuru cembung yang terpunar terdiri daripada morfologi permukaan yang berbeza di mana kelihatan satu permukaan yang mempamerkan struktur yang halus dan licin, manakala permukaan yang lain didapati agak kasar dan mempunyai bentuk yang tidak teratur.



Rajah 2: Hasil simulasi penjuru cembung terpunar yang terdiri daripada morfologi permukaan yang berbeza berpunca daripada kemunculan satah-satah silikon berindeks tinggi

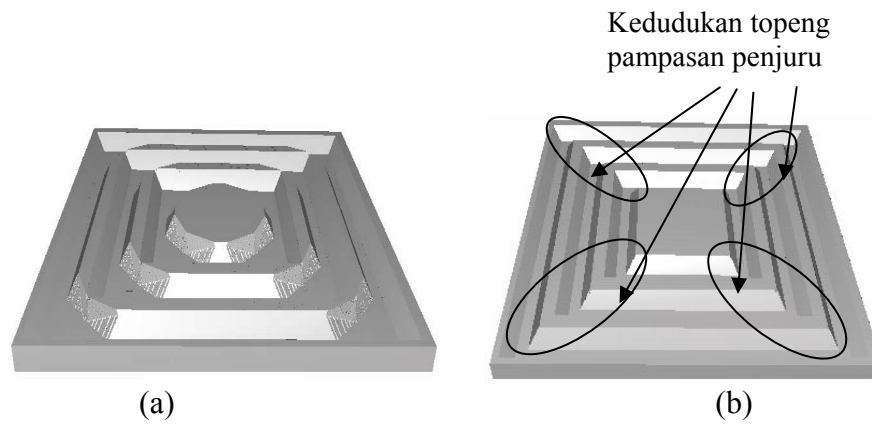
Keadaan morfologi permukaan yang berbeza ini adalah disebabkan oleh satah-satah $\{411\}$, $311\}$ atau satah-satah silikon berindeks tinggi yang lain terpunar dengan kadar yang lebih pantas dari satah-satah $\{100\}$ dan akhirnya mengakibatkan keadaan potong bawah penjuru pada setiap penjuru cembung di mana kesemua satah tersebut terdedah kepada larutan pemunaran KOH [5,6]. Pandangan atas bagi suatu penjuru cembung yang telah terpunar yang didapati dari hasil kajian simulasi ini ditunjukkan secara grafik dalam Rajah 3 dengan takrifan sudut penjuru cembung terpunar, α , dan jarak-jarak d_a dan d_b untuk memudahkan pencirian suatu keadaan potong bawah penjuru.



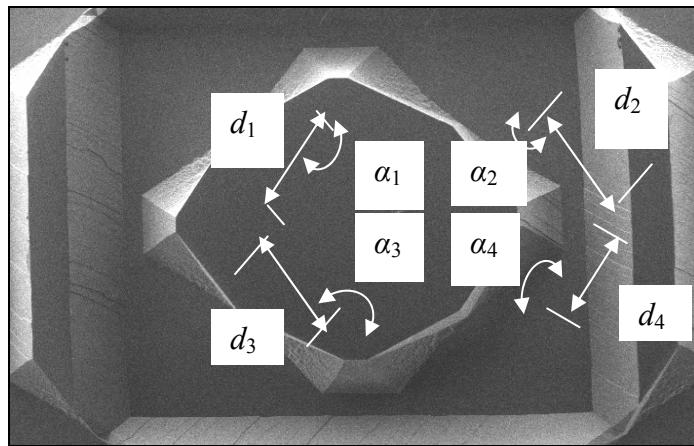
Rajah 3: Pandangan atas dua dimensi suatu penjuru cembung yang terpunar dengan takrifan sudut terhasil, α dan jarak-jarak d_a dan d_b

Berdasarkan keputusan kajian simulasi di atas, perisian simulasi proses punaran AnisE yang telah digunakan terbukti mempunyai kemampuan untuk meramalkan bentuk hasil punaran pada penjuru cembung dan seterusnya boleh digunakan dalam proses pengoptimuman reka bentuk topeng pampasan bagi menghasilkan diafram beralun yang sempurna. Suatu pandangan dekat ke atas fenomena potong bawah penjuru yang berlaku pada bahagian atas diafram dan kesan daripada proses punaran yang menggunakan bentangan topeng pampasan dijelaskan dalam Rajah 4.

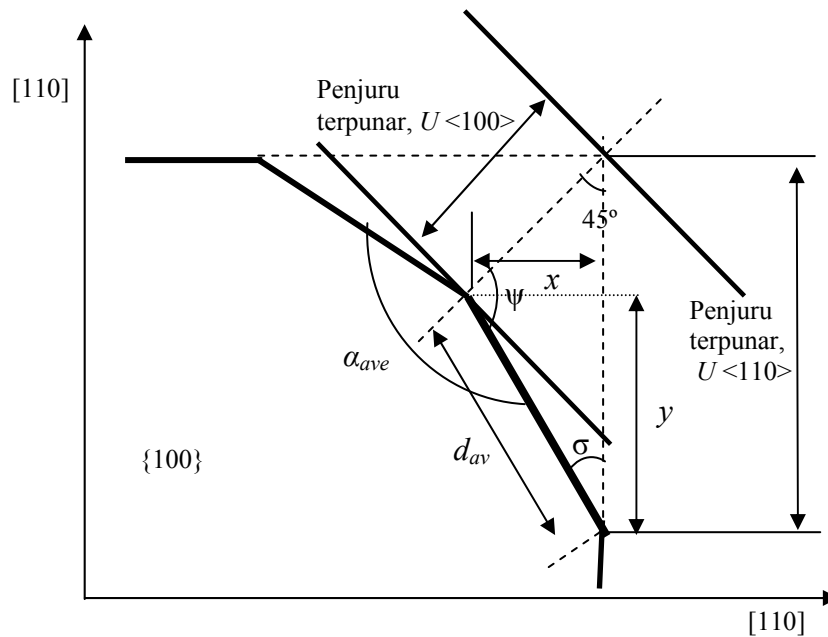
Di samping itu, kaedah yang lebih jelas bagi menunjukkan perbezaan keadaan potong bawah penjuru yang diperolehi hasil punaran ke atas diafram beralun ini adalah melalui pengukuran jumlah penjuru yang terpunar dari arah 45° kepada satah permukaan rata $\langle 100 \rangle$, $U_{\langle 100 \rangle}$ dan dari arah $\langle 110 \rangle$, $U_{\langle 110 \rangle}$. Pengukuran ini dilakukan berdasarkan nilai-nilai purata sudut terpunar, α_{ave} , dan panjang sisi, d_{ave} , yang diperolehi hasil simulasi seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5 di mana pengiraan dibuat dengan merujuk kepada Rajah 6. Rajah ini menunjukkan model dua dimensi suatu penjuru cembung terpunar yang dilihat dari atas di mana parameter-parameter x , y , ψ , σ dan seterusnya $U_{\langle 100 \rangle}$ dan $U_{\langle 110 \rangle}$ ditentukan dengan menggunakan prinsip trigonometri seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2.



Rajah 4: Perbandingan hasil simulasi proses punaran diafram beralun dengan menggunakan bentangan topeng: (a) tanpa pampasan dan (b) dengan pampasan penjuru



Rajah 5: Contoh-contoh struktur penjuru cembung terpunar, α_1 , α_2 , α_3 , dan α_4 dan parameter parameter d_1 , d_2 , d_3 dan d_4 sebagai rujukan dalam pengukuran jumlah potong bawah penjuru



Rajah 6: Pandangan atas dua dimensi suatu penjuru cembung yang terpunar dengan takrifan sudut terhasil, α_{ave} dan parameter-parameter d_{ave} , x , y , ψ dan σ bagi rujukan penentuan jumlah penjuru cembung terpunar

Jadual 2: Keputusan pengiraan jumlah potong bawah penjuru dan parameter-parameter yang berkenaan dengan merujuk kepada Rajah 6

Jenis pemutar	d_{ave} (μm)	α_{ave} ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	σ ($^\circ$)	$U_{<100>}$ (μm)	$U_{<110>}$ (μm)
KOH	520.02	150.21	104.90	30.10	368.81	710.67

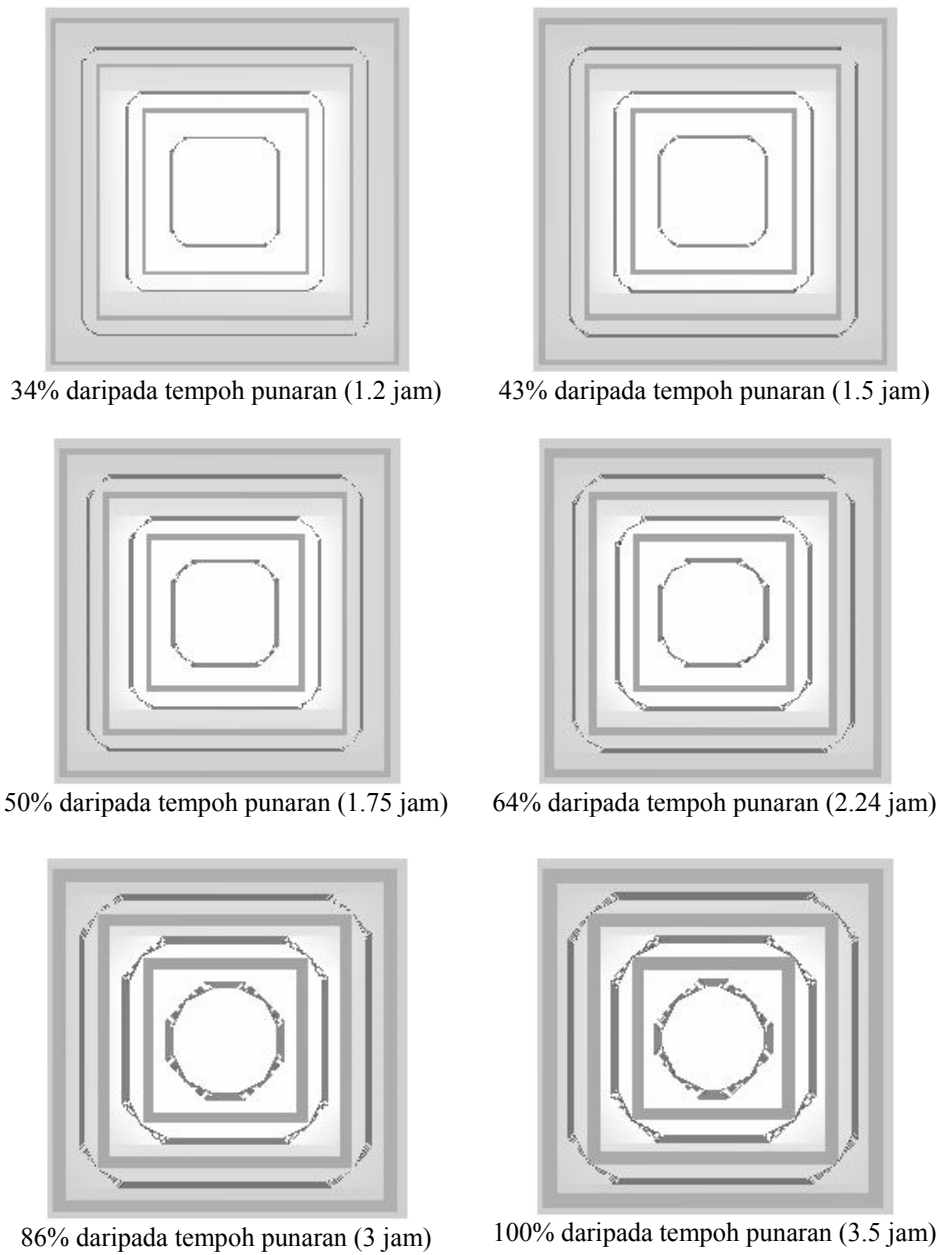
Keadaan punaran wafer silikon berorientasi (100) dengan menggunakan larutan KOH untuk menghasilkan diafram beralun mengikut spesifikasi yang telah diberikan adalah seperti yang telah diringkaskan dalam Jadual 3. Penentuan keadaan proses simulasi punaran KOH dibuat dengan merujuk kepada keputusan-keputusan kajian uji kaji proses punaran yang telah dijalankan di makmal Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN) [7]. Kajian tersebut telah dilakukan ke atas wafer silikon jenis-n berorientasi (100) dengan menggunakan kepekatan larutan KOH yang berlainan, iaitu daripada 15 hingga 55%, manakala suhu punaran yang digunakan adalah daripada 65 hingga 85°C. Hasil kajian ini,

suatu keadaan proses punaran yang optimum diperoleh bagi pembentukan suatu diafram beralun silikon.

Jadual 3: Ringkasan maklumat keadaan punaran untuk proses simulasi

Parameter punaran	Larutan KOH
Suhu (°C)	80
Kepekatan larutan pemunaran (%)	35
Masa punaran (jam)	3.5
Kadar punaran ($\mu\text{m}/\text{jam}$)	
Si {100}	72.55
Si {110}	111.7
Purata ketebalan diafram (μm)	38.50
Purata kedalaman alunan (μm)	≈ 216

Pemerhatian secara lebih dekat ke atas pembentukan keadaan potong bawah penjurong pada bahagian atas diafram di mana perambatan proses punaran terhadap masa diilustrasikan dalam Rajah 7. Proses punaran ini telah dijalankan pada bahagian atas diafram sahaja dengan menggunakan larutan KOH yang berkepekatan 35% pada suhu 82°C. Kelihatan pembentukan keadaan potong bawah penjurong pada struktur-struktur penjurong cembung diafram beralun menjadi lebih ketara jika proses punaran yang dijalankan mengambil masa yang lama.



Rajah 7: Pandangan atas pembentukan keadaan potong bawah penjurong pada bahagian atas diafram mengikut turutan masa punaran apabila diafram dipunat dari arah atas dengan menggunakan larutan KOH berkepekatan 35% pada suhu 80°C

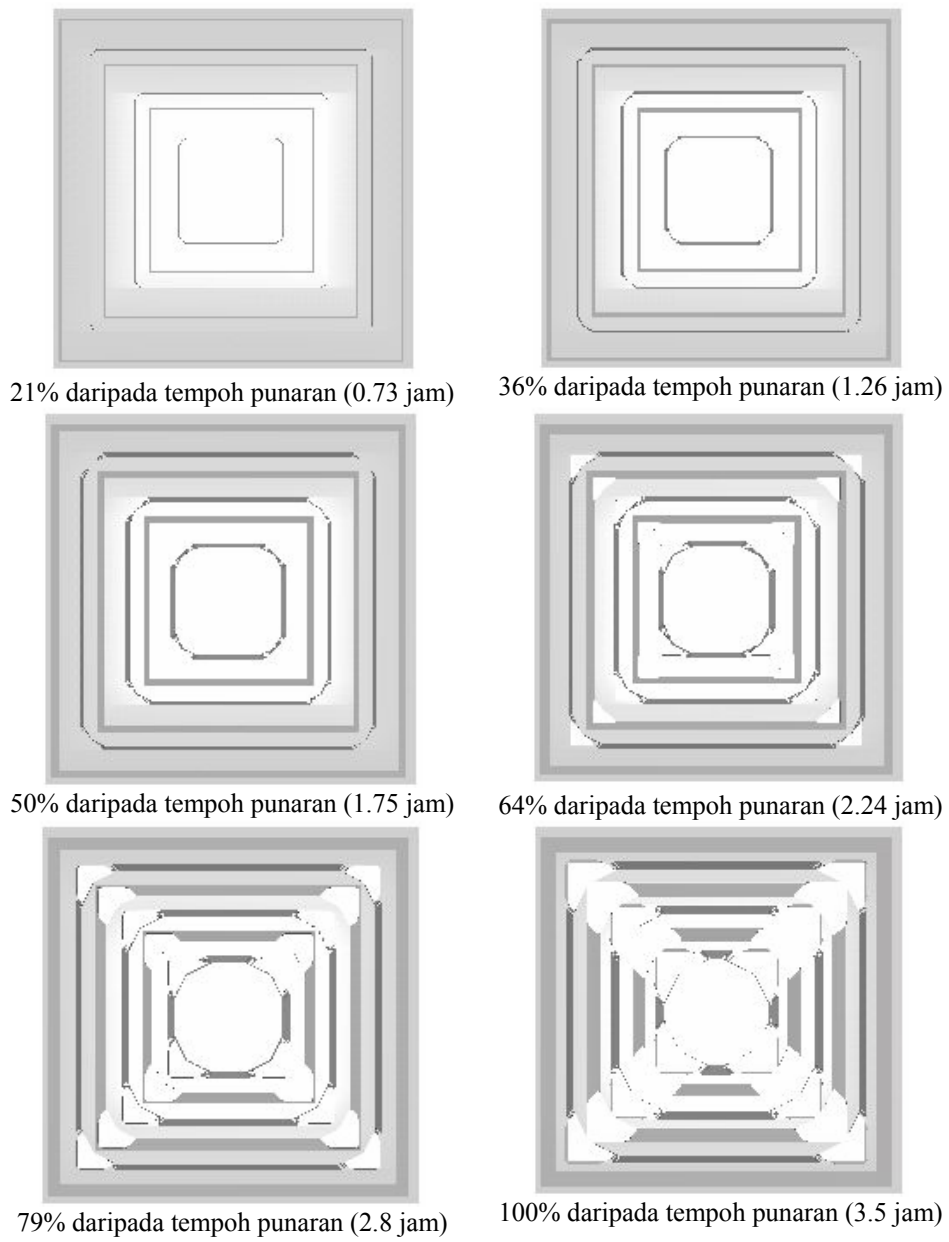
Dalam kes struktur diafram beralun yang lengkap pula, pembentukan keadaan potong bawah penjuru mengikut turutan masa ditunjukkan dalam Rajah 8. Bagi tujuan penghasilan diafram beralun ini, wafer silikon telah dipunarkan dari kedua-dua arah atas dan bawah wafer silikon. Setiap penjuru cembung yang ada pada bahagian atas dan bawah diafram akan memulakan pengubahsuaian bentuk masing-masing kepada bentuk yang lain yang terdiri daripada satah berindeks tinggi sepanjang proses punaran sehingga tamat. Merujuk kepada Rajah 8, kelihatan kewujudan lubang yang terbentuk pada setiap penjuru cembung diafram beralun tersebut yang disebabkan oleh pembentukan keadaan potong bawah penjuru pada setiap penjuru cembung pada kedua-dua bahagian atas dan bawah diafram. Kesan ini menjadi lebih ketara lagi pada masa pelengkapan proses punaran.

4.1 Kebersandaran Pembentukan Keadaan Potong Bawah Penjuru Terhadap Suhu Larutan KOH dan Tempoh Punaran

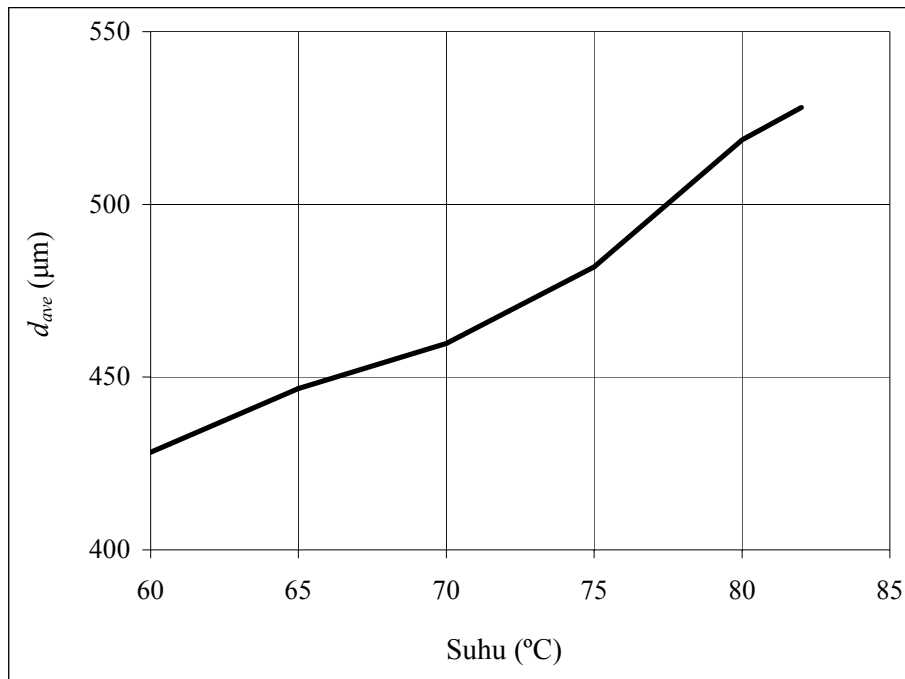
Objektif kajian simulasi ini dijalankan adalah untuk membuat pemerhatian ke atas pengaruh suhu larutan KOH ke atas struktur penjuru cembung yang terdapat pada diafram beralun yang telah direka bentuk. Simulasi ini dilakukan pada kepekatan larutan KOH yang malar, iaitu 35% dan perubahan suhu larutan KOH daripada 60 hingga 82°C. Keputusan pencirian keadaan potong bawah penjuru dalam kajian ini diringkaskan seperti dalam Jadual 4. Kesemua takrifan dan kaedah yang digunakan untuk tujuan pencirian keadaan potong bawah penjuru ini boleh dirujuk kepada Rajah 5 dan Rajah 6. Daripada keputusan ini, kesan sudut penjuru cembung yang terpunar didapati lebih ketara apabila suhu larutan KOH meningkat. Keadaan ini lebih jelas lagi dengan merujuk kepada graf dalam Rajah 9 di mana kelihatan jarak d_{ave} bertambah dengan kenaikan suhu larutan KOH.

Jadual 4: Perubahan keadaan penjuru cembung terpunar terhadap suhu KOH

Suhu (°C)	d_{ave} (μm)	α_{ave} (°)	ψ (°)	σ (°)
60	429.66	155.85	102.10	32.90
65	447.73	154.61	102.7	32.30
70	461.85	153.50	103.25	31.75
75	483.67	152.10	103.95	31.05
80	520.02	150.21	104.9	30.10
82	529.46	149.60	105.2	29.80

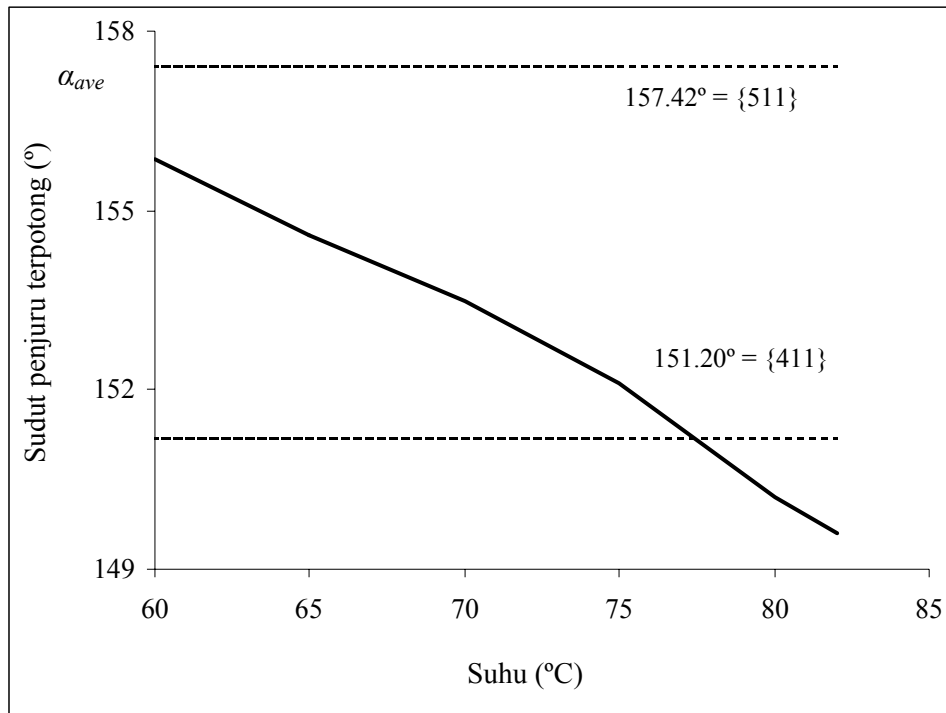


Rajah 8: Pandangan atas pembentukan keadaan potong bawah penjuru pada bahagian atas diafram mengikut turutan masa punaran apabila diafram dipunar dari arah atas dan bawah dengan menggunakan larutan KOH berkepekatan 35% pada suhu 80°C



Rajah 9: Kebersandaran jarak-jarak d_{ave} terhadap suhu larutan KOH
 Nota: Takrifan secara grafik untuk d_a dan d_b boleh didapati daripada Rajah 3

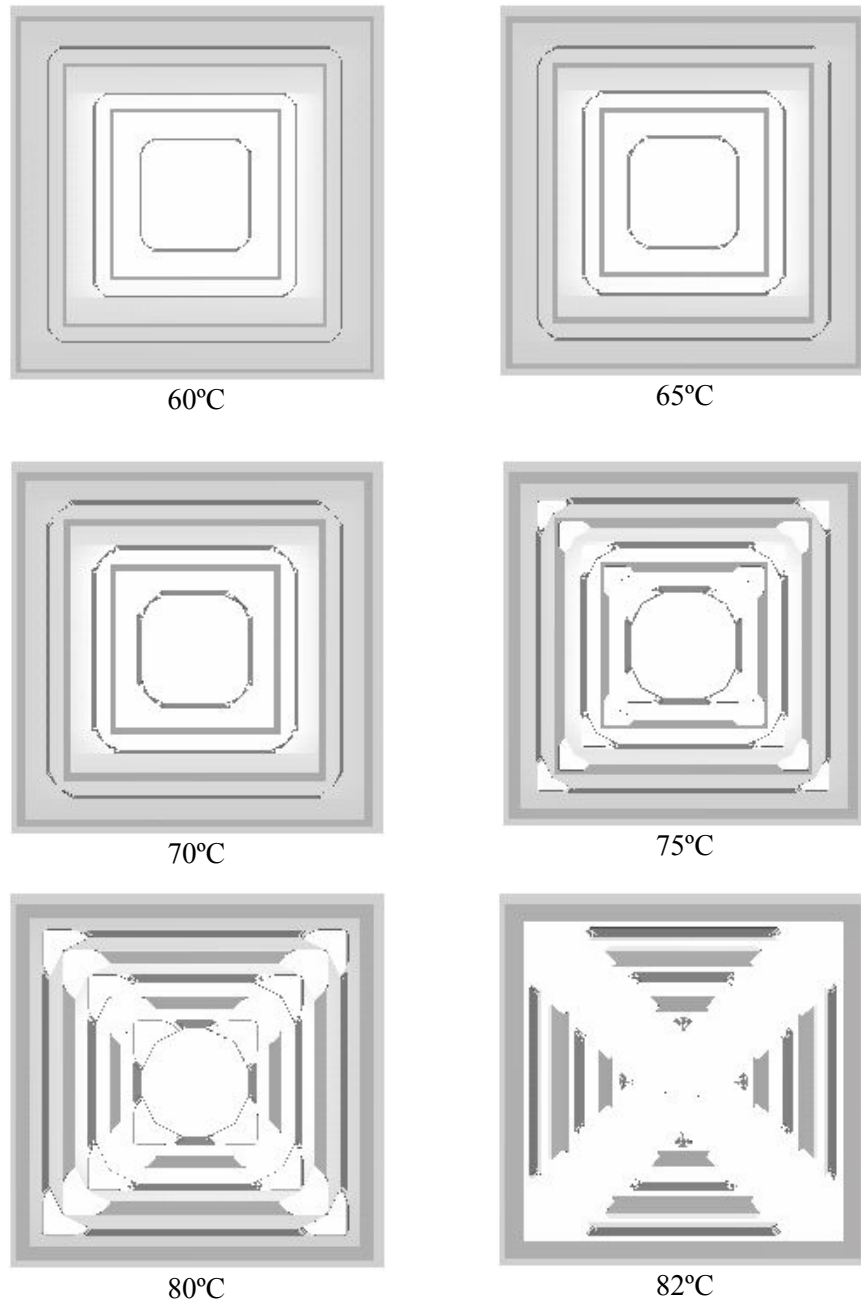
Dari aspek lain pula, iaitu perubahan sudut penjuru cembung terpunar, α_{ave} , kenaikan suhu larutan KOH telah menjadikan nilai sudut ini semakin menurun seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 10. Dalam rajah ini terdapat dua garisan putus masing-masing menandakan sudut-sudut yang dihasilkan daripada satah-satah menyerong {511} dan {411}. Sebagaimana yang dapat dilihat dalam Rajah 10, nilai sudut penjuru cembung terpunar, α_{ave} pada permulaan nilai suhu larutan KOH yang rendah adalah lebih rendah daripada nilai sudut untuk satah-satah {511}. Walau bagaimanapun, apabila suhu meningkat, nilai sudut ini menjadi semakin berkurangan sehingga melepasi nilai sudut satah-satah {411} tetapi masih terlalu jauh dari menghampiri nilai satah {311}, iaitu 143.20° . Dalam kajian ini rujukan nilai sudut-sudut satah menyerong, iaitu sudut satah menyerong {511}, {411} dan {311} dibuat berdasarkan nilai-nilai teori antara sudut-sudut tersebut dengan satah {100} seperti yang diberikan dalam Jadual 5 [8].



Rajah 10: Kebersandaran sudut penjuru cembung terpunar, α_{ave} terhadap suhu larutan KOH

Jadual 5: Nilai-nilai teori bagi sudut penjuru cembung terpunar, α , bagi beberapa satah-satah silikon berindeks tinggi [8]

HKL	Sudut, α (°)
211	126.84
311	143.20
411	151.20
511	157.42



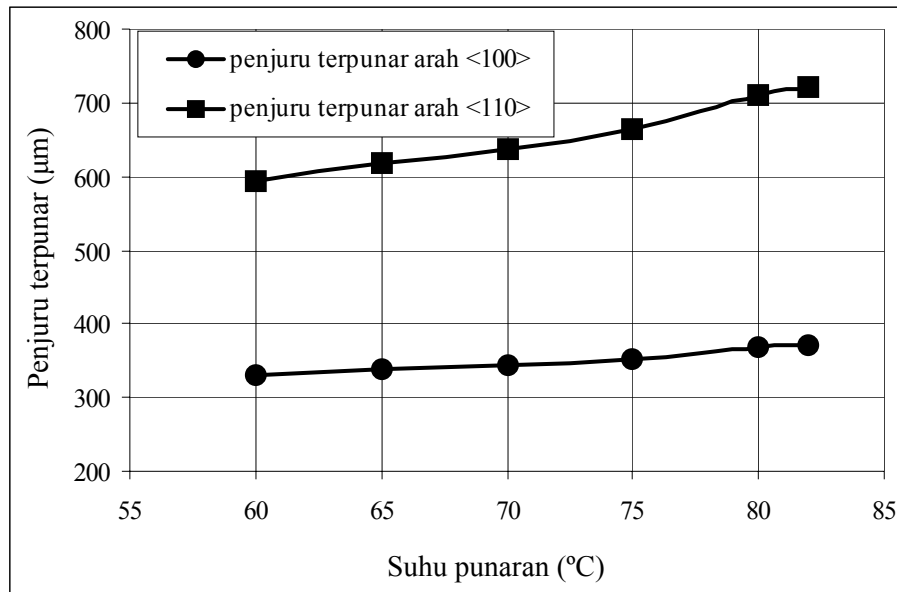
Rajah 11: Pandangan atas keputusan simulasi untuk diafram beralun lengkap yang telah dipunarkan selama 3.5 jam pada suhu larutan KOH yang berbeza dan kepekatan larutan KOH 35%

Gambaran jelas hasil simulasi struktur diafram beralun tentang kebersandaran pembentukan keadaan potong bawah penjuru terhadap suhu larutan KOH boleh didapati dalam Rajah 11. Kelihatan pembentukan keadaan potong bawah penjuru semakin nyata apabila suhu meningkat dan akhirnya menghasilkan lubang-lubang pada suhu 75°C. Seterusnya saiz lubang-lubang tersebut semakin ketara apabila suhu meningkat. Perubahan saiz lubang bagi satu unit struktur penjurua cembung pada diafram beralun ini yang berlaku apabila suhu larutan KOH ditingkatkan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 6.

Jadual 6: Perubahan jumlah potong bawah penjuru terhadap peningkatan suhu KOH

Suhu (°C)	Penjurua terpunar $U_{<100>}(\mu\text{m})$	Penjurua terpunar $U_{<110>}(\mu\text{m})$	Saiz lubang terbentuk (mm^2)
60	330.31	594.60	0.139
65	338.32	617.50	0.148
70	343.74	635.84	0.154
75	352.83	663.88	0.166
80	368.81	710.67	0.185
82	371.80	721.95	0.189

Perubahan jumlah potong bawah penjurua dalam kedua-dua arah 45° terhadap permukaan rata $<100>$, $U_{<100>}$, dan dalam arah $<110>$, $U_{<110>}$, dalam kajian ini diberikan dalam Jadual 6. Kelihatan bahawa jumlah potong bawah penjurua dalam kedua-dua arah tersebut semakin bertambah apabila suhu meningkat disebabkan pertambahan dalam kadar punaran. Jumlah potong bawah penjurua dalam kedua-dua arah ini juga merupakan parameter yang memberikan gambaran yang paling jelas dalam pencirian penjurua terpunar seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6 di mana nilai yang tinggi menandakan keadaan potong bawah penjurua yang amat ketara. Kebersandaran parameter-parameter ini terhadap suhu diilustrasikan secara grafik dalam Rajah 12.



Rajah 12: Kebersandaran jumlah potong bawah penjuru terhadap suhu larutan KOH

Nota: Takrifan secara grafik untuk α boleh didapati daripada Rajah 3

Bagi keadaan punaran yang akan digunakan dalam kerja-kerja fabrikasi, iaitu pada kepekatan KOH 35% dan suhu 80°C, jumlah potong bawah penjuru yang berlaku pada satu struktur penjuru cembung didapati adalah sebanyak 368.81 μm dalam arah 45° kepada permukaan rata <100> dan 710.67 μm dalam arah <110>. Oleh sebab diafram beralun yang akan direka bentuk mempunyai jumlah alunan sebanyak tiga, maka jumlah bilangan penjuru cembung yang terpunar adalah sebanyak 12. Oleh itu, kesan keadaan potong bawah penjuru ke atas diafram beralun ini amat ketara di mana jika topeng berpampasan penjuru tidak digunakan, ia akan menjejaskan prestasi diafram tersebut.

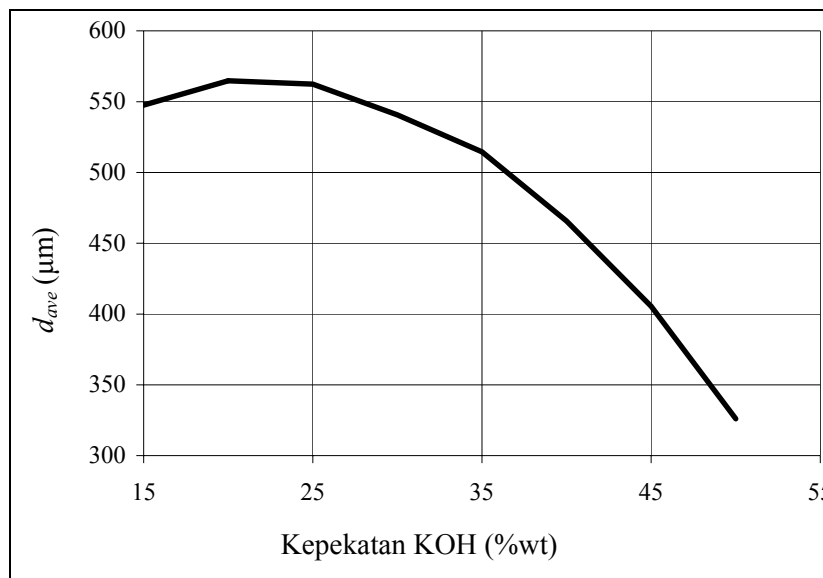
4.2 Kebersandaran Pembentukan Keadaan Potong Bawah Penjuru Terhadap Kepekatan Larutan KOH dan Tempoh Punaran

Objektif kajian simulasi ini dijalankan adalah untuk membuat pemerhatian ke atas pengaruh kepekatan larutan KOH ke atas struktur penjuru cembung yang terdapat pada diafram beralun yang telah direka bentuk. Simulasi ini dilakukan pada suhu larutan KOH yang malar, iaitu 80°C dan perubahan kepekatan larutan KOH daripada 15 hingga 50%.

Pencirian keadaan potong bawah penjuru dalam kajian ini diringkaskan seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 7. Kesemua takrifan dan kaedah yang digunakan untuk tujuan pencirian keadaan penjuru terpotong ini boleh didapati dengan merujuk kepada Rajah 5 dan Rajah 6. Kesan kepekatan larutan KOH terhadap jarak-jarak d_a dan d_b ditunjukkan dengan lebih jelas lagi dalam Rajah 13 dimana didapati nilai bagi d_{ave} bertambah sehingga kepekatan larutan KOH mencapai 20%. Walau bagaimanapun selepas takat ini, kedua-dua nilai tersebut mengalami penurunan apabila kepekatan larutan KOH bertambah.

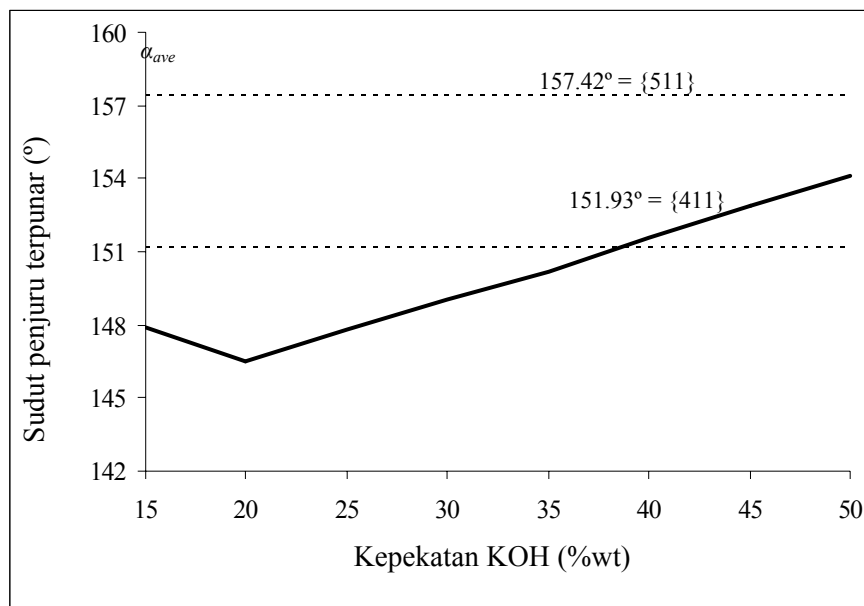
Jadual 7: Perubahan ciri-ciri penjuru cembung terpunar terhadap kepekatan KOH

Kepekatan (% wt)	d_{ave} (μm)	α_{ave} ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	σ ($^\circ$)
15	550.01	147.90	106.05	28.95
20	567.61	146.50	106.75	28.25
25	564.24	147.80	106.10	28.90
30	543.75	149.00	105.50	29.50
35	520.02	150.21	104.90	30.10
40	468.75	151.60	104.20	30.80
45	407.28	152.90	103.60	31.40
50	328.72	154.10	102.95	32.05



Rajah 13: Kebersandaran jarak d_{ave} terhadap kepekatan larutan KOH

Pencirian keadaan potong bawah penjuru dari aspek sudut penjuru cembung terpunar, α_{ave} adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 14. Daripada rajah ini, kelihatan pada kepekatan larutan KOH yang paling rendah dalam kajian ini, nilai sudut penjuru cembung α_{ave} berada di bawah paras nilai sudut satah $\{411\}$, iaitu 151.93° [8]. Walau bagaimanapun nilai sudut ini mengalami penurunan apabila larutan KOH mencapai 20%, tetapi selepas takat ini, nilai sudut tersebut mengalami peningkatan seterusnya apabila kepekatan larutan KOH bertambah, jauh dari menghampiri sudut satah-satah $\{511\}$, iaitu 157.42° [8].



Rajah 14: Kebersandaran sudut penjuru cembung terpunar, α_{ave} terhadap kepekatan larutan KOH

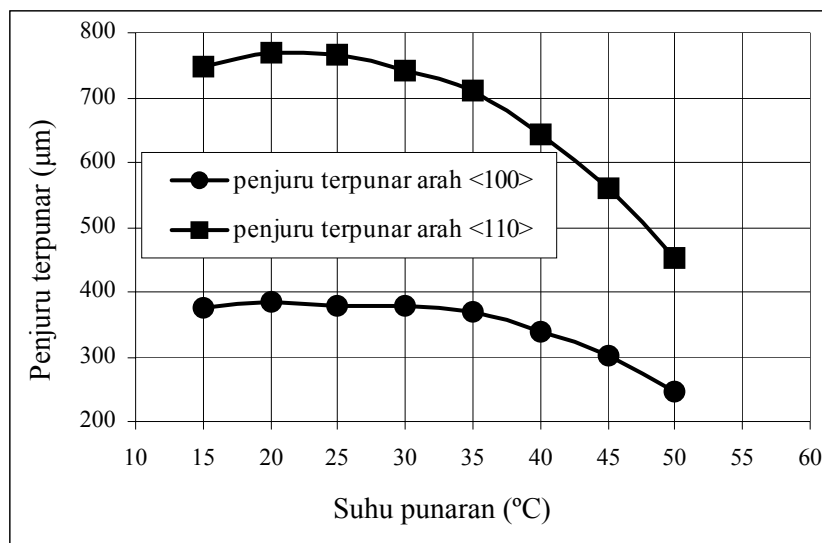
Perubahan jumlah potong bawah penjuru dalam kedua-dua arah 45° terhadap permukaan rata $\langle 100 \rangle$ dan dalam arah $\langle 110 \rangle$ dalam kajian ini diberikan dalam Jadual 8. Kelihatan bahawa jumlah kedua-dua potong bawah penjuru tersebut bermula dengan peningkatan nilai pada kepekatan KOH yang paling rendah dalam kajian ini tetapi mengalami penurunan nilai seterusnya selepas mencapai kepekatan 20%. Kebersandaran parameter-parameter ini terhadap kepekatan KOH digambarkan secara grafik dalam Rajah 15.

Gambaran yang lebih jelas tentang kebersandaran keadaan potong bawah penjuru terhadap kepekatan larutan KOH boleh dilihat dalam Rajah 16. Daripada rajah tersebut, lubang-lubang yang terbentuk akibat keadaan potong bawah

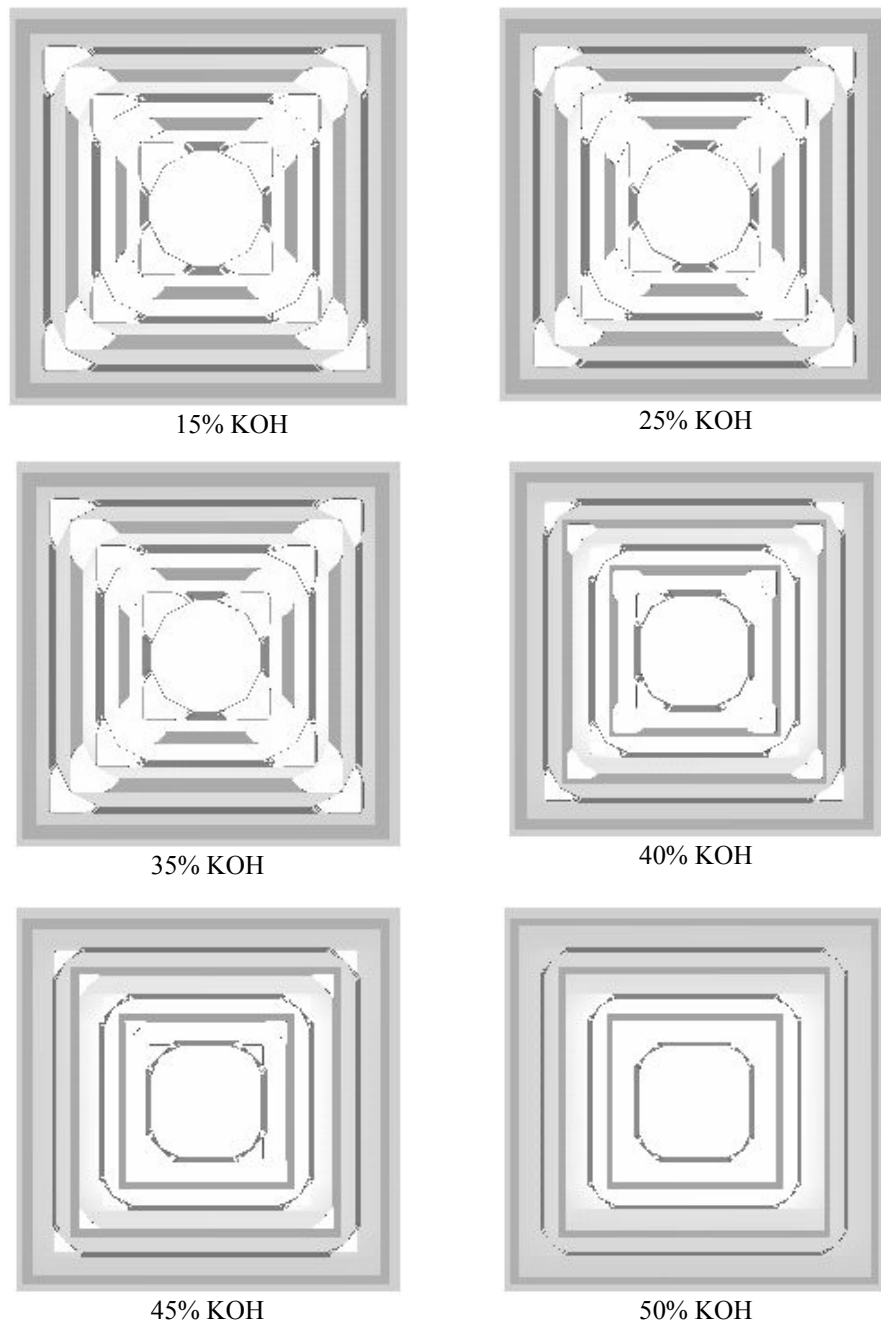
penjuru yang berlaku pada bahagian atas dan bawah diafram menjadi kurang ketara apabila kepekatan larutan KOH ditambah dan seterusnya lenyap pada kepekatan larutan KOH 50% disebabkan kadar punaran yang rendah. Pada prinsipnya, tindak balas kimia akan meningkat apabila kepekatan larutan KOH bertambah, tetapi, keputusan hasil simulasi ini adalah bertentangan dan penjelasan mengenainya diberikan seperti berikut [9].

Jadual 8: Perubahan jumlah potong bawah penjuru terhadap peningkatan kepekatan KOH

Kepekatan (°C)	Penjuru terpunar $U_{<100>}$ (μm)	Penjuru terpunar $U_{<110>}$ (μm)
15	376.50	747.50
20	385.64	768.65
25	379.94	766.67
30	378.66	741.01
35	368.81	710.67
40	339.44	642.66
45	300.08	559.82
50	246.69	453.06



Rajah 15: Kebersandaran jumlah potong bawah penjuru terhadap kepekatan larutan KOH



Rajah 16: Pandangan atas keputusan simulasi untuk diafram beralun lengkap yang telah dipunarkan selama 3.5 jam pada kepekatan larutan KOH yang berbeza dan suhu 80°C

Atom-atom silikon bergabung (*pile*) mengikut struktur yang tertentu untuk pembentukan silikon berhablur tunggal. Atom pada permukaan silikon mengikat atom dalaman silikon dalam lapisan atomik yang kedua dengan ikatan Si-Si. Semasa proses punaran silikon, selepas ikatan-ikatan belakang terlerai, suatu ion OH^- akan terikat dengan atom silikon pada permukaan. Dalam kes wafer silikon, bilangan atom silikon yang bersentuh secara langsung dengan larutan KOH adalah pasti. Di bawah keadaan kepekatan larutan KOH yang rendah, bilangan atom pada permukaan silikon adalah melebihi bilangan ion OH^- untuk satu unit kawasan. Bilangan ion OH^- akan bertambah sekiranya kepekatan KOH meningkat. Oleh yang demikian, bilangan atom silikon yang bertindak balas dengan ion-ion OH^- meningkat dan seterusnya mengakibatkan peningkatan kadar punaran.

Walau bagaimanapun, apabila kepekatan larutan KOH mencapai suatu takat, bilangan ion-ion OH^- akan menjadi lebih banyak daripada bilangan atom silikon. Dalam keadaan ini, ketumpatan ion-ion OH^- yang tinggi akan menyebabkan daya penolakan berlaku antara dua ion OH^- dan akhirnya mengakibatkan penurunan kadar punaran. Nilai kritikal bagi kepekatan larutan KOH yang didapati daripada hasil kajian ini ialah 20%, di mana nilai ini boleh dianggap bertepatan dengan hasil kajian terdahulu yang melaporkan bahawa kadar punaran yang maksimum berlaku pada kepekatan larutan KOH antara 20 hingga 30% [10,11].

5. KESIMPULAN

Kajian ini telah membuktikan bahawa ciri-ciri potong bawah penjuru bagi diafram beralun silikon dipengaruhi oleh suhu, kepekatan larutan pemunaran KOH dan tempoh proses punaran. Kepentingan pengaruh faktor-faktor ini boleh ditentukan dengan saiz geometri struktur terpunar dan kemunculan satah-satah baru silikon pada penjuru-penjuru cembung yang terpunar. Hasil kajian ini, permukaan penjuru-penjuru cembung yang terpunar dapat disimpulkan terdiri daripada kemunculan satah-satah silikon baru yang berindeks tinggi yang berada berhampiran dengan nilai satah-satah {411} dan {511}.

Penghasilan suatu diafram beralun yang sempurna adalah amat penting di mana dengan kehadiran keadaan potong bawah penjuru ini, kawasan permukaan efektif di bahagian atas dan bawah diafram akan berkurangan dan seterusnya menjejaskan prestasi diafram tersebut. Akhir sekali, pertimbangan yang wajar perlu diberikan kepada teknologi fabrikasi yang akan digunakan untuk merealisasikan suatu diafram beralun demi menghasilkan produk yang berprestasi tinggi.

6. RUJUKAN

1. Madou, M. (1997). *Fundamentals of microfabrication*. Boca Raton: CRC Press, 79–84.
2. Bao, M., Burrer, C., Esteve, J., Bausells, J. & Marco, S. (1993). Etching front control of <110> strips for corner compensation. *Sensors and Actuators A*, 37–38, 727–732.
3. Offereins, H.L., Kuhl, K. & Sandmaier, S. (1991). Methods for the fabrication of convex corners in anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH. *Sensors and Actuators A*, 25–27, 9–13.
4. Marchetti, J., He, Y., Than, O. & Akkaraju, S. (1998). Efficient process development for bulk silicon etching using cellular automata simulation techniques. *SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication, Micromachined Devices and Components*, Santa Clara. 83–89.
5. Bean, K.E. (1978). Anisotropic etching of silicon. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 25(10), 1185–93.
6. Offereins, H.L., Kuhl, K. & Sandmaier, H. (1991). Methods for the fabrication of convex corners in anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH. *Sensors and Actuators A*, 25–27, 9–13.
7. Mimiwati Mohd Noor. (2004). Kajian punaran basah tidak isotropik secara eksperimen untuk fabrikasi membran silikon. Tesis Sarjana, Universiti Kebangsaan Malaysia.
8. Runyan, W.R. (1965). *Silicon semiconductor technology*. New York: McGraw Hill, 84–93.
9. Seidel, H., Csepregi, L., Heuberger, A. & Baumgartel, H. (1990). Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions. *J. Electrochem. Soc.*, 137, 3612–3632.
10. Shikida, M., Nambara, K., Koizumi, T., Sasaki, H., Odagaki, M., Ado, M., Furuta, S. & Asaumi, K. (2002). A model explaining mask-corner undercut phenomena in anisotropic etchin: A saddle point in the etching-rate diagram. *Sensors and Actuators A*, 97–98, 758–763.
11. Palik, E.D., Glembocki, O.J., Heard, I., Burno, P.S. & Tenez, L. (1991). Etching roughness for (100) silicon surface in aqueous KOH. *Journal of Applied Physics*, 70, 3291–3300.