

# Hubungan Peratus Mampatan dalam Rawatan Termomekanikal ke atas Sifat Mikromekanikal Aloi Pateri Sn-Cu Menggunakan Pendekatan Pelekukan Nano

Fateh Amera Mohd Yusoff<sup>a</sup> and Maria Abu Bakar<sup>a,\*</sup> dan Azman Jalar<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN),  
Universiti Kebangsaan Malaysia,  
43600 Bangi, Selangor.*

<sup>b</sup>*Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi,  
Universiti Kebangsaan Malaysia,  
43600 Bangi, Selangor.*

(Received: 20.10.2021 ; Published: 8.12.2021)

**Abstrak.** Aloi pateri adalah penting sebagai bahan antarasambungan komponen elektronik yang memberikan kebolehfungsian kepada pakej elektronik. Rawatan termomekanikal merupakan suatu proses rawatan gabungan terma dan mekanik yang digunakan dengan meluas untuk mengubahsuai sifat dan prestasi bahan. Kajian ini mengkaji kesan rawatan termomekanikal ke atas bahan aloi pateri. Sifat mikromekanikal aloi pateri selepas diselidiki menggunakan kaedah pendekatan pelekukan nano. Aloi pateri Sn-Cu berbentuk kubik menjalani rawatan haba pada suhu 30 °C, 60°C, 90°C, 120°C dan 150 °C selama 20 minit, diikuti dengan pemampatan sebanyak 20% dan dilindap-kejut di dalam medium air. Sampel kawalan merupakan sampel yang hanya didedahkan pada rawatan haba tanpa melalui proses mampatan. Hasil kajian mendapati, sifat kekerasan serta modulus terkurang bagi aloi pateri Sn-Cu selepas rawatan termomekanikal menghasilkan jurang perbezaan nilai yang rendah jika dibandingkan pada 30°C dan 150°C, iaitu 40 MPa (~33% perubahan) dan 27 GPa (~39% perubahan). Kedua-dua nilai ini hampir tiga kali ganda lebih rendah berbanding sampel kawalan yang menghasilkan jurang perbezaan nilai kekerasan sebanyak 102 MPa (~57% perubahan) dan 64 GPa (~39% perubahan) bagi nilai modulus terkurang. Ini bermaksud aloi pateri Sn-Cu menunjukkan kestabilan sifat mikromekanikal yang lebih tinggi selepas rawatan termomekanikal. Justeru, kajian ini boleh digunakan sebagai rujukan untuk meramal sifat mikromekanikal aloi pateri dan diaplikasikan dalam industri pempakejan elektronik.

**Kata Kunci:** Kekerasan; kestabilan sifat mikromekanikal; modulus terkurang; mampatan

**Abstract.** Solder alloys are important as interconnect materials for electronic components which provides functionality to the electronic packages. Thermomechanical treatment is a combined process of thermal and mechanical treatment commonly used to modify the properties and performance of materials. In this study, the effects of thermomechanical treatment on solder alloys are investigated. The micromechanical properties of the solder joint alloys were investigated using the nanoindentation method. The cubic shape of Sn-Cu solder alloy was heat-treated at 30 °C, 60 °C, 90 °C, 120 °C and 150 °C for 20 minutes, followed by 20% compression processing and quenched in water medium. The controlled sample is a sample subjected to heat treatment without undergoing compression processing.

*The results showed that the hardness properties and reduced modulus of Sn-Cu solder alloy after thermomechanical treatment have a small difference in values gap when compared to 30 °C and 150 °C, which is 40 MPa (~ 33% changes) and 27 GPa (~ 39% changes). These two values were almost three times lower than the control sample, which showed a hardness value difference gap of 102 MPa (~ 57% changes) and 64 GPa (~ 39% changes) for the reduced modulus value. This implies that Sn-Cu solder alloys exhibit higher stability of micromechanical properties after thermomechanical treatment. Thus, this study can serve as a reference for predicting the micromechanical properties of solder alloys and can be applied in the electronic packaging industry.*

## I. PENGENALAN

Bahan pateri telah digunakan secara meluas di dalam pempakejan elektronik sebagai antarasambungan komponen elektronik. Perkembangan teknologi pempakejan elektronik telah mengakibatkan komponen elektronik yang digunakan mengalami penyusutan saiz, dan keadaan ini juga diikuti oleh pengecilan saiz bahan pateri (Ismail et al. 2019). Keberkesanan bagi satu sistem elektronik, kebolehharapan serta kosnya sangat dipengaruhi oleh bahan pempakejan yang digunakan. Justeru, kefahaman kelakuan mekanik bahan pateri adalah penting agar kebolehharapan alat elektronik dapat ditentukan (Zhang, Xue & Wang 2020). Bahan pateri dibahagikan kepada dua jenis iaitu aloi pateri berplumbum (Sn-Pb) dan bebas plumbum seperti Sn-Cu. Walau bagaimanapun, penggunaan aloi Sn-Pb di dalam pempakejan elektronik dihentikan kerana ketoksikan bahan plumbum yang memberi impak negatif terhadap kesihatan dan alam sekitar (Aamir et al. 2019). Larangan penggunaan bahan pateri berplumbum oleh RoHS telah mendesak pembangunan bahan pateri bebas plumbum, dan Sn-Cu merupakan calon yang berpotensi untuk menggantikannya (Zhao et al. 2019).

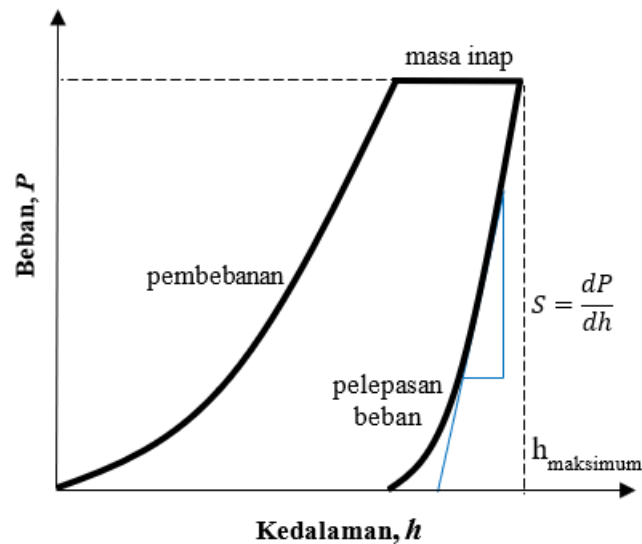
Rawatan termomekanikal adalah gabungan rawatan terma dan proses mekanikal yang menghasilkan canggaan plastik untuk mengubah mikrostruktur dan meningkatkan sifat suatu bahan (Zeng et al. 2021). Rawatan ini sering digunakan sebagai bahan aplikasi struktur dalam industri automotif dan pembinaan, yang memerlukan bahan struktur mempunyai sifat mekanikal dan kebolehharapan yang tinggi agar dapat digunakan dalam jangka masa panjang (Hui et al. 2018). Rawatan termomekanikal memanipulasi sifat mekanikal melalui kawalan suhu dan beban yang dikenakan ke atas bahan secara serentak. Kenyataan ini disokong oleh kajian keluli aloi mikro Nb-Ti yang menunjukkan bahawa proses termomekanikal melalui teknik penggulangan panas menghasilkan kekuatan tegangan yang lebih tinggi daripada aloi yang tidak melalui penggulangan panas (Li et al. 2020). Di samping itu, rawatan ini juga akan menyebabkan canggaan bahan setelah mengalami suhu dan jenis beban tertentu seperti mampatan, ketegangan, atau ricih. Beban mampatan akan memberikan pengurangan ketebalan yang berbeza pada bahan, dan memberi kesan yang berbeza pada sifat mekanik. Joo, Hwang dan Im (2018) telah melakukan kajian mengenai pembentukan wayar melalui rawatan termomekanikal menggunakan proses mekanikal pada peratusan pengurangan yang berbeza. Hasil kajian menunjukkan bahawa kekerasan meningkat pada peratusan pengurangan yang lebih tinggi. Oleh itu, kefahaman berkaitan hubungan antara proses dan sifat adalah penting dalam suatu kajian kerana kedua-dua komponen ini saling berkait antara satu sama lain.

Untuk mengkaji hubungan tersebut, pencirian bahan pateri dalam skala kecil diperlukan untuk menentukan kebolehharapan pempakejan elektronik. Kajian terdahulu telah menggunakan kaedah konvensional untuk memperoleh sifat mekanikal aloi pateri iaitu ujian mikrokekerasan, uji ricih,

ujian hentaman, ujian Vickers, ujian lenturan dan ujian tegangan (Ali et al. 2016). Kajian mengenai sifat mekanikal aloi pateri SAC menggunakan kaedah Vickers dengan membuat lekukan pada kawasan pateri dan kawasan substrat telah dilaporkan (Giuranno et al. 2016). Walau bagaimanapun, kaedah tersebut adalah kaedah konvensional dan hanya dapat memberikan sifat mekanikal secara pukal. Oleh itu, pendekatan pelekukan nano adalah teknik yang sesuai digunakan untuk memperoleh sifat mekanikal secara setempat (Abdullah et al. 2018). Pendekatan pelekukan nano telah digunakan secara meluas dalam mencirikan sifat mekanikal pada struktur berskala kecil tanpa merosakkan sampel. Kaedah ini juga dapat memberikan kawalan terhadap beban, kedalaman dan kedudukan ujian yang tepat. Berdasarkan lengkung beban melawan kedalaman, maklumat mengenai sifat mekanikal pada struktur berskala kecil dapat diperoleh. Oleh itu, kajian ini dijalankan untuk mengkaji hubungan peratus mampatan dan sifat mikromekanikal bagi aloi pateri Sn-Cu yang telah dirawat secara termomekanikal menggunakan pendekatan pelekukan nano.

## II. METODOLOGI

Bar aloi pateri bebas plumbum komersial, Sn-Cu dengan komposisi 99.3% timah (Sn) dan 0.7% kuprum (Cu). Aloji pateri Sn-Cu dipotong kepada sampel berbentuk kiub dengan dimensi  $6 \text{ mm}(l) \times 6 \text{ mm}(w) \times 10 \text{ mm}(h)$ . Sampel didedahkan pada rawatan terma pada suhu yang berbeza iaitu  $30^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$  dan  $150^\circ\text{C}$  selama 20 minit di dalam ketuhar. Tempoh 20 minit adalah untuk memastikan sampel mencapai kestabilan terma tanpa melibatkan perubahan mikrostruktur. Selepas dikeluarkan daripada ketuhar, sampel dimampat menggunakan tolak tolak tarik sehingga ketebalan asal berkurang sebanyak 20% iaitu dari 10 mm kepada 8 mm. Sampel yang tidak melalui proses mampatan digunakan sebagai sampel kawalan. Seterusnya, sampel disediakan dalam bentuk keratan rentas bagi pencirian sifat mikromekanikal menggunakan teknik metalografi. Untuk teknik metalografi, sampel dicagak di dalam resin epoksi. Sampel yang telah dirawat dikepil dengan menggunakan pemegang sampel sebelum ia diletakkan pada bahagian tengah acuan. Serbuk resin dan cecair resin epoksi telah disediakan dengan nisbah 3:2. Kedua bahan ini dicampurkan ke dalam cawan polisterin dan digaul selama 30 saat untuk memperoleh larutan yang homogen. Larutan resin epoksi dituang ke dalam bekas acuan dan dibiarkan selama tiga hingga empat jam untuk mengeras pada suhu bilik. Kemudian sampel akan dilas menggunakan kertas las silikon karbida (SiC) dengan saiz 800 grit, 1000 grit, 1200 grit, 2000 grit dan 4000 grit. Julat kelajuan putaran semasa proses lelasan adalah antara 50-60 rpm diikuti dengan aliran air yang berterusan bagi membersihkan sisa lelasan dari sampel. Selesai proses lelasan, sampel akan digilap menggunakan kain penggilap bersama dengan semburan berlian bersaiz  $1 \mu\text{m}$  dan diikuti dengan  $\frac{1}{4} \mu\text{m}$  (Jalar et al. 2020). Kemudian, sampel dicirikan menggunakan pendekatan pelekukan nano (*Micro Materials, NanoTest<sup>TM</sup>*) bagi sifat mikromekanikal dari segi kekerasan dan modulus terkurang. Beban maksimum ujian pelekukan nano adalah 10 mN dengan kadar permbenan dan perlepasan beban sebanyak 0.5 mN/s dan masa inap selama 540 s. Nilai yang diperoleh semasa ujian pelekukan nano telah direkod dan beban ( $P$ ) diplot melawan kedalaman ( $h$ ) seperti yang diilustrasikan dalam Rajah 1. Sifat mikromekanikal seperti kekerasan, modulus terkurang dapat diperolehi melalui profil  $P-h$  ini.

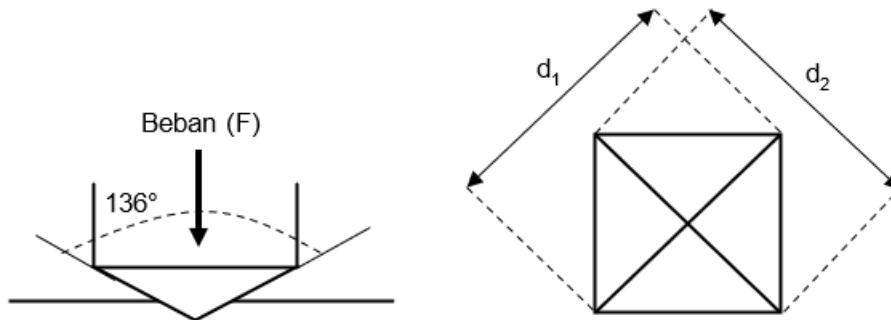


RAJAH 1. Skematik lengkung beban,  $P$  melawan kedalaman,  $h$  semasa ujian pelekukan nano.

### III. KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Sifat kekerasan permukaan aloi pateri Sn-Cu dapat diperoleh melalui ujian pelekukan seperti Vickers dan Nano. Bagi ujian pelekukan secara Vickers, dimensi atau luas sentuhan selepas pelekukan memainkan peranan utama dalam pengiraan nilai kekerasan (Rajah 2). Perkara ini dapat dijelaskan melalui persamaan (1), di mana  $HV$  iaitu nilai kekerasan adalah berkadar terus dengan  $F$  (beban ujikaji dalam kgf) manakala secara songsang dengan  $S$  (luas permukaan sentuhan). Jika nilai  $S$  yang diperoleh adalah kecil, maka nilai  $HV$  yang terhasil adalah besar dan begitu juga sebaliknya. Ini memberi kefahaman bahawa bentuk lekuk piramid berlian yang sempurna perlu diperolehi untuk pengiraan nilai kekerasan yang lebih tepat.

$$HV = \frac{F}{S} \quad (1)$$



RAJAH 2. Skematik ujian mikrokekerasan Vickers.

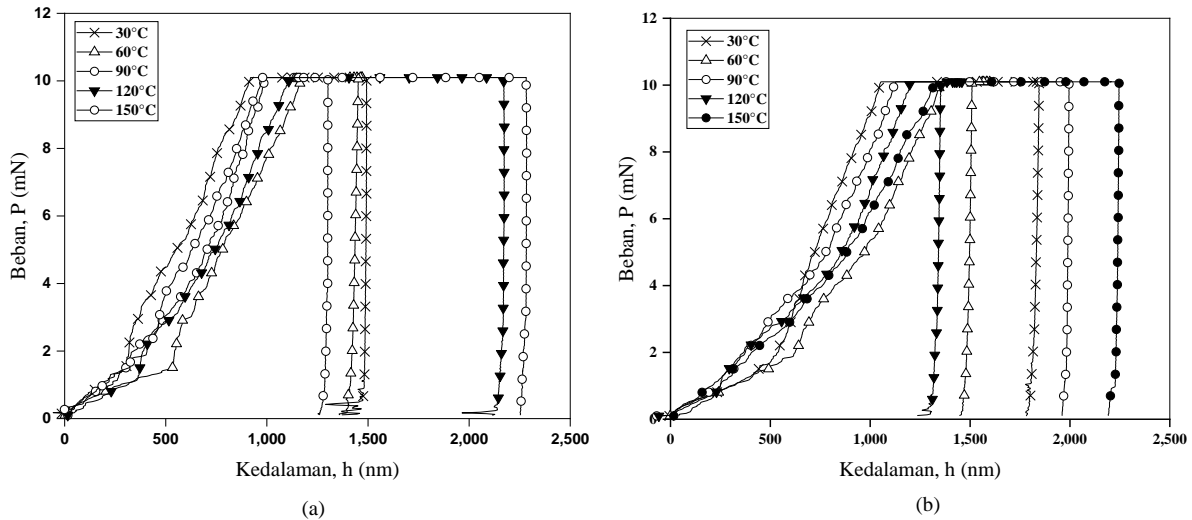
Namun, ujian pelekukan nano mengambil kira luas sentuhan ( $A_c$ ) pada beban maksimum ( $P_{maksimum}$ ) dalam menentukan nilai kekerasan ( $H$ ) bagi bahan ujikaji seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2).

$$H = \frac{P_{maksimum}}{A_c} \tag{2}$$

Ujian pelekukan nano juga memberi maklumat modulus terkurang ( $E_r$ ) seperti yang dipamerkan pada persamaan (3).  $E_s$  dan  $V_s$  adalah modulus Young dan nisbah Poisson bagi sampel, manakala  $E_i$  dan  $V_i$  merupakan parameter yang sama tetapi untuk pelekuk. Pelekuk jenis Berkovich telah diguna pakai dalam kajian ini, maka nilai  $E_i$  dan  $V_i$  adalah 0.07 dan 1141 GPa.

$$E_r = \frac{(1-V_s^2)}{E_s} + \frac{(1-V_i^2)}{E_i} \tag{3}$$

Profil beban ( $P$ ) melawan kedalaman ( $h$ ) bagi aloi pateri Sn-Cu dengan peratus mampatan yang berbeza telah digambarkan dalam Rajah 3. Semasa ujian pelekukan nano,  $P$  yang dikenakan ke atas pelekuk Berkovich (dikenali sebagai pembebanan) telah menyebabkan tip pelekuk mula menembusi struktur sampel dari permukaannya.  $h$  juga turut bertambah seiring dengan pertambahan  $P$  sehingga beban maksimum ( $P_{maksimum}$ ) iaitu 10 mN dicapai. Pada  $P_{maksimum}$ , tip pelekuk dibiarkan dalam keadaan statik selama 540 saat (dikenali sebagai masa inap) sebelum  $P$  dikurangkan (dikenali sebagai perlepasan beban) dan tip pelekuk bergerak keluar dari struktur sampel. Berdasarkan pada plot tersebut, profil  $P-h$  yang tipikal bagi sampel yang homogen secara setempat telah diperoleh kerana pembentukan lengkung pembebanan tanpa gangguan.

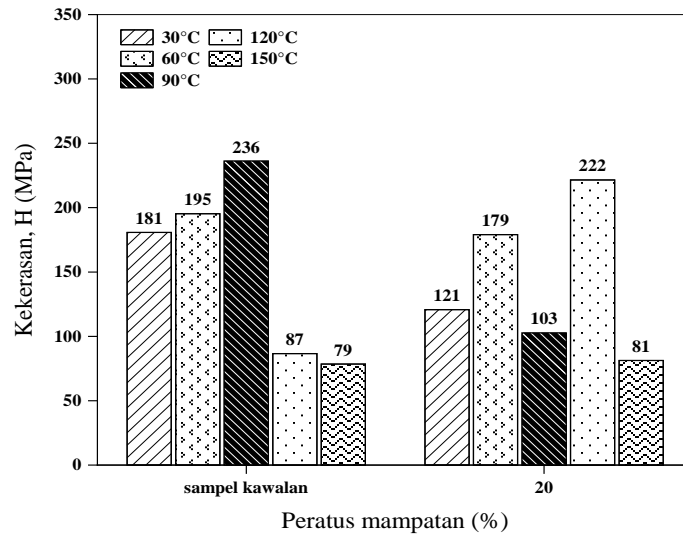


**RAJAH 3.** Lengkung beban,  $P$  melawan kedalaman,  $h$  bagi sampel aloi pateri Sn-Cu selepas (a) rawatan terma dan (b) rawatan termomekanikal.

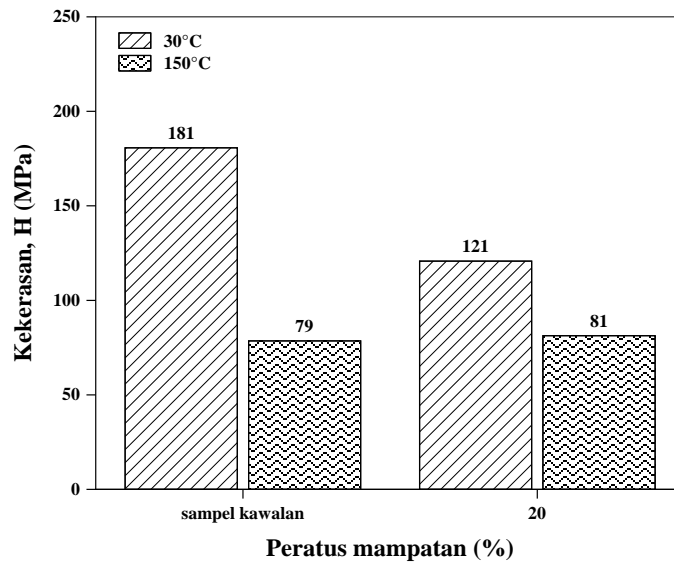
Rajah 4 menunjukkan nilai kekerasan bagi aloi pateri Sn-Cu dengan peratus mampatan yang berbeza. Nilai kekerasan sampel kawalan bertambah dari 181 MPa pada suhu 30°C kepada 236 MPa pada suhu 90°C, sebelum ia menyusut secara mendadak kepada 79 MPa pada suhu 150°C. Sampel kawalan pada suhu 150°C juga jelas menunjukkan nilai kekerasan paling rendah antara kelima-lima suhu semasa rawatan haba. Sampel dengan mampatan 20% juga mempamerkan trend penurunan yang sama seperti sampel kawalan, di mana nilainya mula berkurang dari 121 MPa

(30°C) kepada 81 MPa (150°C). Penurunan ini dirujuk sebagai pelembutan yang mana ia selaras dengan teori kekerasan bahan logam menurun akibat kenaikan suhu semasa rawatan haba (Ismail et al. 2018). Walau bagaimanapun, aloi pateri Sn-Cu dengan mampatan 20% menghasilkan jurang perbezaan nilai kekerasan yang rendah berbanding sampel kawalan. Untuk membuktikan dengan lebih jelas pernyataan ini, nilai kekerasan sampel pada 30°C dan 150°C telah dibandingkan seperti yang dapat dilihat di dalam Rajah 5. Sampel kawalan telah menunjukkan perubahan nilai kekerasan yang lebih tinggi iaitu sebanyak 102 MPa berbanding sampel yang dimampat iaitu sebanyak 40 MPa. Perbezaan perubahan ini adalah ~57% iaitu hampir tiga kali ganda lebih tinggi berbanding dengan sampel yang dimampat 20% iaitu ~33%.

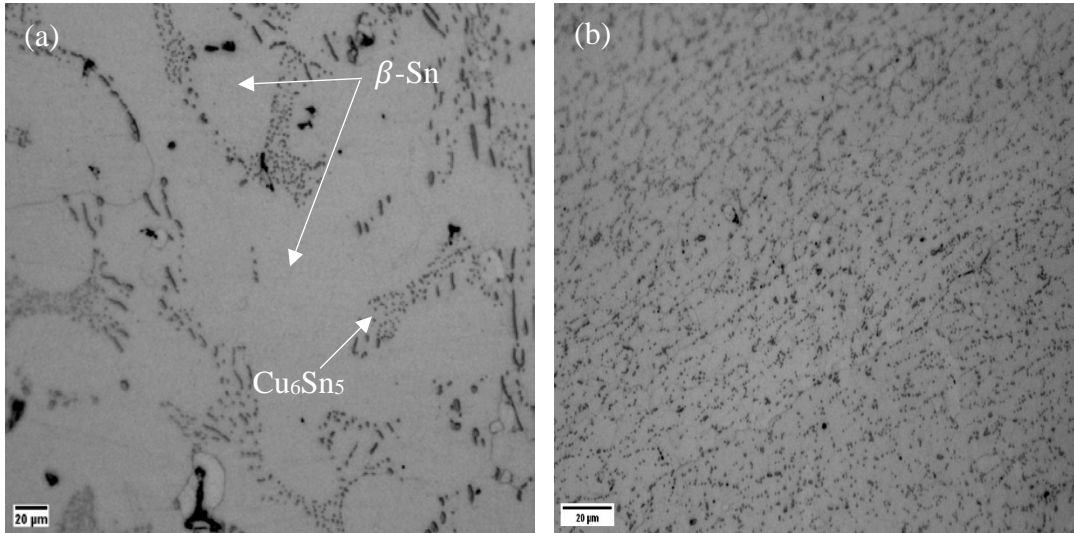
Analisis sifat kekerasan bagi sampel Sn-Cu selepas rawatan termomekanikal telah memberikan kestabilan yang lebih baik, di mana jurang perbezaan nilai antara suhu adalah rendah. Kestabilan ini berjaya dicapai kerana pembebasan haba pada kadar yang segera semasa proses pembebanan atau mampatan akan menggalakkan perhalusan butiran (Long et al. 2020). Secara umum, setiap bahan mempunyai kehelan di dalam mikrostrukturnya, tetapi ketumpatan kehelan adalah berbeza mengikut jenis serta keadaan suatu bahan. Kehadiran serta ketumpatan kehelan boleh mengganggu susunan di dalam mikrostruktur apabila sampel melalui pendedahan terhadap suhu. Secara teori, apabila sampel Sn-Cu melalui kerja panas seperti rawatan terma, ketumpatan kehelan akan mula berkurang kerana ia menggalakkan kehelan untuk bergerak, bergabung dan menggelungsur antara atom-atom di dalam mikrostruktur bahan untuk membentuk susunan baru seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 6 (a). Namun, kajian ke atas aloi pateri Sn-Cu selepas rawatan termomekanikal menunjukkan hasil yang bertentangan dengan sampel yang melalui rawatan terma sahaja (Rajah 6 (b)). Hal ini kerana, jumlah ketumpatan kehelan di dalam mikrostrukturnya telah bertambah selepas sampel Sn-Cu dimampat sebanyak 20%. Pertambahan jumlah kehelan ini telah menyukarkan pergerakan di antara kehelan dan atom-atom bersebelahan kerana tenaga haba yang dibekalkan dari luar tidak mencukupi dan kesannya jarak antara butiran menjadi semakin kecil atau halus. Perhalusan butir akan meningkatkan ketahanan aloi pateri Sn-Cu dengan meningkatkan halangan kepada pergerakan kehelan walaupun kepadatan kehelan meningkat semasa rawatan termomekanik. Kajian yang dilakukan oleh Yang (2016) juga menyokong kenyataan tersebut dengan melaporkan beban mampatan yang dikenakan untuk mengurangkan ketebalan bahan memberikan halangan yang lebih banyak kerana kepadatan kehelan yang tinggi pada mikrostruktur sesuatu bahan. Hal ini menunjukkan bahawa sifat kekerasan bagi Sn-Cu lebih stabil selepas rawatan termomekanikal.



**RAJAH 4.** Kekerasan sampel kawalan dan aloi pateri Sn-Cu selepas rawatan termomekanikal dengan mampatan 20%.

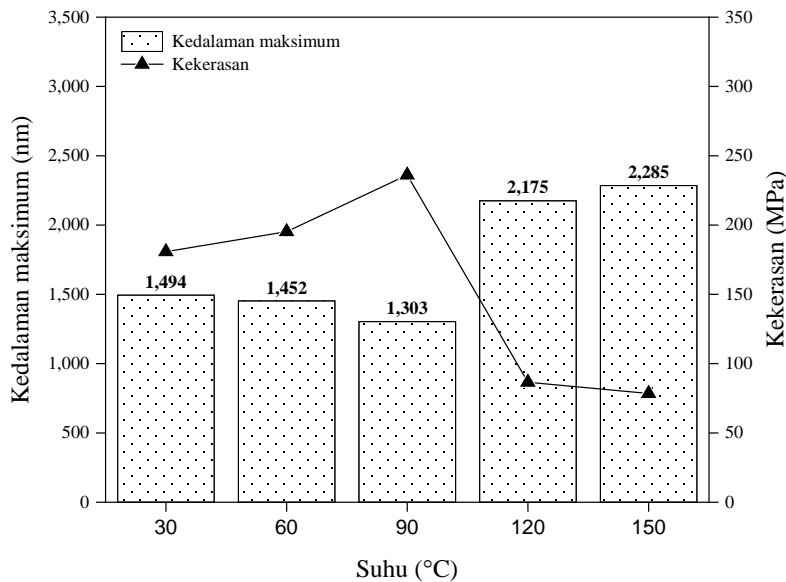


**RAJAH 5.** Kekerasan aloi pateri Sn-0.7Cu pada peratus mampatan dan suhu yang berbeza.



**RAJAH 6.** Imej IFM bagi sampel Sn-Cu selepas (a) rawatan haba dan (b) rawatan termomekanikal pada 120°C.

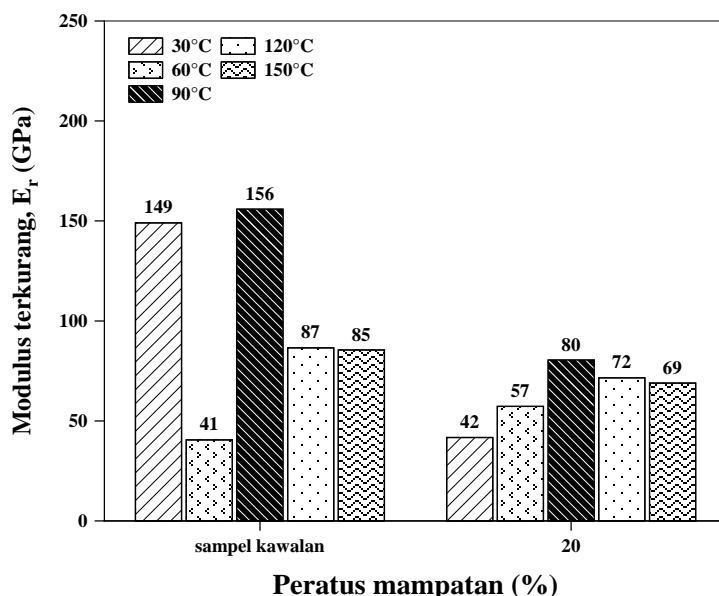
Definisi kekerasan adalah pengukuran rintangan suatu bahan terhadap canggaan plastik. Di dalam ujian pelekukan nano, kekerasan diukur dengan keupayaan bahan untuk menahan tip pelekuk semasa ia menembusi strukturnya apabila beban dikenakan. Ini memberi kefahaman bahawa kekerasan yang tinggi akan memberikan ketahanan dan halangan kepada pelekuk daipada menembusi permukaan sampel kerana canggaan plastik yang berlaku disebabkan rawatan termomekanik. Canggaan plastik pada aloi pateri Sn-Cu berlaku disebabkan peningkatan kepadatan kehelan apabila suhu dan beban mampatan yang dikenakan (Afdzaluddin & Bakar 2020). Zhou et al. (2020) juga telah melaporkan kekerasan pelekukan nano bergantung secara signifikan dengan kedalaman pelekukan. Dalam kajian ini, nilai kedalaman yang diperolehi adalah sonsang dengan nilai kekerasan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 7. Sebagai contoh, pada nilai kekerasan yang paling rendah iaitu pada suhu 150°C bagi sampel kawalan, kedalaman maksimum yang terhasil adalah yang paling tinggi iaitu 2,285 nm.



**RAJAH 7.** Kedalaman maksimum serta kekerasan sampel kawalan dengan kenaikan suhu.



Pemilihan aloi pateri yang sesuai adalah penting kerana sifat mekaniknya sangat mempengaruhi keboleharapan sambungan pateri untuk aplikasi pempakejan elektronik. Oleh itu, nilai kekerasan sahaja tidak mencukupi untuk dipertimbangkan bagi menggambarkan sifat mekanikal aloi pateri. Rajah 8 menunjukkan hasil keputusan bagi nilai modulus terkurang bagi sampel kawalan dan sampel dengan 20% mampatan pada suhu yang berbeza.  $E_r$  bagi sampel dengan 20% mampatan menunjukkan pertambahan nilai apabila berlaku kenaikan suhu berbanding sampel kawalan yang mempamerkan trend penurunan nilai. Nilai  $E_r$  bagi sampel dengan 20% mampatan meningkat dari 42 GPa pada suhu 30°C kepada 80 GPa pada suhu 90°C, sebelum nilainya menurun pada kadar yang sedikit iaitu 69 GPa pada suhu 150°C. Jika dibandingkan pada suhu 30°C dan 150°C, sampel dengan 20% mampatan menunjukkan trend kenaikan nilai  $E_r$  manakala sampel kawalan adalah sebaliknya. Sampel kawalan menghasilkan jurang perbezaan nilai sebanyak 64 GPa, iaitu ~43% perubahan berbanding sampel dengan mampatan yang hanya menghasilkan perubahan nilai sebanyak 27 GPa iaitu ~39% perubahan. Abdullah et al. (2018) telah menyatakan dalam kajiannya bahawa penurunan nilai modulus berkait rapat dengan sifat intrinsik dan bukannya mikrostruktur. Perubahan nilai yang signifikan bagi sampel kawalan mungkin disebabkan oleh perubahan mendadak pada sifat intrinsik atau orientasi kristalografi setelah rawatan haba. Perbincangan ini disokong oleh kajian dari Sun et al. (2018), di mana aloi entropi tinggi (HEA) membentuk fasa FCC apabila nilai modulus terkurang menyusut secara mendadak. Perubahan kecil nilai modulus terkurang aloi pateri selepas rawatan termomekanikal dengan 20% mampatan menggambarkan terdapat sedikit atau tiada perubahan sifat intrinsik yang berlaku.



RAJAH 8. Modulus terkurang aloi pateri Sn-0.7Cu dengan peratus mampatan yang berbeza.

Melalui analisis mikomekanik melalui pendekatan pelekukan nano, aloi pateri Sn-Cu selepas rawatan termomekanikal dengan mampatan 20% menghasilkan sifat mikromekanik yang paling stabil. Maka, hubungan termomekanikal-sifat bagi aloi pateri adalah sah dan ia sangat berguna untuk meramalkan sifatnya.

## VI. KESIMPULAN

Hubungan peratus mampatan semasa rawatan termomekanikal dengan sifat mikromekanikal aloi pateri Sn-Cu telah berjaya dikaji melalui pendekatan pelekukan nano. Hasil kajian mendapati, sifat kekerasan serta modulus berkurang bagi aloi pateri dengan 20% mampatan menghasilkan jurang perbezaan nilai yang rendah iaitu 40 MPa (~33% perubahan) dan 64 GPa (~43% perubahan) berbanding sampel kawalan iaitu ~57% dan ~39%. Ini bermaksud aloi pateri Sn-0.7Cu menunjukkan kestabilan sifat mikromekanikal yang lebih tinggi selepas rawatan termomekanikal. Justeru, kajian ini boleh digunakan sebagai rujukan untuk meramal sifat mikromekanikal aloi pateri dan diaplikasikan dalam industri pempakejan elektronik

## PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pengajian Tinggi (KPT) untuk geran penyelidikan FRGS/1/2019/STG07/UKM/03/1.

## RUJUKAN

1. Aamir, M., Muhammad, R., Tolouei-Rad, M., Giasin, K. & Silberschmidt, V. V. 2019. A review: microstructure and properties of tin-silver-copper lead-free solder series for the applications of electronics. *Soldering & Surface Mount Technology* 32(2): 115–126.
2. Abdullah, I., Zulkifli, M.N., Jalar, A. & Ismail, R. 2018. Deformation behavior relationship between tensile and nanoindentation tests of SAC305 lead-free solder wire. *Soldering & Surface Mount Technology* 30(3): 194–202.
3. Afdzaluddin, A.M. & Bakar, M.A. 2020. Effect of coating element on joining stability of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder joint due to aging test. *Sains Malaysiana* 49(12): 3029–3036.
4. Ali, B., Sabri, M.F.M., Jauhari, I. & Sukiman, N.L. 2016. Impact toughness, hardness and shear strength of Fe and Bi added Sn-1Ag-0.5Cu lead-free solders. *Microelectronics Reliability* 63(2015): 224–230.
5. Giuranno, D., Delsante, S., Borzone, G. & Novakovic, R. 2016. Effects of Sb addition on the properties of Sn-Ag-Cu/(Cu, Ni) solder systems. *Journal of Alloys and Compounds* 689: 918–930.
6. Hui, J., Feng, Z., Fan, W. & Yuan, X. 2018. The influence of power spinning and annealing temperature on microstructures and properties of Cu-Sn alloy. *Materials Characterization* 144(August): 611–620.
7. Ismail, N., Jalar, A., Abu Bakar, M., Ismail, R., Safee, N.S., Ismail, A.G. & Ibrahim, N.S. 2019. Kesan Penuaan Sesuhu terhadap Sifat Mikro Kekerasan Pempaterian Sn-Ag-Cu/CNT/Cu menggunakan Pelekukan Nano. *Sains Malaysiana* 48(6): 1267–1272.
8. Ismail, N., Jalar, A., Bakar, M.A. & Ismail, R. 2018. Effect of carbon nanotube addition on the growth of intermetallic layer of Sn-Ag-Cu solder system under thermal aging. *Sains Malaysiana* 47(7): 1585–1590.
9. Jalar, A., Bakar, M.A. & Ismail, R. 2020. Temperature Dependence of Elastic–Plastic Properties of Fine-Pitch SAC 0307 Solder Joint Using Nanoindentation Approach. *Metallurgical and Materials Transactions A* 51: 1221–1228.
10. Joo, H.S., Hwang, S.K. & Im, Y.-T. 2018. Effect of thermomechanical treatment on mechanical and electrical properties of Cu-Cr-Zr alloy in continuous hybrid process. *Procedia Manufacturing* 15: 1525–1532.

11. Li, H., Gong, M., Li, T., Wang, Z. & Wang, G. 2020. Effects of hot-core heavy reduction rolling during continuous casting on microstructures and mechanical properties of hot-rolled plates. *Journal of Materials Processing Technology* 283(April): 116708.
12. Long, X., Xu, J., Wang, S., Tang, W. & Chang, C. 2020. Understanding the impact response of lead-free solder at high strain rates. *International Journal of Mechanical Sciences* 172(December 2019): 105416.
13. Sun, Y., Chen, P., Liu, L., Yan, M., Wu, X., Yu, C. & Liu, Z. 2018. Local mechanical properties of Al CoCrCuFeNi high entropy alloy characterized using nanoindentation. *Intermetallics* 93(November 2017): 85–88.
14. Yang, Y. 2016. Sensitivity of nanoindentation strain rate in poly(ester-ester-ketone) using atomic force microscopy. *Polymer Testing* 53: 85–88.
15. Zeng, H., Sui, H., Wu, S., Liu, J., Wang, H., Zhang, J. & Yang, B. 2021. Evolution of the microstructure and properties of a Cu–Cr-(Mg) Alloy upon thermomechanical treatment. *Journal of Alloys and Compounds* 857(xxxx): 157582.
16. Zhang, P., Xue, S. & Wang, J. 2020. New challenges of miniaturization of electronic devices: Electromigration and thermomigration in lead-free solder joints. *Materials & Design* 192: 108726.
17. Zhao, M., Zhang, L., Liu, Z.-Q., Xiong, M.-Y. & Sun, L. 2019. Structure and properties of Sn-Cu lead-free solders in electronics packaging. *Science and Technology of Advanced Materials* 20(1): 421–444.
18. Zhou, G., Guo, J., Zhao, J., Tang, Q. & Hu, Z. 2020. Nanoindentation Properties of 18CrNiMo7-6 Steel after Carburizing and Quenching Determined by Continuous Stiffness Measurement Method. *Metals* 10(1): 125.