

KESAN KEJUTAN TERMA TERHADAP
SAMBUNGAN PATERI BERASASKAN
TIMAH-PERAK-KUPRUM DENGAN
UNSUR-UNSUR MINOR BAGI
PAKEJ TATASUSUNAN
GRID BEBOLA



LIM EE MAY

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

**KESAN KEJUTAN TERMA TERHADAP SAMBUNGAN PATERI
BERASASKAN TIMAH-PERAK-KUPRUM DENGAN
UNSUR-UNSUR MINOR BAGI PAKEJ
TATASUSUNAN GRID BEBOLA**

LIM EE MAY

**TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH
SARJANA**

**INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI**

2026

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/ DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN

Bil. No	Perkara / Items	Senarai Semak (√) Check List
1.	Mematuhi Panduan Menulis Tesis Gaya UKM (Sila layari https://www.ukm.my/akademik/pelajar-pascasiswazah/) <i>Comply with the UKM Style Guide.</i> (Please visit https://www.ukm.my/akademik/pelajar-pascasiswazah/)	√
2.	Borang Perakuan Tesis / Disertasi Sarjana / Doktor Falsafah dimasukkan bersama tesis akhir dalam bentuk salinan lembut <i>Insert the Certification of Master's/ Doctoral Thesis/ Dissertation with the final thesis/dissertation in soft copy form.</i>	√
3.	Menyerahkan salinan tesis / disertasi versi akhir (salinan lembut) kepada Fakulti / Institut dan Perpustakaan mengikut keperluan masing-masing <i>Submit the final version of the thesis/ dissertation (soft copy) to the Faculty/Institute and Library according to their respective requirements.</i>	√
4.	Menyerahkan salinan tesis / disertasi versi akhir kepada semua penyelia <i>Submit a copy of the final version of the thesis/ dissertation to all supervisors.</i>	√
5.	Menyerahkan salinan syarat penerbitan <i>Submit the proof of publication requirements.</i>	√

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

**BORANG PENYERAHAN TESIS/DISERTASI YANG TELAH DIBUAT PEMBETULAN
AMENDED THESIS/ DISSERTATION SUBMISSION**

A. MAKLUMAT PELAJAR (STUDENT DETAILS)			
Nama <i>Name</i>	LIM EE MAY		
No. Pendaftaran <i>Registration No.</i>	P137670		
Jabatan <i>Department</i>	-		
Fakulti / Institut <i>Faculty / Institute</i>	INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK (IMEN)		
Program Pengajian <i>Program of Study</i>	Sarjana (Master) ☒	Doktor Falsafah (Doctor of Philosophy) ☐	
Alamat: <i>Address</i>	20, HALAMAN KAMPUNG BUKIT 1, TIERRA RESIDENCES, 11900 BAYAN LEPAS, PENANG, MALAYSIA.		
E-mel/ <i>Email</i> : lim_may85@hotmail.com	No. Telefon/ <i>Tel. No</i> : 0124051518		
B. MAKLUMAT TESIS / DISSERTASI (THESIS / DISSERTATION DETAILS)			
Tajuk Tesis/ <i>Disertasi</i> (Thesis / Dissertation Title): KESAN KEJUTAN TERMA TERHADAP SAMBUNGAN PATERI BERASASKAN TIMAH-PERAK-KUPRUM DENGAN UNSUR-UNSUR MINOR BAGI PAKEJ TATASUSUNAN GRID BEBOLA			
Tandatangan: <i>Signature</i> 	Tarikh: 3 MAC 2026 <i>Date</i>		
C. PERAKUAN PENYELIA DAN PEMERIKSA DALAM ** (APPROVAL FROM SUPERVISORS AND INTERNAL EXAMINER) **			
Nama: PROF. DR. AZMAN JALAR <i>Name</i> (Penyelia Utama/Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan) (Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)	Tandatangan: <i>Signature</i> 		

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

Nama/Name: DR. MARIA ABU BAKAR (Penyelia Bersama / Ahli Jawatankuasa Penyeliaan) (Co-Supervisor/ Member of Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature 
Nama/Name: (Ahli Jawatankuasa Penyeliaan / Member of Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature
Nama/Name: PROF. DR. MOHD YUSRI ABD RAHMAN (Pemeriksa Dalam / Internal Examiner)	Tandatangan: Signature 
**Potong yang tidak berkenaan / Delete where not appropriate	
D. PENGESAHAN FORMAT TESIS/DISERTASI / CONFIRMATION OF THESIS/DISSERTATION FORMAT COMPLIANCE	
Disahkan bahawa format tesis/disertasi adalah mengikut Gaya UKM dan calon dibenarkan menyerahkan tesis/disertasi dalam bentuk salinan lembut. This is to confirm that the thesis/dissertation format complies with the UKM Style Guide and is approved for submission in soft copy form.	
Tandatangan:  (Penyelia Utama / Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan) (Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)	Tarikh: 3 MAC 2026 Date
E. PERAKUAN KETUA JABATAN / KETUA PROGRAM / PENERUSI PUSAT PENGAJIAN APPROVAL FROM HEAD OF DEPARTMENT / HEAD OF PROGRAM / SCHOOL CHAIRPERSON	
Tandatangan: Signature  Nama dan Cap Rasmi: Name and Official Stamp	Tarikh: 25 Mac 2026 Date  PROF. MADYA DR. MUHAMAD RAMDZAN BIN BUYONG Timbalan Pengerusi Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

F. KELULUSAN DEKAN/PENGARAH / APPROVAL FROM DEAN/DIRECTOR			
Tandatangan: Signature		Tarikh: Date	
 PROF. IR. DR. AHMAD ASHRIF A. BAKAR Pengerah Nama dan Cap Rasmi: Name and Official Stamp		26 Mac 2026 	
G. PERAKUAN TESIS/ DISERTASI SARJANA / DOKTOR FALSAFAH (CERTIFICATION OF MASTER'S / DOCTORAL THESIS / DISSERTATION)			
Nama penuh pengarang (Author's Full Name)		LIM EE MAY	
No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)		P137670	Sesi Akademik (Academic Session)
Tajuk Tesis / Disertasi (Thesis / Dissertation Title)		KESAN KEJUTAN TERMA TERHADAP SAMBUNGAN PATERI BERASASKAN TIMAH-PERAK-KUPRUM DENGAN UNSUR-UNSUR MINOR BAGI PAKEJ TATASUSUNAN GRID BEBOLA	
Semua tesis/disertasi dan penerbitan berkaitan hasil penyelidikan pelajar adalah tertakluk kepada Dasar Harta Intelek Universiti Kebangsaan Malaysia. <i>All theses/ dissertations and publications relating to the research work of a student are subject to the Intellectual Property Policy of Universiti Kebangsaan Malaysia.</i> Saya mengaku bahawa tahap akses tesis/disertasi ini sebagai (*Tandakan ✓ dalam kotak bagi maklumat yang berkaitan; tandakan satu (1) kotak di bawah sahaja): <i>I hereby declare the level of access for this thesis/dissertation as follows (tick ✓ the relevant box below; tick only one option).</i>			
Pilihan Tahap Akses Access Level Selection		Tafsiran Tahap Akses Tesis/Disertasi Definition of Thesis/Dissertation Access Level	
☐ RAHSIA (CONFIDENTIAL)		Mengandungi maklumat rahsia sepertimana yang diperuntukan bawah Akta Rahsia Rasmi 1972. <i>Contains classified information as stipulated under the Official Secrets Act 1972.</i>	

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

☒	TERHAD (RESTRICTED)	Mengandungi maklumat yang hanya boleh diakses oleh pihak yang mempunyai kebenaran atau keperluan tertentu untuk mengetahuinya yang ditentukan oleh organisasi/ badan di mana penyelidikan dijalankan. <i>Contains information that may only be accessed by parties with specific authorization or a defined need to know, as determined by the organization or body where the research is conducted.</i>
☐	AKSES TERBUKA (OPEN ACCESS)	Tesis/disertasi versi akhir dalam format PDF yang boleh diakses secara percuma secara dalam talian dan bebas dari isu hak cipta dan pelesenan <i>The final version of the thesis/dissertation in PDF format that is freely accessible online and free from copyright and licensing issues.</i> Kementerian Pendidikan Tinggi melalui surat bertarikh 27 Mac 2025 memutuskan bahawa kebenaran akses tesis / disertasi dalam borang serahan akses terbuka ditentukan oleh penyelia (bukan pelajar). <i>The Ministry of Higher Education, through a letter dated 27 March 2025, has decided that permission for thesis / dissertation access in the open access submission form shall be determined by the supervisor (not the student).</i>
☐	EMBARGO	Tempoh masa di mana akses kepada tesis/disertasi disekat (ditutup) selama dua (2) tahun atas sebab-sebab tertentu sebagai contoh kerahsiaan atau hak cipta. Tesis/disertasi akan berstatus akses terbuka selepas tamat tempoh embargo. <i>The period during which access to the thesis/dissertation is restricted for two (2) years due to specific reasons, such as confidentiality or copyright. The thesis/dissertation will be granted open-access status upon the expiry of the embargo period.</i>

PENGESAHAN PELAJAR (STUDENT VERIFICATION)	PENGESAHAN PENYELIA (SUPERVISOR VERIFICATION)
 TANDATANGAN PELAJAR (STUDENT'S SIGNATURE)	 TANDATANGAN PENYELIA / PENERUSI JK SISWAZAH (SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON SUPERVISION COMMITTEE SIGNATURE)
Nama Pelajar (Student name): No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.) LIM EE MAY P137670	Nama Penyelia / Pengerusi JK Siswazah : (Supervisor's / Chairperson Supervision Committee Name) PROF. DR. AZMAN JALAR
Tarikh: (Date) 3 MAC 2026	Tarikh: (Date) 3 MAC 2026

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

08 Mac 2026

LIM EE MAY
P137670

PENGHARGAAN

Saya berasa amat berterima kasih kerana dapat menyelesaikan tesis ini. Setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih yang tidak terhingga diucapkan kepada kedua-dua penyelia saya, terutamanya Prof. Dr. Azman Jalar selaku penyelia utama dan Dr. Maria Abu Bakar selaku penyelia bersama di atas segala nasihat, dorongan dan keprihatinan dalam menyempurnakan tesis ini. Terima kasih kepada keluarga saya Khoo Teng Eng suami, anak-anak Albee Khoo Kai Yuan dan Alden Khoo Kai Chuen, yang memberi dorongan dan bantuan untuk meneruskan tesis saya.

Terima kasih juga saya ucapkan kepada pihak Western Digital®, SanDisk Storage Malaysia Sdn. Bhd. dan Universiti Kebangsaan Malaysia di atas bantuan kewangan dan teknikal melalui kolaborasi penyelidikan di bawah geran penyelidikan RR-2020-004 dan RR-2023-007. Terima kasih tidak terhingga buat Jabatan Package Technology Development di atas sumbangan bahan penyelidikan dalam kolaborasi projek ini. Saya juga ingin mengambil kesempatan untuk mengucapkan ribuan terima kasih kepada pengurus saya, Tan Choo Par dan rakan-rakan sekerja, Dr. Fakhrozi Che Ani, Dr. Adlil Aizat bin Ismail dan semua rakan dalam kumpulan penyelidikan Pempakejan Mikroelektronik dan Bahan (MIPAC) atas segala bantuan dan dorongan.

Sekian, terima kasih.

ABSTRAK

Keutuhan sambungan pateri memainkan peranan penting bagi kebolehharapan dan prestasi pakej elektronik. Kajian ini mengkaji tentang modifikasi pes pateri terhadap kebolehharapan sambungan pateri dalam komponen tatasusunan grid bebola (BGA). Pes aloi pateri timah-perak-kuprum (SAC) digabungkan dengan unsur-unsur minor seperti antimoni (Sb), bismut (Bi), indium (In), dan nikel (Ni). Pes pateri ini seterusnya digunakan untuk menyambung komponen BGA dengan papan litar bercetak (PCB). Sebanyak empat komponen BGA digunakan yang terletak di bahagian atas dua BGA U106 dan U107 dan bahagian bawah dua BGA U105 dan U108. BGA pada PCB dicerminkan antara satu sama lain. Setiap saiz BGA 14 mm x 18 mm $\pm$ 0.1 mm, ketebalan maksimum 1.45 mm, terdiri daripada 272 bola pateri dan diameter bola BGA 0.45 mm $\pm$ 0.5 mm. Ketebalan PCB ialah 0.80 mm $\pm$ 0.08 mm dan terdiri daripada 12 lapisan kemasan permukaan pengawet kebolehpaterian organik (OSP). Pemasangan PCB bermula dengan percetakan pes pateri bahagian bawah menggunakan stensil, yang dengan tepat mendepositkan pes pateri pada bahagian bawah PCB. Kemudian, PCB bergerak dalam ketuhar aliran semula, yang mana komponen BGA diletakkan dengan tepat pada pes pateri yang telah digunakan. Seterusnya, PCB meneruskan penghantar dan memasuki ketuhar aliran semula untuk proses pematerian, melengkapkan pemasangan bahagian bawah. Proses seterusnya adalah pemasangan bahagian atas, mengikut urutan yang sama: percetakan stensil, penempatan komponen, dan pematerian aliran semula. Ini memastikan bahawa kedua-dua sisi PCB dipasang dengan sambungan pateri dengan kebolehharapan dan kukuh. Untuk menilai kebolehharapan sambungan, ujian kejutan terma (TST) dilakukan pada pemasangan BGA dengan sambungan pateri yang dibentuk menggunakan aloi SAC yang diubah suai dengan unsur-unsur ini, dengan penilaian dilakukan pada T0, T1500, T1900, dan T2500 kejutan terma. Hasil menunjukkan bahawa unsur paduan minor memberikan kesan yang ketara terhadap tahap keretakan sambungan pateri BGA. Pes Pateri SAC menunjukkan tahap keretakan kumulatif tertinggi sebanyak 166.73%. Penambahan antimoni (Sb) dalam Pes Pateri berjaya mengurangkan tahap keretakan kepada 68.20%, menunjukkan keberkesanan Sb dalam meningkatkan ketahanan terhadap keletihan terma. Pes Pateri yang ditambah dengan In menunjukkan penambahbaikan dengan jumlah keretakan sebanyak 97.70%, menandakan peningkatan separa dalam ketahanan sambungan. Sebaliknya, Pes Pateri yang mengandungi Bi dan Ni mencatatkan jumlah keretakan sebanyak 123.81%, menunjukkan keberkesanan yang terhad dalam mengurangkan keretakan berbanding Sb dan In. Keputusan ini menunjukkan bahawa Sb merupakan unsur tambahan paling berkesan dalam meningkatkan kebolehharapan sambungan pateri di bawah tekanan haba, diikuti oleh In, manakala Bi dan Ni memberikan peningkatan yang terhad berbanding pateri SAC piawai. Selain itu, hasil menunjukkan bahawa In tidak memberi impak positif yang menyeluruh terhadap ketahanan kejutan terma. Penemuan ini menyumbang wawasan berharga mengenai peranan unsur-unsur minor dalam menyesuaikan prestasi termo-mekanik sambungan pateri SAC untuk aplikasi elektronik berkebolehharapan tinggi, terutamanya dalam peranti yang beroperasi di bawah tekanan terma yang signifikan. Penemuan ini menyumbang kepada kemajuan produk elektronik yang berkebolehharapan dan efisien, seperti pemacu keadaan pepejal terbenam (eSSD), dan memberikan panduan untuk ketahanan sambungan pateri dalam peranti elektronik generasi berikutnya.

EFFECT OF THERMAL SHOCK ON TIN-ARGENTUM-COPPER BASED SOLDER JOINT WITH MINOR ELEMENTS FOR BALL GRID ARRAY PACKAGE

ABSTRACT

The integrity of solder joints plays a critical role in the reliability and performance of electronic packages. This study investigates the effects of solder paste modification on solder joint reliability in ball grid array (BGA) components. Tin-silver-copper (SAC) solder paste is combined with minor elements such as Antimony (Sb), Bismuth (Bi), Indium (In), and Nickel (Ni). This solder paste is then used to connect BGAs component to printed circuit boards (PCBs). Total of four BGA components were used located on top side two BGA U106 and U107 and bottom side two BGA U105 and U108. The BGA on PCB is mirrored with each other. Each BGA size 14 mm x 18 mm $\pm$ 0.1 mm, thickness max 1.45 mm, consists of 272 solder balls and BGA balls diameter 0.45 mm $\pm$ 0.5 mm. The PCB thickness is 0.80 mm $\pm$ 0.08 mm and consists of 12 layers organic solderability preservative (OSP) surface finish. The PCB assembly begins with bottom-side solder paste printing using a stencil, precisely depositing the solder paste onto the PCB's underside. Then, the PCB travels along a conveyor system to the pick-and-place machine, where BGA components are accurately placed onto the applied solder paste. Subsequently, the PCB continues the conveyor and enters the reflow oven for the soldering process, completing the bottom-side assembly. The process then continues with the top side, following the same sequence: stencil printing, component placement, and reflow soldering. This ensures that both sides of the PCB are assembled with reliable and robust solder joints. To assess joint durability, thermal shock tests (TST) were conducted on BGA assemblies with solder joints formed using SAC alloys modified with these elements, with evaluations performed at T0, T1500, T1900, and T2500 thermal cycles. The results indicate a clear impact of alloying elements on crack severity in BGA solder joints subjected to thermal shock cycles. Standard SAC solder (Solder A) exhibited the highest overall crack severity, with a cumulative crack percentage of 166.73% across all thermal cycles. The addition of Sb in solder significantly reduced the total crack severity to 68.20%, demonstrating Sb's effectiveness in enhancing resistance to thermal fatigue. Solder modified with In, showed improvement with a total crack percentage of 97.70%, suggesting partial enhancement in joint durability. Conversely, solder joints which includes Bi and Ni, resulted in a cumulative crack percentage of 123.81%, indicating a less effective mitigation of cracking compared to Sb or In additions. These findings highlight that Sb is the most effective additive for improving solder joint reliability under thermal stress, followed by In, while Bi and Ni offer limited improvement over standard SAC. The results demonstrate that In does not impact positively in the thermal shock resistance. These findings contribute valuable insights into the role of minor alloying elements in tailoring the thermo-mechanical performance of SAC solder joints for high-reliability electronic applications, particularly in devices operating under significant thermal stress. The findings contribute to the advancement of more reliable and efficient electronic products, such as embedded solid-state drives (eSSD), and provide guidance for solder joint durability in next-generation electronic devices.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	ix
SENARAI ILUSTRASI	x
SENARAI SINGKATAN	xvi
SENARAI SIMBOL	xviii
BAB I	PENDAHULUAN
1.1	Pengenalan 1
1.2	Keaslian Kajian 3
1.3	Permasalahan Kajian 4
1.4	Objektif Kajian 5
1.5	Hipotesis Kajian 5
1.6	Skop Kajian dan Tesis 5
BAB II	KAJIAN LITERATUR
2.1	Pendahuluan 7
2.2	Teknologi Komponen Tatasusunan Grid Bebola (BGA) 14
2.2.1	Pengenalan Kepada Teknologi BGA 14
2.2.2	Aplikasi BGA 17
2.2.3	Sejarah BGA 19
2.2.4	Peralihan dari PGA ke BGA 20
2.2.5	Evolusi BGA 21
2.2.6	Bebola Pateri dalam BGA dan Jenis Alooi 23
2.2.7	Keserasian Pes Pateri dengan Bebola pateri BGA 23
2.2.8	Penambahan Unsur Alooi Minor dalam Pes Pateri 24
2.2.9	Isu pemilihan pes pateri untuk komponen BGA 26

2.3	Komposisi Alooi Pateri Dan Kesannya	27
2.3.1	Sn-Ag-Cu (SAC) dan kekangan penggunaannya	27
2.3.2	Modifikasi aloi dengan Sb, Bi dan Ni	27
2.4	Kegagalan Sambungan Pateri Dan Ujian Kebolehharian	28
2.4.1	Jenis kegagalan sambungan pateri	28
2.4.2	Ujian Kebolehharian : Ujian Kitaran Terma dan Ujian Kejutan Terma	28
2.4.3	Teknik ujian dan pemeriksaan	29

BAB III KAEDAH KAJIAN

3.1	Pendahuluan	32
3.2	Penyediaan Sampel	32
3.2.1	Bahan komponen BGA, pes pateri dan PCB	35
3.2.2	Proses percetakan stensil	38
3.2.3	Perletakkan komponen	40
3.3	Ujian Kebolehharian: Ujian Kejutan Terma (TST)	44
3.4	Pencirian Sampel	46
3.4.1	Ujian sinar-X	46
3.4.2	Ujian pencelup dan tarik	48
3.4.3	Analisis keratan rentas sambungan pateri	49
3.4.4	Analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop imbasan elektron (SEM)	52
3.5	Analisis Kuantitatif Penembusan Pewarna DnP	53

BAB IV KEPUTUSAN & PERBINCANGAN

4.1	Keputusan Percetakan Pes Pateri	56
4.2	Keputusan Hasil Profil Aliran semula	61
4.3	Komponen Tatasusunan Grid Bebola Selepas Proses Pematerian Aliran Semula	67
4.4	Keputusan Ujian Sinar-X	72
4.5	Keputusan Ujian Penembusan Pewarna	77
4.5.1	Hasil ujian penembusan pewarna	77
4.5.2	Pemetaan skematik bilangan sambungan pateri yang terjejas	86
4.5.3	Penilaian kuantitatif sambungan pateri yang terjejas	94
4.5.4	Analisis kuantitatif sambungan pateri keseluruhan	101
4.6	Analisis Mikrostruktur Keratan Rentas Sambungan Pes Pateri	107

4.7	Analisis Mikrostruktur Sambungan Pateri Menggunakan Microskop Imbasan Elektron SEM	115
-----	---	-----

BAB V KESIMPULAN & CADANGAN

5.1	Kesimpulan	119
5.2	Cadangan Kajian Masa Depan	120

RUJUKAN		121
----------------	--	-----

LAMPIRAN

Lampiran A	Senarai Penerbitan	132
------------	--------------------	-----



SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Jadual suhu bagi proses pematerian aliran semula	13
Jadual 3.1	Sampel bahan pes pateri	33
Jadual 3.2	Sampel komposisi pateri	37
Jadual 3.3	Bilangan Sampel Ujian	45
Jadual 3.4	Skala Peratus Liputan Penembusan Pewarna, Tahap Liputan dan Kod Warna Pewarna	49
Jadual 4.1	Parameter profil pes pateri	62



SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Proses pemasangan SMT untuk komponen BGA pada PCB	8
Rajah 2.2	Contoh keratan rentas sambungan pateri antara komponen BGA yang dipasang pada PCB	9
Rajah 2.3	Pembentukan Retakan pada Sambungan Pateri BGA selepas Ujian Kebolehharian	10
Rajah 2.4	Profil aliran semula yang dioptimumkan untuk komponen BGA.	12
Rajah 2.5	Contoh fizikal pakej BGA yang menggunakan bebola pateri jenis: (a) SAC305 dan (b) Sn37Pb.	14
Rajah 2.6	Contoh Pakej Tatasusunan Grid Pin (PGA).	20
Rajah 2.7	Ujian pencelupan dan tarikan sambungan pateri BGA pada: (a) sisi PCB dan (b) sisi komponen.	30
Rajah 2.8	Keratan rentas sambungan pateri: (a) mikrostruktur sambungan pateri komponen BGA dan (b) komponen BGA tercermin pada PCB	31
Rajah 3.1	Carta alir kaedah kajian kesan kejutan terma terhadap sambungan pateri berasaskan timah-perak-kuprum dengan unsur-unsur minor bagi pakej tatasusunan grid bebola	34
Rajah 3.2	Kedudukan lokasi komponen BGA: (a) Bahagian atas terdiri daripada U106 dan U107 (b) Bahagian bawah terdiri daripada U105 dan U108 dan (c) susun atur skematik bebola pateri dalam komponen BGA. Garisan putus-putus dalam (a) dan (b) menunjukkan kawasan untuk penilaian keratan rentas.	36
Rajah 3.3	Proses percetakan pes pateri	39
Rajah 3.4	Mesin percetakan pes pateri	39
Rajah 3.5	Mesin pemeriksaan visual automatik	40
Rajah 3.6	Mesin perletakan komponen	41
Rajah 3.7	Mesin Aliran semula	41
Rajah 3.8	Profil aliran semula untuk pemasangan BGA	42
Rajah 3.9	(a) Penempatan wayar TC pada sambungan pateri BGA (b) Skematik penempatan wayar TC pada sambungan pateri BGA.	42

Rajah 3.10	Mesin Espec EGNZ28-15NW	46
Rajah 3.11	Skematik ujian kejutan terma	46
Rajah 3.12	Mesin sinar-X 3D	47
Rajah 3.13	Skala Peratusan Liputan Penembusan Pewarna, Tahap Liputan dan Kod Warna Pewarna	49
Rajah 3.14	Mesin untuk proses lelasan	50
Rajah 3.15	Kupon resin semasa proses lelasan	51
Rajah 3.16	Kupon resin setelah siap proses lelasan	51
Rajah 3.17	Kain penggilap dan bahan larutan penggilap	52
Rajah 3.18	Mikroskop optik	52
Rajah 3.19	Mikroskop imbasan elektron (SEM)	53
Rajah 4.1	Percetakan stensil untuk sampel kawalan pateri A pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	57
Rajah 4.2	Percetakan stensil untuk sampel kawalan pateri B pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	58
Rajah 4.3	Percetakan stensil untuk sampel kawalan pateri C pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	59
Rajah 4.4	Percetakan stensil untuk sampel kawalan pateri D pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106	60
Rajah 4.5	Profil aliran semula bagi pes pateri A bahagian atas PCB.	62
Rajah 4.6	Profil aliran semula bagi pes pateri A bahagian bawah PCB.	63
Rajah 4.7	Profil aliran semula bagi pes pateri B bahagian atas PCB.	63
Rajah 4.8	Profil aliran semula bagi pes pateri B bahagian bawah PCB.	64
Rajah 4.9	Profil aliran semula bagi pes pateri C bahagian atas PCB.	64

Rajah 4.10	Profil aliran semula bagi pes pateri C bahagian bawah PCB.	65
Rajah 4.11	Profil aliran semula bagi pes pateri A bahagian atas PCB.	65
Rajah 4.12	Profil aliran semula bagi pes pateri A bahagian bawah PCB.	66
Rajah 4.13	Komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	68
Rajah 4.14	Komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri B pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	69
Rajah 4.15	Komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri C pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	70
Rajah 4.16	Komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri D pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	71
Rajah 4.17	Sinar-X komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	73
Rajah 4.18	Sinar-X komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri B pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	74
Rajah 4.19	Sinar-X komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri C pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	75
Rajah 4.20	Sinar-X komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri D pada bahagian PCB pad komponen BGA bahagian bawah: (a) Komponen BGA U105 dan (b) Komponen	

	BGA U108; bahagian atas (c) Komponen BGA U107 dan (d) Komponen BGA U106.	76
Rajah 4.21	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk T0 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	78
Rajah 4.22	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk T0 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	79
Rajah 4.23	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk TST1500 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	80
Rajah 4.24	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk TST1500 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	81
Rajah 4.25	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk TST1900 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	82
Rajah 4.26	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk TST1900 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	83
Rajah 4.27	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk TST2500 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	84
Rajah 4.28	Ujian penembusan pewarna komponen BGA selepas aliran semula untuk sampel kawalan pateri A bahagian atas PCB untuk TST2500 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	85
Rajah 4.29	Ujian penembusan pawarna komponen BGA skematik untuk TST1500 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	87
Rajah 4.30	Ujian penembusan pawarna komponen BGA skematik untuk TST1500 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	88

Rajah 4.31	Ujian penembusan pawarna komponen BGA skematik untuk TST1900 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	89
Rajah 4.32	Ujian penembusan pawarna komponen BGA skematik untuk TST1900 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	91
Rajah 4.33	Ujian penembusan pawarna komponen BGA skematik untuk TST2500 bahagian atas PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	92
Rajah 4.34	Ujian penembusan pawarna komponen BGA skematik untuk TST2500 bahagian bawah PCB (a) Pes pateri A, (b) Pes pateri B, (c) Pes pateri C dan (d) Pes pateri D.	93
Rajah 4.35	Carta bar penembusan pewarna tahap liputan bahagian bawah PCB jenis pes pateri A, B, C dan D.	96
Rajah 4.36	Carta bar penembusan pewarna tahap liputan bahagian atas PCB jenis pes pateri A, B, C dan D.	97
Rajah 4.37	Penembusan pewarna bahagian atas PCB jenis pes pateri A, B, C dan D bagi T0, TST1500, TST1900 dan TST2500.	99
Rajah 4.38	Penembusan pewarna bahagian bawah PCB jenis pes pateri A, B, C dan D bagi T0, TST1500, TST1900 dan TST2500.	100
Rajah 4.39	Carta bar menunjukkan % tahap keretakan bahagian atas PCB jenis pes pateri A, B, C dan D bagi setiap kitaran.	102
Rajah 4.40	Carta bar menunjukkan % tahap keretakan bahagian bawah PCB jenis pes pateri A, B, C dan D bagi setiap kitaran.	102
Rajah 4.41	Carta bar menunjukkan % tahap keretakan bagi semua jenis pes pateri A, B, C dan D bagi setiap kitaran.	104
Rajah 4.42	Mikrograf Keratan rentas mikroskop optik bagi pes pateri A. (a) sambungan pateri selepas T0, (b) sambungan pateri selepas TST1500, (c) sambungan pateri selepas TST1900, (d) sambungan pateri selepas TST2500.	108
Rajah 4.43	Mikrograf Keratan rentas mikroskop optik bagi pes pateri B. (a) sambungan pateri selepas T0, (b) sambungan pateri selepas TST1500, (c) sambungan pateri selepas TST1900, (d) sambungan pateri selepas TST2500.	110
Rajah 4.44	Mikrograf keratan rentas mikroskop optik bagi pes pateri C. (a) sambungan pateri selepas T0, (b) sambungan pateri selepas TST1500, (c) sambungan pateri selepas TST1900, (d) sambungan pateri selepas TST2500.	112

- Rajah 4.45 Mikrograf Keratan rentas mikroskop optik bagi pes pateri D. (a) sambungan pateri selepas T0, (b) sambungan pateri selepas TST1500, (c) sambungan pateri selepas TST1900, (d) sambungan pateri selepas TST2500. 114
- Rajah 4.46 Mikrograf SEM selepas aliran semula, (a) Pes pateri A (b) Pes pateri B (c) Pes pateri C (d) Pes Pateri D 115
- Rajah 4.47 Imej SEM terperinci 1000x, (a) Pes pateri A (b) Pes pateri B (c) Pes pateri C (d) Pes pateri D 117



SENARAI SINGKATAN

3D	3 Dimensi
Ag	Perak
BGA	Tatasusunan grid bebola
CTE	Pekali pengembangan haba
Cu	Kuprum
DP	Celupan dan tarik
FPBGA	Tatasusunan grid bebola pic halus
IMC	Sebatian antara logam
IPC	<i>Institute of Printed Circuits</i>
JESD	<i>Joint Electron Device Engineering Council Standard</i>
OSP	Pengawet kebolehpaterian organik
PCB	Papan litar bercetak
PCBA	Pemasangan papan litar bercetak
PGA	Tatasunan grid pin
QFP	Pakej kuadrata
s	Saat
SAC	Sn-Ag-Cu/Timah-perak-kuprum
SEM	Mikroskop imbasan elektron

SMT	Teknologi lekapan permukaan
Sb	Antimoni
Sn	Timah
Bi	Bismut
TC	Pengganding suhu
TST	Ujian kejutan terma



SENARAI SIMBOL

q	Kadar aliran haba
T_0	Suhu awal
$^{\circ}\text{C}$	<i>Celsius</i>



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 PENGENALAN

Teknologi tatasusunan grid bebola (BGA) merupakan salah satu kaedah pempakejan cip elektronik yang paling meluas digunakan dalam peranti moden. Dalam konfigurasi ini, sambungan antara cip dan papan litar bercetak (PCB) dibentuk melalui bebola pateri yang disusun dalam tatasusunan grid. Teknologi ini memberikan kelebihan seperti ketumpatan sambungan yang tinggi, laluan elektrik yang lebih pendek, prestasi terma yang baik serta pelepasan haba yang lebih efisien dengan ciri-ciri penting bagi aplikasi elektronik berkelajuan tinggi.

Namun begitu, dengan peningkatan pengecilan peranti, saiz bebola pateri juga semakin mengecil, sekali gus menjadikan sambungan ini lebih terdedah kepada kegagalan mekanik, khususnya apabila terdedah kepada kejutan terma dan persekitaran operasi yang berubah-ubah (Zhang & Liu, 2023; Liu et al. 2020). Pes pateri digunakan dalam proses pemasangan sebagai medium logam penghubung antara bebola pateri BGA dan pad pada PCB. Proses aliran semula akan mencairkan pes pateri dan membentuk sambungan metalurgi antara dua permukaan tersebut (Ismail et al. 2022).

Walaupun sambungan yang terbentuk selepas pemasangan mungkin menunjukkan keutuhan struktur yang baik, isu kebolehharapan sering timbul semasa perkhidmatan jangka panjang, terutamanya dalam situasi yang melibatkan perubahan suhu secara mendadak (Zhou & Lin, 2023). Kegagalan sambungan pateri seperti retakan, pemisahan antara muka pada sebatian antara logam (IMC) dan pembentukan kekosongan boleh mengakibatkan penurunan prestasi dan kerosakan sistem sepenuhnya (Bakar, et al. 2024; Ismail et al. 2024).

Untuk menilai kebolehharapan sambungan ini, salah satu kaedah yang digunakan secara meluas ialah ujian kejutan terma (TST) (Zhou, et al. 2022). Ujian ini

mensimulasikan keadaan perubahan suhu ekstrem yang berlaku secara berulang, dan digunakan untuk mengenal pasti ketahanan sambungan terhadap tekanan termal yang berulang. Kajian melalui TST membolehkan penyelidik mengenal pasti kecacatan seperti retakan mikro, pemisahan IMC, serta perubahan mikrostruktur yang menyumbang kepada kegagalan sambungan (Yang & Tan, 2022; Zhou et al. 2023). Beberapa pendekatan telah dilakukan untuk meningkatkan kebolehharapan sambungan pateri BGA, antaranya melalui pengubahsuaian bahan pes pateri dengan menambahkan unsur minor seperti antimoni (Sb), bismut (Bi), nikel (Ni), dan Indium (In). (Zhang & Liu, 2021; Tompkins & Evans, 2024; Sivakumar & Cho, 2020). Unsur-unsur ini dipilih berdasarkan sifat fizikal dan metalurginya yang boleh mempengaruhi kestabilan fasa, mengurangkan tekanan termal, dan melambatkan pertumbuhan IMC yang rapuh (Vasilev & Petrov, 2021). Walau bagaimanapun, penyelidikan terhadap kesan kombinasi unsur-unsur minor ini dalam pes pateri terhadap kebolehharapan sambungan masih terhad dan memerlukan kajian lebih terperinci.

Sehubungan itu, kajian ini memberi tumpuan kepada analisis mikrostruktur, penembusan pewarna (DNP), dan keparahan keretakan sambungan pateri yang terbentuk menggunakan pes pateri SAC yang dimodifikasi dengan unsur minor tersebut. Semua sampel akan tertakluk kepada pelbagai kitaran TST untuk menilai kestabilan sambungan secara menyeluruh. Kajian ini dijangka dapat menyumbang kepada pembangunan pes pateri berprestasi tinggi untuk aplikasi kritikal seperti pemacu keadaan pepejal terbenam (eSSD), yang memerlukan tahap kebolehharapan jangka panjang yang tinggi.

Hubungan antara kejutan termal, pembentukan IMC dan kebolehharapan sambungan dapat dijelaskan melalui kesan perubahan suhu ekstrem berulang yang menghasilkan ketidakpadanan pekali pengembangan termal (CTE) antara komponen, pad dan bahan pateri, sekali gus mewujudkan tegasan pada antara muka. Tegasan ini mempercepatkan proses resapan atom dan pertumbuhan sebatian antara logam (IMC) seperti Cu_6Sn_5 dan Cu_3Sn , di mana penebalan dan morfologi IMC yang semakin kasar menjadikan antara muka lebih rapuh. Keadaan tersebut meningkatkan kepekatan tegasan setempat serta memudahkan pemulaan dan perambatan retakan mikro

sepanjang kitaran haba. Oleh itu, kadar pertumbuhan dan kestabilan IMC memainkan peranan penting dalam menentukan tahap degradasi dan kebolehharapan jangka panjang sambungan pateri di bawah ujian kejutan terma.

1.2 KEASLIAN KAJIAN

Keaslian kajian ini terletak pada penilaian kebolehharapan pateri berasaskan Sn-Ag-Cu (SAC) dengan penambahan unsur-unsur minor bagi aplikasi komponen BGA, dengan penekanan terhadap kebolehharapan sambungan pateri. Walaupun pateri SAC konvensional telah digunakan secara meluas dalam industri elektronik, kajian yang menilai kesan unsur minor terhadap kebolehharapan sambungan pateri BGA masih terhad, khususnya di bawah keadaan ujian yang lebih ekstrem.

Keaslian utama kajian ini adalah penggunaan TST yang ekstrem sebagai kaedah penilaian kebolehharapan, yang berbeza daripada ujian kitaran terma (TCT) yang lazim digunakan dalam kajian terdahulu. Pendekatan ini membolehkan kajian ini menilai kegagalan sambungan pateri di bawah keadaan tegasan terma yang lebih agresif dan mencerminkan senario operasi yang lebih mencabar. Selain itu, kajian ini memberikan pemahaman baharu mengenai pengaruh unsur-unsur minor dalam pateri SAC terhadap evolusi mikrostruktur, pembentukan sebatian antara muka dan retakan apabila terdedah kepada kejutan terma yang berulang. Penemuan ini membezakan kajian ini daripada kajian kebolehharapan konvensional yang kebanyakannya tertumpu kepada komposisi SAC dan keadaan ujian TCT.

Secara keseluruhan, keaslian kajian ini terletak pada gabungan bahan baharu pateri SAC dengan unsur minor, aplikasi khusus BGA, dan penggunaan ujian kebolehharapan TST ekstrem, yang menghasilkan sumbangan baharu kepada pemahaman kegagalan sambungan pateri serta memberikan rujukan penting kepada pembangunan bahan pateri berprestasi tinggi dalam industri elektronik moden.

1.3 PERMASALAHAN KAJIAN

Sambungan pateri merupakan tulang belakang kepada pakej elektronik yang memberikan sokongan mekanik dan kebolehfungsi terutama bagi komponen BGA. Sambungan pateri ini sering terdedah kepada kegagalan struktur apabila berhadapan dengan tekanan terma yang berulang, terutama dalam persekitaran operasi yang melibatkan perubahan suhu secara mendadak seperti TST. Fenomena ini menjadi cabaran utama kerana peralihan suhu secara tiba-tiba boleh menyebabkan pembentukan dan pertumbuhan lapisan IMC yang rapuh dan tidak stabil. Lapisan IMC yang tidak seragam ini menghasilkan tekanan dalaman pada sambungan pateri yang akhirnya membawa kepada kemunculan retakan mikro. Retakan mikro tidak terkawal ini akan mengakibatkan kegagalan mekanik dan seterusnya kegagalan fungsi keseluruhan peranti elektronik.

Penambahan unsur-unsur minor seperti Sb, Bi, Ni dan In ke dalam aloi pateri berasaskan SAC merupakan salah satu pendekatan yang banyak dilakukan untuk meningkatkan kebolehharapan sambungan pateri. Unsur-unsur minor ini dijangka dapat memodifikasi mikrostruktur aloi pateri, memperbaiki sifat mekanik serta kestabilan terma. Walaubagaimanapun, kajian yang menyeluruh mengenai kesan gabungan unsur-unsur ini dalam pes pateri berasaskan SAC terhadap kestabilan mikrostruktur dan kebolehharapan sambungan pateri bagi pakej BGA di bawah ujian kejutan terma masih kurang diterokai. Kajian ini juga melibatkan penilaian yang lanjut terhadap perubahan mikrostruktur sambungan pateri melalui teknik penembusan pewarna (DNP) serta analisis keparahan retakan selepas pendedahan TST dengan kitaran yang berbeza. Kajian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai perubahan mikrostruktur, dan analisis tahap keparahan keretakan yang memberikan sumbangan dalam merancang dan menghasilkan sambungan pateri yang lebih tahan lama, khususnya untuk industri elektronik yang memerlukan tahap kebolehharapan sambungan pateri yang tinggi. TCT yang luas digunakan dalam industri juga mengambil masa yang amat lama untuk mengaruh kebolehharapan sambungan pateri khususnya dalam kajian ini untuk menyelidiki kesan unsur minor ke dalam pes pateri, maka kajian ini memilih TST yang lebih cepat.

1.4 OBJEKTIF KAJIAN

Objektif kajian ini adalah untuk:

- i. Mengkaji kesan penambahan unsur minor seperti Sb, Bi, Ni dan In dalam pes pateri berasaskan SAC terhadap kualiti sambungan pateri BGA melalui penembusan pewarna kualitatif dan kuantitatif.
- ii. Menilai prestasi sambungan pateri melalui perubahan mikrostruktur, dan keparahan retakan bagi sambungan pateri komponen BGA apabila didedahkan kepada TST.

1.5 HIPOTESIS KAJIAN

Hipotesis kajian ini menggariskan bahawa:

- i. Penambahan unsur minor seperti Sb, Bi, Ni dan In dalam pes pateri SAC akan meningkatkan kestabilan struktur dan mengurangkan pembentukan keretakan semasa kitaran kejutan termal.
- ii. Setiap unsur minor menyumbang secara berbeza: Sb meningkatkan ketahanan terhadap tekanan, Bi membantu pelepasan tegangan termal, Ni menstabilkan mikrostruktur, dan In mengurangkan suhu lebur sambil mengekalkan keutuhan sambungan.

1.6 SKOP KAJIAN

Skop kajian ini memberi tumpuan kepada beberapa aspek utama berkaitan kebolehharian sambungan pateri bagi pakej BGA. Pes pateri berasaskan SAC digunakan untuk menyambung bebola pateri SAC bagi pakej BGA kepada PCB. Pes pateri berasaskan SAC dimodifikasi dengan unsur-unsur minor seperti Sb, Bi, Ni, dan In. Kajian ini menilai prestasi sambungan pateri tersebut untuk memahami kesan penambahan unsur-unsur minor tersebut terhadap kualiti sambungan pateri. Skop kajian ini melibatkan pemerhatian kebolehharian sambungan pateri dengan pendedahan kepada TST daripada kitaran T1500, T1900 dan T2500. Kestabilan

sambungan pateri dari segi perubahan mikrostruktur, tahap penembusan pewarna, serta keparahan keretakan diperhatikan bagi kesemua jenis pes pateri SAC dengan unsur-unsur minor.



RUJUKAN

- Abdel Razzaq, M., Meilunas, M., Cao, X. A., Wilcox, J., & Ramini, A. (2025). Thermal fatigue behaviors of BGA packages with an optimized solder joint layout. *Electronics*, 14 (11), 2286.
- Abramov, I. & Grekov, V. (2021). Assessment of IMC growth kinetics in SnAgCu solders with Sb additions. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 7540–7551.
- Ahmed, O., Hutchinson, L., Su, P. & Jiang, T. (2021). Effects of heatsink application and PCB design variations on BGA solder joint reliability. *Proceedings of the IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 1001–1006.
- An, X. & Chen, Y. (2020). Voids and their effect on thermal fatigue reliability of BGA solder joints. *Microelectronics Reliability*, 103, 113–123.
- Arfaei, B. & Clech, J.-P. M. (2010). Failure analysis of lead-free solder joints subjected to thermal cycling using dye and pry technique. *Microelectronics Reliability*, 50(9–11), 1452–1458.
- Aspandiar, R., Murayama, K., Goonetilleke, P., Radhakrishnan, J., & Fu, H. (2021). Post mechanical shock test failure analysis on mixed SnAgCu–BiSn BGA solder joints. *International Conference on Electronics Packaging*, 137–138.
- Belhadi, M.E.A., Hamasha, S., Alahmer, A., Qasaimeh, Q., Alakayleh, A. & Alavi, S. (2023). Investigating the evolution of creep properties during thermal cycling of homogeneous lead-free solder joints. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 13(12), 1951–1965.
- Bhattacharya, S., Lee, K. & Park, H. (2021). Thermal cycling performance of SAC305 with minor Bi additions. *Materials Science & Engineering A*, 803, 140664.
- Becker, M. & Tran, P. (2022). Power cycling and thermal cycling combined effects on BGA joints in automotive ECUs. *Microelectronics Reliability*, 129, 114540.

- Chen, B. (2023). Optimizing reflow profile for high reliability BGA assemblies. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 123–132.
- Chen, B. L. & Li, G. Y. (2005). An investigation of effects of Sb on the intermetallic formation in Sn-3.5Ag-0.7Cu solder joints. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 28(3), 534–541.
- Chen, C.M., Gan, C.L., Wilson, K., Tennant, T., Du, H., Wong, K. W., Ang, X. Y. & Takiar, H. (2021). Low temperature solder paste characterization for memory module and SSD product level reliability tests. *Electronic Packaging Technology Conference (EPTC)*, 423–426.
- Chen, X. (2025). Study on the microstructure and comprehensive performance of SAC105–xCo solder in a magnetic field. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 4445–4452.
- Cheng, J., Wang, Y. & Li, H. (2023). Lead-free solder alloys for advanced BGA packaging: A review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(6), 9876–9890.
- El-Shamy, H. & Park, S. (2023). Low-temperature reflow chemistry for next-gen memory modules. *Journal of Surface Mount Technology*, 37(2), 121–136.
- Ersoy, E. & Kaya, A. (2023). Fatigue life analysis of mixed-alloy solder joints under thermal cycling and vibration. *International Journal of Fatigue*, 156, 106619.
- Gao, L., Huang, T. & Zhou, J. (2024). Minor alloying elements impact on thermal fatigue behavior in BGA solder joints. *Materials Science and Engineering A*, 852, 143299.
- Gao, X. & Sun, P. (2021). Microstructural evolution of SAC-based solders during multiple reflow. *Materials Characterization*, 176, 111094.
- Gupta, V. & Banerjee, P. (2022). Void formation mechanisms in SAC305: influence of flux and reflow profile. *Journal of Electronic Materials*, 51, 2345–2358.
- He, L. & Wu, J. (2022). Thermal shock testing methodology for heterogeneous BGA assemblies. *Journal of Electronic Testing*, 38(5), 411–423.

- Hernandez, P. & Kim, S. (2022). Interfacial cracking mechanism in BGA package under thermal cycling. *Microelectronics Reliability*, 139, 114592.
- Hoque, M.A., Haq, M.A., Chowdhury, M.M., Suhling, J.C. & Lall, P. (2020). Cyclic stress-strain and constitutive behaviors of SAC-Bi-Ni-Sb solder alloys during fatigue testing. *In Proceedings of ITherm*, 1211–1220.
- Hsu, L. & Chen, Y. (2021). Influence of minor In additions on reliability of Sn-Ag-Cu solders. *Soldering & Surface Mount Technology*, 33(4), 211–223.
- Hu, X., Liu, L., Liu, S., Ruan, M. & Chen, Z. (2023). Effects of voids on thermal fatigue reliability of solder joints on inner rings in Ball Grid Array packaging by finite element analysis. *Micromachines*, 14(3), 588.
- Ikeda, M. & Sato, Y. (2020). Reliability of OSP vs ENIG under thermal cycling. *Surface & Coatings Technology*, 392, 125762.
- Ismail, A. A., Bakar, M. A., Ehsan, A. A., Jalar, A., Burke, J., Zolkefli, Z. E., & Basiron, E. (2022). Effect of heat shield locations on rework-induced thermal management in ball grid array solder joint. *Scientific Reports*, 12, 15118.
- Ismail, A. A., Abu Bakar, M., Jalar, A., Zolkefli, Z. E., Basiron, E. & Ilias, M. N. (2024). Laser rework process for efficient lead-free solder joints ball grid array (BGA) component rework. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(4), 735–742.
- Ismail, N., Wan Yusmawati Wan Yusoff, W., Azuraidda Amat, A., Nor Azlian Abdul Manaf, N., & Nurazlin Ahmad, N. (2024). *A review of extreme condition effects on solder joint reliability: Understanding failure mechanisms. Defence Technology*, 41, 134–158.
- Jain, Rahul. (2023). Generation of statistical hypotheses: Methods and applications. *SSRN*, 4, 4553418.
- Jang, T. & Lee, M. (2021). Crack initiation sites in Pb-free BGA solder joints under thermal cycling. *Microelectronics Reliability*, 117, 114015.

- Jiang, X., Zhang, C., Pan, Z., Wang, J. & Liu, Y. (2024). Failure characteristics and mechanisms of Sn-based solder interconnections under vibrational conditions. *IEEE Conference Proceedings*, 1-4.
- Jivan, P. & Mehta, N. (2024). Standardization of thermal shock profiles for mobile-device BGA reliability screening. *Electronics (MDPI)*, 13(2), 202.
- Junghoon Kim, Yong Jung, Eunho Oh, Y., Çinar, Y., Jong-Seol Jeong, Sungki Lee, & Jonggyu Park. (2023). TC reliability enhancement technology for SSD with low temperature solder paste material. *International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems (EuroSimE)*, 1-4.
- Kaur, P. & Singh, R. (2022). Effects of miniaturisation on solder joint geometry and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 154, 106541.
- Kohl, C. & Meyer, F. (2023). AI methods for X-ray CT defect detection in BGA arrays. *IEEE Journal of Electronic Testing*, 39(4), 421–435.
- Lau, J. H. (2013). Impact of reflow parameters on microstructure and reliability of Pb-free BGA solder joints. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 3(12), 2141–2150.
- Lau, J. H. (2011). Overview and outlook of solder joint reliability of BGA, CSP, and flip chip packages. *Microelectronics Reliability*, 51(1), 1–12.
- Lee, Y.-S. & Lin, J.-H. (2016). Dye and pry evaluation of SAC305 solder joints after accelerated mechanical shock tests. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(4), 1689–1695.
- Leong, A. & Tan, C. (2020). Accelerated test methods for solder joint reliability qualification. *Journal of Electronic Packaging*, 142(3), 031005.
- Li, L., Du, X., Chen, J. & Wu, Y. (2024). Thermal fatigue failure of micro-solder joints in electronic packaging devices: A review. *Materials*, 17(10), 2365.

- Li, Q., Zhao, W., Zhang, W., Chen, W. & Liu, Z. (2022). Research on thermal fatigue failure mechanism of BGA solder joints based on microstructure evolution. *International Journal of Fatigue*, 167, 107356.
- Li, H. & Su, J. (2021). Influence of minor Ni addition on intermetallic morphology of SAC305. *Materials Science & Engineering A*, 807, 140774.
- Li, M., Nogita, K. & Dahle, A. (2022). Formation and growth of intermetallic compounds in lead-free solder joints: A review. *Materials*, 15(4), 1261.
- Li, W. & Wong, M. (2023). OSP immersion techniques for multi-layer PCB fabrication. *Journal of Electronic Materials*, 52(7), 3750–3759.
- Lim, J. & Tanaka, Y. (2021). Cross-sectional analysis of BGA solder joints using SEM-EDS. *Materials Characterization*, 175, 111044.
- Liu, Y., Yang, B., Shenghua, H., Ning, Y., Bhagath, S. & Shukla, R. (2020). Board level reliability enhancement with considerations of solder ball, substrate and PCB. *Proceedings of the Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 249–256.
- Ma, X. & Chen, Y. (2023). Nano-indentation based measurement of IMC mechanical properties in BGA solder joints. *Materials Characterization*, 195, 112368.
- Martinez, R. & Lopez, A. (2023). Cross-sectional analysis techniques for solder joint failure diagnosis in BGA. *Journal of Electronic Materials*, 52(9), 4580–4592.
- Suhaimi, M. F., Abu Bakar, M., Jalar, A., Che Ani, F., & Ramli, M. R. (2022). Thermal cycling effect on the crack formation of solder joint in ball grid array package. *Journal of Physics: Conference Series*, 2169(1), 012006.
- Abdel Razzaq, M.; Meilunas, M.; Cao, X. A.; Wilcox, J.; Ramini, A. (2025). *Thermal Fatigue Behaviors of BGA Packages with an Optimized Solder Joint Layout. Electronics*, 14(11), 2286.
- Nakamura, T. & Ito, K. (2021). Effects of cooling rate on thermal fatigue resistance of SAC alloys. *Journal of Electronic Materials*, 50, 4511–4521.

- Ochoa, F. & Sanchez, L. (2024). Atmosphere control in reflow soldering: Nitrogen use in BGA assemblies. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(1), 150–158.
- Ozel, F. & Erdem, A. (2024). Thermal management strategies during laser reflow of fine-pitch BGAs. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(5), 845–856.
- Pádua, G.F.R.C., Figueiredo, L.F.S., Rocha, G.S., Junior, J.S.M., de Oliveira, J.S., Barboza, R.S., Kieling, A.C. & Macêdo Neto, J.C. (2025). Characterization and failure analysis of solder joints in BGA components using cross-section, dye and pry, and microstructural etching techniques. *Materials Research*, 28 (Suppl 1), 0211.
- Park, C. & Lee, D. (2020). Reflow profile optimization for mixed-alloy BGA assemblies. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 164–174.
- Park, S., Kim, J. & Lee, C. (2024). Advances in reflow soldering for fine-pitch BGA assemblies. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 14(2), 210–218.
- Patel, R., Sharma, S. & Gupta, A. (2024). Automotive electronics packaging: The role of BGA technology. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(4), 4001–4012.
- Peng, P., Ma, H., Zhang, L. & Zhou, W. (2019). Effect of zinc addition on Sn–Ag–Cu solder alloys: microstructure, mechanical properties, and wettability. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 652–660.
- Qiu, H. & Zhang, Y. (2021). Effects of humidity and storage on OSP surface finishes prior to reflow. *Journal of Electronic Materials*, 50(10), 5624–5631.
- Rahman, A. & Chen, Z. (2022). Bayesian reliability prediction of BGA solder joints under variable amplitude thermal cycling. *Reliability Engineering & System Safety*, 217, 108026.
- Rahman, A., & Jain, R. (2023). *Generation of statistical hypotheses: Methods and applications*. SSRN Electronic Journal, 1–24.

- Reddy, M. & Patel, K. (2021). Thermal expansion mismatch and IMC cracking in BGA solder joints. *Microelectronics Reliability*, 124, 114229.
- Sato, R. & Yamaguchi, T. (2023). Solder paste volume and stencil design impacts on BGA joint reliability. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 13(9), 1256–1267.
- Seo, E. Y., & Ryu, J. (2020). Influence of reflow profile on thermal fatigue behaviors of solder ball joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29, 6701–6710.
- Shah, N. & Gupta, R. (2021). Statistical process control for stencil printing of micro BGAs. *Journal of Surface Mount Technology*, 35(3), 141–154.
- Sham, M.L., Kim, J. & Wong, C.P. (2004). Characterization of solder joint failures in ball grid array packages using dye penetration and cross-sectioning techniques. *Microelectronics Reliability*, 44(1), 111–121.
- Shun Cao, Parviziomran, I., Srihari, K., Park, S., & Won, D. (2020). Statistical analysis for component shift in pick and place process of surface mount technology. *Journal of Electronic Packaging*, 142(3), 031006.
- Sivakumar, P., O'Donnell, K., & Cho, J. (2020). Effects of bismuth and nickel on the microstructure evolution of Sn-Ag-Cu (SAC)-based solders. *Materials Today Communications*, 25, 101457.
- Smith, R. & Zhang, Q. (2023). Controlled cooling in BGA reflow to suppress crack formation. *Journal of Electronics Manufacturing*, 28(4), 305–315.
- Soliman, A. & Lee, S. (2022). Effect of pad land shape on solder joint stress concentration in fine-pitch BGAs. *Journal of Electronic Packaging*, 144(2), 021003.
- Suhaimi, M.F., Abu Bakar, M., Jalar, A., Che Ani, F. & Ramli, M. (2022). Thermal cycling effect on the crack formation of solder joint in ball grid array package. *Journal of Physics: Conference Series*, 2169(1), 012006.

- Sun, Y. & Chen, B. (2023). Analyzing the impact of void distribution on thermal fatigue life using 3D X-ray CT. *Journal of Electronic Testing*, 39(2), 179–195.
- Swanson, T.J. & Anselm, M.K. (2023). Properties of mixing SAC solder alloys with bismuth-containing solder alloys for a low reflow temperature process. *Journal of Surface Mount Technology*, 36, 25–34.
- Tan, L. & Eu, P. (2021). Micro-CT derived statistics for solder joint voiding and their correlation to fatigue life. *Materials Characterization*, 178, 111235.
- Tanaka, Y., Suzuki, T. & Nakamura, M. (2023). AI-enabled X-ray CT inspection for BGA solder joint reliability. *Journal of Electronic Testing*, 39(3), 295–307.
- Swanson, T. J., & Anselm, M. K. (2023). Properties of mixing SAC solder alloys with bismuth-containing solder alloys for a low reflow temperature process. *Journal of Surface Mount Technology*, 36(3), 25–34.
- Thakur, P. & Mehra, R. (2021). Influence of reflow atmosphere on wetting and IMC formation in lead-free solders. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5000–5012.
- Tompkins, S. & Evans, J. (2024). Comparative study: SAC305 vs SAC+Bi in mobile device BGA assemblies. *Soldering & Surface Mount Technology*, 36(2), 98–118.
- Tomy, A. & Kapoor, R. (2022). Reliability of mixed-alloy solder joints under combined thermal and mechanical loading. *International Journal of Fatigue*, 155, 106595.
- Tsai, T.-N. & Liukkonen, M. (2016). Robust parameter design for the micro-BGA stencil printing process using a fuzzy logic based Taguchi method. *Applied Soft Computing Journal*. 30, 862-870.
- Tsai, C. & Lin, Y. (2022). Reliability modeling of mixed alloy solder joints under thermal cycling and power cycling. *Microelectronics Reliability*, 128, 114506.
- Tuer, A. & Novak, M. (2021). Effect of board warpage on BGA solder joint reliability during reflow. *Journal of Electronic Packaging*, 143(1), 011002.

- Ueno, H. & Saito, M. (2020). Influence of flux residues on long-term reliability of BGA assemblies. *Surface & Coatings Technology*, 383, 125136.
- Vasilev, A. & Petrov, D. (2021). Experimental characterization of intermetallic mechanical properties in Pb-free solders. *Materials Science & Engineering A*, 797, 139990.
- Vyas, P.P., Alahmer, A., Bolanos, S., Alavi, S.S. & Hamasha, A. (2024). Drop shock testing analysis at elevated temperature: Assessing SAC305 solder alloy reliability in BGA assemblies. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(8), 1384–1393.
- Wang, F. & Liu, J. (2020). Rework effects on solder joint microstructure and fatigue resistance. *Journal of Electronic Materials*, 49, 3456–3467.
- Wang, P.-H., Huang, Y.-W. & Chiang, K.-N. (2021). Reliability evaluation of fan-out type 3D packaging-on-packaging under accelerated thermal cycling. *Micromachines*, 12(3), 295.
- Wang, Y. & Li, H. (2023). Lead-free solder alloys for advanced BGA packaging: a review (see Cheng, Wang & Li, 2023). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(6), 9876–9890.
- Wang, X., Zhang, L., Ma, H. & Zhou, W. (2022). Rare earth element additions in Sn-based solder alloys: Effects on microstructure, intermetallic compounds and reliability. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(9), 5534–5551.
- Wong, E., & Seah, S. (2022). Pad finish reliability and IMC evolution under thermal cycling: comparative studies. *Surface Engineering*, 38(8), 701–712.
- Wong, E. H., Lim, T. B. & Mai, Y. W. (2008). Statistical reliability analysis of BGA solder joints under thermo-mechanical loading. *Microelectronics Reliability*, 48(3), 453–461.
- Xu, H. & Zheng, L. (2024). Machine learning for predicting solder joint lifetime from X-ray CT features. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(6), 915–926.

- Yang, Z. & Tan, H. (2022). Study on microstructure evolution of Sn-based solders during long-term thermal aging. *Journal of Alloys and Compounds*, 910, 164595.
- Yoon, J. W., Kim, Y. J., Lee, S. H. & Jung, S. B. (2018). Role of germanium in suppressing oxidation and improving wettability of lead-free solder alloys. *Metals and Materials International*, 24(3), 476–485.
- Yu, C. & Wang, Y. (2021). Effect of pad design and surface finish on solder joint reliability in fine-pitch BGAs. *Journal of Surface Mount Technology*, 34(4), 221–233.
- Zhao, M. (2016). Effect of cobalt doping on the microstructure and tensile properties of Sn–Ag–Cu lead-free solder. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(10), 1005–1012.
- Zeng, G., McDonald, S. & Nogita, K. (2021). Effects of copper content on microstructure, thermal and mechanical properties of Sn–Ag–Cu solders. *Microelectronics Reliability*, 116, 114043.
- Zeng, R. (2025). An introductory overview of various typical lead-free solders for electronic packaging. *Inorganics*, 13(3), 86.
- Zeng, G., McDonald, S. & Nogita, K. (2012). Effects of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Sn–Ag–Cu solder alloys. *Journal of Electronic Materials*, 41(3), 563–571.
- Zolkefli, Z.E., Ismail, A.A., Bakar, M.A., Jalar, A., Basiron, E. & Ilias, M.N. (2024). Laser rework process for efficient lead-free solder joints ball grid array (BGA) component rework. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(4), 735–742.
- Zhang, L. & Liu, X. (2023). Enhancing thermal fatigue resistance of lead-free solders with minor alloying additions. *Soldering & Surface Mount Technology*, 35(1), 45–56.
- Zhang, R., Li, F. & Wang, H. (2022). Comparative study of OSP, ENIG, and HASL surface finishes. *Surface & Coatings Technology*, 425, 127653.

- Zhang, W. & Liu, Z. (2021). Effect of minor alloying additions on grain refinement and thermal fatigue. *Journal of Electronic Materials*, 50, 564–576.
- Zhang, Y. & Qiu, H. (2021). Effects of humidity and storage on OSP prior to reflow (see Qiu & Zhang, 2021). *Journal of Electronic Materials*, 50(10), 5624–5631.
- Zhang, Q., Zhang, M., Gamanayake, C., Yuen, C., Geng, Z., Jayasekara, H., Woo, C.-W. & Guan, Y. L. (2022). Deep learning based solder joint defect detection on industrial printed circuit board X-ray images. *Complex & Intelligent Systems*, 8, 1525–1537.
- Zhou, Q. & Lin, D. (2023). Miniaturization and reliability trends in BGA packages for mobile applications. *Microelectronics Journal*, 137, 107667.
- Zhou, S., Lin, Z., Qiu, B., Wang, H., Xiong, J., He, C., Zhou, B., Pan, Y., Huang, R., Bao, Y. & Cai, N. (2022). Evaluation of solder joint reliability in 3D packaging memory devices under thermal shock. *Electronics*, 11(16), 2556.
- Zou, H. & Li, M. (2020). Stencil printing repeatability for micro BGA solder paste deposits. *Journal of Surface Mount Technology*, 33(2), 77–86.
- Zuo, L. & He, M. (2023). Thermal fatigue life prediction of BGA solder joints using physics-informed neural networks. *International Journal of Fatigue*, 164, 107120.
- Zhou, Y., Zhang, L., Chen, X. & Chan, Y. C. (2020). Effects of antimony addition on the microstructure and mechanical properties of Sn–Ag–Cu solder alloys. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(5), 3832–3844.

LAMPIRAN A
SENARAI PENERBITAN

JURNAL

Ee May, Lim. Azman, Jalar. Maria, A. Adlil, A. Fakhrozi, C. Choo Par, T. (2025). Enhancing Ball Grid Array (BGA) Component on Printed Circuit Board (PCB) Solder Joint Integrity with Antimony Element. Journal of Failure Analysis and Prevention. Vol 25, 813-827. <https://doi.org/10.1007/s11668-025-02144-4>

