

**KEBOLEHHARAPAN SAMBUNGAN PATERI BAGI
KOMPONEN TATASUSUNAN GRID BEBOLA
TERCERMIN**

MUHAMMAD NIZAM BIN ILIAS

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

KEBOLEHHARAPAN SAMBUNGAN PATERI BAGI KOMPONEN
TATASUSUNAN GRID BEBOLABGA TERCERMIN

MUHAMMAD NIZAM BIN ILIAS

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH
IJAZAH SARJANA

INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2026

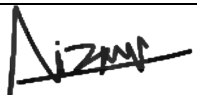
 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

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 Name	MUHAMMAD NIZAM BIN ILIAS	
No. Pendaftaran Registration No.	P137088	
Jabatan Department	-	
Fakulti / Institut Faculty / Institute	INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO & NANOELEKTRONIK	
Program Pengajian Program of Study	Sarjana (Master) ☒	Doktor Falsafah (Doctor of Philosophy) ☐
Alamat: Address	35, LORONG PUNGGUK 2, TAMAN RASA RIA, 14200, SUNGAI JAWI, PULAU PINANG	
E-mel/ Email: P137088@siswa.ukm.edu.my		No. Telefon/ Tel. No: 017-2440184
B. MAKLUMAT TESIS / DISERTASI (THESIS / DISSERTATION DETAILS)		
Tajuk Tesis/ Disertasi (Thesis / Dissertation Title): KEBOLEHHAARAN SAMBUNGAN PATERI BAGI KOMPONEN TATASUSUNAN GRID BEBOLA TERCERMIN		
Tandatangan: Signature 	Tarikh: Date 30 JUN 2026	
C. PERAKUAN PENYELIA DAN PEMERIKSA DALAM ** (APPROVAL FROM SUPERVISORS AND INTERNAL EXAMINER) **		
Nama: DR. MARIA BINTI ABU BAKAR Name (Penyelia Utama/Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan) (Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature 	

 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: PROF. DR. AZMAN JALAR (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: DR. NORHAYATI ABU BAKAR (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: Date 30 JUN 2026
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: PROF. Madya DR. MUHAMAD RAMDAN BIN BUDONG Name and Official Stamp Timbalan Pengerah Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi	Tarikh: Date 16/7/2026

	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	
		16 Julai 2026	
Nama dan Cap Rasmi: Name and Official Stamp			
G. PERAKUAN TESIS/ DISERTASI SARJANA / DOKTOR FALSAFAH (CERTIFICATION OF MASTER'S / DOCTORAL THESIS / DISSERTATION)			
Nama penuh pengarang (Author's Full Name)	MUHAMMAD NIZAM BIN ILIAS		
No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)	P137088	Sesi Akademik (Academic Session)	1/20262027
Tajuk Tesis / Disertasi (Thesis / Dissertation Title)	KEBOLEHHARAPAN SAMBUNGAN PATERI BAGI KOMPONEN TATASUSUNAN GRID BEBOLA TERCERMIN		
Semua tesis/disertasi dan penerbitan berkaitan hasil penyelidikan pelajar adalah tertakluk kepada Dasar Harta Intelek Universiti Kebangsaan Malaysia. All theses/ dissertations and publications relating to the research work of a student are subject to the Intellectual Property Policy of Universiti Kebangsaan Malaysia. Saya mengaku bahawa tahap akses tesis/disertasi ini sebagai (*Tandakan ✓ dalam kotak bagi maklumat yang berkaitan; tandakan satu (1) kotak di bawah sahaja): I hereby declare the level of access for this thesis/dissertation as follows (tick ✓ the relevant box below; tick only one option).			
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. Contains classified information as stipulated under the Official Secrets Act 1972.	
☒	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. 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.	

 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		

☐	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 / Pengerusi JK SISWAZAH (SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON SUPERVISION COMMITTEE SIGNATURE)	
Nama Pelajar (Student name): No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)	MUHAMMAD NIZAM BIN ILIAS P137088	Nama Penyelia / Pengerusi JK Siswazah: (Supervisor's / Chairperson Supervision Committee Name)	DR. MARIA BINTI ABU BAKAR
Tarikh: 30 JUN 2026 (Date)		Tarikh: 30 JUN 2026 (Date)	

PENGAKUAN

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

15 Julai 2026

MUHAMMAD NIZAM BIN ILIAS
P137088

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang Maha Pemurah lagi Maha Mengasihani.

Alhamdulillah dengan izin dan rahmat-Nya dapat juga saya menyiapkan kajian ini dalam masa yang ditetapkan. Saya berasa amat bersyukur kerana dapat menyelesaikan tesis ini. Setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih yang tidak terhingga diucapkan kepada kedua-dua penyelia saya, Dr. Maria Abu Bakar dan Prof. Dr. Azman Jalar di atas segala nasihat, dorongan dan keprihatinan dalam menyempurnakan kajian ini.

Terima kasih juga diucapkan kepada pihak SanDisk Storage Malaysia Sdn. Bhd. dan Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) di atas bantuan kewangan serta teknikal melalui kolaborasi di bawah geran penyelidikan RR-2023-007. Penghargaan khas juga buat Jabatan *Package Technology Development* atas sumbangan bahan penyelidikan yang amat membantu kelancaran projek kolaborasi ini.

Saya juga ingin mengambil kesempatan ini untuk mengucapkan ribuan terima kasih kepada pengurus saya, Erwan Basiron, rakan-rakan sekerja, Dr. Fakhrozi Che Ani dan Dr. Adlil Aizat bin Ismail, serta seluruh ahli kumpulan penyelidikan Pempakejan Mikroelektronik dan Bahan (MIPAC) atas segala bantuan, toleransi, dan dorongan yang diberikan sepanjang pengajian saya.

Akhir sekali, dedikasi paling istimewa buat keluarga tercinta, ayah, umi, isteri, dan anak-anak tersayang. Terima kasih atas segala doa yang tidak pernah putus, pengorbanan masa, serta kesabaran yang tinggi sepanjang saya mengimbangi komitmen kerjaya dan pengajian ini. Sokongan kalian adalah kekuatan utama saya.

Sekian, terima kasih.

ABSTRAK

Pemasangan komponen tatasusunan grid bebola (BGA) tercermin digunakan dalam integrasi dwi-sisi pada papan litar bercetak (PCB). Walau bagaimanapun, penempatan dua komponen BGA secara tercermin pada sisi atas dan bawah PCB menimbulkan isu kebolehharapan yang ketara berbanding konfigurasi satu sisi. Walaupun pes pateri berasaskan Sn-Ag-Cu (SAC) lazim digunakan untuk menyambungkan komponen BGA, isu kebolehharapan sambungan pateri bagi konfigurasi BGA tercermin masih wujud kerana melalui proses pematerian semula berulang kali. Oleh itu, kajian ini bertujuan untuk menilai kesan ketebalan PCB (1.2 mm, 1.6 mm dan 2.0 mm) serta pengaruh modifikasi unsur minor dalam pes pateri berasaskan SAC (SAC, SAC-In, dan SAC-Sb) terhadap kebolehharapan sambungan pateri yang didedahkan pada tempoh ujian kitaran terma (TCT) berbeza, 400-1200 kitaran. Metodologi kajian ini bermula dengan pemeriksaan awal sambungan yang menggunakan sampel kawalan yang dicirikan dengan sinar-X dan ujian celupan dan tarik (DnP). Kemudian analisis keratan rentas dan mikroskop optik digunakan untuk mengesahkan integriti pematerian awal dan selepas ujian TCT. Kajian terperinci terhadap kemerosotan dan kadar keparahan keretakan dijalankan menggunakan ujian DnP untuk melihat taburan retakan bebola pateri secara menyeluruh. Analisis perambatan retak dan perubahan mikrostruktur pada antaramuka sambungan juga dilakukan. Hasil analisis percirian awal menggunakan sinar-X mengesahkan tiada kecacatan kritikal pasca-pemasangan sebelum ujian kelesuan dimulakan. Namun, keputusan ujian DnP mendedahkan bahawa komposisi pes pateri dan ketebalan PCB secara signifikan mempengaruhi peratusan dan taburan kegagalan sambungan. Analisis ketebalan PCB mendapati bahawa papan nipis (1.2 mm) mencatatkan kadar penusukan warna tertinggi mencapai 13.18% selepas ujian TCT sebanyak 1200 kitaran. Penggunaan PCB dengan ketebalan 1.6 mm dan 2.0 mm telah berjaya mengurangkan jumlah keretakan secara drastik kepada purata sekitar 6.86% hingga 5.03% selepas ujian TCT sebanyak 1200 kitaran. Dari segi penggunaan jenis pes pateri, didapati bahawa aloi SAC-In menunjukkan kadar retakan yang terendah selepas 1200 kitaran TCT iaitu 8.58% diikuti dengan SAC-Sb sebanyak 11.83% dan 17.01% dengan SAC. Kajian ini menunjukkan bahawa analisis kadar keparahan boleh digunakan untuk mewakili kebolehharapan sambungan pateri bagi komponen BGA tercermin. Secara keseluruhannya, kajian ini merumuskan bahawa aplikasi SAC-In dan ketebalan PCB yang optimum (khususnya melebihi 1.6 mm) menawarkan penyelesaian praktikal untuk memanjangkan jangka hayat pemasangan elektronik berketumpatan tinggi, sekaligus memberi pemahaman baharu terhadap mekanisme kegagalan BGA tercermin.

THE RELIABILITY OF SOLDER JOINTS FOR MIRRORED BALL GRID ARRAY COMPONENTS

ABSTRACT

Mirrored BGA component assembly is used in double-sided integration on printed circuit board (PCB). However, mirrored placement BGA components on the top and bottom sides of the PCB poses significant reliability issues compared to single-sided configurations. Although Sn-Ag-Cu (SAC) solder paste is commonly used to assemble BGA components, solder joint reliability issues for mirrored BGA configurations still exist due to multiple reflow process. Therefore, this study aims to evaluate the effects of PCB thickness (1.2 mm, 1.6 mm and 2.0 mm) as well as the influence of minor element modifications in SAC-based solder pastes (SAC, SAC-In, and SAC-Sb) on the reliability of solder joints exposed to different thermal cycle test (TCT) periods, 400-1200 cycles. The methodology in this study begins with an initial inspection of the joints using control samples characterized by X-rays and Dye and Pull (DnP). Then cross-sectional analysis and optical microscopy were used to confirm the integrity of the solder joints before and after the TCT test. A detailed study of the degradation and severity of cracks was carried out using the DnP test to evaluate the overall distribution of solder ball cracks. Analysis of crack propagation and microstructural also performed. The results of the initial characterization using X-rays confirmed that there were no critical defects post-assembly before the fatigue test was initiated. However, the DnP results revealed that the solder paste composition and PCB thickness significantly affected the percentage and distribution of joint failures. PCB thickness analysis found that thin boards (1.2 mm) recorded the highest color penetration rate reaching 13.18% after 1200 TCT cycles. The use of PCB with thicknesses of 1.6 mm and 2.0 mm has succeeded in drastically reducing the number of cracks to an average of around 6.86% to 5.03% after 1200 TCT cycles. In terms of the type of solder paste used, it was found that SAC-In alloy showed the lowest crack severity after 1200 TCT cycles of 8.58% followed by SAC-Sb of 11.83% and 17.01% with SAC. This study shows that crack severity analysis can be used to represent the reliability of solder joints for mirrored BGA components. Overall, this study concludes that the application of SAC-In and optimal PCB thickness (especially above 1.6 mm) offers a practical solution to extend the lifespan of high-density electronic assemblies, while providing new insights into the failure mechanisms of reflected BGAs.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	x
SENARAI ILUSTRASI	xii
SENARAI SINGKATAN	xvi
BAB I PENGENALAN	
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Permasalahan Kajian	2
1.3 Objektif Kajian	3
1.4 Hipotesis Kajian	4
1.5 Skop Kajian	4
1.6 Sumbangan Kajian	5
BAB II KAJIAN LITERATUR	
2.1 Pendahuluan	6
2.2 Teknologi Pempakejan Tatasusunan Grid Bebola dan Konfigurasi Tercermin	7
2.2.1 Evolusi teknologi lekapan permukaan dan pempakejan tatasusunan grid bebola	7
2.2.2 Cabaran konfigurasi tatasusunan grid bebola tercermin	8
2.3 Papan Litar Bercetak	10
2.3.1 Komposisi bahan dan sifat termomekanik FR-4	10
2.3.2 Ketegaran melawan lenturan dinamik	11
2.3.3 Kesan pendedahan haba berulang	12
2.4 Mekanisme Kegagalan Termomekanik Sambungan Pateri Tatasusunan Grid Bebola	12
2.4.1 Ketidakpadanan pekali pengembangan terma	12
2.4.2 Kelesuan terma dan rayapan	13

	2.4.3	Klasifikasi Mod kegagalan sambungan pateri	13
2.5		Metalurgi Pes Pateri Aloji Tanpa Plumbum dan Peranan Unsur Minor	15
	2.5.1	Aloji SAC piawai (Sn-Ag-Cu) dan keterbatasannya	15
	2.5.2	Sebatian antara logam	15
	2.5.3	Peranan unsur minor antimoni dalam pes pateri SAC	16
	2.5.4	Peranan unsur minor indium dalam pes pateri SAC	16
2.6		Teknologi Lekapan Permukaan	17
	2.6.1	Evolusi dan kekangan proses teknologi lekapan permukaan	17
	2.6.2	Percetakan stensil dan analisis isipadu pes pateri	17
	2.6.3	Proses peletakan komponen	18
	2.6.4	Profil terma aliran semula	18
	2.6.5	Kesan pemasangan dwi-sisi	19
	2.6.6	Adaptasi profil terma terhadap modifikasi aloji pateri	19
2.7		Kaedah Penilaian Kebolehharian dan Analisis Kegagalan	20
	2.7.1	Ujian kitaran terma	20
	2.7.2	Pemeriksaan sinar-X	21
	2.7.3	Celupan dan tarik dan keratan rentas	21
2.8		Rumusan Kajian Literatur	22
2.9		Jurang Kajian dan Keaslian Kajian	25
BAB III		METODOLOGI	
3.1		Pendahuluan	26
3.2		Pelan Jadual Eksperimen	28
3.3		Proses Pemasangan	31
	3.3.1	Penyediaan bahan	31
	3.3.2	Peralatan dan skematik aliran kerja	37
	3.3.3	Proses penyambungan pateri menggunakan kaedah teknologi lekapan permukaan	41
3.4		Ujian Kitaran Terma	43
3.5		Pencirian dan Analisis Sambungan Pateri	44
	3.5.1	Ujian sinar-X	44
	3.5.2	Celupan dan tarik	45
	3.5.3	Penyediaan keratan rentas	46
	3.5.4	Pemeriksaan sambungan pateri menggunakan mikroskop optik	49

3.5.5	Prosedur pemilihan sampel dan pengkuatifikasikan data	49
-------	---	----

BAB IV

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pendahuluan	54
4.2	Pemasangan Komponen Tatasusunan Grid Bebola Pada Papan Litar Bercetak	54
4.3	Analisis Pengimejan Sambungan Pateri Menggunakan Sinar-X	67
4.4	Analisis Penusukan Celupan Pada Sambungan Pateri Menggunakan Ujian Celupan dan Tarik	69
4.5	Analisis Tahap Keparahan Retakan Sambungan Pateri	72
4.6	Analisis Kuantitatif dan Keparahan Retak Sambungan Pateri Selepas Ujian Kitaran Terma Bagi Ujikaji Perbezaan Ketebalan Papan Litar Bercetak	75
4.6.1	Analisis kesan ujian kitaran terma terhadap sambungan pateri retak berdasarkan ketebalan papan litar bercetak	76
4.6.2	Analisis kesan sisi permukaan papan litar bercetak terhadap sambungan pateri retak berdasarkan ketebalan papan litar bercetak	80
4.6.3	Analisis kesan lokasi bebola terhadap sambungan pateri retak berdasarkan ketebalan papan litar bercetak	83
4.6.4	Analisis kumulatif retakan berdasarkan ketebalan papan litar bercetak	86
4.7	Analisis Kesan Penambahan Unsur Minor Dalam SAC Terhadap Sambungan Pateri	89
4.7.1	Analisis kesan ujian kitaran terma terhadap sambungan pateri retak berdasarkan jenis komposisi pateri	90
4.7.2	Analisis kesan sisi permukaan papan litar bercetak terhadap sambungan pateri retak berdasarkan jenis komposisi pes pateri	94
4.7.3	Analisis kumulatif retakan berdasarkan jenis komposisi pes pateri	98
4.8	Analisis Kuantitatif dan Keparahan Retak Sambungan Pateri Selepas Ujian Kitaran Terma Bagi Ujikaji Perbezaan Pes Pateri	101
4.9	Sintesis Mekanisme Kegagalan Termomekanik	107

BAB V

KESIMPULAN DAN CADANGAN

5.1	Kesimpulan	113
-----	------------	-----

5.2	Cadangan	114
RUJUKAN		116
Lampiran A	Senarai Penerbitan	126
Lampiran B	Senarai Terminologi	127



SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Rumusan Kajian Literatur	23
Jadual 3.1	Pelan jadual eksperimen bagi penggunaan ketebalan papan litar bercetak berbeza	30
Jadual 3.2	Pelan jadual eksperimen bagi penggunaan pes pateri berbeza	31
Jadual 3.3	Komposisi pes pateri	35
Jadual 4.1	Suhu zon-zon bagi proses pematerian aliran semula untuk komponen tatasusunan grid bebola bahagian bawah pada papan litar bercetak untuk papan litar bercetak berketebalan berbeza	56
Jadual 4.2	Suhu zon-zon bagi proses pematerian aliran semula untuk komponen tatasusunan grid bebola bahagian atas pada papan litar bercetak untuk papan litar bercetak berketebalan berbeza	56
Jadual 4.3	Suhu zon-zon bagi proses pematerian aliran semula untuk pemasangan komponen tatasusunan grid bebola bahagian bawah bagi pes pateri SAC & SAC-Sb	58
Jadual 4.4	Suhu zon-zon bagi proses pematerian aliran semula untuk pemasangan komponen tatasusunan grid bebola bahagian atas bagi pes pateri SAC & SAC-Sb	58
Jadual 4.5	Suhu zon-zon bagi proses pematerian aliran semula untuk pemasangan komponen tatasusunan grid bebola bahagian bawah bagi pes pateri SAC-In	59
Jadual 4.6	Suhu zon-zon bagi proses pematerian aliran semula untuk pemasangan komponen tatasusunan grid bebola bahagian atas bagi pes pateri SAC-In	60
Jadual 4.7	Imej bahagian papan litar bercetak dan komponen tatasusunan grid bebola, tahap penusukan celupan dari Tahap 1 hingga Tahap 4, jenis Mod kegagalan sambungan pateri dan lokasi sambungan bebola pateri yang terlibat bagi ujian perbezaan ketebalan papan litar bercetak selepas 1200 kitaran	74
Jadual 4.8	Imej bahagian papan litar bercetak dan komponen tatasusunan grid bebola, tahap penusukan celupan dari Tahap 1 hingga Tahap 4, jenis Mod kegagalan sambungan pateri dan lokasi sambungan bebola pateri yang terlibat bagi ujian perbezaan pes pateri selepas 1200 kitaran	110

Jadual 4.8	Ringkasan perbandingan keputusan kajian ini dan dapatan kajian lepas	66
------------	--	----



SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	(a) Contoh komponen pakej rata empat sisi (QFP), (b) contoh komponen litar bersepadu bersaiz kecil (SOIC)	7
Rajah 2.2	Ilustrasi tatasusunan grid bebola tercermin yang dipasang pada papan litar bercetak	8
Rajah 2.3	Ilustrasi komponen tatasusunan grid bebola yang dipasang pada papan litar bercetak dan mempunyai lapisan sebatian antara logam	9
Rajah 3.1	Carta aliran kajian keboleharapan sambungan pateri bagi komponen tatasusunan grid bebola tercermin	28
Rajah 3.2	Papan litar bercetak yang digunakan pada ujian perbezaan ketebalan papan litar bercetak	32
Rajah 3.3	Papan litar bercetak yang digunakan pada ujian perbezaan pes pateri	33
Rajah 3.4	Komponen tatasusunan grid bebola yang digunakan pada ujian perbezaan ketebalan papan litar bercetak	36
Rajah 3.5	Komponen tatasusunan grid bebola yang digunakan pada ujian perbezaan pes pateri	37
Rajah 3.6	Skematik aliran kerja	38
Rajah 3.7	Palet yang digunakan sepanjang proses pemasangan menggunakan kaedah teknologi lekapan permukaan; (a) Palet untuk ujikaji ketebalan papan litar bercetak, (b) palet untuk ujikaji perbezaan pes pateri	39
Rajah 3.8	Contoh gambarajah stensil untuk proses teknologi lekapan permukaan	40
Rajah 3.9	Proses pemasangan komponen pada papan litar bercetak secara tercermin menggunakan kaedah teknologi lekapan permukaan	42
Rajah 3.10	Ilustrasi profil suhu yang digunakan pada proses kitaran aliran semula	43
Rajah 3.11	Profil suhu yang digunakan dalam ujian kitaran terma	44
Rajah 3.12	Alatan digunakan untuk memotong, mencuci dan merendam papan litar bercetak; (a) Laser mesin, (b) pembersih fluks, dan (c) bekas berserta perwarna untuk merendam sampel dan vakum	45

Rajah 3.13	Alatan digunakan untuk memotong, mencuci dan merendam papan litar bercetak; (a) Laser mesin, (b) resin dan pengeras dan (c) acuan pemegang	47
Rajah 3.14	(a) Mesin penggilap, (b) contoh komponen selepas digilap	47
Rajah 3.15	Ilustrasi keratan rentas bagi ujikaji (a) perbezaan ketebalan papan litar bercetak, (b) perbezaan pes pateri	49
Rajah 3.16	Ilustrasi tahap keparahan retakan berdasarkan penembusan warna dari ujian celupan dan tarik; (a) Tahap 1 (0 ~ 25%), (b) Tahap 2 (25 ~ 50%), (c) Tahap 3 (51 – 75%), (d) Tahap 4 (76 – 100%)	51
Rajah 3.17	Pemetaan komponen; (a) Komponen pada ujian ketebalan papan litar bercetak, (b) komponen pada ujian pes pateri	52
Rajah 3.18	Mod kegagalan pada sambungan pateri: (a) Mod A, (b) Mod C, (c) Mod E	53
Rajah 4.1	Profil suhu pematerian aliran semula bagi; (a) Bahagian bawah pada PCB dan (b) bahagian atas bagi ujikaji papan litar bercetak berketebalan berbeza	57
Rajah 4.2	Profil suhu pematerian aliran semula bagi; (a) Bahagian bawah dan (b) pematerian bahagian atas bagi ujikaji pes pateri berbeza - SAC & SAC-Sb	59
Rajah 4.3	Profil suhu pematerian aliran semula bagi; (a) Bahagian bawah dan (b) pematerian bahagian atas bagi ujikaji pes pateri berbeza – SAC-In	60
Rajah 4.4	Gambar komponen dan sinar-X bagi ujian ketebalan papan litar bercetak: (a) 1.2 mm, (b) 1.6 mm, (c) 2.0 mm; (i) permukaan atas, (ii) permukaan bawah, (iii) sinar-X komponen atas dan bawah yang telah disengetkan.	62
Rajah 4.5	Keratan rentas sambungan komponen tatasusunan grid bebola pada papan litar bercetak selepas proses pemasangan secara tercemin (T0) dengan ketebalan; (a) 1.2 mm (14 lapis), (b) 1.6 mm (16 lapis) dan (c) 2.0 mm (18 lapis)	64
Rajah 4.6	Gambar komponen dan sinar-X bagi ujian perbezaan pes pateri: (a) SAC, (b) SAC-Sb, (c) SAC-In; (i) permukaan atas PCB, (ii) permukaan bawah PCB. (iii) sinar-X komponen atas dan bawah yang telah disengetkan.	65
Rajah 4.7	Keratan rentas sambungan komponen tatasusunan grid bebola pada papan litar bercetak menggunakan pes pateri: (a) SAC, (b) SAC-Sb dan (c) SAC-In sebelum ujian kitaran terma	67

Rajah 4.8	Imej sinar-X bagi komponen tatasusunan grid bebola tercermin (komponen atas U59 dan komponen bawah U61) yang disengetkan bagi ketebalan PCB: (a) 1.2 mm, (b) 1.6mm dan (c) 2.0 mm selepas didedahkan pada 1200 kitaran	68
Rajah 4.9	Imej sinar-X bagi komponen BGA tercermin (komponen atas U106 dan komponen bawah U206) yang disengetkan bagi: (a) pes pateri SAC, (b) pes pateri SAC-Sb dan (c) pes pateri SAC-In selepas didedahkan pada 1200 kitaran	69
Rajah 4.10	Graf bar ujian kitaran terma melawan jumlah bebola pateri retak mengikut ketebalan papan litar bercetak	78
Rajah 4.11	Graf bar ujian kitaran terma melawan purata tahap retakan bebola pateri mengikut ketebalan papan litar bercetak	80
Rajah 4.12	Graf bar permukaan diletakkan komponen melawan jumlah bebola pateri retak mengikut ketebalan papan litar bercetak	82
Rajah 4.13	Graf bar permukaan diletakkan komponen melawan purata tahap retakan bebola pateri mengikut ketebalan papan litar bercetak	83
Rajah 4.14	Graf bar barisan melawan jumlah bebola pateri retak mengikut ketebalan papan litar bercetak	85
Rajah 4.15	Graf bar barisan melawan purata tahap bebola pateri retak mengikut ketebalan papan litar bercetak	86
Rajah 4.16	Graf bar kumulatif retakan melawan jumlah bebola pateri retak mengikut ketebalan papan litar bercetak	88
Rajah 4.17	Graf bar kumulatif retakan melawan purata tahap bebola pateri retak mengikut ketebalan papan litar bercetak	89
Rajah 4.18	Graf bar ujian kitaran terma melawan jumlah bebola pateri retak mengikut jenis komposisi pateri	92
Rajah 4.19	Graf bar ujian kitaran terma melawan purata tahap retakan bebola pateri mengikut jenis komposisi pateri	94
Rajah 4.20	Graf bar permukaan diletakkan komponen melawan jumlah bebola pateri retak mengikut jenis komposisi pateri	96
Rajah 4.21	Graf bar permukaan diletakkan komponen melawan purata tahap retakan bebola pateri mengikut jenis komposisi pateri	97
Rajah 4.22	Graf bar kumulatif retakan melawan jumlah bebola pateri retak mengikut ketebalan PCB	99

Rajah 4.23	Graf bar kumulatif retakan melawan purata tahap bebola pateri retak mengikut jenis komposisi pateri	100
Rajah 4.24	Graf bar ketinggian bebola 0 kitaran dan 1200 kitaran mengikut jenis pes pateri	102
Rajah 4.25	Keratan rentas bebola pateri bagi setiap bahan pada pin pertama setiap komponen di permukaan atas selepas kitaran terma 1200 kitaran - SAC	103
Rajah 4.26	Keratan rentas bebola pateri bagi setiap bahan pada pin pertama setiap komponen di permukaan atas selepas kitaran terma 1200 kitaran – SAC-Sb	104
Rajah 4.27	Keratan rentas bebola pateri bagi setiap bahan pada pin pertama setiap komponen di permukaan atas selepas kitaran terma 1200 kitaran – SAC-In	106



SENARAI SINGKATAN

Ag	perak
AOI	Pemeriksaan optik automatik
Au	emas
BGA	tatasusunan grid bebola
Bi	bismuth
CDA	udara kering bersih
CDM	bahan delmat komposit
Cu	kuprum
CTE	pekali pengembangan terma
DfR	reka bentuk untuk kebolehhidupan
DnP	celupan dan tarik
FEA	simulasi unsur terhingga
FR-4	kalis api 4
Ge	germanium
IC	litar bersepadu
ID	indentifikasi
IMC	sebatian antara logam
In	indium
I/O	masuk/ keluar
IPC	institut bagi saling sambung dan pembungkusan litar elektronik
Ni	nikel
PCB	papan litar bercetak
QFP	pakej rata empat sisi
RoHS	sekatan bahan berbahaya

Sb	antimoni
SEM	mikroskop elektron imbasan
SiP	sistem dalam pakej
SMT	teknologi lekapan permukaan
Sn	timah
SNIA	persatuan industri rangkaian storan
SOIC	litar bersepadu bersaiz kecil
SPI	pemeriksaan pes pateri
SSD	pemacu keadaan pepejal
OSP	pengawet kebolehpaterian organik
TAL	masa di atas takat cecair
TC	pengganding suhu
TCT	ujian kitaran terma
Tg	suhu peralihan kaca
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia
2D	dua dimensi
3D	tiga dimensi

BAB I

PENGENALAN

1.1 PENDAHULUAN

Dalam era pengecilan saiz peranti elektronik berprestasi tinggi, teknologi pempakejan tatasusunan grid bebola (BGA) tercermin telah menjadi salah satu jalan penyelesaian untuk mengoptimumkan ruang pada papan litar bercetak (PCB) bagi memenuhi keperluan komponen berketumpatan tinggi tanpa mengorbankan kecekapan sistem (Deng et al. 2022). Konfigurasi pemasangan komponen pada kedua-dua sisi secara tercermin ini membolehkan pemendekan laluan isyarat elektrik dan meningkatkan ketumpatan komponen (Lin et al. 2024). Walau bagaimanapun, reka bentuk ini mendedahkan peranti kepada cabaran termomekanikal yang ekstrem semasa operasi, di mana ketidakpadanan pekali pengembangan terma (CTE) antara komponen dan substrat menghasilkan tegasan ricih yang menyebabkan PCB melentur secara dinamik (Hissam 2023). Penggunaan aloi pateri bebas plumbum komersial berasaskan timah-perak-kuprum (SAC) piawai didapati masih lemah dalam menyerap tenaga terikan akibat lenturan ini, lantas menyebabkan sambungan pateri terdedah kepada retakan.

Oleh hal yang demikian, kajian ini dilaksanakan sebagai motivasi untuk menyiasat secara empirikal interaksi antara modifikasi bahan pateri dan reka bentuk struktur iaitu ketebalan PCB bagi mengatasi isu kelemahan rintangan kelesuan tersebut. Secara spesifiknya, kajian ini menguji keberkesanan pengaloiian unsur minor, iaitu indium (In) dan antimoni (Sb) secara berasingan ke dalam pes pateri SAC, serta kesan variasi ketebalan PCB (1.2 mm, 1.6 mm, dan 2.0 mm) terhadap kebolehharian sambungan pateri BGA tercermin. Bagi mencapai matlamat tersebut, sampel pemasangan didedahkan kepada ujian kitaran terma (TCT) sehingga 1200 kitaran bagi mensimulasikan jangka hayat sambungan pateri yang mengalami kitaran suhu. Profil

perambatan retak dinilai secara kuantitatif melalui kaedah analisis keparahan celupan dan tarik (DnP), manakala evolusi struktur mikro dan peralihan mod kegagalan dianalisis menggunakan kaedah keratan rentas mikroskopik. Pendekatan metodologi bersepadu ini dilaksanakan bagi menjawab secara langsung objektif kajian, iaitu untuk menentukan konfigurasi gabungan ketebalan papan dan komposisi aloi yang paling optimum dalam memanjangkan jangka hayat kebolehharian modul elektronik berketumpatan tinggi.

1.2 PERMASALAHAN KAJIAN

Penempatan komponen BGA secara tercermin menimbulkan isu kebolehharian yang lebih kritikal berbanding konfigurasi satu sisi. Kajian Sun et al. (2024) melaporkan bahawa konfigurasi dwi-sisi menyebabkan kekangan mekanik yang lebih tinggi, lalu meningkatkan risiko kegagalan sambungan pateri. Perubahan suhu berulang mewujudkan persekitaran kitaran terma. Disebabkan perbezaan pekali pengembangan terma antara komponen BGA dan PCB, tegasan termomekanik yang tinggi tertumpu pada sambungan pateri. Konfigurasi tercermin memburukkan lagi keadaan kerana ia mewujudkan tindanan tegasan pada kedua-dua sisi PCB.

Ketebalan PCB memainkan peranan kritikal dalam menangani agihan tegasan ini. Menurut Doranga et al. (2022), PCB yang lebih tebal meningkatkan ketegaran keseluruhan yang secara langsung mengurangkan risiko keretakan pateri kerana mempunyai tahap lenturan papan yang rendah. Selain faktor fizikal, proses pemasangan melalui teknologi lekapan permukaan (SMT) yang melibatkan pamerian aliran semula secara berulang turut menjejaskan integriti sambungan pateri serta peningkatan ketebalan lapisan sebatian antara logam (IMC) (Harisham et al. 2025).

Walaupun pes pateri berasaskan SAC lazim digunakan, ia menghadapi cabaran besar dalam mengekalkan kebolehharian bagi konfigurasi tercermin. Penambahan unsur minor seperti Sb dan In telah dibuktikan oleh Chantaramanee et al. (2017) mampu memperbaiki sifat mekanik pateri pukal. Namun, pengaruh spesifiknya terhadap aloi SAC dalam aplikasi BGA tercermin masih belum difahami sepenuhnya. Maka, kajian ini dijalankan bagi memahami bagaimana interaksi antara variasi ketebalan PCB serta

penggunaan mikro-aloi SAC-In dan SAC-Sb dapat menjamin kebolehharapan sambungan pateri dalam mendepani cabaran kekangan ruang dan kitaran suhu.

1.3 OBJEKTIF KAJIAN

Bagi menjawab permasalahan kajian yang telah dinyatakan, kajian ini digariskan untuk mencapai objektif-objektif berikut:

1. Mengkaji kesan ketebalan PCB terhadap kebolehharapan sambungan pateri bagi pakej BGA tercermin di bawah kitaran terma.
2. Menganalisis pengaruh penambahan unsur minor Sb dan In dalam pes pateri SAC terhadap kebolehharapan sambungan pateri komponen BGA tercermin.
3. Mendapatkan peratus keparahan retakan sambungan pateri pakej BGA tercermin melalui ujian kebolehharapan.

Secara keseluruhannya, kajian ini menggunakan aliran metodologi yang seragam bagi menjawab ketiga-tiga objektif yang telah digariskan. Proses eksperimen bermula dengan dedahan sampel kepada TCT untuk simulasi kebolehharapan sambungan pateri, diikuti dengan ujian DnP bagi mendedahkan lokasi retakan pada sambungan pateri.

Perbezaan fokus bagi setiap objektif terletak pada parameter yang dinilai. Objektif pertama menganalisis kesan ketebalan PCB (1.2 mm, 1.6 mm, dan 2.0 mm), manakala objektif kedua menilai pengaruh jenis pes pateri (SAC, SAC-In, dan SAC-Sb) terhadap integriti sambungan tersebut. Seterusnya, objektif ketiga memperincikan kaedah penilaian data dengan beralih daripada sekadar pengiraan bilangan retak kepada pengukuran peratusan keparahan retakan bagi mendapatkan analisis kegagalan yang lebih kuantitatif dan mendalam.

1.4 HIPOTESIS KAJIAN

Peningkatan ketebalan PCB akan meningkatkan ketegaran struktur berserta mengurangkan tahap lenturan PCB semasa ujian kitaran termal. Hal ini secara langsung akan mengurangkan tegasan yang terhasil dan meminimumkan risiko keretakan dan meningkatkan kebolehharapan sambungan pateri bagi pakej BGA tercermin.

Penambahan unsur minor Sb dan In ke dalam pes pateri SAC berupaya mengubah struktur mikro dan merencatkan pertumbuhan berlebihan pada IMC. Modifikasi metalurgi ini dijangka akan menyerap tenaga terikan dengan lebih berkesan, lalu meningkatkan kebolehharapan sambungan pateri komponen BGA tercermin.

Tahap keparahan retakan mempunyai hubungan yang berkadar songsang dengan prestasi jangka hayat komponen. Kadar perambatan retakan yang perlahan dijangka akan menyumbang kepada kebolehharapan yang lebih tinggi, sekaligus memanjangkan jangka hayat sambungan pateri pakej BGA tercermin di bawah pembebanan kitaran termal.

1.5 SKOP KAJIAN

Skop kajian ini memfokuskan kepada penyelidikan berkaitan kebolehharapan sambungan pateri bagi konfigurasi komponen BGA tercermin yang merupakan salah satu cara dalam industri pempakejan elektronik bagi mencapai pengecilan dan ketumpatan komponen yang tinggi. Penyelidikan ini menggunakan pengaruh faktor fizikal dengan membandingkan tiga variasi ketebalan PCB, iaitu 1.2 mm (nipis), 1.6 mm (sederhana) dan 2.0 mm (tebal) untuk terhadap kebolehharapan sambungan pateri BGA tercermin. Kajian ini juga menilai keberkesanan pes pateri bebas plumbum berasaskan SAC piawai serta SAC yang ditambahkan dengan unsur minor Sb dan In terhadap integriti sambungan pateri BGA tercermin.

Bagi mewakili keadaan operasi sebenar produk elektronik, peranti storan dalam rak pelayan yang mengalami kitaran suhu semasa beroperasi dan ditutup, TCT dengan julat operasi antara -40°C hingga 85°C digunakan. Prestasi kebolehharapan sambungan pateri pula dinilai melalui analisis retakan menggunakan kaedah DnP. Selain itu, kajian

ini juga digunakan untuk melihat kesesuai penggunaan analisis keparahan retakan bagi menilai prestasi kebolehharian sambungan pateri bagi membolehkan tahap kegagalan diklasifikasikan secara lebih komprehensif berbanding kaedah pengiraan bilangan retak konvensional.

1.6 SUMBANGAN KAJIAN

Hasil dapatan daripada penyelidikan ini diharapkan memberi sumbangan kepada bidang pempakejan elektronik melalui aspek-aspek berikut:

1. Sumbangan kepada industri elektronik dalam usaha menyokong teknologi 5G dan automotif elektrik yang memerlukan sambungan pateri yang mempunyai kebolehharian tinggi. Kajian ini menyediakan data empirikal mengenai prestasi konfigurasi BGA tercemin, membolehkan pengeluar mengurangkan risiko kegagalan dalam peranti elektronik.
2. Panduan mengoptimumkan reka bentuk peranti dengan memahami hubungan antara ketebalan PCB dan kegagalan pateri yang membolehkan jurutera memilih spesifikasi bahan yang lebih tepat.
3. Alternatif bahan pateri berprestasi tinggi dengan menggunakan aloi pateri SAC yang ditambah dengan unsur seperti Sb dan In. Dapatan ini turut memperkayakan kajian sains bahan mengenai kesan penambahan unsur minor, khususnya untuk aplikasi peranti elektronik berprestasi tinggi.

RUJUKAN

- Anthati, S.G., Wiss, E. & Wiese, S. 2024. Bending Experiments on QFN Components. *2024 25th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*.
- Abueed, M., Athamneh, R.A., Tanash, M. & Hamasha, S. 2022. The Reliability of SAC305 Individual Solder Joints during Creep–Fatigue Conditions at Room Temperature. *Crystals* 12(9): 1306.
- Almaetah, Y., Santos, D., Patel, D., Scheid, J., Huang, Y., Pantone, M., & Shindadkar, S., 2025. The Effects of Temperature and Relative Humidity on Intermetallic Compound Layer Growth: Implications for Solder Joint Reliability. 2025 Pan Pacific Strategic Electronics Symposium (Pan Pacific), hlm. 1-9.
- Aravamudhan, S., Combs, C., Prasad, A., & Abraham, A., 2016. Multi-Faceted Approach to Minimize Printed Circuit Board Warpage In Board Assembly Process.
- Bakar, A., Suhaimi, M., Jalar, A., Ismail, A., Ilias, M., Ramli, M., Ani, C., & Atiqah, A., 2025. Stereometric Analysis of Underfilled Micro Ball Grid Array Solder Joints Under Thermal Cycling Conditions. *Jurnal Kejuruteraan*.
- 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.
- Busek, D., Dusek, K. & Renza, O. 2017. Study of temperature profile influence on intermetallic growth. 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), hlm. 1–4. IEEE: Sofia, Bulgaria.
- Capela, P.A., Souza, M.S., Costa, S., Teixeira, J.C., Fernandes, M., Figueiredo, H., Delgado, I. & Soares, D. 2022. Effect of the IMC layer geometry on a solder joint thermomechanical behavior. *Soldering and Surface Mount Technology* 35(2): 70–77.
- Chantaramanee, S. & Sungkhaphaitoon, P. 2022. Combined effects of Bi and Sb elements on microstructure, thermal and mechanical properties of Sn-0.7Ag-0.5Cu solder alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 32(10): 3301–3311.
- Chantaramanee, S., Sungkhaphaitoon, P., & Plookphol, T., 2017. Influence of Indium and Antimony Additions on Mechanical Properties and Microstructure of Sn-3.0Ag-0.5Cu Lead Free Solder Alloys. *Solid State Phenomena*, 266, hlm. 196 - 200.

- Chaparala, S., Pitarresi, J.M., Parupalli, S., Mandepudi, S. & Meilunas, M. 2006. Experimental and numerical investigation of the reliability of double-sided area array assemblies. *Journal of Electronic Packaging* 128(4): 395–402.
- Chen, W.-H., Yu, C.-F., Cheng, H.-C., Tsai, Y. & Lu, S.-T. 2013. IMC growth reaction and its effects on solder joint thermal cycling reliability of 3D chip stacking packaging. *Microelectronics Reliability* 53(1): 30–40.
- Chen, C., Wang, C., Sun, H., Yin, H., Gao, X., Xue, H., Ni, D., Bian, K. & Gu, Q. 2022. Interfacial microstructure and mechanical reliability of SN-58BI/ENEPIG solder joints. *Processes* 10(2): 295.
- Chen, D.Y., Osterman, M., Handwerker, C. & Hamasha, S. 2024. Criteria for solder alloy adoption. *Journal of Surface Mount Technology* 37(1): 2–7.
- Chen, Z., Zhang, C. & Zheng, Z. 2024. Advancements in transfer printing techniques for flexible electronics: adjusting interfaces and promoting versatility. *International Journal of Extreme Manufacturing* 6(5): 052005.
- Choi, H., Illés, B. & Dušek, K. 2025. SN Whisker growth mitigation by modifying the composition of the solder alloys: A Brief review. *Materials* 18(5): 1130.
- Chung, S. & Kwak, J.B. 2015. Realistic warpage evaluation of printed board assembly during reflow process. *Soldering & Surface Mount Technology* 27(4): 137–145.
- Chung, S., Heo, G., Kwak, J., Oh, S., Lee, Y., Kang, C., & Lee, T., 2013. Development of PCB design guide and PCB deformation simulation tool for slim PCB quality and reliability. 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, hlm. 2157-2162.
- Coonrod, J., Blaskowski, L., Judin, V., Sprentall, K. & Kuszaj, M. 2025. High-performance PCB materials for next-generation electronics packages, driving signal integrity, power handling, and reliability. IMAPSource Proceedings.
- Coyle, R., Anselm, M., Feng, C. & Popowich, R. 2024. The Effect of Extended Dwell Time on Thermal Cycling Performance of Hybrid Low Temperature Solder Joints. 2024 IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC): 1452–1459.
- Dayang Izzah Nabilah Awang Azman, Saliza Azlina Osman, Pavithiran Narayanan, & Yuji Kozutsumi. 2024. The Effect of Isothermal Aging on the Intermetallic Growth between SN100C Lead-Free Solders and ENIG Surface Finish. *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering* 17(1): 69–75.
- Deng, S., Bhatnagar, S. & He, S. 2022. Development and applications of embedded passives and interconnects employing nanomaterials. *Nanomaterials* 12(19): 3284.
- Depiver, J., Mallik, S. & Harmanto, D. 2020. Solder joint failures under thermo-mechanical loading conditions – a review. *Advances in Materials and Processing Technologies* 7(1): 1–26.

- Depiver, J.A., Mallik, S. & Amalu, E.H. 2024. Impact of Thermomechanical Fatigue and Creep on the Reliability of BGA Lead-Free Solder Joints in Electronic Modules. *2024 IEEE 40th International Electronics Manufacturing Technology (IEMT)*: 1–7.
- Doranga, S., Schuldt, M. & Khanal, M. 2022. Effect of Stiffening the Printed Circuit Board in the Fatigue Life of the Solder Joint. *Materials* 15(18): 6208.
- Drummer, J., Gibhardt, D., Körbelin, J. & Fiedler, B. 2022. General influence of the environmental temperature on the matrix strength under tensile and compressive loading - A comprehensive study on high performance matrices. *Composites Science and Technology* 230: 109486.
- Fan, Y., Zhang, K., Chen, W., Wu, J. & Wang, Y. 2024. Thermomigration microstructure and properties of NI Nanoparticle-Reinforced SN58BI Composite Solder/CU Solder Joint. *Metals* 14(12): 1420.
- Fu, X., Chen, K., Zhang, Q., Chen, N., Wang, M. & Hua, X. 2023. Interfacial intermetallic compound layer in friction stir welded Mg/Al joints: Relationship between thickness and the welding temperature history. *Journal of Magnesium and Alloys* 13(6): 2540–2553.
- Gao, Y., Bian, X., Qiu, X., Jia, Y., Yi, J. & Wang, G. 2023. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of SAC105 Solders with Sb, In, Ni, and Bi Additions. *Materials* 16(11): 4059.
- Ghosh, R., Kanjilal, A. & Kumar, P. 2017. Effect of type of thermo-mechanical excursion on growth of interfacial intermetallic compounds in Cu/Sn-Ag-Cu solder joints. *Microelectronics Reliability* 74: 44–51.
- Go, H., Noh, T., Jung, S.-B. & Sohn, Y. 2024. Microstructural Optimization of Sn-58Bi Low-Temperature Solder Fabricated by Intense Pulsed Light (IPL) Irradiation. *Crystals* 14(5): 465.
- Griffith, E., Rowland, C., Sbiroli, D. & Sjoberg, J. 2023. Innovations in Soldering Materials and Optimization of Solder Paste Printing and Inspection Parameters for System-in-Package Assembly. *IMAPSource Proceedings 2022(IMAPS Symposium)*.
- Guangji, L., 2007. Effect of Dopant on Microstructure and Mechanical Properties of Pb-Free Solder Joints., hlm. 1-5.
- Guyenot, M., Maas, D., Ratchev, R., Khoshamouz, A., Gottwald, T. & Kreuer, S. 2018. New Failure Mechanism in High Temperature Resin Materials. 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), hlm. 1238–1244. IEEE: San Diego, CA.
- Ha, J., Lai, Y., Yang, J., Yin, P. & Park, S. 2024. Effect of Differently Shaped Solder Joints of Chip Resistor on Fatigue Life. *Journal of Electronic Packaging* 146(2): 021002.

- Hagberg, J., Putaala, J., Raumanni, J., Salmela, O. & Galkin, T. 2017. BGA interconnection reliability in mirrored module configurations. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 7: 1634–1643.
- Harisham, I.S.I., Johari, I.N.S., Ourdjini, A. & Osman, S.A. 2025. Effects of multiple microwave soldering cycles on corrosion behavior and conductivity of lead-free solder joints. *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering* 33(1): 22–32.
- Hillman, D., Pearson, T. & Coyle, R. 2024. Intermetallic Compounds in Solder Alloys: Common Misconceptions. *Journal of Surface Mount Technology* 37(2): 19–33.
- Hissam, M.I.B. 2023. Case study on thermal cycling analysis for different solder joint. *Advanced and Sustainable Technologies* 2(1).
- Huang, L., Zhu, Z., Wu, H. & Long, X. 2022. Effect of high-frequency PCB laminate on thermal cycling behavior of electronic packaging structures. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 18(1): 111–128.
- Idris, S.R.A. & Jaya, N.T. 2025. Exploring the barrier function of nickel in Lead-Free solder joints: Thickness and aging effects on IMC formation. *Journal of Physics Conference Series* 2933(1): 012003.
- IPC. (2022), “IPC-9701B Thermal Cycling Test Method for Fatigue Life Characterization of Surface Mount Attachments”, hlm. 11-12.
- IPC. (2023), “IPC-A-610 Acceptability of Electronic Assemblies”, hlm. 87.
- IPC. (2025), “IPC-7530B Guidelines for Temperature Profiling for Mass Soldering Processes (Reflow and Wave)”, hlm 5-8.
- Ismail, N., Yusoff, W.Y.W., Amat, A., Manaf, N.A.A. & Ahmad, N. 2024. A review of extreme condition effects on solder joint reliability: Understanding failure mechanisms. *Defence Technology* 41: 134–158.
- Ismail, A.A., Abu Bakar, M., Ehsan, A.A., Jalar, A., Basiron, E. & Ani, F.C. 2022. Cardinal and Ordinal Directions Approach in Investigating Arrayed Solder Joints Crack Propagation of Ball Grid Array Semiconductor Packages. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 12(9): 1492–1501.
- Islam, M.N., Anwar, M.S., Islam, M.S., Arifuzzaman, M. & Bari, M.A.A. 2023. Bending analysis of glass fiber reinforced epoxy composites/copper-clad laminates for multi-layer printed circuit boards. *Hybrid Advances* 4: 100090.
- Jayaram, V., Gupte, O., Bhangaonkar, K. & Nair, C. 2023. A Review of Low-Temperature Solders in Microelectronics Packaging. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 13(4): 570–579.

- Kang, B.-H., Park, W., Park, K., Lee, H., Yoo, J., Park, N. & Jung, C. 2025. Transparent and Fine Film Stencils with Functional Coating for Advanced Surface Mount Technology. *Micromachines* 16(9): 969.
- Khaldarov, V., Zhang, A., Xie, D., Lee, J., Shi, X., Roucou, R., Doranga, S. & Shalumov, A. 2022. Solder joint fatigue studies subjected to board-level random vibration for automotive applications. *2022 IEEE 72nd Electronic Components*
- Kumar, P., Talenbanpour, B., Sahaym, U., Wen, C. H., & Dutta, I. 2012. Microstructural evolution and some unusual effects during thermo-mechanical Cycling of Sn-Ag-Cu alloys. 13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, San Diego, CA, USA, 2012, hlm. 880-887.
- Lall, P., Pandurangan, A.R.R. & Choudhury, P. 2023. Pad Cratering Evolution with Multiple-Reflows at Resin-Copper Interfaces Under Large Out-of-Plane Deformation. 2023 22nd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), hlm. 1–7. IEEE: Orlando, FL, USA.
- Lau Hong Ming, Sujan Debnath, Mahzan Johar, Siti Faizah Mad Asasaari, Mohd Al Fatihhi Szali Januddi, & Mohamad Shahrul Effendy Kosnan. 2022. Effect of Solder Ball Geometry on Solder Joint Reliability under Solder Reflow Cooling Process. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)* 18(08): 142–153.
- Lee, C., Tran, T., Mawer, A., Daves, G., Pang, X., & Yao, J., 2022. MaxQFP: A High Density QFP. 2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), hlm. 2174-2183.
- Lee, D.W., Mayberry, R., Mackie, A., Hable, B., Heller, D., Jarrett, B., Zhao, X. & Nash, T. 2022. Optimizing reflowed Solder TIM (STIMs) processes for emerging heterogeneous integrated packages. *2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*: 1228–1237.
- 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, M., Li, S., Zhang, Z., Su, C., Wong, B. & Hu, Y. 2025. Advancing thermal management technology for power semiconductors through materials and interface engineering. *Accounts of Materials Research* 6(5): 563–576.
- Li, S., Liu, H., Wang, Y., Yan, H., Liao, M. & Wang, F. 2025. Microstructure, interface and shear strength on Sn-based solder joints induced from the change on solder size. *Soldering and Surface Mount Technology* 38(1): 1–7.
- Libot, J.-B. & Milesi, P. 2025. A new efficient thermomechanical reliability model for Lead-Free solder joints. *Journal of Surface Mount Technology* 38(1): 14–25.

- Lim, J.H., Lee, D.H. & Lee, E.H. 2023. Numerical investigation of the evolving inelastic deformation path of a solder ball joint under various loading conditions. *Applied Sciences* 13(22): 12137.
- Lin, N.-C., Shih, H.-C., Tsai, C.-I., Kao, C.-L., Wang, C.-C. & Hung, C.P. 2025. High-Speed Ball Shear Mechanism on Ni-Au Substrate & Thermal Aging Effect. 2025 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), hlm. 245–246. IEEE: Nagano, Japan.
- Lin, T.C., Hsu, F.Y., Mak, W.K. & Wang, T.C. 2024. An effective netlist planning approach for double-sided signal routing. *Asia and South Pacific Design Automation Conference*: 310–315.
- Liu, S., Yan, Y., Zhou, Y., Han, B., Wang, B., Zhang, D., Xue, S., Wang, Z., Yu, K., Shi, Y. & Wang, C. 2022. Thermal Induced Interface Mechanical Response Analysis of SMT Lead-Free Solder Joint and Its Adaptive Optimization. *Micromachines* 13(6): 908.
- Lu, Y., Zheng, C., Huang, A., Lau, S., Ye, N. & Yang, B. 2024. Automatic Solder Joint Failure Mode Analysis Based on Dye & Pry Image Processing. 2024 IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), hlm. 1657–1661. IEEE: Denver, CO, USA.
- Luktuke, A., Singaravelu, A.S.S., Mannodi-Kanakkithodi, A. & Chawla, N. 2023. Influence of Indium addition on microstructural and mechanical behavior of Sn solder alloys: Experiments and first principles calculations. *Acta Materialia* 249: 118853.
- Marshall, M. 2025. Reducing Cost Through DFX: A Deep Dive into PCB Design and Fabrication Economics. *SMTA International* 27(1): 244–247.
- Miao, Y., Dong, T., Li, C., Yang, J., Lu, Q., Xu, Z., Zhang, X., Peng, J. & Yi, J. 2024. Effects of Sb on the properties and interfacial evolution of SAC305-2Bi-xSb/Cu solder joints. *Journal of Materials Research and Technology* 30: 9494–9502.
- Mondal, D., Wu, J., Fahim, A., Suhling, J.C. & Lall, P. 2021. Micromechanical Modeling of SAC305: Homogenization and Effect of IMC Particles on Deformation Behavior. 2021 20th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm), hlm. 960–967. IEEE: San Diego, CA, USA.
- Morris. 2004. Physical Basis for Mechanical Properties of Solders. 2004.. *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*, hlm. 228–255. Edisi ke-0. CRC Press.
- Munizaga, V. & Falk, M.L. 2024. The thermodynamic effects of solute on void nucleation in Mg alloys. *The Journal of Chemical Physics* 161(4): 044509.
- Nebo, S.E., Amalu, E.H. & Hughes, D.J. 2024. Critical solder joint in insulated gate bipolar transistors (IGBT) power module for improved mechanical reliability. *Microelectronic Engineering* 291: 112200.

- Oh, M., Tokunaga, N. & Kobayashi, E. 2024. Reactive diffusion at the interface between Cu and Sn–Ag alloys. *Journal of Materials Research and Technology* 30: 9531–9541.
- Paarmann, S., Schreiber, M., Chahbaz, A., Hildenbrand, F., Stahl, G., Rogge, M., Dechent, P., Queisser, O., Frankl, S.D., Morales Torricos, P., Lu, Y., Nikolov, N.I., Kateri, M., Sauer, D.U., Danzer, M.A., Wetzel, T., Endisch, C., Lienkamp, M., Jossen, A. & Lewerenz, M. 2024. Short - Term Tests, Long - Term Predictions - Accelerating Ageing Characterisation of Lithium - Ion Batteries. *Batteries & Supercaps* 7(11): e202300594.
- Pádua, G.F.R.C., Figueiredo, L.F.S., Rocha, G.S., Junior, J.S.M., Oliveira, J.S.D., Barboza, R.S., Kieling, A.C. & Macêdo Neto, J.C. 2025. Characterization and Failure Analysis of Solder Joints in Ball Grid Array (BGA) Components Using Cross-Section, Dye and Pry, and Microstructural Etching Techniques. *Materials Research* 28(suppl 1): e20250211.
- Pan, Y. & Yang, B. 2024. Comprehensive analysis of advancements and challenges in smartphone semiconductor technology. *Highlights in Science, Engineering and Technology* 87: 214–218.
- Prakoso, P.T., Bustanul Arifin, & Suryani ALifah. 2025. The Analisis Kinerja dan Akurasi Sensor Thermocouple Tipe K dalam Sistem Pengendalian Suhu Reflow Soldering. *Jurnal Teknik Informatika dan Teknologi Informasi* 5(2): 773–779.
- Qiu, B., Xiong, J., Wang, H., Zhou, S., Yang, X., Lin, Z., Liu, M. & Cai, N. 2022. Survey on fatigue life prediction of BGA solder joints. *Electronics* 11(4): 542.
- Ramli, M.I.I., Salleh, M.A.A.M., Abdullah, M.M.A.B., Zaimi, N.S.M., Sandu, A.V., Vizureanu, P., Rylski, A. & Amli, S.F.M. 2022. Formation and Growth of Intermetallic Compounds in Lead-Free Solder Joints: A Review. *Materials* 15(4): 1451.
- Razouki, S.S. & Kuttah, D. 2024. Improving Strength by Increased Compaction of Gypsum—Enriched Soil under Long-Term Soaking Conditions. *Geotechnics* 4(2): 415–429.
- Roucous, R., Rongen, R., Zaal, J., & Van Der Wel, P., 2018. Effect of PCB stack-up on Temperature Cycling Reliability of WLCSP. 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), hlm. 1-6.
- Santos, D.D., Talledo, J. & Santos, M.R. 2022. Package Failure Understanding Through Crack Propagation Analysis. 2022 IEEE 24th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), hlm. 816–820. IEEE: Singapore, Singapore.
- Schmid, M., Zippelius, A., Hanß, A., Böckhorst, S. & Elger, G. 2022. Investigations on High-Power LEDs and Solder Interconnects in Automotive Application: Part I—Initial Characterization. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 22(2): 175–186.

- Selver, E., Selver, A.D., La Rosa, A.D., Saifullah, A., Zhang, Z., Driver, S., Herring, J. & Dhakal, H.N. 2025. Recent developments in sustainable composites for printed circuit boards (PCBs): A review. *Macromolecular Materials and Engineering*: 202500311.
- Shanthi Bhavan, J., Pazhani, A., Amer, M., Patel, N. & Tg, U. 2024. Microstructural Evolution and Phase Transformation on Sn-Ag Solder Alloys under High - Temperature Conditions Focusing on Ag₃ Sn Phase. *Advanced Engineering Materials* 26(13): 2400660.
- Sharon, G. & Tulkoff, C. 2014. Temperature Cycling and Fatigue in Electronics. *SMTA International* 16(1): smKNFKY83870.
- Shen, B., Yang, S., Xu, M., Zhao, J., Liu, G., Xie, M. & Zhang, Q. 2022. Effect of in Addition on Thermodynamic Properties, Wettability, Interface Microstructure, and Soldering Performance of SnBiAg-xIn/Cu Solder Joints. *Metals* 12(10): 1594.
- Shen, Y.-A. & Wu, J.A. 2022. Effect of Sn Grain Orientation on Reliability Issues of Sn-Rich Solder Joints. *Materials* 15(14): 5086.
- Shen, Y.-A. 2024. Effect of indium addition on mechanical, thermal, and soldering properties of eutectic Sn-9Zn alloy. *Materials Chemistry and Physics* 315: 128992.
- SNIA. (2023), “SFF-TA-1008 Enterprise and Datacenter Standard Form Factor (E3)”, pp. 23.
- SNIA. (2025), “SFF-TA-1006 Enterprise and Datacenter 1U Short Device Form Factor (E1.S)”, pp. 13.
- SNIA. (2025A), “SFF-TA- 1007 Enterprise and Datacenter 1U Long Device Form Factor (E1.L)”, pp. 13.
- Su, P., Ahmed, O., Ahari, A., Hutchinson, L. & Glasauer, B. 2023. Reliability Challenges and Mitigation Measures of Small Body-Sized Components on Complex and High-Layer Count PCBs. 2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), hlm. 834–839. IEEE: Orlando, FL, USA.
- Sun, G., Jing, W., Lu, S., Peng, C., Zhu, W. & Wang, L. 2024. Failure Mechanism and reliability research of solder layer tilt in Double-Sided Cooling Power Modules. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology* 14(9): 1585–1592.
- Sukhanov M. A., Bakarov A. K., & Zhuravlev K.S. 2023. Oxide desorption process from InSb surface under Sb flux. *Semiconductors* 57(3): 140.
- Takyi, G. 2015. Optimisation of Reflow Profile of Surface Mount Assembly Using Taguchi Design of Experiments. *Science Research* 3(4): 150.

- Thakur, A., Jain, J. & Santra, S. 2024. Effect of individual and synergistic alloying of In and Ni on microstructure, phase stability and thermal properties of lead-free Sn-0.7Cu solder. *Philosophical Magazine* 104(24): 1207–1229.
- Valero, D., Belay, B.S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M.J. 2022. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226: 119078.
- Vellukunnel, M.T., Khanal, M. & Fan, X. 2023. Thermal Stresses in a Bi-Layer Assembly in Electronics Packaging. *2023 24th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*: 1–7.
- Vera Alvarado, J.W., Caballero García, L.F. & Taboada Neira, M. 2023. Capability of the Liquid Penetrant Method to Detect Defects in Welds. *Proceedings of the 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): “Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development,”* hlm. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.
- Wang, W., Wang, S., Sa, Z., Feng, J., Tian, R., Ding, Y. & Tian, Y. 2024. Size Effect of IMC Growth in Liquid-Solid Reflow Reaction at SAC305/Cu Interface. *2024 25th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, hlm. 1–5. IEEE: Tianjin, China.
- Wang, Y., He, J., Hu, P., Xiao, C. & Wang, X. 2024. Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Property of Nickel-Based Superalloy MAR-M247. *Materials* 17(5): 982.
- Wang, Y., Wang, X., Cai, S. & Gu, H. 2025. Characterization of indium doped Sn1Ag0.7Cu3Bi1.5Sb solder/solder joints. *Journal of Physics: Conference Series* 3113(1): 012021.
- Wong, E.H. 2005. Dynamics Of Board-Level Drop Impact. *Journal of Electronic Packaging* 127(3): 200–207.
- Wu, W., Yang, H., Li, Y., Fan, Z. & Li, J. 2023. Effect of IMC Thickness on the Mechanical Properties of Microbumps. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 13(2): 265–273.
- Xiao, J., Cheng, W. & Fu-Kang, Q. 2024. Interfacial reaction of Sn-1.5Ag-2.0Zn low-silver lead-free solder with oriented copper. *Heliyon* 10(5): e27010.
- Xiao, K., Li, Q. & Chen, Y. 2022. Automatic detection method for BGA defects based on x-ray imaging. *Applied Optics* 61(21): 6356.
- Xie, M., Chen, G., Yuan, X., Zhang, L. & Lin, Q. 2023. Study of the effect of crystal orientation on the mechanical response and fatigue life of solder joints under thermal cycling by crystal plasticity. *Journal of Materials Research and Technology* 27: 7195–7212.

- Yagnamurthy, V.N.C. & Nathi, V.K. 2025. Board level solder joint analysis of ball grid array package under drop test using finite element methods. *Matéria (Rio de Janeiro)* 30: e20240798.
- Yang, A., Xiao, K., Duan, Y.H., Li, C., Yi, J., Peng, M. & Shen, L. 2022. Effect of Indium on Microstructure, Mechanical Properties, Phase Stability and Atomic Diffusion of Sn-0.7Cu Solder: Experiments and First-Principles Calculations. *SSRN Electronic Journal*.
- Ye, D., Geyik, C.S., Qian, Z. & Aygün, K. 2023. Package technology enabling for 224 Gbps electrical signaling. *2023 IEEE 32nd Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*: 1–3.
- Yu, W., Che, F., Liu, V., Chen, R., Ireland, S., Ong, Y.C., Ng, H.W. & Kumar, G. 2025. An Overview of Substrate Copper Trace Crack Through Experiments, Characterization, and Numerical Simulations. *Micromachines* 16(4): 428.
- Zarmai, M.T. & Oduoza, C.F. 2020. Impact of inter-metallic compound thickness on thermo-mechanical reliability of solder joints in solar cell assembly. *Microelectronics Reliability* 114: 114008.
- Zhang, H., Richmond, T., Lytwynec, S., Harter, T. & Prado, D. 2023. A Drop-in High-Temperature Pb-Free Solder Paste that Outperforms High-Pb Pastes in Power Discrete Applications. *IMAPSource Proceedings 2022(IMAPS Symposium)*.
- Zhang, Z., Kim, J. & Won, D. 2025. Statistical-based simulation and reflow profile optimization for improving self-alignment performance – an experimental study. *Soldering & Surface Mount Technology* 37(4): 258–268.
- Zhao, X., Chang, J., Wu, X., Ye, Z.-T., Chen, W. & Xie, X. 2024. Effect of Sb Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Eutectic SnPb Solder. *Materials* 17(10): 2233.
- Zhao, X., Mitsugi, H., Shohji, I. & Kobayashi, T. 2021. Investigation of mechanical properties of high tg epoxy resin material. *Journal of Smart Processing* 10(6): 365–371.
- Zhou, D., Haseeb, A., & Andriyana, A., 2022. Mechanical Performance of Advanced Multicomponent Lead-Free Solder Alloy Under Thermal Aging. *SSRN Electronic Journal*.