

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Printed Circuit Board*

Papan sirkuit tercetak atau *printed circuit board* (PCB) merupakan elemen fundamental dalam sistem elektronik, berfungsi sebagai medium untuk menyediakan interkoneksi antara berbagai komponen elektronik serta memberikan dukungan struktural yang diperlukan untuk kelangsungan operasional perangkat tersebut (Sood & Pecht, 2011). Secara komposisional, PCB terdiri dari jalur konduktif yang menghubungkan komponen-komponen elektronik dan bahan isolasi, dengan bahan dasar yang umumnya terbuat dari prepreg termoseting yang memiliki sifat mekanik dan termal yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi elektronik (Wang, 1987). Seiring dengan perkembangan teknologi, PCB telah mengalami berbagai inovasi untuk mengakomodasi kebutuhan fungsionalitas yang semakin kompleks dan miniaturisasi perangkat elektronik. Papan multilayer, yang mengandung beberapa lapisan konduktif dan isolasi, kini menjadi lebih umum dalam industri, memberikan solusi untuk mendukung desain perangkat yang lebih canggih dan padat (Sood & Pecht, 2011; Wang, 1987). Proses fabrikasi PCB melibatkan serangkaian teknik dan bahan yang terintegrasi dengan ketat, dengan penekanan pada kontrol proses yang teliti dan inspeksi menyeluruh untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya kegagalan yang sering terjadi pada komponen tersebut (Sood & Pecht, 2011).

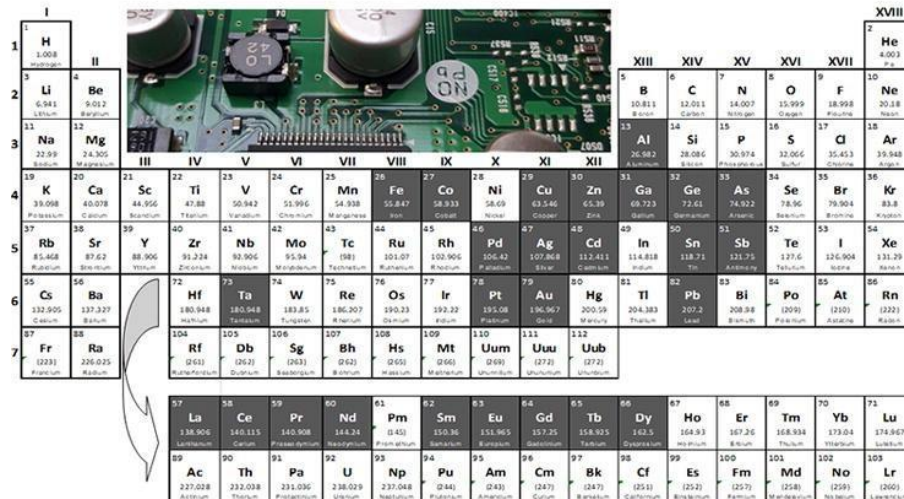


Gambar 2.1 *Printed circuit board* (Nguyen et al., 2025)

PCB umumnya terdiri dari kombinasi logam, keramik, dan polimer, dengan bahan dasar yang paling banyak digunakan adalah epoksi FR-4 yang diperkuat dengan *fiberglass*, yang dikenal karena sifat mekanik dan termalnya yang sesuai untuk aplikasi elektronik. Dalam upaya untuk meningkatkan kinerja dan memenuhi tuntutan teknologi yang semakin berkembang, para produsen sedang mengeksplorasi berbagai sistem resin dan bahan penguat alternatif, termasuk epoksi non-halogenasi, untuk menghasilkan PCB yang lebih ramah lingkungan atau dikenal dengan sebutan “*green PCB*” (Ehrler, 2002). Selain itu, bahan-bahan dengan kinerja tinggi, seperti polimida, bismaleimida triazin, ester sianat, dan polytetrafluoroethylene, mulai populer, khususnya dalam industri komputer, karena kemampuan material-material tersebut untuk mendukung perangkat dengan kinerja yang lebih baik dan miniaturisasi yang lebih tinggi (Hall & Williams, 2007). Salah satu komponen utama dalam pembuatan PCB adalah tembaga, yang memberikan kontribusi signifikan terhadap struktur konduktif papan tersebut (Yamane et al., 2011).

PCB mengandung berbagai elemen penting yang berperan dalam fungsionalitas dan struktur material tersebut. Elemen-elemen ini meliputi logam dasar seperti tembaga, aluminium, dan besi yang membentuk jalur konduktif dan komponen struktural PCB. Selain itu, PCB juga mengandung logam mulia seperti emas dan perak yang digunakan dalam sambungan dan konektor, serta elemen

tanah jarang (REE) seperti serium yang digunakan dalam beberapa komponen elektronik berperforma tinggi (Anshu Priya & Hait, 2018; Ichikawa et al., 2023). Pada **Gambar 2.2**, ditunjukkan unsur-unsur yang terkandung dalam PCB secara umum,



1	H	1.008	Hydrogen	18	Ar	39.948	Argon
2	He	4.003	Helium	19	K	39.098	Potassium
3	Li	6.941	Lithium	20	Ca	40.078	Calcium
4	Be	9.012	Beryllium	21	Sc	44.956	Scandium
5	B	10.811	Boron	22	Ti	47.88	Titanium
6	C	12.011	Carbon	23	V	50.942	Vanadium
7	N	14.007	Nitrogen	24	Cr	51.996	Chromium
8	O	15.999	Oxygen	25	Mn	54.938	Manganese
9	F	18.998	Fluorine	26	Fe	55.847	Iron
10	Ne	20.18	Neon	27	Co	58.933	Cobalt
11	Na	22.99	Sodium	28	Ni	58.69	Nickel
12	Mg	24.305	Magnesium	29	Cu	63.546	Copper
13	Al	26.982	Aluminum	30	Zn	65.39	Zinc
14	Si	28.086	Silicon	31	Ga	69.723	Gallium
15	P	30.974	Phosphorus	32	Ge	72.61	Germanium
16	S	32.06	Sulfur	33	As	74.922	Arsenic
17	Cl	35.453	Chlorine	34	Se	78.96	Selenium
18	Ar	39.948	Argon	35	Br	79.904	Bromine
19	K	39.098	Potassium	36	Kr	83.8	Krypton
20	Ca	40.078	Calcium	37	Rb	85.468	Rubidium
21	Sc	44.956	Scandium	38	Sr	87.62	Strontium
22	Ti	47.88	Titanium	39	Y	88.906	Yttrium
23	V	50.942	Vanadium	40	Zr	91.224	Zirconium
24	Cr	51.996	Chromium	41	Nb	92.906	Niobium
25	Mn	54.938	Manganese	42	Mo	95.94	Molybdenum
26	Fe	55.847	Iron	43	Tc	(98)	Technetium
27	Co	58.933	Cobalt	44	Ru	101.07	Ruthenium
28	Ni	58.69	Nickel	45	Rh	102.906	Rhodium
29	Cu	63.546	Copper	46	Pd	106.42	Palladium
30	Zn	65.39	Zinc	47	Ag	107.868	Silver
31	Ga	69.723	Gallium	48	Cd	112.411	Cadmium
32	Ge	72.61	Germanium	49	In	114.818	Indium
33	As	74.922	Arsenic	50	Sn	118.71	Tin
34	Se	78.96	Selenium	51	Sb	121.75	Antimony
35	Br	79.904	Bromine	52	Te	127.6	Tellurium
36	Kr	83.8	Krypton	53	I	126.904	Iodine
37	Rb	85.468	Rubidium	54	Xe	131.29	Xenon
38	Sr	87.62	Strontium	55	Cs	132.905	Cesium
39	Y	88.906	Yttrium	56	Ba	137.327	Barium
40	Zr	91.224	Zirconium	57	La	138.906	Lanthanum
41	Nb	92.906	Niobium	58	Ce	140.115	Cerium
42	Mo	95.94	Molybdenum	59	Pr	140.908	Praseodymium
43	Tc	(98)	Technetium	60	Nd	144.24	Neodymium
44	Ru	101.07	Ruthenium	61	Pm	(145)	Promethium
45	Rh	102.906	Rhodium	62	Sm	150.36	Samarium
46	Pd	106.42	Palladium	63	Eu	151.965	Europium
47	Ag	107.868	Silver	64	Gd	157.25	Gadolinium
48	Cd	112.411	Cadmium	65	Tb	158.925	Terbium
49	In	114.818	Indium	66	Dy	162.5	Dysprosium
50	Sn	118.71	Tin	67	Ho	164.93	Holmium
51	Sb	121.75	Antimony	68	Er	167.26	Erbium
52	Te	127.6	Tellurium	69	Tm	168.934	Thulium
53	I	126.904	Iodine	70	Yb	173.04	Ytterbium
54	Xe	131.29	Xenon	71	Lu	174.967	Lutetium
55	Cs	132.905	Cesium	72	Hf	178.49	Hafnium
56	Ba	137.327	Barium	73	Ta	180.948	Tantalum
57	La	138.906	Lanthanum	74	W	183.85	Tungsten
58	Ce	140.115	Cerium	75	Re	186.207	Rhenium
59	Pr	140.908	Praseodymium	76	Os	190.23	Osmium
60	Nd	144.24	Neodymium	77	Ir	192.22	Iridium
61	Pm	(145)	Promethium	78	Pt	195.08	Platinum
62	Sm	150.36	Samarium	79	Au	196.967	Gold
63	Eu	151.965	Europium	80	Hg	200.59	Mercury
64	Gd	157.25	Gadolinium	81	Tl	204.383	Thallium
65	Tb	158.925	Terbium	82	Pb	207.2	Lead
66	Dy	162.5	Dysprosium	83	Bi	208.98	Bismuth
67	Ho	164.93	Holmium	84	Po	(209)	Polonium
68	Er	167.26	Erbium	85	At	(210)	Astatine
69	Tm	168.934	Thulium	86	Rn	(222)	Radon
70	Yb	173.04	Ytterbium	87	Fr	(223)	Francium
71	Lu	174.967	Lutetium	88	Ra	226.025	Radium
72	Hf	178.49	Hafnium	89	Ac	(227)	Actinium
73	Ta	180.948	Tantalum	90	Th	232.038	Thorium
74	W	183.85	Tungsten	91	Pa	231.036	Protactinium
75	Re	186.207	Rhenium	92	U	238.029	Uranium
76	Os	190.23	Osmium	93	Np	237.048	Neptunium
77	Ir	192.22	Iridium	94	Pu	(244)	Plutonium
78	Pt	195.08	Platinum	95	Am	(243)	Americium
79	Au	196.967	Gold	96	Cm	(247)	Curium
80	Hg	200.59	Mercury	97	Bk	(247)	Berkelium
81	Tl	204.383	Thallium	98	Cf	(251)	Californium
82	Pb	207.2	Lead	99	Es	(252)	Einsteinium
83	Bi	208.98	Bismuth	100	Fm	(257)	Fermium
84	Po	(209)	Polonium	101	Md	(258)	Mendelevium
85	At	(210)	Astatine	102	No	(259)	Nobelium
86	Rn	(222)	Radon	103	Lr	(260)	Livermorium

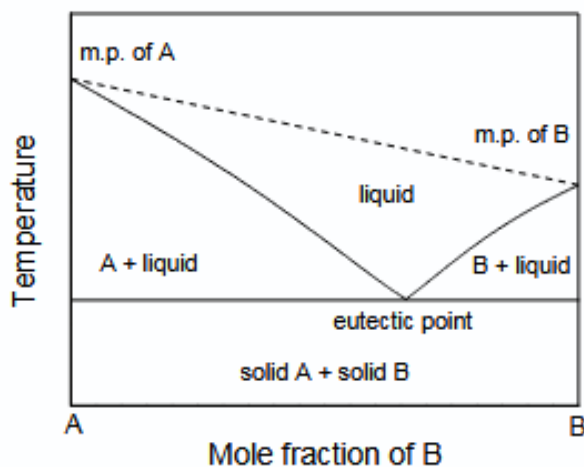
Gambar 2.2 Unsur-unsur yang secara umum terkandung dalam PCB (Korf et al., 2019).

Daur ulang logam memegang peranan yang sangat penting dalam pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan, mengingat logam merupakan sumber daya yang bernilai tinggi namun terbatas (Azizi, 2022). E-waste merupakan salah satu sumber utama logam-logam yang dapat dipulihkan, dengan logam mulia sebagai komponen yang mendorong potensi ekonomi dalam proses daur ulang ini (Cui & Zhang, 2008). Salah satu sumber limbah yang kaya akan logam berharga adalah PCB. Pada skala industri, ekstraksi logam dari PCB umumnya dilakukan dengan menggunakan metode pirometalurgi, meskipun metode ini memiliki sejumlah kekurangan, seperti proses yang kompleks dan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan, metode solvometalurgi dapat diterapkan, dengan menggunakan DES yang menawarkan solusi yang lebih efisien dan lebih ramah lingkungan dalam ekstraksi logam dari e-waste.

2.2 *Deep Eutectic Solvent (DES)*

Pelarut eutektik dalam (DES) atau *Deep Eutectic Solvent* pertama kali diperkenalkan pada tahun 2004 sebagai alternatif yang lebih fleksibel dan serbaguna dibandingkan dengan cairan ionik konvensional (ionic liquid, IL) yang telah digunakan sebelumnya (Abbott et al., 2004). Meskipun DES dan IL memiliki beberapa sifat yang serupa, keduanya termasuk dalam kategori pelarut yang berbeda, dengan DES terdiri dari dua atau lebih padatan yang membentuk campuran eutektik melalui ikatan hidrogen, sementara IL merupakan pasangan kation-anion yang membentuk struktur cairan pada suhu kamar (De Oliveira Vigier & Jérôme, 2019). DES menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan IL, di antaranya kemudahan dalam sintesis, biaya yang lebih rendah, serta dampak lingkungan yang lebih minimal, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan (Bajpai, 2021). Kedua jenis pelarut ini umumnya memiliki titik leleh yang rendah, volatilitas yang rendah, serta stabilitas termal yang tinggi, yang menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi industri, terutama dalam ekstraksi dan pemrosesan material (De Oliveira Vigier & Jérôme, 2019).

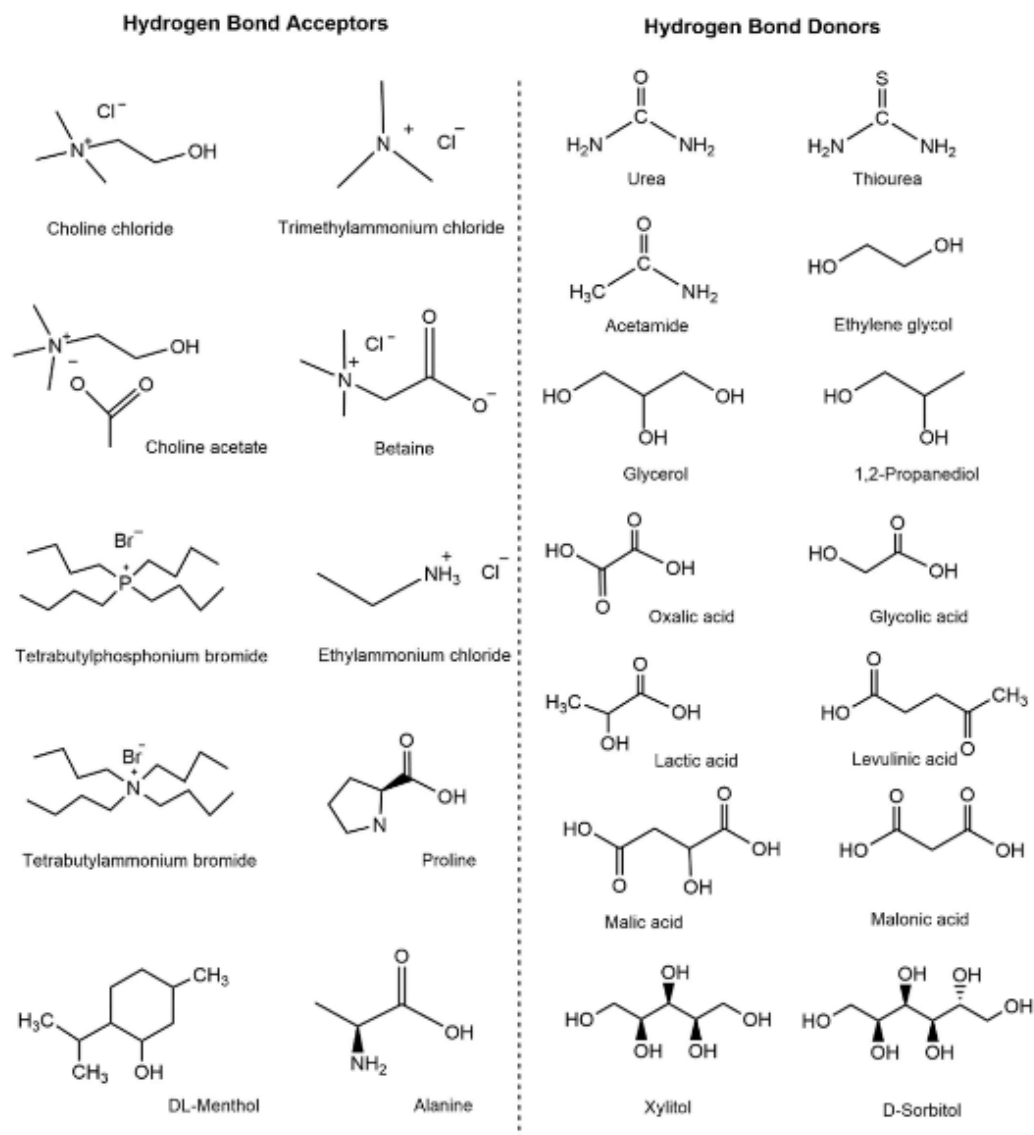
DES berada pada titik eutektik dalam campuran dua atau lebih komponen yang membentuk pelarut tersebut. Dalam hal ini, DES terbentuk dengan menggabungkan akseptor ikatan hidrogen (HBA) dan donor ikatan hidrogen (HBD) dalam rasio tertentu, sehingga menghasilkan campuran yang memiliki titik leleh lebih rendah daripada titik leleh masing-masing komponen penyusunnya seperti yang ditunjukkan pada diagram fase eutektik **Gambar 2.4**. Titik eutektik ini sangat penting karena menunjukkan suhu dan komposisi tertentu di mana campuran dua bahan tersebut akan meleleh pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan titik leleh individual masing-masing komponen (HOU et al., 2018). Penurunan titik leleh ini disebabkan oleh delokalisasi elektron dan penurunan energi kisi yang terjadi karena interaksi antara kelompok HBD dan komponen HBA (Smith et al., 2014). Ini adalah fenomena khas dalam sistem eutektik, di mana dua padatan membentuk campuran yang memiliki titik leleh lebih rendah daripada titik leleh komponen tunggalnya (El Achkar et al., 2021).



Gambar 2.4 Diagram fasa eutektik (HOU et al., 2018).

Formula umum untuk DES dapat dituliskan sebagai $\text{Cat}^+\text{X}^-\text{zY}$, di mana Cat^+ merujuk pada kation, biasanya berasal dari garam kuaterner amonium yang bertindak sebagai HBA. X^- adalah anion, yang bisa berupa halida logam seperti Cl^- atau anion lainnya, sedangkan z menggambarkan jumlah mol anion X^- yang berinteraksi dengan kation Cat^+ , sementara Y adalah HBD (Zhang et al., 2023).

DES dapat diklasifikasikan menjadi empat tipe utama, berdasarkan jenis bahan yang digunakan dalam pembentukan campuran eutektik tersebut. Tipe pertama, *Salt-Based* DES, terdiri dari gabungan garam (biasanya garam amonium kuaterner atau garam alkali) dengan donor ikatan hidrogen (HBD) seperti urea atau gliserol (Abbott et al., 2004). Tipe kedua, *Organic Acid-Based* DES, menggabungkan asam organik, seperti asam lemak atau asam amino, dengan donor hidrogen seperti alkohol atau glikol. Tipe ketiga, *Metal-Based* DES, melibatkan penggunaan senyawa logam dalam kombinasi dengan HBD (Nian & Li, 2022). Terakhir, *Hydrate-Based* DES melibatkan penggunaan senyawa yang memiliki air terikat dalam struktur kristalnya, seperti hidrasi dari asam dan garam tertentu (Marcus, 2019). Pada **Gambar 2.5**, ditunjukkan senyawa-senyawa yang umumnya digunakan sebagai HBA dan HBD dalam proses sintesis DES.



Gambar 2.5 Senyawa HBA dan HBD yang biasa digunakan dalam proses sintesis DES (El Achkar et al., 2021)

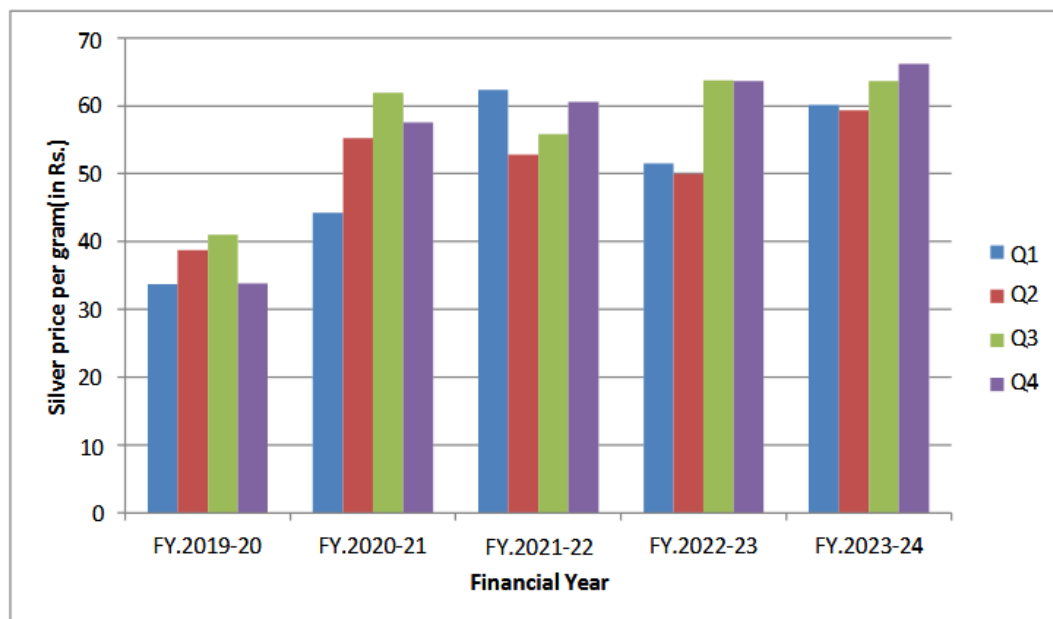
Optimasi komposisi *Deep Eutectic Solvents* (DES) sangat penting untuk memaksimalkan potensinya, dan salah satu cara untuk mencapainya adalah dengan menggunakan sistem terner. Dalam sistem terner, penambahan komponen ketiga ke dalam campuran biner DES memberikan fleksibilitas untuk menyesuaikan sifat fisik dan kimia pelarut tersebut, yang memungkinkan peningkatan kinerja pelarut dalam berbagai aplikasi (Meneses et al., 2019). Dengan modifikasi ini, parameter-parameter utama seperti viskositas, titik leleh, konduktivitas, serta kemampuan pelarut untuk melarutkan senyawa tertentu dapat dikendalikan lebih efektif. Hal ini

dapat meningkatkan efisiensi DES dalam aplikasi seperti ekstraksi logam dan pemrosesan material (Wu et al., 2025).

Salah satu studi yang berhasil menghasilkan *Ternerary Deep Eutectic Solvent* (TDES) adalah studi yang dilakukan oleh Shahrezaei et al. (2024). Studi ini menyelidiki proses pelindian seng dari konsentrat sfalerit menggunakan DES tipe terner yang terdiri dari kolin klorida (ChCl), asam p-toluen sulfonat (PTSA), dan etilen glikol (EG) dengan rasio molar 1:1:1. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa TDES yang dibuat berhasil mencapai pemulihan seng hingga 99.7%. Analisis inframerah mengonfirmasi stabilitas kimia pelarut selama proses pelindian. Penelitian ini menunjukkan bahwa TDES memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan menjadi pelarut stabil untuk proses pelindian dengan hasil pemulihan yang tinggi.

2.3 Logam Perak (Ag)

Perak (Ag) adalah unsur kimia dengan nomor atom 47 dan massa atom 107,86 termasuk dalam golongan logam transisi. Unsur ini memiliki sifat fisik yang sangat baik, seperti konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, serta kemampuan memantulkan cahaya yang sangat baik. Sifat unik perak membuatnya berharga untuk berbagai aplikasi. Kemampuan kerja, keindahan, dan efek antibakterinya telah membuatnya diminati sejak zaman kuno. Ketahanan perak terhadap oksidasi dan kemampuannya untuk membentuk paduan telah menjadikannya penting dalam aplikasi teknologi canggih, termasuk kaca jendela hemat energi dan mesin jet (Etris, 2001).



Gambar 2.3 Grafik tren nilai jual logam perak (Bhattacharya & Roy, 2025)

Perak telah memainkan peran yang signifikan dalam berbagai aplikasi industri serta sebagai aset investasi sepanjang sejarah. Nilainya sebagai logam industri terus berkembang seiring dengan meningkatnya permintaan di sektor-sektor seperti energi terbarukan dan elektronik (Złoty et al., 2024). Sebagai instrumen investasi, perak terbukti memiliki kemampuan untuk mempertahankan nilai kekayaan, terutama selama periode kemerosotan ekonomi (Rowland et al., 2022). Berbeda dengan tembaga, yang memerlukan model multi-faktor untuk analisis harga, fluktuasi harga perak dapat dimodelkan secara memadai menggunakan model satu faktor yang bervariasi seiring waktu (Urich, 2000). Penelitian terbaru juga telah mengkaji pendekatan-pendekatan baru untuk memprediksi harga perak, termasuk pemanfaatan teknik seperti Latent Dirichlet Allocation dan data dari Google Trends, dengan penerapan pohon regresi menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam analisis prediktif (Öndin & Küçükdeniz, 2023). Berdasarkan **Gambar 2.3** yang diperoleh dari penelitian Bhattacharya & Roy (2025), harga perak menunjukkan tren peningkatan yang konsisten, yang mengindikasikan bahwa nilai perak diperkirakan tidak akan mengalami penurunan yang signifikan di masa depan.

2.4 Suhu Pelindian PCB

Suhu memainkan peran yang sangat penting dalam proses pelindian, terutama dalam pelindian logam dari material seperti PCB. Pada suhu yang lebih tinggi, laju reaksi kimia biasanya meningkat, yang dapat mempercepat proses pelindian logam (Schmitz & Lente, 2020). Dalam proses ekstraksi logam menggunakan pelarut seperti DES, suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan kelarutan logam dalam pelarut, karena suhu yang lebih tinggi seringkali menyebabkan peningkatan energi kinetik molekul, sehingga mempercepat proses difusi antara logam dan pelarut. Hal ini dapat menyebabkan pemulihan logam yang lebih cepat dan efisien (Havlik et al., 2010).

Namun, meskipun suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju ekstraksi, terdapat batasan tertentu yang perlu diperhatikan. Jika suhu terlalu tinggi, dapat terjadi dekomposisi pelarut atau reaksi sampingan yang merugikan, yang dapat mengurangi efisiensi ekstraksi dan menghasilkan produk sampingan yang tidak diinginkan (Leenson, 1999). Oleh karena itu, penting untuk menentukan suhu optimal yang memungkinkan ekstraksi logam yang maksimal tanpa merusak pelarut atau menyebabkan reaksi yang tidak diinginkan.

Selain itu, suhu juga mempengaruhi viskositas pelarut, yang dapat mempengaruhi laju pelindian. Pada suhu tinggi, viskositas pelarut biasanya menurun, memungkinkan pelarut untuk lebih mudah meresap ke dalam material yang akan diekstraksi. Dengan viskositas yang lebih rendah, proses difusi antara pelarut dan material yang terkandung di dalam PCB menjadi lebih efisien, yang selanjutnya mempercepat proses ekstraksi logam (Li et al., 2020). Namun, suhu yang terlalu tinggi juga dapat mempengaruhi stabilitas termal pelarut, yang memerlukan pengendalian suhu yang tepat selama proses pelindian untuk menjaga efektivitasnya.

2.5 Lama Waktu Pelindian PCB

Lama waktu proses pelindian memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi ekstraksi logam dari PCB. Secara umum, semakin lama waktu pelindian, semakin banyak logam yang dapat terlarut dalam pelarut, karena reaksi antara logam dan pelarut berlangsung lebih lama, memungkinkan lebih banyak logam

yang terlepas. Namun, ada batas waktu tertentu yang memberikan efisiensi ekstraksi maksimal, setelah itu peningkatan waktu pelindian tidak lagi memberikan peningkatan yang signifikan (Sahu & Devi, 2022).

Pada awal proses pelindian, peningkatan waktu akan mempercepat proses difusi antara pelarut dan material yang terkandung dalam PCB, yang memungkinkan lebih banyak logam terlarut. Hal ini sangat relevan dalam proses pelindian dengan menggunakan pelarut DES yang dapat melarutkan logam dengan lebih efisien ketika waktu kontak antara pelarut dan material cukup lama. Namun, setelah waktu tertentu, pelindian cenderung mencapai titik jenuh, di mana sebagian besar logam yang dapat diekstraksi telah terlarut, dan perpanjangan waktu lebih lama tidak lagi memberikan hasil yang signifikan (Ukiwe et al., n.d.).

Di sisi lain, waktu yang terlalu lama juga dapat menyebabkan beberapa efek sampingan yang merugikan. Misalnya, pada suhu tinggi, lama waktu pelindian yang berlebihan dapat menyebabkan degradasi pelarut atau pembentukan senyawa sampingan yang tidak diinginkan. Selain itu, dalam beberapa kasus, kelebihan waktu pelindian dapat menyebabkan pelarut mengikat unsur-unsur non-logam atau bahan lain yang tidak diinginkan, yang akhirnya mempengaruhi kemurnian logam yang diekstraksi (Muzenda et al., 2013).

2.6 Rasio Solid-To-Liquid Pelindian PCB

Rasio solid-to-liquid (S/L) dalam proses pelindian merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi efisiensi ekstraksi logam dari PCB. Rasio ini merujuk pada perbandingan antara jumlah bahan padat (dalam hal ini jumlah PCB yang digunakan dalam pelindian) dengan volume pelarut yang digunakan dalam proses pelindian (TDES). Rasio yang tepat antara solid dan liquid sangat penting untuk memastikan bahwa pelarut cukup untuk melarutkan logam secara efisien tanpa menyebabkan pemborosan pelarut yang berlebihan. (Tzani et al., 2023).

Pengaruh rasio S/L terhadap efisiensi ekstraksi logam dapat dijelaskan berdasarkan prinsip dasar bahwa semakin besar jumlah pelarut yang digunakan, semakin besar pula kemungkinan logam terlarut dari material padat. Jika rasio S/L terlalu tinggi, berarti terlalu banyak bahan padat yang relatif sedikit pelarutnya, yang dapat membatasi efektivitas pelarut dalam mengekstraksi logam dari senyawa

lain. Sebaliknya, jika rasio terlalu rendah, meskipun pelarut berlimpah, jumlah bahan padat yang sedikit mungkin tidak optimal untuk memaksimalkan ekstraksi, karena volume logam yang dapat diekstraksi terbatas (Aziz et al., 2024)

Penelitian menunjukkan bahwa rasio S/L yang optimal dapat bervariasi tergantung pada jenis logam yang diekstraksi dan sifat pelarut yang digunakan. Dalam ekstraksi logam dari PCB menggunakan DES, rasio S/L yang tepat dapat membantu mempercepat proses pelindian dengan memastikan bahwa pelarut cukup untuk melarutkan logam berharga seperti perak, tembaga, atau emas, tanpa memboroskan pelarut. Biasanya, rasio yang lebih tinggi dari 1:5 hingga 1:10 sering kali digunakan dalam praktik industri, di mana jumlah pelarut lebih banyak akan memberikan hasil ekstraksi yang lebih cepat dan efisien. (Airouyuwa et al., 2022).

Namun, perlu dicatat bahwa pengaturan rasio S/L tidak hanya mempengaruhi kecepatan ekstraksi, tetapi juga kualitas ekstraksi logam. Rasio yang tidak sesuai dapat menghasilkan ekstraksi yang tidak lengkap atau menurunkan kemurnian logam yang dihasilkan (Airouyuwa et al., 2022)

2.7 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR) adalah alat analisis yang ampuh yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada material, dengan menganalisis interaksinya dengan radiasi inframerah. Teknik ini terbukti sangat efektif untuk mendeteksi kontaminan, mengidentifikasi zat aditif, dan mempelajari proses penguraian dan oksidasi bahan. FTIR menghasilkan spektrum dalam kisaran 4000 hingga 400 cm^{-1} , yang berfungsi sebagai penanda unik untuk setiap senyawa yang dikarakterisasi. Setiap molekul menyerap cahaya inframerah pada panjang gelombang yang khas, sehingga menjadikan FTIR sebagai metode yang baik untuk menentukan komposisi kimia suatu (Titus et al., 2019).

Prinsip inti FTIR terletak pada pendeteksian interaksi antara sinar inframerah dan molekul-molekul di dalam sampel. Molekul-molekul ini menunjukkan keadaan energi rotasi dan vibrasi yang berbeda, yang memungkinkan mereka untuk menyerap energi pada panjang gelombang tertentu. Ketika radiasi inframerah yang dipancarkan selaras dengan perbedaan energi vibrasi molekul, maka akan terjadi perubahan momen dipol, yang memungkinkan molekul

menyerap foton pada panjang gelombang tertentu. Spektrum inframerah yang dihasilkan menampilkan pola penyerapan yang berbeda sesuai dengan setiap ikatan kimia, biasanya dalam rentang panjang gelombang 780 nm hingga 50 μm ($12800\text{--}200\text{ cm}^{-1}$) (Eid, 2021).

FTIR dapat mendeteksi berbagai gugus fungsi dalam senyawa berdasarkan vibrasi ikatan kimianya. Gugus fungsi hidrokarbon, seperti alkil, alkene, dan alkuna, dapat terdeteksi melalui vibrasi stretching C-H pada kisaran $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ untuk alkana, serta vibrasi C=C dan C $\equiv$ C yang muncul pada sekitar 1600 cm^{-1} dan 2100 cm^{-1} , masing-masing. Gugus fungsi oksigen, yang mencakup ikatan C-O, O-H, dan C=O dalam senyawa seperti alkohol, asam, ester, dan keton, juga dapat dianalisis dengan FTIR, di mana vibrasi O-H pada alkohol atau asam terdeteksi pada $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, C=O pada keton atau aldehida teramati pada sekitar 1725 cm^{-1} , dan C-O dalam alkohol dan eter terdeteksi pada kisaran $1000\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, FTIR mampu mendeteksi gugus fungsi nitrogen seperti N-H dalam amina dan amida pada kisaran $3300\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$, serta vibrasi C-N dalam amina pada sekitar $1200\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$. Terakhir, gugus fungsi halogen, seperti C-F dan C-Cl, juga terdeteksi dalam FTIR, di mana vibrasi C-F pada senyawa fluorokarbon teramati pada sekitar $1200\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$, dan vibrasi C-Cl muncul pada kisaran $700\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ (Mohamed et al., 2017).

2.8 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Differential Scanning Calorimetry (DSC) adalah teknik analisis termal yang digunakan untuk mengukur perubahan energi dalam sampel saat suhu diubah. DSC memungkinkan pemantauan perubahan fisik dan kimia pada sampel dengan cara mengukur perbedaan laju pemanasan atau pendinginan antara sampel dan bahan referensi yang tidak terpengaruh oleh perubahan tersebut. Teknik ini banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk penelitian material, farmasi, dan polimer, untuk mengidentifikasi sifat termal bahan, seperti titik leleh, suhu transisi gelas (T_g), dan entalpi kristalisasi (Brown & Chapman, 2020).

Dalam proses analisis DSC, sampel yang ditempatkan dalam sebuah sel pengukur dipanaskan atau didinginkan dengan laju tertentu. Seluruh proses suhu yang diterapkan pada sampel dibandingkan dengan sel referensi yang tidak

memiliki sampel, sehingga perbedaan energi yang diserap atau dilepaskan selama proses tersebut dapat diukur. Perubahan energi ini bisa berasal dari berbagai fenomena, seperti perubahan fase (misalnya transisi dari padat ke cair), reaksi eksotermik atau endotermik, atau pelepasan gas (Singh & Singh, 2022). Analisis DSC memberikan informasi penting mengenai stabilitas termal bahan dan dapat digunakan untuk mempelajari sifat termal material yang digunakan dalam berbagai aplikasi.

Salah satu keunggulan utama dari DSC adalah kemampuannya untuk memberikan informasi kuantitatif mengenai perubahan termal dalam sampel, seperti titik leleh dan kapasitas panas spesifik (Singh & Singh, 2022). Dalam industri farmasi, misalnya, DSC digunakan untuk mempelajari sifat termal obat-obatan dan formulasi, termasuk proses kristalisasi dan stabilitas bahan aktif (Craig & Reading, 2016). Dalam konteks material dan polimer, DSC digunakan untuk memeriksa perubahan termal dalam polimer dan komposit, yang sangat penting untuk desain dan pengujian produk (Saxena et al., 2020).

2.9 Atomic Absorption Spectrometry (AAS)

Atomic Absorption Spectrometry (AAS) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengukur konsentrasi unsur-unsur logam dalam sampel dengan memanfaatkan penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu oleh atom bebas unsur yang dianalisis. Teknik ini sangat berguna dalam analisis kualitas air, tanah, makanan, dan sampel biologis untuk mendeteksi elemen-elemen seperti timbal (Pb), tembaga (Cu), dan perak (Ag). AAS bekerja dengan cara mensinari sampel yang telah dipersiapkan dalam bentuk larutan dengan cahaya dari sumber lampu katoda berongga yang sesuai dengan unsur yang akan dianalisis, dan kemudian mengukur jumlah cahaya yang diserap oleh atom-atom unsur tersebut (Harris, 2015).

Proses analisis dalam AAS dimulai dengan atomisasi sampel, di mana sampel dipanaskan di dalam pembakar hingga elemen-elemen dalam sampel terurai menjadi atom-atom bebas. Atom-atom ini kemudian menyerap cahaya pada panjang gelombang spesifik, yang dicatat oleh detektor. Intensitas cahaya yang diserap sebanding dengan konsentrasi unsur dalam sampel, memungkinkan

perhitungan konsentrasi unsur tersebut (Skoog et al., 2017). Salah satu keunggulan AAS adalah kemampuannya untuk menganalisis elemen logam dalam sampel dengan sensitivitas tinggi dan akurasi yang tinggi, bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah (Harris, 2015).

Selama proses analisis, sampel yang telah dipersiapkan dalam bentuk larutan disinari dengan cahaya dari sumber lampu katoda berongga yang sesuai dengan unsur yang akan dianalisis. Atom-atom dalam sampel menyerap cahaya pada panjang gelombang spesifik, dan jumlah cahaya yang diserap sebanding dengan konsentrasi unsur tersebut (Krüger et al., 2023). Salah satu keuntungan utama AAS adalah kemampuannya untuk menganalisis elemen logam dalam sampel dengan sensitivitas tinggi dan akurasi yang tinggi, bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah.

AAS digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pengawasan kualitas air, penelitian lingkungan, dan kontrol kualitas produk industri. Dalam konteks pengolahan limbah elektronik, AAS dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi logam berat dalam sampel untuk memastikan bahwa elemen-elemen berbahaya, seperti kadmium (Cd) dan merkuri (Hg), tidak melebihi batas yang diizinkan (Krüger et al., 2024).