

Pengaruh penambahan unsur Zn terhadap sifat fisis dan mekanis solder bebas timbal Sn-0,7Cu-1,5Ag

Leo Hermanus Kasi¹

¹Progam Studi Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Kalimantan, Jl. Soekarno Hatta km. 15
Karang Joang, Balikpapan, Indonesia
06211035@student.itk.ac.id

Kata Kunci : solder bebas timbal, limbah elektronik, timbal

Abstrak : Pesatnya Pertumbuhan industri elektronik di Indonesia terus meningkat seiring kebutuhan akan produk yang lebih efisien, mencapai 14,59% berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2023. Namun, peningkatan ini diiringi dengan tantangan pencemaran lingkungan akibat limbah elektronik, yang sebagian besar mengandung bahan berbahaya seperti timbal. Material solder berbasis timbal (Sn-Pb) yang digunakan secara luas dalam industri elektronik menjadi salah satu penyumbang utama pencemaran ini. Paparan timbal berdampak serius pada kesehatan manusia dan lingkungan, mendorong kebijakan internasional seperti RoHS dan WEEE yang membatasi penggunaannya sejak 2006. Sebagai alternatif, solder bebas timbal berbasis paduan Sn-Ag-Cu (SAC) telah dikembangkan karena sifat mekanik, konduktivitas termal, dan listrik yang baik. Namun, titik leleh SAC yang lebih tinggi dibandingkan solder Sn-Pb menjadi kendala dalam aplikasi industri. Alternatif lain, seperti paduan Sn-Zn, menawarkan titik leleh yang lebih mendekati solder Sn-Pb serta keunggulan kekuatan mekanik dan biaya produksi rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakterisasi paduan solder bebas timbal Sn-0,7Cu-1,5Ag dengan variasi kandungan Zn sebagai alternatif solder konvensional. Karakterisasi mekanik dan fisis dilakukan untuk memastikan paduan ini dapat memenuhi kebutuhan industri modern. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan material solder bebas Pb yang ramah lingkungan, berkualitas tinggi, dan kompetitif dalam aplikasi industri.

1. LATAR BELAKANG

Pertumbuhan industri elektronik di Indonesia meningkat, pertumbuhan ini disebabkan oleh kebutuhan industri akan produk yang lebih efisien. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada

tahun 2023, pertumbuhan sektor industri mengalami pertumbuhan sampai 14,59% produk yang meliputi komputer, elektronika, dan peralatan listrik. Kementerian Perindustrian (Kemenperin) menilai

industri elektronika menjadi salah satu sektor yang mendapat prioritas pengembangan sesuai peta jalan “*Making Indonesia 4.0*”. Dibalik fakta itu, sampah elektronik juga menyebabkan pencemaran lingkungan, hal ini dikarenakan alat elektronik yang telah rusak dibuang begitu saja oleh pabrik perindustrian dan aktivitas rumah tangga. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tahun 2021, penimbunan limbah elektronik di Indonesia mencapai 2 juta ton. Penimbunan di pulau Jawa mencapai 56%, pulau Sumatera mencapai 22% dan 22% lainnya tersebar di pulau Kalimantan, Sulawesi, Nusa Tenggara dan Papua. Pada tahun 2020, *Global E-waste Monitor* melaporkan bahwa diperkirakan akan terjadi lonjakan limbah elektronik dari tahun 2019 sekitar 53 juta ton meningkat menjadi 74 juta ton pada tahun 2030. Benua Asia menyumbang sampah elektronik terbesar di dunia dengan angka 25 juta ton, disusul oleh Benua Amerika dengan angka 13 juta ton dan Eropa 12 juta ton. Limbah elektronik sangat berbahaya karena mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), kandungan dalam B3 sangat berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan (Dwiyanti, 2022). Limbah elektronik mengandung zat berbahaya seperti timbal, kadmium, antimon, nikel, merkuri, mangan, lithium dan sebagainya.

Pada alat elektronik terdapat komponen penting yaitu *printed circuit board* (PCB). Presentase PCB pada ponsel adalah sekitar 20 – 30%, 20% pada komputer, dan 10% pada televisi (Wang H. Z., 2017). Pada alat elektronik, PCB berfungsi sebagai dasar letak dari komponen elektronik yang menghubungkan antar komponen elektronik dan mempermudah proses produksi alat elektronik. PCB menghubungkan antar komponen elektronik melalui

proses penyolderan dengan material solder yang mempunyai titik leleh yang rendah. Material solder sejak lama telah digunakan secara luas dalam dunia perindustrian elektronik, umumnya material yang digunakan berupa timah (Sn) – timbal (Pb) (SnPb). Material solder SnPb sangat baik secara kelistrikan, mekanik dan daya tahan korosinya. Namun, dari keunggulan material ini, Pb menjadi masalah karena sifatnya yang *toxic*, dapat menyebabkan kerusakan ekosistem terutama pada tanah, sungai, dan laut. Partikel-partikel halus dari sisa pembakaran limbah elektronik dapat melepaskan Pb ke udara sehingga mencemari lingkungan disekitarnya. Partikel kecil yang dihirup oleh manusia lalu sampai ke paru-paru, akan diserap ke dalam aliran darah dan menyebar ke seluruh tubuh. Partikel Pb yang telah sampai ke organ-organ tubuh akan menyebabkan kerusakan otak, gangguan saraf, masalah reproduksi, dan keracunan kronis (Abubakar, 2022). Selain itu, Pb juga dapat mencemari tanah dengan adanya penimbunan sampah elektronik. Timbal yang tertimbun akan meresap sampai lapisan bawah tanah, hal ini dapat merusak kualitas tanah serta kesuburan dari tanaman (Wijayati, 2022). Pencemaran air terjadi dari hasil pembuangan limbah elektronik yang mengendap di dasar laut. Air yang mengandung Pb akan berbahaya jika tidak dikelola dengan baik, terlebih lagi jika dikonsumsi atau untuk kegiatan rumah tangga lainnya. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif pengganti Pb yaitu material yang ramah lingkungan, memiliki kelistrikan, sifat mekanik dan daya tahan korosi yang baik.

Sejak Juli 2006 *Waste Electrical and Electronic Equipment* (WEEE) dan *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS) memberlakukan peraturan terkait pembatasan dan larangan penggunaan Pb

dalam perangkat elektronik (Tan et al, 2020). Oleh karena itu, penggunaan solder berbasis Pb tidak digunakan lagi mengingat bahayanya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Perindustrian elektronik memulai inovasi material solder bebas Pb yang memicu perkembangannya. Penggunaan solder bebas Pb pada bahan semikonduktor merupakan inovasi yang bertujuan untuk mengurangi penggunaan solder berbahan timbal, sekaligus mencegah pencemaran lingkungan dan risiko penyakit berbahaya akibat paparan timbal secara berkelanjutan, solder jenis ini tidak menggunakan timbal sebagai komponen utamanya, melainkan memanfaatkan bahan alternatif (Fazlullah, 2021). Salah satu bahan paduan alternatif solder bebas Pb yang menjanjikan adalah paduan timah (Sn) - perak (Ag) - tembaga (Cu) (SAC) dengan komposisi Sn-0.7wt%Cu dan Sn-3.5wt%Ag (Cui, 2023). Paduan SAC banyak digunakan untuk menggantikan solder timah konvensional karena memiliki keunggulan seperti sifat mekanik yang unggul serta memberikan konduktivitas listrik dan termal yang baik (Chen Y. Z., 2021).

Material solder SAC dianggap sebagai solder bebas Pb yang paling potensial. Namun, material ini memiliki titik leleh yang lebih tinggi dibandingkan solder eutektik SnPb konvensional yang memiliki titik leleh pada 183°C (Cui, 2023). Sn-0,7Cu-1,5Ag memiliki titik leleh yang juga tinggi yaitu pada 191°C (Siahaan, 2018). Oleh sebab itu, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengembangkan material solder yang mendekati titik leleh material solder SnPb konvensional. Salah satu alternatifnya adalah paduan eutektik timah (Sn) – Zinc (Zn) (SnZn), semakin besar Zn yang ditambahkan pada paduan, maka titik leleh paduan akan semakin

mendekati SnPb. paduan Sn-0,7Cu7%Zn leleh pada suhu 173°C sedangkan SnPb memiliki temperature leleh 188°C (Siahaan, 2020). Paduan yang paling mendekati sifat-sifat SnPb yaitu Sn-0,7Cu7%Zn dari pengujian sifat fisis: melting point, berat jenis dan pengujian sifat mekanis: uji kekerasan (Siahaan, 2020).

Perkembangan material solder yang ramah lingkungan sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) pada tahun 2030, yaitu nomor 3 (Kehidupan Sehat dan Sejahtera), nomor 14 (Menjaga Ekosistem Laut) dan nomor 15 (Menjaga Ekosistem Darat). Sebagai salah satu alternatif solder yang memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam panduan solder bebas timbal, diperlukan langkah-langkah strategis dan terencana untuk mengatasi berbagai kendala yang mungkin dihadapi. Langkah-langkah tersebut yaitu salah satunya dengan memilih material yang bisa mendukung SDGs. Material Zn menjadi pilihan yang tepat karena material Zn yang ramah lingkungan, dibalik itu Zn juga menunjang titik leleh yang rendah.

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN METODOLOGI

2.1 Soldering

Teknologi penyambungan solder seringkali digunakan pada industri pengemasan elektronik untuk membuat interkoneksi antara senyawa elektronik untuk waktu yang lama. Dimana proses penyambungan solder dengan tembaga akan membentuk IMCs pada reaksi kimianya. Paduan timah sering kali digunakan sebagai material pada penyambungan logam, hal ini dikarenakan temperatur liquidusnya yang rendah sehingga dapat

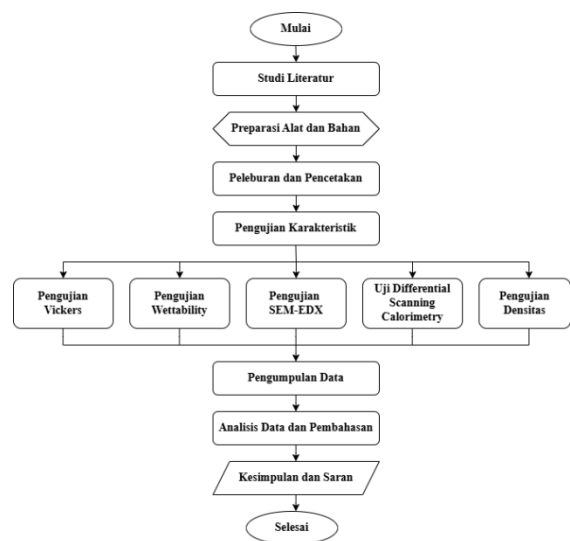
membentuk ikatan metalik dengan Cu pada temperature yang rendah (Chen S. W., 2006)Sebagian besar solder eutektik bebas timbal adalah paduan Sn diantaranya yaitu Au, Ag, Cu, Bi, Cd, In, Sb, atau Zn (McCormack, 1994) (Artaki, 1994).

2.2 SnPb

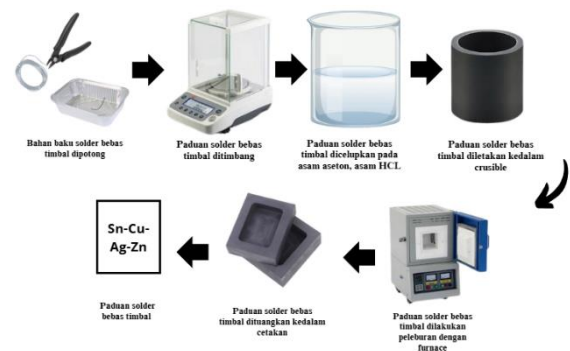
Sejarah penggunaan solder berbasis timbal (SnPb) dimulai pada awal abad ke 20, di mana paduan timbal-timah (SnPb) menjadi standar industri karena karakteristiknya yang ideal, seperti titik leleh yang rendah (183°C untuk Sn63Pb37) dan kemampuan untuk menghasilkan sambungan yang andal serta tahan lama. Solder SnPb digunakan secara luas dalam industri elektronik dan metalurgi, terutama karena kemampuannya memberikan sambungan yang konduktif secara listrik dan termal. Namun, pada akhir 1990-an, kekhawatiran terhadap dampak lingkungan dan kesehatan akibat paparan timbal mulai meningkat. Timbal dianggap sebagai bahan berbahaya karena sifatnya yang toksik, yang dapat menyebabkan masalah kesehatan jika terakumulasi dalam tubuh manusia dan mencemari lingkungan. Dengan meningkatnya kesadaran tentang bahaya ini, serta diberlakukannya regulasi seperti *Restriction of Hazardous Substances (RoHS)* di Uni Eropa pada tahun 2006, yang melarang penggunaan timbal dalam produk elektronik, muncul kebutuhan untuk mencari alternatif yang lebih aman. Solder bebas timbal (lead-free solder), yang umumnya terdiri dari paduan berbasis timah, perak, dan tembaga (Sn-Ag-Cu), mulai menggantikan SnPb secara bertahap. Paduan ini menawarkan kinerja yang serupa dalam hal kekuatan mekanis dan konduktivitas listrik, meskipun memiliki titik leleh

yang lebih tinggi dan tantangan teknis dalam proses soldering. Sejak pengadopsiannya, solder bebas timbal telah menjadi standar baru dalam banyak industri, meskipun penelitian dan inovasi terus berlanjut untuk meningkatkan efisiensi dan keandalannya.(Brown & Lee, 2018)

2.3 Diagram Alir Penelitian



3. PROSEDUR PEMBUATAN



Material dipotong terlebih dahulu, material dipotong $\pm 0,5$ cm panjangnya agar dapat masuk ke dalam krusibel, material di potong menggunakan tang. Kedua, material yang telah dipotong ditimbang sesuai dengan perhitungan *material balance* yang

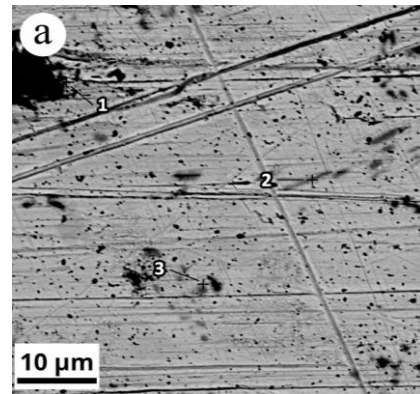
telah dihitung, material di timbang menggunakan timbangan analitik. Ketiga, material yang telah ditimbang di bersihkan dengan tiga proses perendaman, yaitu pertama perendaman ke dalam cairan aseton yang digunakan untuk menghilangkan kontaminan seperti minyak atau pelumas dari sisa fabrikasi, kedua perendaman ke dalam cairan Asam klorida(HCL) yang digunakan untuk membersihkan oksida logam atau karat yang terbentuk, ketiga perendaman ke dalam cairan alcohol yang digunakan untuk menetralkan sisa asam dari proses sebelumnya. Keempat, material yang telah direndam di masukkan kedalam krusibel graphite. Kelima, krusibel dimasukkan ke dalam furnace menggunakan capit, kemudian dileburkan selama 30 menit dengan temperature 500°C. Keenam, setelah 30 menit berlalu, krusibel hasil peleburan dikeluarkan dari furnace menggunakan capit, lalu dituangkan ke dalam cetakan graphite dengan ukuran 55mm x 37mm x 20mm(kubus). Ketujuh, Setelah dituangkan ke dalam cetakan graphite, Paduan di dinginkan dengan metode air cooling di suhu ruangan, maka selesailah proses pembuatan specimen. Kedelapan, paduan yang telah dingin dikeluarkan dari cetakan graphite, selanjutnya paduan di potong menjadi 6 bagian yang setiap bagiannya berukuran $\pm 18,3 \text{ mm} \times 12,3 \text{ mm}$, terdapat 4 sampel yang dipotong menjadi 6 bagian kemudian tiap bagian mewakili setiap satu pengujian.

4. HASIL DAN DISKUSI

4.1 SEM EDX

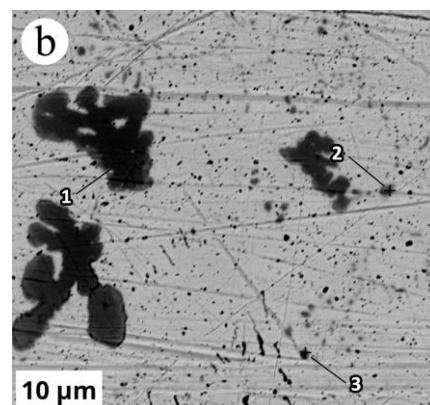
Pada spot 1 sampel 0Zn, kandungan unsur timah (Sn) sangat dominan dengan konsentrasi atomik sebesar 83,88%, disusul oleh perak (Ag)

sebesar 12,73% dan tembaga (Cu) sebesar 2,01%, kandungan oksigen terdeteksi kecil sekitar 1,38%. Komposisi seperti ini mengindikasikan bahwa fasa intermetalik Ag_3Sn sangat mungkin terbentuk.



Gambar 4.1 Hasil SEM-EDX Sampel 0Zn

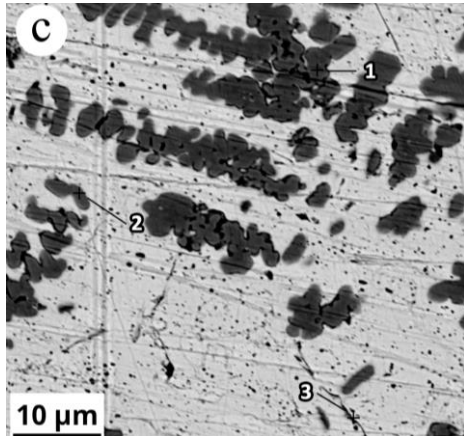
Pada spot 2 dan 3 memiliki persentase Ag yang lebih besar, yang lebih memungkinkan terbentuknya intermetalik Ag_3Sn .



Gambar 4.2 Hasil SEM-EDX Sampel 7Zn

Pada spot pertama sampel 7Zn terdapat dominasi unsur Sn sebesar 69,33% dan kandungan Ag sebesar 9,11%, sedangkan Zn sekitar 18,57%. Kandungan Ag dan Zn yang cukup rendah memungkinkan membentuk fasa SnZn_3 dan Ag_3Sn minor. Pada spot kedua, kandungan Zn meningkat hingga 37,25%, sedangkan Sn hanya 52,36% dan Ag sangat rendah,

yaitu 6,54%. Hal ini mengindikasikan kemungkinan terbentuknya fasa SnZn_3 . Spot ketiga juga menunjukkan kecenderungan serupa dengan kandungan Zn sebesar 39,24% dan Ag sebesar 5,82%, sehingga diperkirakan terbentuk fasa SnZn_3 .

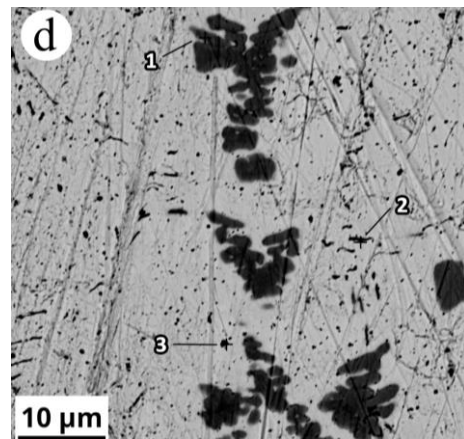


Gambar 4.3 Hasil SEM-EDX Sampel 8Zn

Spot 1 sampel 8Zn mengandung Ag sebesar 11,79%, Zn sebesar 26,88%, dan Sn sebesar 37,56%. Kandungan Zn yang cukup tinggi memungkinkan membentuk fasa SnZn_3 . Ada kemungkinan juga Ag_3Sn minor terbentuk. Pada spot kedua, dominasi Sn sebesar 62,58% dan Zn 23,35% menunjukkan bahwa kemungkinan terbentuknya SnZn_3 relatif kecil dan mungkin Zn hanya terlarut dalam Sn. Spot ketiga sangat berbeda, dengan Sn hanya 2,89% dan dominasi unsur oksigen (20,98%) serta Zn sebesar 33,37%. Kandungan oksigen tinggi pada titik ini mengindikasikan kemungkinan terbentuknya senyawa oksida, seperti ZnO .

Pada sampel 9Zn Spot 1, kandungan Sn sebesar 39,73 wt%, Zn sebesar 33,92 wt%, dan Ag sebesar 24,67 wt% sehingga sangat memungkinkan terbentuknya intermetalik SnZn_3 . Spot 2 menunjukkan peningkatan signifikan pada Zn (44,59

wt%) dan Ag (37,43 wt%), namun kandungan Sn menurun drastis menjadi 9,61 wt%, sehingga SnZn_3 tetap berpotensi terbentuk. Pada Spot 3, komposisi kembali menunjukkan dominasi Sn (43,56 wt%), dengan Zn sebesar 37,21 wt% dan Ag sebesar 18,34 wt%, serta oksigen yang sangat rendah (0,89 wt%), menegaskan terbentuknya intermetalik SnZn_3 secara dominan tanpa keterlibatan oksida.



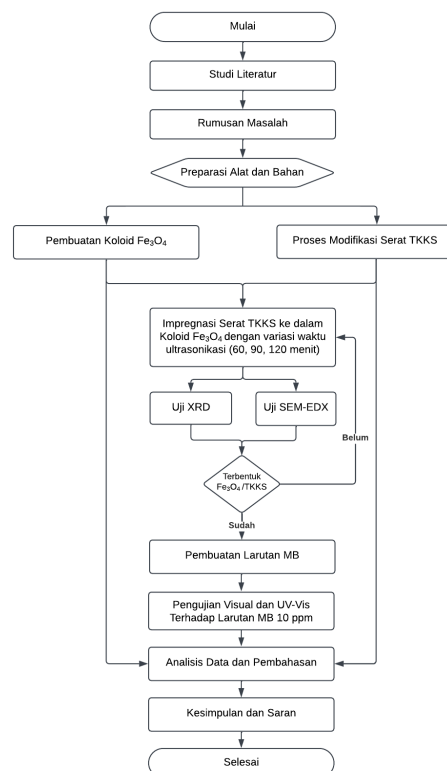
Gambar 4.4 Hasil SEM-EDX Sampel 9Zn

merata dan memiliki luas permukaan kontak yang



optimal (Ernawati, 2021; Ramli et al., 2014; Marbun & Hutajulu, 2023).

2.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.4 Prosedur Pembuatan Koloid Fe₃O₄

Gambar 2. Pembuatan Koloid Fe₃O₄

Proses sintesis koloid Fe₃O₄ dimulai dengan menimbang FeCl₃·6H₂O dan FeSO₄·7H₂O dengan rasio molar 2:1. Kedua bahan tersebut dilarutkan masing-masing dalam 100 mL aquades, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer dengan

kecepatan 600 rpm selama 5 menit hingga larut sempurna. Setelah itu, larutan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dicampurkan dan dipanaskan pada suhu 80°C sambil terus diaduk dengan kecepatan yang sama selama 10 menit. Selanjutnya, 20 mL ekstrak daun nanas ditambahkan ke dalam campuran, dan larutan diaduk selama 5 menit. Setelahnya, larutan NaOH 1M ditambahkan secara bertahap hingga pH larutan mencapai 11. Campuran tersebut diaduk secara kontinu selama 60 menit pada kecepatan 600 rpm hingga larutan berubah warna menjadi hitam. Proses ini menghasilkan koloid Fe_3O_4 yang siap untuk diimpregnasikan dengan serat TKKS.

2.5 Prosedur Pembuatan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$

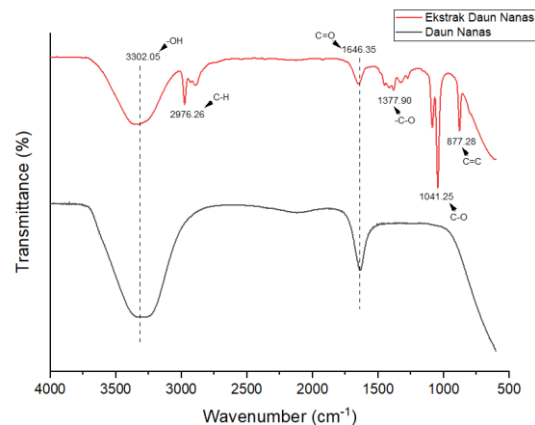


Gambar 3. Impregnasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$

Proses impregnasi Fe_3O_4 ke dalam serat TKKS dimulai dengan menyiapkan serat TKKS yang telah dimodifikasi, kemudian menimbang sebanyak 5 gram. Serat tersebut dimasukkan ke dalam gelas beaker yang berisi koloid Fe_3O_4 yang telah dibuat sebelumnya. Gelas beaker tersebut dipindahkan ke dalam tangki *ultrasonic bath* untuk dilakukan proses ultrasonikasi dengan variasi waktu selama 60 menit, 90 menit, dan 120 menit pada temperatur yang sama disetiap variasi yaitu 50°C . Setelah ultrasonikasi, serat TKKS dibiarkan terendam dalam koloid Fe_3O_4 selama 2 jam dengan temperatur 60°C . Kemudian sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$ dibilas beberapa kali menggunakan ethanol diikuti dengan aquades untuk menghilangkan sisa larutan dan menjadikannya pH netral. Selanjutnya, serat dikeringkan menggunakan oven pada suhu 90°C selama 120 menit. Hasil akhirnya adalah sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$ yang siap dilanjutkan ke tahap karakterisasi.

3 HASIL DAN DISKUSI

3.1 Uji FTIR



Gambar 4. FTIR Daun dan Ekstrak Daun Nanas

Berdasarkan spektrum FTIR, daun nanas dan ekstrak daun nanas menunjukkan kesamaan peak pada $3302,05\text{ cm}^{-1}$ ($-\text{OH}$) dan $1646,35\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}=\text{O}$), sedangkan ekstrak daun nanas memiliki empat peak tambahan: $2976,26\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{H}$ metil), $1377,90\text{ cm}^{-1}$ ($-\text{C}-\text{O}$), $1041,25\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{O}$ eter), dan $877,28\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}=\text{C}$ alkena). Keberadaan gugus-gugus fungsi tersebut mengindikasikan bahwa ekstrak daun nanas mengandung senyawa fitokimia seperti flavonoid dan fenolik, yang berperan sebagai agen penstabil (*capping agent*) selama proses sintesis nanopartikel. Senyawa ini dapat berinteraksi dengan permukaan partikel, sehingga membantu mengontrol pertumbuhan dan mencegah aglomerasi selama pembentukan Fe_3O_4 (Hamdiani & Shih, 2021).

3.2 Uji Koloid

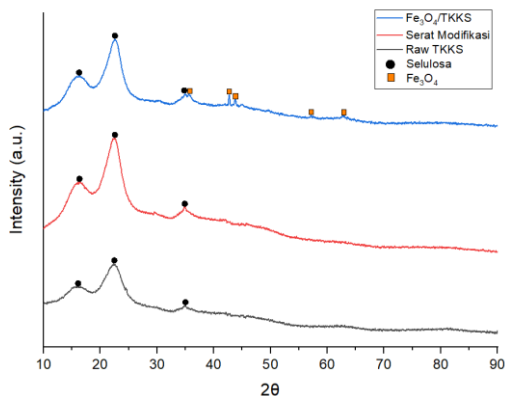


Gambar 5. Hasil Uji Koloid dengan Efek Tyndall

Pengamatan pada larutan Fe_3O_4 menunjukkan terbentuknya efek Tyndall, ditandai dengan munculnya lintasan sinar laser yang jelas pada Gambar 5. Hal ini mengindikasikan keberhasilan sintesis nanopartikel Fe_3O_4 yang terdispersi dalam

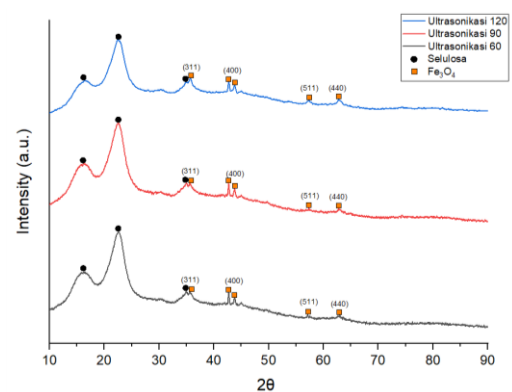
medium koloid, di mana partikel dengan ukuran lebih besar menghasilkan lintasan sinar yang lebih terang dan mudah diamati.

3.3 Uji XRD



Gambar 6. Hasil XRD Raw TKKS, Serat Modifikasi dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$

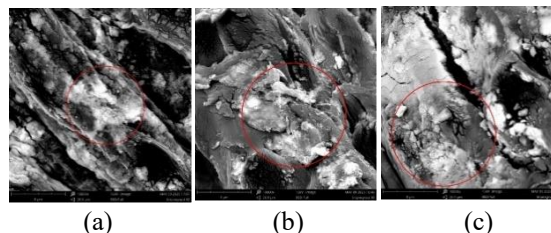
Pola XRD pada Gambar 6 menunjukkan puncak-puncak baru pada $35,67^\circ$, $42,78^\circ$, $43,71^\circ$, $57,26^\circ$, dan $62,87^\circ$ pada sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$, yang mengindikasikan keberadaan kristal Fe_3O_4 sesuai standar JCPDS No. 19-0629. Sementara itu, sampel TKKS hanya menunjukkan puncak khas selulosa pada $16,3^\circ$, $22,8^\circ$, dan $34,87^\circ$. Hasil ini menegaskan bahwa proses impregnasi Fe_3O_4 ke dalam serat TKKS berhasil dilakukan.



Gambar 7. Hasil XRD dengan Variasi Waktu Ultrasonikasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TKKS}$

Pola XRD pada gambar 7 menunjukkan bahwa semua sampel dengan variasi waktu ultrasonikasi (60, 90, dan 120 menit) memiliki puncak difraksi pada bidang kristal (311), (400), (511), dan (440), sesuai dengan JCPDS No. 19-0629, yang mengindikasikan keberadaan fasa Fe_3O_4 dengan struktur spinel kubik terbalik. Puncak dominan pada bidang (311) menandakan bahwa partikel yang terbentuk merupakan fasa murni Fe_3O_4 tanpa indikasi fasa lain. Intensitas puncak meningkat seiring dengan bertambahnya waktu ultrasonikasi, dengan nilai maksimum tercapai pada 120 menit, yang menunjukkan kristalinitas tertinggi. Peningkatan ini menandakan bahwa proses ultrasonikasi selama 120 menit memberikan struktur kristal yang lebih teratur dan dispersi partikel yang lebih merata (Dhar et al., 2021)

3.4 Uji SEM-EDX



Gambar 8. Topografi Permukaan Sampel Perbesaran 10.000x (a) Ultrasonikasi 60 menit, (b) 90 menit, (c) 120 menit

Hasil SEM pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa peningkatan waktu ultrasonikasi berdampak langsung terhadap morfologi dan aglomerasi partikel. Pada 60 menit, masih terlihat gumpalan besar akibat dispersi yang belum optimal. Waktu 90 menit menunjukkan perbaikan dengan distribusi lebih merata meskipun aglomerasi masih terjadi. Sementara itu, durasi 120 menit menghasilkan sebaran partikel paling homogen dengan ukuran agregat lebih kecil, menandakan proses impregnasi dan dispersi nanopartikel Fe_3O_4 yang lebih efektif. Hasil ini diperkuat oleh analisis EDX yang menunjukkan peningkatan persentase unsur Fe seiring bertambahnya waktu sonikasi

Tabel 1. Hasil Komposisi EDX			
Variasi Sampel	Unsur	Weight Concentration (%)	
Ultrasonikasi 60 Menit	Fe	53.98	
	O	31.10	
	C	14.92	
Ultrasonikasi 90 Menit	Fe	54.94	
	O	30.07	
	C	14.99	
Ultrasonikasi 120 Menit	Fe	55.70	
	O	31.38	
	C	12.91	

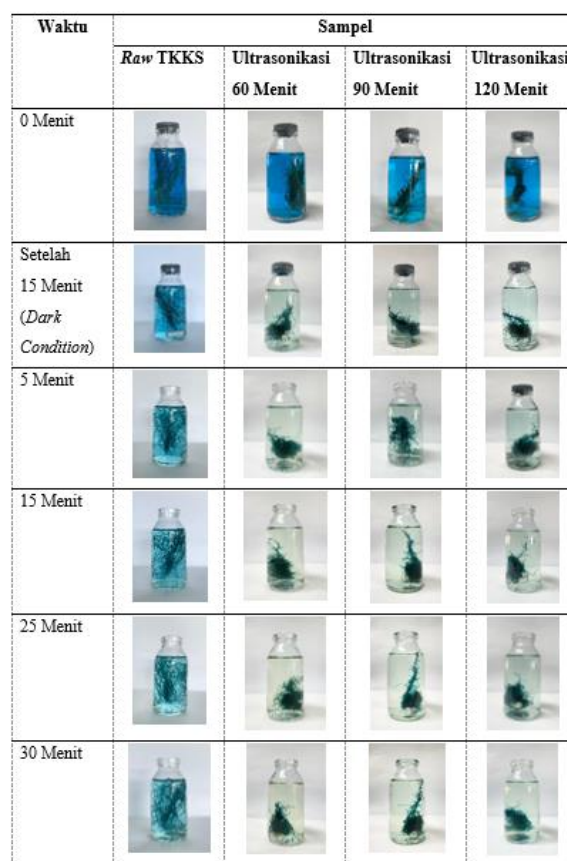
3.5 Uji Peforma Katalis

Tabel 2. %Degradasi Fe₃O₄/TKKS Terhadap MB

Waktu	% Degradasi			
	Raw TKKS	Ultrasonikasi 60 Menit	Ultrasonikasi 90 Menit	Ultrasonikasi 120 Menit
0 Menit	0.00	0.00	0.00	0.00
Setelah 15 Menit (Dark Condition)	72.94	93.56	93.85	93.99
5 Menit	79.01	94.23	94.69	94.55
10 Menit	82.64	94.94	94.61	95.18
15 Menit	83.16	94.95	94.49	95.73
20 Menit	83.77	94.57	94.14	95.26
25 Menit	84.52	94.35	93.29	94.72
30 Menit	85.03	94.04	94.33	94.65

Ketiga sampel Fe₃O₄/TKKS dengan variasi waktu ultrasonikasi menunjukkan efisiensi degradasi methylene blue yang serupa, yaitu di kisaran 94–95%, dengan nilai tertinggi dicapai pada waktu 120 menit. Sementara itu, sampel raw TKKS tanpa perlakuan hanya menunjukkan degradasi paling rendah. Rentang nilai degradasi ini berada dalam batas

toleransi pengukuran sebesar $\pm 0,01$, yang mencerminkan ketelitian alat ukur. Karena tidak terdapat perbedaan signifikan di luar batas ini, maka fluktuasi kecil yang tampak kemungkinan besar disebabkan oleh ketidakstabilan sistem seperti penyinaran yang tidak merata atau pencampuran yang tidak konsisten. Hasil ini tetap menunjukkan bahwa keberadaan Fe₃O₄ berperan signifikan dalam meningkatkan kinerja fotokatalitik, terutama melalui pembentukan pasangan muatan dan *Reactive Oxygen*



Species (ROS) yang lebih efektif.

Gambar 9. Uji Visual Degradasi Fe₃O₄/TKKS

Hasil visual menunjukkan adanya perbedaan tingkat degradasi yang signifikan antara sampel raw TKKS dan Fe₃O₄/TKKS. Setelah 30 menit proses fotokatalitik, larutan pada sampel raw TKKS masih

menunjukkan warna biru, menandakan bahwa material tersebut tidak memiliki aktivitas fotokatalitik yang signifikan. Sebaliknya, seluruh sampel Fe₃O₄/TKKS menunjukkan pemudaran warna larutan, yang mengindikasikan bahwa proses degradasi MB telah berlangsung. Hasil paling optimal diperoleh pada sampel dengan waktu ultrasonikasi 120 menit, di mana larutan tampak paling bening, menunjukkan degradasi MB yang lebih sempurna. Pada variasi ultrasonikasi 60 dan 90 menit, larutan menunjukkan warna akhir yang sedikit kekuningan. Hal ini dapat disebabkan akibat dari aglomerasi partikel Fe₃O₄ dan distribusi yang belum merata pada permukaan serat TKKS, sehingga membatasi jumlah situs aktif untuk menghasilkan gugus radikal (Nouren et al., 2024).

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan waktu ultrasonikasi dalam proses impregnasi berpengaruh terhadap keberhasilan pembentukan Fe₃O₄/TKKS. Seluruh sampel menunjukkan fasa Fe₃O₄ berdasarkan pola difraksi XRD, dengan intensitas tertinggi pada ultrasonikasi 120 menit. Citra SEM memperlihatkan partikel putih bercahaya yang tersebar di permukaan serat TKKS, didukung oleh temuan unsur Fe pada hasil EDX. Pada waktu 120 menit, sebaran partikel lebih merata dan homogen, meskipun aglomerasi masih terjadi dan ukuran partikel belum mencapai skala nanometer. Ketiga variasi waktu ultrasonikasi berhasil mendegradasi methylene blue (MB) dengan efisiensi serupa, yaitu 94–95%. Sampel 120 menit menghasilkan larutan akhir yang paling bening, menunjukkan degradasi paling optimal, sementara sampel 60 dan 90 menit sedikit kekuningan yang bisa disebabkan akibat aglomerasi partikel. Sebaliknya, raw TKKS tidak menunjukkan aktivitas fotokatalitik, dengan larutan MB yang tetap berwarna biru.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini tidak akan terwujud tanpa keterlibatan Bapak Ade Wahyu Yusariarta P. P., S.T., M.T. yang membantu membiayai dan membimbing penelitian.

REFERENSI

- Augustin, A., Chuaicham, C., Shanmugam, M., Vellaichamy, B., Rajendran, S., Hoang, T. K. A., Sasaki, K., & Sekar, K. (2022). Recent development of organic–inorganic hybrid photocatalysts for biomass conversion into hydrogen production. *Nanoscale Advances*, 4(12), 2561–2582. <https://doi.org/10.1039/D2NA00119E>
- Balamurugan, M., Saravanan, S., & Soga, T. (2017). Coating of green-synthesized silver nanoparticles on cotton fabric. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(3), 735–745. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9894-1>
- Dhar, P. K., Saha, P., Hasan, M. K., Amin, M. K., & Haque, M. R. (2021a). Green synthesis of magnetite nanoparticles using Lathyrus sativus peel extract and evaluation of their catalytic activity. *Cleaner Engineering and Technology*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100117>
- Enrico. (2019). Dampak Limbah Cair Industri Tekstil Terhadap Lingkungan Dan Aplikasi Teknik Eco Printing Sebagai Usaha Mengurangi Limbah. *MODA*, 1(1), 5–13. www.google.com
- Ernawati, L. (2021). *Buku Ajar Fundamental dan Terapan Teknologi Katalis*.
- Hamdiani, S., & Shih, Y. F. (2021). A green method for synthesis of silver-nanoparticles-diatomite (AgNPs-d) composite from pineapple (ananas comosus) leaf extract. *Indonesian Journal of Chemistry*, 21(3), 740–752. <https://doi.org/10.22146/ijc.63573>
- Hendrian, E., & Munasir. (2023). Green synthesis of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles (MNPs) using plant extract and Biomedicine Applications: Targeted Anticancer Drug Delivery System. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 12, 30–46.
- Nouren, S., Bibi, I., Kausar, A., Sultan, M., Nawaz Bhatti, H., Safa, Y., Sadaf, S., Alwadai, N., & Iqbal, M. (2024). Green synthesis of CuO nanoparticles using Jasmin sambac extract: Conditions optimization and photocatalytic degradation of Methylene Blue dye. *Journal of King Saud University - Science*, 36(3), 103089. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103089>
- Pradana, M. A., Ardhyana, H., & Farid, M. (2017). Pemisahan Selulosa dari Lignin Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Alkalisasi untuk Penguat Bahan Komposit Penyerap Suara. *JURNAL TEKNIK ITS*, 6(2).
- Ramesh, A. V., Rama Devi, D., Mohan Botsa, S., & Basavaiah, K. (2018). Facile green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using aqueous leaf extract of

- Zanthoxylum armatum DC. for efficient adsorption of methylene blue. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(2), 145–155.
<https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1459335>
- Ramli, R., Khan, Md. M. R., Yunus, R. M., Ong, H. R., Halim, R. M., Aziz, A. A., Ibrahim, Z., & Zainal, N. H. (2014). In-Situ Impregnation of Copper Nanoparticles on Palm Empty Fruit Bunch Powder. *Advances in Nanoparticles*, 03(03), 65–71.
<https://doi.org/10.4236/anp.2014.33009>
- Thamilselvan, V., Balu, S., Ganapathy, D., Atchudan, R., Arya, S., Hazra, S., & Sundramoorthy, A. K. (2025). Utilization of biomass waste derived carbon quantum dots intercalated ZnO for effective photocatalytic degradation of methylene blue. *Results in Surfaces and Interfaces*, 19, 100520.
<https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100520>
- Vita Mey Destty Marbun, N., & Evencus Hutajulu, P. (2023). Evaluasi Kuantitas Dan Kualitas Produk Katalis Heterogen Hasil Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit Melalui Impregnasi Logam Transisi. *JURNAL REKAYASA, TEKNOLOGI PROSES DAN SAINS KIMIA*.
- Yew, Y. P., Shameli, K., Miyake, M., Ahmad Khairudin, N. B. B., Mohamad, S. E. B., Naiki, T., & Lee, K. X. (2020). Green biosynthesis of superparamagnetic magnetite Fe₃O₄ nanoparticles and biomedical applications in targeted anticancer drug delivery system: A review. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 13, Issue 1, pp. 2287–2308). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.04.013>