

## PENGEMBANGAN E-MAJALAH KIMIA BERBANTUAN KIMIA KOMPUTASI: STUDI INHIBITOR KOROSI MINYAK PALA (*MYRISTICA FRAGRANS*) PADA TEMBAGA

Gesti Maharani<sup>1</sup>, Saprizal Hadisaputra<sup>2\*</sup>, Ermia Hidayanti<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Pendidikan Kimia, FKIP Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, Nusa Tenggara Barat 83125

\* Corresponding Author. E-mail: [rizal@unram.ac.id](mailto:rizal@unram.ac.id)

Received: 02 April 2026

Accepted: 30 Mei 2026  
doi: 10.29303/cep.v9i1.12234

Published: 31 Mei 2026

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan e-majalah kimia berbantuan kimia komputasi sebagai suplemen pembelajaran pada materi reaksi reduksi–oksidasi (redoks) serta mengetahui tingkat validitasnya berdasarkan penilaian ahli. Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed methods* yang mengombinasikan data kualitatif (wawancara guru dan siswa, deskripsi proses pengembangan, masukan validator) dan data kuantitatif (angket kebutuhan peserta didik dan indeks Aiken's V). Rancangan pengembangan menggunakan model 4D (*define, design, develop, disseminate*), dibatasi hingga tahap *develop*. E-majalah yang dikembangkan memuat materi reaksi redoks yang dikontekstualisasikan dengan fenomena korosi tembaga, kajian minyak pala (*Myristica fragrans*) sebagai *green corrosion inhibitor*, data kimia komputasi berbasis DFT (parameter HOMO, LUMO, dan *energy gap*), serta nilai adsorpsi hasil simulasi Monte Carlo pada permukaan Cu(111). Validasi dilakukan oleh tiga ahli menggunakan lembar penilaian yang dianalisis dengan indeks Aiken's V. Hasil menunjukkan rata-rata nilai V sebesar 0,84 (sangat valid), yang mencakup kegrafikan (0,85), kelayakan isi (0,82), kelayakan penyajian (0,89), dan kebahasaan (0,87). E-majalah dinyatakan layak digunakan sebagai suplemen pembelajaran kimia untuk materi reaksi redoks.

**Kata Kunci:** E-Majalah Kimia, Kimia Komputasi, Inhibitor Korosi, *Myristica Fragrans*, Reaksi Redoks

### *Development of a Computational Chemistry-Assisted Chemistry E-Magazine: Study of Nutmeg Oil (Myristica Fragrans) As a Corrosion Inhibitor on Copper*

#### Abstract

This study aims to develop a chemistry e-magazine, assisted by computational chemistry, as a learning supplement for redox reaction material and to determine its validity based on expert assessment. This study uses a mixed-methods approach that combines qualitative data (interviews with teachers and students, descriptions of the development process, and validator input) and quantitative data (student needs questionnaires and Aiken's V index). The development design uses the 4D model (*define, design, develop, disseminate*), limited to the development stage. The developed e-magazine contains redox reaction material contextualized with the phenomenon of copper corrosion, a study of nutmeg (*Myristica fragrans*) as a green corrosion inhibitor, DFT-based computational chemistry data (HOMO, LUMO, and *energy gap* parameters), as well as adsorption values from Monte Carlo simulations on the Cu(111) surface. Validation was carried out by three experts using an assessment sheet analyzed with Aiken's V index. The results showed an average V value of 0.84 (very valid), with coverage of graphics (0.85), content feasibility (0.82), presentation feasibility (0.89), and language (0.87). The e-magazine was deemed suitable for use as a supplementary learning resource for chemistry on redox reactions.

**Keywords:** Chemistry e-magazine, computational chemistry, corrosion inhibitor, *Myristica fragrans*, redox reaction.

---

## PENDAHULUAN

Ilmu kimia dikenal sebagai ilmu sentral karena menghubungkan berbagai disiplin ilmu seperti biologi, fisika, kedokteran, dan teknik material (Brown dkk., 2022). Di tingkat Sekolah Menengah Atas (SMA), reaksi reduksi–oksidasi (redoks) merupakan materi inti yang mendasari pemahaman elektrokimia. Namun, redoks dikenal sebagai materi yang sulit dipahami oleh peserta didik karena melibatkan tiga level representasi secara bersamaan, yakni makroskopik, submikroskopik, dan simbolik (Hardinungrahningsih dkk., 2022; Sukmawati dkk., 2020). Ketidakmampuan siswa memvisualisasikan perpindahan elektron menjadi hambatan utama yang menyebabkan miskonsepsi dan rendahnya pemahaman konseptual pada materi ini.

Kondisi tersebut dikonfirmasi oleh data kualitatif hasil wawancara terstruktur dengan guru kimia kelas XII yang menunjukkan bahwa media yang tersedia, seperti buku teks dan presentasi PowerPoint, belum mampu menyajikan mekanisme korosi logam secara visual dan kontekstual. Guru menyatakan bahwa siswa sering kali hanya menghafal konsep tanpa memahami proses elektrokimia yang mendasarinya. Temuan ini diperkuat oleh data kuantitatif hasil angket kebutuhan yang disebarkan kepada 36 peserta didik kelas XII, di mana 69,4% siswa menganggap materi redoks sulit dipahami, 74,3% mengalami kesulitan khusus pada materi korosi logam, 95,3% menyatakan membutuhkan media pembelajaran pendukung yang lebih menarik, dan 86,1% menyatakan tertarik belajar kimia menggunakan majalah elektronik. Sebanyak 88,9% peserta didik lebih menyukai media yang memuat gambar dan infografis. Data ini mengindikasikan kesenjangan yang signifikan antara kebutuhan peserta didik dan ketersediaan media pembelajaran yang ada (Anggraeni dkk., 2024).

Pembelajaran kimia yang bersifat kontekstual dan mengaitkan konsep dengan fenomena nyata terbukti mampu meningkatkan motivasi dan pemahaman siswa secara signifikan (Sukmawati dkk., 2020). Salah satu fenomena yang sangat relevan dengan materi redoks adalah korosi logam, yaitu proses degradasi elektrokimia yang terjadi ketika logam berinteraksi dengan lingkungannya. Korosi bukan hanya permasalahan ilmiah, tetapi juga berdampak besar secara ekonomi global. Laporan NACE International mencatat kerugian akibat korosi mencapai 2,5 triliun dolar AS per tahun, setara

dengan 3,4% produk domestik bruto dunia (Koch dkk., 2017). Pengendalian korosi melalui inhibitor alami atau green corrosion inhibitor yang berasal dari bahan tumbuhan menjadi solusi berkelanjutan yang berkembang pesat karena sifatnya yang ramah lingkungan, mudah diperoleh, dan berbiaya rendah dibandingkan dengan inhibitor sintetis (Verma dkk., 2021; Haldhar dkk., 2018; Heliyon, 2024).

Minyak pala (*Myristica fragrans*), yang merupakan komoditas pertanian unggulan Nusa Tenggara Barat, diketahui mengandung senyawa aktif seperti miristisin, safrol, dan elemisin. Senyawa-senyawa tersebut memiliki heteroatom oksigen (O) dan sistem  $\pi$ -elektron yang memungkinkan terjadinya interaksi donasi elektron ke orbital d logam tembaga, sehingga mampu menghambat laju korosi melalui mekanisme adsorpsi pada permukaan logam (Haldhar dkk., 2018; Cruz dkk., 2024; Iyyappan dkk., 2024). Kajian mekanisme inhibisi pada tingkat molekuler dapat dilakukan melalui pendekatan kimia komputasi berbasis *Density Functional Theory* (DFT) yang menghasilkan parameter elektronik seperti energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*), energi LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*), dan *energy gap*. Selain DFT, simulasi Monte Carlo digunakan untuk menghitung nilai energi adsorpsi senyawa inhibitor pada permukaan logam secara kuantitatif (Hadisaputra dkk., 2022a; 2022b; 2023). Integrasi data kimia komputasi ke dalam media pembelajaran berpotensi membantu peserta didik memvisualisasikan fenomena kimia pada tingkat submikroskopik yang selama ini tidak dapat diamati secara langsung.

Majalah elektronik (e-majalah) merupakan media digital yang mampu menyajikan konten sains secara visual, interaktif, dan mudah diakses melalui berbagai perangkat digital seperti laptop maupun smartphone (Arief dkk., 2021; Karmila dkk., 2023). Salah satu pendekatan yang relevan untuk mengintegrasikan dimensi sosial dan kontekstual dalam e-majalah kimia adalah Socio-Scientific Issues (SSI), yakni pendekatan pembelajaran yang mengangkat isu-isu sains yang memiliki implikasi sosial, ekonomi, dan lingkungan secara nyata (Sadler, 2011; Zeidler dkk., 2022). Pendekatan SSI terbukti mampu mendorong kemampuan berpikir kritis, penalaran berbasis bukti, dan literasi sains peserta didik karena menghadirkan permasalahan autentik yang membutuhkan analisis multidimensi (Sadler, 2011). Dalam konteks

penelitian ini, dampak ekonomi korosi global senilai 2,5 triliun dolar AS per tahun (Koch dkk., 2017) dan potensi minyak pala sebagai green corrosion inhibitor yang ramah lingkungan merupakan isu SSI yang sangat relevan untuk diintegrasikan ke dalam materi redoks. Pengintegrasian SSI ke dalam e-majalah berpotensi menjadikan pembelajaran kimia lebih bermakna karena peserta didik tidak hanya memahami konsep secara ilmiah, tetapi juga merefleksikan implikasinya dalam kehidupan nyata (Zeidler dkk., 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengembangan e-majalah pada materi kimia menghasilkan produk yang valid, efektif, dan layak digunakan (Arief dkk., 2021; Yunus & Abidin, 2021; Rahmawati dkk., 2025). Namun, pengembangan e-majalah yang secara khusus mengintegrasikan data kimia komputasi DFT dan simulasi Monte Carlo, sekaligus memuat konten SSI untuk materi redoks, belum pernah dilaporkan sebelumnya. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan tujuan: (1) mengembangkan e-majalah kimia berbasis SSI berbantuan kimia komputasi sebagai suplemen pembelajaran pada materi reaksi redoks, dan (2) mengetahui tingkat validitas e-majalah yang dikembangkan berdasarkan penilaian validator ahli.

## METODE

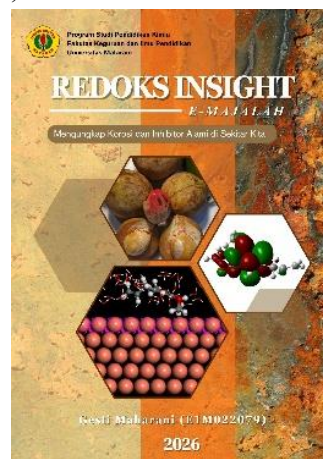
Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed methods yang menggabungkan data kualitatif dan kuantitatif secara komplementer. Data kualitatif diperoleh dari wawancara terstruktur dengan guru kimia, deskripsi proses pengembangan produk, serta catatan masukan dari validator ahli. Data kuantitatif diperoleh dari angket kebutuhan peserta didik (persentase) serta analisis validasi menggunakan indeks Aiken's V. Rancangan pengembangan produk menggunakan model 4D yang dikembangkan oleh Thiagarajan dkk. (1974), meliputi tahap *define* (analisis kebutuhan dan kurikulum melalui wawancara dan angket), *design* (perancangan konten dan tampilan visual e-majalah menggunakan Canva), dan *develop* (pengembangan produk akhir berupa flipbook digital melalui *Heyzine Flipbooks* serta uji validitas oleh ahli). Tahap *disseminate* tidak dilakukan karena berada di luar lingkup penelitian ini. Validasi produk dilakukan oleh tiga validator ahli yang kompeten di bidang kimia komputasi, pendidikan kimia, dan media pembelajaran. Instrumen validasi mencakup empat komponen: kegrafikan (15 indikator), kelayakan isi (5 indikator), kelayakan penyajian

(7 indikator), dan kebahasaan (5 indikator), masing-masing pada skala 1–4. Data kuantitatif hasil validasi dianalisis menggunakan rumus indeks Aiken's V. Data kualitatif berupa masukan dan saran validator dianalisis secara deskriptif sebagai dasar revisi produk.

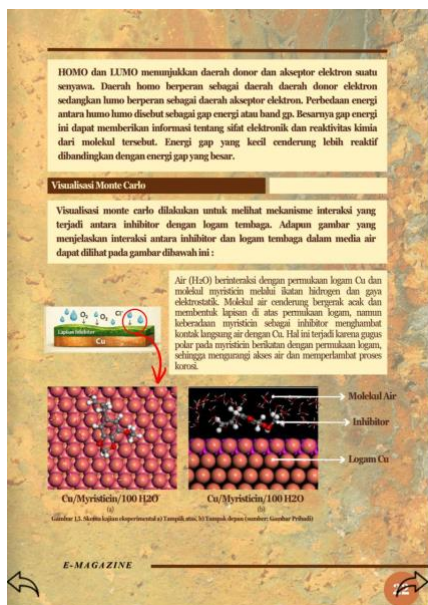
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kuantitatif angket kebutuhan menyatakan bahwa 69,4% siswa merasa materi redoks sulit, 74,3% kesulitan memahami korosi logam, 95,3% membutuhkan media pendukung yang menarik, dan 86,1% tertarik belajar dengan e-majalah. Temuan ini sejalan dengan temuan Suryati dkk. (2022) yang menyatakan bahwa media interaktif berbasis visualisasi mampu meningkatkan literasi sains siswa pada materi redoks dan elektrokimia. Berdasarkan data kualitatif dan kuantitatif tersebut, disimpulkan bahwa terdapat kesenjangan signifikan antara kebutuhan peserta didik dan ketersediaan media pembelajaran yang ada, sehingga pengembangan e-majalah berbantuan kimia komputasi sangat diperlukan (Anggraeni dkk., 2024).

E-majalah (*Redoks Insight*) dirancang dalam format A4 sesuai standar ISO menggunakan aplikasi Canva dengan skema warna coklat-oranye-krem yang konsisten dan mencerminkan tema inhibitor alami (Gambar 1). Produk kemudian dikonversi ke format *flipbook* digital melalui *Heyzine Flipbooks* sehingga dapat diakses secara daring maupun luring melalui berbagai perangkat. E-majalah terdiri atas beberapa bagian utama yaitu bagian pendahuluan, isi, dan bagian penutup. Di dalam produk terdapat infografis simulasi proses adsorpsi Monte Carlo pada permukaan Cu(111) (Gambar 2), serta konten *Socio-Scientific Issues* (SSI) terkait dampak ekonomi korosi global (Gambar 3).



Gambar 1. Cover E-Majalah Kimia



Gambar 2. Informasi infografis simulasi Monte Carlo proses adsorpsi pada permukaan Cu(111)



Gambar 3. Konten Socio-Scientific Issues (SSI) dampak ekonomi korosi global

Desain e-majalah mengacu pada prinsip multimedia learning (Mayer, 2009) dan prinsip desain visual instruksional (Smaldino dkk., 2019).

### Data Kimia Komputasi

Nilai energi adsorpsi hasil simulasi Monte Carlo pada permukaan Cu(111) disajikan pada Tabel 1. Seluruh senyawa aktif minyak pala menunjukkan nilai adsorpsi inhibitor yang jauh lebih negatif dibandingkan dengan molekul air, yang mengindikasikan bahwa ketiga senyawa mampu bersaing secara efektif dengan molekul air dalam menempati permukaan logam, sebuah

syarat utama kinerja inhibitor yang baik (Hadisaputra dkk., 2022; Verma dkk., 2021).

Tabel 1. Nilai Adsorpsi Senyawa Aktif Minyak Pala

Sistem	Adsorpsi Inhibitor (kJ/mol)	Adsorpsi Air (kJ/mol)
Cu(111)/Miristicin/100H <sub>2</sub> O	-110,8236	-38,8963
Cu(111)/Safrol/100H <sub>2</sub> O	-58,5970	-40,0997
Cu(111)/Elemisin/100H <sub>2</sub> O	-123,7997	-40,2898

Sumber: pribadi

Berdasarkan Tabel 1, elemisin menunjukkan nilai adsorpsi inhibitor paling negatif (-123,7997 kJ/mol), diikuti miristicin (-110,8236 kJ/mol), dan safrol (-58,5970 kJ/mol). Nilai adsorpsi yang lebih negatif mencerminkan interaksi yang lebih kuat dan lebih stabil antara molekul inhibitor dengan permukaan Cu(111), sehingga elemisin diprediksi memiliki efisiensi inhibisi tertinggi di antara ketiga senyawa. Tingginya nilai adsorpsi elemisin dapat dikaitkan dengan keberadaan tiga gugus metoksi (-OCH<sub>3</sub>) pada strukturnya yang menyediakan lebih banyak elektron bebas untuk berinteraksi dengan orbital d tembaga dibandingkan miristicin (dua gugus metoksi dan satu metilendoksi) maupun safrol (satu gugus metilendoksi). Hal ini konsisten dengan penelitian Haldhar dkk. (2018) yang melaporkan efisiensi inhibisi ekstrak minyak pala mencapai 87,81% pada konsentrasi 500 mg/L dalam medium H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 M, serta didukung oleh temuan Iyyappan dkk. (2024) yang mencatatkan efisiensi inhibisi hingga 98,04% pada media biodiesel. Selisih signifikan antara nilai adsorpsi inhibitor dan air pada seluruh sistem mengonfirmasi bahwa ketiga senyawa aktif minyak pala memiliki afinitas yang jauh lebih tinggi terhadap permukaan Cu(111) dibandingkan molekul air, sehingga mampu membentuk lapisan pelindung yang efektif pada permukaan logam

### Hasil Validasi Ahli

Hasil validasi kuantitatif oleh tiga validator ahli menggunakan indeks Aiken's V disajikan pada Tabel 2. E-majalah secara keseluruhan memperoleh nilai rata-rata V sebesar 0,84 yang termasuk dalam kategori sangat valid. Data kualitatif dari validator berupa saran dan catatan perbaikan e-majalah prortotipe 1 juga diperoleh sebagai dasar revisi produk sebelum dinyatakan final sebagai produk e-majalah prototipe 2.

**Tabel 2.** Hasil Validasi Ahli E-Majalah Kimia

Komponen Penilaian	Nilai V	Kategori
Kegrafikan	0,85	Sangat Valid
Kelayakan Isi	0,82	Sangat Valid
Kelayakan Penyajian	0,89	Sangat Valid
Kebahasaan	0,87	Sangat Valid
Rata-rata Keseluruhan	0,84	Sangat Valid

Sumber: pribadi

E-majalah terdiri atas 32 halaman yang tersusun dalam tiga bagian utama: bagian pendahuluan (halaman 1–6), bagian isi (halaman 7–26), dan bagian penutup (halaman 27–32). Bagian pendahuluan memuat *cover*, daftar isi, kata pengantar, dan profil redaksi. Bagian isi mencakup penjelasan konsep reaksi redoks dengan infografis proses oksidasi-reduksi, konten SSI tentang dampak ekonomi korosi global, kajian minyak pala (*Myristica fragrans*) sebagai green corrosion inhibitor, visualisasi orbital HOMO-LUMO ketiga senyawa aktif (miristisin, safrol, elemisin) hasil kalkulasi DFT, infografis simulasi Monte Carlo proses adsorpsi pada permukaan Cu(111), serta daftar pustaka. E-majalah dilengkapi dengan fitur interaktif berupa soal match-up sebagai sarana evaluasi mandiri, tautan QR code menuju sumber referensi eksternal, serta navigasi halaman dua arah yang memungkinkan pembaca berpindah langsung ke bagian yang diinginkan melalui platform Heyzine Flipbooks.

Komponen kelayakan penyajian memperoleh nilai V tertinggi (0,89). Secara kualitatif, validator menilai teknik penyajian e-majalah sangat baik, meliputi urutan materi yang logis dan sistematis, konsistensi format antarbagian, penggunaan infografis yang relevan, visualisasi orbital HOMO-LUMO yang informatif, serta soal interaktif *match-up* yang dinilai efektif sebagai sarana evaluasi mandiri. Hal ini selaras dengan teori *multimedia learning* yang dikemukakan Mayer (2009), bahwa peserta didik belajar lebih efektif ketika informasi disajikan melalui kombinasi teks verbal dan representasi visual. Arief dkk. (2021) juga menyimpulkan bahwa e-majalah kimia pada materi redoks yang mengedepankan penyajian visual terstruktur terbukti valid dan efektif dalam mendukung pembelajaran. Integrasi data adsorpsi Monte Carlo dan visualisasi DFT yang ditampilkan secara infografis menjadi nilai

tambah yang membedakan produk ini dari e-majalah kimia yang telah ada sebelumnya.

Komponen kebahasaan memperoleh nilai V sebesar 0,87. Data kualitatif menunjukkan bahwa validator mengapresiasi perpaduan bahasa formal ilmiah yang digunakan dalam penjelasan konsep kimia komputasi dengan bahasa semi-formal yang komunikatif pada bagian pengantar dan infografis. Perpaduan ini dinilai sesuai dengan tingkat perkembangan kognitif dan sosial-emosional peserta didik SMA, sejalan dengan prinsip pengembangan bahan ajar yang efektif (Prastowo, 2019). Karmila dkk. (2023) pada pengembangan majalah kimia di Universitas Mataram juga melaporkan bahwa keterbacaan bahasa menjadi faktor penentu utama penerimaan positif media oleh pengguna.

Komponen kegrafikan mendapat nilai V sebesar 0,85. Validator secara kualitatif memberikan catatan perbaikan bahwa beberapa halaman memiliki tata letak dengan ruang kosong yang kurang proporsional serta pemilihan ukuran font yang perlu disesuaikan pada beberapa bagian infografis. Semua masukan tersebut telah ditindaklanjuti dalam proses revisi produk dengan mengacu pada prinsip keseimbangan, kontras, dan kesatuan elemen visual (Smaldino dkk., 2019). Desain akhir e-majalah menggunakan skema warna coklat-oranye-krem yang secara psikologis memberikan kesan hangat dan natural, selaras dengan tema inhibitor alami yang menjadi inti konten.

Komponen kelayakan isi memperoleh nilai V terendah (0,82) meskipun tetap berada dalam kategori sangat valid. Data kualitatif dari validator mengungkapkan bahwa penjelasan mekanisme interaksi senyawa inhibitor minyak pala dengan permukaan tembaga pada level molekuler perlu diperkuat dengan narasi tambahan agar dapat dipahami secara mandiri oleh peserta didik SMA tanpa bimbingan guru. Sebagai tindak lanjut, dilakukan penambahan infografis yang menjelaskan mekanisme inhibisi secara bertahap dari konsep redoks hingga proses adsorpsi inhibitor pada level molekuler, serta konten SSI tentang dampak ekonomi korosi global (Koch dkk., 2017). Penambahan konten SSI ini bertujuan untuk mendorong peserta didik merefleksikan implikasi sosial, ekonomi, dan lingkungan dari ilmu kimia, sesuai dengan rekomendasi Sadler (2011) dan Zeidler dkk. (2022).

Secara keseluruhan, nilai rata-rata V sebesar 0,84 menempatkan e-majalah ini pada kategori sangat valid dan layak digunakan

sebagai suplemen pembelajaran. Keunggulan utama produk ini dibandingkan e-majalah kimia sejenis (Arief dkk., 2021; Yunus & Abidin, 2021) terletak pada integrasi data kimia komputasi DFT dan simulasi Monte Carlo yang memvisualisasikan mekanisme inhibisi korosi pada level submikroskopik aspek yang selama ini menjadi tantangan utama dalam pembelajaran kimia SMA (Hardinungrahningsih dkk., 2022). Penelitian Wildayani dkk. (2023) juga mengonfirmasi bahwa media pembelajaran berbantuan kimia komputasi efektif meningkatkan pemahaman konsep kimia pada level submikroskopik. Dengan demikian, e-majalah ini berpotensi menjadi suplemen pembelajaran yang tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep redoks, tetapi juga menumbuhkan literasi sains dan kemampuan berpikir kritis peserta didik (Suryati dkk., 2022; Sadler, 2011).

Kontribusi e-majalah ini terhadap pemahaman konsep redoks bertumpu pada tiga mekanisme pedagogis yang saling mendukung. Pertama, penyajian konten redoks melalui kombinasi infografis, teks ilmiah, dan visualisasi molekuler selaras dengan prinsip Multimedia Learning yang dikemukakan Mayer (2009), bahwa pemahaman konseptual yang lebih dalam terjadi ketika informasi verbal dan visual disajikan secara terintegrasi dan terpadu. Kedua, visualisasi orbital HOMO-LUMO dan simulasi Monte Carlo yang ditampilkan dalam e-majalah secara langsung mendukung penguasaan representasi submikroskopik level yang paling sulit dijangkau peserta didik dalam kimia (Hardinungrahningsih dkk., 2022). Ketiga, integrasi konten SSI tentang dampak ekonomi korosi global menjadikan pembelajaran kimia kontekstual dan bermakna: peserta didik diajak tidak hanya memahami reaksi redoks secara ilmiah, tetapi juga menganalisis implikasinya terhadap ekonomi global, keberlanjutan lingkungan, dan potensi lokal minyak pala NTB sebagai solusi green chemistry. Interaksi antara pengetahuan ilmiah, data komputasi, dan isu sosial inilah yang membedakan e-majalah ini dari media pembelajaran kimia konvensional dan berpotensi menumbuhkan literasi sains serta kemampuan berpikir kritis peserta didik secara holistik.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan yang menggunakan pendekatan *mixed methods* dengan model 4D, dapat

disimpulkan sebagai berikut. Pertama, e-majalah kimia berbantuan kimia komputasi sebagai suplemen pembelajaran pada materi reaksi redoks berhasil dikembangkan melalui tahap *define*, *design*, dan *develop*. Produk memuat materi redoks yang dikontekstualisasikan dengan korosi tembaga, kajian minyak pala (*Myristica fragrans*) sebagai *green corrosion inhibitor*, data DFT (HOMO, LUMO, *energy gap*), serta nilai adsorpsi Monte Carlo senyawa aktif pala pada permukaan Cu(111). Elemisin menunjukkan nilai adsorpsi paling negatif (-123,7997 kJ/mol), mengindikasikan interaksi paling kuat dengan permukaan tembaga. Kedua, tingkat validitas e-majalah berada pada kategori sangat valid berdasarkan indeks Aiken's V dengan nilai rata-rata 0,84 yang mencakup kegrafikan (0,85), kelayakan isi (0,82), kelayakan penyajian (0,89), dan kebahasaan (0,87). Peneliti selanjutnya disarankan melanjutkan penelitian ke tahap uji kepraktisan dan efektivitas di lapangan, serta memperkaya fitur interaktif produk seperti simulasi molekuler dinamis dan integrasi dengan platform pembelajaran digital.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aiken, L. R. (1985). Three coefficients for analyzing the reliability and validity of ratings. *Educational and Psychological Measurement*, 45(1), 131–142.
- Anggraeni, M. E., Abudarin, A., Sadiana, I. M., Fatah, A. H., & Asi, N. B. (2024). The needs analysis for the development of differentiated learning e-worksheet on the acid-base concept. *Jurnal Ilmiah Kanderang Tingang*, 15(2), 370–376.
- Arief, M. D., Auliah, A., & Hardin, H. (2021). Pengembangan E-Magazine Reaksi Reduksi dan Oksidasi sebagai media pembelajaran kimia kelas X SMA/MA. *Jurnal Inovasi Pembelajaran Kimia*, 3(2), 148–163.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2022). *Chemistry: The Central Science (15th ed.)*. Pearson Education.
- Cruz, A., Sánchez-Hernández, E., Teixeira, A., Oliveira, R., Cunha, A., & Martín-Ramos, P. (2024). Phytoconstituents and antimicrobial activity of nutmeg (*Myristica fragrans* Houtt.) against phytopathogens. *Molecules*, 29(2), 471.

- Hadisaputra, S., Irham, A. D., Purwoko, A. A., Junaidi, E., & Hakim, A. (2023). Development of QSPR models for furan derivatives as corrosion inhibitors for mild steel. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(8), 100207.
- Hadisaputra, S., Purwoko, A. A., & Hamdiani, S. (2022). Copper corrosion protection by 4-hydrocoumarin derivatives: Insight from DFT, Ab initio, and Monte Carlo simulation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(2), 413–428.
- Hadisaputra, S., Purwoko, A. A., Hakim, A., Prasetyo, N., & Hamdiani, S. (2022). Corrosion inhibition properties of phenyl phthalimide derivatives against carbon steel: DFT, MP2, and Monte Carlo simulation studies. *ACS Omega*, 7(36), 33054–33066.
- Hadisaputra, S., Purwoko, A. A., Savalas, L. R. T., Prasetyo, N., Yuanita, E., & Hamdiani, S. (2020). Quantum chemical and Monte Carlo simulation studies on caffeine derivatives against corrosion of copper. *Coatings*, 10(11), 1086.
- Haldhar, R., Prasad, D., & Saxena, A. (2018). Myristica fragrans extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2290–2301.
- Hardinungrahningsih, T., Rahmawati, Y., & Suryani, E. (2022). An analysis of preservice chemistry teachers' misconceptions of reduction-oxidation reactions. *Journal of Technology and Science Education*, 12(2), 448–465.
- Heliyon. (2024). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review. *Heliyon*, 10(13), e33748.
- Iyyappan, S., Kumar, K. P. V., & Ponram, P. (2024). Corrosion inhibition by Myristica fragrans extract in neem biodiesel: Machine learning and traditional methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 238(18), 8829–8837.
- Karmila, S., Rahmawati, R., Sofia, B. F. D., Hadisaputra, S., Loka, I. N., Al-Idrus, S. W., & Junaidi, E. (2023). Majalah kimia untuk SMA tentang sintesis senyawa turunan benzena. *Chemistry Education Practice*, 6(2), 120–127.
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2017). International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. NACE International.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Prastowo, A. (2019). *Panduan Kreatif Membuat Bahan Ajar Inovatif (8th ed.)*. Diva Press.
- Rahmawati, R., Hidayati, H., & Al-Idrus, S. W. (2025). Pengembangan majalah kimia dengan konten kondensasi. *Chemistry Education Practice*, 8(2), 290–298.
- Retnawati, H. (2017). Analisis Kuantitatif Instrumen Penelitian. Parama Publishing.
- Sadler, T. D. (2011). *Socio-scientific issues in the classroom: Teaching, learning and research*. Contemporary Trends and Issues in Science Education, 39. Springer.
- Smaldino, S. E., Lowther, D. L., Mims, C., & Russell, J. D. (2019). *Instructional Technology and Media for Learning (12th ed.)*. Pearson.
- Sukmawati, W., Kadarohman, A., Sumarna, O., & Sopandi, W. (2020). Pengembangan bahan ajar kimia berbasis conceptual change text pada materi redoks. *EDUSAINS*, 12(2), 243–251.
- Suryati, S., Surningsih, S., & Mashami, R. A. (2022). Pengembangan e-modul interaktif reaksi redoks dan elektrokimia berbasis nature of science untuk literasi sains. *Reflection Journal*, 2(1), 14–20.
- Thiagarajan, S., Dorothy, S. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional Development for Training Teachers of Exceptional Children*. Indiana University.
- Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2021). Molecular structural aspects of organic corrosion inhibitors: An overview. *Journal of Molecular Liquids*, 338, 116923.
- Wildayani, H., Nugraha, A. W., & Nurfajriani. (2023). Development of computational chemistry-based learning media on isomers of organic chemical reaction. *Jurnal Inovasi Pendidikan Kimia*, 17(2), 3321–3330.
- Yunus, M., & Abidin, Z. (2021). Pengembangan majalah elektronik sebagai media pembelajaran IPA di sekolah dasar. *Jurnal Basicedu*, 5(4), 2104–2113.

Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Applebaum, S. M.,  
& Callahan, B. E. (2022). Advancing  
reflective judgment through  
socioscientific issues. *Journal of Research  
in Science Teaching*, 59(5), 934–963.