

MODEL ITS-G DIGITAL: MENGINTEGRASIKAN INSTRUMEN GCI UNTUK MENUMBUHKAN KARAKTER EKOTEOLOGIS DI MADRASAH

Zuraida^{1*}, Syarifah Asyura², Rahmad Rizki Fazli³, Melly Ernita⁴, M. Zakky Dhiya
Ulhaq⁵, Hafiz Al-Isra⁵, Miftahussyifa⁵, Sofia Rubia⁵

¹ Guru Kimia, MAN 1 Aceh Barat. Jalan Sisingamangaraja, Kecamatan Johan Pahlawan, Gampong Drien
Rampak, Kabupaten Aceh Barat 23617, Indonesia

² Dosen Departemen Kesehatan, Universitas Ubudiyah Indonesia. Jalan Alue Naga Desa Tibang, Kecamatan
Syiah Kuala, Banda Aceh 23114, Indonesia

³ Dosen Departemen Pendidikan Kimia, FKIP, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, 23111, Indonesia

⁴ Department of Pharmaceutical and Chemical Engineering, School of Pharmacy and School of Chemistry and
Chemical Engineering, Queen's University Belfast. University Road, Belfast BT7 1NN, Northern Ireland, United
Kingdom.

⁵ Siswa/i MAN 1 Aceh Barat. Jalan Sisingamangaraja, Kecamatan Johan Pahlawan, Gampong Drien Rampak,
Kabupaten Aceh Barat 23617, Indonesia

*Korespondensi Penulis: zuraidazuraida00043@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan, memvalidasi, dan mengevaluasi efektivitas **Model ITS-G Digital** yang terintegrasi dengan instrumen **GreenChem Innovator (GCI)** untuk mengoptimalkan pembelajaran kimia hijau di Madrasah. GCI dikembangkan sebagai solusi deterministik untuk mengatasi keterbatasan akurasi dan risiko halusinasi data pada AI generatif umum dalam materi saponifikasi minyak jelantah. Metode penelitian menggunakan pendekatan **Penelitian Pengembangan (Developmental Research)** dengan uji efektivitas melalui desain *One-Group Pretest-Posttest* terhadap 40 siswa kelas XII MAN 1 Aceh Barat tahun ajaran 2025/2026. Hasil penelitian menunjukkan tingkat keterlaksanaan model mencapai rata-rata 91,80% (kategori sangat baik). Secara kuantitatif, instrumen GCI terbukti valid sebagai prediktor kualitas produk dengan nilai Koefisien Korelasi Ganda (*Multiple R*) sebesar 0,8547 dan signifikansi $p < 0,05$. Daya penjelas model (*Adjusted R²*) mencapai 71,06%, yang efektif memandu siswa menghasilkan produk sabun dengan tingkat keamanan 100% sesuai standar SNI. Implementasi model secara signifikan meningkatkan Literasi Digital siswa dengan nilai *N-Gain* 0,78 (kategori tinggi) dan memperkuat Karakter Ekoteologis (sikap *Hubbul Bi'ah*) dengan *N-Gain* 0,83 (kategori tinggi). Hasil uji *Paired Sample t-Test* mengonfirmasi perbedaan signifikan pada karakter siswa sebelum dan sesudah intervensi. Disimpulkan bahwa Model ITS-G Digital merupakan inovasi pembelajaran yang valid dan reliabel dalam menyinergikan teknologi kecerdasan buatan dengan nilai teologis untuk membentuk profil "Khalifah Saintis" yang berwawasan lingkungan.

Kata Kunci: *ITS-G Digital, GreenChem Innovator, Kimia Hijau, Karakter Ekoteologis, Khalifah Saintis.*

ITS-G DIGITAL MODEL: INTEGRATING GCI INSTRUMENT TO FOSTER ECOTHEOLOGICAL CHARACTER IN MADRASAH

Abstract

This study aims to develop, validate, and evaluate the effectiveness of the ITS-G Digital Model, integrated with the GreenChem Innovator (GCI) instrument, to optimize green chemistry instruction in Madrasah. GCI was developed as a deterministic tool to address the accuracy limitations and risks of data hallucination prevalent in general generative AI models when applied to waste oil saponification. The research employed a Developmental Research approach, with effectiveness testing conducted via a One-Group Pretest-Posttest design involving 40 twelfth-grade students at MAN 1 Aceh Barat during the 2025/2026 academic year. Results indicate that the ITS-G Digital Model achieved a high implementation rate of 91.80% (very good category). Quantitatively, the GCI instrument proved valid as a product quality predictor, yielding a Multiple Correlation Coefficient

(**Multiple R**) of 0.8547 with a significant p -value ($p < 0.05$). The model's explanatory power (**Adjusted R²**) reached 71.06%, which successfully guided students in producing soap with 100% compliance with SNI safety standards. Furthermore, the implementation significantly enhanced students' Digital Literacy with an **N-Gain of 0.78** (high category) and strengthened their Ecotheological Character (*Hubbul Bi'ah* attitude) with an **N-Gain of 0.83** (high category). Paired Sample t -Test results confirmed a significant difference in student character development following the intervention. It is concluded that the ITS-G Digital Model is a valid, accurate, and reliable pedagogical innovation for synergizing artificial intelligence with theological values to foster the "**Khalifah Saintis**" (Scientist Caliph) profile.

Keywords: ITS-G Digital, GreenChem Innovator, Green Chemistry, Ecotheological Character, Scientist Caliph.

PENDAHULUAN

Pendidikan sains di era *Society 5.0* menuntut integrasi teknologi cerdas yang selaras dengan kesadaran ekologis. Di lingkungan madrasah, pembelajaran kimia memiliki dimensi unik melalui perspektif ekoteologi, di mana sains dipandang sebagai instrumen untuk menunaikan tanggung jawab manusia sebagai *khalifah fil ardh* atau penjaga kelestarian bumi (Widiastuty & Anwar, 2025). Secara institusional, kesadaran ini diwujudkan melalui program Adiwiyata, sebuah inisiatif nasional yang bertujuan membentuk warga sekolah yang bertanggung jawab dalam perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup (Pahru *et al.*, 2021). Namun, tantangan utama dalam praktikum kimia konvensional, khususnya pada materi saponifikasi, adalah tingginya risiko limbah beracun dan penggunaan metode yang kurang eksploratif (*cookbook*) (Lukum *et al.*, 2024). Hal ini sering kali kontradiktif dengan semangat pelestarian lingkungan yang diusung oleh sekolah Adiwiyata (Budiaman *et al.*, 2024).

Di tengah pesatnya digitalisasi pendidikan, pemanfaatan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) muncul sebagai solusi potensial untuk meminimalkan dampak lingkungan dari aktivitas laboratorium (Dahnial *et al.*, 2024). Namun, literatur terbaru menunjukkan adanya tantangan signifikan dalam penggunaan AI generatif umum di bidang kimia. Ruff *et al.* (2024) dalam penelitiannya pada *Journal of Chemical Education* melaporkan bahwa *Large Language Models* (LLMs) seperti ChatGPT sering kali memberikan respons yang tidak jelas (*vague*) dan keliru (*erroneous*) ketika diminta menyusun metode kimia tingkat lanjut, terutama dalam modifikasi kimia hijau (*green chemistry*).

Ketidakpastian referensi dan kesalahan teknis pada AI umum tersebut berdampak pada rendahnya kepercayaan diri siswa dalam merancang prosedur eksperimen yang aman dan presisi (Lumbu *et al.*, 2025). Fenomena ini menunjukkan adanya kebutuhan mendesak akan instrumen digital yang terspesialisasi dan memiliki akurasi empiris untuk mendukung pembelajaran kimia hijau di madrasah (Widarti *et al.*, 2025).

Inovasi Model ITS-G Digital (*Inquiry, Technology, Synthesis, Green Chemistry*) hadir sebagai solusi strategis untuk menjembatani kesenjangan tersebut. Sebagai jantung dari model ini, dikembangkan instrumen **GreenChem Innovator (GCI)**. Perbedaan mendasar antara LLM (seperti ChatGPT) dan model **GCI** terletak pada sifat keluaran (*output*) terhadap masukan (*input*) yang sama. LLM beroperasi secara **stokastik-generatif**, di mana sistem memprediksi token berikutnya berdasarkan distribusi probabilitas, sehingga sering kali menghasilkan variasi teks meskipun diberikan instruksi yang identik.

Sebaliknya, **GCI** yang dibangun menggunakan algoritma **Regresi Linear Berganda** bersifat **deterministik secara operasional**. Meskipun proses pembentukan modelnya bersifat probabilistik (mengakomodasi residu atau error epsilon dari data empiris), namun setelah koefisien regresi ditetapkan, model ini akan menghasilkan nilai prediksi yang eksak dan konsisten setiap kali parameter input yang sama dimasukkan. Hal ini memberikan reliabilitas teknis yang lebih tinggi untuk aplikasi laboratorium dibandingkan sifat generatif LLM. Instrumen GCI berfungsi sebagai 'filter keamanan' yang memprediksi kualitas produk sabun secara virtual melalui

optimasi rasio NaOH dan variasi ekstrak alami sebelum siswa melakukan eksekusi fisik. Dengan demikian, GCI secara langsung menerapkan prinsip pencegahan limbah (*waste prevention*). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi model ITS-G Digital yang terintegrasi dengan instrument GCI guna mentransformasi praktikum kimia di Madrasah Adiwiyata menjadi sarana pembentukan karakter "Khalifah Saintis" yang cerdas secara digital dan memiliki integritas moral dalam menjaga keberlanjutan ekosistem.

METODE

1. Desain dan Subjek Penelitian

Penelitian pengembangan (*Developmental Research*) ini bertujuan memvalidasi Model ITS-G Digital yang diintegrasikan dengan instrumen *GreenChem Innovator* (GCI). Instrumen GCI berbasis *Progressive Web App* (PWA) dikembangkan berdasarkan data empiris tahun 2022–2025 dan dapat diakses melalui <https://green-chem-flow.base44.app>. Efektivitas model diuji menggunakan desain *One-Group Pretest-Posttest* terhadap 40 siswa kelas XII MIPA 3 MAN 1 Aceh Barat pada Semester Ganjil 2025/2026 yang dipilih melalui teknik *purposive sampling*.

2. Pengembangan Instrumen: GreenChem Innovator (GCI)

GCI dikembangkan berbasis *Low-Code Development Platform* (LCDP) dengan arsitektur *Progressive Web App* (PWA) untuk menjamin aksesibilitas *mobile-first*. Secara komputasi, GCI beroperasi sebagai **prediktor deterministik** menggunakan algoritma **Regresi Linear Berganda**. Instrumen ini memproses input massa NaOH dan jenis ekstrak limbah untuk memprediksi pH produk secara *real-time* melalui fungsi *dynamic data lookup*. Meskipun memiliki presisi tinggi, model tetap mengakomodasi variabel residu epsilon guna mengantisipasi fluktuasi lingkungan saat praktikum riil.

3. Prosedur Penelitian (Sintaks ITS-G Digital)

Implementasi model mengikuti tujuh fase sekuensial:

1. **Eksplorasi:** Identifikasi dampak limbah minyak jelantah.
2. **Desain Digital:** Input variabel ester ke dalam instrument GCI.
3. **Optimasi:** Penentuan formula efisien berbasis data digital.
4. **Praktikum Fisik:** Sintesis sabun menggunakan ekstrak alami.
5. **Refleksi:** Analisis keberhasilan melalui *meaningful learning*.
6. **Uji Kualitas:** Validasi pH produk sesuai standar SNI.
7. **Diseminasi:** Presentasi melalui platform *socio-entrepreneurship*.

4. Teknik Analisis Data

Data dikumpulkan melalui lembar observasi keterlaksanaan model, tes literasi digital, dan skala sikap *Hubbul Bi'ah*. Teknik analisis yang digunakan meliputi:

- **Analisis Akurasi AI:** Regresi Linear Berganda untuk mengukur korelasi variabel input terhadap pH sabun dan *Green Score*.
- **Uji Efektivitas:** Analisis *Normalized Gain (N-Gain)* untuk mengukur peningkatan kompetensi dan *Paired Sample t-Test* untuk menguji signifikansi perubahan sikap ekoteologis.
- **Statistik Deskriptif:** Digunakan untuk mengukur persentase keterlaksanaan sintaks model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Akurasi instrument GCI

Validitas model ITS-G Digital secara empiris didukung oleh kinerja instrumen GCI yang menggunakan algoritma **Regresi Linear Berganda**. Berdasarkan uji statistik, ditemukan hubungan yang sangat kuat antara variabel input (massa NaOH dan pH ekstrak) terhadap variabel output (pH riil produk), dengan nilai **Koefisien Korelasi Ganda (*Multiple R*) sebesar 0,8547**. Hal ini mengindikasikan bahwa model memiliki reliabilitas yang tinggi dalam memetakan interaksi kimia pada proses saponifikasi minyak jelantah. Model prediksi yang dihasilkan,

$$Y = -22.67 + 0.46X_1 + 0.31X_2 + \varepsilon$$

Model ini memiliki nilai signifikansi $p < 0,05$ ($2,04 \times 10^{-8}$), yang mengonfirmasi bahwa secara simultan variabel-variabel tersebut merupakan determinan utama dalam menentukan kualitas produk. Meskipun nilai *Adjusted R Square* (71,06%) menunjukkan adanya pengaruh variabel luar sebesar 28,94%—seperti fluktuasi suhu reaksi atau konsistensi pengadukan manual—instrumen ini terbukti efektif sebagai panduan optimasi formulasi bagi siswa. Penggunaan GCI berhasil memitigasi risiko kegagalan praktikum, sehingga seluruh produk akhir yang dihasilkan siswa (100%) berada dalam rentang pH aman (9–11) sesuai standar SNI.

Untuk mempertegas posisi instrumen GCI dalam ekosistem kecerdasan buatan untuk pendidikan, Tabel 1 merangkum perbedaan fundamental antara penggunaan AI generatif umum dengan model prediktif deterministik yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 1, terlihat bahwa superioritas GCI terletak pada sifat deterministiknya. Hal ini sejalan dengan kekhawatiran Ruff *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa sifat stokastik pada LLM sering kali membahayakan akurasi prosedur kimia. Temuan ini memperkuat urgensi penggunaan instrumen digital terspesialisasi dalam pendidikan sains. Berbeda dengan *Large Language Models* (LLMs) yang bersifat **stokastik-generatif**—di mana prediksi teks sering kali mengalami "halusinasi" data—instrumen GCI beroperasi secara **deterministik**.

Melalui "Mesin Prediksi Formula" (A.F.P), GCI memberikan kepastian matematis berdasarkan hukum stoikiometri. Hal ini tidak hanya meningkatkan kepercayaan diri siswa dalam merancang eksperimen, tetapi juga mengintegrasikan prinsip kimia hijau (pencegahan limbah) secara presisi. Transformasi digital di Madrasah, melalui model ini, berhasil menjembatani kecakapan teknologi dengan tanggung jawab etis-teologis (Khalifah Saintis).

Penelitian Ruff, Franz, dan West (2024) melaporkan bahwa penggunaan *Large Language Models* (LLMs) seperti ChatGPT dalam perancangan prosedur kimia sering kali menghasilkan respons yang samar (*vague*) dan

keliru (*erroneous*), yang pada akhirnya menurunkan kepercayaan diri siswa dalam merancang eksperimen. LLM pada dasarnya beroperasi secara stokastik (probabilistik), sehingga rentan terhadap halusinasi data yang membahayakan akurasi prosedur kimia

Tabel 1. Perbandingan Analisis: *Generative AI* vs. GreenChem Innovator (GCI)

Fitur Perbandingan	AI Generatif Umum (Contoh: ChatGPT)	GreenChem Innovator (GCI)
Sifat Operasional	Stokastik-Generatif: Output bervariasi meski input sama (prediksi probabilitas kata).	Deterministik-Empiris: Output konsisten untuk input yang sama (berdasarkan model regresi statistik).
Akurasi Stoikiometri	Rentan terhadap halusinasi data	Presisi Tinggi: Berdasarkan data eksperimen riil yang telah divalidasi secara statistik.
Prinsip Keamanan	Respons sering kali samar (<i>vague</i>) untuk prosedur kimia tingkat lanjut.	Filter Keamanan: Memprediksi pH riil dan memberikan "Green Score" sebelum praktikum fisik dimulai.
Konteks Lokal	Global dan Umum.	Spesifik: Dिसesuaikan dengan karakteristik limbah minyak jelantah dan nilai Ekoteologi Madrasah.
Dampak Pembelajaran	Siswa cenderung menjadi pengguna pasif (<i>copy-paste</i>).	Siswa menjadi Khalifah Saintis yang aktif melakukan optimasi data secara kritis.

Sebaliknya, GCI menyediakan pendekatan berbasis data yang rigid, memastikan bahwa setiap simulasi formulasi sabun aman (pH 9-11 sesuai SNI) sebelum siswa melangkah ke laboratorium. Hal ini menegaskan bahwa untuk pendidikan sains, pengembangan alat bantu digital terspesialisasi lebih efektif daripada penggunaan *chatbot* umum yang tidak memiliki basis perhitungan stoikiometri atau data empiris kimia yang presisi. Model GCI memberikan akurasi prediksi yang signifikan dalam mengarahkan siswa menuju formulasi yang sesuai standar SNI.

2. Analisis Keterlaksanaan Model ITS-G Digital

Data observasi guru terhadap aktivitas 40 siswa menunjukkan sintaks ITS-G Digital dapat diimplementasikan dengan sangat baik di Madrasah. Tingkat keterlaksanaan model dirangkum dalam Tabel 2. Fokus utama model ini adalah mengubah limbah minyak jelantah melalui alur digital sebelum eksekusi fisik. Implementasi model ITS-G Digital pada materi saponifikasi menunjukkan integrasi yang sinergis antara teknologi AI, prinsip kimia hijau, dan pembentukan karakter ekoteologis.

Tabel 2. Persentase Keterlaksanaan Sintaks

No.	Fase Model ITS-G	Persentase Keterlaksanaan	Kategori
1.	Fase 1: Inkuiri Masalah Lingkungan (I)	92,00%	Sangat Baik
2.	Fase 2: Perancangan Sintesis Hijau dengan instrumen GCI (H & S)	95,00%	Sangat Baik
3.	Fase 3: Optimasi Formula dan Presentasi (I & H)	94,00%	Sangat Baik
4.	Fase 4: Praktikum Fisik (S)	90,00%	Baik
5.	Fase 5: Analisis Hasil dan Perbandingan Data (I & H)	93,00%	Sangat Baik
6.	Fase 6: Validasi Produk dan Uji Kualitas (H & S)	88,00%	Baik
7.	Fase 7: Diseminasi dan <i>Socio-Entrepreneurship</i>	91,00%	Sangat Baik
	Kerlaksanaan	91.86%	Sangat Baik

Berdasarkan hasil observasi selama proses penelitian, tingkat keterlaksanaan model ITS-G Digital mencapai rata-rata **91,80%**. Persentase ini menunjukkan bahwa model berada pada kategori **Sangat Efektif**. Data per fase (Tabel 2) menunjukkan bahwa seluruh tahapan sintaks dapat diimplementasikan dengan presisi tinggi oleh siswa dan pendidik.

Fokus utama model ini adalah mengubah limbah minyak jelantah melalui alur digital sebelum eksekusi fisik. Data per fase (Tabel 2) menunjukkan bahwa seluruh tahapan sintaks dapat diimplementasikan dengan presisi tinggi oleh siswa dan pendidik. Tingkat keterlaksanaan tertinggi tercapai pada **Fase 2 (95,00%)**, yang mengindikasikan bahwa integrasi Instrumen GCI dalam perancangan sintesis hijau sangat membantu siswa dalam merumuskan prosedur eksperimen secara efisien.



Gambar 1. Foto fase 4 : praktikum fisik



Gambar 2. Dokumentasi Uji Busa



Gambar 3. Foto sabun pada proses *curing*

Sementara itu, keterlaksanaan pada aspek teknis seperti praktikum fisik (Fase 4) dan validasi produk (Fase 6) tetap berada pada kategori baik, meskipun memerlukan ketelitian lebih tinggi dalam kontrol variabel kimia di lapangan.

Dukungan pemerintah terhadap model ini terlihat secara eksplisit melalui Diseminasi dan *Socio-Entrepreneurship* di *Stand Comsrat 8 Actualization* di MAN 1 Aceh Barat (Gambar 4), dan arahan Wakil Bupati Aceh Barat (Gambar 5), yang menyarankan agar produk inovasi siswa segera diintegrasikan ke dalam pameran UKM daerah guna memperluas dampak ekonominya.



Gambar 4. Dokumentasi Diseminasi dan *Socio-Entrepreneurship* di *Stand Comsrat 8 Actualization* di MAN 1 Aceh Barat



Gambar 5. Dokumentasi Arahan Wakil Bupati Aceh Barat dalam mendukung hilirisasi produk ITS-G Digital pada pameran sektor UKM lokal.

3. Hasil Peningkatan Literasi Digital (Penggunaan instrument GCI)

Efektivitas model dalam meningkatkan kompetensi siswa dianalisis melalui nilai kenaikan presentase tiap-tiap indikator literasi digital. Data perolehan skor siswa disajikan dalam Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Rekapitulasi Rerata Skor Peningkatan Literasi Digital

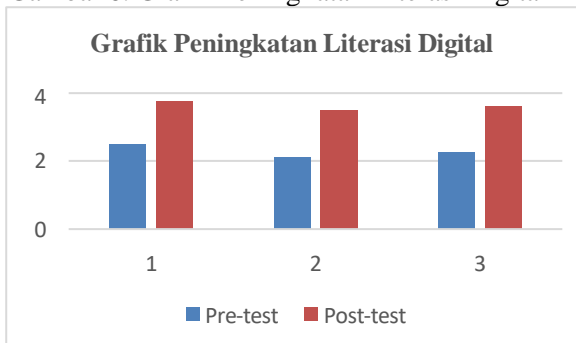
Indikator Literasi Digital	Skor Rerata Awal (Skala 4)	Skor Rerata Akhir (Skala 4)	Kenaikan (%)
Kemampuan Mengoperasikan GCI	2.50	3.75	50,00%
Kemampuan Menganalisis Data Prediksi (<i>Green Score/pH</i>)	2.10	3.50	66,70%
Kemampuan Mengambil Keputusan Formulasi Berbasis Data	2.25	3.60	60,00%

Catatan: Skor rata-rata dihitung berdasarkan instrumen angket dengan skala likert 1-4.

Tabel 3 menunjukkan peningkatan signifikan pada Literasi Digital siswa dengan kategori **Tinggi**. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan alat bantu digital dalam merancang

eksperimen membantu siswa memahami data kompleks secara lebih intuitif. Adapun kenaikan presentasinya dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Grafik Peningkatan Literasi Digital



Catatan: Sumbu Y mewakili skor rerata pada skala likert 1-4

Penerapan model ITS-G Digital memberikan dampak positif yang signifikan terhadap literasi digital siswa, sebagaimana disajikan pada Gambar 6. Lonjakan signifikan pada literasi digital siswa, terutama pada kemampuan **Menganalisis Data Prediksi** yang mencapai kenaikan 66,70%. Kenaikan skor rerata pada setiap indikator sebesar 58,90% menunjukkan efektivitas instrument GCI dalam memfasilitasi inkuiri terbimbing. Siswa kini mampu beralih dari spekulasi ke pengambilan keputusan formulasi sabun berbasis data ilmiah, yang menjadi kunci keberhasilan proses *Meaningful Learning* dalam memahami reaksi esterifikasi/saponifikasi.

4. Hasil Pembentukan Khalifah Saintis Madrasah

Peningkatan karakter siswa diukur melalui Angket Sikap Kesadaran Lingkungan (*Khalifah Saintis*) yang diberikan kepada 40 siswa (*Pre-test* dan *Post-test*) dapat di lihat pada Tabel 4.

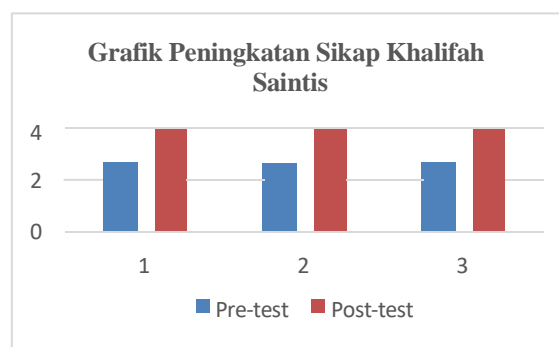
Keberhasilan internalisasi nilai-nilai ekoteologis siswa dikonfirmasi melalui perbandingan skor sikap sebelum dan sesudah perlakuan pada Gambar 7. Pada tabel 4, Rerata peningkatan sikap Kesadaran Lingkungan sebesar 41,00% mengonfirmasi bahwa siswa tidak hanya berkembang secara kognitif, tetapi juga memiliki integritas moral yang bertanggung jawab dalam pengelolaan limbah.

Tabel 4. Data Analisis Peningkatan Sikap Khalifah Saintis (n=40).

Aspek Sikap	Skor Rerata <i>Pre-test</i> (Skala 4)	Skor Rerata <i>Post-test</i> (Skala 4)	Kenaikan (%)
Komitmen Ekoteologi & Konservasi	2.70	3.80	40,70%
Peran Aktif <i>Khalifah fil Ardh</i> (Inovasi & Tanggung Jawab)	2.65	3.75	41,50%
Rata-Rata Peningkatan Kesadaran Lingkungan	2.68	3.78	41,00%

Keberhasilan di ranah karakter pada grafik (Gambar 7) menunjukkan peningkatan pada aspek **Peran Aktif *Khalifah fil Ardh***. Hal ini mengonfirmasi keberhasilan model dalam mengintegrasikan *Green Chemistry* dengan **Kurikulum Cinta (*Hubbul Bi'ah*)**, menegaskan bahwa siswa tidak hanya cerdas secara kognitif, tetapi juga memiliki integritas dan tanggung jawab lingkungan yang termanifestasi dalam tindakan nyata (mengolah limbah jelantah).

Gambar 7. Grafik Peningkatan Skor Sikap Khalifah Saintis (*Pre-test vs Post-test*)



Catatan: Skor rerata dihitung berdasarkan instrumen angket dengan skala likert 1-4

5. Analisis Efektivitas Model (N-Gain & Uji-t) dan Signifikansi Perubahan Karakter

Untuk mengukur efektivitas penerapan model ITS-G Digital, dilakukan analisis

Normalized Gain (*N-Gain*) guna mengetahui peningkatan skor siswa secara objektif dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Data Peningkatan Literasi Digital dan Karakter Ekoteologis

Indikator	Pre-test	Post-test	N-Gain	Kategori
Literasi Digital	2.28	3.62	0.78	Tinggi
Karakter Ekoteologis	2.68	3.78	0.83	Tinggi

Berdasarkan data perolehan skor literasi digital, diperoleh nilai *N-Gain* sebesar **0,78** yang masuk dalam kategori '**Tinggi**'. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan GCI dalam praktikum memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap kemampuan kognitif siswa dalam mengintegrasikan teknologi dengan prinsip kimia hijau. Selanjutnya, hasil analisis *Pre-test* dan *Post-test* pada skor sikap karakter ekoteologis diuji menggunakan *Paired Sample t-Test*.

Nilai *N-Gain* untuk aspek karakter tercatat sebesar **0,83** (kategori '**Tinggi**'). Integrasi nilai *Hubbul Bi'ah* ke dalam praktikum kimia memberikan dimensi moral pada sains yang selama ini sering dianggap bebas nilai. Sejalan dengan perspektif Widiastuty dan Anwar (2025) mengenai Ekoteologi Islam, model ITS-G Digital berhasil mengontekstualisasikan peran siswa sebagai *khalifah fil ardh* (penjaga bumi) melalui pengelolaan limbah minyak jelantah.

Data menunjukkan bahwa ketika siswa diberikan alat untuk melihat dampak lingkungan dari tindakan mereka secara digital (melalui *Green Score*), komitmen konservasi mereka meningkat. Fenomena ini membuktikan bahwa program Adiwiyata (Pahru et al., 2021) akan jauh lebih efektif jika didukung oleh instrumen sains yang kuat. "Khalifah Saintis" bukan lagi sekadar slogan, melainkan profil lulusan madrasah yang mampu memadukan kecerdasan teknologi dengan integritas etika lingkungan. Secara keseluruhan, model ini telah berhasil menjembatani kesenjangan antara kemajuan

kecerdasan buatan dan tanggung jawab teologis terhadap kelestarian lingkungan.

6. Validasi Keberhasilan Produk dan Peran Krusial instrument GCI

Temuan peningkatan karakter ekoteologis, serta validasi penggunaan alat GCI sebagai prediktor kualitas produk (ditunjukkan pada Gambar 8), dan sebagai alat kuantifikasi keberlanjutan berdasarkan *Green Score* merupakan poin inti dari inovasi ini. Fitur **Analisis Komparatif** melalui *Green Score* mendorong siswa melakukan **Optimasi Berkelanjutan** (Fase 3).

Selain itu, berdasarkan uji statistik diperoleh nilai signifikansi < 5%. Ini adalah bukti keberhasilan Prinsip **Pencegahan Limbah (P1)** dan **Keamanan Produk (P4/P12)** yang difasilitasi GCI. penelitian tersebut memberikan bukti kuat bahwa Model ITS-G Digital berhasil mencetak lulusan Madrasah yang inovatif, berintegritas, dan kompeten dalam solusi *Green Chemistry*.

Tabel 6. Data Uji Kualitas Produk Sabun Ekstrak Limbah (4 Kelompok).

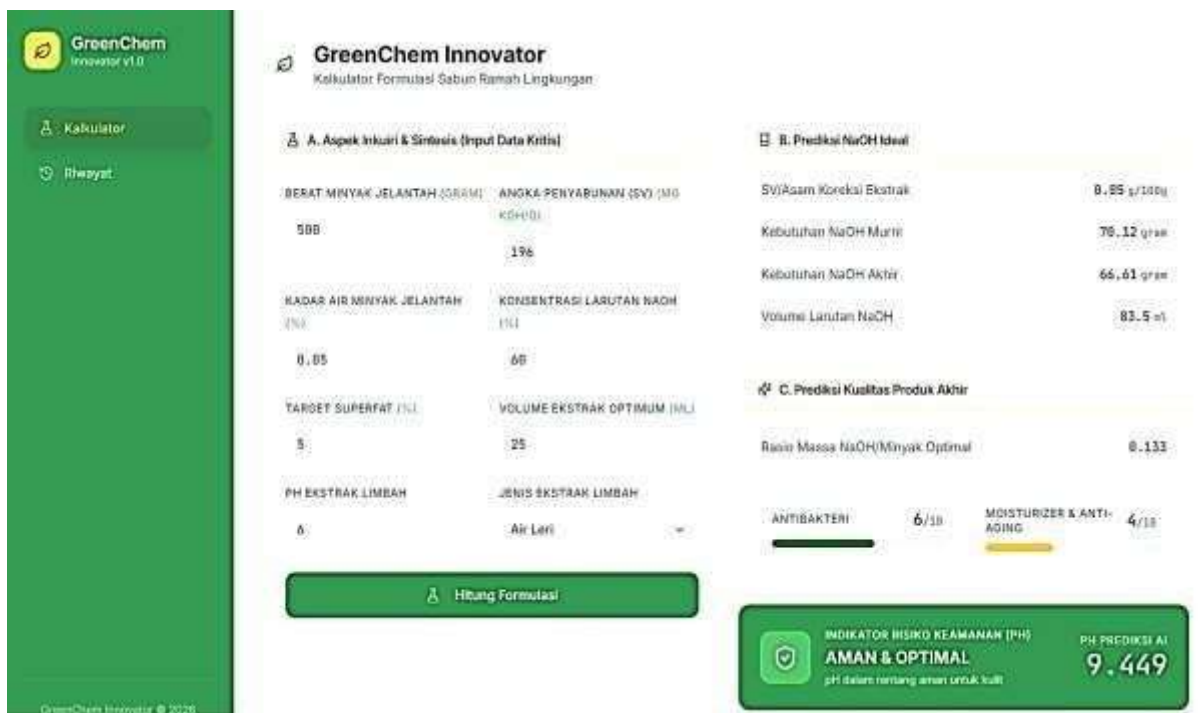
Kelompok (Ekstrak Limbah)	Prediksi pH GCI (Fase 2)	pH Riil Produk/ Rerata 3x pengulangan (Fase 6)	Keterangan Uji Kualitas
Kulit Buah Naga	9.27	9	Aman (Masuk SNI 9-11)
Kulit Jambu Biji	9.92	10	Aman (Masuk SNI 9-11)
Ampas Kopi	9.54	9.8	Aman (Masuk SNI 9-11)
Air Leri	10.56	10.61	Aman (Masuk SNI 9-11)

Pada Tabel 6, dapat dilihat bahwa mesin **GCI** berhasil memprediksi rasio NaOH Ideal untuk lemak bervariasi (minyak jelantah),

sehingga pH Riil seluruh produk berada di rentang aman SNI.

kedua, siswa berhasil mencapai *Efisiensi Atom* yang tinggi, menghasilkan produk sabun yang aman (pH sesuai SNI) tanpa sisa alkali berbahaya. Temuan ini memberikan bukti empiris bahwa transformasi digital di madrasah

Gambar 8. Screenshot Visualisasi Alat GCI



Visualisasi tampilan alat GCI setelah ‘Hitung Formulasi’ dapat dilihat pada Gambar 8. Prediksi NaOH ideal, Kualitas produk akhir, serta indikator resiko keamanan (pH) dapat ditampilkan sesuai variabel input. Berdasarkan hasil perhitungan Data Uji Kualitas Produk Sabun Ekstrak Limbah (Tabel 6) menunjukkan nilai signifikansi (*2-tailed*) sebesar $p < 0,05$, yang berarti terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah perlakuan. Sebagai validasi puncak, pada empat kelompok sabun ekstrak limbah tersebut diperoleh *Validasi_Input* dengan dengan deviasi rata-rata 0,165 pada tiap-tiap perlakuan ini membuktikan bahwa GCI menampilkan akurasi yang tinggi.

Seluruh empat kelompok menunjukkan selisih (*Delta*) yang kecil antara **Skor Hijau Prediksi** dan **Skor Hijau Aktual**. Konsistensi ini membuktikan dua hal krusial: pertama, *Mesin Prediksi Formula* (A.F.P) dari AI memiliki akurasi yang teruji secara empiris dalam menghitung stoikiometri saponifikasi untuk minyak jelantah yang bervariasi; dan

tidak hanya menuntut kecakapan teknis, tetapi juga memerlukan kurikulum yang kontekstual dan bermakna.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa implementasi model ITS-G Digital pada materi Saponifikasi limbah jelantah efektif mentransformasi pembelajaran kimia di madrasah melalui tiga temuan utama. Pertama, secara kuantitatif, Penelitian ini menghasilkan Model ITS-G Digital yang valid dan efektif. Validitas instrumen GCI dibuktikan melalui akurasi prediksi yang tinggi (*Adjusted R² = 71,06%*). Nilai *Multiple R = 0,8547* ($p < 0,05$) dan meskipun nilai *Adjusted R Square (71,06%)* menunjukkan adanya pengaruh variabel luar sebesar 28,94% —seperti fluktuasi suhu reaksi atau konsistensi pengadukan manual— instrumen ini terbukti efektif sebagai panduan optimasi formulasi bagi siswa. Penggunaan GCI berhasil memitigasi risiko kegagalan praktikum, sehingga seluruh produk akhir yang dihasilkan

siswa (100%) berada dalam rentang pH aman (9–11) sesuai standar SNI.

Kedua, efektivitas model terlihat dari peningkatan signifikan pada literasi digital siswa ($N\text{-Gain} = 0,78$) dan pembentukan Karakter Ekoteologis (sikap *Hubbul Bi'ah*) mencapai $N\text{-Gain}$ 0,83 (kategori tinggi). Hasil uji *Paired Sample t-Test* mengonfirmasi adanya perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$) pada aspek karakter sebelum dan sesudah perlakuan. serta menjamin keberhasilan prinsip *Green Chemistry* melalui optimasi *AI Predictor* yang akurat.

Ketiga, model ini berhasil menumbuhkan Karakter Ekoteologis. ITS-G Digital direkomendasikan sebagai solusi pembelajaran inovatif yang mampu menyelaraskan kemajuan teknologi kecerdasan buatan dengan tanggung jawab teologis terhadap kelestarian lingkungan di lingkungan Madrasah serta membentuk profil "Khalifah Saintis" di madrasah.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiaman, Andaryati, A. P., Susanti, A. F., Rahman, A., Ibrahim, J. S., & Winingsih, M. P. (2024). *Model Pendidikan Lingkungan Sekolah Adiwiyata*. Nganjuk, Jawa Timur: Selat Media
- Dahnial, I., Al-Khowarizmi, & Wanda, K. (2024). *Modernisasi Pendidikan pada Era Artificial Intelligence*. Medan: UMSU Press.
- Lukum, A., Pikoli, M., & Stiosarint, Y. (2024). *KIMIA DI SEKITAR KITA: Memahami Peran dan Aplikasinya Dalam Kehidupan*. Gorontalo: UNG Press.
- Lumbu, A., Haryono, P., & Tumober, R. T. (2025). *Buku Referensi Strategi Pembelajaran Populer Abad-21*. Yogyakarta: PT. Green Pustaka.
- Pahru, S., Akbar, S., & Hitipeuw, I. (2021). Pelaksanaan Program Adiwiyata dalam Mendukung Pembentukan Karakter Peduli Lingkungan. *Jurnal Pendidikan: Teori, Penelitian, dan Pengembangan*, 6(1), 119–127. Retrieved from
- Ruff, E. F., Franz, J. L., & West, J. K. (2024). Assessing the accuracy of large language models in generating green chemistry experimental procedures. *Journal of Chemical Education*, 101(3), 854-862. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00193>
- Widarti, H. R., Mahartika, I., & Alusti. (2025). *Wawasan Pendidikan Kimia: Sebuah Perspektif Ilmu*. Yogyakarta: Deepublish Digital.
- Widiastuty, H., & Anwar, K. (2025). Ekoteologi Islam: Prinsip Konservasi Lingkungan dalam Al-Qur'an dan Hadits serta Implikasi Kebijakannya. *Risalah: Jurnal Pendidikan Dan Studi Islam*, 11(1), 465–480.