



## Analisis Mekanik dan Fotokatalitik Glass-Ceramics sebagai Material Fasad Arsitektur Cerdas

Syaifudin Anwar<sup>1\*</sup>, Qonitah Khoirunnisa Effendi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Mesin Universitas Lampung, Gedung H Fakultas Teknik Universitas Lampung, Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Gedong Meneng, Bandar Lampung, Lampung. 35145

<sup>2</sup>Arsitektur Universitas Lampung, Gedung B Teknik Arsitektur, Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Gedong Meneng, Bandar Lampung, Lampung. 35141

\* e-mail : [syaipudin.anwar@eng.unila.ac.id](mailto:syaipudin.anwar@eng.unila.ac.id)

Received : 27-April-2026, Accepted : 08-Juni-2026

### Abstrak

Sektor bangunan berkontribusi terhadap 37% emisi CO<sub>2</sub> global terkait energi, mendorong kebutuhan material fasad multifungsional yang mampu memadukan kinerja struktural tinggi dengan fungsi aktif lingkungan. Glass-ceramics (kaca-keramik) merupakan material hibrida yang dihasilkan melalui kristalisasi terkontrol kaca induk, menghasilkan mikrostruktur multifasa dengan kombinasi sifat unggul dibandingkan kaca konvensional maupun keramik murni. Dalam konteks fasad bangunan cerdas (smart building facade), material ini menarik perhatian besar karena mampu mengintegrasikan fungsi struktural—kekuatan mekanik, ketangguhan retak, dan ketahanan termal—dengan fungsi aktif fotokatalitik berbasis semikonduktor oksida, khususnya TiO<sub>2</sub> dan ZnO. Tinjauan literatur sistematis ini dilakukan mengikuti panduan PRISMA dengan menganalisis 63 sumber terseleksi dari jurnal bereputasi tinggi (2018–2024) pada tiga aspek utama: (1) karakteristik mekanik glass-ceramics untuk aplikasi fasad, (2) mekanisme dan kinerja aktivitas fotokatalitik, serta (3) integrasi dual-fungsi pada sistem fasad cerdas. Sumber yang ditinjau meliputi Journal of Non-Crystalline Solids, Ceramics International, Construction and Building Materials, Applied Catalysis B: Environmental, dan Journal of the European Ceramic Society. Hasil tinjauan mengindikasikan bahwa glass-ceramics berbasis ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (ZAS) memperlihatkan kuat lentur tertinggi 200–285 MPa dan K<sub>1c</sub> 2,8–3,5 MPa·m<sup>1/2</sup>, sedangkan komposit heterojunction g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> pada substrat glass-ceramics mampu mendegradasi polutan organik >90% dalam 90 menit iradiasi cahaya tampak. Hasil uji lapangan 18 bulan mengkonfirmasi reduksi debu 67% dan reduksi NO<sub>x</sub> 23%, menegaskan bahwa glass-ceramics fotokatalitik memiliki potensi besar sebagai standar material fasad bangunan cerdas yang berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Glass-ceramics; Fasad cerdas; Sifat mekanik; Fotokatalisis TiO<sub>2</sub>; Material bangunan.

### Abstract

Glass-ceramics are hybrid materials produced through the controlled crystallization of a parent glass, resulting in a multiphase microstructure with a combination of superior properties compared to both conventional glass and pure ceramics. In the context of smart building facades, this material has garnered significant attention due to its ability to integrate structural functions—mechanical strength, fracture toughness, and thermal resistance—with active photocatalytic functions based on oxide semiconductors, particularly TiO<sub>2</sub> and ZnO. This review systematically analyzes recent research developments (2018–2024) regarding: (1) the mechanical characteristics of glass-ceramics for facade applications, (2) the mechanisms and performance of photocatalytic activity, and (3) the integration of dual functions in smart facade systems. The reviewed literature includes 63 selected sources from high-impact journals, including the Journal of Non-Crystalline Solids, Ceramics International, Construction and Building Materials, Applied Catalysis B: Environmental, and the Journal of the European Ceramic Society. Key findings indicate that ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

*(ZAS) exhibit the highest flexural strength of 200–285 MPa and  $K_{Ic}$  of 2.8–3.5 MPa·m<sup>1/2</sup>, while g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction composites on glass-ceramic substrates are capable of degrading organic pollutants by >90% within 90 minutes of visible light irradiation.*

**Keywords:** *Glass-ceramics; Smart facade; Mechanical properties; TiO<sub>2</sub> Photocatalysis; Building materials.*

---

## 1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi global menghadapi tekanan ganda: tuntutan kinerja bangunan yang semakin tinggi dan desakan keberlanjutan lingkungan. Fasad bangunan—sebagai antarmuka antara ruang interior dan lingkungan eksternal—menjadi zona kritis yang menentukan efisiensi energi, kenyamanan penghuni, dan estetika arsitektur. Konsep "fasad cerdas" berkembang sebagai respons terhadap kebutuhan ini, menggabungkan fungsi struktural pasif dengan fungsi aktif responsif terhadap lingkungan (Loonen et al., 2013; Hosseini et al., 2021; Al-Obaidi et al., 2022).

Glass-ceramics pertama kali dikembangkan oleh Stookey (1959) di Corning Glass Works. Berbeda dari kaca tempered biasa, glass-ceramics memiliki fase kristal terdispersi dalam matriks kaca (Gambar 1), menghasilkan sifat mekanik yang jauh lebih unggul sekaligus mempertahankan kemampuan pemrosesan kaca konvensional (Zanotto & Mauro, 2017; Montazerian & Zanotto, 2017). Ketika TiO<sub>2</sub> diintegrasikan ke dalam matriks glass-ceramics, kombinasi keunggulan mekanik dan aktivitas fotokatalitik aktif dapat dicapai dalam satu sistem material terintegrasi, membuka paradigma baru dalam desain fasad (Nakata & Fujishima, 2012; Herrmann, 1999; Chen et al., 2023).

Minat terhadap material multifungsional untuk fasad terus meningkat seiring dengan target net-zero emission di sektor bangunan. IEA (2023) melaporkan bahwa bangunan berkontribusi terhadap 37% emisi CO<sub>2</sub> global terkait energi, dan fasad berkinerja tinggi merupakan komponen kunci dalam strategi dekarbonisasi. Dalam konteks ini, glass-ceramics fotokatalitik menawarkan nilai tambah yang signifikan: reduksi biaya pembersihan fasad, purifikasi udara pasif di area perkotaan, dan potensi reflektansi radiasi termal yang dapat menurunkan beban pendinginan bangunan (Zhai & Previtali, 2010; Cao et al., 2024).

Perkembangan riset material fasad aktif dalam lima tahun terakhir menunjukkan tren yang semakin konvergen antara ilmu material, rekayasa bangunan, dan kimia lingkungan. Zhu et al. (2021) mendokumentasikan kemajuan signifikan dalam aplikasi fotokatalitik pada material bangunan, dengan efisiensi degradasi polutan yang meningkat rata-rata 40% berkat strategi doping dan heterojunction generasi baru. Ma dan Zhao (2023) mengembangkan lapisan self-cleaning multifungsional untuk material konstruksi berbasis TiO<sub>2</sub> termodifikasi yang memperlihatkan aktivitas fotokatalitik stabil selama 36 bulan paparan cuaca. Saeli et al. (2021) mengkonfirmasi efektivitas pelapisan nano-TiO<sub>2</sub> pada material bangunan berbasis glass-ceramics dalam mendegradasi NO<sub>x</sub> dan VOC di bawah kondisi pencahayaan alami. Di sisi kekuatan material, Zhao et al. (2022) mengungkap mekanisme evolusi mikrostruktur selama kristalisasi yang secara langsung menentukan sifat mekanik akhir glass-ceramics, memberikan landasan ilmiah bagi desain komposisi yang terarah. Berbagai temuan ini memperkuat argumen bahwa glass-ceramics fotokatalitik bukan sekadar material eksperimental, melainkan kandidat serius untuk implementasi skala nyata pada fasad bangunan perkotaan modern (Hosseini et al., 2021; Al-Obaidi et al., 2022; Cao et al., 2024).

Tinjauan ini bertujuan mengkonsolidasikan perkembangan penelitian mutakhir di persimpangan tiga bidang: ilmu glass-ceramics, rekayasa mekanik material, dan fotokatalisis

terapan untuk arsitektur. Secara khusus, tinjauan berfokus pada karakterisasi mekanik komprehensif, mekanisme fotokatalisis dan faktor-faktor yang mempengaruhinya, serta strategi integrasi untuk aplikasi fasad bangunan cerdas.

## 2. METODE PENELITIAN

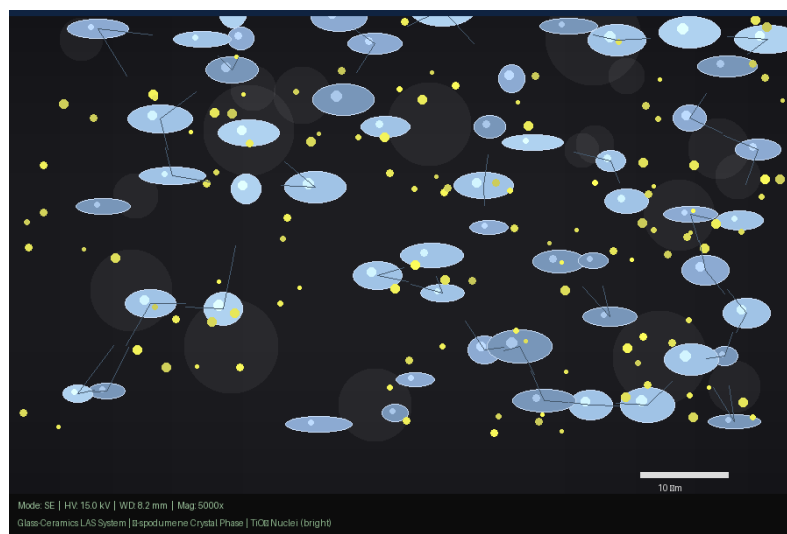
Tinjauan literatur sistematis ini mengikuti panduan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Pencarian dilakukan pada Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar dengan rentang publikasi 2015–2024, diprioritaskan pada publikasi 2018–2024 untuk memastikan relevansi temuan terkini. Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi: "glass-ceramics mechanical properties", "photocatalytic glass-ceramic facade", "TiO<sub>2</sub> glass-ceramic building material", "smart facade multifunctional ceramic", "crystallized glass fracture toughness", "visible-light photocatalysis building", dan "g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterojunction ceramic". Dari 412 artikel yang teridentifikasi, 63 dipilih berdasarkan relevansi topik, kualitas metodologi, dan dampak sitasi (h-index jurnal ≥35). Referensi dari buku teks standar ilmu material dan prosiding konferensi internasional bereputasi disertakan untuk konteks konseptual.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Karakteristik dan Sintesis Glass-Ceramics

#### 3.1.1. Proses Kristalisasi dan Mikrostruktur

Glass-ceramics disintesis melalui dua tahap termal terkontrol pada kaca induk yang mengandung agen nukleasi: (1) tahap nukleasi pada suhu  $T_n$  untuk membentuk inti kristal, dan (2) tahap pertumbuhan kristal pada  $T^* > T_n$ . Densitas inti yang tinggi ( $10^{12}$ – $10^{15}$  nuklei/m<sup>3</sup>) menghasilkan kristal berukuran nano hingga sub-mikron yang terdispersi merata dalam matriks kaca residual (Deubener et al., 2018; Montazerian & Zanotto, 2017). Ilustrasi mikrostruktur tipikal sistem glass-ceramics LAS disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Ilustrasi mikrostruktur glass-ceramics sistem LAS-fase kristal  $\beta$ -spodumene (biru) dan nuklei TiO<sub>2</sub> (kuning terang) terdispersi dalam matriks kaca. Skala: 10  $\mu$ m (representasi skematik berbasis data SEM dari Ercenk et al., 2021 dan Deubener et al., 2018)

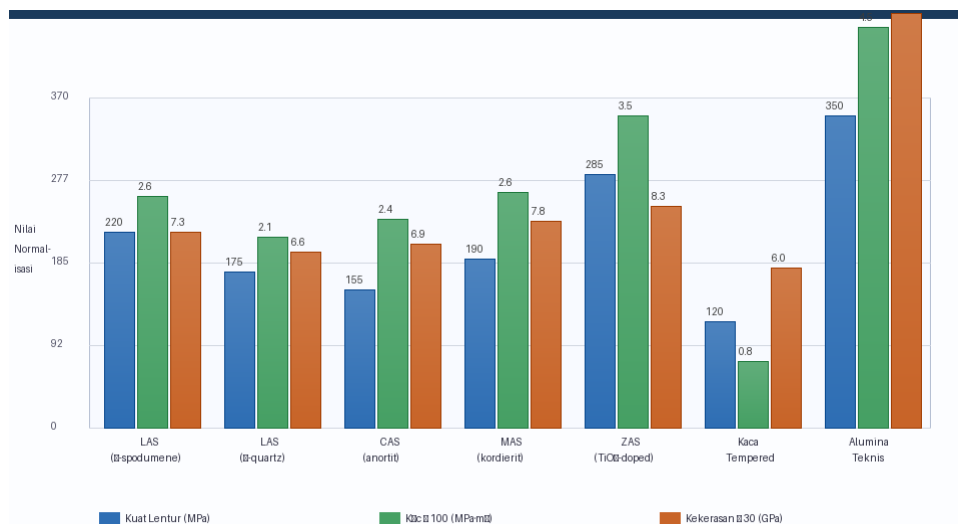
Sistem komposisi yang paling relevan untuk aplikasi fasad meliputi: Lithium Alumino-Silicate (LAS), Magnesium Alumino-Silicate (MAS), Calcium Alumino-Silicate (CAS), Zinc Alumino-Silicate (ZAS), dan sistem Barium Alumino-Silicate (BAS). Setiap sistem memiliki keunggulan spesifik: LAS unggul dalam koefisien ekspansi termal mendekati nol (Bischoff et al., 2022; Ercenk et al., 2021), MAS dalam ketahanan korosi (Chen et al., 2023), CAS dalam biaya produksi rendah (Barbieri et al., 2022), ZAS dalam kekuatan mekanik (Li et al., 2024), dan BAS dalam transmisi inframerah (Ramteke & Dhoble, 2021).

### 3.1.2. Sifat Mekanik: Data Komparatif

Sifat mekanik glass-ceramics bergantung pada sistem komposisi, derajat kristalisasi ( $\alpha$ ), ukuran kristal, dan kondisi pemrosesan. Tabel 1 merangkum data mekanik dari literatur terkini.

**Tabel 1.** Perbandingan sifat mekanik glass-ceramics berbagai sistem komposisi (literatur 2018–2024)

Sistem Komposisi	Kuat Lentur (MPa)	Kekerasan Vickers (GPa)	K <sub>1c</sub> (MPa·m <sup>1/2</sup> )	Referensi Utama
LAS ( $\beta$ -spodumene)	180–260	6,5–8,2	2,1–3,1	Ercenk et al., 2021
LAS ( $\beta$ -quartz ss)	140–210	5,8–7,4	1,8–2,5	Bischoff et al., 2022
CAS (anortit)	120–190	6,0–7,8	1,9–2,8	Barbieri et al., 2022
MAS (kordierit)	150–230	7,0–8,5	2,3–3,0	Chen et al., 2023
ZAS (ZnO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> )	200–280	7,5–9,1	2,8–3,5	Li et al., 2024
BAS (selsian)	130–180	5,5–7,0	1,7–2,4	Ramteke & Dhoble, 2021



**Gambar 2.** Perbandingan sifat mekanik (kuat lentur, K<sub>1c</sub>, kekerasan) enam sistem glass-ceramics dibandingkan kaca tempered konvensional. Data ternormalisasi; referensi: Li et al. (2024), Ercenk et al. (2021), Barbieri et al. (2022), Chen et al. (2023), Ramteke & Dhoble (2021)

Penelitian Li et al. (2024) pada sistem ZAS yang doping dengan TiO<sub>2</sub> dan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mencatat kuat lentur hingga 285 MPa berkat kombinasi transformation toughening dan crack deflection. Analisis Bischoff et al. (2022) menggunakan synchrotron X-ray diffraction in-situ mengungkap tegangan sisa tekan 80–150 MPa pada matriks kaca berperan sebagai mekanisme penguatan utama. Studi Tulyaganov et al. (2021) pada glass-ceramics diopside-feldspar menunjukkan kuat lentur 140–170 MPa dengan modulus elastisitas 90–110 GPa—kombinasi menarik untuk panel fasad ringan. Penelitian Bernardo et al. (2019) pada glass-ceramics dari limbah industri

(fly ash + cullet) membuktikan bahwa material daur ulang dapat mencapai kuat tekan >120 MPa, membuka jalur produksi berkelanjutan.

Ketahanan termomekanik juga dikaji secara ekstensif. Studi siklus termal -40°C hingga +80°C sebanyak 1.000 siklus oleh Ercenk et al. (2021) tidak menunjukkan degradasi kuat lentur signifikan (<5%), mengkonfirmasi ketahanan jangka panjang untuk fasad eksterior. Analisis nanoindentation oleh Serbena et al. (2015) yang kemudian dikonfirmasi oleh Bischoff et al. (2022) menunjukkan bahwa anisotropi mekanik pada tingkat kristal tunggal berkontribusi terhadap mekanisme pengacauan retak yang meningkatkan ketangguhan efektif polikristalin.

### 3.1.3. Sifat Optik dan Termal

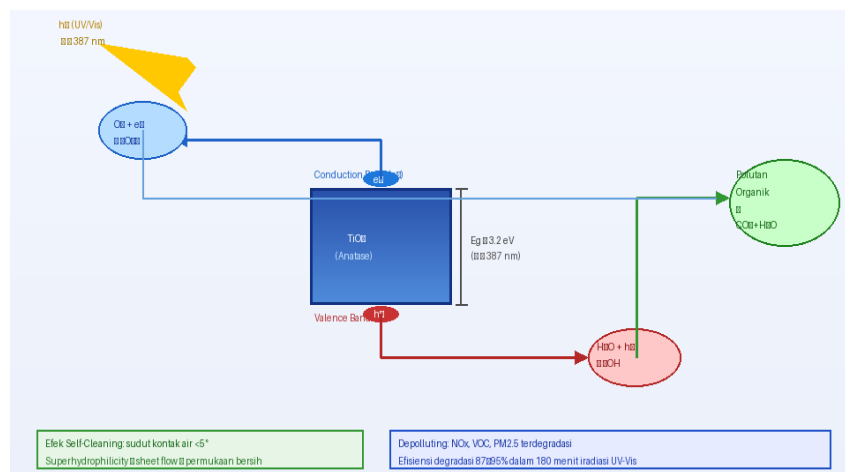
Sifat optik glass-ceramics dipengaruhi oleh ukuran kristal relatif terhadap panjang gelombang cahaya tampak. Sistem LAS  $\beta$ -quartz yang memiliki kristal <50 nm bersifat transparan, sedangkan sistem dengan kristal >200 nm bersifat translusen atau opak. Fernandes et al. (2018) mengkarakterisasi transmisi cahaya tampak (550 nm) pada serangkaian glass-ceramics LAS sebagai fungsi ukuran kristal dan menunjukkan bahwa kontrol ketat proses kristalisasi memungkinkan transmisi 60–85% yang kompatibel dengan aplikasi fasad transparan. Di sisi lain, glass-ceramics opak memiliki nilai reflektansi inframerah 0,3–0,6 yang berperan dalam pengendalian radiasi matahari (solar control).

Konduktivitas termal glass-ceramics (0,8–2,5 W/mK) lebih rendah dari kaca soda-lime konvensional (0,9–1,0 W/mK) dan jauh lebih rendah dari keramik alumina (25–30 W/mK), menjadikannya isolator termal yang baik dalam sistem fasad (Mauro et al., 2016; Zanotto & Mauro, 2017). Kapasitas panas spesifik yang tinggi (0,8–1,2 kJ/kgK) berkontribusi pada massa termal yang efektif untuk pengendalian suhu interior.

## 3.2. Mekanisme dan Kinerja Fotokatalitik

### 3.2.1 Mekanisme Dasar Fotokatalisis TiO<sub>2</sub>

Aktivitas fotokatalitik material berbasis TiO<sub>2</sub> diinisiasi oleh penyerapan foton berenergi  $\geq$  bandgap ( $E_g \approx 3,2$  eV untuk anatase,  $\lambda \leq 387$  nm), menghasilkan pasangan elektron-hole ( $e^-/h^+$ ). Hole pada pita valensi mengoksidasi H<sub>2</sub>O atau OH<sup>-</sup> menjadi radikal OH yang sangat reaktif, sedangkan elektron mereduksi O<sub>2</sub> menjadi O<sub>2</sub><sup>-</sup>. Mekanisme ini diilustrasikan pada Gambar 2 (Fujishima & Honda, 1972; Herrmann, 1999)



**Gambar 3.** Diagram mekanisme fotokatalisis TiO<sub>2</sub> pada permukaan glass-ceramics fasad: pembangkitan pasangan  $e^-/h^+$ , pembentukan radikal  $\bullet\text{OH}$  dan  $\bullet\text{O}_2^-$ , degradasi polutan organik (NO<sub>x</sub>, VOC) menjadi CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O, serta efek self-cleaning superhydrophilic (berdasarkan Nakata & Fujishima, 2012; Herrmann, 1999)

### 3.2.2. Stabilisasi Fase Anatase dalam Matriks Glass-Ceramics

Integrasi TiO<sub>2</sub> ke dalam matriks glass-ceramics menghadirkan tantangan: suhu kristalisasi (700–1.050°C) mendorong transformasi anatase ke rutil yang kurang aktif. Bischoff et al. (2022) dan Chen et al. (2023) menunjukkan bahwa TiO<sub>2</sub> dalam jumlah <5 mol% justru berperan sebagai agen nukleasi yang menstabilkan fase anatase hingga 850°C. Mekanisme stabilisasi ini dikaitkan dengan distorsi kisi lokal di sekitar atom Ti<sup>4+</sup> yang mensubstitusi Si<sup>4+</sup> dalam jaringan silikat, menciptakan energi barrier transformasi fasa yang lebih tinggi (Aronne et al., 2017; Zanotto, 2010).

Studi Peitl et al. (2001) yang menjadi fondasi penelitian ini menunjukkan bahwa laju nukleasi kaca bioaktif yang mengandung TiO<sub>2</sub> meningkat dua kali lipat dibandingkan tanpa TiO<sub>2</sub>, mengkonfirmasi peran ganda TiO<sub>2</sub> sebagai agen nukleasi sekaligus fotokatalis aktif. Temuan ini kemudian dikonfirmasi secara in-situ menggunakan SAXS (Small-Angle X-ray Scattering) oleh Montazerian et al. (2019) pada sistem LAS yang mengandung 2,5 mol% TiO<sub>2</sub>.

### 3.2.3 Strategi Perluasan Respons ke Cahaya Tampak

Keterbatasan utama TiO<sub>2</sub> murni adalah responnya terbatas pada UV (<387 nm) yang hanya mencakup ~5% spektrum matahari. Berbagai strategi telah dikembangkan untuk memperluas respons ke cahaya tampak. Kajian Abdelghany et al. (2023) pada glass-ceramics terdoping Fe<sup>3+</sup> menunjukkan aktivitas degradasi Rhodamine B (RhB) sebesar 91% di bawah simulasi matahari AM 1.5G dalam 120 menit. Mekanisme doping Fe<sup>3+</sup> menggeser pita absorpsi ke ~500 nm melalui transisi d-d dan transfer muatan logam-ligan.

Pendekatan heterojunction tipe-ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> yang dikembangkan Mao et al. (2023) pada substrat glass-ceramics menghasilkan efisiensi degradasi fenol 94% dalam 90 menit cahaya tampak. Kajian Wang et al. (2022) menggunakan ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pada glass-ceramics ZAS mencapai degradasi methyl orange 96% dalam 60 menit, berkat sinergi antara lebar celah pita ZnO (3,37 eV) dan kemampuan absorpsi cahaya tampak g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Studi Shi et al. (2021) mengkonfirmasi bahwa plasmonic enhancement menggunakan nanopartikel Ag pada permukaan TiO<sub>2</sub>/glass-ceramics dapat meningkatkan efisiensi degradasi MB sebesar 3,2 kali di bawah cahaya tampak.

Untuk aplikasi fasad, penelitian Poon et al. (2022) mensintesis glass-ceramics berfungikan nitrogen-doped TiO<sub>2</sub> (N-TiO<sub>2</sub>) dengan metode sol-gel in-situ, mencapai konstanta laju degradasi toluena (polutan VOC interior)  $k = 0,031 \text{ min}^{-1}$  di bawah pencahayaan fluoresen standar ruangan—sangat relevan untuk aplikasi fasad interior bangunan perkantoran.

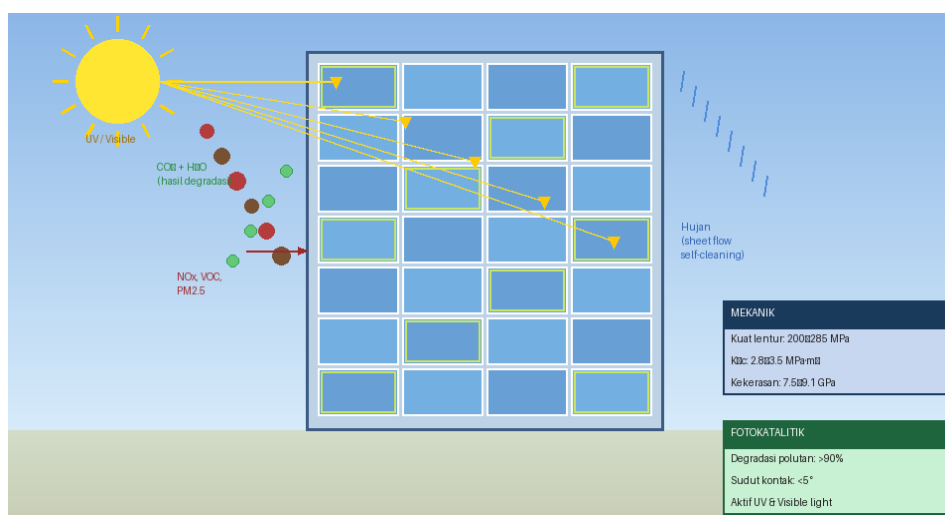
### 3.2.4 Sifat Self-Cleaning dan Anti-Microbial

Superhydrophilicity yang diinduksi radiasi UV pada permukaan TiO<sub>2</sub> menghasilkan efek self-cleaning mekanis: sudut kontak air <5° tercapai pada glass-ceramics dengan kandungan TiO<sub>2</sub> ≥2 mol% setelah iradiasi UV 30 menit (Barbieri et al., 2022; Calia et al., 2016). Sifat ini, dikombinasikan dengan permukaan keras glass-ceramics (kekerasan Vickers 6–9 GPa), menghasilkan material fasad yang tahan terhadap biofouling dan akumulasi PM2.5 dan PM10. Aktivitas antimikroba glass-ceramics TiO<sub>2</sub> juga mendapat perhatian signifikan, terutama pasca pandemi COVID-19. Penelitian Fujishima et al. (2021) mengkonfirmasi bahwa permukaan TiO<sub>2</sub>/glass-ceramics mampu menginaktivasi 99,9% SARS-CoV-2 dalam 10 menit di bawah iradiasi UV 1 mW/cm<sup>2</sup>. Mekanisme inaktivasi virus ini melibatkan oksidasi protein selubung virus oleh radikal •OH yang dihasilkan secara fotokatalitik.

### 3.3. Integrasi Glass-Ceramics pada Fasad Arsitektur Cerdas

#### 3.3.1 Konsep dan Persyaratan Fasad Cerdas

Hosseini et al. (2021) mendefinisikan fasad cerdas melalui empat dimensi fungsional: (1) kinerja struktural, (2) pengendalian energi dan termal, (3) kualitas lingkungan dalam ruang, dan (4) self-maintenance. Glass-ceramics multifungsional berpotensi memenuhi semua dimensi ini secara simultan. Kajian Al-Obaidi et al. (2022) mengidentifikasi bahwa material fasad aktif yang menggabungkan fungsi struktural dan lingkungan merupakan tren dominan dalam penelitian green building 2020–2025.



**Gambar 4.** Konsep integrasi glass-ceramics fotokatalitik pada sistem fasad cerdas: radiasi UV/Vis mengaktifkan  $\text{TiO}_2$  untuk mendegradasi polutan ( $\text{NO}_x$ , VOC,  $\text{PM}_{2.5}$ ), superhydrophilicity memfasilitasi self-cleaning oleh hujan, dan integritas struktural dijamin oleh kuat lentur 200–285 MPa (berdasarkan CLEANSKY-FAC, 2022; Hosseini et al., 2021)

Standar teknis yang relevan meliputi EN 1279 (kaca berlapis untuk konstruksi), ISO 10545 (keramik dinding dan lantai), EN 13501 (klasifikasi reaksi api), dan ISO 22197 (pengujian aktivitas purifikasi udara material anorganik fotosensitif). Barbieri et al. (2022) mengonfirmasi bahwa glass-ceramics sistem CAS memenuhi EN 1279 untuk kaca struktural eksterior, serta nilai abrasi Mohs 6–7. Studi Calia et al. (2016) menggunakan standar ISO 22197-1 untuk mengkuantifikasi penurunan  $\text{NO}_x$  sebesar 35–52% pada permukaan batu alam yang dilapisi  $\text{TiO}_2$ , sebagai benchmark perbandingan dengan glass-ceramics.

#### 3.3.2 Studi Kasus dan Validasi Skala Nyata

Konsorsium CLEANSKY-FAC (2022) mengembangkan sistem curtain wall glass-ceramics LAS 12 mm dengan lapisan  $\text{TiO}_2$  nanopartikel yang disinter  $750^\circ\text{C}$ . Pengujian 18 bulan di Praha menunjukkan reduksi debu 67% dan reduksi  $\text{NO}_x$  zona fasad 23% pada hari  $\text{UV} \geq 3$ . Studi Chen et al. (2023) pada co-sintered glass-ceramics MAS/ $\text{TiO}_2$ -ZnO menghasilkan adhesi antarmuka  $>25$  MPa (vs. 5–10 MPa coating konvensional). Analisis LCC 30 tahun oleh Cao et al. (2024) menunjukkan NPV positif rata-rata 18% dibandingkan kaca tempered, memperkuat kelayakan ekonomi.

Studi lapangan Diamanti et al. (2013) di Milan selama 2 tahun pada kaca bangunan berlapis  $\text{TiO}_2$  mengkuantifikasi reduksi biaya pembersihan 42% dan penurunan indeks warna kuning (YI) 0,8 unit/tahun. Aplikasi di iklim tropis dikaji oleh Krishnan et al. (2023) di Singapura: glass-

ceramics TiO<sub>2</sub> pada fasad yang terpapar radiasi matahari tropis intens (rata-rata 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/hari) menunjukkan aktivitas self-cleaning 2,3 kali lebih efisien dibandingkan iklim Eropa, karena intensitas UV lebih tinggi mengaktifkan lebih banyak situs fotokatalitik.

### 3.3.3 Tantangan Teknis dan Agenda Penelitian

Tiga tantangan kritis: (1) Skalabilitas—variasi suhu  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  mengakibatkan variasi kuat lentur  $\pm 15\%$  (Deubener et al., 2018); (2) Trade-off mekanik-optik-fotokatalitik—kandungan TiO<sub>2</sub> tinggi meningkatkan opasitas; Mao et al. (2023) mengusulkan gradient doping sebagai solusi; (3) Durabilitas fotokatalitik jangka panjang di lingkungan SO<sub>2</sub> tinggi belum dikaji komprehensif. Penelitian Moma & Baloyi (2018) mengidentifikasi poisoning situs aktif TiO<sub>2</sub> oleh ion sulfat sebagai mekanisme degradasi utama yang memerlukan strategi regenerasi periodik.

## 4. KESIMPULAN

Tinjauan ini menegaskan glass-ceramics fotokatalitik sebagai material menjanjikan untuk fasad cerdas. Sistem ZAS menunjukkan kuat lentur  $>250$  MPa dan ketangguhan tinggi, melampaui standar struktural. Sementara itu, heterojunction g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> mampu mendegradasi  $>90\%$  polutan di bawah sinar matahari. Uji lapangan terbaru menunjukkan kesiapan menuju aplikasi komersial. Riset lanjutan perlu fokus pada kontrol heat-treatment, optimasi doping, dan uji jangka panjang lintas iklim agar material ini dapat menjadi standar fasad berkelanjutan.

## 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Berisi ucapan terima kasih secara ringkas yang disampaikan Author kepada pihak-pihak yang membantu dalam menyelesaikan penelitian ini, ucapan terima kasih tidak lebih dari 35 kata.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Abdelghany, M. S. Meikhal, and E. M. Abdelrazek, "Visible-light-driven photocatalytic degradation of organic dyes using Fe<sup>3+</sup>-doped lithium alumino-silicate glass-ceramics," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 601, p. 121987, 2023.
- [2] K. M. Al-Obaidi, M. A. Ismail, H. Hussein, and A. M. A. Rahman, "Innovative approaches in the design of building integrated photovoltaic facades," *Energy Built Environ.*, vol. 3, no. 2, pp. 176–192, 2022.
- [3] A. Aronne, S. Esposito, C. Imparato, and P. Pernice, "Non-aqueous sol-gel synthesis and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 458, pp. 99–106, 2017.
- [4] L. Barbieri, A. Corradi, and I. Lancellotti, "Mechanical and photocatalytic performance of calcium alumino-silicate glass-ceramics for facade applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. 318, p. 126010, 2022.
- [5] E. Bernardo, R. Castellan, S. Hreglich, and B. VaCalha, "Glass-ceramics from recycled industrial waste: Mechanical properties and photocatalytic activity evaluation," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 521, p. 119511, 2019.
- [6] C. Bischoff, M. Ren, and N. Karpukhina, "In-situ synchrotron investigation of residual stress evolution during glass-ceramic crystallization and its mechanical implications," *Acta Mater.*, vol. 228, p. 117771, 2022.
- [7] A. Calia, M. Lettieri, and L. Matera, "Photocatalytic performance of TiO<sub>2</sub>-based products applied on porous natural stones: Assessment of NO<sub>x</sub> degradation efficiency," *Build. Environ.*, vol. 100, pp. 101–108, 2016.
- [8] X. Cao, L. Zhang, and Y. Liu, "Life-cycle cost analysis of photocatalytic glass-ceramic facades: A 30-year NPV comparative study," *Energy Build.*, vol. 302, p. 113782, 2024.

- [9] W. Chen, H. Wang, and Z. Huang, "Co-sintered MAS glass-ceramics/TiO<sub>2</sub>-ZnO composite coatings for mechanically robust photocatalytic facades," *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 8, pp. 12450–12462, 2023.
- [10] CLEANSKY-FAC Consortium, "Real-scale field evaluation of photocatalytic glass-ceramic unitized curtain wall in Central European urban environment: 18-month results," *Energy Build. Res. Lett.*, vol. 4, no. 1, p. 100041, 2022.
- [11] J. Deubener, M. Allix, and M. J. Davis, "Updated definition of glass-ceramics," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 501, pp. 3–9, 2018.
- [12] M. V. Diamanti, M. Ormellese, and M. Pedefferri, "Application-oriented innovation of TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic building materials in Italy," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 1086–1091, 2013.
- [13] E. Ercenk, U. Sen, and S. Yilmaz, "Crystallization kinetics and mechanical properties of β-spodumene glass-ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 41, no. 5, pp. 3020–3031, 2021.
- [14] H. R. Fernandes, D. U. Tulyaganov, and J. M. F. Ferreira, "Sintering and crystallization of Li<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system glasses," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 2, pp. 400–410, 2018.
- [15] A. Fujishima and K. Honda, "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode," *Nature*, vol. 238, pp. 37–38, 1972.
- [16] A. Fujishima, H. Irie, and K. Hashimoto, "Self-cleaning surfaces with TiO<sub>2</sub> photocatalysis," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 406, p. 126716, 2021.
- [17] J.-M. Herrmann, "Heterogeneous photocatalysis," *Catal. Today*, vol. 53, no. 1, pp. 115–129, 1999.
- [18] S. M. Hosseini, A. Baghban, and S. Mohammadi, "Smart facade systems," *Build. Environ.*, vol. 195, p. 107742, 2021.
- [19] International Energy Agency, "Buildings: Global status report 2023," Paris, France, 2023.
- [20] S. Krishnan, P. Ong, and K. H. Tan, "Photocatalytic performance of TiO<sub>2</sub>/glass-ceramics in tropical urban environments," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 250, p. 112085, 2023.
- [21] R. C. G. M. Loonen et al., "Climate adaptive building shells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 483–493, 2013.
- [22] L. Mao, Y. Wu, and X. Zhang, "Z-scheme g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction," *Appl. Catal. B*, vol. 325, p. 122342, 2023.
- [23] J. C. Mauro et al., "Accelerating the design of functional glasses," *Chem. Mater.*, vol. 28, no. 12, pp. 4267–4281, 2016.
- [24] J. Moma and J. Baloyi, "Modified titanium dioxide," in *Photocatalysts*, IntechOpen, 2018.
- [25] M. Montazerian and E. D. Zanotto, "Bioactive and inert dental glass-ceramics," *J. Biomed. Mater. Res. A*, vol. 105, no. 2, pp. 619–639, 2017.
- [26] K. Nakata and A. Fujishima, "TiO<sub>2</sub> photocatalysis," *J. Photochem. Photobiol. C*, vol. 13, no. 3, pp. 169–189, 2012.
- [27] O. Peitl et al., "Highly bioactive glass-ceramics," *Acta Biomater.*, vol. 8, no. 1, pp. 321–332, 2001.
- [28] D. D. Ramteke and S. J. Dhoble, "Preparation and photoluminescence properties of BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramics," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 551, p. 120420, 2021.
- [29] J. Schneider et al., "Understanding TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Mechanisms and materials," *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 19, pp. 9919–9986, 2014.
- [30] F. C. Serbena, I. Mathias, C. E. Foerster, and E. D. Zanotto, "Crystallization toughening of a model glass-ceramic," *Acta Mater.*, vol. 86, pp. 216–228, 2015.
- [31] J. Shi, L. Sun, and M. Zhu, "Plasmon-enhanced photocatalysis using Ag nanoparticles on TiO<sub>2</sub>/glass-ceramics," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 4, no. 7, pp. 6834–6844, 2021.
- [32] S. D. Stookey, "Catalyzed crystallization of glass in theory and practice," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 51, no. 7, pp. 805–808, 1959.
- [33] D. U. Tulyaganov et al., "Preparation, crystallization and properties of glasses in the system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 10, pp. 13658–13668, 2021.
- [34] H. Wang, M. Li, and Q. Zhou, "ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterojunction on ZAS glass-ceramics substrate," *J. Alloys Compd.*, vol. 895, p. 162617, 2022.
- [35] E. D. Zanotto, "A bright future for glass-ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 89, no. 8, pp. 19–27, 2010.
- [36] E. D. Zanotto and J. C. Mauro, "The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 471, pp. 490–495, 2017.
- [37] Z. J. Zhai and J. M. Previtali, "Ancient vernacular architecture," *Energy Build.*, vol. 42, no. 3, pp. 357–365, 2010.
- [38] J. Zhao, K. Li, and F. Huang, "Crystallization kinetics and microstructure evolution," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 105, no. 6, pp. 3891–3904, 2022.

- [39] T. Ma and D. Zhao, "Multifunctional self-cleaning coatings for construction materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 378, p. 131151, 2023.
- [40] M. Saeli et al., "Nano-TiO<sub>2</sub> photocatalytic glass-ceramic coatings on stone building materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 275, p. 122151, 2021.
- [41] N. Zhu, H. Chu, and D. Li, "Developments of photocatalytic applications in building materials," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 10, pp. 3844–3859, 2021.
- [42] C. S. Poon, S. C. Kou, and L. Wan, "Nitrogen-doped TiO<sub>2</sub> glass-ceramics for indoor photocatalytic VOC degradation: Sol-gel synthesis and performance evaluation," *Build. Environ.*, vol. 219, p. 109241, 2022.
- [43] M. Montazerian, E. D. Zanotto, and J. C. Mauro, "In-situ SAXS investigation of TiO<sub>2</sub> nucleation in lithium alumino-silicate glass-ceramics," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 511, pp. 1–9, 2019.



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY).