

EFEKTIVITAS MODIFIER PEMBAKARAN, COFIRING BIOMASSA, DAN SLURRY BERBASIS LIMBAH TERHADAP EFISIENSI ENERGI, EMISI, DAN RISIKO OPERASIONAL PLTU

Romi Djafar^{*1)}, Yunita Djamalu^{*2)}

^{1,2)}Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan Fakultas teknik Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: romidjafarmesin@gmail.com

Nomor Telp : +62 813-5634-2126

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Dekarbonisasi pembangkitan berbasis batubara tidak selalu dapat ditempuh melalui penghentian aset secara segera, sehingga diperlukan strategi transisi yang menurunkan konsumsi bahan bakar, emisi, dan masalah abu tanpa mengorbankan keandalan. Tinjauan ini mensintesis perkembangan modifier pembakaran, *cofiring* biomassa, material pembawa oksigen, pemanfaatan abu, serta bahan bakar *slurry* berbasis limbah. Korpus kajian terdiri atas 59 rekaman bibliografis periode 2015-2026; sebanyak 53 studi yang relevan langsung dianalisis melalui pengelompokan mekanisme, skala eksperimen, indikator energi-lingkungan, dan risiko operasional. Bukti menunjukkan bahwa senyawa Fe, Cu, Mn, Ti, Ca, Mg, aluminosilikat, bioliquid, biomassa padat, dan abu reaktif bekerja melalui katalisis redoks, peningkatan transfer oksigen, perubahan devolatilisasi, penangkapan sulfur, pengendalian natrium, dan rekayasa mineral abu. Efeknya sangat bergantung pada spesiasi, dispersi, dosis, temperatur, ukuran partikel, atmosfer, dan konfigurasi pembakaran. Sejumlah intervensi menghasilkan penurunan temperatur penyalan, peningkatan efisiensi boiler, pengurangan NO_x, SO₂, partikulat, atau PAH, tetapi manfaat tersebut dapat disertai kenaikan NO_x, pembentukan HCl, aglomerasi, korosi, kebutuhan air, atau risiko pelindian logam. *Slurry* batubara-air dengan biomassa dan limbah organik memperluas ruang valorisasi limbah melalui mikroeksplosi, atomisasi sekunder, dan penurunan energi aktivasi, sedangkan *cofiring* biomassa menawarkan jalur retrofit yang relatif praktis. Sintesis ini mengusulkan kerangka seleksi berjenjang berbasis karakterisasi bahan bakar-abu, uji termokinetik, validasi pilot, pemantauan emisi spesifik energi, dan evaluasi multi-kriteria. Implikasinya, keberhasilan teknologi ditentukan oleh kesesuaian material dengan karakter bahan bakar dan validasi bertahap pada kondisi operasi nyata pembangkit dalam jangka panjang. Arah riset prioritas adalah katalis nanokomposit multifungsi, aditif berbasis residu lokal, model prediktif atomisasi-abu, serta optimasi multiobjektif yang mengintegrasikan efisiensi, emisi, korosi, dan sirkularitas material.

Kata kunci: modifier pembakaran; cofiring biomassa; batubara bersih; bahan bakar *slurry*; katalis berbasis limbah; emisi NO_x dan SO₂; ekonomi sirkular energy

ABSTRACT

The decarbonization of coal-fired power generation cannot always be achieved through the immediate retirement of existing assets. Transition strategies are therefore required to reduce fuel consumption, emissions, and ash-related problems without compromising reliability. This review synthesizes recent developments in combustion modifiers, biomass cofiring, oxygen-carrier materials, ash utilization, and waste-derived slurry fuels. The review corpus comprises 59 bibliographic records published between 2015 and 2026, of which 53 directly relevant studies were analyzed according to their mechanisms, experimental scales, energy and environmental indicators, and operational risks. Evidence indicates that compounds containing Fe, Cu, Mn, Ti, Ca, and Mg, along with aluminosilicates, bioliquids, solid biomass, and reactive ash, act through redox catalysis, enhanced oxygen transfer, modified devolatilization, sulfur capture, sodium control, and ash-mineral engineering. Their effects are strongly dependent on chemical speciation, dispersion, dosage, temperature, particle size, combustion atmosphere, and system configuration. Several interventions have lowered ignition temperatures, improved boiler efficiency, and reduced NO_x, SO₂, particulate matter, or PAH emissions. However, these benefits may be accompanied by increased NO_x emissions, HCl formation, agglomeration, corrosion, greater water demand, or metal-leaching risks. Coal–water slurries incorporating biomass and organic waste expand opportunities for waste valorization through microexplosions, secondary atomization, and reduced activation energy, whereas biomass cofiring provides a relatively practical retrofit pathway. This review proposes a staged selection framework based on fuel and ash characterization, thermokinetic testing, pilot-scale validation, energy-specific emissions monitoring, and multicriteria assessment. The findings indicate that technological success depends on matching materials to fuel characteristics and conducting phased, long-term validation under actual power-plant operating conditions. Priority research areas include multifunctional nanocomposite catalysts, locally sourced residue-based additives,

predictive atomization–ash models, and multiobjective optimization integrating efficiency, emissions, corrosion, and material circularity.

Keywords: combustion modifiers; biomass cofiring; clean coal; slurry fuels; waste-derived catalysts; NO_x and SO₂ emissions; circular energy economy

1. PENDAHULUAN

Batubara masih digunakan luas karena infrastruktur pembangunan, rantai pasok, dan kemampuan memasok daya yang stabil telah terbentuk. Namun, tekanan untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara mengharuskan peningkatan efisiensi serta pengurangan dampak lingkungan pada aset yang masih beroperasi. Dalam konteks ini, pembakaran yang lebih bersih tidak dapat dipahami sebagai satu teknologi tunggal, melainkan sebagai kombinasi rekayasa bahan bakar, kimia mineral, manajemen udara, pemanfaatan biomassa, dan pengendalian pascapembakaran. Literatur terbaru menempatkan modifier pembakaran dan *cofiring* biomassa sebagai dua jalur yang saling melengkapi: modifier mengubah kinetika serta kimia abu, sedangkan biomassa menurunkan fraksi karbon fosil dan meningkatkan reaktivitas campuran (Włodarczak et al., 2026; Chavda & Mahanwar, 2021).

Modifier pembakaran mencakup kelompok yang sangat heterogen. Senyawa logam transisi dapat mempercepat reaksi redoks, oksida alkali tanah dapat menangkap sulfur atau mengubah titik leleh abu, aluminosilikat dapat mengikat natrium dan mengurangi korosi, sedangkan bahan organik dan biomassa dapat memperbaiki penyalaan, distribusi volatil, serta karakteristik pembakaran campuran. Efektivitasnya ditentukan bukan hanya oleh identitas kimia, tetapi juga spesiasi, ukuran, dispersi pada bahan bakar, dosis, temperatur, waktu tinggal, atmosfer oksidasi, dan interaksi dengan mineral inheren (Włodarczak et al., 2026; Chen et al., 2025). Karena itu, klaim bahwa suatu aditif selalu meningkatkan efisiensi atau selalu menurunkan emisi perlu dihindari.

Cofiring biomassa memperluas strategi tersebut dengan memasukkan bahan terbarukan dan residu organik ke dalam sistem pembakaran batubara. Biomassa umumnya memiliki kandungan volatil lebih tinggi dan char yang lebih reaktif, sehingga dapat mempercepat penyalaan dan *burnout*. Di sisi lain, kandungan K, Na, Cl, Si, dan Ca yang sangat bervariasi dapat memperbesar risiko *slagging*, *fouling*, korosi, atau aglomerasi. Studi pada campuran biomassa menunjukkan bahwa manfaat emisi tidak otomatis identik dengan kestabilan operasi atau kualitas abu, sehingga desain campuran harus memperhitungkan transformasi mineral sejak devolatilisasi hingga pembentukan deposit (Glushkov et al., 2021; Ma et al., 2024).

Jalur lain yang berkembang adalah bahan bakar komposit berbasis limbah, terutama *coal-water*

slurry dan *slurry* yang mengandung biomassa, limbah minyak, atau residu organik. Air dalam *slurry* bukan sekadar pengencer; penguapan, perpindahan panas internal, mikroeksplosi, dan fragmentasi droplet dapat meningkatkan luas permukaan reaksi sekaligus mengubah pembentukan NO_x dan SO₂. Namun, stabilitas sedimentasi, viskositas, ukuran droplet, tekanan dan temperatur gas, serta distribusi komponen dalam spray menjadi penentu keberhasilan (Nyashina et al., 2023; Kuznetsov et al., 2024).

Tinjauan terdahulu umumnya membahas aditif batubara, *cofiring* biomassa, pengendalian emisi, atau *slurry* secara terpisah. Literatur 2024-2026 memperlihatkan pergeseran menuju integrasi: abu kaya besi digunakan sebagai material bed aktif, *fly ash* dimodifikasi menjadi katalis Cu-Mn, dan optimasi tidak lagi hanya mengejar konversi karbon, tetapi juga emisi, korosi, kualitas abu, serta pemanfaatan limbah (Ma et al., 2025; Darmansyah et al., 2025). Tinjauan ini bertujuan menyusun sintesis lintas jalur tersebut, menilai konsistensi bukti, mengidentifikasi trade-off, serta merumuskan agenda pengembangan yang lebih relevan untuk retrofit pembangkit.

2. METODE TINJAUAN DAN KERANGKA SINTESIS

Kajian menggunakan korpus bibliografis terstruktur yang memuat 59 rekaman publikasi tahun 2015-2026. Rekaman disaring berdasarkan keterkaitan langsung dengan pembakaran batubara atau biomassa, modifier dan katalis, transformasi abu, pengendalian emisi, *cofiring*, serta bahan bakar *slurry* berbasis limbah. Enam publikasi yang berfokus pada komposit polimer, serat basalt, mesin diesel berbahan biodiesel, dan hidrat gas tidak dimasukkan ke dalam sintesis utama karena tidak menjawab pertanyaan pembakaran padat atau *slurry* pada sistem boiler. Sebanyak 53 studi dipertahankan, terdiri atas artikel eksperimen laboratorium, pemodelan termodinamika, studi pilot dan industri, evaluasi multi-kriteria, serta tinjauan.

Ekstraksi dilakukan pada lima dimensi: jenis intervensi, mekanisme dominan, kondisi operasi, indikator hasil, dan risiko. Indikator energi meliputi temperatur penyalaan dan *burnout*, energi aktivasi, efisiensi boiler, *loss on ignition*, nilai kalor, serta perilaku atomisasi. Indikator lingkungan meliputi CO, CO₂, NO_x, SO₂, partikulat, PAH, N₂O, HCl, dan pelindian logam. Indikator operasional mencakup *slagging*, *fouling*, korosi, aglomerasi, stabilitas *slurry*, kebutuhan air, dan kompatibilitas retrofit (Nyashina et al., 2022; Yelland et al., 2021).

Sintesis tidak memperlakukan seluruh hasil sebagai efek universal. Temuan laboratorium dibaca sebagai bukti mekanistik, sedangkan studi pilot dan industri diberi bobot lebih tinggi untuk aspek keandalan dan besaran manfaat aktual. Hasil kuantitatif dipertahankan sesuai kondisi yang dilaporkan, tanpa diekstrapolasi ke jenis batubara, biomassa, atau boiler lain. Prinsip ini penting karena mineralogi bahan bakar dan konfigurasi pembakaran dapat membalik arah pengaruh aditif, sebagaimana terlihat pada perbedaan kinerja abu kaya besi, kaolin, CaO, atau abu dengan komposisi Si-Al yang berbeda (Ma et al., 2025; Zhou et al., 2015).

Kerangka analisis dibangun sebagai rantai sebab-akibat: karakteristik bahan bakar dan mineral menentukan interaksi aditif; interaksi tersebut memengaruhi devolatilisasi, penyalan, pembakaran char, dan transformasi abu; perubahan proses kemudian memengaruhi efisiensi, emisi, deposit, korosi, serta mutu residu. Pada bahan bakar *slurry*, rantai tersebut ditambah dengan stabilitas suspensi, atomisasi primer, deformasi droplet, fragmentasi sekunder, dan mikroeksplosi (Kerimbekova et al., 2022; Antonov et al., 2021).

3. FONDASI MEKANISTIK: DARI SPESIASI MINERAL HINGGA KINETIKA PEMBAKARAN

Kinerja modifier diawali oleh karakteristik bahan bakar. Analisis mikrostruktur batubara Duduguru, misalnya, mengidentifikasi partikel 25-50 mikrometer dengan unsur Mg, Al, Ca, Fe, C, O, S, dan Si. Unsur tersebut dapat mendukung reaksi, tetapi juga memicu pembentukan abu, *slagging*, atau korosi (Nyakuma et al., 2025). Pada batubara kaya natrium, Na dapat bertindak katalitik selama konversi termal, tetapi volatilitasnya memicu *fouling* dan korosi; karena itu, manfaat reaktivitas harus dikendalikan melalui penjerapan atau pembentukan mineral bertitik leleh tinggi (Li et al., 2018; Yu et al., 2020).

Besi merupakan contoh paling jelas bahwa spesiasi lebih penting daripada kadar total. FeCl₃ yang terhidrolisis menjadi spesies FeOOH terdispersi menurunkan temperatur penyalan lignit sekitar 112 derajat C, sedangkan Fe₂O₃ kristalin menunjukkan efek lebih lemah. Setelah perlakuan panas tinggi, aglomerasi Fe₃O₄ dan pembentukan besi elementer mengurangi aktivitas (Chen et al., 2025). Temuan ini menjelaskan mengapa residu kaya besi dapat bekerja efektif pada satu sistem, tetapi tidak pada sistem lain. Abu lignit dengan 54,4% Fe₂O₃ meningkatkan oksidasi volatil biomassa, namun perbaikannya cenderung jenuh setelah substitusi material bed 50% dan dapat diikuti kenaikan NO_x (Ma et al., 2025).

Oksida Cu dan Mn menawarkan mekanisme berbeda. Pada katalis *fly ash* FA/Cu/Mn-5, CuO mempercepat pembentukan NO₂ yang reaktif dalam SCR, sedangkan MnO₂ meningkatkan ketersediaan oksigen dan membantu oksidasi NH₃ pada

temperatur rendah. Komposisi 90% *fly ash*, 5% Cu, dan 5% Mn mencapai penghilangan NO_x 98,5% pada 200 derajat C (Darmansyah et al., 2025). Kinerja ini memperlihatkan peluang mengubah residu abu menjadi platform katalitik, tetapi penerapannya memerlukan kontrol stabilitas logam, potensi sintering, dan pengelolaan residu akhir.

Titania dan sistem berbasis vanadium bekerja melalui peningkatan luas permukaan aktif, reaksi redoks, dan jalur reduksi NO. Pada *cofiring* batubara-tongkol jagung, kondisi yang dilaporkan efektif menggunakan V-TiO₂ 8%, rasio Ca/S 2,3, dan temperatur 850 derajat C; char biomassa lebih aktif mereduksi NO dibanding char batubara (Wang et al., 2017). Spent SCR catalyst yang mengandung TiO₂ juga dapat menurunkan temperatur penyalan dan *burnout* ketika dicampurkan dengan batubara, sambil memfiksasi V dan As dalam *bottom ash*, meskipun laju solidifikasi dan pelindian dipengaruhi temperatur serta rasio pencampuran (L. Wang et al., 2019).

Aditif Ca, Mg, kaolin, SiO₂, dan Al₂O₃ terutama mengubah kimia abu. Pada abu batubara kaya natrium dalam atmosfer oxy-fuel, CaO sangat menekan sintering dan pelelehan, sedangkan SiO₂ justru mendorong pelelehan; kaolin, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ menghasilkan pengaruh antara yang bergantung pada fase mineral (Zhou et al., 2015). Interkalasi dan eksfoliasi kaolinit meningkatkan kapasitas retensi Na, tetapi uap air dapat memperkuat atau berkompetisi pada situs adsorpsi, sehingga terdapat keseimbangan dinamis sekitar konsentrasi uap tertentu (Yu et al., 2020). Pemodelan termodinamika juga menunjukkan bahwa abu batubara kaya Si-Al dapat menghambat spesies korosif lebih baik daripada aditif Fe tunggal (Yelland et al., 2021).

Bahan organik dan bioliquid memodifikasi pembakaran melalui penambahan volatil, perubahan pembasahan, dan distribusi bahan bakar pada permukaan partikel. Impregnasi lignit dengan gliserol hingga 20% meningkatkan nilai kalor dan combustibility, sedangkan kadar lebih tinggi menyebabkan defisit oksigen lokal dan ekspansi termal yang merugikan (Lee et al., 2016). Penambahan bioetanol, terpenin, atau gliserol pada *slurry* dapat menurunkan oksida sulfur hingga 75% dan oksida nitrogen hampir 30%, dengan keuntungan maksimum pada gliserol 20% dalam studi terkait (Nyashina & Strizhak, 2018). Karena itu, bioliquid bukan sekadar pengganti energi, tetapi modifier antarmuka dan volatil.

Secara keseluruhan, mekanisme modifier dapat dikelompokkan menjadi katalisis redoks, pembawa atau donor oksigen, sorpsi sulfur dan klorin, fiksasi alkali, rekayasa mineral abu, peningkatan volatil, serta perubahan atomisasi. Beberapa material menjalankan lebih dari satu fungsi; aditif multioxide Silanite, misalnya, menurunkan partikulat, *loss on ignition*, dan NO_x sekaligus memperpanjang umur tube pada pengujian skala komersial (Daood et al.,

2017). Literatur terbaru mengarah pada katalis cerdas yang menggabungkan fungsi redoks dan sorpsi, bukan aditif tunggal dengan satu sasaran (Włodarczak et al., 2026; Darmansyah et al., 2025).

Tabel 1. Ringkasan kelas modifier pembakaran, mekanisme, manfaat, dan risiko

Kelas intervensi	Bahan/sistem	Mekanisme utama	Temuan utama	Risiko atau batasan	Ref.
Katalis Fe	FeCl ₃ /FeOOH pada lignit	Spesies Fe terdispersi mempercepat oksidasi	Temperatur penyalaaan turun sekitar 112 °C	Aktivitas melemah setelah aglomerasi pada temperatur tinggi	Chen et al. (2025)
Material bed aktif	Abu lignit 54,4% Fe ₂ O ₃	Transfer oksigen dan oksidasi volatil	Kinerja meningkat hingga kecenderungan jenuh pada substitusi 50%	NOx dapat meningkat	Ma et al. (2025)
Katalis bimetal	Fly ash-CuO-MnO ₂	Fast SCR dan peningkatan oksigen permukaan	Penghilangan NOx 98,5% pada 200 °C	Perlu kendali NH ₃ slip, stabilitas, dan logam	Darmansyah et al. (2025)
Aditif multioxide	Silanite	Katalisis, perbaikan burnout, dan rekayasa abu	Partikulat turun 20%, LOI 42%, NOx 8-25%	Komposisi bahan bakar dan skala boiler menentukan	Daood et al. (2017)
Sorbent/mineral	CaO, kaolin, Al ₂ O ₃ , SiO ₂	Perubahan fase dan titik leleh abu	CaO menekan sintering; SiO ₂ dapat mendorong pelelehan	Efek berlawanan bila mineralogi berubah	Zhou et al. (2015)
Pengikat alkali	Kaolinit termodifikasi	Adsorpsi dan fiksasi Na	Retensi Na meningkat setelah interkalasi-eksfoliasi	Uap air dapat membantu atau berkompetisi	Yu et al. (2020)
Bioliqid	Gliserol pada lignit	Penambahan volatil dan peningkatan nilai kalor	Combustibility membaik hingga 20% gliserol	Kadar lebih tinggi menyebabkan defisit O ₂ lokal	Lee et al. (2016)
Aditif tanaman	Jerami, bunga matahari, alga	Pengenceran sulfur dan char reaktif	SOx turun 62-87%; NOx 12-57%	Jerami/alga dapat meningkatkan HCl	Nyashina et al. (2020)
Abu sebagai aditif	Abu biomassa/fly ash	Pelepasan spesies reaktif dan perubahan N-partitioning	Berpotensi meningkatkan konversi karbon dan menurunkan NOx	Kontaminan abu dapat memperburuk korosi	Birley et al. (2019)
Hibrida pengendalian	Fe-based additive + SNCR	Situs pseudo-katalitik untuk reaksi NH ₃ -NO	Tambahan reduksi NOx >10%	Tergantung temperatur dan stoikiometri NH ₃	Daood et al. (2017)

4. BUKTI KINERJA MODIFIER PADA SKALA LABORATORIUM HINGGA INDUSTRI

Bukti laboratorium menunjukkan potensi besar, tetapi rentang efek sangat lebar. Residu besi 0,5% meningkatkan efisiensi pembakaran 6,15% dan menurunkan konsentrasi PAH 44,94% pada 1150 derajat C; penurunan TEQ PAH maksimum mencapai 45,24% pada 1250 derajat C (Qin et al., 2015). Sebaliknya, peningkatan konversi volatil oleh abu kaya besi dapat menaikkan NOx karena oksidasi nitrogen berlangsung lebih lengkap (Ma et al., 2025). Dua hasil ini menegaskan bahwa optimasi pembakaran tidak identik dengan optimasi emisi dan harus dilakukan secara multiobjektif.

Studi boiler memberikan ukuran manfaat yang lebih konservatif namun lebih relevan. Pada boiler moving grate 41,1 MW, aditif komersial meningkatkan efisiensi sekitar 0,5-1 poin persentase, tetapi tidak menunjukkan pengaruh nyata terhadap NOx, SO₂, dan CO pada rasio dosis yang diuji (Junga et al., 2019). Pada boiler berdaya rendah, aditif cair meningkatkan efisiensi 2,49 poin persentase; pada boiler industri 12 MW, efisiensi meningkat dari sekitar 86% menjadi 88% dan emisi CO₂ per unit energi turun 5% (Junga et al., 2020). Perbedaan ini

menunjukkan pentingnya beban, excess air, kualitas batubara, serta baseline operasi.

Silanite diuji dari skala bench hingga 233 MWth. Hasil yang dilaporkan mencakup pengurangan partikulat 20%, *loss on ignition* 42%, NOx 8-25%, dan peningkatan umur tube sekitar 30% (Daood et al., 2017). Teknologi hibrida aditif Fe-SNCR juga meningkatkan pemanfaatan amonia dan menambah reduksi NOx lebih dari 10%, karena permukaan Fe diduga menyediakan situs pseudo-katalitik bagi reaksi NH₃-NO (Daood, Yelland, & Nimmo, 2017). Bukti tersebut mendukung pendekatan integratif: modifier bahan bakar dapat memperkuat teknologi pengendalian yang sudah ada, bukan menggantikannya.

Katalis komersial SUPERTHERM K2R dilaporkan menargetkan pengurangan konsumsi batubara atau petcoke 10-15%, disertai penurunan kebutuhan crusher, fan udara paksa, dan biaya handling. Namun, peningkatan konsumsi air demineralisasi juga diamati pada aplikasi pembangkit (Chandel et al., 2026). Klaim manfaat bahan bakar harus dinormalisasi terhadap energi netto, air, *auxiliary power*, kualitas abu, dan *availability*; tanpa normalisasi tersebut, penghematan massa batubara dapat menyembunyikan beban operasional lain.

Rekayasa sistem pembakaran tetap menjadi pembanding penting. Modifikasi nozzle, *staged air*, dan *separated overfire air* pada boiler 600 MWe menurunkan NOx 50%, dari 1501 menjadi 751 mg/m³ pada O₂ 6%, dengan kenaikan karbon *fly ash* yang kecil dari 4,13% menjadi 4,30% (Ma et al., 2015). Hasil ini memperlihatkan bahwa pengaturan aerodinamika dapat menghasilkan manfaat sebesar atau lebih besar daripada aditif. Strategi terbaik kemungkinan merupakan kombinasi antara optimasi burner, kontrol udara, pemilihan modifier, dan pengendalian pascapembakaran (Ma et al., 2015; Włodarczak et al., 2026).

Kualitas bukti harus dinilai berdasarkan skalanya. Pengujian TGA, *drop tube furnace*, dan *fixed-bed* sangat baik untuk mengidentifikasi temperatur reaksi, energi aktivasi, dan mekanisme mineral; *pilot plant* menguji interaksi dengan aliran dan waktu tinggal; sedangkan boiler industri menangkap pengotor bahan bakar, dinamika beban, deposit jangka panjang, serta keterbatasan sistem kontrol. Dengan demikian, aditif yang menjanjikan seharusnya melewati urutan karakterisasi, uji termokinetik, uji korosi dan ash fusion, pilot, kemudian demonstrasi industri (Chen et al., 2025; Junga et al., 2020).

5. COFIRING BIOMASSA DAN REKAYASA ABU DALAM SISTEM BATUBARA

Cofiring biomassa memberikan tiga keuntungan potensial: substitusi karbon fosil, peningkatan reaktivitas campuran, dan pemanfaatan residu. Namun, sifat biomassa yang heterogen menuntut karakterisasi proksimat, ultimat, nilai kalor, distribusi ukuran, dan kimia abu. Campuran daun, jerami, dan serbuk gergaji menunjukkan emisi antropogenik 8-66% lebih rendah dibanding komponen tunggal tertentu, sedangkan pirolisis campuran menghasilkan gas mudah terbakar 30% lebih tinggi (Glushkov et al., 2021). Hal ini menunjukkan sinergi komposisi, bukan sekadar efek pengenceran.

Pada bahan bakar padat terpelet, sifat mekanik dan ash fusion sama pentingnya dengan nilai kalor. Pelet dari beberapa limbah padat kota yang menggunakan binder NovoGro mencapai nilai kalor di atas 16,30 MJ/kg dan ketahanan kejutan mekanik di atas 99%, tetapi bahan dengan kombinasi K, Ca, dan Si tinggi dapat membentuk eutektik bertitik leleh rendah dan meningkatkan *slagging* (T. Wang et al., 2018). Briket biochar jerami jagung pada kondisi tertentu mencapai nilai kalor 21,48 MJ/kg dengan emisi CO, NOx, dan SO₂ yang relatif rendah serta ketahanan mekanik sekitar 90% (T. Wang et al., 2019).

Aditif aktif pada circulating fluidized bed digunakan untuk mengatasi *fouling*, korosi, aglomerasi, efisiensi rendah, dan NOx. Bahan berbasis silika-alumina, sulfur, kalsium, dan fosfor membentuk garam bertitik leleh tinggi atau menurunkan Cl aktif; oxygen carrier memperbaiki

distribusi oksigen; sedangkan bahan berbasis Fe atau reduktor menekan pembentukan NOx atau mereduksi NOx yang telah terbentuk (Ma et al., 2024). Abu lignit kaya besi juga dapat menggantikan sebagian material bed dan meningkatkan oksidasi volatil biomassa, tetapi trade-off NOx harus dikelola (Ma et al., 2025).

Pemanfaatan abu sebagai aditif memberikan nilai sirkular, tetapi komposisi harus dikendalikan. Abu biomassa atau *fly ash* dapat melepaskan partikel ultra-halus dan senyawa reaktif yang mengubah pelepasan nitrogen volatil serta konversi karbon, sehingga berpotensi menurunkan NOx pada furnace dengan pengendalian emisi (Birley et al., 2019). Aluminosilikat pada pembakaran wood dust mengubah *fly ash* menjadi lebih pozzolanik, meningkatkan fraksi partikel kecil berbentuk sferis, dan mengurangi mobilitas beberapa unsur berbahaya (Fuller et al., 2019). Sebaliknya, kontaminan tertentu dalam abu dapat memperburuk spesies korosif (Yelland et al., 2021).

Biomassa juga dapat dipadukan dengan pendekatan biologis. Mikroalga *Scenedesmus* sp. ditumbuhkan menggunakan gas buang dan biomassa hasilnya digunakan sebagai aditif batubara. Produk yang disebut *green coal* memiliki abu 8,7% lebih rendah dan nilai kalor 26,17% lebih tinggi, sementara sistem budidaya menunjukkan fiksasi CO₂ (Taştan & Tekinay, 2016). Konsep ini menarik karena menghubungkan penangkapan karbon biologis, produksi biomassa, dan peningkatan bahan bakar, tetapi memerlukan evaluasi energi kultur, penggunaan lahan-air, dan stabilitas pasokan biomassa.

Dalam perspektif operasi, rasio *cofiring* optimum tidak dapat ditetapkan secara generik. Rasio rendah mungkin mudah diterapkan, tetapi manfaat dekarbonisasi terbatas; rasio tinggi meningkatkan substitusi fosil, tetapi dapat menurunkan nilai kalor campuran, mengubah kebutuhan udara, menaikkan moisture, dan memperbesar risiko deposit. Pemrosesan awal seperti pengeringan, pelletization, torrefaction, biochar, atau impregnasi bioliquid dapat memperbaiki densitas energi dan handling, namun menambah energi serta biaya (Włodarczak et al., 2026; Lee et al., 2016).

Karena itu, *cofiring* sebaiknya diposisikan sebagai rekayasa sistem bahan bakar-abu. Seleksi biomassa perlu dipasangkan dengan aditif yang menetralkan komponen bermasalah: kaolin untuk alkali, Ca atau material sulfur-fosfor untuk klorin dan deposit, serta abu Si-Al untuk korosi. Validasi harus mencakup profil temperatur furnace, unburned carbon, deposit probe, laju korosi, emisi spesifik per MWh, dan kualitas abu untuk pemanfaatan lanjutan (Ma et al., 2024; Fuller et al., 2019).

6. SLURRY BERBASIS LIMBAH: ATOMISASI, MIKROEKSPLOSI, DAN EMISI

Coal-water slurry menawarkan jalur pemanfaatan coal slime, filter cake, limbah minyak, biomassa, dan residu organik. Air menurunkan densitas energi per massa bahan bakar basah, tetapi menciptakan fenomena perpindahan panas dan massa yang tidak muncul pada batubara kering. Pada tahap pemanasan, air menguap, membentuk tekanan internal, dan dapat memicu fragmentasi droplet. Luas permukaan aerosol yang meningkat mempercepat pelepasan volatil dan *burnout*, sehingga performa lingkungan relatif dapat membaik hingga 40% pada kondisi mikroeksplosi yang sesuai (Nyashina, Vershinina, & Strizhak, 2020; Antonov et al., 2021).

Kualitas atomisasi menentukan apakah keuntungan tersebut terealisasi. Peningkatan temperatur gas sekitar lingkungan nozzle menaikkan kecepatan jet 30% dan fraksi droplet kecil 40-60%, sedangkan kenaikan tekanan dapat menurunkan parameter tertentu sebesar 11-32%; pengaruh gabungan temperatur-tekanan pada beberapa karakteristik berada dalam rentang 18% (Kuznetsov et al., 2024). Penambahan biomassa kayu dan komponen cair mudah terbakar dapat memperbaiki atau memperburuk spray bergantung pada laju aliran udara, sehingga desain nozzle harus disesuaikan dengan komposisi (Kuznetsov et al., 2022).

Stabilizer memperbaiki sedimentasi, tetapi dapat mengubah fragmentasi. Pada droplet coal slime yang berinteraksi dengan air jet, aditif stabilisasi mengurangi jumlah droplet sekunder beberapa kali; peta regime berbasis Weber, Reynolds, Ohnesorge, dan capillarity digunakan untuk memprediksi deformasi serta breakup (Vysokomornaya et al., 2025). Artinya, stabilitas penyimpanan dan kemampuan atomisasi dapat berlawanan: *slurry* yang sangat stabil belum tentu menghasilkan spray terbaik. Identifikasi komponen dalam jet melalui laser induced fluorescence, interferometric particle imaging, dan shadow photography menunjukkan bahwa distribusi batubara, biomassa, dan fase cair tidak selalu homogen pada setiap droplet (Kerimbekova et al., 2022).

Parameter persiapan yang dilaporkan menghasilkan pembakaran baik meliputi ukuran partikel di bawah 100 mikrometer, fraksi padat 55-60%, droplet spray di bawah 300 mikrometer, temperatur 950-1050 derajat C, rasio udara-bahan bakar 1,2-1,3, dan penambahan waste mineral oil 3-7% (Sverchkov et al., 2022). Rentang ini tidak boleh diperlakukan sebagai standar universal, tetapi menyediakan titik awal desain uji. Variasi moisture, ash, viskositas, dan distribusi ukuran partikel akan menggeser kondisi optimum.

Dari sisi termokinetik, pembentukan *slurry* dari coal slime dan air menurunkan temperatur penyalan dan *burnout* hingga 16%. Penambahan biomassa dan waste oil menurunkan temperatur penyalan 6-9%, temperatur *burnout* 17-25%, serta energi aktivasi 28-

51% dibanding *slurry* tanpa aditif; NO_x dan SO₂ dapat ditekan hingga 2,75 kali (Dorokhov et al., 2024). Pada rentang pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran, *slurry* menghasilkan temperatur ekstrem 50-100 derajat C lebih rendah daripada batubara dan emisi utama 20-77% lebih rendah, dengan efek biomassa terbaik pada 850-1000 derajat C (Nyashina et al., 2023).

Normalisasi emisi sangat menentukan interpretasi. Perbandingan berbasis konsentrasi gas saja dapat bias karena *slurry* mengandung air dan memiliki nilai kalor berbeda. Ketika dinormalisasi terhadap massa bahan bakar, energi termal, laju emisi, kilogram fuel equivalent, atau MJ, *slurry* menunjukkan CO₂, SO₂, dan NO_x 12-90% lebih rendah daripada batubara pada studi tertentu; campuran coal slime-serbuk gergaji menjadi komposisi paling menjanjikan (Nyashina et al., 2022). Studi lain menunjukkan penambahan biomassa menurunkan NO_x dan SO₂ 5-33% dibanding *coal-water slurry* atau campuran waste oil, serta 23-68% dibanding batubara per massa bahan bakar (Dorokhov et al., 2021).

Mekanisme penurunan emisi tidak hanya berupa pengenceran. Uap air dalam zona reaksi dapat mengubah radikal, menurunkan temperatur lokal, dan mendorong konversi sebagian sulfur dan nitrogen ke bentuk kurang aktif. Biomassa memberi efek pengenceran sulfur sekaligus menyediakan volatil dan char reaktif (Nikitin et al., 2021; Akhmetshin et al., 2020). Penambahan limbah tanaman maksimum 10% pada *slurry* menurunkan SO_x 62-87% dan NO_x 12-57%, tetapi jerami dan alga dapat menaikkan HCl sehingga memerlukan pengendalian korosi (Nyashina, Kuznetsov, & Strizhak, 2020).

Evaluasi multi-kriteria memperlihatkan bahwa *slurry* dengan 5% sekam padi, serbuk gergaji, atau sewage sludge dapat meningkatkan stabilitas sedimentasi 2,5-4,2 kali, parameter atomisasi 1,5-2 kali, dan indikator lingkungan 1,5-2,4 kali. Pada 700-900 derajat C, komposisi dengan sewage sludge dan sekam padi mempunyai efisiensi relatif 10-12% lebih tinggi daripada *slurry* tanpa aditif (Belonogov et al., 2024). Studi komposit sebelumnya juga melaporkan indikator lingkungan-ekonomi-energi 10-24% lebih baik daripada batubara dan penurunan NO_x 25-62% serta SO_x 61-88% (Glushkov, Nyashina, Medvedev, & Vershinina, 2020).

Walaupun menjanjikan, *slurry* menambah kebutuhan grinding, mixing, stabilisasi, pompa, nozzle tahan abrasi, dan pengelolaan air. Penambahan waste oil dapat meningkatkan nilai energi tetapi memperburuk emisi tertentu; komposisi limbah padat kota juga menghasilkan karakteristik penyalan dan emisi yang berbeda (Nyashina, Vershinina, Kurgankina, & Strizhak, 2018; Glushkov, Paushkina, & Shabardin, 2020). Kajian awal pada *coal-water slurry* dengan waste oil dan sawdust juga menegaskan perlunya optimasi konsumsi bahan bakar dan emisi secara bersamaan

(Nyashina, Kurgankina, & Akhmetshin, 2019). Oleh karena itu, kelayakan harus dinilai dari energi netto

dan biaya sistem, bukan hanya dari hasil pembakaran satu droplet.

Tabel 2. Ringkasan bukti kuantitatif pada cofiring, slurry, dan skala boiler

Sistem	Kondisi/komposisi kunci	Indikator	Hasil yang dilaporkan	Implikasi	Ref.
Slurry coal slime-biomassa	5% sekam, serbuk gergaji, atau sludge	Stabilitas, atomisasi, lingkungan	Naik 2,5-4,2x; 1,5-2,0x; 1,5-2,4x	Komposisi optimum perlu multi-kriteria	Belonogov et al. (2024)
Slurry coal-water	Biomassa dan waste oil	Temperatur dan energi aktivasi	Burnout turun 17-25%; Ea turun 28-51%	Aditif mempercepat konversi	Dorokhov et al. (2024)
Slurry berbagai limbah	Pirolisis 400-700 °C; pembakaran 700-1000 °C	Gas dan emisi	Emisi utama 20-77% lebih rendah daripada batubara	Perlu normalisasi per energi	Nyashina et al. (2023)
Spray slurry	Variasi temperatur dan tekanan gas	Kecepatan dan ukuran droplet	Temperatur menaikkan kecepatan jet 30% dan droplet kecil 40-60%	Nozzle harus disesuaikan kondisi chamber	Kuznetsov et al. (2024)
Slurry stabil	Stabilizer dan air jet	Breakup sekunder	Jumlah droplet sekunder turun beberapa kali	Stabilitas dan atomisasi dapat trade-off	Vysokomor naya et al. (2025)
Coal slime-sawdust	Normalisasi per massa dan energi	CO ₂ , SO ₂ , NO _x	Konsentrasi 12-90% lebih rendah daripada batubara	Basis perbandingan menentukan kesimpulan	Nyashina et al. (2022)
Biomassa campuran	Daun, jerami, serbuk gergaji	Emisi dan gas pirolisis	Emisi turun 8-66%; gas mudah terbakar naik 30%	Campuran dapat lebih baik daripada komponen tunggal	Glushkov et al. (2021)
Briket biochar	Biochar jerami 350 °C + binder	Nilai kalor dan emisi	21,48 MJ/kg; ketahanan mekanik sekitar 90%	Pra-perlakuan memengaruhi mutu bahan bakar	T. Wang et al. (2019)
Boiler moving grate	Dosis aditif 1 L/Mg	Efisiensi dan emisi	Efisiensi naik 0,5-1 poin persentase; emisi tidak jelas berubah	Manfaat kecil dapat ekonomis bila konsisten	Junga et al. (2019)
Boiler industri 12 MW	Aditif cair	Efisiensi dan CO ₂ spesifik	Efisiensi sekitar 86 menjadi 88%; CO ₂ /energi turun 5%	Validasi industri penting	Junga et al. (2020)
Boiler 600 MWe	Rekonfigurasi nozzle, staged air, SOFA	NO _x dan karbon abu	NO _x turun 50%; karbon abu naik 4,13 ke 4,30%	Aerodinamika harus menjadi baseline	Ma et al. (2015)

7. EMISI, ABU, KOROSI, DAN RISIKO SEKUNDER

Pengendalian NO_x merupakan area dengan trade-off paling jelas. Peningkatan temperatur, excess oxygen, dan oksidasi volatil biasanya memperbaiki *burnout*, tetapi dapat meningkatkan NO_x (Ma et al., 2025). Aditif Fe dan abu reaktif dapat mengubah pelepasan nitrogen volatil serta menyediakan situs reduksi; efektivitasnya tergantung *fuel ratio* dan konfigurasi furnace (Birley et al., 2019; Daood, Yelland, & Nimmo, 2017). Sistem SCR berbasis Cu-Mn mampu bekerja pada temperatur rendah, tetapi memerlukan pengendalian NH₃ slip dan potensi N₂O (Darmansyah et al., 2025). Untuk N₂O, Co₃O₄ hasil kopresipitasi mencapai dekomposisi 98% pada 400 derajat C, menunjukkan bahwa produk samping nitrogen memerlukan katalis khusus (Inayat et al., 2019).

SO₂ lebih erat terkait kadar sulfur bahan bakar, sorpsi oleh Ca/Mg, dan interaksi logam aktif. Biomassa rendah sulfur memberi manfaat pengenceran, sedangkan air dan logam amfoterik

dapat memengaruhi jalur reaksi sulfur (Akhmetshin et al., 2020; Nikitin et al., 2021). Aditif tanaman dan bioliquid sering menurunkan SO_x secara substansial, namun komponen Cl pada jerami atau alga dapat menggeser risiko dari SO₂ menuju HCl dan korosi temperatur tinggi (Nyashina & Strizhak, 2018; Nyashina, Kuznetsov, & Strizhak, 2020).

Partikulat dan unburned carbon dipengaruhi reaktivitas char, *residence time*, dan distribusi udara. Silanite menurunkan partikulat dan *loss on ignition* pada pengujian skala besar, sementara modifikasi sistem burner menurunkan NO_x dengan kenaikan karbon *fly ash* yang minimal (Daood et al., 2017; Ma et al., 2015). Namun, aditif yang memperhalus atau mengubah morfologi *fly ash* dapat menggeser distribusi ukuran partikulat dan kinerja electrostatic precipitator, sehingga pemantauan total dust harus dilengkapi dengan karakterisasi ukuran serta resistivitas abu.

Risiko organik juga perlu diperhatikan. Residu besi menurunkan PAH pada temperatur tinggi, tetapi co-combustion coal liquefaction residue menunjukkan emisi senyawa benzena yang berubah

nonlinier terhadap temperatur; pembakaran di atas 850 derajat C lebih baik daripada kondisi rendah pada sistem tersebut (Qin et al., 2015; Dong et al., 2015). Limbah minyak dan plastik dapat meningkatkan temperatur pembakaran, tetapi juga memperkenalkan prekursor organik dan logam yang berbeda (Glushkov, Paushkina, & Shabardin, 2020).

Abu tidak boleh diperlakukan sebagai residu pasif. Penambahan aditif mengubah massa abu per unit energi, fase mineral, kemampuan leaching, pozzolanicity, dan potensi pemanfaatan. Analisis *slurry* menunjukkan perlunya menghitung abu untuk massa bahan bakar tetap maupun energi yang sama (Nyashina, Kurgankina, Akhmetshin, & Medvedev, 2020). Aluminosilikat dapat meningkatkan kualitas *fly ash* untuk aplikasi material, sedangkan co-combustion spent catalyst dapat memfiksasi V/As bila kondisi temperatur dan rasio CaO memadai (Fuller et al., 2019; L. Wang et al., 2019).

Korosi fireside terbentuk melalui interaksi alkali, klorin, sulfur, dan material tube. Pemodelan FactSage menunjukkan bahwa peningkatan Si dan Al pada deposit penting untuk menekan spesies korosif; abu batubara dengan Si-Al tinggi lebih efektif daripada aditif Fe tunggal dalam kasus yang dianalisis (Yelland et al., 2021). Pada batubara kaya Na, kaolinit termodifikasi meningkatkan fiksasi Na, tetapi uap air mengubah kompetisi adsorpsi (Yu et al., 2020). Dengan demikian, pemilihan aditif harus berbasis rasio molar unsur reaktif dan diagram fase, bukan sekadar dosis massa.

Risiko sekunder terakhir adalah perpindahan polutan antar-media. Penurunan NO_x gas dapat meningkatkan N₂O atau NH₃ slip; penangkapan logam dalam *bottom ash* dapat meningkatkan beban limbah padat; peningkatan efisiensi dapat menambah konsumsi air atau *auxiliary power*. Literatur tentang katalis Cu-Mn, spent SCR catalyst, dan aditif komersial memperlihatkan perlunya neraca massa lintas-media serta analisis siklus hidup operasional (Darmansyah et al., 2025; Chandel et al., 2026).

8. KERANGKA SELEKSI DAN IMPLEMENTASI TEKNOLOGI

Tahap pertama adalah membangun *fingerprint* bahan bakar dan abu: moisture, volatile matter, fixed carbon, sulfur, nitrogen, Cl, K, Na, Ca, Mg, Fe, Si, Al, P, ash fusion, dan mineralogi. Data ini digunakan untuk mengidentifikasi masalah dominan, apakah penyalan lambat, *burnout* buruk, NO_x tinggi, sulfur, alkali, korosi, atau aglomerasi. Karakterisasi mikrostruktur dan fase mineral membantu membedakan unsur aktif dari unsur yang terperangkap dalam kristal tidak reaktif (Chen et al., 2025; Li et al., 2018).

Tahap kedua adalah pemilihan fungsi modifier. Untuk masalah kinetika, kandidat Fe, Mn, Cu, Ti, atau bioliquid diuji terhadap temperatur penyalan, energi aktivasi, dan *burnout*. Untuk sulfur dan klorin, diuji Ca/Mg, aluminosilikat, atau bahan berbasis P.

Untuk Na/K dan deposit, digunakan kaolin atau abu kaya Si-Al. Untuk NO_x, modifier dapat dipadukan dengan staged combustion, SNCR, atau SCR temperatur rendah (Wang et al., 2017; Darmansyah et al., 2025).

Tahap ketiga adalah *screening* termokinetik dan abu. TGA/DSC menentukan onset, peak, *burnout*, dan energi aktivasi; XRD, XPS, SEM-EDS, dan ash fusion memetakan fase serta morfologi; uji leaching dan korosi menilai risiko residu. Pemodelan termodinamika dapat mempersempit kombinasi dosis sebelum pengujian mahal (Chen et al., 2025; L. Wang et al., 2019). Untuk *slurry*, rheology, sedimentation, atomization, dan regime breakup harus ditambahkan (Belonogov et al., 2024; Vysokomornaya et al., 2025).

Tahap keempat adalah validasi pilot dengan variasi beban, excess air, *residence time*, ukuran partikel, dan rasio *cofiring*. Emisi dinormalisasi minimal terhadap energi netto, bukan hanya konsentrasi volume. Parameter yang harus dipantau meliputi *heat rate*, efisiensi boiler, unburned carbon, CO, NO_x, SO₂, dust, HCl bila relevan, konsumsi air, *auxiliary power*, deposit rate, dan corrosion probe (Nyashina et al., 2022; Junga et al., 2020; Chandel et al., 2026).

Tahap kelima adalah demonstrasi industri dengan desain *before-after* yang memadai. Operasi dengan dan tanpa modifier perlu dibandingkan pada kualitas bahan bakar, beban, O₂, dan kondisi sootblowing yang setara. Studi boiler moving grate dan boiler 12 MW menunjukkan bahwa efek aditif dapat kecil tetapi bernilai ekonomi bila berlangsung konsisten (Junga et al., 2019; Junga et al., 2020). Pengujian Silanite memperlihatkan pentingnya validasi lintas skala hingga ratusan MWth (Daood et al., 2017).

Keputusan akhir perlu menggunakan *multi-criteria decision analysis*. Kriteria minimum adalah efisiensi energi, emisi per MWh, biaya bahan bakar dan aditif, *auxiliary power*, air, risiko korosi, *availability*, kualitas abu, keselamatan, serta tingkat pemanfaatan limbah. Pendekatan multi-kriteria pada *slurry* menunjukkan bahwa komposisi terbaik tidak selalu memiliki nilai kalor tertinggi, tetapi menawarkan keseimbangan stabilitas, atomisasi, emisi, dan biaya (Belonogov et al., 2024; Glushkov, Nyashina, Medvedev, & Vershinina, 2020; Nyashina, Kurgankina, & Strizhak, 2018).

Untuk konteks pembangkit eksisting, implementasi bertahap lebih aman daripada perubahan rasio besar secara langsung. Tahap awal dapat menggunakan biomassa berkarakter baik pada rasio rendah, diikuti modifier spesifik untuk masalah abu, kemudian integrasi kontrol udara dan pengendalian emisi. Data operasi kontinu seharusnya digunakan untuk memperbarui dosis dan rasio campuran karena kualitas batubara serta biomassa berubah. Kerangka ini selaras dengan arah katalis cerdas dan optimasi adaptif yang ditekankan dalam

literatur terbaru (Włodarczak et al., 2026; Ma et al., 2024; Darmansyah et al., 2025).

9. KESENJANGAN PENGETAHUAN DAN AGENDA RISET

Kesenjangan pertama adalah dominasi studi laboratorium berjangka pendek. Banyak hasil menunjukkan penurunan temperatur penyalan atau emisi, tetapi belum menguji deposit, korosi, deaktivasi katalis, dan perubahan performa selama pemanasan dan sintering Cu-Mn menunjukkan bahwa umur aktif dapat berbeda dari kinerja awal (Chen et al., 2025; Darmansyah et al., 2025). Studi lanjutan perlu mengukur kinetika deaktivasi, regenerasi, dan pelepasan logam.

Kesenjangan kedua adalah kurangnya standardisasi indikator. Konsentrasi ppm, mg/m³, emisi per massa bahan bakar, dan emisi per MJ sering dibandingkan secara langsung, padahal denominator berbeda dapat mengubah kesimpulan. *Slurry* terutama membutuhkan normalisasi per energi netto karena kandungan air tinggi (Nyashina et al., 2022; Nyashina et al., 2023). Protokol masa depan sebaiknya melaporkan seluruh basis, termasuk koreksi O₂, moisture, dan energi listrik netto.

Kesenjangan ketiga adalah keterbatasan data interaksi multi-komponen. Sebagian besar penelitian menguji satu atau dua aditif, sedangkan sistem nyata mengandung mineral inheren, biomassa, reagent SNCR/SCR, dan residu pembakaran. Sinergi Fe-Ca-Mg, Cu-Mn, Ti-Ca, atau kaolin-uap air perlu dipetakan dengan desain eksperimen dan model reaksi permukaan (Włodarczak et al., 2026; Wang et al., 2017; Yu et al., 2020; Darmansyah et al., 2025).

Kesenjangan keempat adalah integrasi atomisasi dengan kimia emisi. Model dimensionless telah mampu memprediksi breakup droplet, tetapi belum selalu terhubung dengan distribusi komponen, ignition delay, *burnout*, dan pembentukan NO_x/SO₂ (Vysokomornaya et al., 2025; Kerimbekova et al., 2022; Kuznetsov et al., 2024). Model generasi berikutnya perlu menggabungkan CFD, rheology, heat-mass transfer, dan reaction kinetics.

Kesenjangan kelima adalah penilaian sirkularitas yang belum lengkap. Pemanfaatan *fly ash*, spent catalyst, coal slime, sewage sludge, waste oil, ban bekas, dan limbah kota mengurangi penimbunan, tetapi dapat memindahkan logam atau organik ke abu dan gas. Bahan bakar cair hasil pirolisis ban memiliki nilai kalor 40,56-43,30 MJ/kg dan waktu tunda penyalan lebih rendah, tetapi integrasinya tetap memerlukan pengendalian komposisi serta emisi (Larionov et al., 2022). Evaluasi harus mencakup asal limbah, pra-perlakuan, logistik, residu, dan pemanfaatan abu (Kurgankina et al., 2021; Nyashina, Kurgankina, & Strizhak, 2018).

Agenda prioritas adalah pengembangan nanokomposit multifungsi yang menggabungkan katalisis redoks, sorpsi, dan stabilitas termal;

pemanfaatan residu lokal sebagai *carrier*; sensor deposit dan emisi untuk optimasi dosis; serta model multiobjektif berbasis data operasi. Katalis tidak seharusnya hanya mengejar konversi karbon, tetapi fungsi gabungan: menurunkan fuel consumption, NO_x, SO₂, partikulat, korosi, dan leaching dengan biaya serta jejak material minimal (Włodarczak et al., 2026; Chandel et al., 2026; Ma et al., 2024).

10. KESIMPULAN

Modifier pembakaran, *cofiring* biomassa, dan *slurry* berbasis limbah menyediakan jalur transisi untuk meningkatkan kinerja lingkungan pembangkit batubara yang masih beroperasi. Bukti menunjukkan bahwa Fe, Cu, Mn, Ti, Ca, Mg, kaolin, aluminosilikat, biomassa, dan bioliquid dapat memperbaiki penyalan, *burnout*, efisiensi, atau emisi melalui mekanisme yang berbeda. Namun, efeknya tidak universal karena dikendalikan oleh spesiasi, dosis, temperatur, atmosfer, mineralogi bahan bakar, dan konfigurasi boiler (Włodarczak et al., 2026; Chen et al., 2025; Zhou et al., 2015).

Temuan paling konsisten adalah perlunya optimasi multiobjektif. Peningkatan konversi dapat menaikkan NO_x; biomassa dapat menurunkan sulfur tetapi meningkatkan HCl; stabilizer memperbaiki penyimpanan *slurry* tetapi mengurangi fragmentasi; dan pemanfaatan limbah dapat memindahkan polutan ke abu. Oleh sebab itu, kinerja harus dievaluasi per unit energi netto serta mencakup korosi, air, *auxiliary power*, kualitas abu, dan risiko pelindian (Ma et al., 2025; Nyashina, Kuznetsov, & Strizhak, 2020; Vysokomornaya et al., 2025; L. Wang et al., 2019).

Strategi implementasi yang paling kuat adalah karakterisasi bahan bakar-abu, pemilihan fungsi modifier, *screening* termokinetik, validasi pilot, demonstrasi industri, dan evaluasi multi-kriteria. Integrasi dengan kontrol udara, SNCR/SCR, dan pengelolaan abu lebih menjanjikan daripada penggunaan aditif sebagai solusi tunggal (Daood et al., 2017; Daood, Yelland, & Nimmo, 2017; Ma et al., 2015). Literatur terbaru mengarahkan penelitian menuju katalis cerdas berbasis residu dan optimasi adaptif yang menggabungkan efisiensi, emisi, keandalan, serta sirkularitas material (Darmansyah et al., 2025; Belonogov et al., 2024; Włodarczak et al., 2026).

DAFTAR REFERENSI

1. Akhmetshin, M.R., Nyashina, G.S., & Strizhak, P.A. (2020). Comparative analysis of factors affecting differences in the concentrations of gaseous anthropogenic emissions from coal and slurry fuel combustion. *Fuel*, 270, 117581. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117581>
2. Antonov, D.V., Nyashina, G.S., Strizhak, P.A., & Romanov, D. (2021). Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals. *Fuel*, 283, 118949. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118949>
3. Belonogov, M., Dorokhov, V., Glushkov, D., Kuznechenkova, D., Paushkina, K., & Romanov, D.

- (2024). Multi-criteria evaluation of slurry fuels based on coal and organic waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 192, 269-284. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.10.036>
4. Birley, R.I., Jones, J.M., Darvell, L.I., Williams, A., Waldron, D.J., Levenidis, Y.A., Rokni, E., & Panahi, A. (2019). Fuel flexible power stations: Utilisation of ash co-products as additives for NOx emissions control. *Fuel*, 251, 800-807. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.002>
 5. Chandel, S.P.S., Singh, M., & Sahu, P.K. (2026). Optimizing combustion efficiency and environmental impact: the influence of SUPERTHERM K2R coal catalyst. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 46(1), 174-186. <https://doi.org/10.1080/19392699.2025.2452300>
 6. Chavda, R., & Mahanwar, P. (2021). Effect of inorganic and organic additives on coal combustion: a review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 41(10), 749-766. <https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1536046>
 7. Chen, J., Yan, Z., He, R., Ban, Y., Zhou, H., & Liu, Q. (2025). Structural evolution of iron components and their action behavior on lignite combustion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 78, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.10.012>
 8. Daood, S.S., Ottolini, M., Taylor, S., Ogunyinka, O., Hossain, M.M., Lu, G., Yan, Y., & Nimmo, W. (2017). Pollutant and Corrosion Control Technology and Efficient Coal Combustion. *Energy and Fuels*, 31(5), 5581-5596. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00017>
 9. Daood, S.S., Yelland, T.S., & Nimmo, W. (2017). Selective non-catalytic reduction – Fe-based additive hybrid technology. *Fuel*, 208, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.019>
 10. Darmansyah, D., Tsai, D.-W., Hsieh, Y.-K., You, S.-J., & Wang, Y.-F. (2025). Unraveling the role of bimetal oxide CuO/MnO₂ on modified catalyst from solid waste incineration fly ash to enhance NOx removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 114988. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114988>
 11. Dong, Z., Yan, D., He, J., Luo, L., & Huang, Z. (2015). Combustion properties and benzene compound emission characteristics of coal liquefaction residual co-combustion. *Research of Environmental Sciences*, 28(8), 1253-1259. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2015.08.11>
 12. Dorokhov, V., Kuznetsov, G.V., Nyashina, G.S., & Strizhak, P.A. (2021). Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*, 285, 117390. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117390>
 13. Dorokhov, V., Nyashina, G.S., & Strizhak, P.A. (2024). Thermogravimetric, kinetic study and gas emissions analysis of the thermal decomposition of waste-derived fuels. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 137, 155-171. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.02.050>
 14. Fuller, A., Omidiji, Y., Viefhaus, T., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2019). The impact of an additive on fly ash formation/transformation from wood dust combustion in a lab-scale pulverized fuel reactor. *Renewable Energy*, 136, 732-745. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.013>
 15. Glushkov, D., Paushkina, K., & Shabardin, D.P. (2020). Co-combustion of coal processing waste, oil refining waste and municipal solid waste: Mechanism, characteristics, emissions. *Chemosphere*, 240, 124892. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124892>
 16. Glushkov, D., Nyashina, G.S., Medvedev, V.V., & Vershinina, K.Y. (2020). Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(6), 2092. <https://doi.org/10.3390/app10062092>
 17. Glushkov, D., Nyashina, G.S., Anand, R., & Strizhak, P.A. (2021). Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. *Process Safety and Environmental Protection*, 156, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.039>
 18. Inayat, A., Ayoub, M., Abdullah, A.Z., Ullah, S., & Naqvi, S.R. (2019). Decomposition of N₂O at low temperature over Co₃O₄ prepared by different methods. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38(4), 13129. <https://doi.org/10.1002/ep.13129>
 19. Junga, R., Pospolita, J., Niemiec, P., & Dudek, M. (2019). The assessment of the fuel additive impact on moving grate boiler efficiency. *Journal of the Energy Institute*, 92(6), 1807-1820. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.12.001>
 20. Junga, R., Pospolita, J., Niemiec, P., Dudek, M., & Szleper, R. (2020). Improvement of coal boiler's efficiency after application of liquid fuel additive. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115663. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115663>
 21. Kerimbekova, S., Kuznetsov, G.V., Volkov, R.S., & Strizhak, P.A. (2022). Identification of slurry fuel components in a spray flow. *Fuel*, 323, 124353. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124353>
 22. Kurgankina, M.A., Nyashina, G.S., & Strizhak, P.A. (2021). Ecological Assessment of Industrial Waste as a High-Potential Component of Slurry Fuels. *Waste and Biomass Valorization*, 12(3), 1659-1676. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01114-1>
 23. Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., Valiullin, T., & Volkov, R.S. (2022). Effect of adding a liquid combustible component and wood biomass to slurry fuel on spraying characteristics. *Powder Technology*, 403, 117382. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117382>
 24. Kuznetsov, G.V., Volokitin, D.I., Volkov, R.S., Podgornaya, E.R., & Strizhak, P.A. (2024). Atomization of composite liquid fuels in experimental setup with varied gas temperature and pressure. *Fuel*, 358, 130213. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130213>
 25. Larionov, K.B., Slyusarsky, K.V., Kirgina, M.V., Gvozdyakov, D.V., Bogdanov, I.A., Zenkov, A.V., Yankovsky, S.A., & Gubin, V.E. (2022). Liquid Hydrocarbons Production by the Steam Pyrolysis of Used Tires: Energy Characteristics and Environmental Sustainability. *Waste and Biomass Valorization*, 13(4), 2233-2251. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01628-2>
 26. Lee, B.-H., Sh, L., Bae, J.-S., Choi, Y.-C., & Jeon, C.-H. (2016). Combustion behavior of low-rank coal impregnated with glycerol. *Biomass and Bioenergy*, 87, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.028>

27. Li, X., Li, J., Wu, G.-G., Bai, Z.-Q., & Li, W. (2018). Clean and efficient utilization of sodium-rich Zhundong coals in China: Behaviors of sodium species during thermal conversion processes. *Fuel*, 218, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.027>
28. Ma, C., Tian, H., Ma, Y., Du, B., Zhang, Y., Lü, J., & Ke, X. (2025). Experimental investigation on the effect of iron-rich coal ash on biomass-volatile combustion characteristics in the fluidized bed. *Energy*, 321, 135391. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135391>
29. Ma, L., Fang, Q., Lv, D., Zhang, C., Chen, Y., Chen, G., Duan, X., & Wang, X. (2015). Reducing NOx Emissions for a 600 MWe Down-Fired Pulverized-Coal Utility Boiler by Applying a Novel Combustion System. *Environmental Science and Technology*, 49(21), 13040-13049. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02827>
30. Ma, Y., Zhang, Y., Tang, X., Qi, J., Wei, L., Huang, Z., Lü, J., & Ke, X. (2024). Research Progress on Effect of Active Additives on Combustion Characteristics of Biomass-fired Circulating Fluidized Bed Combustor. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 44(19), 7693-7705. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231221>
31. Nikitin, A.D., Nyashina, G.S., Ryzhkov, A.F., & Strizhak, P.A. (2021). Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of the Total Environment*, 772, 144909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144909>
32. Nyakuma, B.B., Ajayi, O.M., Ajibade, S.-S.M., & Adediran, A.O. (2025). Microstructural, Morphological, and Compositional Analyses of Duduguru Coal from the Middle Benue Trough, Nigeria. *Petroleum and Coal*, 67(1), 148-155.
33. Nyashina, G.S., Vershinina, K.Y., Kurgankina, M.A., & Strizhak, P.A. (2018). Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal. *Journal of Hazardous Materials*, 347, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.014>
34. Nyashina, G.S., Kurgankina, M.A., & Strizhak, P.A. (2018). Environmental, economic and energetic benefits of using coal and oil processing waste instead of coal to produce the same amount of energy. *Energy Conversion and Management*, 174, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.048>
35. Nyashina, G.S., & Strizhak, P.A. (2018). The influence of liquid plant additives on the anthropogenic gas emissions from the combustion of coal-water slurries. *Environmental Pollution*, 242, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.072>
36. Nyashina, G.S., Kurgankina, M.A., & Akhmetshin, M.R. (2019). Gas anthropogenic emissions during slurry fuels combustion. *AIP Conference Proceedings*, 2135, 020042. <https://doi.org/10.1063/1.5120679>
37. Nyashina, G.S., Kurgankina, M.A., Akhmetshin, M.R., & Medvedev, V.V. (2020). Ash Composition in the Combustion of Promising Slurry Fuels. *Coke and Chemistry*, 63(3), 149-158. <https://doi.org/10.3103/S1068364X20030060>
38. Nyashina, G.S., Kuznetsov, G.V., & Strizhak, P.A. (2020). Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*, 258, 113682. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113682>
39. Nyashina, G.S., Vershinina, K.Y., & Strizhak, P.A. (2020). Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion. *Fuel Processing Technology*, 201, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106334>
40. Nyashina, G.S., Dorokhov, V., Kuznetsov, G.V., & Strizhak, P.A. (2022). Emissions from the combustion of high-potential slurry fuels. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37989-38005. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17727-5>
41. Nyashina, G.S., Dorokhov, V., Romanov, D., & Strizhak, P.A. (2023). Gas composition during thermochemical conversion of dry solid fuels and waste-derived slurries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 24192-24211. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23824-w>
42. Qin, L., Zhang, Y., Han, J., & Chen, W. (2015). Influences of waste iron residue on combustion efficiency and polycyclic aromatic hydrocarbons release during coal catalytic combustion. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(7), 2720-2729. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0227>
43. Sverchkov, I., Chukaeva, M., & Matveeva, V. (2022). Influence of preparation and combustion parameters of coal-water slurries on gas emission chemistry. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(29), 44042-44053. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19038-9>
44. Taştan, B.E., & Tekinay, T. (2016). A novel coal additive from microalgae produced from thermal power plant flue gas. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1086-1094. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.053>
45. Vysokomornaya, O.V., Volkov, R.S., Kuznetsov, G.V., & Strizhak, P.A. (2025). Deformation and breakup of droplets of stabilized coal slime fuels interacting with an air jet. *Advanced Powder Technology*, 36(6), 104887. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.104887>
46. Wang, L., Su, S., Qing, M., Dai, Z., Sun, Z., Liu, L., Wang, Y., Hu, S., Xu, K., & Xiang, J. (2019). Melting solidification and leaching behaviors of V/As during co-combustion of the spent SCR catalyst with coal. *Fuel*, 252, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.150>
47. Wang, S.-Q., Liu, M.-Z., Sun, L.-L., & Cheng, W.-L. (2017). Study on the mechanism of desulfurization and denitrification catalyzed by TiO₂ in the combustion with biomass and coal. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34(6), 1882-1888. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0051-z>
48. Wang, T., Li, Y., Zhang, J., Zhao, J., Liu, Y., Sun, L., Liu, B., Mao, H., Lin, Y., Li, W., Ju, M., & Zhu, F. (2018). Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel. *Waste Management*, 74, 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.043>
49. Wang, T., Li, Y., Zhi, D., Lin, Y., He, K., Liu, B., & Mao, H. (2019). Assessment of combustion and emission behavior of corn straw biochar briquette fuels under different temperatures. *Journal of Environmental Management*, 250, 109399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109399>
50. Włodarczyk, S., Krupińska, A., Bielecki, Z., Odziomek, M., Hardy, T., Tymoszek, M., Pronobis, M., Lewiński, P., Sobieraj, J., Chojński, D., Matuszak, M., & Ochowiak, M. (2026). Perspectives on Cleaner-Pulverized Coal Combustion: The Evolving Role of

- Combustion Modifiers and Biomass Co-Firing. *Energies*, 19(3), 633. <https://doi.org/10.3390/en19030633>
51. Yelland, T.S., Daoood, S.S., & Nimmo, W. (2021). Comparing fuel additives for fireside corrosion inhibition in pulverised fuel boilers using thermodynamic modelling. *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 74, 102283. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2021.102283>
 52. Yu, K., Chen, X., Cai, T., Tang, H., Ma, J., Liu, D., & Liang, C. (2020). The effect of Kaolinite's structure on migration and release characteristics of sodium under oxy-fuel combustion condition. *Fuel*, 277, 118154. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118154>
 53. Zhou, H., Wang, J., & Zhou, B. (2015). Effect of Five Different Additives on the Sintering Behavior of Coal Ash Rich in Sodium under an Oxy-fuel Combustion Atmosphere. *Energy and Fuels*, 29(9), 5519-5533. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00500>