

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu adalah berbagai hasil penelitian, jurnal, artikel ilmiah, laporan, atau studi sebelumnya yang membahas topik yang sama atau berkaitan dengan penelitian yang sedang dilakukan. Bagian ini berfungsi sebagai dasar untuk memahami perkembangan ilmu, metode, serta temuan terkait topik penelitian. Ringkasan penelitian terdahulu tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti & tahun	Judul Penelitian	Hasil penelitian
1	Widyawati & Permana Putri (2021)	Karakteristik <i>Sludge oil</i> sebagai Bahan Bakar Alternatif pada <i>Rotary Kiln</i> Industri Semen	<i>Sludge oil</i> memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif pada <i>rotary kiln</i> industri semen, khususnya setelah dilakukan proses pengolahan awal berupa pengurangan kadar air (<i>moisture content</i>). Hasil pengujian karakteristik fisik dan kimia <i>sludge oil</i> menunjukkan bahwa tingginya kadar air pada kondisi awal menyebabkan nilai kalor (<i>heating value</i>) relatif rendah.

2	Prariesta, Edahwati & Karaman (2023)	Pemanfaatan <i>Refuse-Derived Fuel RDF</i> sebagai bahan bakar alternatif pada proses pembakaran <i>kiln</i> semen	<i>Sludge oil</i> , biomassa dapat menjadi bahan bakar alternatif menurunkan konsumsi batu bara dan emisi relevan untuk implementasi <i>kiln</i> semen. RDF layak diterapkan sebagai bahan bakar alternatif pada <i>kiln</i> semen, baik dari aspek teknis maupun lingkungan, serta berpotensi mendukung peningkatan efisiensi energi dan keberlanjutan industri semen.
3	Safar uddin dkk. (2023)	Studi awal dan evaluasi potensi AFR dari oli/ <i>sludge</i> di <i>kiln</i>	Menunjukkan peluang substitusi batu bara dengan <i>Sludge oil</i> di PT Semen Baturaja serta dampak efisiensi biaya energi.
4	Mustika & Solikin (2024)	Analisis Substitusi Bahan Bakar Fosil dengan Limbah pada <i>Kiln</i> Semen dan Dampaknya terhadap Efisiensi Energi	Substitusi sebagian bahan bakar fosil dengan limbah dapat menurunkan konsumsi batu bara dan biaya energi tanpa menurunkan kualitas <i>Clinker</i> .

2.2. Industri Semen di Indonesia

Industri semen di Indonesia merupakan salah satu sektor industri strategis yang mendukung pembangunan infrastruktur nasional. Pada tahun 2024, kapasitas produksi terpasang industri semen nasional mencapai sekitar 120 juta ton per tahun,

namun konsumsi domestik hanya sekitar 65–70 juta ton per tahun. Kondisi ini menimbulkan *overcapacity*, sehingga produsen menghadapi tekanan efisiensi dan biaya produksi.

Proses pembakaran *clinker* di *rotary kiln* merupakan tahap yang paling intensif energi dalam produksi semen, karena material harus mencapai suhu tinggi untuk reaksi kalsinasi dan sintering yang menghasilkan *clinker*. Penelitian menunjukkan bahwa bagian ini menyerap energi dalam jumlah besar, dan biaya energi menjadi salah satu komponen biaya terbesar dalam produksi semen, bahkan bisa mencapai sekitar 20–30 % dari total biaya produksi industri semen di Indonesia (Sati dkk., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi bahan bakar menjadi prioritas utama bagi produsen semen dalam upaya mengurangi biaya operasional dan meningkatkan daya asing.

2.3. Klin (*Rotary Kiln*) dalam Industri Semen

Dalam industri semen, *rotary kiln* merupakan peralatan utama yang memegang peranan sentral dalam proses pembentukan *clinker*, yaitu bahan setengah jadi yang selanjutnya digiling menjadi semen. *Rotary kiln* merupakan reaktor berbentuk silinder panjang yang dipasang dengan kemiringan kecil dan berputar secara kontinu, sehingga material dapat bergerak melewati zona-zona dengan suhu tinggi yang memungkinkan terjadinya perpindahan panas dan reaksi kimia dalam proses pembentukan *Clinker* (Zdarta dkk., 2022).

Di dalam *rotary kiln* terjadi seluruh transformasi material dari *raw meal* menjadi *clinker*, meliputi pemanasan awal, dekomposisi kalsium karbonat, hingga pembentukan senyawa mineral utama pada temperatur sekitar 1.400–1.500 °C.

Proses ini bersifat kompleks dan sangat dipengaruhi oleh kestabilan suhu, laju aliran material, serta kualitas bahan bakar yang digunakan (Ridho dkk., 2022).

Karena tingginya kebutuhan energi pada tahap ini, konsumsi bahan bakar pada *rotary kiln* menjadi komponen biaya terbesar dalam proses produksi semen. Evaluasi energi menunjukkan bahwa biaya energi untuk pembakaran *kiln* dapat mencapai 20–30% dari total biaya produksi, sehingga optimasi operasional *kiln* dan peningkatan efisiensi bahan bakar menjadi fokus utama industri semen di Indonesia (Sati dkk., 2022).

2.4. Proses Pembentukan *Clinker*

Proses pembentukan *clinker* merupakan inti dari proses produksi semen yang berlangsung terutama di *rotary kiln* setelah tahapan pemanasan awal dan *preheater*. Material *raw meal* yang telah melalui proses homogenisasi dan pengeringan selanjutnya memasuki *rotary kiln* dan mengalami serangkaian reaksi kimia pada suhu tinggi hingga membentuk *clinker*, yaitu butiran padat hasil reaksi yang menjadi bahan setengah jadi semen (Sati dkk., 2022).

Di dalam *rotary kiln*, proses pembentukan *clinker* terbagi ke dalam beberapa zona utama, yaitu zona kalsinasi, zona transisi, dan zona *clinkerisasi* (*sintering*). Pada zona kalsinasi terjadi penguraian kalsium karbonat (CaCO_3) menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO_2). Selanjutnya, pada zona *sintering* terbentuk fase mineral utama *clinker* seperti C_2S , C_3S , C_3A , dan C_4AF melalui reaksi antara oksida-oksida penyusun bahan baku (Sati dkk., 2022).

Proses pembentukan senyawa *clinker* tersebut memerlukan temperatur yang sangat tinggi, yaitu sekitar 1.260–1.510 °C pada zona pembakaran, untuk

mempercepat reaksi kimia yang diinginkan (Polinema Distilat, 2020). Kecepatan rotasi *kiln* dan pengendalian suhu menjadi faktor penting yang memengaruhi kualitas *clinker*. Setelah terbentuk, *clinker* kemudian didinginkan dan disimpan sebelum digiling bersama *gypsum* untuk menghasilkan semen.

2.5. Bahan Bakar pada *Kiln*

Pembakaran Pada proses produksi semen, tahap pembakaran *clinker* di *rotary kiln* merupakan tahapan yang paling intensif energi. Proses ini memerlukan suplai panas dalam jumlah besar karena material harus mencapai temperatur tinggi untuk mendukung terjadinya reaksi kalsinasi dan sintering. Oleh sebab itu, bahan bakar yang digunakan pada *kiln* memegang peranan sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi, stabilitas proses pembakaran, kualitas *clinker*, serta besarnya biaya produksi semen.

Secara konvensional, industri semen di Indonesia masih didominasi oleh penggunaan bahan bakar fosil, khususnya batu bara, karena memiliki nilai kalor tinggi dan ketersediaan yang relatif stabil. Namun demikian, ketergantungan terhadap batu bara menyebabkan tingginya biaya energi serta berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan pencemaran udara. Kondisi ini mendorong industri semen untuk mencari alternatif bahan bakar yang lebih efisien dan ramah lingkungan seiring dengan meningkatnya tuntutan keberlanjutan industri.

Sejalan dengan upaya tersebut, pemanfaatan bahan bakar alternatif melalui skema *alternative fuel and raw material* (AFR) dan *co-processing* mulai banyak diterapkan pada *kiln* semen di Indonesia. Berbagai jenis limbah, seperti biomassa,

oli bekas, *sludge oil*, dan *refuse derived fuel* (RDF), dimanfaatkan untuk menggantikan sebagian penggunaan batu bara. Pemanfaatan bahan bakar alternatif ini tidak hanya bertujuan menekan konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga berperan dalam mengurangi volume limbah yang dibuang ke tempat pemrosesan akhir (Agustina dkk., 2025).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa substitusi parsial bahan bakar fosil dengan bahan bakar alternatif dapat meningkatkan efisiensi energi tanpa menurunkan kualitas *clinker* yang dihasilkan. Studi pada unit AFR di industri semen nasional menunjukkan bahwa penggunaan limbah seperti oli bekas dan biomassa mampu meningkatkan *thermal substitution rate* serta mengurangi ketergantungan terhadap batu bara dalam operasional *kiln* (Agustina dkk., 2025). Temuan ini memperkuat peran bahan bakar alternatif sebagai solusi strategis dalam pengelolaan energi di industri semen.

Selain itu, penggunaan campuran bahan bakar fosil dan bahan bakar alternatif juga terbukti memberikan dampak positif terhadap biaya energi. (Mustika & Solikin, 2024) melaporkan bahwa substitusi sebagian batu bara dengan bahan bakar alternatif pada *kiln* semen mampu menurunkan konsumsi batu bara dan biaya operasional, tanpa menyebabkan penurunan mutu *clinker*. Hasil ini menunjukkan bahwa optimalisasi komposisi bahan bakar pada *kiln* dapat memberikan manfaat teknis sekaligus ekonomis.

2.6. Co-Processing dalam Industri Semen

Co-processing merupakan metode pemanfaatan limbah sebagai bahan bakar alternatif (*alternative fuel and raw material/AFR*) maupun sebagai bahan baku

alternatif dalam proses pembentukan *clinker* pada industri semen. Melalui pendekatan ini, limbah dimanfaatkan secara langsung di dalam *rotary kiln* sehingga berfungsi sebagai sumber energi panas dan komponen material, tanpa menghasilkan residu tambahan yang memerlukan pengolahan lanjutan (Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2021).

Prinsip utama *co-processing* dalam industri semen meliputi pemulihan energi (*energy recovery*), penghancuran limbah secara termal pada temperatur tinggi, serta pengikatan unsur anorganik dan logam jejak ke dalam struktur mineral *clinker*. Penelitian Sati dkk. (2022) menjelaskan bahwa kondisi operasi *rotary kiln* yang bertemperatur tinggi dan memiliki waktu tinggal material yang lama memungkinkan limbah organik terdegradasi secara optimal, sementara fraksi anorganik terinkorporasi ke dalam fase mineral *clinker* tanpa menurunkan kualitas produk.

Keunggulan penerapan *co-processing* dalam industri semen meliputi penurunan pemakaian bahan bakar fosil, pengurangan biaya produksi, minimisasi pembuangan limbah ke tempat pemrosesan akhir (TPA), serta penurunan emisi gas rumah kaca. Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa pemanfaatan bahan bakar alternatif melalui *co-processing* mampu menggantikan sebagian konsumsi batu bara tanpa mengganggu stabilitas proses pembakaran di *rotary kiln*, sehingga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan secara simultan (Sati dkk., 2022).

Selain itu, *co-processing* dinilai efektif dalam pengelolaan limbah karena memanfaatkan kondisi operasi *kiln* yang bertemperatur tinggi dan memiliki waktu tinggal material yang cukup lama. Prariest dkk. (2023) menyatakan bahwa

penerapan *co-processing* menggunakan RDF pada *kiln* semen mampu menurunkan emisi gas rumah kaca dan mengurangi timbunan limbah, sekaligus menjaga kualitas *clinker* yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa limbah organik dapat terdegradasi secara optimal di dalam *kiln* semen.

2.7. Bahan Bakar Alternatif

Saat Pada proses produksi semen, tahap pembakaran *clinker* di *rotary kiln* merupakan tahapan yang paling intensif energi. Proses ini memerlukan suplai panas dalam jumlah besar karena material harus mencapai temperatur tinggi untuk mendukung terjadinya reaksi kalsinasi dan sintering. Oleh sebab itu, bahan bakar yang digunakan pada *kiln* memegang peranan sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi, stabilitas proses pembakaran, kualitas *clinker*, serta besarnya biaya produksi semen.

Secara konvensional, industri semen di Indonesia masih didominasi oleh penggunaan bahan bakar fosil, khususnya batu bara, karena memiliki nilai kalor tinggi dan ketersediaan yang relatif stabil. Namun demikian, ketergantungan terhadap batu bara menyebabkan tingginya biaya energi serta berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan pencemaran udara. Kondisi ini mendorong industri semen untuk mencari alternatif bahan bakar yang lebih efisien dan ramah lingkungan seiring dengan meningkatnya tuntutan keberlanjutan industri.

Sejalan dengan upaya tersebut, pemanfaatan bahan bakar alternatif melalui skema *alternative fuel and raw material* (AFR) dan *co-processing* mulai banyak diterapkan pada *kiln* semen di Indonesia. Berbagai jenis limbah, seperti biomassa,

oli bekas, *sludge oil* dan *refuse derived fuel* (RDF), dimanfaatkan untuk menggantikan sebagian penggunaan batu bara. Pemanfaatan bahan bakar alternatif ini tidak hanya bertujuan menekan konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga berperan dalam mengurangi volume limbah yang dibuang ke tempat pemrosesan akhir (Agustina dkk., 2025).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa substitusi parsial bahan bakar fosil dengan bahan bakar alternatif dapat meningkatkan efisiensi energi tanpa menurunkan kualitas *clinker* yang dihasilkan. Studi pada unit AFR di industri semen nasional menunjukkan bahwa penggunaan limbah seperti *Sludge oil* mampu meningkatkan *thermal substitution rate* serta mengurangi ketergantungan terhadap batu bara dalam operasional *kiln* (Agustina dkk., 2025). Temuan ini memperkuat peran bahan bakar alternatif sebagai solusi strategis dalam pengelolaan energi di industri semen.

2.8. *Sludge oil*

Sludge oil merupakan salah satu jenis limbah B3 yang berasal dari aktivitas industri, seperti pengolahan minyak, bengkel, tangki penyimpanan bahan bakar, serta instalasi pengolahan air limbah. Limbah ini umumnya mengandung campuran hidrokarbon, air, dan partikel padat, sehingga memiliki karakteristik fisik dan kimia yang bervariasi. Dalam konteks industri semen, *sludge oil* memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif karena kandungan hidrokarbonnya yang dapat menghasilkan energi panas ketika dibakar (Widyawati & Putri, 2021).

Karakteristik utama *sludge oil* yang mempengaruhi kelayakannya sebagai bahan bakar adalah nilai kalor (*heating value*), kadar air (*moisture content*), dan

stabilitas pembakaran. Penelitian Widyawati dan Putri (2021) menunjukkan bahwa *sludge oil* memiliki nilai kalor yang cukup tinggi setelah melalui proses pengurangan kadar air, meskipun pada kondisi awal kadar airnya relatif besar. Pengeringan *sludge oil* terbukti meningkatkan nilai *heating value*, sehingga lebih sesuai digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada rotary *kiln* industri semen.

Pemanfaatan *sludge oil* sebagai bahan bakar alternatif pada *kiln* semen umumnya dilakukan melalui skema *co-processing*, yaitu dengan mencampurkan *sludge oil* ke dalam sistem pembakaran *kiln* untuk menggantikan sebagian penggunaan bahan bakar fosil. Studi Safaruddin dkk. (2023) menunjukkan bahwa *sludge oil* memiliki potensi untuk mensubstitusi batu bara dalam proses pembakaran *kiln* semen, serta memberikan dampak positif terhadap efisiensi biaya energi. Hal ini menunjukkan bahwa *sludge oil* dapat menjadi alternatif yang layak secara teknis dan ekonomis.

Selain memberikan manfaat dari sisi energi, pemanfaatan *sludge oil* juga berkontribusi terhadap pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan. Penggunaan *sludge oil* sebagai bahan bakar alternatif dapat mengurangi volume limbah B3 yang harus ditangani melalui metode pembuangan konvensional, seperti penimbunan atau pengolahan khusus. Dengan demikian, pemanfaatan *sludge oil* mendukung penerapan konsep *circular economy*, di mana limbah dimanfaatkan kembali sebagai sumber daya dalam proses produksi (Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2021).

2.8.1. Fasilitas Injeksi *Sludge oil*

PT Semen Baturaja saat ini memanfaatkan *Sludge oil* diumpankan menggunakan pompa yang nantinya akan disemprotkan menggunakan *nozzle* ke dalam *kiln* untuk membantu menghasilkan pembakaran yang sempurna. Fasilitas injeksi *Sludge oil* merupakan sarana yang digunakan di PT semen baturaja untuk memanfaatkan *Sludge oil* sebagai bahan bakar alternative dengan cara menyimpan *Sludge oil* yang terkumpul setelah penggantian oli dalam tangki penyimpanan dengan kapasitas 2x23 m³ kemudian *Sludge oil* dari tangki dipompa menggunakan *screw pump* menuju kalsiner.

Sebelum masuk ke kalsiner aliran *Sludge oil* didorong/di-inject udara kompresor untuk memastikan aliran ter-spray dengan baik. Berikut adalah gambar alur proses injeksi *Sludge oil*.

1.8.2. Komponen-komponen Fasilitas *Sludge oil*

Beberapa komponen fasilitas utama *sludge oil* yaitu meliputi :

- a. Tangki penyimpanan, terdapat 2 buah tangki penyimpanan *Sludge oil* ini berbentuk silinder dengan ukuran masing-masing 23 m³. Yang berfungsi untuk menyimpan *Sludge oil*.
- b. Perpipaan, perpipaan berfungsi sebagai jaringan transport dan sirkulasi *Sludge oil* menuju ke *calsiner kiln*.
- c. Pompa, ada 2 buah pompa pada fasilitas injeksi *Sludge oil*:
 - 1) PU03, PU03 merupakan *screw pump* yang digunakan untuk mengalirkan *Sludge oil* menuju ke *Calsiner*

- 2) PU04, PU04 merupakan pompa sentrifugal yang digunakan untuk mensirkulasikan *Sludge oil* di antara kedua tangki.

2.9. Co-Processing *Sludge oil* di Industri Semen

Co-processing sludge oil merupakan metode pemanfaatan limbah *sludge oil* sebagai bahan bakar alternatif dalam proses pembakaran *clinker* di rotary *kiln* industri semen. Melalui pendekatan ini, *sludge oil* digunakan untuk menggantikan sebagian bahan bakar fosil, khususnya batu bara, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi sekaligus pengurangan dampak lingkungan. Pemanfaatan *sludge oil* melalui *co-processing* memanfaatkan kondisi operasi *kiln* yang bertemperatur tinggi, sehingga komponen organik limbah dapat terdegradasi secara efektif (Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2021).

Dalam sistem *co-processing*, *sludge oil* berperan sebagai sumber energi panas karena kandungan hidrokarbonnya yang relatif tinggi. Penelitian Widyawati dan Putri (2021) menunjukkan bahwa *sludge oil* memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif setelah melalui pengurangan kadar air, karena peningkatan nilai kalor yang dihasilkan mampu mendukung kebutuhan energi pada rotary *kiln*. Dengan karakteristik tersebut, *sludge oil* dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pendukung tanpa mengganggu proses pembakaran *clinker*.

Selain manfaat teknis, penerapan *co-processing sludge oil* juga memberikan keuntungan dari aspek ekonomi dan lingkungan. Studi Safaruddin dkk. (2023) melaporkan bahwa pemanfaatan *sludge oil* sebagai bahan bakar alternatif pada *kiln* semen berpotensi menurunkan konsumsi batu bara dan biaya energi, sekaligus mengurangi volume limbah B3 yang memerlukan penanganan khusus. Hal ini

menunjukkan bahwa *co-processing sludge oil* sejalan dengan penerapan konsep *circular economy* di industri semen.

Meskipun demikian, penggunaan *sludge oil* melalui *co-processing* memerlukan pengendalian operasional yang cermat. Variasi kadar air, viskositas, dan komposisi *sludge oil* dapat mempengaruhi stabilitas pembakaran serta distribusi panas di dalam *kiln*. Oleh karena itu, pengolahan awal *sludge oil* dan pengaturan laju umpan bahan bakar menjadi aspek penting untuk menjaga kestabilan operasi *kiln* dan memastikan kualitas *clinker* tetap sesuai standar (Sati dkk., 2022).

2.10. Efektivitas Pemanfaatan *Sludge oil*

Berdasarkan penelitian terdahulu, *sludge oil* telah banyak dikaji sebagai bahan bakar alternatif pada proses pembakaran *clinker* di industri semen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *sludge oil* memiliki potensi untuk menggantikan sebagian bahan bakar fosil, khususnya batu bara, karena kandungan hidrokarbon dan nilai kalor yang relatif tinggi setelah melalui proses pengolahan awal. Widyawati dan Putri (2021) menyatakan bahwa pengurangan *moisture content* pada *sludge oil* dapat meningkatkan nilai kalor secara signifikan, sehingga mendukung penggunaannya sebagai bahan bakar alternatif pada *rotary kiln*.

Safaruddin dkk. (2023) menyatakan bahwa pemanfaatan *sludge oil* melalui metode *co-processing* dapat diterapkan tanpa mengganggu kestabilan proses pembakaran di *kiln*. Suhu operasi *kiln* yang tinggi memungkinkan terjadinya pembakaran sempurna komponen organik dalam *sludge oil*, sementara residu anorganik yang dihasilkan dapat terikat ke dalam struktur mineral *clinker*. Kondisi

ini menunjukkan bahwa penggunaan *sludge oil* tidak menurunkan kualitas *clinker* yang dihasilkan.

Dari aspek efisiensi energi dan ekonomi, penelitian Mustika dan Solikin (2024) menyimpulkan bahwa substitusi parsial bahan bakar konvensional dengan bahan bakar alternatif, termasuk *sludge oil*, mampu menurunkan konsumsi batu bara dan biaya energi secara signifikan. Hasil tersebut menegaskan bahwa pemanfaatan *sludge oil* tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi industri semen.

Selain itu, penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa pemanfaatan *sludge oil* berkontribusi terhadap pengurangan volume limbah yang memerlukan penanganan khusus. Dengan memanfaatkan *sludge oil* sebagai bahan bakar alternatif, limbah yang sebelumnya menjadi beban lingkungan dapat diolah kembali dalam proses produksi semen tanpa menghasilkan residu berbahaya yang terpisah.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian terdahulu secara umum menunjukkan efektivitas pemanfaatan *sludge oil* sebagai bahan bakar alternatif pada pembakaran *clinker* di *rotary kiln*. Efektivitas tersebut dipengaruhi oleh karakteristik *sludge oil*, pengolahan awal, serta pengendalian parameter operasional *kiln*, sehingga evaluasi pada kondisi spesifik pabrik semen tetap diperlukan.