

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Beberapa hasil pengujian dari peneliti terdahulu dapat dilihat dari tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Kesimpulan
1	Kumar & Singh (2016)	<i>Influence of Grinding aid on Cement Fineness and Energy Consumption</i>	<i>Grinding-aid</i> (TEA & glycol) meningkatkan kehalusan semen 10–20% dan menurunkan konsumsi energi 8–15%.
2	Li dkk. (2018)	<i>Environmental Impacts of Cement Production Using Additives: A Comparative Study</i>	Penggunaan aditif mengurangi emisi CO ₂ total proses <i>grinding</i> sebesar 5–12%.
3	Rahman (2019)	Pengaruh Penambahan <i>Grinding aid</i> terhadap Konsumsi Energi pada Proses Penggilingan Semen di Industri Nasional	Konsumsi listrik turun 10% dengan dosis optimal 0,03% GA; dosis berlebih tidak efektif.
4	Zhang & Chen (2020)	<i>Effect of Glycol-Based Grinding aids on Mechanical and Environmental Performance of Cement</i>	<i>Grinding-aid</i> meningkatkan performa compressive strength dan menurunkan kebutuhan clinker ratio.
5	Prasetyo (2021)	Optimasi Bahan Tambah pada Proses Penggilingan Semen untuk Efisiensi Energi	Penentuan rasio aditif optimum menghasilkan penurunan energi 12,6% dan meningkatkan <i>output mill</i> .
6	Silva dkk. (2021)	<i>Sustainability Improvement in Cement Manufacturing through Additive-Based Grinding Optimization</i>	Aditif grinding memungkinkan penurunan emisi total 3–10% pada proses produksi semen.
7	Yu dkk. (2022)	<i>Optimization of Grinding aid Composition to Reduce Environmental Burden in Cement Milling</i>	Rasio GA yang tepat mengurangi emisi listrik proses <i>milling</i> hingga 15%.

8	Wijaya (2023)	Evaluasi Efisiensi Energi Proses Penggilingan Semen Menggunakan Aditif Berbasis <i>Glycol</i>	Penurunan energi listrik sebesar 9–14% dan peningkatan umur peralatan.
---	---------------	---	--

2.2. Proses Pembuatan Semen

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis yang menjadi komponen utama dalam industri konstruksi. Proses pembuatannya melibatkan tahapan kompleks yang membutuhkan energi sangat besar, terutama panas dalam jumlah tinggi untuk proses kalsinasi dan pembakaran klinker (Aldea dkk, 2021). Secara umum, alur proses produksi semen terdiri dari beberapa tahap utama, yaitu: (1) penambangan bahan baku, (2) pengolahan awal bahan baku, (3) pembakaran di kiln untuk menghasilkan klinker, (4) penggilingan klinker bersama bahan tambahan, dan (5) pengemasan dan distribusi produk akhir.

Menurut Wijaya (2023), tahap pertama adalah penambangan batu kapur dan tanah liat, yang merupakan bahan baku utama pembentuk klinker. Klinker adalah produk padat berbentuk butiran (bongkahan kecil 3-25 mm) hasil pembakaran campuran bahan baku semen (batu kapur, tanah liat, dll.) dalam tanur (kiln) yang menjadi bahan utama pembuatan semen Portland. Faktor klinker (*Clinker factor*) adalah proporsi atau persentase klinker dalam total campuran material semen, yang seringkali dikurangi dengan menambahkan bahan mineral pengganti seperti terak atau abu terbang untuk meningkatkan keberlanjutan produksi semen.

- Klinker (*Clinker*):

- Bahan dasar utama semen yang keras dan berbentuk kerikil kecil setelah dibakar.
- Mengandung empat fase utama: alit, belit, aluminat, dan ferit, yang memberikan sifat pengikat pada semen.
- Digiling halus bersama gipsum untuk menjadi semen Portland yang siap pakai.
- Faktor Klinker (*Clinker factor*):
 - Merupakan ukuran seberapa banyak klinker yang digunakan dalam produksi semen.
 - Penurunan faktor klinker berarti mengganti sebagian klinker dengan material lain (seperti terak atau abu terbang).
 - Tujuannya untuk mengurangi emisi karbon dari proses produksi klinker (yang sangat intensif energi dan karbon), sehingga lebih ramah lingkungan.

Batu kapur memiliki kandungan CaCO_3 tinggi yang diperlukan untuk menghasilkan kapur aktif (CaO) melalui proses kalsinasi. Setelah ditambang, bahan baku dihancurkan menggunakan crusher hingga berukuran lebih kecil dan kemudian dihomogenisasi dalam silo atau *blending bed* untuk menjaga konsistensi kualitas (Mahendra dkk, 2022).

Selanjutnya, bahan baku mengalami proses pemanasan awal (*preheating*) dan kalsinasi (*calcination*). Preheater digunakan untuk memanfaatkan panas dari gas buang kiln sehingga dapat mengurangi konsumsi energi. Pada tahap kalsinasi, CaCO_3 dipanaskan hingga $900\text{--}950^\circ\text{C}$ dan terurai menjadi CaO dan CO_2 . Reaksi

kalsinasi ini sendiri merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi CO₂ dari industri semen.

Tahap paling intensif energi adalah pembakaran *clinker* di dalam *rotary kiln* pada temperatur sekitar 1.450°C. Di sini terjadi reaksi pembentukan mineral klinker seperti alit (C₃S), belit (C₂S), aluminat (C₃A), dan ferrit (C₄AF). Pembakaran membutuhkan bahan bakar fosil seperti batu bara, *petcoke*, gas alam, atau minyak. Selain menghasilkan klinker, proses ini mengemisi gas buang seperti CO₂, NO_x, SO₂, dan partikulat (Yu dkk, 2022).

Setelah keluar dari kiln, klinker didinginkan menggunakan *clinker cooler* untuk menjaga kualitas mineral dan memulihkan panas. Klinker yang telah dingin kemudian menuju tahap penggilingan semen (*finish grinding*), yang merupakan salah satu proses paling banyak mengonsumsi energi listrik (Nugraha, 2023). Pada tahap ini, klinker dicampur dengan gypsum (3–5%) untuk mengatur waktu ikat, serta bahan tambahan lain seperti *limestone*, pozolan, atau slag tergantung jenis semen yang diproduksi. Penggilingan dilakukan menggunakan *ball mill*, *vertical roller mill*, atau *roller press*.

Tahap terakhir adalah penyimpanan dan pengantongan semen, kemudian distribusi kepada pengguna. Meskipun tahap distribusi tidak sebanyak tahap kiln dalam menyumbang emisi, kegiatan transportasi tetap memiliki kontribusi terhadap jejak karbon produk semen secara keseluruhan (Silva dkk, 2021).

Proses produksi semen secara keseluruhan membutuhkan energi yang sangat besar dan menghasilkan jumlah emisi yang signifikan (Hidayat dkk, 2019). Oleh karena itu, inovasi efisiensi energi, pengurangan *clinker factor*, dan penggunaan

bahan tambahan seperti *grinding aid* menjadi penting dalam mendukung produksi semen berkelanjutan.

Semen *Portland Composite Cement* (PCC) merupakan jenis semen hidrolik yang dihasilkan melalui proses penggilingan klinker semen portland dengan penambahan satu atau lebih bahan anorganik tertentu serta gipsium sebagai pengatur waktu ikat (Rahman, 2019). Bahan tambahan yang umum digunakan dalam semen PCC antara lain batu kapur (*limestone*), *pozzolan* alami, *fly ash*, dan *slag*, dengan komposisi yang telah ditetapkan dalam standar nasional maupun internasional. Di Indonesia, semen PCC diatur dalam SNI 7064:2014, yang menyatakan bahwa kandungan bahan tambahan dalam PCC dapat mencapai hingga sekitar 35% dari total komposisi semen.

Secara fungsional, semen PCC memiliki sifat yang setara dengan semen portland tipe I, namun menawarkan beberapa keunggulan, seperti panas hidrasi yang lebih rendah, *workability* yang lebih baik, serta ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan agresif. Penurunan panas hidrasi menjadikan PCC lebih sesuai untuk pekerjaan beton massal karena dapat mengurangi risiko retak akibat perbedaan suhu (Zhang dan Chen, 2020). Selain itu, penggunaan bahan tambahan dalam PCC berkontribusi pada peningkatan densitas mikrostruktur beton melalui reaksi pozzolanik, sehingga mampu meningkatkan durabilitas beton dalam jangka panjang.

Dari sisi lingkungan, semen PCC dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan semen portland biasa karena penggunaan bahan tambahan dapat mengurangi kebutuhan klinker, yang merupakan komponen dengan konsumsi

energi dan emisi karbon tertinggi dalam proses produksi semen. Oleh karena itu, semen PCC banyak digunakan pada pekerjaan konstruksi umum, seperti bangunan gedung, perkerasan jalan, dan struktur beton bertulang, baik untuk skala kecil maupun besar (Li, 2018).

2.3. Kontribusi Produksi Semen terhadap Emisi dan Gas Rumah Kaca

Industri semen merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi karbon dioksida (CO₂) secara global. Diperkirakan bahwa sekitar 7–8% dari total emisi CO₂ dunia berasal dari sektor ini. Tingginya emisi berasal dari dua sumber utama: emisi proses kimia dan emisi dari penggunaan energi (Indrawan dkk, 2018).

2.3.1. Emisi Proses Kalsinasi

Sekitar 60% total emisi CO₂ dalam industri semen berasal dari proses kalsinasi, yaitu dekomposisi CaCO₃ menjadi CaO dan CO₂. Reaksi kimianya adalah:



Reaksi ini menghasilkan CO₂ langsung dari bahan baku, sehingga tidak dapat dihindari kecuali melalui inovasi seperti *carbon capture* atau substitusi klinker dengan bahan lain (Kusumawati dkk, 2020).

2.3.2. Emisi dari Energi Termal

Proses pembakaran klinker di kiln membutuhkan energi panas yang sangat tinggi. Untuk mencapai suhu 1.450°C, pabrik semen umumnya menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara atau petcoke. Pembakaran bahan bakar inilah yang menyumbang sekitar 30–35% emisi CO₂ tambahan (Baskara dkk, 2022).

2.3.3. Emisi dari Energi Listrik

Tahap yang paling banyak menggunakan energi listrik adalah proses penggilingan. Penggilingan clinker menjadi semen membutuhkan 25–35 kWh per ton semen. Karena konsumsi listrik tinggi, penggunaan energi listrik dari jaringan yang masih berbasis fosil meningkatkan emisi tidak langsung (Darmadi dkk, 2021).

2.3.4. Emisi Tambahan

Sumber emisi lainnya meliputi:

- Emisi SO₂, NO_x, dan partikulat dari *kiln*.
- Emisi bahan bakar kendaraan untuk transportasi bahan baku dan produk akhir.
- Emisi dari kegiatan penambangan dan pengolahan awal.

Secara keseluruhan, produksi semen memiliki jejak karbon tinggi, sehingga upaya mengurangi konsumsi energi dan menurunkan *clinker factor* melalui penggunaan bahan tambahan seperti *grinding aid* menjadi sangat relevan untuk mengurangi dampak lingkungan (Ananda dkk, 2021).

2.4. Grinding Aid.

Grinding Aid (GA) adalah zat aditif kimia (misalnya glikol, amina, polialkohol, senyawa organik/surfaktan) yang ditambahkan ke sistem penggilingan klinker semen. Tujuannya membantu proses penggilingan agar lebih efisien (Kumar and Singh, 2016).

Dalam industri semen, fase penggilingan (*grinding*) adalah tahap yang sangat intensif energi, sekitar sepertiga dari total penggunaan energi untuk produksi

semen. Penambahan grinding aid membantu menurunkan konsumsi daya dengan mekanisme berikut:

- Mengurangi energi permukaan & hambatan antar partikel: Saat *klinker* digiling, partikel menjadi sangat halus, menyebabkan *surface free energy* dan muatan elektrostatik meningkat yang membuat partikel mudah “menggumpal” atau “menempel” pada bola giling atau dinding *mill*. *Grinding aid* bekerja dengan menyerap ke permukaan partikel, mengurangi energi permukaan, menetralkan muatan, dan menurunkan kecenderungan aglomerasi. Akibatnya, butiran semen tetap terpisah, sehingga proses penggilingan lebih efisien (Prasetyo, 2021).
- Meningkatkan fluiditas dan dispersi partikel: Dengan partikel yang tidak menggumpal, aliran partikel dalam *mill* lebih baik, tumbukan antar partikel lebih efektif, sehingga ukuran partikel halus tercapai lebih cepat, dengan waktu penggilingan lebih singkat ataupun beban dan tenaga giling lebih kecil.
- Mengurangi waktu dan energi untuk mencapai *fineness* tertentu: Karena efisiensi giling meningkat, untuk mencapai *fineness* atau kehalusan target (misalnya nilai Blaine tertentu) dibutuhkan lebih sedikit waktu dan energi, sehingga total konsumsi listrik per ton semen menurun (Aldea, 2021).

2.4.1. Jenis–Jenis *Grinding aid*

Beberapa jenis *grinding aid* yang umum digunakan antara lain:

a. Triethanolamin (TEA)

Merupakan *grinding aid* paling umum, memberikan efek signifikan pada peningkatan kehalusan semen. TEA juga berfungsi meningkatkan reaktivitas C₃A.

b. Glycol-based *Grinding aid*

Contohnya *ethylene glycol* (EG) dan *diethylene glycol* (DEG). Bahan ini efektif dalam mengurangi aglomerasi partikel dan meningkatkan fluiditas campuran.

c. Tipe Polimer Organik

Grinding aid berbasis polimer seperti *lignin sulfonate* digunakan untuk meningkatkan performa semen dan menurunkan kebutuhan energi (Singh dkk, 2018).

d. Aditif Komposit

Beberapa pabrik menggunakan campuran TEA, DEG, dan bahan organik lain untuk mendapatkan efek ganda pada efisiensi energi dan kualitas produk.

2.4.2. Keuntungan Pemakaian *Grinding aid*

Penggunaan *grinding aid* memberikan berbagai keuntungan, baik dari sisi teknis maupun lingkungan:

a. Peningkatan Efisiensi Penggilingan

Grinding aid mampu menurunkan konsumsi energi listrik sebesar 5–20% karena proses penggilingan menjadi lebih efektif (Fahmi dkk, 2023).

b. Meningkatkan Output Mill

Efisiensi mill meningkat sehingga kapasitas produksi bertambah tanpa memerlukan investasi peralatan baru.

c. Meningkatkan Kehalusan Semen

Semen yang lebih halus memiliki luas permukaan lebih besar sehingga meningkatkan reaktivitas dan kekuatan awal beton.

d. Mengurangi Coating pada Mill

Coating adalah masalah serius yang mengurangi performa penggilingan. *Grinding aid* membantu mengurangi lapisan material pada bola maupun dinding mill.

e. Mengurangi *Clinker factor*

Dengan menggunakan *grinding aid*, pabrik dapat menambahkan lebih banyak filler seperti *limestone*, *fly ash*, atau *slag*, sehingga menurunkan *clinker factor*. Pengurangan klinker secara langsung menurunkan emisi CO₂ total (Chen dkk, 2022).

f. Dampak Lingkungan Lebih Rendah

Pengurangan energi dan penurunan *clinker factor* berarti:

- Emisi CO₂ total berkurang.
- Konsumsi bahan bakar fosil menurun.
- Jejak karbon produk semen lebih kecil.

Dengan demikian, *grinding aid* merupakan teknologi yang mendukung produksi semen berkelanjutan.