BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan komponen konstruksi yang memiliki peranan yang luas dalam pendirian berbagai fasilitas prasarana. Saat ini, hampir seluruh proyek konstruksi memanfaatkan beton sebagai bahan utama karena sifatnya yang kuat dan mudah dibentuk. Mutu beton sangat ditentukan oleh komposisi penyusunnya serta kualitas masing-masing material yang digunakan. Salah satu bahan pokok agregat adalah semen Portland.

Dihasilkannya semen portland yaitu melalui proses pembakaran campuran batu kapur (*calcareous*) dan material lempung yang mengandung silika serta alumina (*argillaceous*) pada suhu tinggi, yaitu sekitar 1.550°C. Proses pembakaran tersebut membutuhkan energi yang besar dan berdampak terhadap lingkungan. Dalam produksinya, setiap 1 ton semen yang dihasilkan juga melepaskan kurang lebih 1 ton karbon dioksida (CO_2) ke atmosfer Selain itu, industri semen turut menghasilkan gas sulfur dioksida (SO_2) dan oksida nitrogen (NOx). Kedua gas tersebut berpotensi membahayakan kesehatan karena bisa membuat iritasi di mata dan kulit, lalu dapat mengganggu sistem pernapasan apabila terpapar dalam jangka waktu tertentu. (Fifo, 2023). Berikut adalah volume produksi semen yang ada di Indonesia yang dapat diperhatikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Volume Produksi Semen di Indonesia

Tahun	Volume Produksi Semen (ton)
2022	63.346.000
2023	64.051.000
2024	64.887.000

Sumber: (International Cement Review, 2025)

Berdasarkan Tabel 1.1, volume produksi semen yang ada di Indonesia memberikan progresi secara periodik. Pada tahun 2022, volume produksi mencapai 63.346.000 ton, meningkat menjadi 64.051.000 ton pada tahun 2023, dan kembali naik menjadi 64.887.000 ton pada tahun 2024. Volume permintaan semen nasional pada tahun 2023 mengalami peningkatan dibandingkan tahun sebelumnya di sebagian besar wilayah Indonesia (Suryantoro dkk., 2024). Pulau Jawa masih mendominasi permintaan dengan volume sebesar 32.428.384 ton pada tahun 2023, sedikit meningkat dari 32.224.413 ton pada tahun 2022. Kenaikan signifikan juga terlihat di wilayah Sumatera, dari 13.237.305 ton menjadi 13.951.425 ton. Sementara itu, Kalimantan dan Bali Nusa Tenggara menunjukkan peningkatan permintaan yang cukup mencolok, masing-masing naik dari 4.238.660 ton menjadi 5.177.151 ton, dan dari 3.495.319 ton menjadi 3.953.799 ton. Namun, wilayah Sulawesi justru mengalami sedikit penurunan permintaan, dari 6.422.514 ton pada tahun 2022 menjadi 6.199.358 ton pada tahun 2023 (Suryantoro dkk., 2024).

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi mendorong berbagai upaya untuk menemukan bahan pengganti semen sebagai pengikat dalam campuran beton. Salah satu alternatif yang banyak dikembangkan yakni beton geopolimer. Istilah geopolimer pertama digagas oleh Davidovits (1991) dalam memvisualisasikan terbentuknya material sintesis aluminosilikat yang dihasilkan melalui reaksi antara bahan sumber silika–alumina, seperti contoh *fly ash*, dengan larutan pemicu yang memiliki sifat sangat basa.

Pada beton geopolimer, peran semen Portland selaku matrix utama tidak lagi digunakan, melainkan digantikan oleh *fly ash* sebagai sumber aluminosilikat. Berdasarkan SNI 03-6414-2002, *fly ash* merupakan material pozzolan pada

pembangkit listrik tenaga uap yang berupa butiran sangat halus, umumnya bulat, dan memiliki sifat pozolanik sehingga dapat bereaksi dengan senyawa tertentu membentuk ikatan yang bersifat mengikat. Konsumsi domestik batu bara di Indonesia terus meningkat dari tahun 2015-2023. Penggunaan batu bara pada tahun 2015 itu sebesar 86 juta ton dan 2023 itu sebesar 176 juta ton. Residu pembakaran batu bara yang diubah menjadi *fly ash* itu sebesar 8% dari jumlah penggunaan batu bara di PLTU (Fansuri & Purwanti, 2019). Di samping itu, jumlah *fly ash* yang dihasilkan diperkirakan akan terus bertambah seiring meningkatnya kebutuhan batu bara sebagai alternatif pengganti minyak bumi.

Pemanfaatan *fly ash* sebagai material konstruksi dinilai mampu mendukung konsep pembangunan berkelanjutan (*sustainable construction*) melalui pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri secara lebih optimal. Permintaan batu bara tercatat mengalami kenaikan sekitar 6,3% per tahun, sehingga dapat berdampak langsung pada peningkatan produksi limbah *fly ash*, sesuai dengan yang ditampilkan pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Konsumsi Batu Bara di Indonesia

Tahun	Jumlah (ton)
2015	86.000.000
2016	91.000.000
2017	97.000.000
2018	115.000.000
2019	138.000.000
2020	143.000.000
2021	152.000.000
2022	166.000.000
2023	176.000.000

Sumber: (Anggara dkk., 2023)

Jika dilihat dari Tabel 1.2, pemanfaatan abu layang dari PLTU selama ini masih terbatas, umumnya hanya digunakan sebagai bahan tambahan dalam produksi

semen Portland. Akibatnya, tidak seluruh abu layang dapat terserap oleh industri semen sehingga sebagian besar masih tersisa dan berpotensi menumpuk sebagai limbah. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014, *fly ash* dikategorikan sebagai limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun), sehingga pengelolaannya harus dilakukan secara khusus sebelum dilepas ke lingkungan agar tidak menimbulkan dampak negatif. Di Indonesia, salah satu penghasil *fly ash* dari proses pembakaran batu bara adalah PLTU Pangkalan Susu yang berlokasi di Kabupaten Langkat, Sumatera Utara. Pembangkit listrik ini memiliki kapasitas terpasang sebesar 2 × 210 MW. Dalam operasionalnya, PLTU tersebut dapat menghasilkan limbah *fly ash* hingga sekitar 1 ton per hari. Namun, hingga saat ini pemanfaatan maupun pengolahan limbah tersebut masih belum dilakukan secara optimal dan belum memiliki sistem penanganan khusus yang berkelanjutan (Rozi & Tarigan, 2020).

Simbiosis industri merupakan salah satu alasan mengapa *fly ash* dinilai lebih ramah terhadap lingkungan. Dengan mengolahnya kembali sebagai material konstruksi, maka dapat mereduksi polutan. Namun demikian, apabila tidak dikelola dengan baik, *fly ash* tetap berisiko menimbulkan pencemaran tanah, air, maupun udara karena di dalamnya terdapat unsur-unsur seperti arsenik, vanadium, boron, dan kromium, meskipun dalam kadar yang relatif kecil.

Sejumlah penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa proses produksi geopolimer menghasilkan emisi CO_2 yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan pembuatan semen Portland konvensional (OPC), bahkan rata-rata dapat mencapai sekitar lima kali lebih kecil. Hal ini menjadi salah satu pertimbangan utama dalam pengembangan beton geopolimer sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan.

Pelabuhan mempunyai peran strategis dalam mendukung pertumbuhan ekonomi suatu negara karena menjadi pusat aktivitas distribusi barang dan jasa. Agar operasional pelabuhan tetap berjalan lancar, kegiatan pengerukan harus dilakukan secara rutin untuk menjaga kedalaman alur pelayaran dari risiko pendangkalan. Tanpa pengerukan yang berkelanjutan, lalu lintas kapal dapat terganggu dan berdampak pada aktivitas perdagangan.

Di beberapa negara Eropa dan Amerika, upaya pengendalian dampak lingkungan akibat hasil pengerukan telah diterapkan sejak lebih dari 15 tahun lalu. Limbah sedimen yang dihasilkan tidak langsung dibuang, melainkan ditempatkan pada lokasi khusus untuk diuji kandungan pencemarnya guna memastikan tidak membahayakan kesehatan manusia maupun lingkungan (Silitonga, 2018). Setiap tahunnya, volume pengerukan cenderung meningkat seiring bertambahnya sedimentasi yang terbawa ke perairan maupun ke daratan (Silitonga, 2016).

Apabila sedimen hasil pengerukan pelabuhan akan dimanfaatkan sebagai bahan dalam pembuatan beton geopolimer, maka perlu dilakukan pengujian secara menyeluruh untuk memastikan kandungan logam berat di dalamnya tidak mudah terlepas atau larut, sehingga tidak menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan di kemudian hari. Volume limbah pengerukan pelabuhan terkhususnya pelabuhan Belawan selalu meningkat setiap tahun dapat dilihat pada Tabel 1.3.

Tabel 1. 3 Volume Limbah Pengerukan Pelabuhan Belawan

Tahun	**Volume Pengerukan (m^3)**	**Kedalaman Setelah Pengerukan (m)**
2019	1.200.000	9
2020	1.500.000	10
2021	1.800.000	11
2022	2.000.000	11
2023	2.300.000	12

Sumber: (Pelindo, 2024)

Jika dilihat pada Tabel 1.3, melalui pengembahan beton geopolimer, *fly ash* berperan sebagai binder, namun proses pembentukannya juga memerlukan larutan alkali sebagai aktivator. Berdasarkan permasalahan yang telah dijabarkan diatas, maka dilakukan penelitian dengan judul **"Pengaruh Variasi Konsentrasi Alkali Aktivator NaOH pada Performa Beton Geopolimer dengan Menggunakan Limbah Pengerukan Pelabuhan"** dengan macam konsentrasi NaOH 10 M, 12 M, dan 14 M.

1.2 Identifikasi Masalah

Menimbang dari latar belakang yang sudah dibuat, terdapat masalah pada penelitian yang diantara lain adalah:

1. Variasi molaritas larutan natrium hidroksida (NaOH) berpengaruh terhadap kekuatan tekan beton geopolimer, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan formulasi yang optimal.
2. Sedimen limbah pengerukan dapat mengandung logam berat yang berbahaya sehingga perlu dikaji kelayakan dan keamanannya sebelum digunakan sebagai bahan baku beton geopolimer.
3. Limbah sedimen dari pengerukan yang terus meningkat setiap tahun belum dimanfaatkan sebagai material alternatif dalam konstruksi dan justru dibuang ke laut, menimbulkan potensi pencemaran baru.
4. Meskipun *fly ash* diproduksi dalam jumlah besar dari pembakaran batu bara (sekitar 8% dari konsumsi batubara nasional), pemanfaatannya di Indonesia masih terbatas sehingga sebagian besar masih menjadi limbah B3 yang tidak tertangani dengan baik.

5. Produksi semen portland menciptakan emisi karbon dioksida dengan jumlah besar (±1 ton CO_2 per ton semen), serta gas berbahaya lainnya (SO_2 dan NO_x) yang mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan.

1.3 Pembatasan Masalah

Di penelitian ini, masalah yang menjadi jadi batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada penggunaan limbah pengerukan pelabuhan Pelindo 1 sebagai material campuran beton geopolimer.
2. *Fly ash* yang dipakai adalah *fly ash* PLTU Pangkalan Susu yang berjenis *fly ash* tipe C.
3. Konsentrasi alkali aktivator yang dikaji terbatas pada rentang tertentu (10 M, 12 M, dan 14 M) untuk mengevaluasi efeknya pada performa beton geopolimer.
4. Fokus penelitian hanya pada uji slumb dan kuat tekan. Pengukuran kuat tekan dilakukan pada beton yang sudah berumur 7 hari. 14 hari, 28 hari, dan 56 hari.
5. Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium. Benda uji silinder yang digunakan berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
6. Penelitian ini membatasi karakterisasi limbah pada analisis kimia dasar (kandungan silika dan alumina) dan tidak mencakup analisis mikrostruktur lanjutan.
7. Pembentukan mix desain beton berdasarkan SNI 03-2834-2000 memakai kuat tekan rencana 20 MPa dan kriteria beton geopolimer.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah dan batasan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya dihasilkan rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi molaritas larutan sodium hidroksida (NaOH) terhadap kekuatan tekan beton geopolimer berbasis limbah pengerukan pelabuhan Belawan Pelindo 1?
2. Sejauh mana *fly ash* dapat berperan sebagai material pengikat alternatif yang efektif dalam formulasi beton geopolimer menggunakan sedimen limbah pengerukan?
3. Apakah beton geopolimer yang dihasilkan dari limbah pengerukan pelabuhan dan *fly ash* dengan variasi rasio aktivator dapat mencapai karakteristik mekanik minimum yang sesuai dengan standar konstruksi tertentu?
4. Bagaimana potensi pemanfaatan limbah pengerukan pelabuhan sebagai solusi alternatif yang berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan pada semen portland dan meminimalkan dampak lingkungan dari pembuangan limbah ke laut?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi molaritas larutan natrium hidroksida (NaOH) terhadap sifat mekanik (kekuatan tekan) beton geopolimer berbasis limbah pengerukan pelabuhan Belawan Pelindo 1.

2. Menilai efektivitas *fly ash* sebagai material pengikat pengganti semen portland dalam formulasi beton geopolimer berbasis sedimen limbah pengerukan.
3. Mengetahui pengaruh variasi rasio aktivator untuk mencapai karakteristik mekanik minimum yang sesuai dengan standart konstruksi terhadap beton geopolimer dari limbah pengerukan pelabuhan.
4. Memvalidasi potensi pemanfaatan limbah pengerukan pelabuhan sebagai alternatif material konstruksi yang berkelanjutan guna mengurangi ketergantungan pada semen portland dan menekan dampak negatif lingkungan akibat pembuangan limbah.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

Secara teori:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material konstruksi alternatif berbasis limbah industri (*fly ash*) dan limbah pengerukan pelabuhan yang berpotensi menggantikan semen portland secara parsial maupun menyeluruh.
2. Menyediakan data dan informasi eksperimental mengenai pengaruh konsentrasi larutan natrium hidroksida (NaOH) terhadap sifat mekanik dan fisik beton geopolimer sebagai referensi dalam formulasi campuran beton ramah lingkungan.

Secara lingkungan:

1. Mendorong pemanfaatan limbah B3 (*fly ash*) dan limbah padat (sedimen pengerukan) secara tepat guna, sehingga membantu mengurangi volume limbah yang tidak tertangani dan potensi pencemaran lingkungan.

2. Mendukung agenda pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) melalui solusi rekayasa material yang tidak hanya menurunkan emisi karbon, tetapi juga mengurangi dampak negatif dari aktivitas industri dan kelautan terhadap lingkungan.

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
UNIMED
THE Character Building UNIVERSITY