

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era global saat ini semakin menuntut keberlanjutan dan inovasi dalam perkembangan konstruksi, pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan dan efisien menjadi sangat krusial. Bata beton, sebagai salah satu contoh komponen dalam konstruksi, aspek terpenting dalam memenuhi standar kekuatan struktural dan sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Bata beton adalah bahan konstruksi yang terutama digunakan di jalan, jalan masuk, trotoar, garasi, dan tempat parkir. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-0691-1996 mendefinisikan bata beton sebagai bahan komposit yang terbuat dari semen Portland atau bahan perekat hidrolis sejenis, air, dan agregat. Meningkatnya permintaan bata beton sebagai bahan konstruksi telah mengakibatkan peningkatan kebutuhan semen untuk pembuatan bata beton. Mengurangi penggunaan semen dalam pembuatan bahan berbasis semen seperti mortar, beton, dan bata beton dapat secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dari produksi semen, yang menghasilkan 0,9 ton CO₂ untuk setiap 1,0 ton semen. Sekitar 8% dari total emisi CO₂ global berasal dari produksi semen. Untuk mengatasi permasalahan ini, banyak upaya telah dilakukan untuk memanfaatkan bahan limbah dan produk sampingan seperti *fly ash*, *silica fume*, *ground granulated blast furnace ster*, bubuk limbah keramik, abu sekam padi, abu bahan bakar kelapa sawit, abu ampas tebu gula, dan abu dasar insinerator sebagai alternatif untuk menggantikan sebagian semen pada bahan berbasis semen. (Djamaluddin et al., 2020)

Pemanfaatan berbagai bahan tambahan yang dapat menunjang produksi batu beton sangat bervariasi dalam beberapa tahun terakhir, pembangunan trotoar ini semakin memanfaatkan bahan penolong inovatif sebagai alternatif semen. Akibatnya, para peneliti baru-baru ini mulai fokus pada penggunaan bata beton yang saling mengunci dalam konstruksi jalan karena manfaatnya mengungguli aspal dan beton. Selain itu, bata beton ini memiliki sifat estetika dan daya tahan, yang menjadikannya alternatif yang layak dalam konstruksi trotoar. Studi ini memainkan pemanfaatan limbah untuk meningkatkan sifat semen dari bahan beton yang digunakan dalam konstruksi trotoar ini. Selain mempromosikan keberlanjutan, menggunakan limbah ini sebagai pengganti sebagian semen dapat menurunkan biaya produksi beton. Penelitian telah menunjukkan bahwa memanfaatkan limbah ini mengurangi biaya keseluruhan untuk memproduksi beton. (Busari et al., 2024) Pada penelitian ini limbah yang akan digunakan adalah abu terbang.

Pembakaran batubara tidak hanya menghasilkan energi listrik namun juga menghasilkan limbah abu sisa pembakaran berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA). Jumlah konsumsi batubara untuk kelistrikan dan bidang manufaktur pada tahun 2019 telah mencapai 138,42 juta ton, dengan estimasi limbah FABA yang dihasilkan

diperkirakan akan mencapai 5% dari jumlah total batubara yang dibakar sehingga pada tahun 2019 diperkirakan mencapai 6,92 juta ton. (Ferian Anggara et al., 2021)

Menjaga efisiensi energi di kiln, menggunakan bahan bakar alternatif, dan substitusi klinker dapat membantu mengurangi emisi CO₂ dari industri semen. Dalam penilaian siklus hidup beton, lebih dari 85% emisi CO₂ disebabkan oleh produksi semen Portland (OPC) biasa. Mengurangi OPC dan menggantinya dengan campuran mineral seperti abu terbang sangat penting dalam menurunkan emisi CO₂. Dengan cara ini, kita dapat mengoptimalkan penggunaan semen sekaligus memanfaatkan abu terbang secara efektif, yang merupakan produk sampingan dari pembangkit listrik tenaga batu bara. Sekitar 700 juta ton produk sampingan diproduksi setiap tahun di seluruh dunia, di mana 70% di antaranya adalah *fly ash* (FA). Beton abu terbang tampaknya menawarkan solusi terbaik untuk mengurangi konsumsi semen karena abu terbang dalam jumlah besar dapat diperoleh dengan biaya yang sedikit. Oleh karena itu, masyarakat yang bertanggung jawab terhadap lingkungan harus mengembangkan infrastruktur rendah karbon melalui penggunaan semen yang optimal dan penggunaan abu terbang yang tepat, produk sampingan limbah yang secara signifikan dapat mencemari sumber daya air, udara, dan tanah di dekatnya. Daripada dibuang, abu terbang dapat berguna baik secara lingkungan maupun ekonomi jika digunakan dalam beton. (Nayak et al., 2022)

Tingginya emisi CO₂ yang terjadi dalam proses produksi semen membutuhkan usaha-usaha intensif untuk menurunkan emisi tersebut yang salah satu diantaranya adalah mengurangi penggunaan semen dengan menggantikannya dengan limbah alternatif seperti abu terbang. Terkait pembuatan material konstruksi seperti bata beton dampak lingkungan harus diperhitungkan sebagai bagian dari pertimbangan jangka panjang dan sustainabilitas. Langkah-langkah strategis untuk menurunkan dampak lingkungan adalah mendaur ulang abu terbang dengan memasukkan limbah alternatif ini menjadi bahan bangunan. Menurut Ohemeng ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP merupakan parameter penting untuk mengevaluasi kinerja lingkungan beton. Sejumlah penelitian (Kurda et al., 2018; Majhi & Nayak, 2020; Ohemeng & Naghizadeh, 2023) (Kurda et al., 2018 (Ohemeng & Naghizadeh, 2023) (Majhi & Nayak, 2020) digunakan sebagai dasar untuk mengadopsi berbagai elemen lingkungan yang dipertimbangkan adalah *abiotic depletion potential* (ADP), *global warming potential* (GWP), *ozone depletion potential* (ODP), *photochemical ozone creation potential* (POCP), *acidification potential* (AP), and *eutrophication potential* (EP). Abbe (2017) Kim et al membahas *global warming* adalah kenaikan suhu bumi karena emisi Gas Rumah Kaca (GHG), dengan CO₂ sebagai standar GWP. Peningkatan suhu global berpengaruh buruk pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material, yang memicu perubahan iklim seperti kenaikan permukaan laut dan penyebaran penyakit. GWP adalah ukuran dampak potensial emisi gas CO₂ terhadap pemanasan global. ADP (*Abiotic Depletion Potential*) merujuk pada penurunan sumber daya alam tak terbarukan, seperti mineral dan bahan bakar fosil, akibat ekstraksi. Ekstraksi yang tidak proporsional

mengurangi kapasitas alami bumi dan memicu kelangkaan unsur tertentu, berdampak pada keseimbangan lingkungan dan ketersediaan sumber daya untuk generasi mendatang. ODP (*Ozone Depletion Potential*) adalah proses pengurangan konsentrasi lapisan ozon stratosfer (terletak pada ketinggian 15-30 km) yang dipicu kontaminan buatan manusia. Konsekuensinya adalah tingkat radiasi ultraviolet lebih tinggi, yang dapat memperbesar jumlah melanoma. POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*) merujuk pada dampak dari polutan buatan manusia di udara bereaksi dengan sinar matahari menghasilkan zat kimia seperti ozon. Polutan ini mengakibatkan terbentuknya kabut asap yang mengandung senyawa kimia berbahaya bagi ekosistem, serta berbahaya bagi kesehatan manusia dan pertumbuhan tanaman. AP (*Acidification Potential*) merujuk pada dampak dari deposisi polutan asam seperti SO_2 dan NO_x pada tanah, air, dan ekosistem. Polutan ini dapat merusak ekosistem, mengubah sifat fisik zat, dan meningkatkan mobilisasi logam berat dalam tanah. Akibatnya, rantai makanan hewan dan tumbuhan akuatik dan terestrial dapat terganggu. SO_2 adalah substansi standar untuk menilai AP. EP (*Eutrophication Potential*) digambarkan sebagai suatu kondisi jaringan perairan dengan tingkat konsentrasi nutrisi yang tinggi, yang meliputi nitrogen dan fosfor yang mengakibatkan terjadinya pemekaran alga, sehingga menurunkan kualitas air dalam ekosistem perairan. Eutrofikasi dianggap sebagai tantangan ekologis yang menunjukkan dampak buruk pada ekosistem akuatik serta keberlanjutan air portabel yang dibutuhkan oleh manusia untuk kelangsungan hidup mereka yang tak henti-hentinya di bumi.

Menggunakan abu terbang sebagai pengganti agregat halus dan semen untuk produksi bata beton adalah salah satu cara untuk mengurangi limbah dan mencapai beton ramah lingkungan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki secara komprehensif kuat tekan, hubungan beban dan waktu dibawah beban tekan, dan dampak lingkungan, serta melihat pengaruh dari pemanfaatan abu terbang dalam pembuatan beton dari segi kinerja dan sifat mekanik. Dengan memahami dampak dan interaksi antara bahan-bahan ini, diharapkan dapat ditemukannya formulasi bata beton yang tidak hanya mencapai kerja struktural yang optimal namun juga dapat berperan dalam mendukung tujuan berkelanjutan. Keberhasilan penelitian ini akan membawa kontribusi positif terhadap arah industri konstruksi dalam meningkatkan kualitas material serta dunia konstruksi yang lebih berkelanjutan bagi lingkungan dan masyarakat maka penulis mengangkat judul **“Kuat Tekan, Hubungan Beban dan Waktu, dan Dampak Lingkungan pada Bata Beton yang Mengandung Abu Terbang”**.

1.1.1. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah yang dapat diambil sebagai berikut:

- Masalah perilaku kuat tekan bata beton yang menggunakan abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus.

- Apakah hubungan beban dan waktu pada bata beton yang mengandung abu terbang dapat mencapai beban tekan maksimum?
- Masalah parameter dampak lingkungan daur ulang limbah abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus .

1.1.2. Tujuan Penelitian

- Menganalisis perilaku kuat tekan bata beton yang menggunakan abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus.
- Menilai keterkaitan hubungan beban dan waktu pada bata beton yang mengandung abu terbang untuk mencapai beban tekan maksimum.
- Menganalisa parameter dampak lingkungan terhadap daur ulang limbah abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus.

1.1.3. Manfaat Penelitian

Dengan menggunakan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir dan semen, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pengetahuan tentang perilaku mekanik bata beton saat menggunakan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir dan semen. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat mengurangi jumlah material alami yang terkandung dalam bata beton.

1.1.4. Batasan Masalah

Penulisan skripsi ini dibatasi pada hal-hal berikut :

- Abu terbang (*fly ash*) yang digunakan merupakan abu terbang rendah kalium (kelas F)
- Memanfaatkan pedoman yang ada sebagai acuan adalah SNI 03-0691-1996 dan beberapa jurnal terdahulu
- Pada penelitian ini semen yang digunakan adalah tipe semen Portland komposit (PCC) dan memenuhi standar SNI-2049_2015.
- Bentuk dari benda uji adalah persegi dengan ukuran = 20 x 10 x 8 cm.
- Jumlah benda uji yang direncanakan 4 variasi masing-masing terdiri dari 15 benda uji.

1.2. Teori

1.2.1. Bata Beton

Bata Beton (*paving block*) merupakan salah satu komposisi bahan bangunan yang terbuat dari campuran semen Portland atau *adhesive* hidrolik serupa, air dan agregat, dengan atau tanpa bahan lain yang tidak mengurangi kualitas batu bata beton tersebut. (SNI 03_0691-1996).

Bata beton (*paving block*) dengan nilai penyerapan rendah (%) dan nilai resistensi tinggi (MPa) dianggap berkualitas baik. Jenis karakteristik kualitas yang sehubungan dengan standar kualitas ini lebih besar untuk kekuatan pers dan lebih kecil untuk persentase penyerapan air. Bata beton berkualitas rendah (kelas D)

memiliki kekuatan dorong minimum 8,5 MPa dan persentase penyerapan air rata-rata maksimal 10% menurut (SNI 03-0691-1996).

Bata beton memiliki estetika yang baik karena, selain menjadi persegi atau dengan berbagai bentuk, mereka juga dapat diberi warna sesuai dengan kebutuhan, bata beton itu sendiri cocok untuk lantai luar bangunan yang banyak digunakan dilalu lintas dan dimaksudkan untuk tidak sempurna dan bebas dari retakan.

Di Indonesia, bata beton telah dikenal dan digunakan sejak 1977 atau 1978. Bata beton itu sendiri memiliki berbagai bentuk untuk sesuai dengan preferensi pengguna. Bata beton dapat digunakan untuk berbagai alasan, seperti area parker, terminal, jalan paving, dan blok jalan di kompleks perumahan, tergantung pada kebutuhan. Bata beton adalah sampingan dari bahan bangunan berbasis semen yang digunakan untuk mengeraskan atau menutupi permukaan tanah.

A. Kelebihan Bata Beton

Bata Beton (*paving block*), yang memiliki banyak manfaat, dapat menggantikan plat beton dan aspal. Bata beton berguna untuk berbagai tempat, seperti taman bermain, taman kota, terminal bus, tempat parker, dan area pejalan kaki. Ada banyak manfaat untuk menggunakan bata beton, diantaranya :

1. Dapat diproduksi dalam jumlah besar.
2. Dapat digunakan dalam pembangunan jalan tanpa membutuhkan keterampilan khusus.
3. Bata beton dapat digunakan secara teratur tanpa mudah rusak.
4. Bata beton lebih mudah untuk diletakkan dan dapat digunakan segera tanpa harus menunggu mereka untuk mengeras, seperti dengan beton.
5. Tidak membuat kebisingan dan membuat debu.
6. Keberadaan pori-pori pada bata beton mengurangi aliran permukaan dan meningkatkan aliran air ke tanah.
7. Perkerasan dengan bata beton mampu menurunkan hidrokarbon dan menahan logam berat.
8. Bata beton memiliki daya tarik visual yang berbeda terutama ketika dibuat dengan pola dan warna yang menarik.
9. Harga bata beton lebih rendah bila dibandingkan dengan perkerasan konvensional lainnya.
10. Biaya perawatan murah dan proses pemasangan mudah.

B. Kelemahan Bata Beton

Kelemahan dari bata beton adalah sebagai berikut :

1. Bata beton memerlukan perawatan rutin untuk menjaga keindahan dan fungsionalitasnya.
2. Bata beton rentan terhadap retak akibat tekanan berlebih, suhu ekstrem, atau penempatan yang tidak tepat.
3. Celah-celah antara bata beton dapat menjadi tempat tumbuhnya rumput dan gulma, yang memerlukan perawatan ekstra untuk menjaganya tetap bersih.

4. Jika bata beton tidak dipasang dengan benar atau diletakkan diatas tanah yang tidak stabil, ada risiko mereka bisa bergeser atau miring dari posisi awalnya.

1.2.2. Syarat Mutu Bata Beton

Beberapa faktor yang harus diperhitungkan dalam menentukan mutu bata beton dimana harus memenuhi persyaratan (SNI 03-0691-1996, n.d.) diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Sifat Tampak
Bata beton terbentuk dengan baik dan harus bebas dari retakan atau kerusakan sudut dan pinggul tidak mudah rusak dengan tangan.
2. Bentuk dan Ukuran
Desain dan dimensi bata beton untuk lantai ditentukan oleh kesepakatan antara pengguna dan produsen. Produsen akan menjelaskan desain, ukuran, dan struktur penempatan bata beton.
3. Sifat Fisik
Bata beton harus memiliki kekuatan fisik, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Sifat-Sifat Fisik (SNI 03-0691-1996)

Mutu	Kuat Tekan (MPa)		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan Air rata-rata maks.
	Rata-rata	Min.	Rata-rata	Min.	(%)
A	40	35	0,090	0,103	3
B	20	17,0	0,130	0,149	6
C	15	12,5	0,160	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

1.2.3. Dimensi dan Bentuk Bata Beton

Bata beton berbagai bentuk dan ketebalan tersedia di toko. Bata beton biasanya diproduksi dalam bentuk holand dan heksagon dengan ketebalan yang dapat disesuaikan untuk memenuhi persyaratan tertentu. Panjangnya dapat berkisar dari 200 hingga 250 milimeter, dan lebarnya dapat berkisar dari 100 hingga 112 milimeter. Panjang beam dapat berkisar dari 60 hingga 100 milimeter. Dengan meningkatnya kebutuhan pasar, semakin banyak pilihan dan gaya baru.

1.2.4. Klasifikasi

Beberapa jenis klasifikasi dalam bata beton, antara lain:

1. Bata beton mutu A = Digunakan untuk jalan.
2. Bata beton mutu B = Digunakan untuk area parkir.
3. Bata beton mutu C = Digunakan untuk pejalan kaki.
4. Bata beton mutu D = Digunakan untuk taman dan keperluan lain.

1.2.5. Material Penyusun Bata Beton

1.2.5.1. Semen Portland (PC)

Semen adalah material penyusun beton yang berfungsi sebagai perekat antara agregat kasar dan agregat halus. Apabila semen dicampur dengan air maka akan membentuk adukan yang disebut pasta semen, semen dicampur dengan agregat halus dan air, membentuk adukan yang disebut mortar, semen dicampur dengan agregat halus, agregat kasar dan air, maka akan membentuk campuran beton.

Menurut (SNI 15-2049-2004), menjelaskan bahwa semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Semen portland bersifat hidrolis karena di dalamnya terkandung kalsium silikat dan kalsium sulfat yang bersifat hidrolis dan sangat cepat bereaksi dengan air. Reaksi semen dengan air berlangsung secara irreversibel, artinya hanya dapat terjadi satu kali dan tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula.

Menurut (SNI 15-2049-2004) semen portland dibedakan menjadi 5 tipe sebagai berikut:

- Tipe I yaitu semen Portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus,
- Tipe II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang,
- Tipe III yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi,
- Tipe IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah,
- Tipe V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Semen Portland yang dipakai untuk struktur harus mempunyai kualitas tertentu yang telah ditentukan agar dapat berfungsi secara efektif. Pemeriksaan secara berkala perlu dilakukan, baik masih berbentuk bubuk kering maupun yang pasta. Secara umum, ada 4 senyawa kimia utama yang menyusun semen portland, yaitu:

- Trikalsium Silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang disingkat menjadi C3S.

- Dikalsium Silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang disingkat menjadi C2S.
- Trikalsium Aluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) yang di singkat menjadi C3A.
- Tertrakalsium aluminoferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) yang disingkat menjadi C4AF.

1.2.5.2. Agregat Halus

Berdasarkan (SNI 03-6820-2002), agregat halus adalah agregat besar butir maksimum 4,76 mm berasal dari alam atau hasil alam, sedangkan agregat halus olahan adalah agregat halus yang dihasilkan dari pecahan dan pemisahan butiran dengan cara penyaringan atau cara lainnya dari batuan atau terak tanur tinggi.

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butiran butiran agregat mempunyai ukuran sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori diantara butiran yang besar, sehingga poripori menjadi sedikit, dengan kata lain kemampatan menjadi tinggi. Mengenai klasifikasi berbagai jenis pasir yang biasanya kita kenal:

1. Pasir Beton

Pasir beton adalah bahan berkualitas untuk konstruksi, tetapi datang dengan biaya yang agak tinggi, seperti yang ditunjukkan pada daftar harga untuk pasir. Beton pasir hitam sering memiliki biji-bijian halus yang tidak hancur ketika dicampur dan akan mendapatkan kembali bentuk mereka. Pasir ini sangat baik untuk penggilingan, pemasangan dinding, dan pekerjaan fondasi, serta untuk meletakkan batu bata dan batu.

2. Pasir Pasang

Pasir pasang lebih halus dari pasir beton dan kehilangan strukturnya saat dipanaskan tanpa kembali ke bentuk aslinya. Jenis pasir ini lebih murah dari pasir beton. Pasir biasanya digunakan untuk mencampur dengan beton untuk memastikan tidak terlalu kasar, menjadikannya cocok untuk menutupi dinding.

3. Pasir Elod

Pasir elod memiliki biji-bijian terkecil dibandingkan dengan pasir beton dan jenis-jenis pasir lainnya. Ciri-ciri yang menentukan dari pasir elod adalah bahwa ketika terganggu, itu akan pecah dan tidak tumbuh kembali. Pasir ini masih mengandung campuran kotoran dan hitam dalam warna. Jenis pasir ini tidak cocok untuk konstruksi bangunan. Pasir ini biasanya digunakan untuk mencampur dengan beton untuk pemangkasan dinding atau untuk membuat batu bata.

4. Pasir Merah

Pasir merah, juga dikenal sebagai pasir Jebrod di daerah Sukabumi atau Cianjur, berasal dari wilayah Jebrod di Cianjura. Pasir Jebrod biasanya cocok untuk bahan Cor karena memiliki diameter yang hampir identik dengan pasir beton tetapi lebih kasar dan mengandung batuan besar.

1.2.5.3. Abu Batu Pecah

Abu Batu adalah sisa dari proses pembuatan batu yang hancur. Di setiap area, makeup batu abu digunakan dalam campuran beton terutama untuk meningkatkan karakteristik beton. Abu batu adalah abu yang mengandung sejumlah besar silika dan alumina, serta senyawa alkali, besi, dan batu kapur. Harga yang murah. Menggunakan batu abu alih-alih semen dapat mengurangi kebutuhan untuk semen. Batu abu memiliki komponen silika rapuh yang non-kristal, yang memungkinkannya untuk mengeras ketika dikombinasikan dengan semen. Senyawa yang terbentuk antara silika tanpa bentuk dan batu kapur adalah komposisi silikat kalsium yang sulit larut dalam air.

1.2.5.4. Air

Persyaratan air sesuai dengan Peraturan Standar Beton Indonesia tahun 1971 adalah sebagai berikut:

1. Tidak mengandung lumpur (atau benda melayang lainnya) lebih dari gram/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
3. Tidak mengandung senyawa-senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Jumlah air yang digunakan dalam membuat campuran harus benar, karena menggunakan terlalu banyak air akan mengakibatkan banyak gelembung air terbentuk setelah proses hidrasi, yang menyebabkan penurunan kekuatan bata beton.

1.2.5.5. Abu Terbang (*Fly Ash*)

Menurut (Wardani, 2008)), *fly ash* batu bara adalah material yang memiliki ukuran butiran yang halus dan berwarna keabu-abuan yang diperoleh dari pembakaran batubara. Abu batubara adalah sisa pembakaran batubara yang berupa partikel amorf halus. Abu adalah bahan anorganik yang dihasilkan dari perubahan bahan mineral (mineral matter) selama proses pembakaran. Dalam proses pembakaran batubara di boiler, dua jenis abu terbentuk: abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Abu terbang terdiri dari 10-20 persen dan abu terbang 80-90% dari total abu batu bara. Sebelum dibuang ke udara melalui cerobong, abu terbang ditangkap dengan elektrik precipitator. Selain mengandung unsur kimia seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), *fly ash* batubara juga mengandung unsur kimia lainnya yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan karbon. Keuntungan menggunakan *fly ash* pada beton segar adalah sebagai berikut.

- Memperbaiki sifat pengerjaan adukan beton (workability) akibat bentuk partikelnya yang bundar, mengurangi jumlah air campuran yang dibutuhkan.

Abu terbang dapat menambah workability dan kualitas mortar dalam hal kekuatan dan kekedapan air.

- Mengurangi jumlah panas hidrasi yang terjadi, sehingga baik untuk pembuatan beton massa karena dapat mengurangi terjadinya retak, dapat mengurangi kemungkinan terjadinya segregasi dan bleeding.
- Pada beton keras keuntungan penggunaan fly ash adalah mempertinggi daya tahan terhadap lingkungan yang bersifat agresif, meningkatkan kerapatan beton, mengurangi penyusutan, mengurangi pengembangan yang disebabkan oleh reaksi alkali agregat.

Pozolan dapat dipakai sebagai bahan tambahan atau sebagai pengganti sebagian semen portland. Bila dipakai sebagai pengganti sebagian semen portland umumnya berkisar antara 10% - 35% berat semen. Abu Terbang sebagai bahan tambahan untuk campuran beton disebutkan ada 3 jenis abu terbang, yaitu :

- Abu terbang kelas F, adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara, jenis antrasit pada suhu 1560°C.
- Abu terbang kelas N, adalah hasil kalsinasi dari pozolan alam seperti tanah diatomea, shale (serpih), tuft, dan batu apung.
- Abu terbang kelas C adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran limit atau Batubara dengan kadar karbon $\pm 60\%$. Abu terbang ini mempunyai sifat pozzolan dan sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10 %.

1.2.6. Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan (SNI 1974-2011), Kuat tekan benda uji dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima selama pengujian dengan luas penampang benda uji. Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu sebuah struktur di mana semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Nilai kuat benda uji dapat dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang rata dan dinyatakan dengan dibulatkan ke 1 (satu) desimal dengan satuan 0,1 MPa (SNI 1974-2011, n.d.), yang dinyatakan dalam persamaan

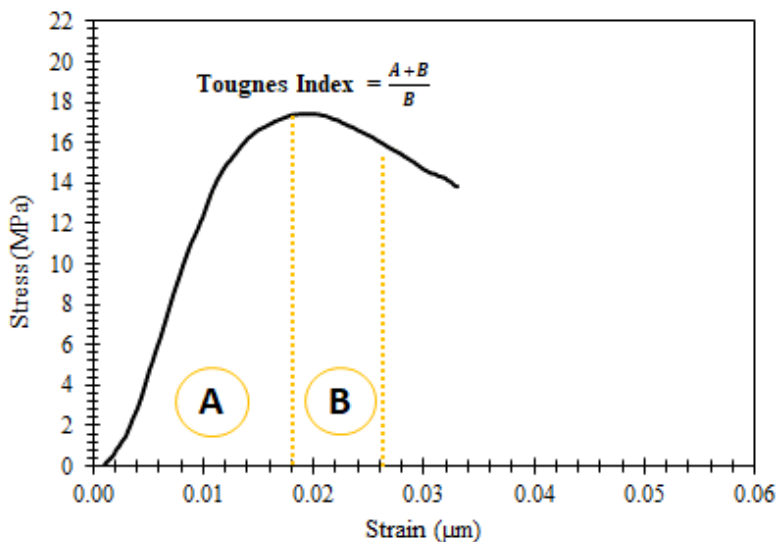
$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

f'_c	=	Kuat tekan beton (MPa atau N/mm ²)
P	=	Gaya tekan aksial (N)
A	=	Luas penampang melintang benda uji (mm ²)

Setelah menentukan kuat tekan, dilakukan upaya untuk mengukur toughness index untuk semua bata beton. *Toughness index* adalah metrik yang mencirikan perilaku tegangan pasca-puncak dari material padat, seperti beton. Indeks ini menunjukkan kapasitas energi beton untuk menahan fraktur.

Toughness index ditentukan dengan membagi integral kurva tegangan tekan-waktu dari tegangan awal hingga 80% tegangan puncak dengan integral kurva dari tegangan awal hingga tegangan puncak. Dalam penelitian ini, tegangan tekan dipresentasikan pada sumbu y dan regangan dipresentasikan pada sumbu x, seperti yangunjukkan pada **Gambar 5**. Perhitungan ini berasal dari penelitian sebelumnya



Gambar 1. Definisi Indeks Ketangguhan

Modulus elastisitas menerapkan pendekatan eksperimental dengan pengujian tegangan-regangan uniaxial pada sampel bata beton. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) untuk mengukur deformasi aksial secara presisi. Beban akan diberikan secara bertahap hingga mencapai titik runtuh sampel, dan data tegangan serta regangan akan direkam secara kontinu.

1.2.7. Parameter Dampak Lingkungan

Produksi beton membutuhkan banyak sumber daya alam, seperti pasir, batu, air, dan semen. Proses ini menghasilkan gas rumah kaca dan polutan yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Pada tahap awal produksi beton, penggalian bahan mentah menyebabkan erosi tanah dan mengganggu ekosistem sekitar. Selain itu, produksi beton memerlukan penggunaan sumber daya alam dalam jumlah yang besar, yang berdampak negatif pada keberlangsungan lingkungan. Selama proses pengadukan, pengangkutan, dan pengecoran beton, pembakaran bahan bakar menghasilkan emisi gas polutan seperti karbon monoksida dan nitrogen oksida, antara lain, yang menyebabkan polusi udara dan membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan sekitarnya. Selain itu, penggunaan air selama proses produksi beton dapat menyebabkan masalah lingkungan seperti penurunan kualitas air dan kerusakan habitat akuatik. Untuk

membentuk beton, bahan mentah biasanya dicampur dengan air dalam jumlah besar. Setelah itu, air ini harus dibuang untuk mengurangi pencemaran dan sisa bahan kimia. Namun, upaya untuk mengurangi dampak paving block terhadap lingkungan telah dilakukan, seperti menggunakan beton yang dibuat dengan bahan alternatif dan menggunakan admixture.

Abiotic depletion potential (ADP), *global warming potential* (GWP), *ozone depletion potential* (ODP), *photochemical ozone creation potential* (POCP), *acidification potential* (AP), and *eutrophication potential* (EP) adalah beberapa parameter yang umum digunakan untuk menilai dampak lingkungan. GWP terkait dengan semua gas rumah kaca yang berasal dari emisi CO₂ dan metana. Gas rumah kaca ini dapat meningkatkan suhu dunia dan berdampak negatif pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. "Gas rumah kaca" seperti karbon dioksida (CO₂), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tetap berada di atmosfer bumi dan menghalangi kehilangan panas bumi yang dihasilkan oleh matahari. Ini dikenal sebagai perubahan iklim. Gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit dapat disebabkan oleh peningkatan suhu global ini. Sebagian besar penelitian ilmiah setuju bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki efek yang signifikan terhadap iklim.

Pengurangan jumlah bahan baku yang tidak dapat diperbaharui di seluruh dunia digambarkan dalam kategori ADP. Di bawah kategori dampak ini termasuk ekstraksi bahan abiotik murni, seperti agregat, biji logam, mineral, tanah, dan sebagainya. Ekstraksi zat-zat ini dapat menunjukkan bahwa kapasitas alami Bumi telah dipenuhi, yang membuatnya tidak dapat digunakan oleh generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan komponen yang dibahas.

ODP (*Ozone Depletion Potential*) adalah proses pengurangan konsentrasi dilapisan ozon stratosfer (terletak pada ketinggian 15-30 km) yang dipicu kontaminan buatan manusia. Konsekuensinya adalah tingkat radiasi ultraviolet lebih tinggi, yang dapat memperbesar jumlah melanoma.

POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*) merujuk pada dampak dari polutan buatan manusia di udara bereaksi dengan sinar matahari menghasilkan zat kimia seperti ozon. Polutan ini mengakibatkan terbentuknya kabut asap yang mengandung senyawa kimia berbahaya bagi ekosistem, serta berbahaya bagi kesehatan manusia dan pertumbuhan tanaman.

Dampak AP disebabkan oleh pembakaran bahan bakar, polutan asam menempel pada tanah, air, hewan, ekosistem, dan bahan seperti sulfur dan nitrogen. Gas asam seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x) bereaksi dengan air di tanah atau di atmosfer, membentuk "hujan asam". Ketika asam bertemu air, ia dapat menghasilkan ion hidrogen (H⁺, atau "proton"), yang sangat reaktif, yang mendorong zat lain untuk mengubah komposisi dan sifat fisiknya.

Oleh karena itu, deposisi asam dapat merusak ekosistem dan mengikis bahan Kategori EP ini mencakup semua efek dari tingkat makronutrien yang tinggi di lingkungan (fosfor dan nitrogen), yang menyebabkan produksi biomassa yang tinggi di ekosistem darat dan akuatik. Polutan udara, air limbah, dll. Meskipun fosfat dan nitrat sangat penting bagi kehidupan, peningkatan konsentrasi mereka dalam air

menyebabkan eutrofikasi, atau overnutrifikasi, yang dapat menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan, mengurangi jumlah oksigen dalam air, dan merusak ekosistem. Pupuk dan emisi nitrogen oksida (NOx) dari pembakaran bahan bakar fosil adalah sumbernya. (Wałach et al., 2019) menggunakan persamaan berikut untuk menghitung nilai parameter dampak lingkungan:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i \times w_i \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

E = dampak lingkungan

Ni = standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i

wi = berat kategori ke-i (kg/m³)

Tabel 2. Data Dampak Lingkungan dari Produksi Bahan Beton

Sumber Literatur	Material	ADP (kgSbeq)	GWP (kgCO ₂ eq)	ODP (kgCFC- 11 eq)	POCP kgC ₂ H ₄ eq)	AP (kgSO ₂ eq)	EP (kgPO ₄ eq)
(Chen et al., 2010)	Abu terbang	3.37.E-04	8.77E-03	5.58.E-09	3.22.E-06	5.53.E-05	8.23.E-06
(Blegini, 2006)	OPC	3.99.E-03	9.51.E-01	1.09.E-07	8.31.E-05	2.76.E-03	3.60.E-04
(Braga, 2015)	Pasir	3.37.E-10	9.87.E-03	1.71.E-11	2.80.E-06	4.58.E-05	1.08.E-05
(Braga, 2015)	Air	1.57.E-11	1.33.E-04	5.93.E-12	4.99.E-08	3.87.E-08	9.70.E-07
(Kurda et al., 2018)	Batu pecah	1.09.E-09	2.44.E-02	2.43.E-10	7.83.E-06	1.44.E-04	3.18.E-05
(Silva et al., 2023)	Abu batu (20% dari produksi batu pecah)	2.18.E-10	4.88.E-03	4.86.E-11	1.57.E-06	2.88.E-05	6.36.E-06

Inventarisasi parameter lingkungan ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur saintifik yang terpercaya. Tabel 2 memperlihatkan nilai-nilai ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP untuk material OPC, pasir, air, batu pecah, *fly ash*, yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

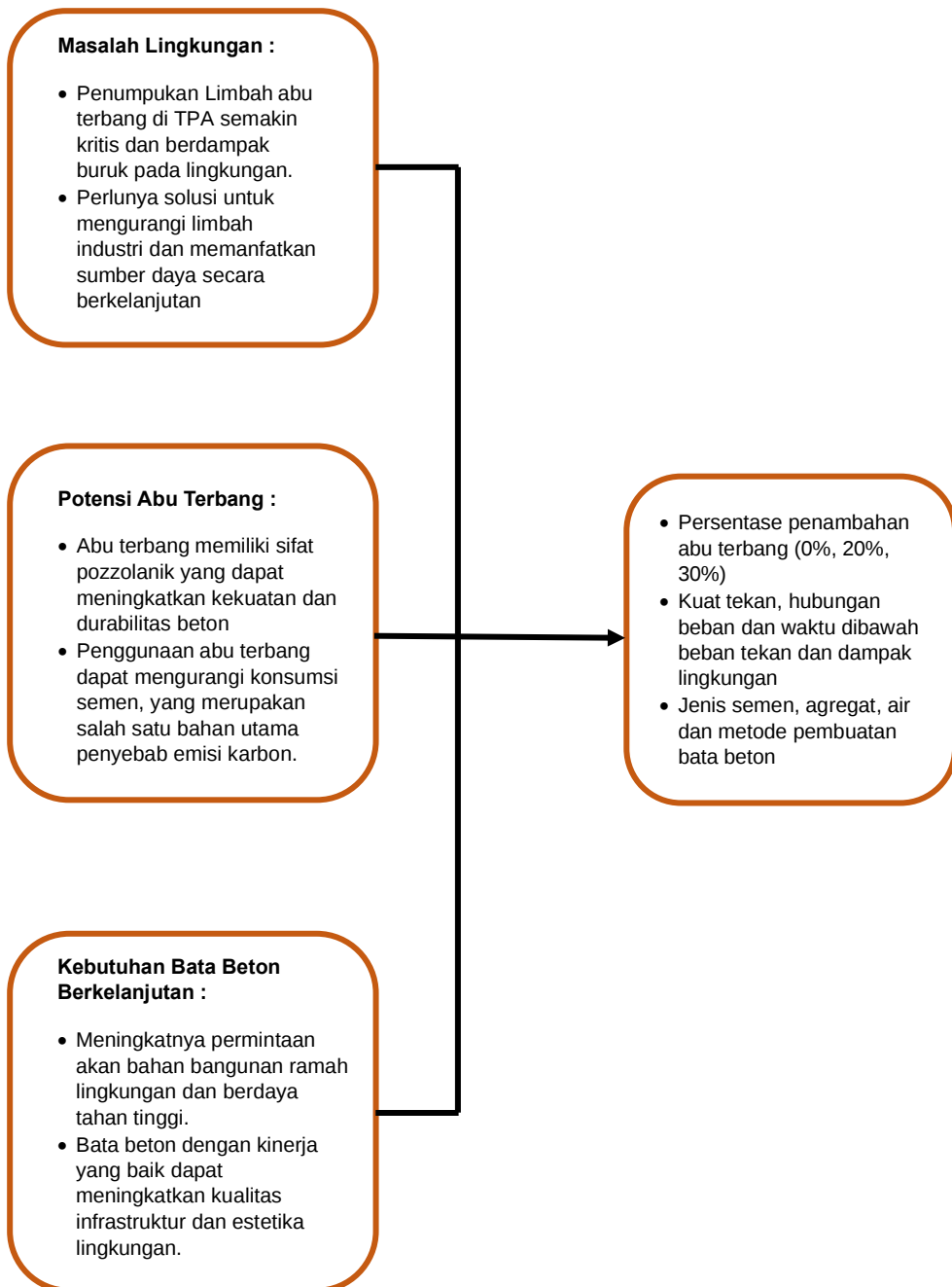
1.2.8. Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual yang disajikan menekankan masalah lingkungan yang serius terkait dengan akumulasi limbah abu terbang di tempat pembuangan akhir dan kemungkinan pemanfaatannya sebagai bahan baku untuk pembuatan bata beton. Produksi bata beton menghasilkan abu terbang yang memiliki sifat pozzolanik yang meningkatkan kualitas bata beton. Penggunaan abu terbang menyelesaikan

masalah lingkungan dan memungkinkan pengembangan produk bangunan yang lebih berkelanjutan.

Dalam proses pembuatan bata beton, menggunakan abu terbang memiliki beberapa manfaat. Pertama, abu terbang dapat mengurangi konsumsi semen, yang merupakan salah satu bahan utama penyebab emisi karbon, sehingga menggunakannya membantu mengurangi perubahan iklim. Kedua, sifat pozzolanik abu terbang dapat meningkatkan kekuatan dan daya tahan bata beton, sehingga bata beton yang dibuat lebih kuat dan tahan lama. Terakhir, menggunakan abu terbang sebagai bahan baku dapat mengurangi volume limbah yang dihasilkan.

Untuk mengoptimalkan penggunaan abu terbang dalam pembuatan bata beton, penelitian lebih lanjut diperlukan. Persentase penambahan abu terbang, jenis semen, agregat, dan metode pembuatan adalah beberapa variabel yang harus diperhatikan. Diperlukan juga untuk mengevaluasi kualitas bata beton yang dibuat, termasuk kekuatan tekannya, ketahanan terhadap abrasi, dan dampak terhadap lingkungan. Dengan demikian, informasi yang lebih akurat dapat diperoleh tentang kemungkinan penggunaan abu terbang sebagai bahan baku dalam industri konstruksi.



Gambar 2. Kerangka Konseptual

1.2.9. Penelitian Terdahulu

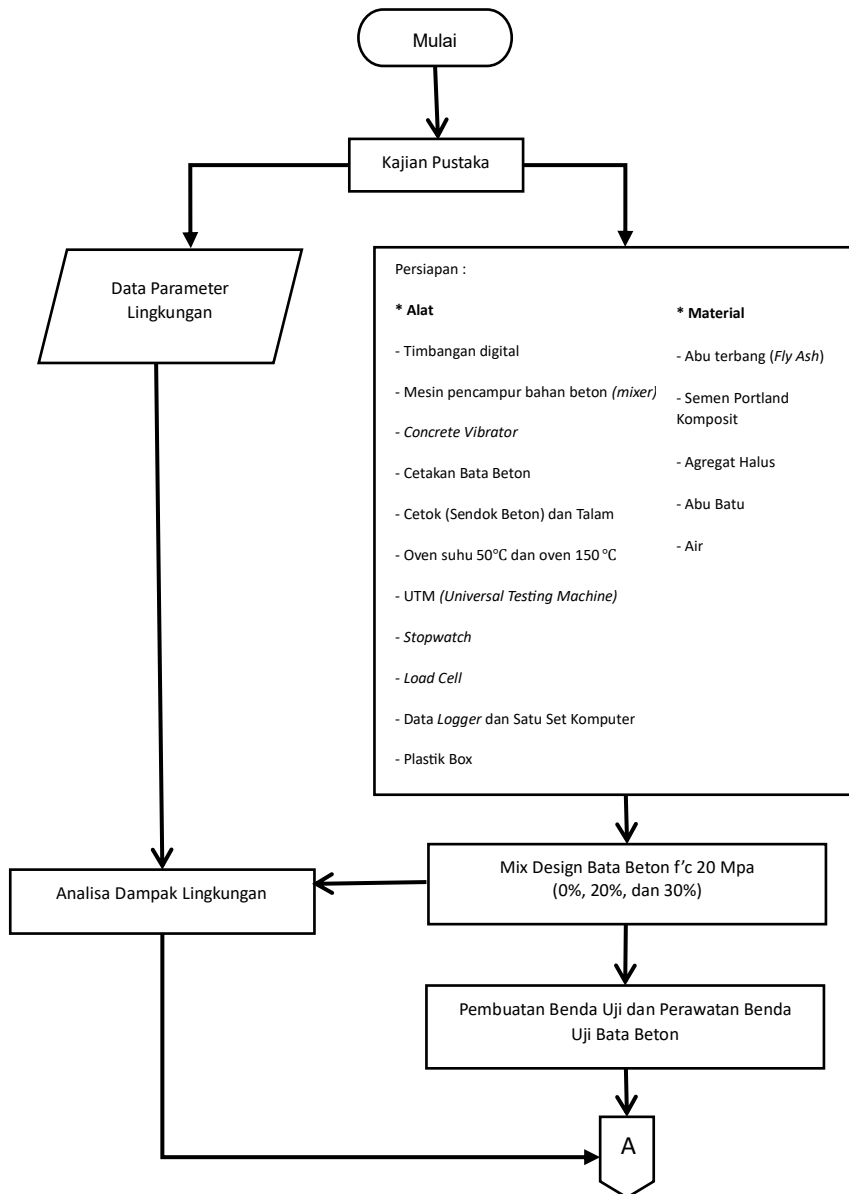
(Suarnita, 2011), melakukan penelitian terkait pengaruh abu terbang terhadap kuat tekan beton. Salah satu bahan pengikat alternatif adalah fly ash (abu terbang). Abu terbang memiliki sifat pozzolan dan dapat bereaksi dengan kapur pada suhu ruang dengan media air dan membentuk senyawa yang bersifat mengikat. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh abu terbang terhadap kuat tekan beton. Penentuan komposisi campuran berdasarkan SNI T-15-1990-03. Penelitian ini memvariasikan bahan tambah abu terbang antara 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% sebagai bahan tambah. Hasil pengujian di laboratorium menunjukkan bahwa beton dengan penggunaan abu terbang sebagai bahan tambah dalam campuran beton mengalami peningkatan kuat tekan antara 5,088%, 9,473%, 12,103%, 14,034% hingga 15,437% dari beton normal.

(Setiawati, 2018) melakukan penelitian mengenai pengaruh penggunaan fly ash sebagai bahan pengganti semen terhadap kuat tekan beton. persentase fly ash yang digunakan juga bervariasi, yaitu 5% sampai 12.5% dengan interval penggunaan fly ash sebesar 2.5%. Beton akan diuji pada umur 3, 7, 14 dan 28 hari setelah dilakukan perawatan dengan metode curing. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus sebanyak 96 benda uji dimana untuk setiap variasi terdapat 12 benda uji. Dari penelitian ini diperoleh bahwa nilai kuat tekan tertinggi pada penggunaan 12,5% fly ash, yaitu 404,03 Kg/cm² pada umur 28 hari dengan persentase peningkatan 27,95%. Pada awal umur beton nilai kuat tertinggi pada penggunaan fly ash 12,5%, sebesar 231,04 Kg/cm² dengan persentase peningkatan sebesar 60% terhadap beton normal. Dapat disimpulkan bahwa pada awal umur beton, penggunaan fly ash mempengaruhi kekuatan beton. Persentase penggunaan fly ash 12,5% pada beton, akan menghasilkan beton dengan kuat tekan maksimum.

(Jayaputri Sahast et al., 2022), melakukan penelitian terkait penggunaan Fly Ash sebagai bahan pengganti sejumlah semen dan bahan tambahan terhadap kuat tekan pada self compacting concrete. Penelitian ini menggunakan beton silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, kemudian digunakan fly ash tipe c sebagai bahan pengganti sejumlah semen dengan variasi penambahan sebesar 0%, 3%, 6%, 9%, dan 12 % dengan nilai factor air semen sebesar 0.41. pada penelitian ini dilakukan pengujian slump flow test dan uji kuat tekan. Slump flow test dilakukan untuk mengetahui flowability dan workability beton, sedangkan uji tekan beton dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton yang dilakukan pada umur 35 hari dan 56 hari. Seiring dengan kenaikan penambahan fly ash, nilai slump flow test mengalami penurunan, sedangkan nilai kuat tekan mengalami kenaikan. Namun, penggunaan fly ash optimal terjadi saat fly ash digunakan sebagai bahan pengganti beton pada variasi senilai 3% dengan kuat tekan beton sebesar 35,98 MPa (35 hari) dan 33,68 MPa (56 hari), nilai berat volume beton 7 sebesar 2313,21 kg/m³ dan 2279,66 kg/m³, serta nilai slump flow test dan nilai T50 telah memenuhi standar.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Diagram Alir Penelitian





Gambar 3. Kerangka Konseptual

2.2. Lokasi Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah bata beton yang menggunakan abu terbang sebagai pengganti semen dan pasir dengan variasi kadar 0%, 20 %, dan 30% abu terbang yang diproduksi dari Moncongloe PT. Citra Sarana Bumi Kabupaten Gowa

2.3. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Riset Eco Material, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa dengan rentang waktu penelitian selama dua bulan, dimulai pada bulan Februari 2024.

2.4. Teknik Pengumpulan Data

Untuk memperoleh data sebagai bahan utama dalam penelitian ini maka digunakan dua metode pengumpulan data yaitu:

- a. Studi pustaka, untuk memperoleh data sekunder dengan membaca sejumlah buku, jurnal ataupun artikel-artikel ilmiah sebagai landasan teori dalam menuju kesempurnaan penelitian ini.

- b. Pemeriksaan sampel dilakukan dilaboratorium untuk mendapatkan data primer yang akan digunakan dalam menganalisa hasil penelitian yang dilaksanakan.

2.5. Persiapan Peralatan dan Pengambilan Benda Uji

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Timbangan digital
2. Mesin pencampur bahan beton (*mixer*)
3. *Concrete Vibrator*
4. Cetakan bata beton ukuran 20 cm x 10 cm x 8 cm
5. Cetok (Sendok Beton) dan Talam
6. Oven suhu 50°C dan oven 150 °C
7. UTM (*Universal Testing Machine*)
8. *Stopwatch*
9. *Load Cell* kapasitas 500 kN untuk mengukur dan verifikasi beban tekan
10. Data *Logger* dan Satu Set Komputer
11. Plastik Box

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yang terdiri dari:

1. *Fly Ash* (Abu Terbang) dalam penelitian ini adalah sisa pembakaran batu bara pada Pembangkit listrik Tenaga Bayu (PLTB) Tolo I Jeneponto, Sulawesi Selatan. *Fly ash* (Abu terbang) pada Gambar 5.
2. Semen Portland Komposit (*Portland Composite Cement, PCC*).
3. Pasir.
4. Abu Batu.
5. Air yang digunakan adalah air bersih.



Gambar 4. Abu Terbang

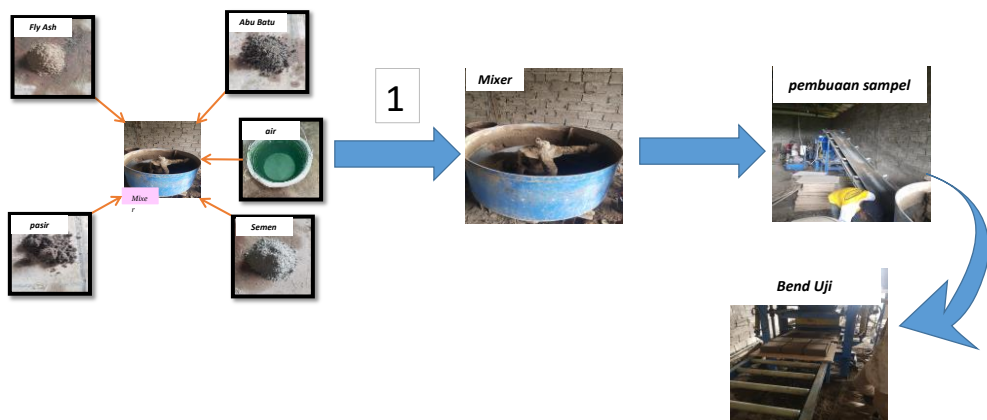
2.6. Penentuan Jumlah Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk persegi dengan Panjang 20 cm, Lebar 10 cm dan Tinggi 8 cm. Dilakukan pembuatan benda uji meliputi bata beton normal dan bata beton sebagai pengganti pasir dan semen

menggunakan limbah abu terbang sebanyak 10%, 20%, dan 30%. Masing-masing variasi benda uji terdapat 15 sampel benda uji. Untuk memudahkan dalam penelitian maka benda uji diberi kode tertentu. Kode tersebut terdiri dari beberapa variasi yang disubstitusi limbah abu terbang disingkat seperti FA 10A, FA 10B dan seterusnya sampai 15 sampel, sedangkan untuk bata beton Normal kode variasinya yaitu Normal A, Normal B dan seterusnya sampai 15 sampel.

Tabel 3. Benda Uji Bata Beton

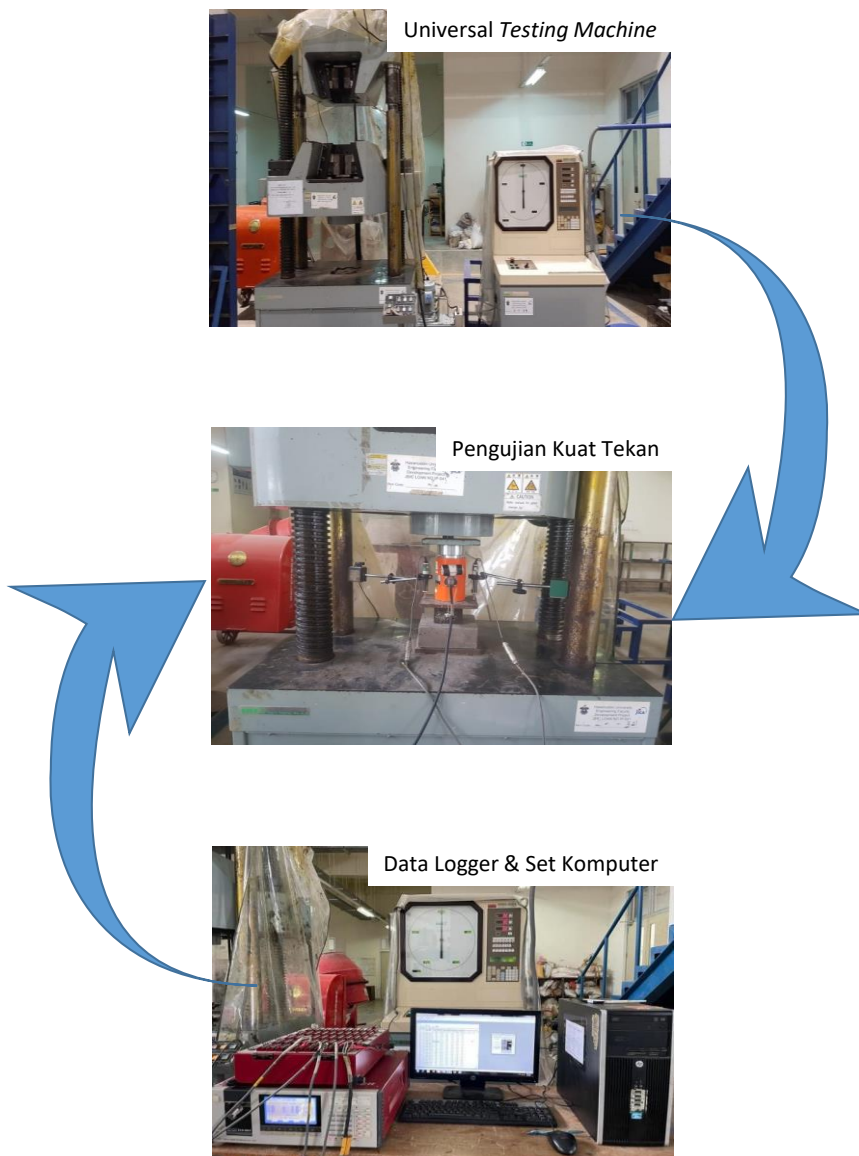
Nama Sampel	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi (cm)	Jumlah Variasi
BBAT-0	20	10	8	15
BBAT-20	20	10	8	15
BBAT-30	20	10	8	15



Gambar 5. Pembuatan Benda Uji

2.7. Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan pedoman pengujian kuat tekan pada SNI 03-0691-1996, pengujian kuat tekan (kuat tekan kompresi) dilakukan untuk mengukur beban tekan maksimal yang dapat ditahan oleh bata beton. Universal Test Machine (UTM) berkapasitas 1000 kN digunakan. Dalam pengujian ini, benda uji akan di press dan diproduksi dengan menggunakan metode secara press hidrolis dan vibrator. Benda uji dipres hingga hancur kemudian dihitung kuat tekannya.



Gambar 6. Pengujian Kuat Tekan

Menurut pedoman SNI 03-0691-1996, kuat tekan (f'_c) substansial menyinggung beberapa besar beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji meledak ketika terkena daya tekan tertentu yang dihasil oleh mesin tekan.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada bata beton dengan ukuran 20 cm x 20 cm x 8 cm. dimana pengujian dilakukan saat bata beton berumur 28 dan 90 hari.

Berdasarkan SNI 03-0691-1996 bahwa persyaratan mutu sifat-sifat aktual bata beton pada Tabel 4 sebagai berikut

Tabel 4. Syarat Mutu Pada Sifat Fisik Kuat Tekan Bata Beton

MUTU	Kuat Tekan (MPa)	
	Rata-rata	Min.
A	40	35
B	20	17
C	15	12,5
D	10	8,5

Keterangan:

Mutu A = Digunakan untuk jalan

Mutu B = Digunakan untuk peralatan parkir

Mutu C = Digunakan untuk pejalan kaki

Mutu D = Digunakan untuk taman dan penggunaan lain

Kemudian rencana mutu yang diambil pada penelitian bata beton dengan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir adalah mutu B digunakan untuk dan nilai kuat tekan rencana adalah 20 Mpa.

2.8. Environment Performance dari Bata Beton

Sebuah analisis efek insertasi abu terbang pada konsumsi energi yang dibutuhkan untuk membuat blok paving serta *abiotic depletion potential* (ADP), *global warming potential* (GWP), *ozone depletion potential* (ODP), *photochemical ozone creation potential* (POCP), *acidification potential* (AP), and *eutrophication potential* (EP)) dilakukan. Referensi untuk nilai parameter dibuat ke sumber yang relevan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengevaluasi keaslian insertasi abu terbang dengan mempertimbangkan dua aspek sekaligus daripada mengandalkan hanya satu, seperti jumlah abu terbang dan kuat tekan. Untuk memprediksi kriteria penerimaan abu terbang sebagai pengganti untuk semen dan agregat halus, nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan di bawah tekanan intensif.

Beberapa penelitian yang memperhatikan secara simultan kuat tekan dan emisi CO₂. Penelitian ini mengadopsi efisiensi kekuatan beton terhadap lingkungan menjadi analisa performa kekuatan beton terhadap parameter lingkungan menjadi . Dalam penelitian ini menyediakan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat lentur dengan parameter lingkungan (GWP, ADP, ODP, POCP, AP, dan EP) seperti pada persamaan 7, 8, 9, dan 10.

$$EP_{GWP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{GWP_{mix}}, \text{ persamaan (3)}$$

$$EP_{ADP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{ADP_{mix}} \text{ persamaan (4)}$$

$$EP_{ODP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{ODP_{mix}}, \text{ persamaan (5)}$$

$$EP_{POCP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{POCP_{mix}}, \text{ persamaan (6)}$$

$$EP_{AP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{AP_{mix}}, \text{ persamaan (7)}$$

$$EP_{EP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{EP_{mix}}, \text{ persamaan (8)}$$

Dimana:

$EP_{GWP/f'_{cn}}$ = total GWP_{mix} nilai yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kekuatan tekan (MPa/kgCO₂)

$EP_{ADP/f'_{cn}}$ = nilai total ADP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSb)

$EP_{ODP/f'_{cn}}$ = nilai total ODP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kekuatan tekan (MPa/kgCFC-11)

$EP_{POCP/f'_{cn}}$ = nilai total $POCP_{mix}$ yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgC₂H₄)

$EP_{AP/f'_{cn}}$ = total nilai AP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO₂)

$EP_{EP/f'_{cn}}$ = total nilai EP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO₄)

f'_c = kekuatan tekan (MPa)

n = usia 28/90 hari