

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Sektor konstruksi saat ini dituntut untuk melakukan transformasi signifikan guna menekan dampak buruk terhadap lingkungan, terutama dalam menghadapi tantangan pemanasan global yang kian mengkhawatirkan. Salah satu upaya nyata dalam meningkatkan keberlanjutan industri ini adalah dengan mengintegrasikan penggunaan bahan konstruksi yang berasal dari limbah. Pemanfaatan material alternatif yang lebih ramah lingkungan menjadi kunci dalam mengurangi eksploitasi sumber daya alam berlebih serta menurunkan jejak karbon industri. Di Indonesia, pesatnya pertumbuhan sektor konstruksi berbanding lurus dengan meningkatnya kebutuhan akan material bangunan, salah satunya adalah batako.

Batako merupakan salah satu bahan utama dalam bidang konstruksi yang sering digunakan untuk dinding karena pemasangannya yang cepat dan harga yang terjangkau, yang pada akhirnya dapat mengurangi biaya, mempercepat proyek konstruksi, pemasangannya relatif cepat dan harga belinya relatif murah. Berdasarkan penelitian Ngii et al. (2024), menyatakan bahwa produksi batako ramah lingkungan adalah langkah maju menuju konstruksi yang berkelanjutan. Dengan memanfaatkan bahan daur ulang dan proses yang lebih bersih, batako ini mengurangi dampak lingkungan dan menawarkan solusi yang lebih baik untuk masa depan (Ngii et al., 2024).

Saat ini, perhatian khusus tertuju pada limbah plastik jenis *High-Density Polyethylene* (HDPE) karena dampak lingkungannya yang masif. Guna mencari solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, muncul gagasan inovatif untuk mendayagunakan limbah HDPE sebagai bahan substitusi parsial agregat halus dalam produksi batako (Padang et al., 2024). Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, penggunaan plastik HDPE sebagai substitusi parsial agregat halus cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan batako seiring dengan bertambahnya persentase limbah yang digunakan. Penurunan yang paling signifikan dapat mencapai 15,15% hanya pada substitusi pasir sebesar 5%. Hal ini disebabkan akibat lemahnya lekatan antarmuka antara semen dan permukaan plastik HDPE yang menjadi faktor penyebab menurunnya kemampuan batako dalam menahan beban tekan (Padang et al., 2024).

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penggunaan Slag Nikel menjadi sangat krusial sebagai bahan komplementer dalam penelitian ini. Slag nikel memiliki karakteristik fisik yang lebih padat dan bersudut (*angular*) yang mampu meningkatkan *interlocking* atau ikatan antar material di dalam matriks beton. (Bethary & Intari, 2022) menyatakan, Indonesia merupakan negara dengan cadangan nikel terbesar di dunia, yaitu sekitar 72 juta ton atau setara dengan 52 persen dari total cadangan global. Pada tahun 2019, produksi bijih nikel Indonesia mencapai sekitar 800 ribu ton atau sekitar 30 persen dari total produksi dunia. Pemerintah Indonesia

mendorong program hilirisasi industri melalui pembatasan ekspor bahan mentah dan peningkatan pengolahan bijih nikel di dalam negeri. Kebijakan tersebut berdampak pada meningkatnya aktivitas produksi, yang pada akhirnya menyebabkan bertambahnya jumlah limbah sampingan berupa terak (*Slag*) dari proses pengolahan nikel. Jumlah slag nikel terus mengalami peningkatan seiring berjalannya waktu, karena setiap proses pemurnian nikel menghasilkan limbah padat dalam jumlah yang sangat besar, yaitu sekitar 50 ton slag untuk setiap satu ton produk nikel yang dihasilkan (Aprianto & Triastianti, 2018).

Berdasarkan permasalahan yang telah dipaparkan, penelitian ini hadir untuk memberikan inovasi material konstruksi berupa pemanfaatan limbah Slag Nikel dan High-Density Polyethylene (HDPE) sebagai bahan pengganti agregat halus dalam pembuatan batako. Penelitian ini menerapkan metode *Cement Treatment* pada HDPE guna memberikan tekstur kasar pada permukaannya agar ikatan mekanis yang terjadi dengan pasta semen menjadi lebih kuat. Inovasi ini diharapkan tidak hanya mampu menjadi solusi atas penumpukan limbah industri dan domestik di Indonesia, tetapi juga menghasilkan produk batako yang memiliki bobot lebih ringan namun tetap memiliki durabilitas yang tinggi.

Melalui penggabungan sifat pozzolanik dari slag nikel dan sifat hidrofobik dari plastik HDPE, penelitian ini berupaya menciptakan material bangunan yang memiliki karakteristik mekanik yang memenuhi standar infrastruktur hijau. Oleh karena itu, penulis melakukan kajian mendalam yang dituangkan dalam penelitian dengan judul: **"KARAKTERISTIK MEKANIK BATAKO RAMAH LINGKUNGAN BERBAHAN SLAG NIKEL DAN HIGH-DENSITY POLYETHYLENE (HDPE)"**.

1.1.1 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang yang telah dipaparkan, pemanfaatan limbah Slag Nikel dan HDPE dengan metode *Cement Treatment* merupakan inovasi strategis untuk menjawab tantangan penumpukan limbah dan kebutuhan material konstruksi hijau, maka rumusan masalah yang akan dikaji secara mendalam dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi substitusi Slag Nikel dan HDPE terhadap nilai densitas (*density*) batako ramah lingkungan?
2. Bagaimana kapasitas penyerapan air (*water absorption*) pada batako yang menggunakan campuran limbah Slag Nikel dan HDPE?
3. Bagaimana nilai kuat tekan (*compressive strength*) yang dihasilkan oleh batako berbahan dasar Slag Nikel dan HDPE?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi substitusi Slag Nikel dan HDPE dengan metode *cement treatment* terhadap perubahan nilai densitas (*density*) batako ramah lingkungan yang dihasilkan.

2. Menentukan besarnya kapasitas penyerapan air (*water absorption*) pada batako dengan campuran limbah Slag Nikel dan HDPE dengan metode *cement treatment* untuk mengetahui ketahanannya terhadap kelembapan.
3. Mengevaluasi nilai kuat tekan (*compressive strength*) batako berbahan Slag Nikel dan HDPE dengan metode *cement treatment*.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dan nilai guna dari berbagai aspek, baik secara teoritis maupun praktis, sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis (Akademis): Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknologi bahan konstruksi, khususnya mengenai karakteristik pemanfaatan limbah Slag Nikel dan HDPE sebagai material substitusi ramah lingkungan.
2. Manfaat Praktis bagi Industri: Menjadi referensi bagi industri konstruksi dalam memproduksi material bangunan alternatif yang lebih berkelanjutan dan memberikan solusi bagi industri nikel dalam mengelola limbah hasil produksinya.
3. Manfaat Bagi Lingkungan: Membantu mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem akibat penumpukan limbah padat Slag Nikel dan sampah plastik HDPE melalui proses daur ulang yang bernilai guna.
4. Manfaat Bagi Masyarakat: Berpotensi menyediakan alternatif material bangunan yang lebih ringan namun tetap berkualitas, yang diharapkan dapat menekan biaya pengadaan material konstruksi di masa depan.

1.1.4 Batasan Masalah

Mengingat luasnya ruang lingkup dalam teknologi bahan konstruksi dan adanya keterbatasan sumber daya, maka penelitian ini dibatasi pada parameter-parameter tertentu agar pembahasan tetap fokus dan mendalam. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut::

1. Slag nikel yang digunakan adalah limbah dari pabrik smelter nikel milik PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia (HNI) yang berlokasi di Kawasan Industri Bantaeng (KIBA).
2. Slag nikel sebagai pengganti agregat halus lolos saringan nomor 4.
3. Limbah plastik jenis HDPE yang digunakan telah melalui proses *Cement Treatment*, di mana diberikan perlakuan penyelimutan (*coating*) menggunakan pasta semen yang bertujuan untuk meningkatkan daya ikat (*bonding*).
4. Variasi persentase substitusi HDPE setelah *cement treatment* dan slag nikel adalah sebesar 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, dan 1%.
5. Penelitian bersifat eksperimental dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan SNI dan ASTM.
6. Pengujian kuat tekan dilakukan setelah benda uji mencapai umur 28 hari untuk memastikan hidrasi semen telah maksimal.

7. Penelitian ini difokuskan pada skala laboratorium dan belum mencakup pengujian struktural penuh dalam bentuk elemen struktural.
8. Produk batako ramah lingkungan yang dihasilkan difokuskan khusus untuk aplikasi dinding partisi bangunan (elemen non-struktural).

1.2 Teori

1.2.1 Batako

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-0349-1989, bata beton atau yang secara umum dikenal sebagai batako adalah unsur bangunan yang dibuat dari campuran semen portland, air, dan agregat dengan atau tanpa bahan tambahan lainnya. Material ini dirancang sebagai komponen pasangan dinding yang memiliki dua bentuk fisik utama, yaitu bata beton pejal dan bata beton berlubang.

Bata beton pejal didefinisikan sebagai batako yang memiliki struktur padat dengan luas penampang pejal mencapai 75% atau lebih dari luas penampang seluruhnya. Selain itu, secara volumetrik, bata beton ini harus memiliki volume pejal lebih dari 75% dari total volume batanya. Karakteristik utama dari tipe pejal ini adalah kepadatannya yang tinggi, yang berimplikasi pada nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan tipe berlubang. Sebaliknya, bata beton berlubang atau sering disebut bata rongga adalah jenis batako yang sengaja dirancang dengan lubang-lubang di dalamnya guna mengurangi berat material. Suatu batako dikategorikan sebagai jenis berlubang apabila memiliki luas penampang lubang lebih dari 25% dari luas penampang batanya. Begitu pula dengan aspek volumenya, di mana volume lubang yang terbentuk harus melebihi 25% dari volume total bata seluruhnya.

Tabel 1. Ukuran Bata Beton

Jenis	Ukuran (mm)			Tebal dinding sekatan lobang, minimum	
	Panjang	Lebar	Tebal	Luar	Dalam
1. Pejal	$390 + 3$ 5	90 ± 2	100 ± 2	-	-
2. Berlobang					
a. Kecil	$390 + 3$ 5	$190 + 3$ -5	100 ± 2	20	15
b. Besar	$390 + 3$ 5	$191 + 3$ -5	200 ± 2	25	20

Sumber : (SNI 03-0349-1989)

Berdasarkan standar dimensi yang tercantum pada Tabel 1 di atas, dapat diketahui bahwa setiap jenis bata beton memiliki spesifikasi ukuran nominal serta batas toleransi penyimpangan yang harus dipenuhi untuk menjamin presisi

konstruksi. Selain aspek dimensi, bata beton juga wajib memenuhi kriteria performa mekanis dan durabilitas tertentu. Adapun rincian mengenai persyaratan karakteristik fisis yang mencakup nilai kuat tekan dan kapasitas penyerapan air dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Syarat-syarat fisis bata beton

Jenis	Satuan	Tingkat mutu bata beton pejal				Tingkat mutu bata beton pejal			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
1. Kuat tekan bruto* rata-rata min.	kg/cm ²	100	70	40	25	70	50	35	20
2. Kuat tekan bruto masing-masing benda uji min.	kg/cm ²	90	65	35	21	65	45	30	17
3. Penyerapan air rata-rata, maks	%	25	35	-	-	25	35	-	-

Sumber : (SNI 03-0349-1989)

Kuat tekan bruto adalah beban tekan keseluruhan pada waktu benda coba pecah, dibagi dengan luas ukuran nyata dari bata termasuk luas lubang serta cekungan tepi.

1.2.2 Material Penyusun Batako Ramah Lingkungan

1.2.2.1 Semen Portland Komposit (PCC)

Portland Composite Cement (PCC) merupakan jenis semen hidrolis yang diproduksi dengan mencampurkan klinker semen Portland dengan satu atau lebih bahan tambahan mineral, seperti batu kapur (limestone), fly ash, pozzolan, atau slag tanur tinggi. Penambahan material tersebut bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan klinker sekaligus menurunkan dampak lingkungan dari industri semen, terutama emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses produksi. PCC mengandung material tambahan seperti terak tanur tinggi (blast furnace slag), pozzolan, batu kapur, atau senyawa silika hingga 35% dari total massa semen komposit. Bahan tambahan pada semen PCC tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air tetapi juga memperbaiki sifat workability pada beton, bahan pozzolan ini berperan penting dalam meningkatkan performa beton melalui reaksi pozzolanik, yang memperkuat sifat mekanis dan daya tahan terhadap lingkungan agresif (Sigit Setyatama & Saputra, 2025).

Bahan tambah pada semen PCC akan reaktif saat bertemu dengan produk hidrasi semen yang kemudian akan menghasilkan ssilikat tambahan atau reaksi pozzolanik untuk meningkatkan kuat tekan dan kedapatan beton dan direkomendasikan untuk konstruksi di lingkungan agresif (Wandala Adi Putra, 2020). Salah satu material penyusun pada Semen Portland Komposit (PCC) adalah

limestone atau batu kapur, yang berfungsi sebagai bahan pengisi (filler) untuk mengoptimalkan pengisian rongga dalam matriks beton serta membantu proses hidrasi material bersifat sementitious (Zuschlag, 2022). Keberadaan limestone yang berukuran halus mampu memperbaiki struktur mikro beton sehingga beton menjadi lebih padat dan homogen.

Secara umum, fungsi utama semen dalam beton adalah menghasilkan produk hidrasi yang berperan sebagai pengikat, terutama calcium silicate hydrate (C-S-H), yang menjadi komponen utama penyumbang kekuatan beton. Pada proses hidrasi, senyawa aktif dalam semen seperti trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) bereaksi dengan air dan membentuk gel C-S-H serta kalsium hidroksida (CH). Gel C-S-H berperan signifikan dalam meningkatkan kekuatan mekanik dan kepadatan beton, sedangkan keberadaan CH dapat menurunkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif apabila tidak dikontrol melalui penggunaan bahan tambahan yang bersifat pozzolan. Selain berkontribusi terhadap kuat tekan beton, semen juga berfungsi dalam meningkatkan kemudahan pengerjaan (workability), mengatur waktu ikat, serta menunjang ketahanan beton terhadap serangan kimia. Pemanfaatan bahan tambahan seperti fly ash, slag, dan pozzolan alam pada jenis semen modern, termasuk Semen Portland Komposit (PCC), terbukti mampu meningkatkan durabilitas beton. Di samping itu, penggunaan bahan campuran tersebut juga berperan dalam menurunkan tingkat porositas, mengurangi panas hidrasi, serta menekan emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksi semen.

Komposisi kimia semen Portland selanjutnya disajikan pada Tabel 3, sedangkan senyawa utama penyusun semen Portland ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Komposisi Oksida Semen

Oksida	Kandungan (%)
Kapur (CaO)	60 – 65
Silika (SiO_2)	17 – 25
Alumina (Al_2O_3)	3 – 8
Sulfur (SO_3)	1 – 2
Besi (Fe_2O_3)	0,5 – 6
Magnesia (MgO)	0,5 – 4
Soda/Potash ($Na_2O + K_2O$)	0,5 – 1

Tabel 4. Senyawa-senyawa utama pada semen portland

Nama Senyawa	Komposisi Oksida	Singkatan
Tricalcium Silicate	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S

Nama Senyawa	Komposisi Oksida	Singkatan
Dicalcium Silicate	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Tricalcium Aluminate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetra Calcium Aluminoferrite	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Sumber : (Rita Irmawaty, 2022)

Semen Portland Komposit (PCC) mengandung material tambahan non-klinker dengan proporsi hingga sekitar 35–40% sebagaimana diatur dalam SNI 15-7064-2004. Komposisi tersebut memungkinkan pengurangan penggunaan klinker dalam proses produksi semen, sehingga berdampak pada penurunan kebutuhan energi dan emisi karbon dioksida (CO_2). Selain itu, pemanfaatan bahan tambahan seperti fly ash dan slag dalam PCC turut mendukung prinsip keberlanjutan dengan mengolah limbah industri menjadi material yang memiliki nilai guna dalam konstruksi.

1.2.2.2 Slag Nikel

Slag nikel merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses peleburan dan pemurnian bijih nikel, khususnya pada proses pirometalurgi dalam industri pengolahan nikel. Seiring dengan meningkatnya produksi dan hilirisasi industri nikel di Indonesia, jumlah slag nikel yang dihasilkan juga mengalami peningkatan signifikan. Secara umum, setiap proses pemurnian bijih nikel menghasilkan slag dalam jumlah yang jauh lebih besar dibandingkan produk nikel yang dihasilkan, sehingga keberadaan slag nikel menjadi salah satu isu lingkungan yang perlu mendapatkan perhatian khusus. (Aprianto & Triastianti, 2018) menyatakan bahwa sekitar 70% komposisi kimia slag nikel didominasi oleh silika sebesar 41,47%, ferri oksida sebesar 30,44%, dan alumina sebesar 2,58%. Kandungan silika yang relatif tinggi pada slag nikel diharapkan dapat meningkatkan kualitas proses hidrasi antara pasta semen dan agregat, sehingga terbentuk interaksi antarmuka (*interface*) yang lebih baik. Dengan terbentuknya *interface* yang lebih sempurna, potensi terjadinya kehancuran beton pada zona antarmuka dapat diminimalkan, atau jika kehancuran tetap terjadi, diperlukan energi yang lebih besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa beton yang dihasilkan berpotensi memiliki kekuatan yang lebih tinggi.

Menurut Ahmad et al., (2022) dalam penelitiannya, slag nikel memiliki beberapa karakteristik unggulan yang menjadikannya layak digunakan sebagai material substitusi agregat halus dalam campuran beton. Slag nikel memiliki tingkat kekerasan yang tinggi serta tekstur butiran yang relatif kasar, sehingga mampu meningkatkan ikatan mekanis antara agregat dan pasta semen. Selain itu, slag nikel menunjukkan nilai porositas dan daya serap air yang rendah, yang menyebabkan jumlah air yang terserap oleh agregat menjadi lebih kecil dan membantu menjaga kestabilan rasio air-semen dalam campuran beton. Dari sisi kimia, slag nikel memiliki stabilitas yang baik dan tidak menunjukkan reaktivitas yang merugikan, termasuk pada lingkungan laut. Karakteristik tersebut juga mendukung ketahanan beton terhadap penetrasi ion klorida, sehingga slag nikel sangat sesuai digunakan pada beton yang diaplikasikan di daerah pesisir atau lingkungan laut.

Tabel 5. Hasil pengujian karakteristik slag nikel

No	Parameter	Hasil	Satuan	Spesifikasi Umum	Keterangan
1	Kadar Air	0	%	3,0 – 5,0	Tidak memiliki kandungan air
2	Modulus Kehalusan	3,39	–	2,2 – 3,1	Relatif kasar
3	Berat Isi	1,71	kg/liter	1,4 – 1,9	Memenuhi
4	Berat Jenis Curah	3,1	–	1,6 – 3,2	Memenuhi
5	Penyerapan Air	0,72	%	0,2 – 2,0	Memenuhi

Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian karakteristik slag nikel yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin . Hasil pengujian memperlihatkan bahwa seluruh parameter yang diuji berada dalam rentang spesifikasi yang dipersyaratkan, sehingga slag nikel dinilai layak digunakan sebagai material campuran beton.

1.2.2.3 *High-Density Polyethylene (HDPE)*

High Density Polyethylene (HDPE) adalah salah satu jenis polimer termoplastik yang termasuk dalam keluarga polietilena dan banyak digunakan dalam berbagai bidang industri. Material ini dikenal memiliki struktur molekul yang relatif rapat dengan tingkat percabangan yang rendah, sehingga menghasilkan sifat mekanik yang baik. HDPE umumnya memiliki kekuatan tarik dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan jenis polietilena lainnya. (Nurchayanto, 2018) menyatakan bahwa *High Density Polyethylene (HDPE)* merupakan salah satu jenis polimer termoplastik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknik karena memiliki sifat mekanik yang baik. HDPE dicirikan oleh struktur molekul dengan tingkat percabangan yang rendah, sehingga menghasilkan ikatan antarmolekul yang kuat dan memberikan kekuatan tarik serta kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan jenis polietilena lainnya. Selain itu, HDPE bersifat opak, memiliki ketahanan yang baik terhadap temperatur tinggi dan bahan kimia, serta menunjukkan stabilitas yang baik terhadap pengaruh lingkungan. Karakteristik tersebut menjadikan HDPE berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif maupun bahan campuran dalam bidang konstruksi dan rekayasa material.

Namun demikian, meskipun HDPE memiliki sifat mekanik yang baik, material ini juga memiliki beberapa keterbatasan apabila diaplikasikan sebagai bahan campuran dalam beton. Salah satu kekurangan utama HDPE adalah karakteristik permukaannya yang relatif licin dan nonpolar, sehingga menyebabkan rendahnya kemampuan lekatan (bonding) antara permukaan HDPE dan pasta semen. Kondisi tersebut mengakibatkan tidak terbentuknya interlocking mekanis yang baik pada zona antarmuka antara plastik HDPE dan matriks beton.

Akibat lemahnya ikatan antarmuka tersebut, penggunaan limbah plastik HDPE sebagai substitusi parsial agregat halus cenderung berdampak negatif

terhadap kuat tekan beton atau batako. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Padang et al. (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan persentase substitusi pasir dengan limbah HDPE menyebabkan penurunan kuat tekan batako. Penurunan kuat tekan yang paling signifikan tercatat mencapai 15,15% pada variasi substitusi pasir sebesar 5%. Penurunan ini disebabkan oleh lemahnya lekatan antara pasta semen dan permukaan plastik HDPE, sehingga kemampuan batako dalam menahan beban tekan menjadi berkurang. Sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan lemahnya lekatan antarmuka antara plastik HDPE dan pasta semen, diperlukan perlakuan khusus terhadap permukaan HDPE sebelum digunakan dalam campuran beton. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah *cement treatment*, yaitu perlakuan dengan melapisi partikel limbah menggunakan pasta semen sebelum proses pencampuran beton. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan kekasaran permukaan serta memperbaiki sifat ikatan antara plastik HDPE dan matriks semen.

Pada penelitiannya, Assaggaf et al (2022) menjelaskan bahwa metode *cement treatment* dilakukan dengan cara menyelimuti partikel *crumb rubber* menggunakan *cement slurry* sebelum dicampurkan ke dalam adukan beton. Dalam penelitiannya, digunakan rasio air-semen (*water-cement ratio*) sebesar 0,4 untuk melapisi partikel *crumb rubber*. Perlakuan ini bertujuan untuk memodifikasi karakteristik permukaan limbah yang semula bersifat hidrofobik menjadi lebih hidrofilik, sehingga mampu berinteraksi lebih baik dengan air dan pasta semen. Dengan adanya lapisan pasta semen pada permukaan limbah, ikatan antarmuka antara limbah dan matriks semen menjadi lebih kuat karena terbentuknya zona transisi antarmuka yang lebih stabil. Hal ini memungkinkan terjadinya transfer tegangan yang lebih efektif dalam beton, sehingga potensi penurunan kuat tekan akibat penggunaan limbah plastik yang bersifat hidrofobik dapat diminimalkan.

1.2.2.4 Air

Air merupakan komponen esensial dalam campuran beton karena berfungsi sebagai media terjadinya reaksi hidrasi antara semen dan air, serta berpengaruh terhadap tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) beton segar. Air yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi persyaratan tertentu agar tidak mengganggu proses hidrasi dan tidak menurunkan kekuatan maupun durabilitas beton. Berdasarkan SNI 7656:2012, air yang digunakan harus bersih dan bebas dari zat berbahaya yang dapat memengaruhi proses pengerasan dan mutu beton, seperti minyak, asam, garam organik maupun anorganik, lumpur, serta bahan lain yang bersifat merugikan. Oleh karena itu, pemilihan air yang sesuai dengan ketentuan SNI menjadi faktor penting dalam menjamin kualitas, ketahanan, dan keamanan struktur beton.

Dalam campuran beton, air memiliki dua fungsi utama sebagai agen hidrasi, yaitu memicu reaksi kimia pembentukan senyawa pengeras dan berperan sebagai pelumas yang memengaruhi *workability* beton (Li, 2021). Pengendalian jumlah air melalui rasio air-semen yang tepat dapat menurunkan porositas beton dengan mengurangi jumlah air bebas, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan

kuat tekan dan menghambat masuknya zat agresif seperti ion klorida dan sulfat. Di sisi lain, kualitas air campuran juga harus diperhatikan karena air yang bersifat asam dengan nilai pH rendah dapat mengganggu proses hidrasi, menurunkan kuat tekan, serta mempercepat terjadinya korosi pada tulangan. Sebaliknya, penggunaan air dengan pH yang lebih tinggi cenderung menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang lebih baik. Dengan demikian, pengendalian kuantitas dan karakteristik kimia air campuran merupakan persyaratan utama dalam perancangan dan pelaksanaan pengecoran beton berkualitas, sesuai dengan rekomendasi SNI dan standar internasional, guna menjamin umur layan struktur yang panjang dan meminimalkan risiko kegagalan struktural.

1.2.3 Pengujian Densitas

Densitas merupakan parameter fisik yang menyatakan perbandingan antara massa dan volume suatu material. Secara umum, densitas digunakan untuk menggambarkan tingkat kepadatan suatu benda, yang secara langsung berkaitan dengan struktur internal dan porositas material tersebut. Pada material bangunan, densitas sering dijadikan indikator awal kualitas karena material dengan densitas yang lebih tinggi umumnya memiliki struktur yang lebih padat dan porositas yang lebih rendah.

Dalam konteks batako, densitas memiliki peranan penting karena berpengaruh terhadap sifat mekanik, khususnya kuat tekan dan penyerapan air pada batako. Batako dengan densitas rendah cenderung memiliki rongga internal yang lebih besar, sehingga menurunkan kemampuan batako dalam menahan beban tekan dan juga meningkatkan kapasitas penyerapan air. Sebaliknya, batako dengan densitas yang lebih tinggi menunjukkan susunan partikel yang lebih rapat, sehingga mampu meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur. (Dafedar et al., 2024) menyatakan bahwa densitas memiliki hubungan yang erat dengan kuat tekan suatu material. Peningkatan nilai densitas umumnya diikuti oleh peningkatan kuat tekan, sedangkan penurunan densitas cenderung menyebabkan berkurangnya kemampuan material dalam menahan beban tekan.

Berdasarkan SNI 1973:2008, berat isi dinyatakan sebagai rasio antara massa material dengan satuan kg terhadap volumenya dengan satuan m^3 . SNI 1973:2008 juga menyatakan bahwa nilai densitas yang diperoleh mencerminkan kondisi kepadatan campuran, termasuk pengaruh kadar air, jenis agregat, serta keberadaan rongga udara yang terperangkap.

1.2.4 Pengujian Penyerapan Air Batako

Pengujian penyerapan air merupakan parameter fundamental dalam mengevaluasi durabilitas dan kinerja jangka panjang batako. Kemampuan material untuk menyerap air menjadi indikator kritis karena infiltrasi kelembapan yang berlebihan dapat memicu berbagai mekanisme degradasi, seperti pelapukan akibat siklus basah-kering. Kapasitas penyerapan air pada batako tidak terjadi secara kebetulan, melainkan merupakan manifestasi langsung dari struktur mikro material tersebut.

Faktor determinan yang mengendalikan tinggi rendahnya persentase penyerapan air adalah porositas yang terbentuk di dalam matriks batako.

Secara definisi, porositas merupakan rasio persentase antara volume pori internal dengan volume keseluruhan material. Parameter ini memiliki korelasi positif yang signifikan dengan permeabilitas, yakni kapasitas matriks beton dalam memfasilitasi infiltrasi fluida dan ion agresif seperti klorida. Oleh karena itu, peningkatan nilai porositas akan berimplikasi langsung pada penurunan durabilitas beton serta resistensinya terhadap paparan lingkungan yang ekstrem. Penentuan karakteristik fisik beton seperti densitas, daya serap air, dan kandungan rongga (*void*) dilakukan menggunakan metode standar ASTM C642. Metode ini berbasis pada analisis gravimetri, di mana benda uji ditimbang dalam kondisi kering, jenuh, dan terendam untuk mendapatkan nilai porositas yang akurat pada beton yang telah mengeras.

Penelitian oleh Putra & Kristianto, (2025) menyatakan bahwa keberadaan rongga dalam struktur batako berpengaruh langsung terhadap nilai penyerapan air. Semakin tertutup dan rapat rongga yang terbentuk, maka kemampuan batako dalam menyerap air akan semakin rendah. Selain itu, penambahan umur batako turut menyebabkan penurunan penyerapan air, seiring dengan meningkatnya nilai densitas yang menunjukkan struktur material yang semakin padat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas pemadatan memegang peranan penting dalam mengendalikan pembentukan rongga pada batako. Pemadatan yang optimal mampu meminimalkan pori-pori terbuka. Dengan demikian, pengendalian rongga melalui proses produksi yang tepat tidak hanya berpengaruh terhadap penurunan penyerapan air, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan densitas dan kinerja mekanik batako secara keseluruhan.

1.2.5 Pengujian Kuat Tekan

Mengacu pada SNI 1974:2011, nilai kuat tekan didefinisikan sebagai hasil bagi antara beban maksimum yang mampu ditahan benda uji dengan luas penampangnya. Proses pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berdasarkan prosedur SNI 03-0349-1989 untuk mengidentifikasi batas kekuatan material. Secara teknis, kuat tekan merepresentasikan tegangan puncak yang mengakibatkan keruntuhan struktur benda uji. Pengujian ini dilakukan secara duplikat (dua sampel) untuk setiap variasi campuran, di mana hasil akhirnya diperoleh dari nilai rata-rata. Adapun formulasi perhitungan kuat tekan menggunakan persamaan berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots \text{Persamaan 1}$$

Dengan,

- f'_c = Kuat Tekan (MPa)
- P = Beban Tekan (N)
- A = Luas Penampang Benda Uji (mm²)

1.2.6 Pengujian Regangan

Regangan (*strain*) merupakan parameter mekanik yang menyatakan perubahan relatif panjang suatu material akibat pengaruh beban atau gaya yang bekerja. Regangan digunakan untuk menggambarkan kemampuan material dalam mengalami deformasi ketika dikenai gaya tarik, tekan, maupun geser, baik dalam kondisi elastis maupun plastis. Analisis regangan sangat penting karena dapat memberikan gambaran mengenai respons deformasi material sebelum mencapai kondisi kegagalan. Besarnya regangan yang terjadi dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis dan sifat material, laju pembebanan, serta kondisi lingkungan seperti temperatur selama pengujian berlangsung.

Pengujian regangan pada benda uji ini dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas deformasi serta mengamati karakteristik kegetasan material batako saat menerima beban tekan. Pengukuran perpindahan linier secara kontinu dilakukan menggunakan alat Linear Variable Differential Transformer (LVDT) yang memiliki tingkat ketelitian tinggi. LVDT mampu mendeteksi perubahan panjang yang sangat kecil secara kontinu selama proses pembebanan. Dalam pelaksanaannya, LVDT dipasang sejajar dengan arah gaya yang bekerja pada benda uji dan ditempatkan pada permukaan benda uji menggunakan rangka atau dudukan yang kaku dan stabil. Penempatan yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan bahwa data deformasi yang diperoleh merepresentasikan kondisi sebenarnya dari benda uji tanpa adanya gangguan akibat pergeseran alat.

Data yang dihasilkan dari pengukuran LVDT berupa perubahan panjang atau deformasi linier yang terjadi pada benda uji selama pembebanan. Selanjutnya, nilai regangan dihitung dengan membandingkan perubahan panjang tersebut terhadap panjang awal benda uji sebelum diberi beban. Secara matematis, regangan diperoleh dari selisih antara panjang akhir dan panjang awal yang kemudian dibagi dengan panjang awal. Karena regangan merupakan perbandingan dua besaran panjang dengan satuan yang sama, maka nilai regangan tidak memiliki satuan. Informasi regangan ini selanjutnya dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antara tegangan dan regangan, serta mengevaluasi karakteristik deformasi material yang diuji.

1.2.7 Penelitian Terdahulu

Rahman et al., (2025) dalam penelitiannya yang berjudul ***“Analysis of the Potential and Impact of Utilizing Nickel Slag Powder and Recycled Plastic on the Technical Properties of Concrete Blocks: In Terms of Strength and Cost Efficiency”*** meneliti pemanfaatan serbuk slag nikel sebagai substitusi parsial semen dan limbah plastik High Density Polyethylene (HDPE) sebagai pengganti parsial agregat halus pada produksi batako beton. Penelitian ini menginvestigasi penggunaan serbuk slag nikel sebagai pengganti parsial semen dan limbah plastik *High-Density Polyethylene* (HDPE) daur ulang sebagai pengganti parsial agregat halus dalam pembuatan batako. Variasi substitusi yang diterapkan berkisar dari 0% hingga 50% untuk mengevaluasi batas optimal pemanfaatan limbah tersebut. Hasil

uji laboratorium menunjukkan bahwa penggabungan slag nikel dan HDPE pada tingkat substitusi rendah (2,5% - 10%) mampu meningkatkan karakteristik mekanik dan durabilitas batako secara signifikan. Secara spesifik, kuat tekan maksimum tercatat sebesar 10,43 MPa pada variasi substitusi 5%, yang lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol yang hanya mencapai 7,13 MPa. Sementara itu, kuat tarik belah tertinggi sebesar 1,32 MPa dicapai pada tingkat substitusi 2,5%. Selain peningkatan kekuatan, penelitian ini juga mencatat perbaikan struktur mikro, di mana porositas terendah (0,97%) dan permeabilitas terendah ditemukan pada variasi 2,5%, yang mengindikasikan struktur batako yang lebih padat dan kedap air. Namun, dari penelitian ini menemukan bahwa substitusi yang berlebihan (di atas 10%) menyebabkan penurunan performa mekanik akibat sifat hidrofobik plastik yang menghambat hidrasi semen serta lemahnya ikatan antarmuka (*interfacial bonding*). Kesimpulan dari studi ini menegaskan bahwa sinergi antara slag nikel (sebagai bahan pozzolan) dan HDPE (sebagai *filler*) sangat potensial untuk batako ramah lingkungan, asalkan komposisinya dibatasi pada rentang 2,5% hingga 10% (Rahman et al., 2025).

Dalam upaya pemanfaatan limbah industri lokal, Pelupessy et al., (2024) melakukan penelitian berjudul ***"Mechanical Characteristics of Concrete with Addition of Nickel Slag Waste as Aggregates"***. Studi ini mengevaluasi karakteristik mekanik beton yang menggunakan limbah terak nikel (*ferronickel slag*) dari PT *Virtue Dragon Nickel Industry* (VDNI) sebagai substitusi parsial untuk agregat halus dan agregat kasar dengan variasi persentase 0%, 10%, 20%, dan 30%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terak nikel memiliki kandungan dominan Silika (SiO_2) sebesar 30,49% dan Besi (Fe) sebesar 23,44%, yang berkontribusi positif terhadap peningkatan densitas dan kekuatan beton. Secara spesifik, penelitian ini menemukan bahwa substitusi terak nikel meningkatkan densitas beton sebesar 6,7% hingga 21,9%, dengan densitas tertinggi mencapai 3,83 gr/cm³ pada variasi 20% agregat halus. Peningkatan ini berbanding lurus dengan kuat tekan beton yang mengalami kenaikan signifikan antara 8,43% hingga 33,79% dibandingkan beton kontrol. Kuat tekan optimum tercatat sebesar 33,23 MPa pada campuran dengan substitusi 20% terak nikel halus. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan terak nikel, khususnya sebagai agregat halus, sangat efektif dalam meningkatkan kepadatan dan kinerja mekanik beton akibat tingginya berat jenis material tersebut (Pelupessy et al., 2024).

Terkait pemanfaatan limbah polimer sebagai material penyusun bata beton, Fasani et al., (2022) melakukan studi berjudul ***"Pemanfaatan Agregat Plastik pada Pembuatan Bata Beton"***. Penelitian ini berfokus pada substitusi pasir menggunakan agregat buatan yang diolah dari limbah plastik *Low Density Polyethylene* (LDPE) bekas tutup botol dan kantong plastik dengan variasi campuran 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Berbeda dengan metode pencacahan langsung, plastik dalam studi ini diolah melalui proses pelelehan (*extruder*) sebelum dibentuk menjadi agregat kasar berdiameter <4,75 mm. Hasil eksperimen menunjukkan tren peningkatan sifat mekanik yang signifikan, di mana penambahan agregat plastik berbanding lurus dengan kenaikan kuat tekan. Kuat tekan maksimum tercatat pada

variasi substitusi 25% sebesar 50,03 kg/cm², yang mengalami peningkatan hingga dua kali lipat dibandingkan beton kontrol (25,06 kg/cm²). Selain peningkatan kekuatan, integrasi agregat LDPE juga berhasil menurunkan berat jenis bata beton menjadi 1667 kg/m³ (lebih ringan) serta mereduksi daya serap air menjadi 10,9%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan agregat plastik olahan tidak hanya menjadikan batako lebih ringan dan kedap air, tetapi juga mampu memenuhi standar mutu kekuatan tekan sesuai SNI 03-0349-1989 (Fasani et al., 2022).

Jalali & Salim, (2019) dalam penelitiannya yang berjudul ***“Karakteristik Beton dengan Agregat Halus Slag Nikel Sebagai Pengganti Sebagian Pasir pada Zona II dan III”*** membandingkan kinerja mekanik beton yang menggunakan substitusi 60% agregat halus slag nikel berdasarkan dua zona gradasi pasir yang berbeda, yaitu Zona II (agak kasar) dan Zona III (agak halus). Hasil pengujian menunjukkan bahwa karakteristik beton sangat dipengaruhi oleh susunan butiran agregat penyusunnya. Beton yang menggunakan campuran pasir dan slag nikel pada Zona II menghasilkan berat volume, modulus elastisitas, dan kuat tekan yang lebih tinggi (rata-rata 24,56 MPa) dibandingkan Zona III (24,26 MPa). Hal ini disebabkan oleh modulus kehalusan butir pada Zona II yang lebih tinggi, yang memungkinkan pengisian rongga antar partikel menjadi lebih padat. Namun, penelitian ini juga mencatat anomali menarik di mana beton Zona III justru memiliki nilai kuat tarik belah dan kuat lentur yang lebih unggul. Studi ini menyimpulkan bahwa slag nikel pada gradasi Zona II lebih direkomendasikan untuk aplikasi yang mengutamakan kekuatan tekan karena menghasilkan densitas yang lebih maksimal (Jalali & Salim, 2019).

Ria Safitri et al. (2020), melalui penelitiannya yang berjudul ***“Behavior of Utilization of HDPE (High Density Polyethylene) Plastic Waste as Added Material in Coarse Aggregate Against Concrete Compressive Strength.”***, menginvestigasi pemanfaatan limbah botol plastik HDPE sebagai material substitusi agregat kasar. Dalam studi ini, limbah plastik dipotong secara manual dan disubstitusikan ke dalam campuran beton mutu K-175 dengan variasi persentase sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan adanya tren penurunan kekuatan seiring dengan bertambahnya persentase limbah plastik. Kuat tekan beton normal tercatat sebesar 244,64 kg/cm² sedangkan pada substitusi 5%, 10%, dan 15% berturut-turut turun menjadi 236,88 kg/cm², 155,44 kg/cm², dan 134,48 kg/cm². Meskipun terjadi penurunan, variasi substitusi 5% masih memenuhi target mutu beton struktural K-175 (>175 kg/cm²), sedangkan variasi 10% dan 15% direkomendasikan hanya untuk beton non-struktural (seperti rabat beton). Penelitian ini juga mengonfirmasi bahwa penambahan HDPE secara efektif menurunkan berat volume beton, menjadikannya lebih ringan dibandingkan beton konvensional.

Berdasarkan tinjauan terhadap kelima penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan limbah slag nikel sebagai substitusi agregat halus terbukti konsisten mampu meningkatkan densitas dan kekuatan tekan beton secara signifikan dikarenakan karakteristik fisiknya yang padat dan keras. Di sisi lain, pemanfaatan limbah plastik HDPE menawarkan keunggulan dalam mereduksi berat

jenis dan meminimalisir penyerapan air pada material beton. Namun demikian, penggunaan HDPE memiliki tantangan utama berupa risiko penurunan kuat tekan yang drastis jika persentasenya melebihi 5%–10%, akibat sifat permukaannya yang licin dan hidrofobik sehingga melemahkan ikatan dengan pasta semen.

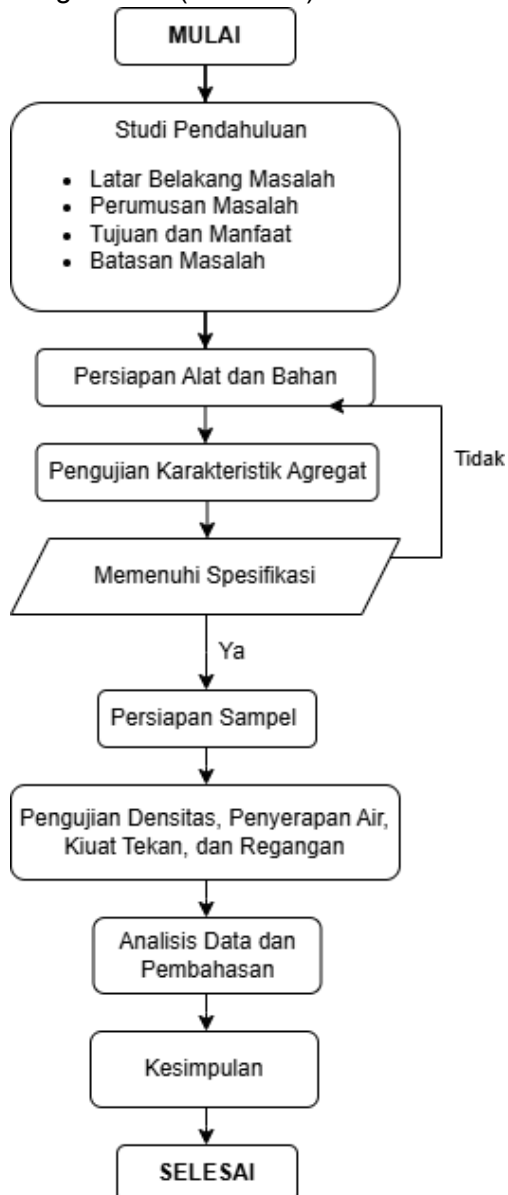
Meskipun karakteristik masing-masing material telah banyak dikaji secara terpisah, studi yang mensinergikan penggunaan Slag Nikel dan HDPE secara bersamaan dalam pembuatan batako masih terbatas. Mayoritas penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada penggunaan tunggal salah satu limbah atau aplikasinya pada beton struktural dan *paving block*. Belum banyak penelitian yang mengeksplorasi bagaimana penambahan Slag Nikel dapat berperan sebagai kompensator untuk menutupi penurunan kekuatan yang disebabkan oleh HDPE pada produk pasangan dinding.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi karakteristik mekanik batako melalui substitusi agregat halus menggunakan kombinasi Slag Nikel dan HDPE. Penelitian ini bertujuan untuk mencari titik keseimbangan komposisi yang ideal, di mana tingginya kuat tekan dari Slag Nikel diharapkan mampu menopang kelemahan mekanis HDPE, sehingga dapat dihasilkan batako ramah lingkungan yang tidak hanya ringan dan kedap air, tetapi juga memiliki performa struktural yang memenuhi standar kelayakan bangunan.

BAB II METODE PENELITIAN

2. 1 Bagan Air Penelitian

Tahapan pelaksanaan dalam penelitian ini disusun secara sistematis yang dapat dilihat pada diagram alir (*flowchart*) di bawah ini:



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

2. 2 Lokasi Material

Material *Slag Nikel* yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh langsung dari area penampungan limbah (*dumping area*) milik PT Huadi Nickel-Alloy Indonesia, yang berlokasi di Kawasan Industri Bantaeng (KIBA), Kabupaten Bantaeng, Sulawesi Selatan. Limbah ini merupakan produk sampingan (*by-product*) dari proses peleburan bijih nikel (*smelting*) dalam tungku pembakaran listrik (*electric furnace*).



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Lokasi Material; (b) Material Slag Nikel

Jenis slag yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan sebagai *Water-Cooled Slag* (slag dingin air) atau sering disebut sebagai *Granulated Slag*. Slag ini terbentuk melalui proses pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan semburan air bertekanan tinggi segera setelah lelehan slag dikeluarkan dari tungku peleburan. Akibat kejutan suhu yang drastis tersebut, material ini tidak sempat membentuk kristal sempurna, sehingga secara fisik memiliki struktur amorf (seperti kaca) dengan tekstur granular yang menyerupai pasir kasar. Sebelum diaplikasikan sebagai substitusi agregat halus, material ini dikeringkan dan diproses melalui tahap penyaringan (*sieving*) atau pemecahan ringan (*crushing*) apabila terdapat gumpalan, hingga mencapai gradasi yang direncanakan.

2. 3 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini mengambil lokasi di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Durasi penelitian dialokasikan selama kurang lebih lima bulan, yakni dari Agustus 2025 sampai dengan Januari 2026, yang meliputi serangkaian proses mulai dari persiapan material hingga pengolahan data akhir

2. 4 Jenis Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental yang dipusatkan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Guna menunjang kedalaman analisis, teknik pengumpulan data diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu:

1. Data Primer: Merupakan data empiris yang diperoleh secara langsung melalui serangkaian pemeriksaan dan pengujian benda uji di laboratorium, yang selanjutnya diolah sebagai basis utama hasil penelitian.
2. Data Sekunder: Merupakan data pendukung yang bersumber dari studi literatur, meliputi buku teks, jurnal ilmiah, artikel, serta standar teknis (SNI) yang relevan, yang berfungsi sebagai landasan teoritis untuk memperkuat validitas penelitian.

2. 5 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini, digunakan berbagai peralatan pendukung untuk menunjang proses pengujian. Adapun alat-alat yang digunakan antara lain sebagai berikut:

Tabel 6. Peralatan Pengujian

No	Nama Alat	Gambar Alat
1	Oven	
2	Talam	
3	Timbangan Digital	

4 Stopwatch



5 Gelas Ukur



6 Labu Erlenmeyer



7 Ember



8 *Los Angeles Machine*



9 Bola Baja



10 Saringan No 4 - PAN



Tabel 7. Bahan-Bahan Pengujian

No	Nama Alat	Gambar Alat
1	Air	
2	Semen	

3 Agregat Halus (Slag Nikel)



4 Agregat Halus (HDPE)



2. 6 Pemeriksaan Karakteristik Agregat

Pada penelitian ini, pengujian karakteristik fisik agregat dilakukan dengan mengacu pada standar-standar pengujian yang berlaku (SNI dan ASTM). Rincian mengenai jenis pengujian beserta standar acuan yang digunakan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 8. Standar Pemeriksaan Karakteristik Slag Nikel

No	Karakteristik Agregat	Standar
1	Kadar Air	SNI 1971:2011
2	Modulus Kehalusan	ASTM C136:2012
3	Berat Volume	SNI 03-4804:1998
4	Berat Jenis	SNI 1970:2016
5	Penyerapan Air	SNI 1970:2016

Berbeda dengan pengujian pada slag nikel yang melibatkan banyak parameter, pengujian karakteristik untuk material *High Density Polyethylene* (HDPE) dalam penelitian ini difokuskan pada pengujian berat jenis (*specific gravity*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui densitas partikel plastik terhadap air, yang merupakan parameter vital dalam mengonversi proporsi campuran dari satuan berat ke satuan volume (*mix design*). Mengingat partikel bijih HDPE memiliki ukuran yang relatif kecil dan ringan, metode pengujian yang diterapkan adalah metode

piknometer. Metode ini diterapkan karena mampu memberikan tingkat akurasi yang tinggi dalam mengukur densitas partikel berukuran kecil seperti HDPE itu sendiri. Adapun tahapan dari pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel HDPE yang sudah bersih dan dalam kondisi kering.
2. Menimbang piknometer kosong dan catat beratnya sebagai (W1).
3. Mengisi piknometer dengan air suling hingga mencapai batas kalibrasi dengan memastikan bahwa tidak ada gelembung udara yang tersisa lalu menimbang berat piknometer beserta isinya dan catat sebagai (W2).
4. Keluarkan sebagian air dari piknometer lalu mengisinya dengan sampel HDPE dan mengatur kembali hingga mencapai batas kalibrasi dari piknometer tersebut lalu mencatatnya sebagai (W3).

Adapun persamaan yang digunakan untuk menentukan berat jenis dengan menggunakan metode piknometer adalah sebagai berikut:

$$\text{Berat Jenis} = \frac{W1}{(W1+W2)-W3} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2}$$

Dengan,

- W1 = Berat piknometer kosong (gram)
W2 = Berat piknometer dengan air (gram)
W3 = Berat piknometer dengan air dan sampel (gram)

2. 7 **High Density Polyethylene (HDPE) dengan Cement Treatment**

Pemanfaatan limbah polimer seperti *High Density Polyethylene* (HDPE) sebagai substitusi agregat dalam campuran beton atau batako seringkali menghadapi tantangan teknis terkait karakteristik antarmuka material. Secara alami, partikel plastik HDPE memiliki permukaan yang licin dan bersifat hidrofobik (menolak air). Kondisi ini menyebabkan rendahnya daya lekat (*bonding*) antara permukaan agregat plastik dengan pasta semen di sekelilingnya, yang mengakibatkan terbentuknya zona transisi antarmuka (*Interfacial Transition Zone / ITZ*) yang lemah. Lemahnya ikatan antarmuka ini menyebabkan agregat plastik mudah terlepas dari matriks pengikatnya saat menerima beban, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan kuat tekan beton secara drastis.

Kurangnya friksi atau gesekan akibat permukaan yang licin juga mengurangi efek penguncian mekanis (*mechanical interlocking*) yang seharusnya terjadi antara agregat dengan pasta semen. Oleh karena itu, diperlukan metode modifikasi permukaan (*surface treatment*) untuk memperbaiki tekstur HDPE agar lebih kasar dan hidrofilik, sehingga mampu menyatu lebih baik dengan matriks beton. Salah satu metode modifikasi permukaan yang terbukti efektif dan ekonomis untuk mengatasi kelemahan agregat hidrofobik adalah metode *Cement Treatment* (Pelapisan Semen).

Berdasarkan penelitian Assagga et al. (2022), perlakuan ini bertujuan untuk melapisi partikel agregat dengan pasta semen (*cement slurry*) sebelum dicampurkan ke dalam adukan beton utama. Proses ini bertujuan untuk menciptakan lapisan perantara yang kasar dan keras pada permukaan plastik. Lapisan semen yang mengering pada permukaan HDPE akan bertindak sebagai jembatan

penghubung (*bonding agent*) dimana sisi dalamnya melekat pada plastik, sementara sisi luarnya yang kasar akan membentuk ikatan mekanis (*interlocking*) yang kuat dengan pasta semen baru pada saat pencampuran beton. Dengan demikian, kelemahan akibat sifat licin HDPE dapat diminimalisir. Metode *surface treatment* dalam penelitian ini mengadaptasi prosedur Assaggaf et al. (2022) dengan tetap mempertahankan rasio faktor air semen (w/c) sebesar 0,4, namun memodifikasi durasi pencampuran dan suhu pengeringan guna menyesuaikan karakteristik limbah HDPE. Adapun untuk prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan pasta semen dengan komposisi yang mengacu pada rasio Assaggaf, yaitu menggunakan faktor air semen (w/c) sebesar 0,4. Semen dan air dicampur hingga membentuk pasta dengan konsistensi cair yang seragam.
2. Biji plastik HDPE dimasukkan ke dalam adukan pasta semen. Campuran kemudian diaduk secara manual maupun mekanis selama kurang lebih 3 menit hingga dipastikan seluruh permukaan butiran HDPE terbungkus rata oleh lapisan pasta semen.
3. Agregat HDPE yang telah terlapisi semen dihamparkan di atas talam (*tray*) logam. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan pengaturan suhu 110°C selama kurang lebih 4 hingga 5 jam. Proses ini bertujuan untuk mempercepat hidrasi semen dan memastikan lapisan mengeras hingga padat.
4. Setelah dikeluarkan dari oven, sampel dibiarkan hingga mencapai suhu ruang. Agregat yang saling menempel akibat semen yang mengeras kemudian dipisahkan kembali (*crushing*) secara manual agar kembali menjadi butiran terpisah. Tahap akhir adalah penyaringan menggunakan saringan No. 8 (2,36 mm).
5. Butiran biji HDPE dengan *Cement Treatment* kemudian siap dipakai sebagai material campuran.



(a)



(b)



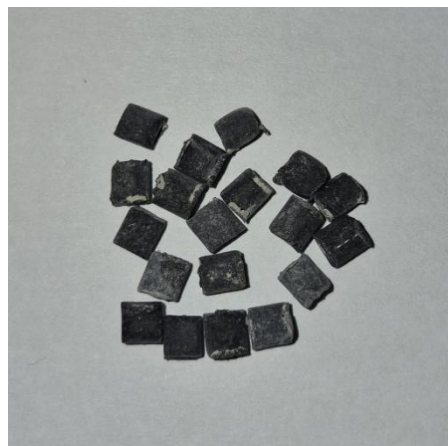
(c)

Gambar 3. Proses Persiapan HDPE *Cement Treatment* ; (a) Pencampuran / *Mixing process*; (b) Pemisahan dan Penyaringan / *Crushing & Sieving*; (c) Hasil Akhir HDPE *Cement Treatment*

Perbandingan morfologi permukaan bijih HDPE sebelum dan sesudah dilakukan *cement treatment* dapat dilihat pada Gambar di bawah ini. Sebelum perlakuan, bijih HDPE memiliki permukaan yang halus dan bersifat non-polar yang memicu lemahnya *interfacial bonding*. Namun, setelah *treatment*, terbentuk lapisan kasar yang meningkatkan *mechanical interlocking* dan memperkuat adhesi pada matriks semen.



(a)



(b)

Gambar 4. (a) HDPE Sebelum *Treatment*; (b) HDPE Setelah *Treatment*

2. 8 Komposisi Campuran Batako Ramah Lingkungan

Guna mempermudah proses identifikasi dan inventarisasi data selama pengujian, setiap benda uji diberikan kodefikasi (penamaan) khusus yang merepresentasikan komposisi campuran masing-masing. Sistem notasi ini bertujuan untuk membedakan variasi persentase substitusi Slag Nikel dan HDPE pada setiap

sampel. Rincian mengenai kode benda uji beserta keterangan komposisinya disajikan secara lengkap pada Tabel 9 berikut:

Tabel 9. Komposisi Batako Slag dan HDPE (Kg/m^3)

Variasi	W/C	Cement (Kg/m^3)	Water (Kg/m^3)	Agregat Halus(Kg/m^3)		Agregat Halus(%)	
				Slag (Kg/m^3)	HDPE (Kg/m^3)	Slag (%)	HDPE (%)
M - 0	0,52	455,8	242,2	2549,9	0	100	0
M - 0,2	0,52	455,8	242,2	2544,8	5,1	99,8	0,2
M - 0,4	0,52	455,8	242,2	2539,7	10,2	99,6	0,4
M - 0,6	0,52	455,8	242,2	2534,6	15,3	99,4	0,6
M - 0,8	0,52	455,8	242,2	2529,5	20,4	99,2	0,8
M - 1	0,52	455,8	242,2	2524,4	25,5	99	1

Keterangan;

HDPE = *High Density Polyethylene*

W/C = Faktor air semen

Berdasarkan tabel rancangan campuran (*mix design*), penelitian ini menetapkan parameter kontrol yang konstan untuk seluruh benda uji, yaitu Faktor Air Semen (W/C) sebesar 0,52. Proporsi campuran dalam tabel ini mengacu pada berat material per satuan volume, di mana kebutuhan semen ditetapkan sebesar $455,8 \text{ Kg/m}^3$ dan kebutuhan air sebesar $242,2 \text{ Kg/m}^3$. Modifikasi dilakukan pada fraksi agregat halus, di mana Slag Nikel disubstitusi oleh limbah HDPE dengan kenaikan interval sebesar 0,2% untuk setiap variasi. Dimulai dari Variasi M - 0,2 yang menggunakan komposisi 99,8% Slag Nikel dan 0,2% HDPE, persentase HDPE terus ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai titik maksimum pada Variasi M - 1 dengan komposisi 99% Slag Nikel dan 1% HDPE. Pola substitusi ini dirancang untuk mengevaluasi sensitivitas karakteristik mekanik batako terhadap penambahan limbah plastik dalam kuantitas kecil namun presisi. Sebagai pembandingan, penelitian ini juga menggunakan Variasi M - 0 sebagai sampel kontrol, yaitu campuran tanpa penambahan HDPE (100% Slag Nikel pada fraksi agregat halus). Keberadaan sampel kontrol ini bertujuan untuk menjadi acuan dasar dalam mengevaluasi pengaruh penambahan HDPE terhadap perubahan sifat fisik dan mekanik batako, sehingga perbedaan kinerja yang terjadi dapat dianalisis secara lebih objektif.

2. 9 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku mekanis batako ramah lingkungan, dengan menggunakan spesimen berupa balok berukuran panjang 40 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 10 cm. Pembuatan benda

uji meliputi batako dengan substitusi total agregat halus menggunakan kombinasi limbah Slag Nikel dan plastik HDPE. Variasi substitusi dirancang bertingkat mulai dari komposisi 99,8% Slag Nikel dengan 0,2% HDPE, hingga komposisi 99% Slag Nikel dengan 1% HDPE. Seluruh variasi campuran tersebut dibuat dengan kontrol kualitas yang seragam menggunakan faktor air semen (FAS) sebesar 0,52.



Gambar 5. Pembuatan Benda Uji

Untuk memperoleh spesimen yang homogen dan memiliki kepadatan yang baik, proses pencetakan dilakukan dengan metode pemadatan bertahap. Adukan dimasukkan ke dalam cetakan sebanyak tiga lapisan dengan ketebalan yang relatif sama. Pada setiap lapisan, pemadatan dilakukan menggunakan mesin vibrator selama 5 detik. Penerapan durasi dan teknik vibrasi ini dilakukan secara konsisten pada seluruh benda uji dengan tujuan untuk mengeluarkan udara yang terperangkap (*entrapped air*) di dalam campuran. Dengan berkurangnya udara terjebak, porositas batako dapat ditekan sehingga densitas yang dihasilkan menjadi lebih optimal.

2. 10 Perawatan Benda Uji

Perawatan (*curing*) dilakukan segera setelah benda uji dilepaskan dari cetakan (*demoulding*) untuk menjaga kondisi lingkungan yang ideal bagi proses pengerasan batako. Prinsip utama dari perawatan ini adalah mencegah hilangnya air dari dalam pori-pori kapiler batako akibat penguapan, yang sangat dibutuhkan untuk reaksi hidrasi semen. Dalam penelitian ini, guna menjamin proses hidrasi berjalan secara optimal selama periode umur rencana, diterapkan metode perawatan (*curing*) dengan sistem lembap (*moisture curing*). Teknis pelaksanaannya dilakukan dengan menutup rapat permukaan benda uji menggunakan karung goni basah yang disiram secara berkala. Teknik ini dipilih untuk menjaga stabilitas kelembapan permukaan serta mencegah evaporasi air yang terlalu cepat. Dengan demikian, risiko retak susut

(*shrinkage*) dari batako dapat diminimalisir dan densitas akhir material yang dihasilkan menjadi lebih maksimal.

2. 11 Pengujian Densitas

Densitas merupakan parameter fisik yang menyatakan perbandingan antara massa dan volume suatu material. Secara umum, densitas digunakan untuk menggambarkan tingkat kepadatan suatu benda, yang secara langsung berkaitan dengan struktur internal dan porositas material tersebut. Pada material bangunan, densitas sering dijadikan indikator awal kualitas karena material dengan densitas yang lebih tinggi umumnya memiliki struktur yang lebih padat dan porositas yang lebih rendah. Dalam konteks batako, densitas memiliki peranan penting karena berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik, khususnya kuat tekan dan penyerapan air. Batako dengan densitas rendah cenderung memiliki rongga internal yang lebih besar, sehingga menurunkan kemampuan batako dalam menahan beban tekan dan meningkatkan kapasitas penyerapan air. Sebaliknya, batako dengan densitas yang lebih tinggi menunjukkan susunan partikel yang lebih rapat, sehingga mampu meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur. Hal ini sejalan dengan pernyataan (Dafedar et al., 2024) yang menyebutkan bahwa densitas memiliki hubungan yang erat dengan kuat tekan suatu material, di mana peningkatan nilai densitas umumnya diikuti oleh peningkatan kuat tekan, sedangkan penurunan densitas cenderung menyebabkan berkurangnya kemampuan material dalam menahan beban.

Mengacu pada SNI 1973:2008, berat isi didefinisikan sebagai rasio antara massa material (kg) terhadap volumenya (m^3). Standar ini juga menegaskan bahwa nilai densitas yang diperoleh mencerminkan kondisi kepadatan campuran, yang dipengaruhi oleh faktor kadar air, karakteristik agregat, serta keberadaan rongga udara yang terperangkap di dalam campuran beton. Secara operasional, prosedur pengujian densitas dalam penelitian ini meliputi langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan benda uji setelah *curing* (berumur 28 hari) dalam kondisi kering udara untuk memastikan akurasi data massa dan menghilangkan pengaruh kelembapan berlebih.
2. Melakukan pengukuran dimensi benda uji (panjang, lebar, dan tinggi) secara presisi guna menghitung volume total (V) dari sampel tersebut.
3. Melakukan penimbangan benda uji menggunakan timbangan digital dengan tingkat ketelitian tinggi untuk mendapatkan nilai berat massa (m) dalam satuan kg yang akurat.
4. Mengolah data dan menyusun laporan hasil pengujian.



Gambar 6. Pengujian Densitas

Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung besarnya densitas batako dapat dilihat pada persamaan 2 berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots \text{Persamaan 3}$$

Dengan;

ρ = Densitas (kg/m³)

m = Massa benda uji (g),

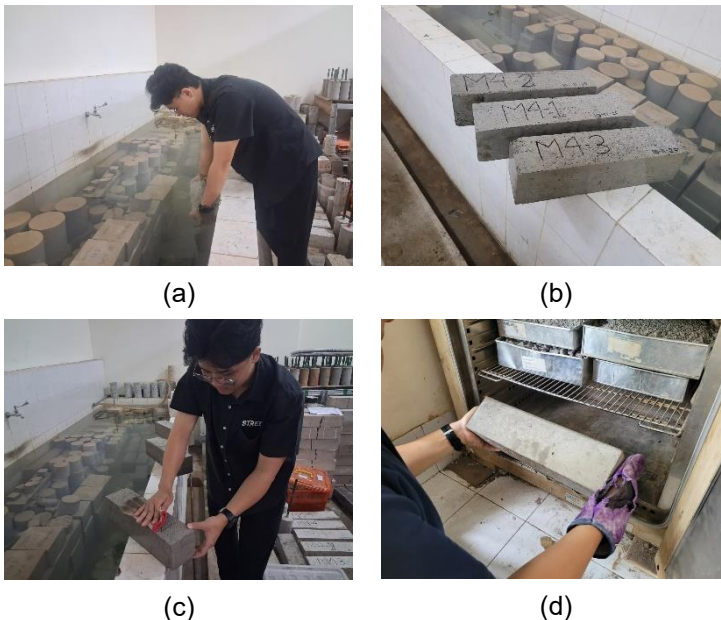
V = Volume benda uji (cm³)

2. 12 Pengujian Penyerapan Air

Pengujian penyerapan air (*water absorption test*) merupakan metode evaluasi untuk mengukur kapasitas material konstruksi dalam menyerap air melalui rongga kapilernya. Parameter ini berfungsi sebagai indikator vital dalam menilai kualitas fisik dan durabilitas material; dimana tingginya persentase penyerapan air berbanding lurus dengan tingkat porositas, yang berimplikasi pada penurunan kekuatan mekanis struktur. Secara teknis, nilai penyerapan air diperoleh dengan membandingkan selisih massa benda uji dalam kondisi jenuh air terhadap massa kering oven, yang kemudian dinyatakan dalam satuan persen. Material dengan nilai absorpsi rendah merepresentasikan struktur yang padat dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap degradasi lingkungan.

Pengujian penyerapan air batako mengacu pada SNI 03-0349-1989. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan suatu material dalam menyerap air ke dalam pori-porinya dalam kondisi tertentu. Prosedur pengujian sebagai berikut:

1. Merendam benda uji yang sudah berumur minimal 28 hari seutuhnya dalam air bersih dengan suhu ruang selama 24 jam.
2. Setelah itu, benda uji diangkat dari rendaman, lalu ditiriskan selama kurang lebih 1 menit dan diseka menggunakan kain untuk mengatasi air berlebih yang berada pada benda uji.
3. Benda uji kemudian ditimbang (A).
4. Kemudian benda uji dikeringkan di dalam oven dengan suhu 105±5°C selama 24 jam.
5. Menimbang benda uji yang sudah dikeluarkan dari oven dan dibiarkan hingga mencapai suhu ruang (B)
6. Mengolah data dan menyusun laporan hasil pengujian



Gambar 7. Proses Pengujian Penyerapan Air; (a) perendaman benda uji; (b) penirisan benda uji; (c) penyekean benda uji; (d) pengeringan benda uji didalam oven

Berdasarkan SNI 03-0349-1989, rumus yang digunakan untuk menghitung penyerapan air dapat dilihat pada persamaan 3 berikut:

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{A-B}{B} \times 100\% \dots\dots\dots \text{Persamaan 4}$$

Dengan;

A = Berat benda uji dalam keadaan basah (Kg).

B = Berat benda uji dalam keadaan kering (Kg).

2. 13 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan merupakan parameter mekanik paling fundamental dalam mengevaluasi mutu beton maupun batako. Nilai ini didefinisikan sebagai besarnya beban aksial maksimum per satuan luas penampang yang mampu ditahan oleh benda uji sebelum mengalami keruntuhan (*failure*). Hasil pengujian kuat tekan sangat bergantung pada tingkat kematangan reaksi kimia antara semen dan air (hidrasi). Oleh karena itu, dalam penelitian ini, pengujian dilaksanakan pada umur rencana 28 hari, di mana material dianggap telah mencapai kekuatan karakteristik maksimum dan bersifat stabil.

Pelaksanaan pengujian kuat tekan dalam penelitian ini merujuk sepenuhnya pada standar SNI 1974:2011 tentang Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. Adapun langkah-langkah prosedural yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji yang telah dibuat.

2. Merawat (*curing*) benda uji dengan menggunakan metode *moisture curing* yaitu dengan menutup benda uji dengan karung goni yang disiram secara berkala selama 28 hari.
3. Mendinginkan benda uji selama ± 1 jam hingga mencapai suhu ruang sebelum dilakukan uji tekan.
4. Meletakkan benda uji diatas plat datar pada mesin UTM (*Universal Testing Machine*).
5. Meletakkan plat besi berukuran 20 cm x 10 cm dengan jarak 5 cm dari ujung sisi permukaan benda uji.
6. Meletakkan *Load Cell* (Beban Sel) secara sentris diatas plat besi.
7. Menjalankan pengujian hingga benda uji hancur.
8. Mengolah data dan Menyusun laporan hasil pengujian.



Gambar 8. Pengujian Kuat Tekan

Adapun formulasi perhitungan kuat tekan menggunakan persamaan berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots \text{Persamaan 5}$$

Dengan,

- | | |
|--------|--|
| f'_c | = Kuat Tekan (MPa) |
| P | = Beban Tekan (N) |
| A | = Luas Penampang Benda Uji (mm^2) |

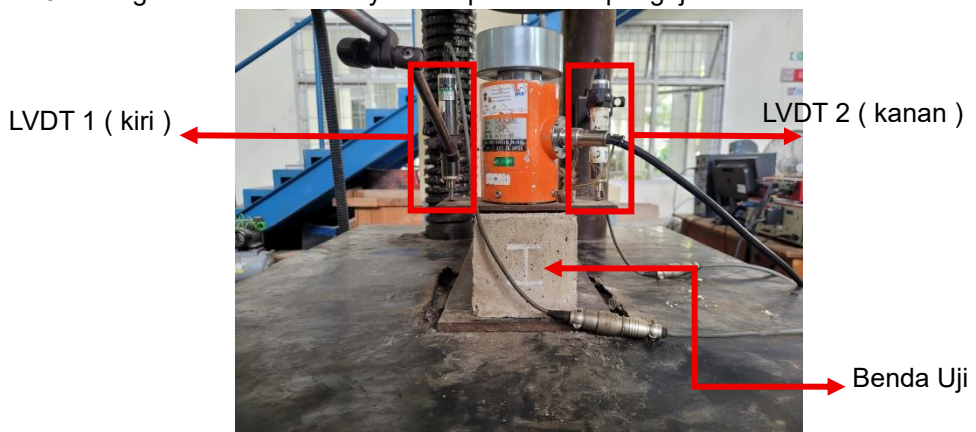
2. 14 Pengujian Regangan

Pengujian regangan pada benda uji ini dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas deformasi serta mengamati karakteristik kegetasan material batako saat menerima beban tekan. Pengukuran perpindahan linier secara kontinu dilakukan menggunakan alat *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) yang memiliki tingkat ketelitian tinggi. LVDT mampu mendeteksi perubahan panjang yang sangat kecil secara kontinu selama proses pembebanan. Dalam pelaksanaannya, LVDT dipasang sejajar dengan arah gaya yang bekerja pada benda uji dan ditempatkan

pada permukaan benda uji menggunakan rangka atau dudukan yang kaku dan stabil. Penempatan yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan bahwa data deformasi yang diperoleh merepresentasikan kondisi sebenarnya dari benda uji tanpa adanya gangguan akibat pergeseran alat.

Berikut merupakan prosedur dari pengujian regangan dengan menggunakan LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*):

1. Menyiapkan benda uji yang minimal sudah berumur 28 hari.
2. Memasang LVDT di titik pengukuran regangan pada benda uji sebanyak 2 buah (kanan – kiri).
3. Mulai menjalankan pengujian dengan kecepatan yang konstan.
4. Memantau hasil pembacaan beban dan juga perpindahan dari *Load Cell* dan juga LVDT pada monitor komputer.
5. Mengolah data dan menyusun laporan hasil pengujian.



Gambar 9. Pengujian Regangan

Berdasarkan ASTM E83-23, rumus yang digunakan untuk menghitung besarnya regangan dapat dilihat pada persamaan 5 berikut:

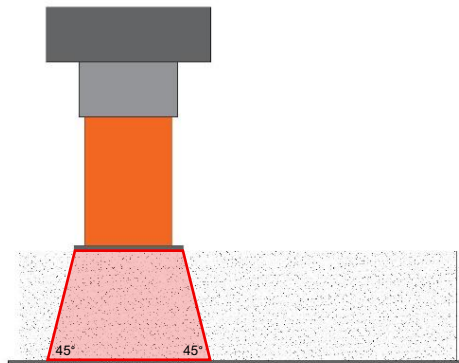
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots \text{Persamaan 6}$$

Dengan,

- | | |
|------------|---------------------------|
| ϵ | = Regangan. |
| ΔL | = Perpindahan Linier (mm) |
| L_0 | = Panjang Awal (mm) |

2. 15 Distribusi Beban

Mekanisme penyaluran beban dari mesin uji ke benda uji diasumsikan mengikuti pola penyebaran tegangan sebesar 45°. Metode ini digunakan untuk mengakomodasi kondisi pembebanan parsial, di mana area yang tertekan akan semakin melebar seiring dengan kedalaman benda uji. Dengan asumsi tersebut, penentuan parameter luas penampang efektif didasarkan pada pendekatan luas rata-rata, yaitu perpaduan antara luas area kontak pelat penekan dengan luas area penyebaran beban di bagian dasar.



Gambar 10. Skema Distribusi Beban



Gambar 11. Visualisasi Pola Retak Benda Uji Akibat Beban Tekan