

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur yang semakin masif menuntut penggunaan material konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu bahan yang paling banyak digunakan dalam industri konstruksi adalah semen *Portland*. Namun, produksi semen *Portland* menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) yang tinggi, sehingga berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, pengembangan alternatif pengikat seperti geopolimer menjadi sangat penting.

Geopolimer merupakan material pengikat berbasis aluminosilikat yang diaktivasi oleh larutan alkali dan memiliki potensi sebagai pengganti semen konvensional karena emisi karbonnya yang lebih rendah dan ketahanan yang baik terhadap lingkungan agresif (Joseph Davidovits 1978). Salah satu limbah pertanian yang berpotensi digunakan sebagai bahan baku geopolimer adalah abu sawit (*Palm Oil Fuel Ash/POFA*), yang merupakan hasil samping dari pembakaran biomassa pada pabrik kelapa sawit. Abu sawit merupakan Geopolimer anorganik yang mengandung silikon (Si) yang terdapat dalam bentuk silika (SiO_2) dan merupakan komponen utama pembentuk rangka geopolimer, Aluminium (Al) yang hadir dalam bentuk Alumina (Al_2O_3) dan berperan sebagai penghubung struktur geopolimer dan besi (Fe) yang hadir sebagai (Fe_2O_3) yang bersifat komponen sekunder dalam jumlah signifikan, sehingga berfungsi sebagai material pozzolanik dalam reaksi geopolimerisasi.

Namun, meskipun geopolimer memiliki banyak keunggulan, pasta geopolimer murni cenderung memiliki waktu ikat yang lebih lambat dibandingkan pasta semen *Portland*. Waktu ikat yang terlalu lama dapat menjadi kendala dalam aplikasi lapangan, terutama dalam proyek konstruksi berskala cepat. Untuk mengatasi masalah ini, dilakukan upaya dengan menambahkan semen *Portland Composit* (PCC) sebagai bahan substitusi sebagian terhadap abu sawit dalam pasta geopolimer. PCC mengandung

senyawa kalsium yang dapat mempercepat reaksi hidrasi dan mempercepat waktu ikat.

Substitusi PCC diharapkan dapat mengoptimalkan sifat reologi pasta geopolimer, khususnya dalam mempercepat waktu ikat awal dan akhir, tanpa mengorbankan kekuatan mekanik dan ketahanan jangka panjang. Namun, penggunaan PCC dalam sistem geopolimer juga dapat mempengaruhi reaksi kimia dan struktur *mikro* yang terbentuk, sehingga perlu dikaji secara mendalam.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi PCC terhadap waktu ikat pasta geopolimer berbasis abu sawit, dengan harapan dapat menghasilkan material pengikat alternatif yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memenuhi kebutuhan teknis di lapangan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana waktu ikat (*initial setting time* dan *final setting time*) pada pasta geopolimer berbasis abu sawit tanpa substitusi PCC?
2. Bagaimana pengaruh variasi persentase substitusi PCC terhadap waktu ikat pasta geopolimer berbasis abu sawit?
3. Berapa persentase substitusi PCC yang optimal untuk mempercepat waktu ikat geopolimer?

1.3 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui waktu ikat awal dan akhir dari pasta geopolimer berbasis abu sawit tanpa substitusi PCC.
2. Untuk menganalisis pengaruh variasi substitusi PCC terhadap waktu ikat pasta geopolimer abu sawit.
3. Untuk menentukan persentase optimal substitusi PCC yang dapat mempercepat waktu ikat.

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat mengetahui waktu ikat awal dan akhir dari pasta geopolimer berbasis abu sawit Tanpa substitusi PCC.
2. Dapat menganalisis pengaruh variasi substitusi PCC terhadap waktu ikat pasta geopolimer abu sawit.
3. Dapat menentukan persentase optimal substitusi PCC yang dapat mempercepat waktu ikat.

1.4 Batasan Masalah

1. Bahan utama yang digunakan terbatas pada:
 - a. Abu sawit (*Palm Oil Fuel Ash / POFA*) sebagai bahan utama *geopolymer* yang didapatkan dari PT. Rambah Sawit Mandiri (PT.RSM).
 - b. PCC (*Portland Composite Cement*) sebagai bahan substitusi sebagian dari POFA dengan merk Semen yaitu Semen Merdeka (PT. Semen Indonesia Group)
 - c. Larutan alkali terdiri dari NaOH dan Na_2SiO_3 dengan konsentrasi 14 Molar.
2. Variasi substitusi PCC yang diteliti dibatasi pada beberapa persentase yaitu 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% dari total binder.
3. Parameter yang dikaji hanya mencakup waktu ikat awal dan waktu ikat akhir dari pasta *geopolymer*, sesuai dengan standar uji seperti ASTM C191 atau SNI yang relevan.
4. Rasio larutan alkali terhadap binder dan rasio NaOH terhadap Na_2SiO_3 dibuat konstan untuk seluruh variasi campuran.
5. Jenis dan ukuran abu sawit yang digunakan berasal dari sumber dan proses pembakaran yang sama, dan telah melewati proses pengayakan dengan ukuran (lolos ayakan 100 mikron).
6. Kondisi curing (perawatan) dilakukan pada suhu kamar ($\pm 25-30^\circ\text{C}$) tanpa perlakuan panas tambahan, untuk menekankan pengaruh komposisi terhadap waktu ikat.

7. Penelitian dilakukan pada skala laboratorium, sehingga hasil yang diperoleh bersifat awal dan perlu validasi lanjutan untuk aplikasi skala besar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian ini menggunakan tinjauan Pustaka dari penelitian sebelumnya, Beberapa contoh penelitian terlebih dahulu yang juga melakukan penelitian tentang “Pengaruh Substitusi PCC Pada Pasta Geopolimer Abu Sawit Terhadap Waktu Ikat (*Setting time*)” tersebut antara lain sebagai berikut:

- a. (Azra Nazirah Nafiah dkk, 2025) Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu dan kelembapan terhadap nilai setting time awal dan akhir pada semen OPC dan PCC pada lima kondisi lingkungan yang berbeda. Suhu dan kelembapan adalah suatu faktor penting dalam proses pengeringan dan pengerasan semen. Suhu dalam proses pengerasan pada penelitian ini berkisar antara 10°C hingga 35°C dengan kelembapan relatif 40% hingga 60%. Hasil penelitian ini menunjukkan jika semakin tinggi tingkat kelembapannya, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan semen untuk mengeras, baik untuk PCC maupun OPC. Dan sebaliknya, semakin rendah kelembapannya, maka semakin cepat pula waktu pengerasan semen tersebut. Pada peningkatan waktu setting time awal, semen PCC menunjukkan kenaikan sebesar 38,5%, sedangkan semen OPC sebesar 37,5%. Untuk waktu *setting time* akhir, semen OPC mengalami peningkatan yang lebih signifikan sebesar 41,65%, dibandingkan PCC yang hanya 25%. Hal ini menunjukkan bahwa semen OPC memiliki waktu ikat akhir yang lebih cepat dan relatif kurang dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan dibandingkan PCC. Penelitian ini menyimpulkan bahwa suhu dan kelembapan secara signifikan mempengaruhi waktu ikat semen, dengan variasi efek yang berbeda antara semen OPC dan PCC.
- b. (Putri, 2022) Penelitian ini dilakukan dengan bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi (NaOH dan Na₂SiO₃) pada uji kuat tekan beton geopolimer, menganalisis variasi alkali aktivator yang paling

optimal, dan menganalisis pengaruh aktivator pada *fly ash* sebagai bahan pengikat terhadap pengujian *setting time* campuran beton geopolimer. Adapun metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimen berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer didapat nilai kuat tekan tertinggi yaitu pada BG 12-1 sebesar 15,02 Mpa. Dengan penggunaan alkali aktivator 12 M perbandingan 1:2 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$). Untuk pengujian *setting time* waktu ikat tercepat diperoleh oleh beton geopolimer 12 M dengan perbandingan 1:2 dengan *initial setting time* 131 menit dan *final setting time* 180 menit. Maka hal ini menunjukkan bahwa pengaruh alkali aktivator dengan perbandingan larutan NaOH lebih besar dibanding Na_2SiO_3 , lebih berpengaruh terhadap nilai uji kuat tekan beton serta memiliki waktu ikat atau *setting time* yang cepat.

- c. (Alwie dkk, 2020) Penelitian ini menggunakan POFA sebagai pengganti semen untuk memengaruhi sifat mekanik dan kelecakan pada beton SCC mutu tinggi. Semakin tinggi persentase POFA yang digunakan maka akan menurunkan tingkat kelecakan beton segar. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik beton SCC mutu tinggi dengan menggunakan POFA sebagai pengganti sebagian semen. Campuran beton SCC sesuai dengan SNI 6468-2000, dengan variasi persentase POFA sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat total semen. Dalam komposisi beton, digunakan superplasticizer tipe viscorete 1003 sebesar 1%. Beton diuji pada usia 28 untuk menganalisis kuat tekan, kekuatan tarik belah, dan modulus elastisitas. Pengujian kuat tekan pada beton SCC mutu tinggi dengan penggunaan abu boiler kelapa sawit sebesar 10% dari berat semen mengalami kenaikan dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 50,29 MPa atau 5,4% lebih tinggi dari kuat tekan beton normal, nilai kuat tarik belah sebesar 4,044 MPa meningkat 4,8% dari kuat tarik belah beton normal. Pada pengujian modulus elastisitas berdasarkan data pengujian laboratorium diperoleh nilai optimum sebesar 34755,78 MPa pada variasi 0% POFA, sedangkan pengujian modulus

elastisitas berdasarkan kuat tekan diperoleh nilai optimum sebesar 33327,06 MPa pada variasi 10% POFA, dan pada pengujian modulus elastisitas berdasarkan berat volume beton diperoleh nilai optimum sebesar 34628,81 MPa pada variasi 10% POFA.

- d. (Akbar Syarif dkk, 2022) Kabupaten Rokan Hulu adalah salah satu kabupaten di Provinsi Riau yang memiliki luas wilayah sebesar 7.588 km². Kabupaten Rokan Hulu memiliki sumber daya alam perkebunannya berupa kelapa sawit. Dengan banyaknya industri kelapa sawit tersebut, timbul banyak persoalan mengenai limbah abu sawit yang membutuhkan lahan kosong untuk menampung sisa abu sawit tersebut. Dalam satu sisi, limbah penumpukan abu sawit ini berakibat pada kelestarian lingkungan sekitar. Abu sawit merupakan bahan baku geopolimer dikarenakan unsur yang terkandung dapat diaktifkan menjadi bahan perekat pengganti semen. Campuran geopolimer merupakan produk dari hasil pemanfaatan abu sawit menjadi bahan pengganti semen yang diaplikasikan dalam pembuatan produk *paving block*. Produk *paving block* memberi nilai positif dari aspek lingkungan dengan pemanfaatan limbah abu sawit dan pengurangan jumlah pemakaian semen. Nilai positif tersebut digabungkan dengan ProKlim yang digalakkan oleh pemerintah yang dapat meningkatkan unit usaha dalam membantu perekonomian masyarakat desa.
- e. (Syarif dkk, 2022) Penelitian ini dilakukan bertujuan menganalisis penerapan penggunaan *paving block* geopolimer abu sawit dengan variasi penambahan *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan *Portland Composite Cement* (PCC) di lahan gambut berbasis *Eco-Green*. Penelitian diawali dengan menguji karakteristik material campuran *paving block* seperti abu sawit, semen, dan pasir. Variasi pengujian sampel terdiri dari 20%, 25%, 30% OPC dan PCC dari komposisi campuran abu sawit. Jenis pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan dan mikrostruktur FTIR dengan umur pengujian 28 hari. Dari hasil yang didapat, kuat tekan variasi OPC 25% memiliki kuat tekan tertinggi 23,82 MPa dari variasi OPC lainnya, sedangkan untuk variasi PCC 30% menghasilkan kuat tekan tertinggi

25,81 MPa dari variasi PCC lainnya. Dari sampel serpihan kuat tekan diuji mikrostruktur FTIR untuk mendapatkan ikatan kimia yang terjadi akibat penambahan variasi OPC dan PCC. Dari data hasil pengujian mikrostruktur FTIR terlihat adanya senyawa Natrium Karbonat, Kalsium Karbonat dan Ziolite yang merupakan reaksi geopolimer antara OPC dan PCC. Reaksi tersebut membentuk ikatan antar butiran sehingga menghasilkan pasta semen pada campuran *paving block* geopolimer abu sawit. Sedangkan ditinjau dari Konsep *Eco-Green*, *paving block* geopolimer lebih murah dibandingkan dengan *paving block* konvensional semen dan menghasilkan mutu yang sama (Mutu B).

- f. (Setiawati dkk, 2022) Semen sebagai bahan pembentuk beton menghasilkan gas CO₂ yang dapat merusak atmosfer bumi. Oleh karena itu beton geopolimer yang ramah lingkungan menjadi pilihan. Bahan utama pembuatan beton ini adalah material pozzolan yang kaya akan Silika (SiO₃) dan Alumina (Al₂O₃) sebagai pengganti semen dan *alkali activator* berupa Sodium Hydroxide (NaOH) dan (Na₂SiO₃) sebagai pengikat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan variasi campuran untuk kuat tekan tertinggi. Perbandingan *fly ash* tipe F dan *alkali activator* yaitu 74%:26%. Molaritas NaOH yang digunakan adalah 10M, 12M, 14M, perbandingan Na₂SiO₃ dan NaOH adalah 2,5:1; 3.0:1; 3.5:1. Benda uji yang silinder ukuran 15cm x 30cm dan pengujian kuat tekan pada umur 28 hari. Hasil pengujian dengan perbandingan NaOH dan Na₂SiO₃ 2,5:1 pada NaOH 10M, 12M, 14M adalah 25,81 Mpa, 27,00 Mpa, 28,98 Mpa. Sedangkan karakteristik tekannya adalah 24,32 Mpa, 24,67 Mpa, 26,58 Mpa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio molaritas dan alkali aktivator sangat mempengaruhi kuat tekan dan *workability* beton geopolimer. Molaritas yang tinggi akan menghasilkan kuat tekan yang tinggi. Sedangkan semakin tinggi rasio alkali activator maka semakin rendah kuat tekan yang dihasilkan.
- g. (Civil dkk, 2025) Fokus dari penelitian ini adalah mengevaluasi dampak variasi komposisi dari alkali aktivator terhadap kuat tekan dari mortar geopolimer berbasis abu terbang tipe F. Material abu terbang diperoleh

dari PLTU Mpanau dan diaktifkan menggunakan kombinasi Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dan Sodium Hidroksida (NaOH). Sampel uji berupa mortar dengan bentuk kubus berukuran $50 \times 50 \times 50$ mm yang rasio massa abu terbang terhadap pasir sebesar 1 : 2,75, serta rasio air terhadap padatan (w/s) 0,35. Aktivator diberikan dalam tiga variasi dosis, yaitu 25%, 40%, dan 55% dari berat abu terbang. Variasi dari Sodium Silikat berbanding dengan aktivator (W/A) yaitu 0; 0,3; 0,5; 0,7; dan 1. Pengujian kuat tekan terhadap mortar dilakukan pada umur ke 3, 7, 14, dan 28 hari, untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan mekanik seiring waktu. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan dosis aktivator dan nilai W/A secara signifikan mempengaruhi karakteristik kuat tekan mortar. Kuat tekan optimum sebesar 24,72 MPa tercapai pada komposisi dosis aktivator 55% dan rasio W/A 0,5 pada umur 28 hari. Nilai tersebut menunjukkan bahwa mortar geopolimer dengan komposisi tersebut memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai elemen struktural alternatif yang ramah lingkungan.

- h. (Kотлер dkk, 2023) Tujuan penelitian ini adalah melihat apakah terjadi peningkatan kekuatan dari beton geopolimer dengan melakukan penambahan abu sekam padi dan abu cangkang sawit. Penambahan abu sekam padi (ASP) dan abu cangkang sawit (ACS) dilakukan dengan variasi 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%. Pertama dilakukan pengujian beton geopolimer tanah liat / beton normal. Kemudian dilakukan pengujian beton geopolimer tanah liat dengan pencampuran abu sekam padi sebesar 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%. Selanjutnya adalah pengujian beton geopolimer tanah liat dengan pencampuran abu cangkang sawit sebesar 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%. Pengujian dilakukan pada umur uji 7 hari, 14 hari dan 28 hari. Hasil dari pengujian diatas kemudian dibandingkan dengan hasil sebagai berikut, pada beton geopolimer tanah liat di umur 28 hari didapatkan kekuatan tekan sebesar 7,6 KN. Pada beton geopolimer tanah liat dengan campuran abu sekam padi variasi 20% (hasil terbesar) didapatkan kuat tekan sebesar 7,1 KN. Sedangkan untuk beton geopolimer tanah liat dengan penambahan abu cangkang sawit

dengan variasi 10% (hasil terbesar) didapat kuat tekan 11,2 KN. Dari hasil penelitian diketahui bahwa penambahan abu cangkang sawit tidak memberikan peningkatan sedangkan pemberian variasi abu cangkang sawit pada variasi 10% memberikan peningkatan kekuatan sebesar 49,3 persen.

- i. (Jalil Bangun dkk, 2021) Dalam penelitian ini digunakan *fly ash* untuk digunakan menjadi sebuah *geopolymer* yang berfungsi sebagai pengganti semen pada campuran beton. *Fly ash* yang digunakan dicampurkan kedalam campuran mortar dengan benda uji berbentuk kubus mortar ukuran 5cm x 5cm x 5cm dengan perawatan benda uji dengan cara di plastic covering dan suhu ruangan dengan umur 3, 7, 14 dan 28 hari. Variasi alkali aktivator yang digunakan adalah 6M, 8M dan 10M dengan perbandingan $\text{NaSiO}_3 : \text{NaOH}$ adalah 1 : 1,5 dan *Fly Ash* : Larutan Alkali adalah 70%:30% pada setiap variasi molaritas alkali. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kuat tekan optimum yang dihasilkan oleh mortar *geopolymer* pada variasi molar dan perawatan tersebut dengan eksperimen langsung di Laboratorium. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh nilai kuat tekan optimum mortar *geopolymer* terdapat pada campuran dengan *activator molaritas* 10M dengan perawatan suhu ruangan yaitu 32,9 Mpa pada umur 28 hari yang berarti curing dengan *plastic covering* tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai kuat tekan beton.
- j. (Sawit dkk, 2023) Geopolimer merupakan material ramah lingkungan yang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti semen dalam pembuatan Batako. Batako geopolimer dibuat dari bahan campuran agregat, air, dan *fly ash* sebagai bahan pengikat yang ditambahkan dengan larutan alkali aktivator dengan kemolaran tertentu. Sodium silikat dan sodium hidroksida digunakan sebagai *alkaline activator* (Hardjito Djuwantoro, dkk, 2004). Pengujian dilakukan meliputi pengujian karakteristik bahan dasar material campuran yang akan digunakan dalam perhitungan perencanaan campuran (*mix design*). Penelitian dilanjutkan dengan pembuatan benda uji sesuai dengan data-data yang telah

diperoleh hasil perhitungan perencanaan campuran (*mix design*). Benda uji dibuat sesuai dengan variasi dari faktor- faktor yang mempengaruhi geopolimer. Benda uji yang telah dibuat selanjutnya dirawat pada suhu ruang selama 28 hari. Pengujian akhir yang dilakukan adalah Pengujian Kuat Tekan dan Absorpsi (penyerapan air). Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan yang telah dilakukan, Nilai kuat tekan pada variasi semen 0% sebesar 4 kg/cm². Variasi semen 10% sebesar 8 kg/cm² . Untuk variasi semen 20% adalah 12 kg/cm². Dan untuk variasi semen 30% adalah sebesar 10 kg/cm² Nilai absorpsi variasi semen 0% sebesar 9,9% (Mutu I), variasi semen 10% sebesar 3,94% (Mutu I) variasi semen 20% adalah 4,7% (Mutu I), dan variasi semen 30% sebesar 6,17%(Mutu I).

- k. (Geofan Juli Pratama Tafonao 2025) Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggantian sebagian semen dengan *fly ash* terhadap kuat tekan pasta dan mortar Metode penelitian meliputi pembuatan sample pasta dan mortar dengan variasi 0%, 10%, 15%, 20%, 25% dan 30%. Dari berat semen .pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Pasta dan mortar akan diuji dengan kuat tekan pasta dan kuat tekan mortar bentuk kubus ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm. Dari penelitian ini dapat diketahui kuat tekan optimum substitusi *fly ash* pada semen yaitu pada persentase 10% dan kuat tekan maksimum pada persentase 15%. Dengan nilai kuat tekan pada proporsi 1pc, 2ps fas 0,485. Dihasilkan yaitu Sebesar 17,83 Mpa, dan 17,19 Mpa Pada umur 28 hari. Sedangkan pada proporsi 1pc, 4ps fas 0,485 Kuat tekan mortar juga mengalami peningkatan pada persentase 10%, dan 15% sebesar 8,36 Mpa dan 7,96 Mpa dibandingkan dengan mortar normal sebesar 7,2 Mpa. Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa *fly ash* berpotensi sebagai bahan substitusi dan menambah kekuatan semen dalam pembuatan pasta dan mortar, yang tidak hanya mendukung efisiensi material tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan semen.

2.2 Keaslian Penelitian

Dalam menilai keaslian penelitian sebelumnya yang dijadikan pembandingan pada penelitian ini, beberapa faktor diperhatikan sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Pasir Pengaraian.
2. Penelitian ini menggunakan alat *Vicat Test* untuk pengujian waktu ikat awal (*Inisial Setting Time*) dan waktu ikat akhir (*Final Setting Time*)
3. Pengambilan semen tipe PCC Semen Merdeka (PT. Semen Indonesia Group) didapatkan melalui toko bangunan sekitar.
4. Pengambilan bahan abu sawit (POFA) diambil dari PT. Rambah Sawit Mandiri (PT.RSM).
5. Substitusi PCC yang diteliti menggunakan variasi 50%, 60% 70%, 80% Dan 90% .
6. Sebagai pembandingan 1, digunakan campuran dengan semen tipe PCC 100% tanpa substitusi POFA.
7. Sebagai pembandingan 2, digunakan campuran dengan POFA 100% tanpa substitusi semen tipe PCC.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Waktu Ikat (*Setting Time*)

Waktu ikat (*setting time*) adalah periode yang dibutuhkan oleh pasta semen sejak mulai dicampur dengan air hingga mencapai tingkat kekerasan tertentu, yang menandai dimulainya dan berakhirnya proses pengerasan. Pengujian waktu ikat bertujuan untuk mengetahui kecepatan reaksi hidrasi semen, sehingga dapat dipastikan bahwa semen tersebut memiliki sifat pengerasan yang sesuai untuk pekerjaan beton di lapangan. (SNI 2049:2015).

SNI 2049:2015 mengatur bahwa pengujian waktu ikat dilakukan menggunakan alat Vicat, sesuai dengan prosedur yang dijelaskan dalam SNI 03-6827-2002 tentang Cara Uji Waktu Ikat dan Kekuatan Tekan Pasta Semen Portland. Alat ini dilengkapi dengan jarum standar untuk mengukur kedalaman penetrasi pada pasta semen. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan dua parameter penting, yaitu waktu ikat awal (*initial setting time*) dan waktu ikat akhir (*final setting time*).

Initial setting time atau waktu ikat awal adalah waktu yang dihitung sejak air pertama kali dicampurkan dengan semen hingga saat pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan menunjukkan tanda-tanda awal pengerasan. Pada tahap ini, campuran semen masih dapat dikerjakan (*workable*), tetapi sudah mulai mengeras akibat reaksi hidrasi antara senyawa semen dengan air. waktu ikat awal semen *portland* tidak boleh kurang dari 45 menit. Artinya, semen harus tetap memiliki waktu kerja minimal 45 menit agar proses pencampuran, pengangkutan, dan pengecoran dapat dilakukan dengan baik sebelum campuran mulai mengeras. (SNI 2049:2015).

Final setting time atau waktu ikat akhir adalah waktu yang dihitung sejak pencampuran air dengan semen hingga pasta semen benar-benar mengeras dan tidak dapat dibentuk lagi. Pada tahap ini, jarum penetapan pada alat *Vicat* tidak lagi meninggalkan bekas pada permukaan pasta, yang menandakan semen telah mencapai kondisi padat dan reaksi hidrasi

berlangsung secara signifikan. waktu ikat akhir semen *portland* tidak boleh lebih dari 375 menit (sekitar 6 jam 15 menit). Batas maksimum ini ditetapkan agar pengerasan semen tidak berlangsung terlalu lama, karena waktu pengerasan yang terlalu lambat dapat mengganggu jadwal pekerjaan dan menurunkan efisiensi konstruksi. (SNI 2049:2015).

Sedangkan POFA tidak memiliki standar SNI terkait waktu ikat karena bukan termasuk semen Portland. Oleh karena itu, pengujian waktu ikat dilakukan menggunakan metode Vicat sesuai SNI, sedangkan hasilnya dianalisis secara komparatif terhadap semen PCC/OPC sebagai pembandingan.

Waktu ikat (*setting time*) pasta semen atau geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain komposisi kimia bahan pengikat, persentase bahan substitusi, rasio air terhadap bahan pengikat, serta kondisi lingkungan. Kandungan CaO yang tinggi pada semen OPC atau PCC cenderung mempercepat proses pengikatan, sedangkan material dengan kandungan silika dan alumina tinggi seperti POFA memiliki reaktivitas yang lebih rendah sehingga waktu ikatnya lebih lama. Selain itu, penggunaan dan persentase substitusi bahan pozzolan juga berpengaruh signifikan, di mana semakin tinggi kadar POFA maka waktu ikat cenderung semakin lambat. Pada sistem geopolimer, jenis dan konsentrasi aktivator alkali, khususnya NaOH dan Na_2SiO_3 , turut menentukan kecepatan reaksi pembentukan gel. Faktor lain seperti kehalusan material, metode pencampuran, serta suhu lingkungan dan kondisi curing juga berperan dalam mempercepat atau memperlambat proses pengikatan pasta.

3.2 Pasta

Pasta adalah campuran bahan padat dan cair yang membentuk massa plastis atau kental (SNI 2049:2015). Fungsi pasta pada konstruksi adalah sebagai bahan pengikat yang menyelimuti dan merekatkan agregat sehingga terbentuk mortar atau beton yang kompak, mengisi rongga di antara agregat, memberikan kelecakan pada campuran, serta mengeras dan menghasilkan kekuatan setelah proses hidrasi.

3.3 Geopolimer

Geopolimer adalah bahan pengikat anorganik yang terbentuk melalui reaksi polimerisasi antara material yang kaya akan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), seperti *fly ash* atau *slag*, dengan larutan alkali sebagai aktivator, sehingga menghasilkan struktur polimer anorganik yang keras dan stabil. Proses pembentukan geopolimer tidak memerlukan pembakaran pada suhu tinggi seperti pada semen Portland, sehingga lebih ramah lingkungan dan mampu menurunkan emisi karbon. Selain itu, material geopolimer memiliki kuat tekan yang baik, ketahanan tinggi terhadap suhu dan serangan kimia, serta berpotensi memanfaatkan limbah industri sebagai bahan konstruksi alternatif, Geopolimer berfungsi sebagai bahan pengikat (binder) pengganti semen Portland yang mampu meningkatkan kuat tekan, ketahanan terhadap suhu tinggi dan serangan kimia, serta mengurangi emisi CO_2 dengan memanfaatkan limbah industri (Davidovits, 1991) ; (Provis & van Deventer, 2009).

3.4 Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Semen *Portland* Komposit (PCC) adalah jenis semen hidrolik yang dihasilkan dengan menggiling *klinker* semen *portland* bersama bahan tambahan mineral aktif seperti pozzolan, batu kapur halus (*limestone*), dan gipsum sebagai pengatur waktu ikat. Jenis semen ini diatur dalam SNI 7064:2014 – Semen Portland Komposit, dan merupakan pengembangan dari semen *portland* biasa (OPC) untuk meningkatkan efisiensi serta ramah lingkungan.

Menurut SNI 7064:2014 tentang Semen *Portland* Komposit, semen PCC diklasifikasikan sebagai semen campuran yang memiliki kemampuan mengeras dan mengikat baik di udara maupun di dalam air. Kandungan bahan tambahannya berkisar antara 6%–35% dari massa total semen, tergantung pada proporsi dan jenis bahan yang digunakan. Bahan tambahan ini berfungsi meningkatkan daya tahan terhadap serangan sulfat, mengurangi panas hidrasi, serta meningkatkan kelecakan (*workability*) dan kemudahan pengerjaan beton atau mortar.

3.5 Air

Menurut SNI 7656:2012 – Tata Cara Pemilihan Air untuk Campuran Beton dan Mortar, air yang digunakan dalam pembuatan beton berfungsi sebagai bahan pencampur utama yang memicu reaksi hidrasi antara semen dan air sehingga semen dapat mengikat agregat menjadi massa yang keras dan padat. Air juga berperan dalam menentukan *workability* (kemudahan pengerjaan), waktu ikat, dan kekuatan beton. Oleh karena itu, kualitas air sangat berpengaruh terhadap mutu akhir beton yang dihasilkan.

SNI 7656:2012 mensyaratkan bahwa air pencampur beton harus bersih dan bebas dari zat-zat yang dapat merusak beton, seperti minyak, asam, alkali, garam, bahan organik, maupun lumpur dalam jumlah berlebihan. Air yang layak diminum (air bersih) pada umumnya dianggap layak digunakan untuk campuran beton, meskipun pengujian kimia tetap disarankan terutama pada pekerjaan berskala besar atau di lokasi dengan sumber air tidak terjamin.

3.6 POFA (*Palm Oil Fuel Ash*)

Palm Oil Fuel Ash (POFA) atau abu hasil pembakaran limbah kelapa sawit merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses pembakaran serat dan cangkang kelapa sawit (*palm fiber and shell*) pada tungku atau boiler di pabrik kelapa sawit. Abu ini terbentuk sebagai hasil samping dari proses pembangkitan energi panas untuk menggerakkan turbin atau memproduksi uap dalam proses pengolahan minyak sawit.

Menurut SNI 2460:2014 – Spesifikasi Pozzolan untuk Bahan Campuran Semen *Portland*, pozzolan didefinisikan sebagai bahan yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam jumlah yang cukup, yang dengan sendirinya tidak memiliki sifat mengikat, tetapi bila dalam bentuk halus dan dengan adanya air akan bereaksi kimia dengan kalsium hidroksida $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ pada suhu normal untuk membentuk senyawa yang bersifat mengikat (*sementasi*), seperti kalsium silikat hidrat (C–S–H).

Berdasarkan kriteria dalam SNI tersebut, Palm Oil Fuel Ash (POFA) termasuk ke dalam bahan pozzolan alam buatan (*artificial pozzolan*) karena berasal dari proses pembakaran limbah biomassa kelapa sawit di pabrik minyak sawit. POFA mengandung unsur utama SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 dengan jumlah total umumnya lebih dari 70%, sehingga memenuhi syarat sebagai pozzolan kelas F sesuai SNI 2460:2014 maupun ASTM C618-19.

3.7 Larutan Alkali NaOH Dan Na_2SiO_3

Larutan alkali merupakan larutan yang bersifat basa kuat karena mengandung ion hidroksida (OH^-) dalam jumlah tinggi. Dalam bidang teknik sipil dan material, larutan alkali umumnya tersusun dari campuran natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Kedua bahan ini digunakan secara bersamaan untuk menghasilkan larutan aktivator alkali yang berfungsi sebagai bahan pengikat alternatif pengganti semen *Portland* pada pembuatan beton geopolimer. Penggunaan larutan alkali bertujuan untuk mengaktifkan material yang kaya silika (Si) dan alumina (Al), seperti *fly ash*, slag, atau *palm oil fuel ash* (POFA), sehingga membentuk senyawa pengikat berstruktur tiga dimensi yang dikenal sebagai geopolimer (Hardjito et al., 2005).

Natrium hidroksida (NaOH) adalah senyawa basa kuat yang mudah larut dalam air dan menghasilkan panas selama proses pelarutan. Dalam larutan, NaOH terionisasi menjadi ion Na^+ dan OH^- , yang berperan penting dalam proses pelindian (*dissolution*) material aluminosilikat. Ion hidroksida (OH^-) membantu memecah ikatan Si–O–Al pada permukaan partikel bahan pozzolan, sehingga melepaskan ion silika (Si^{4+}) dan alumina (Al^{3+}) ke dalam larutan. Konsentrasi NaOH yang digunakan biasanya dinyatakan dalam molaritas, yaitu berkisar antara 8 M hingga 16 M, tergantung pada karakteristik material yang digunakan dan sifat mekanik yang diinginkan (Davidovits, n.d.).

Sementara itu, natrium silikat (Na_2SiO_3) atau dikenal juga sebagai water glass berperan sebagai sumber silika tambahan dalam larutan alkali. Senyawa ini dapat meningkatkan ketersediaan silika reaktif di dalam sistem, yang diperlukan untuk membentuk gel pengikat N–A–S–H (Natrium–

Alumino–Silikat–Hidrat). Penambahan Na_2SiO_3 ke dalam larutan NaOH mempercepat proses polikondensasi, meningkatkan viskositas larutan, serta menghasilkan struktur geopolimer yang lebih padat dan kuat. Rasio pencampuran Na_2SiO_3 terhadap NaOH (SS/SH ratio) biasanya berkisar antara 1,5 hingga 2,5, karena rasio tersebut berpengaruh langsung terhadap kekuatan tekan dan kecepatan pengerasan beton geopolimer (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005).

Proses tersebut menghasilkan struktur tiga dimensi yang bersifat kuat, stabil, dan tahan terhadap suhu tinggi maupun serangan kimia. Oleh karena itu, larutan alkali berbasis NaOH dan Na_2SiO_3 banyak digunakan dalam pengembangan material ramah lingkungan sebagai pengganti sebagian atau seluruh penggunaan semen *Portland* (Hardjito et al., 2005) & (Xu & Van Deventer, 2000).

3.8 Pengujian Konsistensi Normal Semen

Pengujian konsistensi normal semen merupakan salah satu pengujian dasar yang bertujuan untuk menentukan jumlah air yang dibutuhkan untuk memperoleh pasta semen dengan keenceran atau plastisitas normal. Pasta semen dengan konsistensi normal ini menjadi acuan untuk melakukan pengujian lain seperti waktu ikat awal dan akhir (*setting time*) serta uji kekuatan. Secara prinsip, konsistensi normal semen ditetapkan sebagai kondisi ketika jarum *Vicat* (*Vicat Apparatus*) dengan diameter 10mm dan berat tertentu menembus pasta semen hingga kedalaman 10 mm dari permukaan atas cincin uji (SNI 2049:2015).

Menurut SNI 03-6827-2002 tentang Metode Pengujian Konsistensi Normal Pasta Semen Portland, uji ini dilakukan dengan menggunakan alat *Vicat* (*Vicat Apparatus*) yang terdiri dari batang logam vertikal, jarum uji, dan cetakan berbentuk kerucut terpotong (*mould*). Adapun Prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Campurkan semen dan air dalam jumlah tertentu, kemudian diaduk hingga homogen.

2. Lalu pasta semen dimasukkan ke dalam cetakan *Vicat* tanpa adanya rongga udara, lalu permukaan atasnya diratakan.
3. Setelah itu, jarum *Vicat* dengan diameter 10 mm diturunkan perlahan hingga menyentuh permukaan semen, kemudian dilepaskan bebas untuk menembus pasta.
4. Percobaan diulang dengan prosentase air sedemikian rupa sehingga diperoleh konsistensi normal yaitu pada penurunan 10 mm.

Jumlah air yang diperlukan untuk mencapai konsistensi normal biasanya dinyatakan dalam persentase terhadap berat semen. Nilai ini sangat bervariasi tergantung pada jenis semennya, kehalusan butiran semen (*fineness*), serta komposisi kimia semen. Umumnya Semen yang lebih halus membutuhkan lebih banyak air untuk mencapai plastisitas normal dikarenakan luas permukaannya yang lebih besar. Hasil dari pengujian konsistensi normal ini menjadi dasar untuk menentukan proporsi air pada pengujian waktu ikat dan kuat tekan mortar semen, sehingga sangat penting dalam kontrol mutu material (SNI 15-2049-2004).

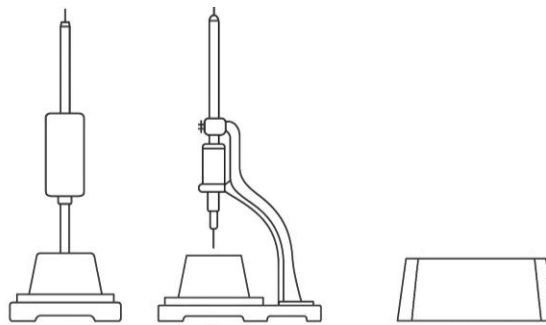
Selain mengacu pada standar SNI, metode ini juga mengacu pada standar internasional seperti ASTM C187-16 “*Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*”. Pengujian dengan metode ini memastikan bahwa semen memiliki karakteristik reaksi hidrasi yang seragam serta dapat digunakan untuk perbandingan mutu antar jenis semen, seperti semen *Portland* (OPC), semen *Portland pozzolan* (PPC), maupun semen campuran (PCC). Nilai konsistensi normal yang sesuai standar umumnya berkisar antara 26% hingga 33% dari berat semen, tergantung jenis dan merek semen yang diuji.

3.9 Pengujian Waktu Ikat (*Setting Time*)

Waktu ikat awal adalah waktu yang diperlukan oleh pasta semen untuk mengubah sifatnya dari kondisi cair menjadi padat (SNI 03 – 6827). Sistem pengujian dilakukan sesuai ketentuan sebagai berikut :

1. pengujian waktu ikat awal semen *Portland* dilakukan dengan benda uji tunggal.
2. pencatatan data pengujian harus menggunakan formulir dari laboratorium yang berisi :
 - a. Identitas benda uji dan contoh
 - b. Teknisi penguji
 - c. Tanggal pengujian
 - d. Penanggung jawab pengujian
 - e. Pencatat data pengujian
 - f. Nama laboratorium dan instansi penguji
3. Hasil pengujian ini harus ditandatangani oleh penanggung jawab pengujian

Perhitungan Waktu ikat awal (*Initial Setting Time*) ditentukan dari grafik penetrasi waktu, yaitu waktu dimana penetrasio jarum vicat mencapai nilai 25 mm. Dan perhitungan Waktu ikat akhir (*Final Setting Time*) ditentukan dari grafik penetrasi waktu, yaitu Dimana waktu penetrasio jarum vicat mencapai nilai 0 mm atau tidak menembus sama sekali.



Gambar 3. 1 Alat Vicat dan Cetakan Benda Uji