

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan landasan teori dan penelitian terdahulu yang relevan dengan mortar geopolimer berbasis *fly ash* mengandung serat selulosa. Pembahasan mencakup sifat geopolimer, mekanisme *shrinkage* dan retak rambut pada mortar, serta peran serat dalam meningkatkan kinerja material. Tinjauan ini digunakan untuk menyusun kerangka konseptual dan mengidentifikasi celah penelitian sebagai dasar pelaksanaan penelitian.

2.1 Material Kontruksi

Material konstruksi terdiri dari berbagai material anorganik, organik, dan komposit yang dipilih berdasarkan kualitas mekanis, fungsionalitas, serta kesesuaiannya untuk keperluan infrastruktur tertentu. Pemilihan material konvensional yang tepat, seperti beton, baja, dan batu bata sangat penting untuk menjaga integritas struktural, menjamin keselamatan pengguna, serta mendukung keberlanjutan struktur. Selain pertimbangan teknis, efisiensi biaya dan pengurangan dampak lingkungan merupakan faktor krusial dalam pemilihan material guna mencapai kinerja konstruksi yang optimal dan berkelanjutan (Babu & Petchikkan, 2023).

Seiring dengan perkembangan teknologi bahan, penelitian saat ini mulai berfokus pada pengembangan material teknik baru (*new engineering materials*) untuk meningkatkan durabilitas dan performa mekanik sekaligus mereduksi jejak ekologis dari material konvensional. Material inovatif, termasuk material campuran dan komposit, menawarkan keunggulan berupa peningkatan kekuatan tekan, ketahanan terhadap retak, serta efisiensi energi yang lebih baik (Sahare, 2026).

2.1.1 Dinding

Dinding merupakan komponen struktural yang sangat penting dalam konstruksi, karena berfungsi sebagai pembatas ruang dan membentuk kerangka utama bangunan. Dinding merupakan elemen penting dalam sebuah bangunan yang tidak

hanya membatasi dan mengatur tata letak area, tetapi juga memberikan stabilitas struktural dan nilai estetika. Dinding dapat dibuat dari berbagai bahan sesuai dengan spesifikasi tertentu, termasuk batu bata, balok beton, beton, atau bahan ringan lainnya, tergantung pada fungsi yang diinginkan dan kapasitas penahan beban dinding tersebut (Sary & Asysyauki, 2020). Dinding memiliki dua fungsi utama, yaitu sebagai elemen struktural dan non-struktural:

1. Dinding Non Struktural: Berfungsi sebagai partisi yang menyekat dan membagi ruang tanpa memikul beban utama dari struktur bangunan. Pada konstruksi bangunan sederhana, dinding ini umumnya menggunakan material bata merah tanpa tulangan yang bertujuan untuk menciptakan ruang tertutup serta pembatas antararea. Meskipun secara desain teknis tidak dirancang untuk menahan beban signifikan, keberadaan dinding jenis ini tetap memberikan kontribusi penting terhadap kekakuan *solid* dan stabilitas bangunan secara keseluruhan.
2. Dinding Struktural: Berfungsi untuk menahan dan mendistribusikan beban vertikal maupun horizontal dari elemen bangunan lain, seperti atap atau lantai. Salah satu bentuknya adalah *reinforced masonry wall*, yaitu dinding pasangan bertulang yang memberikan peningkatan kekuatan lateral, kapasitas tekan, dan stabilitas struktur yang lebih baik dibandingkan dinding konvensional, terutama dalam menghadapi beban gempa. Pemanfaatan sistem ini sangat krusial untuk menjaga integritas sistem konstruksi dalam menahan berbagai gaya yang bekerja pada bangunan.

Selain berfungsi sebagai pembatas ruang dan pelindung interior dari pengaruh lingkungan luar, dinding memiliki peran krusial dalam menjaga stabilitas serta daya tahan jangka panjang bangunan. Secara struktural, penggunaan dinding pengisi bata meningkatkan kekakuan dan respons bangunan terhadap beban lateral seperti gempa. Implementasi sistem inovatif seperti *reinforced masonry wall* terbukti memberikan kapasitas beban yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Sary & Asysyauki, 2020). Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat serta penguasaan metode pelaksanaan sangat penting untuk menjamin integritas struktur

saat menghadapi beban dinamis sekaligus memitigasi risiko kerusakan pada tahap *finishing*.

2.1.2 Plesteran Dinding

Plesteran adalah tahap penting dalam proses pembangunan dinding yang berfungsi sebagai lapisan pelindung, menutup cacat pada dinding bata, melindungi material dari pengaruh lingkungan, serta memberikan permukaan yang halus untuk proses penyelesaian selanjutnya. Fungsi utama plesteran adalah menghasilkan permukaan yang halus dan kokoh, sehingga memudahkan pengaplikasian pada permukaan tegak lurus serta memastikan adukan tetap memiliki konsistensi yang tepat selama masa pakainya. Efektivitas pekerjaan ini sangat dipengaruhi oleh manajemen tenaga kerja yang seimbang untuk meningkatkan efektivitas pemasangan, karena koordinasi tim yang optimal dapat mengurangi waktu konstruksi dan secara signifikan mengoptimalkan anggaran proyek (Andard, 2019).

Dalam perawatan dan perbaikan, plesteran berfungsi sebagai solusi teknis untuk kerusakan dinding akibat degradasi permukaan, yang dihasilkan melalui proses pengikisan, pencampuran bahan secara merata, dan pengaplikasian ulang pada area yang rusak. Efektivitas lapisan plester ini merupakan faktor krusial dalam ketahanan dinding, karena permukaan yang halus dan kokoh meningkatkan integritas komponen non-struktural terhadap tekanan lingkungan (Andard, 2019).

Oleh karena itu, memahami sifat fisik mortar plester dan teknik teknis aplikasinya sangat penting untuk memastikan kualitas permukaan serta sangat penting untuk ketahanan dan stabilitas jangka panjang sistem dinding bangunan secara keseluruhan.

2.1.3 Kerusakan Dinding

Seiring dengan masa pakai sebuah bangunan, dinding rentan terhadap kerusakan akibat pengaruh eksternal seperti kerusakan struktur, penurunan pondasi, serta perubahan suhu dan kelembapan. Meskipun kerusakan ini diklasifikasikan sebagai kerusakan non struktural, dampaknya sangat signifikan terhadap fungsi dan nilai estetika bangunan. Kerusakan tersebut biasanya berupa retakan pada

permukaan, pengelupasan plester, dan kegagalan sambungan antar bagian (Ahmad et al., 2024).

Kerusakan semacam ini memiliki dampak yang semakin parah karena retakan dapat menjadi saluran masuknya air, yang menyebabkan kerusakan material tambahan dan secara signifikan meningkatkan biaya pemeliharaan. Pemahaman yang menyeluruh tentang mekanisme kerusakan sangat penting untuk menjamin ketahanan jangka panjang bangunan, karena berbagai variabel teknis seperti pemilihan material yang tidak tepat dan kurangnya pengetahuan tentang teknik konstruksi dapat memperburuk kondisi dinding.

2.2 Persyaratan dan Spesifikasi Mortar Geopolimer untuk Plesteran Dinding

Mortar Geopolimer untuk plesteran dinding harus memenuhi persyaratan kinerja tertentu agar mampu memberikan kekuatan, stabilitas dimensi, serta ketahanan yang memadai. Persyaratan tersebut meliputi karakteristik mekanis dan durabilitas material, seperti susut, kuat tekan, retak, dan daya serap air. Pada penelitian ini, kajian mengenai karakteristik tersebut mengacu pada SNI 6882:2014 serta penelitian terdahulu yang relevan.

2.2.1 Retak Mortar Geopolimer

Retak merupakan salah satu indikator kinerja mortar yang berkaitan dengan stabilitas dimensi dan durabilitas material. Retak yang terjadi pada mortar plesteran dapat menurunkan kualitas permukaan serta meningkatkan kemungkinan masuknya air dan zat agresif ke dalam material. Retak pada umur awal umumnya dipengaruhi oleh proses susut akibat penguapan air dan perkembangan tegangan tarik yang melebihi kapasitas tarik mortar (Beushausen & Arito, 2018).

Penambahan serat ke dalam mortar diketahui dapat membantu mengendalikan pembentukan dan perkembangan retak melalui mekanisme pengikatan antarbidang retak (*crack bridging*), sehingga lebar maupun luas retak dapat berkurang (Lv et al., 2023). Dalam penelitian ini, pengujian retak dilakukan pada benda uji pelat tipis untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat selulosa

limbah kertas terhadap pembentukan retak pada mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Analisis retak dilakukan menggunakan metode pengolahan citra digital dengan MATLAB untuk memperoleh luas retak secara kuantitatif.

2.2.2 Susut Mortar Geopolimer

Susut merupakan perubahan dimensi mortar akibat reaksi kimia dan penguapan air. Nilai susut yang tinggi dapat meningkatkan risiko retak rambut, terutama pada mortar plesteran yang memiliki luas permukaan besar (ACI 224R-01, 2001). Benda uji susut berbentuk prisma berukuran $4 \times 4 \times 16$ cm dengan mengacu pada dimensi benda uji yang digunakan oleh Stevulova et al., (2021). Perubahan panjang diukur terhadap panjang awal benda uji dan dinyatakan dalam persentase.

2.2.3 Kuat Tekan Mortar

Selain retak dan susut, kinerja mortar juga dievaluasi berdasarkan kuat tekan pada umur 28 hari. Klasifikasi mutu mortar di Indonesia mengacu pada SNI 6882:2014 yang membagi mortar menjadi empat tipe berdasarkan kuat tekan minimum, yaitu tipe M, S, N, dan O.

Berdasarkan SNI 6882:2014, mortar diklasifikasikan menjadi tipe M, S, N, dan O berdasarkan kuat tekan minimum, di mana tipe M memiliki kuat tekan tertinggi 17,2 MPa dan tipe O terendah 2,4 MPa, sedangkan tipe S dan N berada di antara keduanya untuk kebutuhan struktural menengah hingga plesteran. Perbandingan campuran tidak dinyatakan sebagai rasio sederhana, melainkan sebagai perbandingan volume agregat terhadap bahan pengikat yang berkisar antara 2,25 hingga 3,5 kali volume semen. Perbedaan utama tiap tipe terletak pada jumlah bahan pengikat, di mana semakin tinggi tipe mortar maka kandungan semen lebih banyak sehingga kuat tekan meningkat, sedangkan tipe rendah memiliki agregat lebih banyak sehingga lebih fleksibel namun kuat tekannya lebih rendah.

Dalam penelitian ini, mortar yang digunakan adalah mortar geopolimer berbasis *fly ash*, sehingga tidak dapat diklasifikasikan secara langsung ke dalam tipe mortar SNI 6882:2014 yang berbasis semen portland. Oleh karena itu, hasil

kuat tekan yang diperoleh tidak digunakan untuk menetapkan tipe mortar, melainkan dibandingkan dengan batas kuat tekan minimum pada masing-masing tipe sebagai acuan evaluasi kinerja. Dalam hal ini, tipe M dengan kuat tekan minimum 17,2 MPa digunakan sebagai pembanding karena umum diterapkan pada pekerjaan non-struktural seperti plesteran.

Berdasarkan klasifikasi mutu mortar yang telah dijelaskan, diperlukan penyajian batas kuat tekan minimum setiap tipe mortar sebagai acuan dalam menentukan kesesuaian penggunaannya pada pekerjaan konstruksi. Adapun klasifikasi kuat tekan mortar berdasarkan SNI 6882:2014 disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1. Batas Kuat Tekan Minimum Mortar

No	Tipe Mortar	Kuat Tekan Minimum (MPa)	Rasio agregat (pengukuran pada kondisi lembab,gembur)
1	M	17,2	2¼ – 3½ kali jumlah volume bahan bersifat semen
2	S	12,4	
3	N	5,2	
4	O	2,4	

(Sumber : SNI 6882:2014)

Tipe mortar memiliki persyaratan kuat tekan minimum yang berbeda sesuai dengan penggunaannya. Meskipun mortar geopolimer berbasis *fly ash* tidak termasuk dalam klasifikasi mortar semen portland menurut SNI 6882:2014, nilai kuat tekan yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dibandingkan dengan batas kuat tekan minimum tersebut sebagai acuan untuk mengevaluasi kinerja dan potensi penggunaannya sebagai plesteran dinding.

2.2.4 Daya Serap Air

Daya serap air merupakan kemampuan mortar dalam menyerap air melalui pori-pori yang terdapat pada struktur material. Nilai daya serap air sering digunakan sebagai indikator kualitas mikrostruktur mortar karena berhubungan dengan porositas, permeabilitas, dan durabilitas material. Mortar dengan daya serap air yang rendah umumnya memiliki struktur yang lebih rapat sehingga lebih tahan terhadap penetrasi air dan zat agresif dari lingkungan.

Pada mortar geopolimer, daya serap air dipengaruhi oleh komposisi campuran, proses geopolimerisasi, serta keberadaan bahan tambah seperti serat.

Dalam penelitian ini, pengujian daya serap air dilakukan pada benda uji prisma berukuran $4 \times 4 \times 16$ cm untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat selulosa limbah kertas terhadap karakteristik pori mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Nilai daya serap air diperoleh berdasarkan perbandingan berat jenuh kering permukaan dan berat kering oven setelah proses perendaman (Youssf et al., 2025).

2.3 Mortar geopolimer Berbasis *Fly ash*

Mortar geopolimer berbasis *fly ash* merupakan bahan komposit yang memanfaatkan *fly ash* sebagai sumber utama silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), yang diaktifkan menggunakan larutan alkali untuk membentuk sistem pengikat anorganik tanpa melibatkan semen portland. Berbeda dengan mortar berbasis semen yang mengandalkan reaksi hidrasi semen, mortar geopolimer terbentuk melalui proses geopolimerisasi, yaitu reaksi kimia antara mineral aluminosilikat dengan aktivator alkali yang menghasilkan jaringan pengikat berbasis aluminosilikat. Selain itu, agregat halus berupa pasir juga digunakan, dan dalam beberapa formulasi, air berfungsi sebagai media dalam pembuatan larutan aktivator dan pengaturan kelecakan campuran, meskipun tambahan air bebas tidak selalu dianggap sebagai komponen utama di luar sistem aktivator (Oyejobi et al., 2023).

Mortar geopolimer berbasis *fly ash* berfungsi sebagai alternatif mortar semen portland, yang bekerja melalui mekanisme pembentukan matriks akibat aktivasi alkali dan polikondensasi aluminosilikat, bukan melalui hidrasi. Meskipun memiliki potensi sebagai bahan alternatif, tantangan yang dihadapi meliputi sensitivitas terhadap komposisi aktivator, kebutuhan akan desain campuran yang cermat, serta kecenderungan untuk menyusut dan retak jika dipasang secara tidak tepat. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan, terutama untuk aplikasi non-struktural seperti plesteran yang memerlukan kekuatan, stabilitas dimensi, dan kerentanan minimal terhadap retak (Olayinka et al., 2025; Zhang et al., 2018).

2.3.1 Persamaan dan Perbedaan Mortar geopolimer dan Mortar Semen

Portland

Berikut adalah perbandingan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan mortar semen portland (OPC):

1. Perbedaan mortar geopolimer dan mortar semen portland

Mortar semen portland merupakan material plesteran dinding yang tersusun atas semen portland, pasir, dan air, dengan semen berfungsi sebagai bahan pengikat melalui proses hidrasi. Berbeda dengan mortar semen portland, mortar geopolimer berbasis *fly ash* menggunakan *fly ash* sebagai sumber aluminosilikat dan larutan alkali aktivator berupa natrium hidroksida (NaOH) serta natrium silikat (Na_2SiO_3) sebagai bahan pengikat. Pemanfaatan *fly ash* sebagai limbah hasil pembakaran batubara pada PLTU menjadikan mortar geopolimer sebagai alternatif material yang lebih ramah lingkungan dibandingkan mortar semen portland karena dapat mengurangi pemanfaatan semen sekaligus meningkatkan nilai guna limbah industri (Luhar & Luhar, 2022). Dalam aplikasi sebagai plesteran dinding, mortar semen portland memiliki *workability* yang relatif mudah dikendalikan dan telah umum digunakan dalam praktik konstruksi. Sementara itu, kualitas mortar geopolimer sangat dipengaruhi oleh konsentrasi aktivator, rasio campuran, serta kondisi *curing* dan suhu selama proses pengerjaan. Meskipun demikian, dengan perancangan campuran yang tepat, mortar geopolimer tetap mampu menghasilkan kualitas permukaan plesteran yang sebanding dengan mortar semen portland (Matsimbe et al., 2022).

Dari aspek mekanik, mortar geopolimer berbasis *fly ash* mampu menghasilkan kuat tekan yang setara bahkan lebih tinggi dibandingkan mortar semen portland. Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaannya sebagai plesteran dinding adalah kecenderungan terjadinya retak akibat susut pengeringan (*drying shrinkage*). Nilai susut yang tinggi dapat menimbulkan tegangan tarik internal selama proses pengeringan, sehingga apabila tegangan tersebut melampaui kapasitas tarik mortar, akan

terbentuk retak-retak halus (*hair crack*) pada permukaan material (Huang et al., 2024). Kondisi ini menjadi salah satu alasan perlunya upaya pengendalian retak, salah satunya melalui penambahan serat sebagai material penguat.

Dari sisi lingkungan, produksi semen portland diketahui menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah besar, di mana setiap satu ton semen yang diproduksi dapat menghasilkan emisi CO_2 dalam jumlah yang hampir setara. Sebaliknya, mortar geopolimer memiliki jejak karbon yang lebih rendah karena memanfaatkan *fly ash* sebagai produk sampingan industri yang telah tersedia tanpa melalui proses produksi klinker yang intensif energi. Oleh karena itu, mortar geopolimer memiliki potensi yang baik sebagai material plesteran dinding yang lebih berkelanjutan dan mendukung pengembangan konstruksi ramah lingkungan (Luhar & Luhar, 2022; Matsimbe et al., 2022).

2. Persamaan mortar geopolimer dan mortar semen portland

Mortar geopolimer dan mortar semen portland memiliki fungsi dasar yang sama sebagai bahan plesteran dinding, yaitu membentuk lapisan pelindung pada permukaan dinding yang berfungsi meratakan bidang, melindungi material dinding dari pengaruh cuaca, serta menjadi dasar lapisan finishing seperti cat. Keduanya sama-sama menggunakan pasir sebagai agregat halus yang berfungsi memberikan volume pada campuran, mengurangi penyusutan, dan meningkatkan stabilitas dimensi lapisan plesteran. Selain itu, kedua jenis mortar ini sama-sama mengeras dan membentuk kekuatan setelah proses pengerasan berlangsung, sehingga menghasilkan lapisan yang padat dan mampu melekat pada bidang dinding.

Dari sisi sifat mekanis, kedua jenis mortar memiliki karakteristik yang serupa di mana nilai kuat tekan keduanya lebih tinggi dibandingkan kuat tariknya. Kondisi ini menjadikan keduanya sama-sama berpotensi mengalami retak rambut (*hair crack*) apabila terkena tegangan tarik yang melebihi kapasitas materialnya, misalnya akibat susut pengeringan atau perubahan temperatur yang terjadi pada lapisan plesteran (Luhar & Luhar, 2022). Dalam konteks aplikasi sebagai plesteran dinding, sifat ini menjadi pertimbangan

penting yang mendorong perlunya penambahan material berserat pada campuran mortar, baik pada mortar semen portland maupun mortar geopolimer, guna meningkatkan ketahanan retak pada lapisan plesteran.

Persamaan lain yang penting adalah pada standar evaluasi kinerja yang digunakan untuk kedua jenis mortar tersebut. Kinerja mortar geopolimer dan mortar semen portland sebagai plesteran dinding sama-sama dapat dievaluasi menggunakan parameter kuat tekan, kuat lentur, absorpsi air, dan ketahanan retak sesuai dengan standar yang berlaku SNI 6882:2014. Kesepadanan dalam standar pengujian ini memungkinkan perbandingan langsung antara performa mortar geopolimer dan mortar semen portland sebagai plesteran dinding dalam penelitian ini, sehingga simpulan yang dihasilkan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah (Matsimbe et al., 2022).

2.3.2 Karakteristik Mortar geopolimer

Mortar geopolimer yang berbasis *fly ash* menggunakan proses geopolimerisasi, kemudian menghasilkan gel N-A-S-H sebagai matriks pengikat utama, berbeda dengan mortar semen portland yang mengandalkan gel C-S-H melalui reaksi hidrasi. Kinerja matriks pengikat sangat dipengaruhi oleh konsentrasi larutan aktivator alkali. Penelitian ini menggunakan Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium silikat (Na_2SiO_3) bertujuan untuk menyeimbangkan proses pembentukan silika alumina dan percepatan pembentukan gel aluminosilikat.

Selain itu, parameter rasio *liquid-to-solid* (L/S) sebesar 0,3 ditetapkan untuk mencapai kepadatan massa yang optimal guna memenuhi kriteria kuat tekan Tipe M menurut SNI 6882:2014, meskipun rasio yang rendah ini meningkatkan tantangan pada aspek kelecakan (*workability*) dan potensi susut kering. Kekuatan tekan mortar geopolimer dapat dioptimalkan dengan komposisi dan proses yang tepat, namun mortar ini memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dan rentan terhadap penyusutan, yang dapat menyebabkan retak pada fase awal jika tidak dikelola dengan baik (Olayinka et al., 2025; Zhang et al., 2018).

Dalam konteks penelitian ini, karakteristik mortar geopolimer menjadi penting karena material tersebut diarahkan untuk aplikasi plesteran dinding.

Sebagai lapisan tipis, plester rentan mengalami *restrained drying shrinkage* yang dapat memicu terbentuknya retak permukaan. Retak ini tidak hanya menurunkan kualitas visual, tetapi juga berpotensi menjadi jalur masuk kelembapan yang mempercepat kerusakan permukaan serta menurunkan kualitas lapisan finishing.

Dalam penelitian ini, acuan yang digunakan meliputi SNI 6882:2014 untuk spesifikasi mortar plesteran, Stevulova et al. (2021) untuk penggunaan benda uji prisma pada mortar berserat, serta SNI 2460:2014 untuk persyaratan mutu *fly ash*.

2.4 Retak Rambut pada Mortar Geopolimer

Menurut penelitian Khalaf et al. (2024) retak rambut pada mortar merupakan retakan halus berukuran kecil yang muncul pada permukaan mortar akibat tegangan tarik yang melebihi kapasitas tarik material, umumnya disebabkan oleh susut plastis, susut pengeringan, atau perubahan volume selama proses hidrasi dan pengerasan. Mortar pada dasarnya memiliki kuat tekan yang tinggi tetapi kuat tarik yang rendah serta bersifat getas, sehingga mudah mengalami retak ketika terjadi deformasi atau penyusutan. Keretakan ini dapat berkembang seiring waktu dan berpotensi menurunkan durabilitas serta kinerja struktural apabila tidak dikendalikan (Khalaf et al., 2024).

Retak rambut pada mortar geopolimer dipicu oleh penyusutan pengeringan yang nilainya dilaporkan 3–6 kali lebih tinggi dibandingkan semen portland biasa (OPC), sehingga meningkatkan risiko terbentuknya retak halus yang dapat menurunkan durabilitas material. Secara mekanisme, penyusutan terjadi akibat kehilangan air selama proses geopolimerisasi yang menimbulkan tekanan kapiler dalam pori-pori dan menghasilkan tegangan tarik *solid*. Pada aplikasi plesteran, fenomena ini diperparah oleh kondisi *restrained shrinkage* (susut tertahan), di mana pergerakan bebas dari penyusutan mortar terhambat oleh ikatan kuat (*bonding*) dengan substrat dinding atau batu bata. Ketika tegangan tersebut melebihi kapasitas tarik mortar, maka akan terjadi inisiasi retak mikro yang berkembang menjadi retak rambut pada permukaan. Retak ini umumnya mulai berkembang pada umur awal (*early age*), yaitu sejak beberapa jam pertama hingga ± 72 jam (3 hari), dengan periode kritis terjadi pada rentang 2 hingga 60 jam setelah pencetakan, di mana laju

penyusutan mencapai nilai tertinggi sehingga meningkatkan potensi terbentuknya retak (Klingsad & Ayudhya, 2025).

Upaya pengendalian retak pada mortar geopolimer dapat dilakukan melalui optimasi kimiawi maupun intervensi fisik. Secara kimiawi, pengendalian dapat dilakukan melalui variasi jenis dan konsentrasi aktivator serta penambahan aditif seperti magnesium oksida, kalsium hidroksida, atau natrium karbonat. Namun, dalam penelitian ini, solusi difokuskan pada intervensi fisik menggunakan penguatan serat (*fiber reinforcement*) berupa serat selulosa limbah kertas. Serat selulosa yang terdistribusi secara acak dalam matriks berfungsi melalui mekanisme *micro bridging* (jembatan mikro), di mana saat retak mikro mulai terbentuk akibat tegangan tarik, serat-serat tersebut menjembatani celah dan menahan bukaan retakan agar tidak merambat menjadi retak makro yang lebih luas. Mekanisme ini secara efektif mendistribusikan tegangan tarik ke seluruh volume matriks, sehingga mampu meningkatkan integritas permukaan plesteran serta menjaga kualitas finishing dinding dari risiko infiltrasi kelembapan (Riahi Dehkordi et al., 2024).

2.5 Bahan Penyusun Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

Mortar geopolimer berbasis *fly ash* terdiri dari beberapa komponen utama yang terlibat dalam reaksi geopolimerisasi, yaitu *fly ash* sebagai bahan utama aluminosilikat, larutan aktivator alkali, agregat halus, dan pada beberapa formulasi air yang berperan dalam sistem aktivator atau pengaturan kelecakan campuran.

2.5.1 *Fly ash*

Fly ash adalah material halus hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik yang kaya akan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), sehingga menjadikannya material prekursor yang ideal untuk pembentukan pengikat geopolimer. Berbeda dengan semen portland, *fly ash* tidak memiliki kemampuan mengikat secara mandiri tanpa bantuan aktivator alkali. Dalam penelitian ini, digunakan *fly ash* Tipe F berdasarkan SNI 2460:2014, yang memiliki karakteristik kadar kalsium rendah

sehingga lebih stabil dalam membentuk struktur gel aluminosilikat serta meminimalisir risiko reaksi kimia yang tidak terkendali.

Kualitas *fly ash* dalam penelitian ini dipastikan memenuhi kriteria fisik dan kimia yang ketat sesuai SNI 2460:2014, dengan batasan kadar air maksimal 3% guna menjaga konsistensi rasio cairan (L/S ratio) di dalam campuran. Secara fisik, material ini memiliki berat jenis yang berkisar antara 2,2 hingga 2,4 sesuai standar ASTM C188. Saat bereaksi dengan larutan aktivator alkali, silika dan alumina dalam *fly ash* akan mengalami proses disolusi dan polikondensasi untuk membentuk matriks pengikat N-A-S-H (*Sodium Aluminosilicate Hydrate*) yang berfungsi sebagai kekuatan utama pada mortar geopolimer.

2.5.2 Agregat Halus

Agregat halus berupa pasir berfungsi sebagai kerangka dalam mortar geopolimer yang memberikan kestabilan dimensi, mengurangi penyusutan, serta membantu mendistribusikan tegangan dalam matriks pengikat. Secara prinsip, peran agregat halus dalam mortar geopolimer sama dengan pada mortar semen portland, yaitu sebagai pengisi yang meningkatkan kekuatan dan mengontrol deformasi (Davidovits Joseph, 2020).

Kualitas dan karakteristik fisik agregat halus sangat memengaruhi sifat mekanik dan durabilitas mortar. Dalam penelitian ini, spesifikasi dan pengujian agregat halus merujuk pada standar nasional yang berlaku, yaitu:

1. SNI 03-6820-2002
Mengatur spesifikasi agregat halus untuk plesteran, yang mensyaratkan gradasi harus lolos saringan No. 4 dengan Modulus Kehalusan Butir (MHB) berada di antara 2,0 hingga 3,0 agar mortar mudah diaplikasikan secara merata.
2. SNI 1970:2016
Menentukan berat jenis (*Specific Gravity*) *Surface Dry* (SSD) pasir.
3. SNI 03-6820-2002

Menetapkan batas maksimal kadar lumpur sebesar 5% untuk memastikan tidak ada lapisan debu yang menghalangi ikatan antara permukaan pasir dan pasta geopolimer.

Penggunaan standar tersebut dilakukan dengan penyesuaian pada aspek tertentu, terutama terkait metode *curing*, sesuai dengan karakteristik sistem geopolimer (Provis & Van Deventer, 2009).

2.5.3 Larutan Aktivator Alkali

Larutan aktivator alkali memainkan peran krusial dalam sistem mortar geopolimer karena berfungsi melarutkan silika dan alumina dari *fly ash*, sehingga memicu reaksi polikondensasi yang membentuk gel N–A–S–H sebagai pengikat utama. Aktivator yang paling sering digunakan adalah kombinasi natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3).

Performa mortar geopolimer sangat bergantung pada komposisi larutan aktivator. Parameter desain campuran yang paling menentukan meliputi konsentrasi NaOH 10M, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2:1, serta rasio cairan terhadap bahan padat (L/S ratio) sebesar 0,3. Konsentrasi NaOH yang lebih tinggi biasanya mempercepat pelarutan *fly ash*, tetapi juga dapat memengaruhi kelecakan dan waktu set. Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ mengontrol viskositas campuran serta keseimbangan reaksi kimia, sedangkan rasio L/S berpengaruh terhadap *workability*, porositas, dan kuat tekan akhir mortar.

Menurut Olayinka et al. (2025), variasi komposisi aktivator secara signifikan memengaruhi porositas, kekuatan mekanik, serta tingkat penyusutan mortar geopolimer. Oleh karena itu, pengaturan parameter aktivator harus dilakukan secara presisi untuk mencapai kinerja mortar yang optimal (Olayinka et al., 2025).

2.6 Bahan Tambahan

Bahan tambahan dalam mortar digunakan untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik, seperti mengurangi susut, meningkatkan *workability*, serta mengendalikan retak rambut, sehingga mendukung peningkatan kinerja mortar sesuai kebutuhan aplikasi plesteran.

2.6.1 Serat pada Material Geopolimer

Serat pada material geopolimer digunakan untuk meningkatkan kuat dan kinerjanya, sekaligus mengurangi sifat rapuh pada bagian matriks sehingga material tidak mudah retak atau pecah. Penambahan serat berperan sebagai pengikat retakan yang mampu menahan serta memperlambat penyebaran retak. Selain itu, penambahan serat mampu meningkatkan kuat tarik dan kuat lentur, serta memperbaiki kemampuan material untuk mengalami deformasi setelah timbul retak awal (Sulianti et al., 2021).

Pengaruh penambahan serat terhadap beberapa sifat geopolimer, yaitu kemudahan pengerjaan, daya serap air, porositas, kuat mekanik, susut kering, kemampuan menahan tarik satu arah, ketangguhan terhadap retak, serta struktur mikro material (Zhang et al., 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serat selulosa dari limbah kertas (*wastepaper fiber*) sangat efektif dalam mengendalikan retak pada fase umur awal (*early age*), yaitu saat laju penyusutan pengeringan mencapai nilai yang paling kritis, di mana serat mampu menahan kelembapan *solid* dan mengurangi risiko retak rambut pada plesteran (Stevulova et al., 2021).

Penambahan serat selulosa pada dosis optimal antara 1% hingga 1,4% terbukti mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik secara signifikan melalui proses densifikasi pada struktur mikro matriks geopolimer. Meskipun demikian, penggunaan serat yang melebihi batas optimal dapat memicu penggumpalan atau aglomerasi. Kondisi ini justru akan meningkatkan porositas dan mengurangi kemudahan pengerjaan (*workability*) adukan saat proses aplikasi di lapangan. Selain itu, berdasarkan tinjauan ketahanan jangka panjang, komposit geopolimer berserat ini menunjukkan kinerja yang stabil setelah melalui siklus basah-kering, meskipun paparan terhadap lingkungan alkali membutuhkan perlakuan khusus pada serat agar integritas rekatan dengan matriks dapat tetap terjaga (Glenn et al., 2023).

Secara keseluruhan, penggunaan serat limbah kertas sebagai bahan tambah pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* tidak hanya efektif sebagai penahan retak rambut untuk aplikasi plesteran dinding, tetapi juga mendukung pengembangan

material yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan sesuai dengan standar SNI yang berlaku di Indonesia.

2.7 Serat Selulosa dari Limbah Kertas

Serat selulosa yang berasal dari limbah kertas adalah serat berbasis bio yang diperoleh dari kertas bekas, yang sebagian besar terdiri dari selulosa, suatu polimer alami yang melimpah di alam, dan memiliki kandungan selulosa yang tinggi. Penggunaan limbah kertas tidak hanya meningkatkan nilainya melalui daur ulang, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dan menurunkan jejak karbon secara keseluruhan (Stevulova et al., 2021).

Ekstraksi selulosa dari limbah kertas biasanya mencakup tahap penghilangan lignin untuk menghilangkan kontaminan dan lignin. Serat yang dihasilkan memiliki sifat hidrofilik, yang memungkinkannya menyerap dan melepaskan air secara bertahap. Dalam matriks geopolimer abu terbang, karakteristik ini memberikan manfaat pengeringan *solid*, yang menjaga kelembapan *solid*, sehingga secara signifikan mengurangi laju penyusutan akibat pengeringan yang merupakan suatu proses yang sering memicu retakan pada tahap awal (Kiamahalleh et al., 2024).

Dalam matriks geopolimer, serat selulosa berperan ganda sebagai *crack bridging agent* yang menjembatani retak mikro, memperlambat propagasi retak, serta mengurangi lebar retak, sekaligus sebagai *agen solid curing* yang menyimpan air saat pencampuran dan melepaskannya secara bertahap saat pengeringan untuk menekan *shrinkage*. Namun, lingkungan alkali tinggi pada sistem geopolimer menuntut pretreatment serat dan pengendalian fraksi volume agar ikatan serat matriks tetap optimal tanpa meningkatkan porositas secara berlebihan. Pengujian kuat tekan mortar berserat mengacu Mohammed & Fawzi, (2024), sedangkan pengujian susut mengacu pada SNI 03-1974-2011. Hasil pengujian menunjukkan bahwa serat selulosa berpotensi menjadi bahan tambah yang efektif untuk mengendalikan retak rambut pada mortar plesteran dinding.

2.8 Mekanisme Pengendalian Retak oleh Serat

Penggunaan serat dalam mortar geopolimer untuk pengendalian retak didasarkan pada prinsip bahan komposit untuk mengurangi tegangan *solid* yang timbul akibat penyusutan. Mekanisme utamanya adalah penyeimbangan serat, di mana serat mengisi retakan mikro dan menghambat penyebarannya melalui proses penarikan, sehingga menyerap energi dan mengurangi konsentrasi tegangan. Selain itu, serat berfungsi sebagai bahan pengawet *solid* dengan menyerap dan melepaskan air secara bertahap, sehingga secara efisien mengurangi penyusutan dan meningkatkan struktur pori matriks.

Efektivitas mekanisme ini sangat dipengaruhi oleh konsentrasi, rasio aspek, dan penyebaran serat. Penggunaan serat pada konsentrasi yang tepat antara 1% hingga 3% dapat secara efektif menyeimbangkan kekuatan mekanis dan pengendalian retak. Sebaliknya, penggunaan serat yang berlebihan dapat menyebabkan penggumpalan, meningkatkan porositas, dan menurunkan kinerja material (Glenn et al., 2023; Stevulova et al., 2021).

Dengan menggabungkan bahan pencegah retakan pasca-retak dan perubahan mikrostruktur, serat menjadi solusi yang efektif untuk mengurangi lebar dan frekuensi retakan halus pada mortar. Pengujian eksperimental mengenai pengaruh serat terhadap karakteristik mekanis mortar dapat mengacu pada Mohammed & Fawzi, (2024), yang menggunakan benda uji kubus berukuran $5 \times 5 \times 5$ cm untuk pengujian kuat tekan mortar geopolimer. Hasil pengujian tersebut mendukung analisis kuantitatif terhadap peningkatan kekuatan dan pengendalian retak pada mortar plester dinding.

2.9 Penelitian Terdahulu

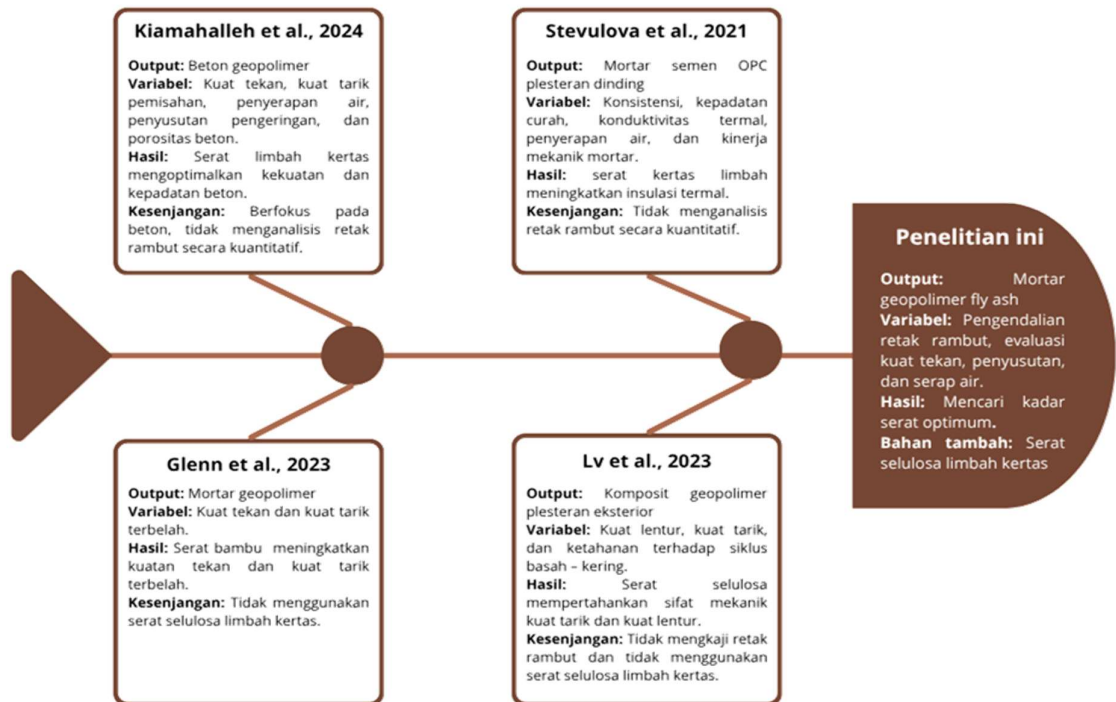
Penelitian terdahulu telah membahas perilaku retak dan kinerja mekanik pada geopolimer maupun material dengan penambahan serat. Namun, literatur tersebut umumnya masih terbatas pada beton struktural, komposit umum, atau mortar berbasis semen portland, sehingga terdapat ruang pengembangan penelitian pada konteks yang lebih spesifik.

Tabel 2.2. *Research Gap*

No	Sumber	Variabel	Hasil	Output	Pengujian	Bahan Tambah	Kesenjangan
1.	(Kiamahallah et al., 2024)	Kuat tekan, kuat tarik pemisahan, penyerapan air, penyusutan pengeringan, dan porositas beton.	Penambahan 1% serat limbah kertas mengoptimalkan kekuatan dan kepadatan beton.	Beton geopolimer.	Uji kuat tekan, uji kuat tarik pemisahan, uji susut pengeringan, uji serap air, analisa miskostruktur.	Serat kertas limbah (<i>wastepaper fiber</i>).	Berfokus pada beton, tidak menganalisis retak rambut secara kuantitatif, dan tidak menggunakan acuan standar SNI.
2.	(Stevulova et al., 2021)	Konsistensi, kepadatan curah, konduktivitas termal, penyerapan air, dan kinerja mekanik mortar.	Penambahan serat limbah meningkatkan insulasi termal.	Mortar semen OPC plesteran dinding.	Uji porositas, kuat tekan, kuat lentur, uji kuat adhesi, dan flow test.	Serat selulosa limbah kertas (<i>waste paper sludge</i>).	Tidak adanya analisis kuantitatif retak rambut.
3.	(Glenn et al., 2023)	Kuat tekan dan kuat tarik terbelah.	Penambahan serat bambu sebesar 1,4% meningkatkan kekuatan tekan 3x lipat dan kekuatan tarik terbelah 4x lipat.	Mortar geopolimer untuk bahan konstruksi, perkuatan struktur, dan plesteran.	Uji kuat tekan, uji kuat tarik terbelah, dan analisa komposisi.	Serat bambu pendek (<i>short bamboo fibers</i>)	Tidak menggunakan serat selulosa limbah kertas.
4.	(Lv et al., 2023)	Kuat lentur, kuat tarik, dan ketahanan terhadap siklus basah – kering.	Penambahan serat selulosa 3% mempertahankan sifat mekanik kuat tarik dan kuat lentur.	Komposit geopolimer plesteran eksterior yang diperkuat serat alami (NCFRG)	Uji siklus basah – kering, uji kuat lentur, dan uji kuat tarik.	Serat selulosa alami (<i>Natural Cellulose Fiber / NCF</i>).	Tidak mengkaji retak rambut dan tidak menggunakan serat selulosa limbah kertas.

2.10 Diagram *Fishbone Research Gap*

Berdasarkan uraian penelitian terdahulu, terdapat beberapa perbedaan konteks dan keterbatasan yang menunjukkan masih adanya celah penelitian pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* untuk aplikasi plester. Untuk memperjelas posisi penelitian ini terhadap penelitian sebelumnya, disajikan diagram research gap dalam bentuk fishbone berikut.



Gambar 2.1. Diagram *Fishbone Research Gap*

Berdasarkan penelitian terdahulu, mortar dan beton geopolimer berbasis *fly ash* rentan mengalami retak awal akibat *shrinkage* terhambat karena kuat tarik yang rendah dan sifat matriks yang getas. Stevulova et al., 2021 membuktikan bahwa pemanfaatan serat selulosa dari limbah kertas efektif untuk memperkuat mortar plesteran dan mendukung ekonomi sirkular (Stevulova et al., 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan 1% serat limbah kertas pada matriks yang mengandung metakaolin mampu mengoptimalkan kekuatan dan kepadatan, meskipun kajiannya terbatas pada aplikasi beton struktural dan belum

menganalisis retak rambut secara kuantitatif (Kiamahalleh et al., 2024). Sementara itu, penambahan menggunakan serat bambu dalam matriks geopolimer *fly ash* juga dapat menemukan peningkatan kuat mekanik (Glenn et al., 2023). Peneliti lainnya juga mengkaji komposit geopolimer berserat alami, tetapi kajiannya berfokus pada siklus basah-kering ekstrem dan tidak mengkaji pengendalian retak rambut pada umur awal (*early age*) (Lv et al., 2023).

Secara umum, serat selulosa limbah kertas menawarkan kombinasi mekanisme *bridging* dan *solid curing* yang efektif untuk pengendalian retak, dengan kadar optimum tertentu tanpa penurunan kuat tekan yang signifikan. Evaluasi kinerja mekanik dapat mengacu pada Mohammed & Fawzi, (2024), yang menggunakan benda uji kubus berukuran $5 \times 5 \times 5$ cm untuk pengujian kuat tekan mortar geopolimer. Namun, masih terdapat celah penelitian pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* dengan penambahan serat limbah kertas untuk plesteran dinding, khususnya dalam pengukuran kuantitatif retak rambut dan penerapan *curing* pada kondisi lingkungan lokal tanpa oven.