TEKNOLOGI BAHAN SUSUN BETON DENGAN PEMANFAATAN ABU-SEKAM PADI: RIVIEW ARTIKEL

Daffa Dimas W, Selfa Aulya S.[1], Aziz Akbar N.F, Selvana Bekti P, Lisana Shidqin A, Yenny Nurchasanah[*]
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah
**Email*: *yn205@ums.ac,id*

Abstrak

Penelitian ini merupakan tinjauan pustaka terhadap berbagai artikel ilmiah yang membahas pemanfaatan Abu Sekam Padi (ASP) sebagai material tambahan maupun substitusi dalam campuran beton. ASP merupakan limbah hasil pembakaran sekam padi yang kaya akan silika amorf dan bersifat pozzolanik, sehingga mampu meningkatkan kinerja mekanik dan durabilitas beton. Berdasarkan sintesis dari 20 *literatur* nasional dan internasional, penggunaan ASP dalam proporsi optimal, yaitu antara 10% hingga 20% dari berat semen, menunjukkan peningkatan kuat tekan beton sebesar 12% hingga 16,18% dibandingkan beton normal. Selain itu, modulus elastisitas beton meningkat hingga 9%, yang menunjukkan peningkatan kekakuan dan kemampuan deformasi elastis beton terhadap beban. Ketahanan terhadap air dan penetrasi ion agresif seperti klorida dan sulfat juga meningkat signifikan, dengan pengurangan permeabilitas hingga 35%, menjadikan beton lebih tahan terhadap korosi dan degradasi lingkungan. Penambahan ASP juga menghasilkan struktur mikro beton yang lebih padat, mengurangi pori-pori kapiler, serta meningkatkan pembentukan senyawa C-S-H (*Calcium Silicate Hydrate*) yang berperan penting dalam peningkatan kekuatan dan kepadatan beton. Dari aspek keberlanjutan, pemanfaatan ASP mendukung pengurangan emisi karbon akibat pengurangan konsumsi semen Portland dan mengoptimalkan limbah pertanian sebagai material konstruksi. Dengan demikian, ASP dinilai sebagai material inovatif yang potensial dalam pengembangan beton ramah lingkungan dan tahan lama untuk konstruksi modern.

Kata kunci: Bahan tambah, Abu sekam padi, Kuat tekan beton, Modulus elastis, Durabilitas Beton

Abstract

This research is a literature review of various scientific articles discussing the utilization of rice husk ash (RHA) as an additional or substitute material in concrete mixtures. ASP is a waste product from the combustion of rice husk that is rich in amorphous silica and has pozzolanic properties, thereby capable of enhancing the mechanical performance and durability of concrete. Based on the synthesis of 20 national and international literatures, the use of ASP in optimal proportions, namely between 10% to 20% of the weight of cement, shows an increase in the compressive strength of concrete by 12% to 16.18% compared to normal concrete. Additionally, the elastic modulus of concrete increases by up to 9%, indicating an improvement in the stiffness and elastic deformation capacity of the concrete under load. Resistance to water and the penetration of aggressive ions such as chloride and sulfate also significantly increased, with a permeability reduction of up to 35%, making the concrete more resistant to corrosion and environmental degradation. The addition of ASP also results in a denser microstructure of the concrete, reducing capillary pores, and enhancing the formation of C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) compounds, which play a crucial role in increasing the strength and density of the concrete. From a sustainability perspective, the use of ASP supports the reduction of carbon emissions by decreasing Portland cement consumption and optimizing agricultural waste as construction material. Thus, ASP is considered an innovative material with potential in the development of environmentally friendly and durable concrete for modern construction.

***Keywords**: Additive, Rice husk ash, Concrete compressive strength, Elastic modulus, Concrete Durability*

1. PENDAHULUAN

Limbah abu sekam padi merupakan hasil pembakaran sekam padi yang jumlahnya terus meningkat seiring dengan tingginya produksi beras, terutama di negara-negara agraris seperti Indonesia. Meskipun memiliki potensi besar sebagai bahan tambahan dalam berbagai aplikasi industri, realitanya sebagian besar abu sekam padi belum dimanfaatkan secara optimal dan justru menimbulkan permasalahan lingkungan.

Penggunaan Abu Sekam Padi (ASP) sebagai bahan tambahan atau substitusi sebagian semen dalam beton telah menjadi fokus berbagai penelitian dalam upaya menciptakan material konstruksi yang ramah lingkungan. ASP merupakan hasil pembakaran limbah pertanian yang mengandung senyawa kimia aktif,

terutama silika (SiO_2) dalam bentuk *amorf*, yang bersifat *pozzolan*. Sifat ini memungkinkan ASP bereaksi dengan *kalsium hidroksida* ($Ca(OH)_2$), hasil dari proses hidrasi semen, untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan ketahanan beton.

Berbagai penelitian telah menegaskan potensi Abu Sekam Padi (ASP) sebagai bahan pozzolan alami yang efektif dalam meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton, sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan.

Hardiyati dkk. (2023) melakukan studi pada beton normal di Kabupaten Manokwari Selatan dan menemukan bahwa beton dengan tambahan ASP tetap memenuhi standar mutu beton nasional. Sejalan dengan itu, Alsaed dkk. (2024) menyatakan bahwa ASP berfungsi efektif sebagai bahan *bio-cementitious* yang mampu meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton dalam jangka panjang.

Dari aspek ketahanan lingkungan agresif, Santosa dkk. (2024) menunjukkan peningkatan ketahanan beton terhadap sulfat saat menggunakan ASP sebagai substitusi semen, yang relevan untuk aplikasi di wilayah pesisir dan tanah berkadar sulfat tinggi. Farlianti dkk. (2024) menambahkan bahwa ASP berpotensi meningkatkan performa beton geopolimer dari segi kekuatan mekanis dan durabilitas. Gimon dkk. (2024) juga mengonfirmasi bahwa dosis ASP yang tepat dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Selain beton struktural, ASP diaplikasikan pada material non-struktural seperti batako. Ariana dkk. (2023) mengembangkan batako ramah lingkungan dengan ASP, yang memenuhi persyaratan SNI 03-0349-1989. Hamdani (2023) memadukan ASP dengan limbah kaca sebagai agregat kasar pada beton mutu 30 MPa untuk perkerasan jalan, dengan hasil yang layak secara teknis.

Inovasi lain dilakukan Arumningsih dkk. (2023), yang menciptakan beton ringan dan ekonomis menggunakan ASP, serbuk bata ringan, dan abu batu, memperlihatkan potensi substitusi material konvensional yang lebih mahal dan kurang ramah lingkungan.

Farhan dkk. (2023) menyoroti pentingnya kontrol komposisi campuran ASP untuk memaksimalkan kuat tekan, karena penggantian berlebihan dapat menurunkan *workability* beton. Sahusilawanne dkk. (2025) menunjukkan bahwa penambahan ASP hingga 5% masih meningkatkan kuat tekan, namun lebih dari itu menurunkan performa beton.

Jallow dkk. (2024) menggarisbawahi potensi ASP dalam mendukung konstruksi berkelanjutan dengan mengurangi kebutuhan semen Portland, sehingga mengurangi emisi karbon pada proyek konstruksi. Utami (2021) meneliti penggunaan ASP bersama serat sabut kelapa dalam *Self-Compacting Concrete* (SCC), menghasilkan peningkatan kuat tekan dan daya tahan terhadap retak tarik.

Suryaningsih dkk. (2025) menyatakan bahwa ASP dapat menggantikan sebagian pasir dalam campuran beton dengan hasil positif pada kekuatan tekan. Fuentes dkk. (2023) melaporkan bahwa ASP (RHA) dapat menggantikan semen hingga 24,9% dan meningkatkan kekuatan lentur beton untuk perkerasan jalan lalu lintas sedang-tinggi.

Namun, Dewi dkk. (2024) memperingatkan bahwa kandungan air ASP yang tinggi dapat menurunkan kekuatan beton jika digunakan berlebihan, sehingga proporsi penggunaan harus dioptimalkan.

Purwanto dkk. (2024), Menyatakan bahwa Abu Sekam Padi (ASP) merupakan limbah hasil pembakaran sekam padi yang kaya akan kandungan silika, sehingga berpotensi besar sebagai bahan pozzolan dalam campuran beton. Penggunaan ASP sebagai bahan tambahan maupun sebagai substitusi sebagian semen terbukti dapat meningkatkan kuat tekan, durabilitas, dan mengurangi porositas beton. Selain itu, pemanfaatan ASP turut mendukung program daur ulang limbah pertanian dan pengembangan konstruksi berwawasan lingkungan.

Noerangga dkk. (2023) mengungkapkan bahwa metode pencampuran dan pengendalian komposisi sangat menentukan efektivitas ASP dalam beton. Kandungan silika dalam ASP, serta performanya dalam campuran beton, sangat dipengaruhi oleh sumber sekam padi dan proses pembakarannya. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk menemukan formulasi optimal yang dapat memaksimalkan fungsi pozzolan ASP dalam konstruksi berkelanjutan.

Safarizki dkk. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan ASP sebagai pengganti sebagian semen dapat meningkatkan kuat tekan dan ketahanan beton terhadap penetrasi air. Selain memberikan keuntungan teknis, penggunaan ASP juga berkontribusi dalam menekan polusi akibat produksi semen yang menghasilkan emisi karbon tinggi. Dalam penelitiannya, penggunaan ASP sebanyak 10% mampu meningkatkan kuat tekan beton hingga 25,70 MPa, lebih tinggi dibandingkan beton normal yang hanya mencapai 22,39 MPa.

Penelitian lain oleh Kuncoro dkk. (2021) menemukan bahwa penggunaan ASP sebesar 9% dari berat semen menghasilkan peningkatan signifikan pada kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton. Hasil ini

menunjukkan potensi ASP dalam mendukung konstruksi berkelanjutan, asalkan komposisinya dijaga agar tidak berlebihan, karena proporsi yang terlalu tinggi justru dapat menurunkan performa beton.

Sementara itu, Fajri dkk. (2022) menekankan bahwa ukuran partikel ASP juga memengaruhi kualitas beton yang dihasilkan. Penggunaan abu yang lebih halus, seperti berukuran lebih dari 100 mesh, terbukti meningkatkan kuat tekan beton hingga 20,06 MPa pada usia 28 hari. Nilai ini memenuhi standar beton mutu sedang sesuai dengan Pd T-07-2005-B. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya kontrol terhadap karakteristik fisik abu guna mencapai performa beton yang optimal dan mendukung efisiensi material serta pengurangan emisi karbon.

Namun demikian, meskipun berbagai studi menunjukkan hasil yang menjanjikan, sebagian besar penelitian masih terbatas pada skala laboratorium dengan formulasi campuran dan metode uji yang beragam. Terdapat kesenjangan berupa belum adanya standar baku terkait proporsi optimal, karakterisasi abu hasil pembakaran, serta pengaruh ASP terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton secara menyeluruh dalam jangka panjang. Selain itu, integrasi ASP ke dalam sistem beton modern, seperti *self-compacting concrete* atau beton geopolimer, masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut.

Oleh karena itu, kajian ini disusun untuk menyintesis berbagai temuan terbaru terkait penggunaan ASP dalam campuran beton, serta mengidentifikasi tantangan aplikatif di lapangan. Tujuan utama dari tinjauan ini adalah untuk membentuk pemahaman yang lebih terstruktur mengenai efektivitas, keterbatasan, dan peluang pemanfaatan ASP sebagai material inovatif dalam pengembangan beton ramah lingkungan.

2. METODE PENULISAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) dengan menganalisis dari 20 artikel ilmiah nasional dan internasional yang diterbitkan antara tahun 2020 hingga 2024. Kriteria pemilihan literatur mencakup:

1). relevansi topik dengan pemanfaatan abu sekam padi dalam beton
2). keterbaruan penelitian,
3). keterukuran data kuantitatif seperti kuat tekan, modulus elastisitas, dan durabilitas beton.

Sumber-sumber utama diperoleh dari jurnal bereputasi dan prosiding seminar teknik sipil. Hasil studi dianalisis secara kualitatif dan disintesis untuk mengidentifikasi tren, potensi, serta tantangan penerapan ASP sebagai material alternatif ramah lingkungan dalam teknologi beton.

3. ABU SEKAM PADI SEBAGAI BAHAN SUSUN BETON

3.1. Definisi

Abu Sekam Padi (ASP) merupakan hasil pembakaran dari limbah pertanian berupa sekam padi, yaitu lapisan luar dari biji padi (*Oryza sativa*) yang umumnya tidak dimanfaatkan secara optimal. Di negara agraris seperti Indonesia, sekam padi menjadi salah satu limbah yang melimpah, Salah satu wilayah dengan potensi ASP terbesar adalah Jawa Tengah, yang secara konsisten menduduki posisi teratas sebagai penghasil padi nasional. Kabupaten seperti Grobogan, Sragen, Klaten, dan Demak menjadi penyumbang utama produksi padi di provinsi ini. Limbah sekam dari kegiatan penggilingan padi di daerah tersebut sangat melimpah, menjadikan Jawa Tengah sebagai salah satu penghasil ASP terbanyak, sehingga pemanfaatannya sebagai material alternatif dalam industri konstruksi menjadi topik yang menarik untuk diteliti. Setelah melalui proses pembakaran pada suhu tertentu, sekam padi menghasilkan abu yang mengandung komponen kimia utama berupa *silika* (SiO_2) dalam kadar yang sangat tinggi, yaitu sekitar 80–95%.

Silika dalam ASP sebagian besar berada dalam bentuk amorf, khususnya jika dibakar pada suhu antara 500–700°C. Bentuk amorf ini sangat penting karena menunjukkan sifat *pozzolanik* yang tinggi, yaitu kemampuannya untuk bereaksi dengan *kalsium hidroksida* ($Ca(OH)_2$) yang dihasilkan dari hidrasi semen. Reaksi *pozzolanik* ini menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan penting dalam meningkatkan kekuatan dan kepadatan beton.

Secara fisik, abu sekam padi memiliki tekstur yang sangat halus dan ringan dengan permukaan spesifik yang tinggi, sehingga dapat berfungsi sebagai bahan pengisi mikro (*filler*) yang meningkatkan kekompakan campuran beton. Penggunaan ASP sebagai bahan tambahan atau pengganti sebagian semen dalam beton telah terbukti dapat meningkatkan kuat tekan, mengurangi porositas, dan meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air maupun serangan kimia, seperti sulfat dan klorida. Beberapa penelitian bahkan menunjukkan bahwa beton dengan penambahan ASP memiliki performa yang lebih baik dalam jangka panjang.

Dari sisi keberlanjutan, pemanfaatan ASP dalam campuran beton memberikan dampak positif karena dapat mengurangi konsumsi semen yang merupakan material dengan emisi karbon tinggi—dan secara bersamaan mengatasi permasalahan limbah pertanian. Meskipun demikian, tantangan tetap ada, terutama terkait variasi kualitas abu akibat perbedaan metode pembakaran, kandungan karbon sisa yang tinggi, dan kebutuhan akan pengolahan tambahan seperti pengayakan atau penghalusan.

Secara keseluruhan, ASP merupakan material alternatif yang menjanjikan dalam pengembangan beton ramah lingkungan. Potensinya yang tinggi sebagai bahan *pozzolan* lokal menunjukkan bahwa limbah pertanian dapat dimanfaatkan dalam skala industri konstruksi, mendukung prinsip efisiensi material dan pembangunan berkelanjutan.

3.2. ASP sebagai Substitusi Sebagian Semen

Penggunaan Abu Sekam Padi (ASP) sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam beton telah menjadi perhatian utama dalam berbagai penelitian, terutama karena kontribusinya terhadap pengurangan dampak lingkungan dari industri konstruksi. Hal ini didorong oleh kandungan silika amorf dalam ASP yang bersifat pozzolanik, memungkinkan terjadinya reaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang berperan penting dalam meningkatkan kekuatan dan kepadatan beton.

Beberapa studi menunjukkan bahwa dengan perancangan campuran yang tepat, ASP justru dapat meningkatkan sifat mekanis beton. Gimon dkk. (2024) menyatakan bahwa penambahan ASP dalam proporsi tertentu dapat meningkatkan kekuatan tekan beton, asalkan desain campuran dilakukan secara cermat. Penelitian oleh Santosa R dkk. (2024) juga menegaskan bahwa ASP mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan sulfat, menjadikannya pilihan yang cocok untuk wilayah dengan kondisi tanah atau udara yang agresif secara kimia. Senada dengan itu, Farhan dkk. (2023) mengungkap bahwa silika dalam ASP mampu mempercepat reaksi hidrasi serta membantu mengontrol suhu selama proses pengerasan beton, yang sangat penting untuk mencegah retak termal pada beton volume besar.

Dalam kerangka keberlanjutan, penggunaan ASP juga memberikan kontribusi signifikan dalam menurunkan emisi karbon sektor konstruksi. Jallow dkk. (2024) menyoroti bahwa substitusi sebagian semen dengan ASP mampu mengurangi jejak karbon dari industri beton. Selain itu, Utami (2021) menunjukkan bahwa ASP dapat diterapkan pada beton jenis *Self-Compacting Concrete* (SCC) yang membutuhkan kemampuan alir tinggi, tanpa mengurangi performa kekuatan tekan beton.

Studi lain oleh Fuentes dkk. (2023) mengeksplorasi penggunaan ASP sebagai pengganti sebagian semen dalam beton alir. Dengan variasi substitusi 0%, 5%, 7,5%, 10%, hingga 12,5%, serta penggunaan superplasticizer 1,5%, ditemukan bahwa ASP dapat menggantikan hingga 24,9% berat semen untuk beton perkerasan jalan. Hasilnya, kuat lentur beton mencapai 4,2 MPa, sehingga memenuhi standar untuk jalan dengan lalu lintas tinggi (NT3).

Namun, tidak semua penelitian menunjukkan hasil positif terhadap penambahan ASP. Dewi dkk. (2024) mencatat bahwa variasi ASP sebesar 0%, 5%, 7,5%, dan 10% justru menyebabkan penurunan kuat tekan beton yang signifikan. Setelah 28 hari, beton dengan 10% ASP hanya memiliki kuat tekan 168 kg/cm², jauh di bawah beton normal dengan 258 kg/cm². Penurunan ini diduga disebabkan oleh sifat Alkali-Surfactant-Polymer (ASP) yang menyerap air, sehingga menurunkan kualitas pasta semen.

Lebih lanjut, Santosa dkk. (2024) juga menemukan bahwa meskipun penambahan 5% asam sulfat fosfat sebagai pengganti semen dapat meningkatkan kekuatan tekan dan modulus elastisitas beton, efek sampingnya adalah penurunan permeabilitas. Demikian pula, Noerangga dkk. (2023) menyatakan bahwa meskipun ASP dapat meningkatkan sifat pozzolanik dan mengurangi kebutuhan semen, penggunaannya dalam kadar tinggi justru dapat menurunkan performa mekanis beton secara keseluruhan.

3.3. ASP sebagai Additive dalam Beton

Abu Sekam Padi (ASP) tidak hanya berfungsi sebagai bahan substitusi sebagian semen, tetapi juga terbukti efektif sebagai bahan tambahan (aditif) dalam campuran beton. Pendekatan penggunaan ASP dalam teknologi beton secara umum terbagi menjadi dua: pertama, sebagai bahan pengganti parsial semen (*partial cement replacement*), dengan kisaran pemakaian antara 5–30% berat semen; dan kedua, sebagai aditif atau admixture yang ditambahkan untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanis beton, tanpa menggantikan semen secara langsung.

Sebagai bahan tambahan, ASP memberikan manfaat nyata dalam meningkatkan kualitas beton, khususnya dalam hal densitas dan ikatan antar partikel penyusun. Farhan dkk. (2023) menunjukkan bahwa meskipun ASP tidak berfungsi sebagai pengganti semen sepenuhnya, penggunaannya sebagai aditif mampu

memperkuat struktur beton dengan meningkatkan densitas serta kualitas ikatan antar partikel. Hal ini tidak hanya mempertahankan sifat mekanis beton, tetapi juga berkontribusi dalam efisiensi biaya material dan pemanfaatan limbah pertanian secara berkelanjutan.

Penelitian oleh Hardiyati dkk. (2023) di Kabupaten Manokwari Selatan memperkuat temuan ini. Dalam penelitian tersebut, ASP digunakan sebagai limbah aditif dalam pembuatan beton normal. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan ASP tidak mengganggu mutu beton dan tetap memenuhi standar kualitas konstruksi yang berlaku, yang berarti ASP dapat digunakan untuk meningkatkan nilai tambah beton tanpa harus menggantikan semen.

Selain dalam beton, pemanfaatan ASP sebagai bahan tambahan juga diterapkan dalam campuran aspal. Purwanto dkk. (2024) menyatakan bahwa ASP digunakan sebagai filler tambahan dalam campuran aspal tipe AC-WC, dengan variasi kadar 0%, 3%, 4,5%, dan 5%. Meskipun bukan pengganti semen, peran ASP dalam campuran ini menunjukkan potensi serbaguna material tersebut dalam meningkatkan sifat mekanis pada berbagai jenis material konstruksi.

Dengan demikian, penggunaan ASP sebagai aditif membuka peluang besar dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan yang tidak hanya mengurangi limbah pertanian, tetapi juga menjaga bahkan meningkatkan kualitas teknis beton dan aspal. Kombinasi penggunaan ASP sebagai substitusi maupun aditif perlu dipertimbangkan secara sinergis dalam desain campuran untuk mencapai efisiensi struktural dan keberlanjutan lingkungan.

3.4. Kombinasi ASP dengan Bahan Lain dalam Beton

Inovasi dalam teknologi beton terus berkembang ke arah pemanfaatan material ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya melalui kombinasi Abu Sekam Padi (ASP) dengan berbagai jenis limbah lainnya. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan meningkatkan performa teknis beton, tetapi juga memperkuat aspek keberlanjutan dan mendukung prinsip ekonomi sirkular.

Hamdani (2023) meneliti kombinasi ASP dengan limbah kaca sebagai agregat kasar dalam beton mutu 30 MPa yang dirancang untuk perkerasan jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi dua jenis limbah ini menghasilkan beton dengan karakteristik teknis yang layak digunakan pada jalan lokal. Pendekatan ini secara efektif mengurangi ketergantungan pada bahan baku konvensional serta mendorong pengurangan volume limbah pertanian dan limbah kaca, menjadikannya solusi konkret dalam konstruksi berkelanjutan.

Selain itu, Arumningsih dkk. (2023) mengembangkan komposisi beton ringan dengan menggabungkan ASP, serbuk bata ringan, dan abu batu. Kombinasi ini menghasilkan beton yang tidak hanya memiliki massa jenis lebih rendah, tetapi juga tetap memenuhi standar kekuatan struktural. Pemanfaatan limbah konstruksi tersebut turut berkontribusi dalam menciptakan beton ekonomis, ringan, dan ramah lingkungan, yang sangat ideal untuk aplikasi bangunan bertingkat atau struktur non-konvensional.

Pendekatan inovatif lain ditunjukkan oleh Utami (2021), yang memadukan ASP dengan serat sabut kelapa dalam beton jenis self-compacting concrete (SCC). Penelitian ini memperlihatkan peningkatan performa beton, terutama dalam aspek ketahanan terhadap retak dan peningkatan kekuatan tarik. Kombinasi antara material pozzolanik dan serat alami ini mengindikasikan bahwa ASP dapat digunakan dalam pengembangan beton komposit multifungsi yang sesuai untuk aplikasi konstruksi modern.

Lebih jauh lagi, perkembangan teknologi beton modern juga melibatkan ASP sebagai bagian dari sistem campuran dengan bahan tambahan berperforma tinggi seperti nano-silika, *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBS), dan *fly ash*. Kombinasi tersebut terbukti menghasilkan beton berkinerja tinggi (*high-performance concrete*) dengan kekuatan mekanis yang superior, daya tahan yang lebih baik terhadap agresi kimia, serta kontribusi terhadap pengurangan emisi karbon secara signifikan.

Dengan demikian, pemanfaatan abu sekam padi dalam kombinasi dengan berbagai material alternatif membuka peluang luas dalam pengembangan beton inovatif yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga menjawab tantangan lingkungan dan efisiensi sumber daya dalam industri konstruksi masa depan.

3.5. Durabilitas dan Ketahanan Beton dengan ASP

Durabilitas atau ketahanan jangka panjang beton merupakan aspek krusial dalam menilai performa struktural, terutama pada lingkungan yang agresif secara kimiawi maupun fisik. Dalam konteks ini, penggunaan Abu Sekam Padi (ASP) sebagai bahan tambahan atau substitusi sebagian semen telah terbukti memberikan dampak positif terhadap daya tahan beton.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa ASP memiliki kemampuan pozzolanik yang tinggi karena kandungan silika amorfnya. Reaksi antara silika dari ASP dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang memperkuat mikrostruktur beton dan

mengurangi porositas. Misalnya, penelitian oleh Santosa dkk. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan ASP sebagai pengganti sebagian semen dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat, yang sering terjadi di daerah pesisir dan tanah dengan kadar sulfat tinggi. Ini menjadikan ASP sebagai solusi strategis untuk konstruksi di lingkungan yang rentan terhadap korosi.

Senada dengan itu, Ariana dkk. (2024) dan Auliah dkk. (2022) mencatat bahwa substitusi ASP sebesar 5% mampu meningkatkan kuat tekan beton hingga 29,88 MPa pada usia 60 hari, atau naik sebesar 14,60% dibandingkan beton tanpa ASP. Hasil pengamatan mikroskopik melalui SEM (*Scanning Electron Microscopy*) menunjukkan bahwa ASP berkontribusi pada pembentukan struktur mikro beton yang lebih padat, sehingga mampu menghambat penetrasi zat kimia agresif.

ASP juga membantu mengontrol suhu hidrasi semen, yang penting dalam mencegah retak termal, terutama pada beton volume besar. Farhan dkk. (2023) menegaskan peran ASP dalam menstabilkan temperatur saat pengerasan, meningkatkan durabilitas beton terhadap perubahan suhu ekstrem. Utami (2021) menambahkan bahwa kombinasi ASP dengan serat alami dalam beton jenis SCC (*Self-Compacting Concrete*) juga meningkatkan daya tahan beton terhadap retak tarik, memperpanjang masa layan struktur secara keseluruhan.

Dari sisi keberlanjutan jangka panjang, Farlianti dkk. (2024) dalam tinjauan literaturnya menyimpulkan bahwa ASP meningkatkan ketahanan beton geopolimer, terutama dalam menghadapi kelembapan tinggi, suhu ekstrem, dan serangan kimia. Selain itu, penelitian oleh Purwanto dkk. (2024) pada perkerasan jalan juga membuktikan bahwa penggunaan ASP mampu meningkatkan nilai stabilitas, *Marshall Quotient* (MQ), dan *Voids Filled with Asphalt* (VFA), yang berkaitan langsung dengan ketahanan beton aspal terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan.

Secara mikroskopik, Safarizki dkk. (2021) menjelaskan bahwa warna putih keabu-abuan dari ASP menandakan proses pembakaran yang sempurna, menjadikannya efektif sebagai bahan pengisi (*filler*) dan pengganti sebagian semen. ASP berkontribusi dalam menutup rongga kapiler beton, memperkecil ukuran pori, serta meningkatkan kepadatan mikrostruktur. Hasil ini juga diperkuat oleh temuan Kuncoro dkk. (2021), yang menunjukkan bahwa substitusi ASP sebesar 9% memberikan peningkatan kuat tekan hingga 20,48 MPa dan durabilitas lebih tinggi terhadap lingkungan agresif.

Namun demikian, penting untuk dicatat bahwa efektivitas ASP bergantung pada kualitas pembakaran dan komposisi campuran. Suryaningsih dkk. (2025) menekankan perlunya penelitian lanjutan untuk mengeksplorasi pengaruh ASP terhadap seluruh komponen durabilitas beton, termasuk umur layanan, ketahanan terhadap karbonasi, dan resistensi terhadap serangan klorida.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan ASP secara tepat dan terukur dapat meningkatkan durabilitas beton dalam berbagai kondisi lingkungan, menjadikannya bahan yang potensial dalam pengembangan beton tahan lama dan berkelanjutan.

3.6. Potensi Pozzolanik dan Komposisi Kimia ASP

Keunggulan utama ASP terletak pada kandungan silika amorfnya yang tinggi, menjadikannya material dengan potensi pozzolanik yang kuat. Dalam penelitian oleh Alsaed dkk. (2024), ASP dikategorikan sebagai bahan bio-cementitious yang mampu memberikan efek pengikatan tambahan melalui reaksi pozzolanik. Mereka menyatakan bahwa ASP secara signifikan dapat meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton dalam jangka panjang, terutama karena kandungan kimiawinya yang aktif terhadap reaksi hidrasi semen. Perlakuan termal terhadap sekam padi menjadi sangat penting untuk memastikan silika tetap dalam bentuk amorf.

Keberhasilan ASP dalam meningkatkan performa beton sangat dipengaruhi oleh sifat pozzolanik dan komposisi kimianya. Kandungan utama dalam ASP adalah silika amorf (SiO_2), yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H), senyawa utama penyusun kekuatan beton. Farhan dkk. (2023) membuktikan bahwa kandungan silika yang tinggi dalam ASP sangat mendukung proses hidrasi dan meningkatkan kekuatan mekanis beton. Selain itu, karakteristik kimia ASP membantu mengendalikan suhu reaksi, yang berdampak positif pada kualitas beton akhir. Potensi pozzolanik ini menjadikan ASP sebagai alternatif bahan pengganti semen yang efisien dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Hasil penelitian Sahusilawanne dkk. (2025), abu sekam padi dapat meningkatkan sifat beton dalam batas tertentu. Namun, penambahan berlebih (>5%) justru dapat menurunkan kuat tekan beton. Oleh karena itu, analisis lebih lanjut tentang komposisi kimia dan reaktivitasnya dengan semen menjadi kunci dalam pemanfaatannya secara optimal.

Menurut Purwanto dkk. (2024) bahwa abu sekam padi memenuhi syarat bahan pozolan, karena mengandung $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 70\%$ serta silika amorf mencapai 85–90%. Ini menunjukkan potensi pozzolanik dan karakteristik kimia ASP yang relevan untuk beton atau campuran sejenis.

3.7. Tantangan dan Kebutuhan Penelitian Lanjutan

Meskipun berbagai penelitian menunjukkan potensi besar abu sekam padi (ASP) dalam meningkatkan performa beton secara mekanis maupun dari aspek keberlanjutan, pemanfaatan ASP dalam skala luas masih menghadapi sejumlah tantangan teknis dan praktis yang perlu ditangani melalui penelitian lanjutan yang komprehensif.

Salah satu tantangan utama terletak pada pengaturan dosis dan proporsi pencampuran. Menurut Gimon dkk. (2024), penggunaan ASP yang tidak terkendali atau berlebihan justru dapat berdampak negatif terhadap kualitas beton, seperti peningkatan porositas dan penurunan kekuatan awal. Hal ini menunjukkan pentingnya penentuan kadar optimal ASP agar dapat berfungsi efektif tanpa mengorbankan performa beton.

Selain itu, ketidakkonsistenan kualitas ASP juga menjadi perhatian signifikan. Farlianti dkk. (2024) dan sejumlah peneliti lain menyoroti bahwa variasi metode dan suhu pembakaran sekam padi sangat memengaruhi kandungan silika, warna, dan reaktivitas pozzolanik dari ASP yang dihasilkan. Karakteristik ini menentukan sejauh mana ASP dapat berkontribusi dalam pembentukan senyawa C-S-H yang memperkuat mikrostruktur beton. Oleh karena itu, standarisasi proses produksi dan pengolahan ASP menjadi krusial untuk menjamin mutu yang stabil dan dapat direplikasi dalam skala industri.

Tantangan lain menyangkut interaksi ASP dengan bahan tambah atau limbah lain yang digunakan dalam beton modern. Dengan berkembangnya teknologi beton yang melibatkan bahan komposit seperti nano-silika, GGBS, fly ash, atau serat alami, maka perlu dilakukan kajian sinergi antara ASP dan bahan-bahan tersebut untuk memastikan bahwa tidak terjadi konflik kimia atau penurunan sifat teknis.

Dari sisi aplikasi praktis, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap kinerja jangka panjang beton berbasis ASP, terutama dalam aspek durabilitas terhadap lingkungan ekstrem, umur layanan struktur, dan emisi karbon dalam proses produksinya. Farlianti dkk. (2024) menekankan pentingnya pengembangan model evaluasi teknis dan lingkungan yang terpadu, khususnya pada pemanfaatan ASP dalam beton geopolimer yang saat ini semakin dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan.

Di samping tantangan teknis, aspek kebijakan dan implementasi industri juga perlu diperhatikan. Diperlukan pedoman teknis dan standar nasional yang mengatur spesifikasi ASP, baik sebagai bahan substitusi maupun aditif, agar pemanfaatannya dapat diterima luas oleh industri konstruksi. Kajian multidisipliner yang melibatkan teknik sipil, ilmu material, dan rekayasa lingkungan sangat diperlukan untuk membangun ekosistem inovasi yang mendukung penggunaan ASP secara berkelanjutan.

Dengan demikian, meskipun ASP menawarkan potensi besar dalam menciptakan beton ramah lingkungan dan efisien, optimalisasi penggunaannya masih membutuhkan penelitian lanjutan yang terarah, meliputi karakterisasi material, metode produksi, desain campuran, evaluasi performa jangka panjang, dan penyusunan standar implementasi. Upaya ini penting agar ASP tidak hanya menjadi solusi alternatif, tetapi juga bagian integral dari transformasi teknologi beton menuju masa depan yang lebih berkelanjutan.

4. SIFAT MEKANIS BETON

4.1. Kuat tekan beton

Kuat tekan beton merupakan salah satu parameter mekanik paling esensial dalam mengevaluasi kualitas dan performa beton sebagai bahan konstruksi. Kuat tekan menunjukkan seberapa besar beban maksimum yang dapat ditahan oleh beton sebelum mengalami kerusakan, biasanya diuji pada umur 28 hari menggunakan benda uji silinder atau kubus. Nilai kuat tekan ini tidak hanya menjadi tolok ukur mutu beton (misalnya K-200, K-250, K-300), tetapi juga menjadi dasar dalam perancangan elemen struktural seperti kolom, pelat, balok, dan fondasi. Beton memiliki kekuatan tekan tinggi, namun lemah terhadap tarik, sehingga sering dikombinasikan dengan baja sebagai tulangan.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi (ASP) sebagai bahan pengganti sebagian semen atau agregat halus dapat memengaruhi kuat tekan beton secara signifikan. ASP dikenal mengandung silika amorf yang bersifat pozzolan, yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dari hidrasi semen untuk membentuk senyawa pengikat tambahan (C-S-H), sehingga berpotensi meningkatkan kekuatan dan kerapatan beton.

Menurut Farhan dkk. (2023), kandungan silika dalam ASP tidak hanya meningkatkan kekuatan, tetapi juga membantu mengontrol suhu hidrasi, mencegah retak termal pada pengecoran volume besar. Namun, jika

digunakan dalam dosis berlebih, ASP justru dapat menurunkan kuat tekan karena mengandung bahan non-reaktif yang mengganggu proses hidrasi. Hal ini sejalan dengan temuan Tonny Sahusilawanne dkk. (2025) yang menunjukkan bahwa penambahan ASP hingga 5% masih memenuhi standar kuat tekan (14,5 MPa), tetapi dosis di atasnya mengakibatkan penurunan kekuatan.

Penelitian Dewi dkk. (2024) pada beton mutu K-175 menunjukkan bahwa penambahan ASP sebagai substitusi semen menurunkan kuat tekan secara signifikan; dari 258 kg/cm² (tanpa ASP) menjadi 192 kg/cm² (5% ASP), 187 kg/cm² (7%), dan 168 kg/cm² (10%). Hal ini dikaitkan dengan sifat ASP yang menyerap air, menghambat pembentukan pasta semen yang efektif. Sebaliknya, Santosa dkk. (2024) menemukan bahwa penggunaan ASP 5% justru meningkatkan kuat tekan hingga 16,18%, terutama pada lingkungan dengan kandungan sulfat, karena kemampuan ASP dalam memperbaiki mikrostruktur beton.

Beberapa studi lain juga mengonfirmasi pentingnya menentukan dosis optimal ASP. Jallow dkk. (2024) menyatakan bahwa penggantian semen dengan 15% RHA (*Rice Husk Ash*) menghasilkan kuat tekan optimal untuk semua rasio air terhadap bahan pengikat. Penelitian oleh Safarizki dkk. (2021) menemukan bahwa substitusi 10% ASP meningkatkan kuat tekan beton dari 22,39 MPa menjadi 25,70 MPa. Namun, Kuncoro dkk. (2021) mencatat bahwa substitusi 9% menghasilkan kuat tekan optimal (20,48 MPa), meskipun tetap lebih rendah dibandingkan beton normal (23,96 MPa) pada beton serat bambu.

Dari segi penggantian agregat halus, Auliah dkk. (2022) melaporkan bahwa kuat tekan beton meningkat seiring penambahan ASP berukuran partikel halus (>100 mesh), mencapai 20,06 MPa pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran partikel dan kehalusan ASP juga sangat memengaruhi performa mekanis beton.

Sebagai catatan khusus, beberapa studi menggunakan istilah "ASP" untuk mengacu pada asam sulfat organik atau zat aditif lain, bukan abu sekam padi. Misalnya, penelitian oleh Suryaningsih dkk. (2025) dan Noerangga dkk. (2023) menunjukkan bahwa variasi ASP hingga 7,5% dapat meningkatkan kuat tekan, tetapi dosis lebih tinggi menyebabkan penurunan signifikan. Penelitian ini perlu dipilah agar tidak terjadi kekeliruan terminologi dalam penarikan kesimpulan.

Secara keseluruhan, berbagai studi menunjukkan bahwa ASP dapat meningkatkan kuat tekan beton jika digunakan secara tepat, baik dalam bentuk substitusi sebagian semen maupun agregat. Namun, peningkatan ini sangat tergantung pada komposisi campuran, karakteristik material ASP, metode pembakaran, serta kondisi lingkungan beton. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk menetapkan dosis optimal, metode pengolahan ASP yang konsisten, serta standar penerapan dalam skala praktis.

4.2. Kuat tarik beton dan modulus elastisitas

Meskipun sering dianggap kurang signifikan dibandingkan kuat tekan, kuat tarik beton memegang peranan penting dalam menilai ketahanan beton terhadap retak, khususnya akibat beban tarik, lentur, dan fluktuasi suhu. Beton memiliki sifat getas alami yang menyebabkan ketahanan terhadap gaya tarik jauh lebih rendah dibanding tekan. Oleh karena itu, penguatan terhadap kuat tarik sangat penting untuk meningkatkan daya tahan struktur terhadap retak awal maupun retak berkembang.

Penggunaan bahan pozzolan seperti abu sekam padi (ASP) terbukti mampu meningkatkan kuat tarik belah beton. Efek pozzolanik dari ASP menghasilkan struktur mikro beton yang lebih padat, halus, dan homogen, sehingga mengurangi terbentuknya pori dan celah yang menjadi titik awal retak mikro. Hal ini secara langsung meningkatkan kemampuan beton dalam menahan gaya tarik serta mendukung kekakuan dan stabilitas struktural jangka panjang.

Utami (2021) dalam penelitiannya terhadap *Self-Compacting Concrete* (SCC) menyatakan bahwa penggantian sebagian semen dengan ASP, ditambah serat sabut kelapa, memberikan peningkatan signifikan pada kuat tarik beton. Matriks beton yang terbentuk menjadi lebih rapat dan daya ikat antar partikel meningkat, mengurangi kemungkinan terjadinya retak akibat gaya tarik awal.

Selain itu, modulus elastisitas beton menjadi parameter penting lain dalam menilai kemampuan beton mengalami deformasi elastis saat menerima beban. Beton dengan modulus elastisitas tinggi menunjukkan deformasi kecil dan lebih tahan terhadap lendutan serta perubahan bentuk permanen. Nilai modulus ini sangat dipengaruhi oleh kuat tekan, jenis agregat, dan kerapatan beton.

Walaupun penelitian mengenai pengaruh langsung ASP terhadap modulus elastisitas masih terbatas, secara teori peningkatan densitas dan penurunan porositas akibat penggunaan ASP berimplikasi pada peningkatan nilai modulus elastisitas. Struktur beton yang lebih padat dan homogen meningkatkan kemampuan material untuk menahan regangan awal tanpa mengalami deformasi permanen.

Dengan demikian, ASP tidak hanya berperan dalam meningkatkan kuat tekan, tetapi juga berkontribusi terhadap kuat tarik dan modulus elastisitas, menjadikan beton lebih tahan terhadap retak dan deformasi. Hal

ini mendukung penggunaannya pada struktur-struktur yang menuntut kekakuan tinggi dan ketahanan jangka panjang terhadap beban tarik maupun beban dinamis.

4.3. Ketahanan terhadap permeabilitas dan air

Ketahanan beton terhadap permeabilitas air merupakan parameter kunci dalam menilai kualitas dan durabilitas beton, terutama pada struktur yang langsung bersentuhan dengan air dan lingkungan agresif, seperti jembatan, pelabuhan, bendungan, dan basement. Beton dengan permeabilitas tinggi memungkinkan air dan zat agresif seperti ion klorida dan sulfat mudah menembus ke dalam struktur beton. Kondisi ini dapat mempercepat proses korosi tulangan baja, menurunkan kekuatan mekanis beton, serta mempercepat kerusakan struktur secara keseluruhan.

Permeabilitas beton sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya adalah rasio air terhadap semen (*w/c ratio*), tingkat hidrasi semen, serta kerapatan struktur internal beton. Pada titik ini, bahan tambahan seperti Abu Sekam Padi (ASP) berperan sebagai pozzolan yang efektif. Partikel ASP yang sangat halus mampu mengisi pori-pori mikro dalam matriks beton dan bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang merupakan fase hidrat utama dengan sifat padat dan kedap air.

Penggunaan ASP dalam campuran beton secara signifikan menurunkan permeabilitas dengan menghasilkan struktur mikro beton yang lebih rapat dan kedap air. Hal ini memperlambat penetrasi air dan ion agresif, sehingga memperpanjang masa layanan dan meningkatkan daya tahan beton terhadap lingkungan korosif.

Penelitian oleh Santosa dkk. (2024) mengkonfirmasi bahwa beton yang menggunakan ASP sebagai substitusi sebagian semen menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap lingkungan agresif, khususnya di tanah atau air yang mengandung kadar sulfat tinggi. Efek ini disebabkan oleh pembentukan struktur mikro yang lebih padat dan reaksi pozzolanik yang membatasi difusi ion berbahaya ke dalam beton. Selain itu, kandungan silika tinggi dalam ASP mendorong pembentukan C-S-H tambahan yang memperkuat matriks beton sekaligus meningkatkan sifat kedap airnya.

Dengan demikian, pemanfaatan ASP sebagai bahan tambahan pada beton memberikan keuntungan signifikan dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air, zat kimia agresif, dan lingkungan lembab. Hal ini sangat penting untuk aplikasi beton pada daerah pesisir, dermaga, dan infrastruktur bawah tanah yang rentan terhadap serangan kimia dan kelembaban.

4.4. Struktur mikro dan daya tahan

Struktur mikro beton merupakan susunan kompleks dari pasta semen terhidrasi yang mengikat agregat kasar dan halus. Komponen utama pasta semen meliputi kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai fase pengikat utama, kalsium hidroksida (CH), pori-pori kapiler, serta sisa semen yang belum bereaksi. Kualitas beton sangat dipengaruhi oleh kerapatan dan homogenitas struktur mikro ini; struktur mikro yang padat dan seragam menandakan beton dengan mutu tinggi dan daya tahan yang baik.

Abu sekam padi (ASP), sebagai bahan pozzolan, berperan penting dalam memperbaiki struktur mikro beton melalui reaksi sekunder. Reaksi ini melibatkan SiO_2 amorf dalam ASP yang bereaksi dengan CH hasil hidrasi semen membentuk C-S-H tambahan. Pembentukan C-S-H tambahan ini memperkuat ikatan antar partikel semen dan agregat sekaligus mengurangi jumlah porositas dan mikroretak dalam beton. Dengan struktur mikro yang lebih padat, pergerakan air, gas, serta ion agresif dapat dicegah, sehingga meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan kimia dan kondisi cuaca ekstrem.

Perbaikan struktur mikro ini berkontribusi langsung pada peningkatan durabilitas beton, yaitu kemampuan beton untuk bertahan lama tanpa mengalami degradasi fungsional akibat paparan lingkungan dan faktor waktu. Struktur mikro yang kuat dan homogen sangat menentukan kinerja jangka panjang beton, terutama dalam menghadapi beban mekanis, perubahan suhu, dan paparan lingkungan agresif.

Dalam kajian terbaru, Farlianti dkk. (2024) menegaskan bahwa penggunaan ASP memperkuat ikatan antar partikel semen dan agregat serta mengurangi jumlah pori dan mikroretak pada beton, sehingga meningkatkan mutu dan daya tahan material. Selanjutnya, Alsaed dkk. (2024) menjelaskan bahwa ASP berfungsi sebagai bahan bio-cementitious yang efektif dalam meningkatkan daya tahan beton terhadap siklus beku-cair, karbonasi, serta serangan sulfat. Penurunan porositas dan peningkatan densitas akibat penambahan ASP menjadikan beton lebih tahan terhadap degradasi lingkungan.

Selain itu, penggunaan ASP dalam kombinasi dengan material lain seperti abu batu dan serbuk bata ringan, sebagaimana diteliti oleh Arumningsih dkk. (2023), membuka peluang untuk menghasilkan beton ringan dengan struktur mikro yang efisien dan ramah lingkungan. Pendekatan ini menunjukkan bahwa ASP

tidak hanya memperbaiki mutu mekanis beton, tetapi juga mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan dengan daya tahan tinggi.

4.5. Efektivitas pozzolan pada beton

Efektivitas pozzolan seperti abu sekam padi dalam campuran beton tidak hanya bergantung pada komposisi kimia, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor-faktor penting lainnya seperti ukuran partikel, aktivitas silika, dan metode pencampuran. Abu sekam padi yang telah mengalami proses pembakaran sempurna memiliki kandungan silika amorf yang tinggi, sehingga sangat reaktif terhadap kalsium hidroksida (CH) hasil hidrasi semen. Kondisi ini menjadikan ASP sebagai salah satu pozzolan alami terbaik untuk memperbaiki sifat mekanik dan durabilitas beton.

Penggunaan ASP secara optimal, biasanya pada kisaran 10–20% berat semen, mampu meningkatkan performa beton secara signifikan, termasuk peningkatan kuat tekan, kuat tarik, dan ketahanan terhadap serangan kimia. Selain manfaat teknis, penggunaan ASP juga berdampak positif terhadap lingkungan, karena substitusi sebagian semen Portland dengan ASP dapat mengurangi konsumsi semen yang produksinya menghasilkan emisi CO_2 dalam jumlah besar. Dengan demikian, ASP tidak hanya meningkatkan kualitas beton tetapi juga mendukung pengembangan beton berkelanjutan yang ramah lingkungan.

Dari sisi proses produksi, ASP yang dibakar pada suhu optimal antara 600–700°C menghasilkan abu dengan kandungan silika amorf tinggi, yang sangat aktif secara pozzolanik dalam lingkungan basa beton baru. Reaksi pozzolan ini menghasilkan senyawa pengikat tambahan berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang memperkuat matriks beton.

Farhan dkk. (2023) menegaskan bahwa pemanfaatan ASP secara optimal dalam campuran beton dapat menghasilkan produk konstruksi yang tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga lebih berkelanjutan secara lingkungan. Studi tersebut mendukung bahwa ASP efektif dalam meningkatkan struktur mikro beton dan mendukung pembangunan konstruksi hijau melalui pengurangan emisi karbon.

5. KESIMPULAN

Hasil tinjauan literatur ini menegaskan bahwa abu sekam padi (ASP) bukan sekadar limbah pertanian, melainkan material pozzolan aktif yang sangat potensial dalam meningkatkan kinerja beton baik dari aspek mekanis maupun durabilitas. Penggunaan ASP dalam proporsi optimal sebesar 10–20% dari berat semen terbukti mampu meningkatkan kuat tekan beton hingga 16,18%, modulus elastisitas hingga 9%, serta menurunkan permeabilitas terhadap air dan ion agresif hingga 35%. Efek ini tidak hanya memperbaiki integritas struktural beton, tetapi juga memperpanjang umur layan bangunan secara signifikan, terutama pada lingkungan agresif seperti daerah pesisir atau tanah bersulfat tinggi.

Selain performa teknis, ASP menawarkan dampak lingkungan yang luar biasa dengan mengurangi konsumsi semen Portland, yang merupakan salah satu sumber utama emisi karbon di sektor konstruksi. Dengan demikian, ASP berperan ganda sebagai material peningkat performa sekaligus agen dekarbonisasi dalam industri beton. Meskipun begitu, kesenjangan masih ada, terutama dalam aspek standardisasi proses pembakaran, konsistensi mutu ASP, serta kurangnya panduan teknis untuk formulasi campuran berbasis ASP yang dapat diimplementasikan secara luas. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan multidisipliner dalam penelitian lanjutan untuk merumuskan standar nasional atau internasional yang memungkinkan pemanfaatan ASP dalam skala industri. Jika dikelola dengan tepat, ASP berpotensi menjadi pilar utama dalam transformasi beton konvensional menuju beton generasi baru yang tangguh, ekonomis, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Alieu, J., Twumasi, J. O., Afrifa, R. O., Amponsah, E., Osei, J. B., & Adom-Asamoah, M. (2024). Rice Husk Ash as partial replacement of cement in sustainable construction. *Journal of Science and Technology (Ghana)*, *1*(1), 15-32.

Arumningsih, D., & Priyanto, K. J. (2023). INOVASI BETON RINGAN DAN EKONOMIS MENGGUNAKAN ABU SEKAM PADI, SERBUK BATA RINGAN, ABU BATU. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, *28*(2), 54-60.D. Arumningsih Diah Purnamawanti, K. Joko Priyanto, F. Teknik, and U. Tunas Pembangunan, 'INOVASI BETON RINGAN DAN EKONOMIS MENGGUNAKAN ABU SEKAM PADI, SERBUK BATA RINGAN, ABU BATU', Online, 2023.

Auliah, N. F., Tyassena, F. Y. P., & Yusuf, A. A. I. S. (2022, December). PENGARUH PENGGUNAAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI PENGGANTI AGGREGAT HALUS TERHADAP KUAT TEKAN BETON. In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri (SNTI)* (Vol. 9, No. 1, pp. 210-213).

Camargo-Pérez, N. R., Abellán-García, J., & Fuentes, L. (2023). Use of rice husk ash as a supplementary cementitious material in concrete mix for road pavements. *Journal of Materials Research and Technology*, *25*, 6167-6182.

Dewi, S. U., & Renaldi, S. (2024). Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan Beton K-175. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, *9*(2), 260-271.

Farhan, M., Nuklirullah, M., & Bahar, F. F. (2023). Pengaruh Penggunaan Abu-Sekam Padi sebagai Bahan Tambahan Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik*, *21*(1), 58-67.S. Pemanfaatan *et al.*, '94 | Jerry Andre Cluiver Yoel, Tonny Sahusilawanne, Delvia Rimesye Apalem Tonny Sahusilawanne Delvia Rimesye Apalem', 2025. [Online]. Available: https://litera-academica.com/ojs/litera/

Gimon, R. I., Maki, T. S., & Tulaka, T. (2024). PENGARUH TAMBAHAN ABU SEKAM PADI TERHADAP KUAT KARAKTERISTIK BETON. *Sustainable Construction (SUSCON)*, *2*(1), 40-47.

HAMDANI, A. H. (2023). *PEMANFAATAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN DAN LIMBAH KACA SEBAGAI AGREGAT KASAR PADA CAMPURAN BETON MUTU 30 MPA UNTUK PERKERASAN JALAN LOKAL PRIMER* (Doctoral dissertation, Universitas Mercu Buana Bekasi).

Hardiyati, C., & Tethool, Y. C. V. (2023). PEMANFAATAN LIMBAH ABU SEKAM PADI SEBAGAI BAHAN PEMBUATAN BETON NORMAL DI KABUPATEN MANOKWARI SELATAN. *Prosiding SEMSINA*, *4*(01), 50-53.M. M. Alsaed and R. L. Al Mufti, 'The Effects of Rice Husk Ash as Bio-Cementitious Material in Concrete', *Construction Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 629–639, Sep. 2024, doi: 10.3390/constrmater4030034.

Husainy, Z., & Suryaningsih, O. (2025). PENGGUNAAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI MATERIAL PENGGANTI PASIR PADA PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON. *Hexagon*, *6*(1), 66-74.

Kuncoro, H. B. B., Darwis, Z., & Rahmat, A. A. (2021). Studi Eksperimental pengaruh abu sekam padi terhadap sifat mekanik beton serat bambu. *Fondasi: jurnal teknik sipil*, *10*(2), 134-143.

Noerangga, F. H., Darmayasa, I. G. N. P., Ariawan, P., & Ariana, K. A. (2023). Pengaruh Komposisi Abu Sekam Padi Terhadap Kuat Tekan Beton. *Reinforcement Review in Civil Engineering Studies and Management*, *2*(1), 25-39.

Safarizki, H. A., Marwahyudi, M., & Pamungkas, W. A. (2021). Beton ramah lingkungan dengan abu sekam padi sebagai pengganti sebagian semen pada era new normal. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, *4*(2), 63-67.

Santosa, R. P., Rochman, A., & Sulaiman, H. M. (2024, June). Analisis Ketahanan Beton dengan Memanfaatkan Abu Sekam Padi (Rice Husk Ash) sebagai Pengganti sebagian Semen pada Lingkungan Sulfat. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 61-68).S. Farlianti *et al.*, 'PENGGUNAAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI BAHAN TAMBAHAN PADA CAMPURAN BETON GEOPOLIMER: REVIEW KINERJA', [Online]. Available: www.teknika-ftiba.info

Purwanto, H., & Firdaus, M. (2024). Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Terhadap Komposisi Campuran Aspal Beton (AC WC). *Journal Of Civil Engineering Building And Transportation*, *8*(1), 176-183.

Utami, A. R. I. (2021). Impak Abu Sekam Padi Sebagai Pengganti Semen Dan Jenis Serat Sabut Kelapa Sebagai Bahan Tambahan Slump Flow Dan Kuat Tekan Beton Self Compacting Concrete Dengan Fas Yang Berbeda. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik [JIMT]*, *1*(3).