JOURNAL FLYOVER (JFO)
Magister Teknik Sipil Program Pascasarjana UMI

Vol. 06, No. 01 Tahun 2026
E-ISSN: 2829-5684

Analisis Perbandingan Biaya Produksi Beton Konvensional dengan Beton Suplemen

Andi Fahrul Juanna [1*], Hanafi Ashad [2], Andi Alifuddin [3]

1*) Magister Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar,
fahrul.andijuanna@gmail.com
2) Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar
3) Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar

Abstract

This study investigates the mechanical performance and economic efficiency of concrete incorporating supplementary cementitious materials (SCMs), namely fly ash, nickel slag, and rice husk ash, as partial replacements for Portland cement. Concrete mixtures were designed for target compressive strengths of 20, 25, 30, and 35 MPa with varying substitution levels. The experimental program focused on compressive strength development, identification of optimum substitution rates, and evaluation of production cost per cubic meter and per MPa of compressive strength. The results indicate that all SCMs enhance cement utilization efficiency and achieve maximum compressive strength at optimum replacement levels ranging from approximately 8% to 15%, which decrease with increasing target strength. From an economic standpoint, SCM-based concretes consistently exhibit lower production costs than conventional concrete. Among the investigated materials, fly ash provides the highest cost efficiency, achieving cost savings of approximately 3–4% per MPa of compressive strength, followed by rice husk ash and nickel slag. These findings highlight the potential of SCM utilization to improve both the performance and sustainability of concrete, while offering tangible economic benefits for construction applications.

Keywords: Compressive Strength, Concrete, Cost Efficiency, Supplementary Cementitious Materials, Sustainable Construction.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji kinerja mekanik dan efisiensi ekonomi beton yang menggunakan bahan suplemen semen (*Supplementary Cementitious Materials*/SCM) berupa *fly ash*, *slag* nikel, dan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen Portland. Campuran beton dirancang untuk mutu rencana 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa dengan variasi kadar substitusi. Parameter yang dianalisis meliputi perkembangan kuat tekan, penentuan kadar substitusi optimum, serta evaluasi biaya produksi per meter kubik dan biaya per MPa kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh SCM mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan semen dan menghasilkan kuat tekan maksimum pada kadar substitusi optimum sekitar 8–15%, dengan kecenderungan menurun seiring meningkatnya mutu beton rencana. Dari aspek ekonomi, beton berbahan suplemen secara konsisten memiliki biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. *Fly ash* memberikan efisiensi biaya tertinggi dengan penghematan sekitar 3–4% per MPa kuat tekan, diikuti oleh abu sekam padi dan *slag* nikel. Temuan ini menegaskan bahwa pemanfaatan bahan suplemen semen tidak hanya meningkatkan kinerja beton, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi yang signifikan serta mendukung penerapan konstruksi berkelanjutan.

Kata Kunci: Bahan Suplemen Semen, Beton, Efisiensi Biaya, Konstruksi Berkelanjutan, Kuat Tekan.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material konstruksi paling dominan di dunia, digunakan lebih dari 70% dalam berbagai jenis infrastruktur seperti gedung, jembatan, jalan, hingga pelabuhan. Keunggulan beton terletak pada kekuatan tekan yang tinggi, daya tahan

terhadap cuaca, serta kemudahan dalam pembentukan. Namun, beton konvensional sangat bergantung pada semen *portland* sebagai bahan pengikat utama. Proses produksi semen ini diketahui menyumbang sekitar 7–8% emisi CO_2 global, sekaligus memerlukan biaya energi yang tinggi. Hal ini menjadikan beton konvensional bukan hanya mahal, tetapi juga memiliki dampak negatif terhadap lingkungan.

Seiring dengan berkembangnya konsep pembangunan berkelanjutan, muncul kebutuhan untuk mencari alternatif material pengganti sebagian semen Portland. Salah satu solusi yang banyak diteliti adalah penggunaan *Supplementary Cementitious Materials* (SCM) atau material suplemen, seperti *fly ash*, *slag*, *silica fume*, dan abu sekam padi. SCM dapat berfungsi sebagai bahan tambahan yang meningkatkan sifat beton sekaligus mengurangi penggunaan semen.

Dari sisi teknis, berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan SCM dapat memperbaiki *workability*, mengurangi panas hidrasi, meningkatkan durabilitas, serta dalam beberapa kasus mampu meningkatkan kekuatan beton pada umur tertentu. Sementara dari sisi ekonomi, penggunaan SCM berpotensi menurunkan biaya produksi karena harga material suplemen relatif lebih murah dibanding semen *portland*, apalagi jika material tersebut merupakan hasil sampingan industri (*by-product*) yang dapat dimanfaatkan kembali.

Sejauh ini belum banyak penelitian yang membandingkan secara kuantitatif biaya produksi beton konvensional dengan beton berbahan limbah industri, baik dari segi biaya material, proses produksi, maupun dampak ekonomis jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk melihat apakah penggunaan limbah industri dalam produksi beton dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

Meski demikian, dalam praktiknya masih terdapat keraguan dan perbedaan hasil studi terkait efisiensi biaya antara beton konvensional dengan beton berbahan SCM. Beberapa proyek menunjukkan penghematan biaya yang signifikan, sementara yang lain justru mengindikasikan peningkatan biaya akibat faktor transportasi, ketersediaan material, atau kebutuhan pengolahan tambahan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbandingan biaya produksi beton konvensional dengan beton berbahan suplemen material. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai sejauh mana SCM mampu menjadi solusi alternatif yang lebih ekonomis sekaligus ramah lingkungan bagi industri konstruksi.

Penelitian ini dimaksudkan sebagai upaya alternatif pemanfaatan limbah industri melalui kajian dan analisis perbandingan biaya produksi antara beton konvensional dan beton berbahan SCM. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk menghitung biaya produksi beton konvensional per meter kubik, menghitung biaya produksi beton berbahan suplemen material per meter kubik, melakukan perbandingan terhadap hasil perhitungan biaya kedua jenis beton tersebut, serta memberikan rekomendasi terkait efisiensi biaya dan kelayakan penggunaan material suplemen sebagai alternatif dalam proses produksi beton yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

2. METODE

A. Jenis Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini merupakan penelitian berbasis kuantitatif dengan pendekatan studi eksperimental di laboratorium yang dipadukan dengan studi literatur. Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung dari produsen beton dan pemasok bahan bangunan yang meliputi informasi mengenai biaya bahan baku, tenaga kerja, serta penggunaan peralatan dalam proses

produksi beton. Sementara itu, data sekunder berupa informasi teknis terkait karakteristik beton konvensional dan beton dengan SCM yang diperoleh dari berbagai sumber literatur, jurnal ilmiah, serta standar beton nasional dan internasional yang relevan sebagai dasar analisis dan pembanding dalam penelitian ini.

B. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia, selama periode Oktober hingga Desember 2025, untuk mendapatkan data biaya yang aktual dan representatif serta data kuat tekan beton.

C. Variabel

Dalam penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah jenis dan persentase SCM yang meliputi *Fly Ash*, *Slag* Nikel, dan Abu Sekam Padi sebagai material substitusi dalam campuran beton, sedangkan variabel terikatnya adalah biaya produksi beton yang diukur dalam satuan biaya per meter kubik (m^3) beton, sehingga perubahan pada jenis dan proporsi SCM akan dianalisis pengaruhnya terhadap besaran biaya produksi yang dihasilkan.

D. Nomenklatur Benda Uji

Nomenklatur benda uji dibuat berdasarkan mutu beton, jenis dan persentase SCM (*Fly Ash*, *Slag* Nikel, dan Abu Sekam Padi). Atas dasar tersebut, maka nomenklatur benda uji adalah seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**

Tabel 1 Nomenklatur Benda Uji Beton

Mutu Beton, f'c (MPa)	Jenis SCM dan Jumlah Benda Uji					
	Fly Ash		*Slag* Nikel		Abu Sekam Padi	
	Kode	Jumlah	Kode	Jumlah	Kode	Jumlah
20	C20-FA-0	3	C20-SN-0	3	C20-ASP-0	3
	C20-FA-A	3	C20-SN-A	3	C20-ASP-A	3
	C20-FA-B	3	C20-SN-B	3	C20-ASP-B	3
	C20-FA-C	3	C20-SN-C	3	C20-ASP-C	3
	C20-FA-D	3	C20-SN-D	3	C20-ASP-D	3
25	C25-FA-0	3	C25-SN-0	3	C25-ASP-0	3
	C25-FA-A	3	C25-SN-A	3	C25-ASP-A	3
	C25-FA-B	3	C25-SN-B	3	C25-ASP-B	3
	C25-FA-C	3	C25-SN-C	3	C25-ASP-C	3
	C25-FA-D	3	C25-SN-D	3	C25-ASP-D	3
30	C30-FA-0	3	C30-SN-0	3	C30-ASP-0	3
	C30-FA-A	3	C30-SN-A	3	C30-ASP-A	3
	C30-FA-B	3	C30-SN-B	3	C30-ASP-B	3
	C30-FA-C	3	C30-SN-C	3	C30-ASP-C	3
	C30-FA-D	3	C30-SN-D	3	C30-ASP-D	3
35	C35-FA-0	3	C35-SN-0	3	C35-ASP-0	3
	C35-FA-A	3	C35-SN-A	3	C35-ASP-A	3
	C35-FA-B	3	C35-SN-B	3	C35-ASP-B	3
	C35-FA-C	3	C35-SN-C	3	C35-ASP-C	3
	C35-FA-D	3	C35-SN-D	3	C35-ASP-D	3

Kode benda uji dalam penelitian ini disusun berdasarkan mutu beton dan jenis serta persentase SCM yang digunakan. Huruf "C" menunjukkan kelas mutu beton (*compressive strength*) dengan angka di belakangnya menyatakan kuat tekan rencana (f'c) dalam satuan

MPa, seperti C20, C25, C30, dan C35 yang masing-masing menunjukkan kuat tekan 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa. Kode "FA" merupakan singkatan dari *Fly Ash*, "SN" adalah *Slag Nikel*, dan "ASP" adalah Abu Sekam Padi sebagai material substitusi semen. Angka "0" menunjukkan campuran beton tanpa penambahan SCM (beton kontrol), sedangkan huruf A, B, C, dan D menunjukkan variasi persentase penggantian semen dengan SCM, yaitu A sebesar 7,5%, B sebesar 15%, C sebesar 22,5%, dan D sebesar 30%. Dengan demikian, setiap kombinasi kode, seperti C20-FA-A atau C35-SN-D, merepresentasikan mutu beton tertentu beserta jenis dan kadar substitusi SCM yang digunakan dalam campuran.

E. Metode Analisis Data

Data yang terkumpul akan dianalisis dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menghitung biaya produksi beton konvensional per meter kubik berdasarkan komposisi dan harga bahan baku, tenaga kerja, dan alat.
2. Menghitung biaya produksi beton SCM menggunakan metode yang sama, dengan penyesuaian komposisi bahan.
3. Melakukan perbandingan antara biaya produksi beton konvensional dan beton dengan SCM.
4. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan biaya secara kuantitatif.
5. Jika memungkinkan, dilakukan uji signifikansi (misal t-test) untuk mengetahui apakah perbedaan biaya tersebut signifikan secara statistik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material

a) Karakteristik Semen

Semen *Portland Composite Cement* (PCC) dan *Ordinary Portland Cement* (OPC) tipe I merupakan bahan pengikat utama dalam beton yang memiliki perbedaan karakteristik fisik dan kimia. Berdasarkan hasil pengujian, PCC memiliki luas permukaan spesifik (*Blaine*) sebesar 378 m^2/kg, lebih tinggi dibandingkan OPC tipe I sebesar 342 m^2/kg. Kehalusan yang lebih tinggi pada PCC meningkatkan luas kontak partikel terhadap air sehingga memperbaiki *workability* dan homogenitas campuran beton. Dari aspek waktu ikat, PCC memiliki waktu ikat awal dan akhir yang lebih lama dibanding OPC tipe I, yang menunjukkan reaktivitas awal yang lebih terkendali dan potensi penurunan risiko retak akibat panas hidrasi pada pengecoran volume besar.

Dari sisi berat jenis, PCC memiliki nilai 3,06 sedangkan OPC Type I sebesar 3,15. Perbedaan ini dipengaruhi oleh kandungan klinker yang lebih dominan pada OPC Type I, sementara PCC mengandung bahan tambahan mineral seperti pozzolan atau batu kapur yang relatif lebih ringan. Perbedaan berat jenis tersebut berimplikasi terhadap densitas beton dan efisiensi penggunaan material dalam desain campuran, terutama pada perhitungan proporsi berbasis berat maupun volume.

Secara kimiawi, kedua semen tersusun atas oksida utama seperti CaO, SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3, namun dengan proporsi yang berbeda. OPC Type I memiliki kandungan CaO yang lebih tinggi sehingga mendukung pembentukan senyawa silikat kalsium reaktif (terutama C_3S) yang berperan dalam kuat tekan awal beton. Sebaliknya, PCC memiliki kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 relatif lebih tinggi akibat adanya bahan tambahan mineral, yang berkontribusi terhadap pembentukan mikrostruktur beton yang lebih stabil pada umur lanjut serta potensi peningkatan durabilitas.

b) Karakteristik Bahan Suplemen

Bahan suplemen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Fly Ash* (FA), Abu Sekam Padi (ASP/RHA), dan *Slag* Nikel (SN), yang masing-masing menunjukkan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda. Dari sisi fisik, abu sekam padi memiliki luas permukaan spesifik tertinggi (670 m^2/kg), menunjukkan tingkat kehalusan dan porositas yang sangat tinggi sehingga berpotensi meningkatkan reaktivitas *pozzolan*. *Fly ash* memiliki luas permukaan sedang (366 m^2/kg) dengan partikel berbentuk bulat yang mendukung peningkatan *workability* beton, sedangkan *slag* nikel memiliki luas permukaan paling rendah (318 m^2/kg) dengan karakter partikel lebih padat dan kasar.

Dari aspek kimiawi, *fly ash* dan abu sekam padi didominasi oleh kandungan silika (SiO_2) yang tinggi, terutama pada abu sekam padi yang mencapai lebih dari 90%, menunjukkan dominasi silika amorf yang sangat reaktif dalam reaksi *pozzolan*. *Fly ash* memiliki kombinasi SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 dalam jumlah besar sehingga memenuhi karakteristik pozzolan aktif. Sebaliknya, *slag* nikel memiliki kandungan Fe_2O_3 dan MgO yang relatif tinggi serta CaO dalam jumlah sedang, yang menunjukkan sifat hidrolis laten dan kontribusi reaksi kimia yang berkembang pada umur lanjut beton.

Nilai berat jenis juga menunjukkan perbedaan yang signifikan, di mana *slag* nikel memiliki berat jenis tertinggi (±3,0), *fly ash* berada pada kisaran 2,3, dan abu sekam padi paling rendah (±2,1). Perbedaan ini mempengaruhi perhitungan volume dalam campuran beton serta densitas akhir beton. Secara keseluruhan, abu sekam padi berperan dominan secara kimia karena reaktivitas silika tinggi, *fly ash* memberikan keseimbangan antara aspek fisik dan kimia, sedangkan *slag* nikel berkontribusi terhadap peningkatan kerapatan dan potensi kekuatan jangka panjang.

c) Karakteristik Agregat

Agregat halus dan agregat kasar yang digunakan berasal dari Bili-Bili Kabupaten Gowa dan telah memenuhi persyaratan teknis untuk beton struktural. Agregat halus memiliki berat jenis SSD sebesar 2,57 dengan penyerapan 1,21%, menunjukkan porositas yang relatif rendah dan stabilitas dalam pengendalian kadar air campuran. Modulus kehalusan (FM) sebesar 2,60 menunjukkan gradasi sedang yang mendukung kemudahan pengerjaan dan distribusi partikel yang baik dalam campuran beton. Kadar lumpur dan kandungan organik yang rendah mengindikasikan kebersihan material serta minimnya potensi gangguan terhadap proses hidrasi semen.

Agregat kasar memiliki berat jenis SSD sebesar 2,70 dan penyerapan 0,80%, mencerminkan struktur batuan yang padat dan kuat. Nilai keausan sebesar 32,40% masih dalam batas yang dapat diterima untuk beton struktural, menunjukkan ketahanan terhadap abrasi dan beban mekanis. Ukuran maksimum nominal 20 mm mendukung distribusi tegangan yang merata dalam beton dan sesuai untuk aplikasi struktural umum.

Secara keseluruhan, kombinasi agregat halus dan kasar dari Bili-Bili menunjukkan karakteristik fisik yang saling melengkapi dalam membentuk rangka beton yang stabil. Agregat halus berperan dalam meningkatkan *workability* dan kohesi campuran, sedangkan agregat kasar berkontribusi terhadap kekuatan, kekakuan, dan kerapatan beton. Dengan desain campuran yang tepat, agregat ini mampu menghasilkan beton dengan kinerja mekanik dan durabilitas yang optimal.

B. Komposisi Campuran Beton

Berdasarkan hasil perancangan campuran beton menggunakan metode ACI, maka komposisi campuran beton untuk beton konvensional dengan mutu rencana (f'c) berturut-turut; 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa diperlihatkan seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Komposisi campuran beton konvensional

No.	Mutu Beton, f'c (MPa)	Semen (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Agregat Kasar (Kg)	Air (Kg)
1	20	350	750	1050	175
2	25	400	750	1050	180
3	30	420	750	1050	176
4	35	450	750	1050	180

Berdasarkan **Tabel 2**, campuran beton kontrol disusun menggunakan semen Portland sebagai satu-satunya bahan pengikat, dengan agregat halus dan agregat kasar sebagai penyusun utama volume beton serta air pencampur sesuai rasio air–semen yang ditetapkan. Pada tabel tersebut terlihat bahwa tidak terdapat substitusi semen oleh abu terbang, *slag* nikel, maupun abu sekam padi (0%)**,** sehingga seluruh massa semen yang tercantum berfungsi langsung sebagai pengikat hidrasi. Proporsi agregat halus dan agregat kasar pada tabel menunjukkan peran agregat sebagai rangka beton, sementara jumlah air yang digunakan ditetapkan untuk mencapai *workabilit*y yang direncanakan tanpa bantuan bahan tambahan mineral atau kimia.

Komposisi campuran sebagaimana tercantum pada tabel tersebut menghasilkan beton yang perkembangan kuat tekannya sepenuhnya dikendalikan oleh reaksi hidrasi semen Portland. Tidak adanya bahan suplemen mineral pada campuran menyebabkan pasta semen yang terbentuk hanya berasal dari hidrasi semen, tanpa kontribusi reaksi pozzolan atau hidrolis sekunder. Hal ini menjelaskan mengapa beton konvensional pada data hasil pengujian menunjukkan peningkatan kuat tekan yang relatif cepat pada umur awal, namun secara teoritis memiliki efisiensi penggunaan semen dan potensi durabilitas jangka panjang yang lebih rendah dibandingkan campuran dengan bahan suplemen. Dengan demikian, tabel komposisi campuran beton konvensional ini berfungsi sebagai campuran kontrol yang menjadi acuan utama dalam mengevaluasi pengaruh penambahan bahan suplemen pada variasi campuran lainnya.

Komposisi campuran beton berbahan suplemen diperlihatkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Komposisi campuran beton berbahan suplemen (FA, ASP, dan SN)

No.	Mutu Beton, f'c (MPa)	Bahan Suplemen (FA, ASP, SN)		Semen (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Agregat Kasar (Kg)	Air (Kg)
		(%)	(Kg)				
1	20	0	0	350,00	750	1050	175
		7,5	26,25	323,75			
		15	52,50	297,50			
		22,5	78,75	271,25			
		30	105,00	271,25			
2	25	0	0	400,00	750	1050	180
		7,5	30,00	370,00			
		15	60,00	340,00			
		22,5	90,00	310,00			
		30	120,00	280,00			
3	30	0	0	420,00	750	1050	176
		7,5	31,50	388,50			
		15	63,00	357,00			
		22,5	94,50	325,50			
		30	126,00	294,00			
4	35	0	0	450,00	750	1050	180
		7,5	33,75	416,25			
		15	67,50	382,50			

No.	Mutu Beton, f'c (MPa)	Bahan Suplemen (FA, ASP, SN)		Semen (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Agregat Kasar (Kg)	Air (Kg)
		(%)	(Kg)				
		22,5	101,25	348,75			
		30	135,00	315,00			

Memperhatikan rancangan campuran beton menurut **Tabel 2** dan **Tabel 3**, perbedaan mendasar antara beton konvensional dan beton dengan bahan suplemen terletak pada adanya substitusi sebagian semen Portland oleh *fly ash*, *slag* nikel, dan abu sekam padi pada campuran berbahan suplemen. Pada beton konvensional, seluruh bahan pengikat berasal dari semen Portland, sedangkan pada campuran beton berbahan suplemen massa semen pada tabel berkurang dan digantikan oleh bahan suplemen mineral sesuai variasi persentase, dengan total volume campuran tetap dijaga relatif sama. Proporsi agregat halus dan agregat kasar pada kedua campuran menunjukkan kecenderungan yang serupa, sehingga perbedaan karakteristik beton terutama dipengaruhi oleh perubahan komposisi bahan pengikat dan karakteristik fisik SCM yang ditambahkan.

Perbedaan komposisi tersebut berdampak langsung pada mekanisme pembentukan kekuatan beton. Beton konvensional sepenuhnya mengandalkan hidrasi semen Portland dan menunjukkan perkembangan kuat tekan yang relatif cepat pada umur awal. Sebaliknya, beton berbahan suplemen memanfaatkan kombinasi antara hidrasi semen dan reaksi pozzolan atau hidrolis sekunder dari bahan suplemen, sehingga laju peningkatan kuat tekan awal cenderung lebih lambat namun berpotensi menghasilkan struktur beton yang lebih rapat pada umur lanjut. Dengan demikian, tabel rancangan campuran beton tersebut menunjukkan bahwa penggunaan bahan suplemen tidak hanya mengubah proporsi material, tetapi juga menggeser mekanisme kerja beton dari sistem hidrasi tunggal menuju sistem reaksi gabungan yang lebih efisien dan berpotensi meningkatkan kinerja jangka panjang beton.

C. Kemudahan Pengerjaan Beton (*Workability*)

Workability beton dalam penelitian ini dievaluasi menggunakan uji *slump* pada berbagai variasi mutu beton (20, 25, 30, dan 35 MPa) serta variasi persentase bahan suplemen mineral sebesar 0%, 7,5%, 15%, 22,5%, dan 30%. Pada campuran dengan *fly ash*, nilai *slump* beton kontrol (0%) berada pada kisaran ±75–80 mm untuk mutu 20 MPa dan sedikit menurun menjadi ±65–70 mm pada mutu 35 MPa. Pada substitusi 7,5% hingga 15%, nilai *slump* relatif stabil bahkan sedikit meningkat, yaitu berada pada kisaran ±80–85 mm untuk mutu rendah hingga menengah, yang menunjukkan kontribusi positif *fly ash* terhadap kemudahan pengerjaan. Namun pada kadar 22,5% dan 30%, terjadi penurunan *slump* menjadi sekitar ±60–65 mm pada mutu 30–35 MPa, meskipun masih berada dalam kategori *slump* sedang dan dapat dikerjakan.

Pada campuran dengan *slag* nikel, tren penurunan nilai *slump* terlihat lebih konsisten sejak awal substitusi. Beton kontrol menunjukkan *slump* sekitar ±75 mm pada mutu 20 MPa dan ±65 mm pada mutu 35 MPa. Pada substitusi 7,5% dan 15%, nilai *slump* menurun bertahap menjadi ±70 mm dan ±60 mm, sedangkan pada kadar 22,5% dan 30% penurunan semakin nyata hingga mencapai ±55–60 mm pada mutu rendah dan sekitar ±50–55 mm pada mutu tinggi. Penurunan ini berkaitan dengan karakter partikel *slag* nikel yang lebih bersudut dan padat sehingga meningkatkan gesekan internal dalam campuran beton.

Pengaruh paling signifikan terhadap *workability* ditunjukkan oleh abu sekam padi. Beton kontrol memiliki nilai *slump* sekitar ±75 mm, namun pada substitusi 7,5% nilai *slump* langsung turun menjadi ±60–65 mm. Pada kadar 15% dan 22,5%, nilai *slump* berada pada kisaran ±50–55 mm, dan pada substitusi 30% turun lebih lanjut hingga ±40–45 mm,

terutama pada mutu beton 30 dan 35 MPa. Penurunan yang cukup tajam ini disebabkan oleh luas permukaan spesifik abu sekam padi yang sangat tinggi (±670 m²/kg) dan sifatnya yang berpori sehingga menyerap air pencampur lebih besar. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa *fly ash* memberikan stabilitas *workability* terbaik, *slag* nikel memberikan pengaruh moderat, dan abu sekam padi memerlukan pengendalian desain campuran untuk menjaga nilai *slump* dalam batas yang dapat diterima.

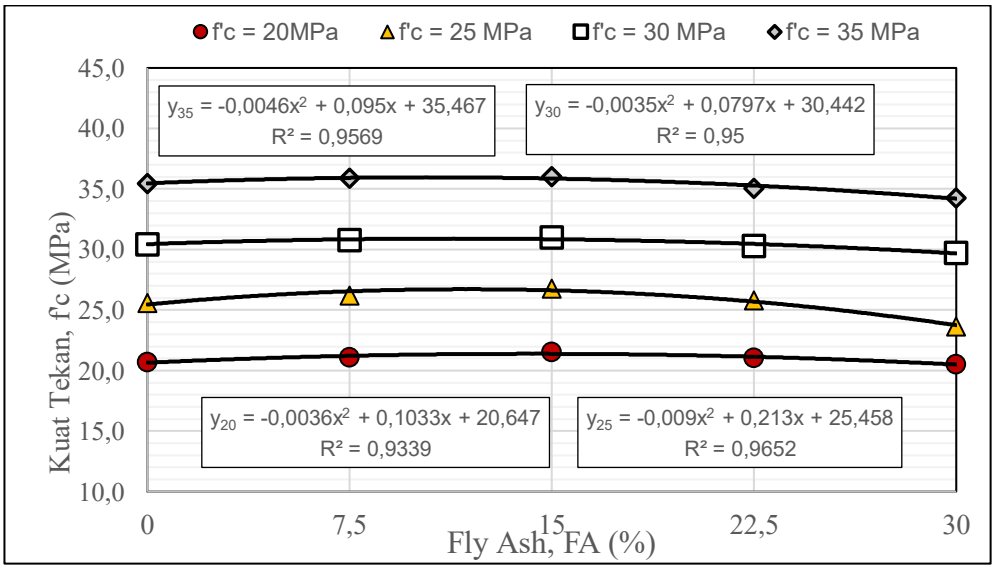
D. Kuat Tekan Beton

Secara keseluruhan, data kuat tekan menunjukkan bahwa *fly ash* memberikan peningkatan kuat tekan paling stabil, diikuti oleh *slag* nikel dengan peningkatan moderat, dan abu sekam padi dengan peningkatan signifikan pada kadar rendah namun sensitif pada kadar tinggi. Ketiga bahan suplemen menunjukkan adanya kadar substitusi optimum, yang menegaskan bahwa efektivitas penggunaan material suplemen tidak hanya ditentukan oleh kandungan kimia, tetapi juga oleh keseimbangan antara reaktivitas, jumlah semen aktif, dan karakteristik fisik material.

a) Pengaruh *Fly Ash* terhadap Kuat Tekan Beton

Peningkatan persentase substitusi *fly ash* hingga batas tertentu memberikan kontribusi positif terhadap kuat tekan beton pada seluruh mutu rencana. Pada beton mutu 20 MPa, kuat tekan meningkat dari 20,68 MPa (0%) menjadi 21,53 MPa (15%), sebelum mengalami penurunan pada substitusi yang lebih tinggi. Pola serupa terjadi pada mutu 25 MPa dan 30 MPa, di mana kuat tekan maksimum dicapai pada kisaran substitusi 15%–22,5%. Pada mutu 35 MPa, kuat tekan meningkat dari 35,46 MPa pada beton konvensional menjadi sekitar 36,05 MPa pada substitusi 15%, yang menunjukkan efektivitas reaksi pozzolan *fly ash* dalam meningkatkan kekuatan beton (**Gambar 1**).

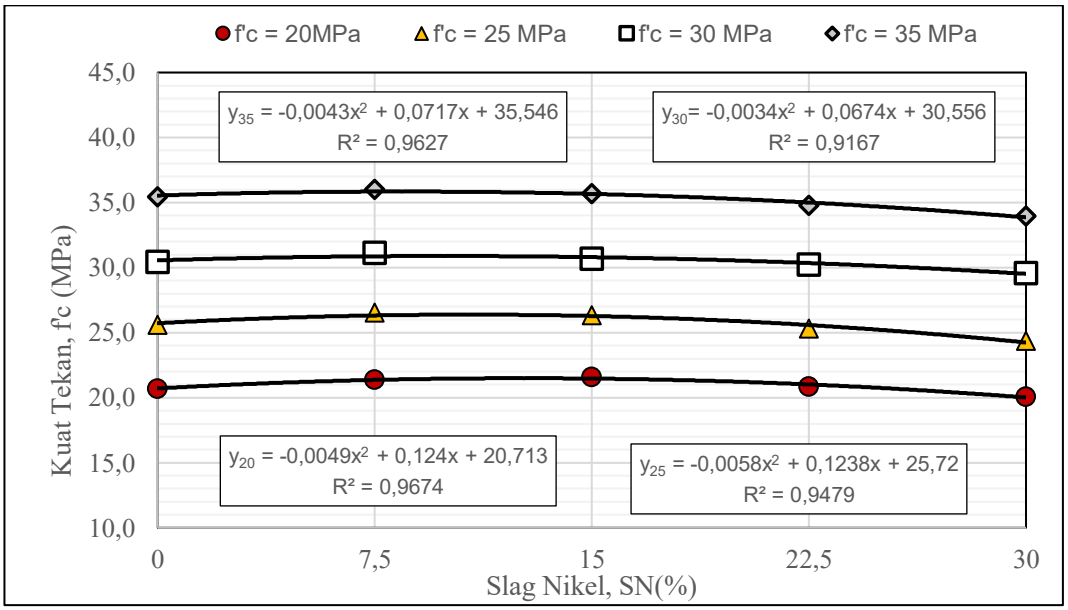
Peningkatan kuat tekan ini menunjukkan bahwa *fly ash* berkontribusi melalui reaksi pozzolan sekunder yang menghasilkan kalsium silikat hidrat tambahan, sehingga memperbaiki kerapatan mikrostruktur beton. Namun, pada substitusi yang lebih tinggi, penurunan kuat tekan terjadi akibat berkurangnya kandungan semen aktif, sehingga reaksi pozzolan tidak lagi mampu mengimbangi kehilangan hidrasi semen. Hal ini menegaskan bahwa *fly ash* memiliki kadar substitusi optimum untuk setiap mutu beton.



Gambar 1 Grafik Hubungan Kuat Tekan dan Persentase *Fly Ash* untuk Berbagai Mutu Beton

b) Pengaruh *Slag* Nikel terhadap Kuat Tekan Beton

Data kuat tekan beton dengan *slag* nikel (**Gambar 2**), menunjukkan kecenderungan peningkatan kuat tekan yang lebih bertahap dibandingkan *fly ash*. Pada beton mutu 20 MPa, kuat tekan meningkat dari kondisi beton kontrol hingga mencapai nilai maksimum pada substitusi menengah, kemudian menurun pada substitusi tinggi. Pola yang konsisten juga terlihat pada mutu 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa, di mana *slag* nikel mampu mempertahankan kuat tekan beton mendekati atau sedikit di atas beton konvensional pada kadar substitusi tertentu.



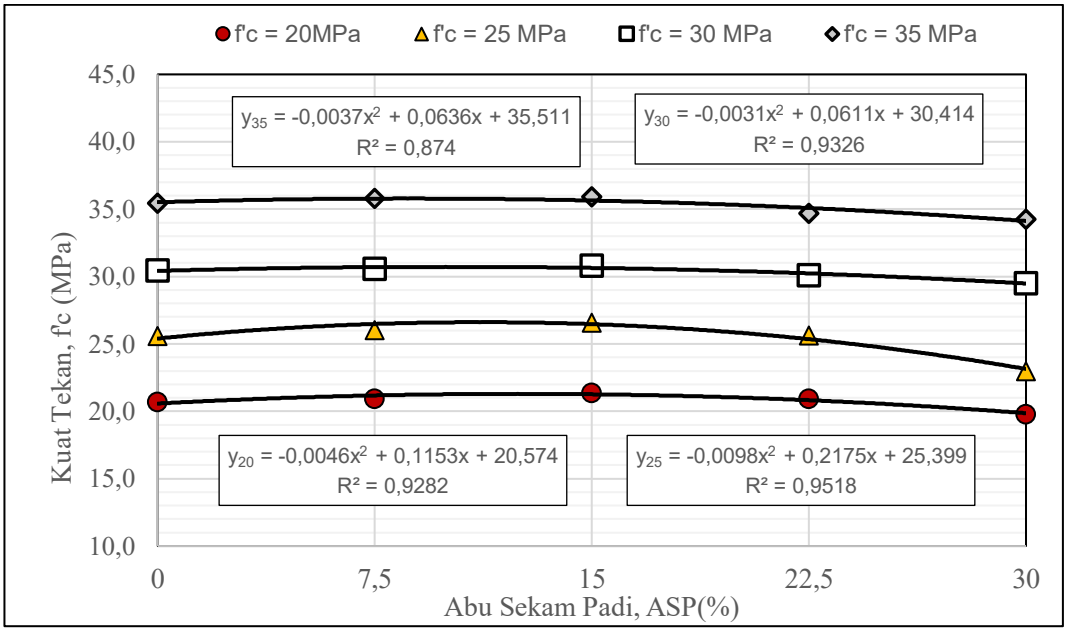
Gambar 2 Grafik Hubungan Kuat Tekan dan Persentase *Slag* Nikel untuk Berbagai Mutu Beton

Karakteristik ini mengindikasikan bahwa *slag* nikel berperan sebagai material hidrolis dan filler mikro yang memperbaiki kepadatan matriks beton. Namun, reaktivitas *slag* nikel yang relatif lebih lambat dibandingkan *fly ash* menyebabkan kontribusinya terhadap kuat tekan awal beton lebih terbatas. Pada kadar substitusi yang terlalu tinggi, pengurangan semen aktif menyebabkan penurunan kuat tekan, sehingga penggunaan *slag* nikel memerlukan pengendalian persentase substitusi yang cermat.

c) Pengaruh Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan Beton

Berdasarkan data kuat tekan beton dengan abu sekam padi pada **Gambar 3**, terlihat bahwa substitusi pada kadar rendah masih mampu mempertahankan bahkan meningkatkan kuat tekan beton, khususnya pada mutu menengah dan tinggi. Hal ini menunjukkan aktivitas pozzolan abu sekam padi yang tinggi akibat kandungan silika amorf yang dominan. Namun, peningkatan persentase substitusi secara berlebihan menyebabkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan pada seluruh mutu beton.

Penurunan ini berkaitan dengan luas permukaan spesifik abu sekam padi yang sangat tinggi, sehingga meningkatkan kebutuhan air dan berpotensi menurunkan efektivitas ikatan pasta semen. Selain itu, sifat fisik abu sekam padi menyebabkan beton menjadi lebih sensitif terhadap variasi rasio air–pengikat. Oleh karena itu, meskipun abu sekam padi memiliki potensi besar sebagai bahan suplemen, penggunaannya harus dibatasi pada kadar optimum agar peningkatan kuat tekan dapat tercapai secara maksimal.



Gambar 3 Grafik Hubungan Kuat Tekan dan Persentase Abu Sekam Padi untuk Berbagai Mutu Beton

E. Perbandingan Persentase Substitusi Optimum Bahan Suplemen

Perbandingan persentase substitusi optimum antara *fly ash*, *slag* nikel, dan abu sekam padi diperlukan untuk memahami perbedaan efektivitas masing-masing bahan suplemen dalam meningkatkan kinerja beton. Setiap material memiliki karakteristik kimia dan fisik yang berbeda, sehingga respon beton terhadap variasi kadar substitusi tidak bersifat seragam. Oleh karena itu, analisis perbandingan ini difokuskan pada identifikasi kecenderungan kadar optimum masing-masing bahan suplemen serta mekanisme yang mendasari perbedaan tersebut, guna memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai batas efektivitas dan potensi pemanfaatan ketiga bahan suplemen dalam campuran beton.

Tabel 4 Perbandingan Persentase Substitusi Bahan Suplemen dan Kuat Tekan Maksimum

No.	Mutu Beton Rencana (MPa)	% Optimum Bahan Suplemen			Kuat Tekan Maksimum		
		FA (%)	SN (%)	ASP (%)	FA (MPa)	SN (MPa)	ASP (MPa)
1	20	14,35	12,65	12,53	21,39	21,50	21,30
2	25	11,83	10,67	11,10	26,72	26,38	26,61
3	30	11,38	9,91	9,85	30,89	30,89	30,72
4	35	10,33	8,34	8,59	35,96	35,85	35,78

Berdasarkan **Tabel 4**, perbandingan substitusi optimum, terlihat bahwa *fly ash* secara konsisten memerlukan persentase substitusi optimum yang lebih tinggi dibandingkan *slag* nikel dan abu sekam padi pada seluruh mutu beton yang ditinjau. Pada mutu beton rencana 20 MPa, substitusi optimum *fly ash* mencapai 14,35%, lebih besar dibandingkan *slag* nikel (12,65%) dan abu sekam padi (12,53%). Pola ini berlanjut pada mutu 25 MPa dan 30 MPa, di mana substitusi optimum *fly ash* masing-masing sebesar 11,83% dan 11,38%, sedangkan *slag* nikel dan abu sekam padi berada pada kisaran yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki rentang efektivitas substitusi yang lebih luas, sejalan dengan sifat

reaktivitas *pozzolan* yang moderat dan kontribusinya sebagai *filler* mikro dalam matriks beton.

Sebaliknya, *slag* nikel dan abu sekam padi menunjukkan kecenderungan substitusi optimum yang lebih rendah, terutama pada mutu beton yang lebih tinggi. Pada mutu 35 MPa, substitusi optimum *slag* nikel dan abu sekam padi masing-masing hanya 8,34% dan 8,59%, lebih kecil dibandingkan *fly ash* (10,33%). Penurunan persentase substitusi optimum seiring peningkatan mutu beton ini mengindikasikan bahwa pada beton berkekuatan tinggi, kebutuhan terhadap semen aktif menjadi lebih dominan, sehingga ruang bagi bahan suplemen menjadi semakin terbatas. Abu sekam padi, meskipun sangat reaktif karena kandungan silika amorf yang tinggi, menunjukkan batas substitusi optimum yang relatif rendah akibat luas permukaan spesifiknya yang besar dan peningkatan kebutuhan air.

Dari sisi kuat tekan maksimum, ketiga bahan suplemen menunjukkan kinerja yang relatif sebanding pada setiap mutu beton. Pada mutu 20 MPa, kuat tekan maksimum berada pada kisaran 21,30–21,50 MPa, sedangkan pada mutu 35 MPa mencapai 35,78–35,96 MPa. *Fly ash* cenderung menghasilkan nilai kuat tekan maksimum sedikit lebih tinggi pada mutu menengah hingga tinggi, sedangkan *slag* nikel dan abu sekam padi memberikan nilai yang sangat kompetitif pada kadar substitusi optimum masing-masing. Secara keseluruhan, perbandingan ini menegaskan bahwa perbedaan utama ketiga bahan suplemen bukan terletak pada capaian kuat tekan maksimum, melainkan pada besarnya persentase substitusi optimum, yang dipengaruhi oleh karakteristik kimia, fisik, dan mekanisme reaksi masing-masing bahan.

F. Perbandingan Biaya Produksi Beton

Perbandingan biaya produksi beton dilakukan untuk menilai tingkat efisiensi ekonomi antara beton konvensional dan beton berbahan suplemen mineral pada berbagai mutu rencana. Analisis ini tidak hanya mempertimbangkan total biaya produksi per meter kubik, tetapi juga biaya relatif terhadap kinerja mekanik beton, yang dinyatakan dalam biaya per MPa kuat tekan. Dengan pendekatan tersebut, perbandingan biaya dapat memberikan gambaran yang lebih objektif mengenai nilai ekonomis setiap jenis campuran beton, sekaligus mengidentifikasi bahan suplemen yang paling efektif dalam menurunkan biaya produksi tanpa mengurangi mutu beton yang direncanakan. Biaya produksi beton konvensional dan beton berbahan suplemen per MPa per m3 untuk ditunjukkan seperti pada **Tabel 5**

Tabel 5 Perbandingan Biaya Produksi Beton Konvensional dan Beton Berbahan Bersuplemen

No.	Mutu Beton Rencana	Biaya Produksi Beton/MPa/m^3 (Rp)			
		BK	BFA	BSN	BASP
1	20 MPa	44.317,39	42.622,46	43.741,88	43.374,61
2	25 MPa	38.055,91	36.778,27	37.612,04	37.292,23
3	30 MPa	32.578,59	31.503,09	32.217,88	31.985,62
4	35 MPa	29.039,93	28.143,53	28.761,14	28.565,09

Tabel 5 menunjukkan bahwa penggunaan bahan suplemen mineral pada beton secara konsisten mampu menurunkan biaya produksi per MPa kuat tekan dibandingkan beton konvensional pada seluruh mutu rencana. Pada mutu 20 MPa, beton konvensional memiliki biaya sebesar Rp 44.317,39/MPa/m^3, sedangkan beton dengan *fly ash*, *slag* nikel, dan abu sekam padi masing-masing menurun menjadi Rp 42.622,46/MPa/m^3, Rp 43.741,88/MPa/m^3, dan Rp 43.374,61/MPa/m^3. Pola serupa berlanjut pada mutu 25 – 35

MPa, di mana beton *fly ash* selalu menunjukkan nilai biaya per MPa terendah, diikuti oleh beton abu sekam padi dan beton *slag* nikel, sementara beton konvensional tetap menjadi yang paling mahal.

Penurunan biaya per MPa ini semakin signifikan pada mutu beton yang lebih tinggi. Pada mutu 35 MPa, beton konvensional memerlukan biaya Rp 29.039,93/MPa/m³, sedangkan beton *fly ash* hanya Rp 28.143,53/MPa/m³, beton abu sekam padi Rp 28.565,09/MPa/m³, dan beton *slag* nikel Rp 28.761,14/MPa/m³. Hal ini menunjukkan bahwa bahan suplemen tidak hanya berfungsi sebagai pengganti sebagian semen, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan biaya terhadap capaian kuat tekan. Secara keseluruhan, *fly ash* merupakan bahan suplemen paling efisien secara ekonomi, diikuti oleh abu sekam padi, sedangkan slag nikel tetap memberikan penghematan dibanding beton konvensional namun dengan efisiensi yang relatif lebih rendah.

4. PENUTUP

Analisis biaya produksi beton merupakan aspek penting dalam evaluasi kinerja material, karena keberhasilan penerapan suatu inovasi material tidak hanya ditentukan oleh peningkatan sifat mekanik, tetapi juga oleh efisiensi ekonominya. Dalam penelitian ini, pendekatan analisis mencakup perhitungan biaya produksi per meter kubik serta biaya relatif terhadap kuat tekan beton, sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak penggunaan bahan suplemen terhadap penghematan biaya. Berdasarkan hasil analisis tersebut, maka kesimpulan penelitian dirumuskan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan utama terkait efisiensi biaya produksi beton, sebagai berikut:

1. Biaya produksi beton konvensional per m³ berdasarkan data yang diperoleh berada pada kisaran Rp 886.347,70 hingga Rp 1.016.397,70, masing-masing untuk mutu beton rencana 20 MPa sampai 35 MPa. Peningkatan biaya ini sejalan dengan bertambahnya kebutuhan semen sebagai komponen utama pengikat pada beton mutu yang lebih tinggi.
2. Biaya produksi beton dengan penambahan suplemen material per m³ menunjukkan nilai yang lebih rendah dibanding beton konvensional pada mutu yang sama. Beton dengan suplemen *fly ash* memiliki biaya sekitar Rp 852.449,20 – Rp 985.023,70, beton dengan *slag* nikel sekitar Rp 874.837,50 – Rp 1.006.639,90, dan beton dengan abu sekam padi sekitar Rp 867.492,20 – Rp 999.778,20, untuk rentang mutu 20 – 35 MPa.
3. Perbandingan biaya produksi menunjukkan bahwa seluruh beton berbahan suplemen lebih ekonomis dibanding beton konvensional, baik ditinjau dari biaya per m³ maupun biaya per MPa kuat tekan. Beton *fly ash* secara konsisten memberikan biaya terendah, diikuti beton abu sekam padi, sedangkan beton *slag* nikel tetap lebih murah dibanding beton konvensional namun dengan selisih yang lebih kecil.
4. Penggunaan suplemen material terbukti memberikan penghematan biaya yang signifikan, terutama pada beton dengan *fly ash* yang mampu menurunkan biaya produksi hingga sekitar 3 – 4% per MPa kuat tekan, diikuti abu sekam padi sekitar 1,6 – 2,1%, dan *slag* nikel sekitar 1%. Dengan demikian, selain meningkatkan aspek keberlanjutan melalui pengurangan penggunaan semen, pemanfaatan bahan suplemen, khususnya *fly ash* juga memberikan keuntungan ekonomi yang nyata tanpa mengorbankan mutu beton yang direncanakan.

5. DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 308. (2001), "Guide to Curing Concrete", American Concrete Institute.

Afiah, I. N., Ashad, H., & Rahman, M. J. (2022). Evaluasi Kinerja Struktur Beton Bertulang Dengan Pushover Analysis Berdasarkan ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440. Jurnal Flyover, 2(2), 99–110. https://doi.org/10.52103/JFO.V2I2.1347

American Concrete Institute (ACI) Committee 211. (2002), "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)". ACI.

Damayanti, R. K., Massara, A., & Syafei, I. (2025). Evaluasi Tingkat Kerentanan Lereng Jalan dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Jurnal Flyover, 5(1), 70–83. https://doi.org/10.52103/JFO.V5I1.2164

Gambatese, J. A., & Hallowell, M. (2011), "Impact of Automation and Innovation in Concrete Production and Placement, Journal of Construction Engineering and Management, 137(6), 439–448.

Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., & Roussel, N. (2010), "An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: Reviewing Current Research Trends", Journal of Cleaner Production, 19(11), 1229-1238.

Hanafi Ashad, "Dampak Intrusi Mikroorganisme Terhadap Material Beton dan Cara Penanggulangannya", [Buku], Perpustakaan Digital Perpuskita. https://perpuskita.perpustakaandigital.com/detail/dampak-intrusi-mikroorganisme-terhadap-material-beton-dan-cara-penanggulangannya/86448

Hernandez (2019), "Durability Performance of Reinforced Concrete-Based Fly Ash Exposed to Combined Chloride Sulfate Attack".

Karim, A., Supardi, S., Alifuddin, A., & Maruddin, M. (2023). Karakteristik Kekuatan Geser Tanah Terhadap Perubahan Nilai Kepadatan Tanah. Jurnal Flyover, 3(2), 69–76. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I2.1532

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002), "Design and Control of Concrete Mixtures (14th ed.)", Portland Cement Association.

Kumar, S., Singh, B. K., & Pandey, V. K. (2018), "Impact of Rice Husk Ash on Cement Concrete", International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 2(3), 1786–1790. https://www.ijtsrd.com/engineering/civil-engineering/11558/impact-of-rice-husk-ash-on-cement-concrete/surender-kumar

Kurniawan, R. D., Ashad, H., & Rahman, M. J. (2024). Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Gedung Perpustakaan Lama (Gedung G) IAIN Sorong di Wilayah Rawan Gempa berdasarkan SNI 1726:2019 dan RSNI 9273:202X (Adopsi ASCE 41-17). Jurnal Flyover, 4(2), 299–312. https://doi.org/10.52103/JFO.V4I2.2198

Mahmud, A. I., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2022). Pemodelan Bidang Gelincir Tanah Menggunakan Plaxis 2D pada Penanganan Pascabencana Ruas Salaonro-Pompanua Kabupaten Soppeng. Jurnal Flyover, 2(2), 76–85. https://doi.org/10.52103/JFO.V2I2.1345

Mehta, P. K. (2002), "Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. Concrete Internasional", Vol. 24, No. 7, pp. 23 28.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014), "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.)", McGraw-Hill Education.

Neville, A. M. (2011), "Properties of Concrete (5th ed.)", Pearson Education Limited.

Pareang, A., Ashad, H., & Rahman, M. J. (2024). Rekayasa Nilai Superstruktur pada Bangunan Rumah Susun Universitas Kristen Indonesia (UKI) Toraja. Jurnal Flyover, 4(1), 70–77. https://doi.org/10.52103/JFO.V4I1.2166

Rohman, M. N., Simanihuruk, B., & Dewita, H. (2025), "Karakteristik Beton Mutu f'c 30 MPa Dengan Menggunakan Limbah Peleburan Baja (Slag) dan Pembakaran Batubara (Fly Ash)", Prosiding TAU SNARS-TEK Seminar Nasional Rekayasa dan Teknologi, 5(1), 23–30. https://doi.org/10.47970/snarstek.v2i1.771.

Shi, C., Wu, Y., & Riefler, C. (2015), "Recent Advances in Understanding the Role of Supplementary Cementitious Materials in Concrete", Construction and Building Materials, 78, 71-80. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018

Siddique, R. (2011), "Supplementary Cementing Materials, Springer.

Siddique, R., & Khan, M. I. (2011), "Supplementary Cementing Materials", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-17865-8 (Hardcover), 978-3-642-26760-4 (Softcover),

978-3-642-17866-5 (eBook), Diterbitkan pada 28 Maret 2011, Seri : Engineering Materials, Jumlah halaman 288. DOI: 10.1007/978-3-642-17866-5.
SNI 03-2834-2000, “Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal”, Badan Standardisasi Nasional.
Tayfun, A., & Zeynep, K. (2015), “Effects of Transportation Distance on Concrete Cost and Quality”, International Journal of Civil Engineering, 13(4), 285–292.
Thomas, M. (2007), “Supplementary Cementing Materials in Concrete”, CRC Press.
Tumadir, A. B., Ashda, H., Rahman, M. J., & BP, M. S. (2022). Kajian Kapasitas Lentur Balok Beton Dengan Perkuatan Luar. Jurnal Flyover, 2(2), 136–146. https://doi.org/10.52103/JFO.V2I2.1356
Zain, M. F. M., & Mahmud, H. B. (2000), “ Effect of Fly Ash on the Properties of High Performance Concrete”, Construction and Building Materials, 14(7), 405-412.