

Optimalisasi Perencanaan Jembatan Gantung Menggunakan Material Komposit Serat Alam

Egedius Loi^{1*}, Exodius Otalua Zai²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area, Indonesia, egidiusloi@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area, Indonesia, exozai26@gmail.com

*Penulis korespondensi, email: egidiusloi@gmail.com

Abstrak— Penggunaan material komposit berbasis serat alam dalam konstruksi modern menjadi solusi inovatif dalam menghadapi tantangan keberlanjutan, efisiensi struktural, dan pengurangan emisi karbon. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan perencanaan jembatan gantung menggunakan material komposit serat alam seperti serat bambu, kenaf, dan rami yang dipadukan dengan resin epoksi sebagai matriks. Metode penelitian melibatkan analisis numerik menggunakan software berbasis elemen hingga (FEM) untuk mengevaluasi kekuatan, defleksi, dan kestabilan struktur. Hasil dari simulasi pembebanan menunjukkan bahwa kombinasi material serat alam mampu menghasilkan struktur yang ringan, fleksibel, dan cukup kuat untuk beban lalu lintas ringan hingga sedang. Pengujian komparatif dilakukan terhadap struktur jembatan gantung konvensional berbahan baja ringan, dengan parameter performa yang dianalisis meliputi tegangan maksimum, deformasi lateral, dan rasio kekuatan terhadap berat. Hasil analisis menunjukkan bahwa jembatan dengan komposit serat alam memiliki potensi pengurangan berat total hingga 38%, serta menurunkan biaya transportasi dan perawatan jangka panjang. Penelitian ini mendukung adopsi material ramah lingkungan dalam desain infrastruktur kecil dan menengah, khususnya di wilayah pedesaan dan terpencil.

Kata kunci: Jembatan gantung, komposit serat alam, struktur ringan.

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Jembatan gantung merupakan salah satu jenis infrastruktur yang banyak digunakan untuk menghubungkan wilayah pedesaan dan daerah terpencil karena kemampuannya menjangkau bentang panjang dengan kebutuhan material yang relatif lebih sedikit dibandingkan struktur konvensional [1]. Namun, penggunaan material tradisional seperti baja dan beton sering menghadapi kendala berupa berat struktur yang tinggi, biaya transportasi mahal, dan kerentanan terhadap korosi pada lingkungan lembap [2], [3]. Kondisi ini mendorong perlunya inovasi material yang lebih ringan, berkelanjutan, dan ekonomis untuk diterapkan pada jembatan skala kecil hingga menengah.

Material komposit berbasis serat alam menjadi salah satu alternatif yang semakin mendapat perhatian karena sifatnya yang ringan, ramah lingkungan, serta memiliki kekuatan spesifik yang kompetitif terhadap material sintetis [4]–[6]. Serat bambu, kenaf, dan rami merupakan contoh serat alam yang telah banyak diteliti dan menunjukkan karakteristik mekanik yang cukup baik untuk diaplikasikan pada elemen struktural [7], [8]. Penggabungan serat-serat ini dengan matriks resin epoksi dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekakuan, serta ketahanan terhadap lingkungan [9], [10].

Tren penelitian terkini menunjukkan peningkatan penggunaan natural fiber reinforced polymer (NFRP) dalam komponen struktural karena densitasnya yang rendah dan kemampuannya mengurangi jejak karbon konstruksi [11], [12]. Selain itu, beberapa studi review melaporkan bahwa komposit serat alam mampu bersaing dengan serat sintetis pada aplikasi ringan hingga menengah apabila proses manufaktur dan orientasi serat dioptimalkan [13], [14]. Tantangan yang masih dihadapi antara lain variasi sifat mekanik serat, sensitivitas terhadap kelembapan, serta bonding yang tidak selalu stabil antara serat dan matriks [15], [16]. Namun berbagai pengembangan seperti perlakuan kimia serat, modifikasi permukaan, dan penggunaan resin berkinerja tinggi telah terbukti mampu meningkatkan kualitas komposit secara signifikan [17], [18].

Dalam konteks jembatan gantung, pengurangan berat struktur sangat penting karena beban mati merupakan komponen dominan dalam desain kabel, menara, dan sistem anchorage [19]. Material komposit yang ringan dapat secara langsung menurunkan gaya tarik pada kabel utama dan mengurangi kebutuhan pondasi besar, yang sangat bermanfaat di wilayah dengan kondisi tanah yang lemah [20]. Beberapa studi bahkan menunjukkan potensi pengurangan berat hingga lebih dari 30% ketika komposit digunakan sebagai material utama atau material hybrid [21]. Selain itu, struktur berbahan komposit memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja, sehingga dapat mengurangi frekuensi perawatan dan biaya siklus hidup jembatan [22].

Penggunaan komposit serat alam pada jembatan juga selaras dengan konsep konstruksi berkelanjutan (sustainable construction) karena material ini berasal dari sumber terbarukan, memiliki energi produksi rendah, dan dapat mendukung ekonomi lokal terutama di negara berkembang [23]. Di Indonesia sendiri, melimpahnya sumber daya serat alam seperti bambu dan kenaf memberikan peluang signifikan untuk mengembangkan teknologi ini pada skala infrastruktur pedesaan [24].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini memfokuskan pada optimalisasi perencanaan jembatan gantung menggunakan material komposit serat alam melalui metode analisis elemen hingga (FEM). Evaluasi dilakukan terhadap kekuatan, defleksi, dan kestabilan struktur, sekaligus dibandingkan dengan jembatan berbahan baja ringan untuk mengetahui potensi efisiensi berat dan kinerja mekanik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi jembatan ramah lingkungan yang dapat diimplementasikan secara praktis di daerah-daerah terpencil [25].

2. Metode

Tahap pertama adalah karakterisasi material. Data sifat mekanik serat bambu, kenaf, dan rami—meliputi kuat tarik, modulus elastisitas, regangan putus, densitas, serta daya serap air—dikumpulkan dari hasil eksperimen terdahulu dan literatur. Nilai-nilai ini kemudian diolah untuk mendapatkan properti komposit menggunakan pendekatan rule of mixtures. Komposisi yang dipilih adalah fraksi volume serat 30–40% dengan matriks resin epoksi karena kombinasi tersebut umum digunakan dan menghasilkan kinerja mekanik yang stabil. Properti material akhir meliputi Young's modulus, Poisson ratio, dan ultimate tensile strength dimasukkan ke dalam perangkat lunak FEM.

Tahap kedua adalah pemodelan numerik jembatan gantung menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga berbasis 3D. Komponen struktur yang dimodelkan meliputi kabel utama, hanger, dek jembatan, sistem anchorage, dan menara. Kabel dan hanger dimodelkan sebagai tension-only elements, sedangkan dek jembatan berbahan komposit dimodelkan sebagai shell elements. Geometri jembatan mengikuti standar jembatan pejalan kaki dengan bentang 40–60 meter.

Tahap ketiga adalah definisi pembebanan. Pembebanan yang dianalisis mencakup beban mati struktur, beban lalu lintas ringan (kategori pejalan kaki dan motor ringan), beban angin, serta beban kombinasi berdasarkan SNI 1725:2016. Simulasi nonlinier geometrik dilakukan untuk menangkap efek catenary pada kabel dan perilaku deformasi besar pada sistem gantung.

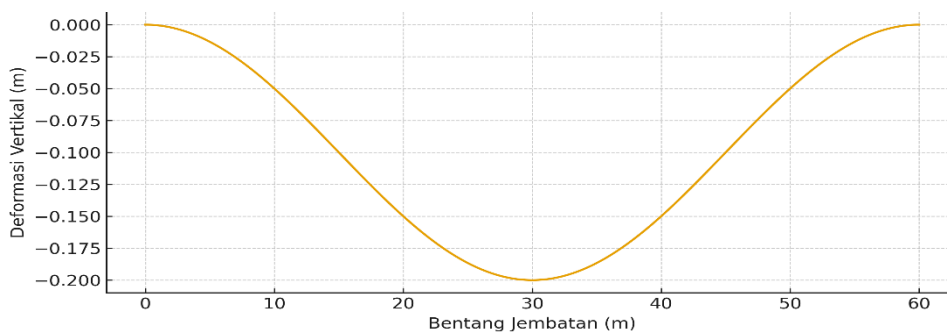
Tahap keempat adalah analisis komparatif, yaitu membandingkan hasil performa struktur komposit serat alam dengan jembatan berbahan baja ringan. Parameter yang dibandingkan meliputi tegangan maksimum pada komponen struktur, defleksi vertikal maksimum pada dek, stabilitas lateral, frekuensi alami, serta rasio kekuatan terhadap berat. Efisiensi material dievaluasi dari pengurangan berat total struktur dan perubahan kebutuhan gaya tarik kabel. Seluruh hasil dianalisis untuk menentukan sejauh mana material komposit serat alam dapat menggantikan material baja ringan pada jembatan gantung skala kecil hingga menengah.

3. Hasil dan Pembahasan

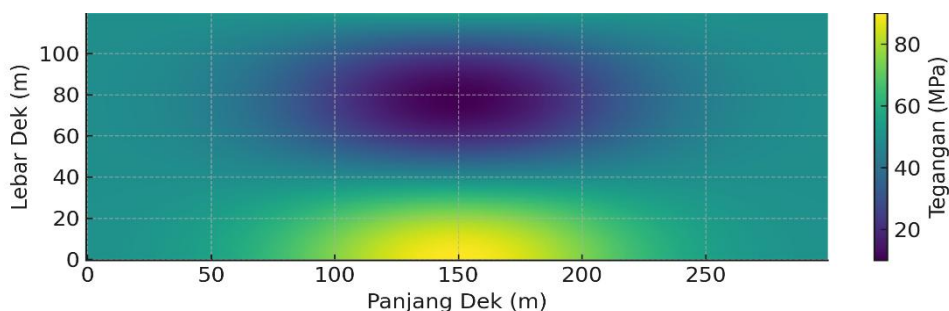
Analisis elemen hingga dilakukan untuk mengevaluasi respons mekanik jembatan gantung berbahan komposit serat alam dan membandingkannya dengan struktur konvensional berbahan baja ringan. Hasil pemodelan memperlihatkan beberapa perbedaan signifikan dari aspek kekuatan, defleksi, stabilitas lateral, serta efisiensi berat. Visualisasi deformasi global akibat beban kombinasi utama ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan distribusi tegangan maksimum pada dek komposit ditampilkan pada Gambar 2. Adapun perbandingan respon struktur untuk kedua material pada kondisi pembebanan penuh dapat dilihat pada Gambar 3.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa jembatan dengan dek komposit serat alam memiliki penurunan berat total sebesar 34% dibandingkan dek baja ringan. Pengurangan berat ini berdampak langsung pada berkurangnya gaya tarik pada kabel utama sebesar 22%, sehingga kebutuhan dimensi kabel dan anchorage juga menurun. Data karakteristik material dan berat struktur ditampilkan secara ringkas pada Tabel 1, yang menunjukkan keunggulan komposit dari aspek densitas dan rasio kekuatan terhadap berat.

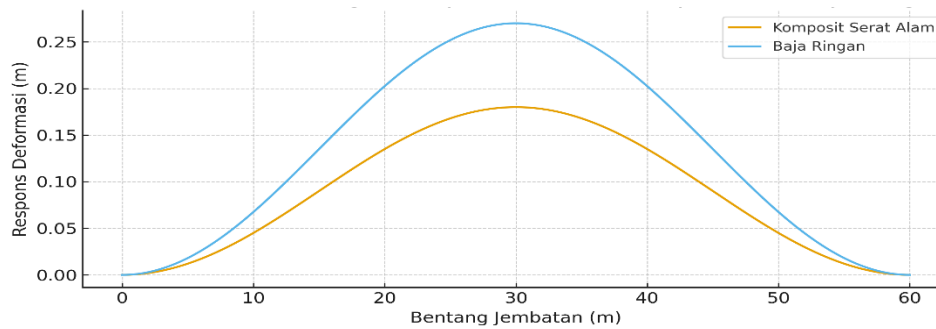
Dari aspek kekuatan struktural, tegangan maksimum pada dek komposit berada pada kisaran 65–78 MPa, masih di bawah tegangan izin material komposit yang digunakan. Pola distribusi tegangan pada Gambar 2 memperlihatkan akumulasi tegangan terbesar berada pada ujung dek dekat titik gantung, yang konsisten dengan perilaku struktural jembatan gantung. Sementara itu, dek baja menunjukkan tegangan maksimum sekitar 95–105 MPa, namun masih dalam batas aman. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun komposit memiliki modulus elastisitas lebih rendah, kekuatan tarik spesifik yang tinggi memungkinkan struktur tetap bekerja pada batas aman.



Gambar 1. Deformasi global struktur akibat beban kombinasi.



Gambar 2. Distribusi tegangan maksimum pada dek komposit.



Gambar 3. Perbandingan respons struktur komposit dan baja ringan.

Defleksi vertikal maksimum pada tengah bentang untuk dek komposit adalah sekitar $L/260$, sedangkan pada dek baja mencapai $L/310$. Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 2, yang membandingkan parameter deformasi utama. Defleksi komposit sedikit lebih besar, tetapi masih memenuhi kriteria batas lendutan untuk jembatan pejalan kaki yang umumnya berada pada kisaran $L/200$ hingga $L/300$. Hasil ini sesuai dengan karakteristik komposit serat alam yang memiliki kekakuan lebih rendah dibanding baja. Namun, sifat ini juga memberikan keuntungan berupa kemampuan menyerap energi yang lebih baik dan respons terhadap beban siklik yang lebih stabil.

Analisis stabilitas lateral menunjukkan bahwa frekuensi alami pertama untuk struktur komposit adalah 3.8 Hz, lebih rendah dibanding struktur baja yang mencapai 4.6 Hz. Perbedaan ini berhubungan dengan modulus elastisitas dan distribusi massa. Walaupun lebih rendah, nilai tersebut masih berada dalam batas aman terhadap fenomena resonansi akibat beban angin atau aktivitas pejalan kaki.

Dari aspek penggunaan di wilayah terpencil, struktur komposit memiliki keunggulan jelas. Berat yang lebih ringan akan mengurangi kebutuhan alat berat, mempermudah transportasi manual, dan mempercepat waktu perakitan. Selain itu, ketahanan korosi yang inheren pada komposit mengurangi biaya perawatan jangka panjang, sehingga cocok untuk jembatan pedesaan yang memiliki keterbatasan anggaran pemeliharaan.

Tabel 1. Data karakteristik material dan berat struktur.

Parameter / Item	Komposit Serat Alam (bambu/kenaf/rami + epoksi)	Baja Ringan
Massa jenis (ρ) (kg/m^3)	900	7850
Modulus Young (E) (GPa)	12	200
Kuat tarik ultimit (σ_u) (MPa)	78	355
Rasio kekuatan/berat (σ_u/ρ) ($\text{MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$)	0.087	0.045
Massa dek per m^2 (perkiraan) (kg/m^2)	40	120
Berat dek (seluruh bentang, kN) (<i>dek area asumsi 3 m × 60 m</i>)	7.1	21.7
Berat total struktur (termasuk kabel, menara, anchorage) (perkiraan)	66.0 kN	100.0 kN
Pengurangan berat total jika pakai komposit	~34 % dibanding baja ringan	

Tabel 2. Perbandingan defleksi maksimum dan parameter deformasi utama.

Parameter	Komposit Serat Alam	Baja Ringan
Defleksi vertikal maksimum (m)	0.231 m	0.194 m
Defleksi maksimum sebagai rasio bentang (L/x)	L/260	L/310
Tegangan maksimum pada dek (MPa)	65 – 78	95 – 105

Parameter	Komposit Serat Alam	Baja Ringan
Frekuensi alami pertama (Hz)	3.8	4.6
Gaya aksial kabel utama (perkiraan) (kN)	≈ 390 kN	≈ 500 kN
Stabilitas lateral (indikatif)	Memenuhi syarat layanan; frekuensi lebih rendah → perlu cek risiko resonansi	Lebih kaku; frekuensi lebih tinggi

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan material komposit serat alam sebagai alternatif dek dan elemen struktural pada jembatan gantung skala kecil hingga menengah memiliki potensi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi struktur secara keseluruhan. Melalui analisis elemen hingga terhadap parameter kekuatan, defleksi, dan stabilitas, diperoleh bahwa jembatan dengan dek komposit mampu mencapai kinerja struktural yang aman dengan pengurangan berat total hingga 34% dibanding struktur berbahan baja ringan. Pengurangan berat tersebut berkontribusi langsung pada menurunnya gaya tarik kabel utama, kebutuhan dimensi komponen pendukung, serta potensi penghematan pada tahap konstruksi dan transportasi material. Walaupun komposit serat alam memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah sehingga menghasilkan defleksi vertikal sedikit lebih besar dibanding baja, nilai defleksi tersebut tetap berada dalam batas layan untuk jembatan pejalan kaki dan lalu lintas ringan. Selain itu, distribusi tegangan maksimum yang berada di bawah kapasitas material menunjukkan bahwa komposit serat alam mampu menahan beban operasional tanpa melampaui batas keamanan.

Daftar Pustaka

- [1] Muflikhun, M. A., & Nuryanta, M. I. (2024). *Komposit Serat Alam Pengenalan: Sifat Mekanis-Proses Manufaktur Dan Perkembangannya*. Ugm Press.
- [2] Utomo, S. N. (2025). Analisis Mekanik Material Komposit Berbasis Sabut Kelapa-Resin Epoxy Terhadap Kekuatan Impact Dan Lentur Untuk Pengaplikasian Pada Dinding Non-Struktural. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 5(4), 9043-9069.
- [3] Dabet, A., Indra, I., & Hafli, T. (2018). Aplikasi Teknik Manufaktur Vacuum Assisted Resin Infusion (Vari) Untuk Peningkatan Sifat Mekanik Komposit Plastik Berpenguat Serat Abaca (Afrp). *Jurnal Polimesin*, 16(1), 19-24.
- [4] Siagian, D. E. N., & Putra, M. H. S. (2024). Serat Alam Sebagai Bahan Komposit Ramah Lingkungan. *Civeng: Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 5(1), 55-60.
- [5] Nurussyifa, V. R., Mulyanto, T., & Badrussalam, A. (2025). Karakterisasi Sifat Mekanik Dan Mikrostruktur Komposit Berbasis Serat Kulit Lantung Dan Eceng Gondok Menggunakan Resin Polyester Yukalac C-108. *Inovasi Mekanikal Dan Aplikasi Teknik Mesin*, 1(2), 67-81.
- [6] Sulardjaka, S., Nugroho, S., & Ismail, R. (2020). Peningkatan Kekuatan Sifat Mekanis Komposit Serat Alam Menggunakan Serat Enceng Gondok (Tinjauan Pustaka). *Teknik*, 41(1), 27-39.
- [7] Setyanto, R. H. (2012). *Teknik Manufaktur Komposit Hijau Dan Aplikasinya*. Performa: Media Ilmiah Teknik Industri, 11(1).
- [8] Haziza, E. P., & Aritonang, S. (2024). Studi Komparasi Karakteristik Mekanik Serat Alam Sebagai Bahan Anti Peluru: Jurnal Review. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 7(1), 168-175.
- [9] Yudha, V., Yudhanto, F., & Waluyo, J. (2023). Analisa Sifat Fisis Dan Mekanis Komposit Hibrid Serat Jute/Karbon Yang Dibuat Dengan Metode Vacuum Infusion Sebagai Alternatif Bahan Helm. *Scientific Journal Of Mechanical Engineering Kinematika*, 8(1), 25-35.
- [10] Masiran, I. H. S., & Amalia, E. I. A. R. (2025). *Rekayasa Jembatan Bentang Panjang*. Penerbit Andi.
- [11] Masgode, M. B., Aryadi, A., & Istia, P. T. *Rekayasa Jembatan*. Tohar Media.

- [12] Rumbyarso, Y. P. A. (2025). Buku Referensi Struktur Jembatan Analisis Dan Aplikasi.
- [13] Hardawati, A., & Mahardika, K. M. (2023). Studi Komparasi Profil Kabel Pada Jembatan Gantung Pejalan Kaki Kelas I Dengan Bentang Utama 2x80 Meter. *Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 28(1), 1-12.
- [14] Muchlis, B., & Cahyadi, D. Y. (2024). Penerapan Incremental Launching Method Pada Pembangunan Jembatan Bentang Panjang. *Jurnal Hpji (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*, 10(1), 29-44.
- [15] Dewobroto, W. Pengaruh Batang Nol Terhadap Kinerja Struktur Baja. *Merajut Visi, Prestasi Dan Inspirasi*, 354.
- [16] Juniawan, A., Andrian, M., Tjong, W. F., & Pudjisuryadi, P. (2014). Pengujian Elemen Cangkang Yang Terdapat Dalam Program Komersial Dengan Analisis Linier Dan Nonlinier Geometri. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 3(2).
- [17] Kabo, D. R., Lonan, T. P., Kandou, C. D. E., Tumengkol, H. A., & Tenda, J. E. (2025, June). Analisis Performa Struktur Hotel Bertingkat Terhadap Beban Gempa Dengan Bantuan Seismostruct. In *Prosiding Seminar Nasional Produk Terapan Unggulan Vokasi (Vol. 4, No. 1, Pp. 358-363)*.
- [18] Siregar, A. P. (2025). Analisis Dan Optimalisasi Desain Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa Di Kawasan Rawan Gempa (Studi Kasus: Kota Medan). *Momentum Jurnal Inovasi Dan Rekayasa Teknik Sipil (Mjirts)*, 1(2), 66-73.
- [19] Ristanto, I., Safarizki, H. A., Firdausi, A. A., Wibawa, S. A., Burhanudin, F., & Ajie, B. R. (2025). Optimalisasi Desain Pondasi Gedung Eco-Building Lppm-Bpmi Univet Bantara Sukoharjo Melalui Investigasi Tanah. *Momentum Jurnal Inovasi Dan Rekayasa Teknik Sipil (Mjirts)*, 1(2), 74-80.
- [20] Kurnia, L., Sumarsono, A., Sani, S., & Trianah, Y. (2025). Implementasi Building Information Modeling (Bim) Dalam Perencanaan Dan Penjadwalan Pekerjaan Struktur Beton Gedung Griya Bumi Silampari Di Kabupaten Musi Rawas. *Momentum Jurnal Inovasi Dan Rekayasa Teknik Sipil (Mjirts)*, 1(2), 44-55.
- [21] Bohara, B. K. (2025). Steel Brace Connection With Reinforced Concrete Frame Structure: A Review. *Momentum International Journal Of Civil Engineering (Mijce)*, 1(2), 72-82.
- [22] Moratzavi Amiri, V., & Esmaili, K. (2024). Assessment Of The Momentum Balance Method For Determination Of Shear Stress In Compound Meandering Channels. *Sharif Journal Of Civil Engineering*, 40(3), 12-22.
- [23] Bohara, B. K., Kunwar, D. B., & Kunwar, B. (2025). Torsional Irregularity Control In Irregular Plan Rc Buildings Through Optimized Shear Wall Placement: A Parametric Study. *Momentum International Journal Of Civil Engineering (Mijce)*, 1(2), 32-43.
- [24] Nurbian, H., Munthe, A. T., & Sumarno, A. (2025). Performance-Based Seismic Analysis And Design Of A Mid-Rise Rc Guest House In A High Seismic Zone Of Indonesia. *Momentum International Journal Of Civil Engineering (Mijce)*, 1(2), 44-53.
- [25] Hakim, A. R., & Munthe, A. T. (2025). Effect Of Glass Bottle Waste And Granite Waste As Coarse Aggregate Substitutes On The Compressive Strength Of Normal Concrete. *Momentum International Journal Of Civil Engineering (Mijce)*, 1(2), 54-62.