

Metode Korelasi Gambar Digital (KDG) untuk Menentukan Sifat Mekanik Beton Bio-Komposit

Parmo dan Arqowi Pribadi

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Ampel Surabaya, Surabaya
e-mail: parmo_99@uinsa.ac.id

ABSTRAK

Beton bio-komposit merupakan alternatif material bangunan yang memiliki sifat keberlanjutan. Pengukuran perpindahan dan regangan material bio-komposit menjadi kendala karena sifat struktur material yang kompleks dan anisotropik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan sifat mekanik beton bio-komposit antara lain: kekuatan, modulus Young's, rasio Poisson, kuat lentur, hubungan tegangan-regangan dan gaya-perpindahan dengan metode Korelasi Gambar Digital (KGD) selama proses pembebanan. Hasil uji tekan menunjukkan bahwa spesimen memiliki kuat tekan 0,078 MPa, modulus Young's fase elastis (E_1) 28,50 MPa, fase deformasi plastis awal (E_2) 12,50 MPa, fase pasca puncak 2,85 (E_3) Mpa, dan rasio Poisson 0,32. Hasil uji lentur diperoleh nilai beban puncak 230 N pada perpindahan 1 mm, dan tegangan lentur balok 0,09 MPa pada regangan 2%. Metode KGD memberikan hasil visual yang sangat signifikan untuk melakukan analisis konsentrasi regangan benda uji selama proses pembebanan dan pada tiap-tiap fase perubahan struktur material.

Kata kunci: beton bio-komposit, korelasi gambar digital, sifat mekanik, modulus Young's, rasio Poisson

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material utama bangunan yang paling banyak digunakan, setelah air, diseluruh dunia di bidang konstruksi (Gagg, 2014). Produksi beton diperkirakan sekitar 25 miliar ton setiap tahunnya diseluruh dunia (Ma et al., 2023). Penggunaan material beton yang sangat besar ini telah mentasbihkan peranan penting beton dalam pembangunan infrastruktur antara lain bangunan gedung, bandara, terowongan, jembatan, jalan dan bendungan (Bouaka & Kriker, 2017). Disisi lain, penggunaan material semen sebagai penyusun inti campuran beton secara signifikan berdampak terhadap lingkungan. Produksi semen telah menyumbang sekitar 5% emisi CO₂ antropogenik secara global (Hawkins et al., 2016; Kline & Kline, 2015).

Industri dan penelitian di bidang konstruksi, pada dasawarsa terakhir, secara aktif mengeksplorasi inovasi material beton yang menggantikan penggunaan semen dan agregat konvensional yang didorong oleh kebutuhan akan keberlanjutan, efisiensi biaya, dan kinerja yang lebih baik. Salah satunya adalah penggunaan binder yang berbahan dasar kapur aerasi, hidrolik dan pozzolan sebagai pengganti material semen untuk beton bio-komposit (Belayachi et al., 2016; Parmo et al., 2023). Material binder yang berbasis kapur, seperti Tradical PF 70, memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan semen dengan emisi CO₂ yang dihasilkan lebih sedikit selama proses produksi. Material pengikat berbasis kapur juga dapat menyerap CO₂ selama siklus hidupnya melalui karbonasi sehingga mengurangi emisi (Malathy et al., 2023; Nicolle, 2025).

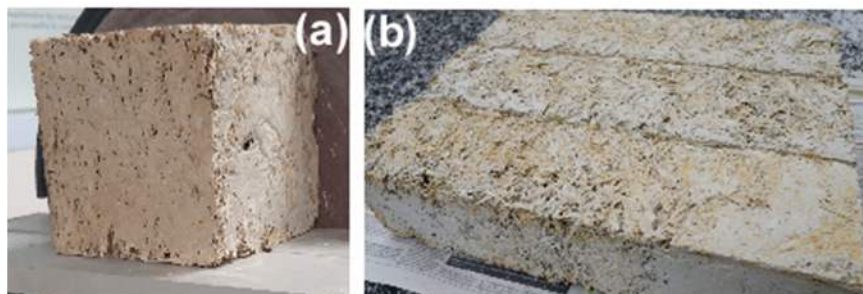
Sementara itu, penggantian agregat konvensional dengan produk sampingan pertanian membantu menghemat sumber daya alam, mengurangi penipisan pasir sungai dan agregat alam lainnya (Santhosh et al., 2021). Agregat berbasis bahan sampingan industri pertanian dan perkebunan seperti jerami, batang tanaman rami, batang bunga matahari dapat digunakan sebagai alternatif sebagai beton bio-komposit.

Beton berbasis bio-komposit merupakan material yang memiliki struktur kompleks dan bersifat anisotropik. Pengukuran regangan untuk menentukan properti mekanik terutama modulus Young's dan rasio Poisson, terutama pada skala mikro, seringkali mengalami kendala jika menggunakan teknik konvensional (i.g. *strain gauge measurement*), hal ini disebabkan karena permukaan material yang tidak rata dan bersifat porous yang tidak memungkinkan merekatkan strain gauge pada permukaan benda uji. Metode Korelasi Gambar Digital (KGD) atau *Digital Image Correlation* (DIC) menawarkan keunggulan untuk mengukur perpindahan dan regangan pada berbagai material, termasuk material beton bio-komposit. KGD merupakan metode non-kontak yang tidak mengganggu material yang diuji, terutama material bio-komposit yang sangat sensitif terhadap pengukuran berbasis kontak (Liu et al., 2024; Wang & Qin, 2023). Tidak seperti pengukuran dengan strain gauge, teknik pengukuran perpindahan dan regangan dengan metode KGD menyediakan data regangan dan perpindahan seluruh area bidang. Hal ini memungkinkan analisis komprehensif terhadap perilaku material pada saat pembebanan (Gdoutos, 2022).

Pada penelitian ini, metode KGD dipergunakan untuk menentukan sifat mekanik material beton bio-komposit berbasis jerami gandum sebagai aggregate dan kapur aerasi sebagai binder. Pengujian tekan benda uji kubus dan pengujian lentur benda uji balok dilakukan dengan menggunakan elektro mekanik testing machine (EMTM) yang dilengkapi dengan *load cell* kapasitas 10 KN untuk uji tekan dan 5 KN untuk uji lentur. Peralatan KGD seperti kamera beresolusi tinggi, lampu pencahayaan, computer PC yang telah terinstall *software post-processing* KGD disiapkan selama proses pengujian. Dari hasil pengujian dan *post-processing* KGD diperoleh nilai modulus Young's dan rasio Poisson untuk masing-masing benda uji tekan dan benda uji lentur.

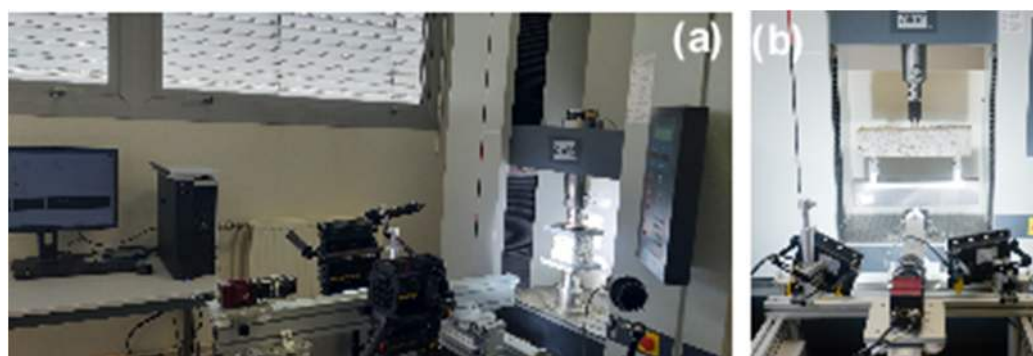
2. MATERIAL DAN METHODOLOGY

Pada penelitian ini, Tradical PF 70 dengan kandungan 70% kapur aerasi, 15% kapur hidrolik dan 10% pozzolan. Sementara itu, material agregat atau fiber menggunakan Jerami gandum kering yang telah dipotong-potong dengan mesin pemotong menjadi ukuran Panjang 10 mm sampai dengan 30 mm dengan bentuk yang bervariasi (pipih, silinder dan elips). Campuran material untuk membuat per m³ benda uji terdiri dari 444,44 kg binder, 88,89 kg agregat, dan 488,89 air sehingga rasio air/binder sebesar 1,1 dan rasio agregat/binder sebesar 0,2. Protokol pembuatan benda uji, pencetakan dan perawatan sesuai dengan literatur (Parmo et al., 2023). Berat jenis spesimen adalah 994 kg/m³ saat kondisi basah setelah pencampuran, dan 530 kg/m³ kondisi kering setelah 90 hari masa pemeliharaan (*curing*). Gambar 1 menunjukkan beton bio-komposit untuk pengujian tekan kubus dengan ukuran 10 x 10 x 10 cm³, dan benda uji balok untuk pengujian lentur dengan ukuran 10 x 10 x 40 cm³.



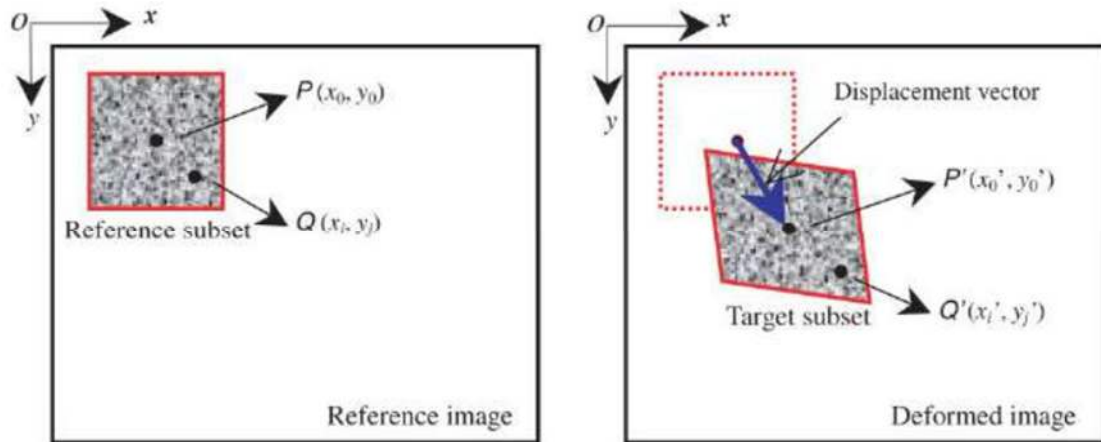
Gambar 1. Benda uji beton bio-komposit, (a) kubus, dan (b) balok

Pengujian kuat tekan dan lentur beton bio-komposit dilakukan setelah 90 hari masa perawatan benda uji. Elektro-mekanik Testing Machine (EMTM) yang dilengkapi dengan 10 KN load cell untuk uji kuat tekan dan 5 KN load cell untuk uji kuat lentur digunakan selama proses pengujian. Selama pengujian, perangkat KGD yang meliputi kamera beresolusi tinggi (Allied Vision Prosilica GX 6600), lensa (Nikon Micro-Nikkor 55 mm f2.8) dipasang dan dikoneksikan dengan computer. Untuk mendapatkan pencahayaan yang cukup, lampu LED dipasang didepan benda uji. Prosedur penyiapan benda uji untuk pre- dan post-processing dengan menggunakan metode KGD sesuai dengan literatur (Parmo et al., 2023). Gambar 2 menunjukkan set up pengujian tekan dan lentur.



Gambar 2. Set up pengujian, (a) uji tekan benda uji kubus, dan (b) uji lentur benda uji balok

KGD adalah metode non-kontak untuk mengukur perpindahan satu elemen yang ditandai dengan titik tertentu, metode ini dikembangkan pada awal 1980-an untuk pertama kalinya. Secara prinsip metode KGD antara lain: pertama, mengambil dua atau lebih citra pada area yang sama permukaan benda uji pada dua atau lebih pembebanan. Kedua, titik-titik yang bersesuaian (titik homolog) antara citra awal (citra referensi) dan citra yang mengalami deformasi dilakukan identifikasi. Dengan kata lain, area perhitungan yang disebut *Region of Interest* (ROI) pada citra referensi ditentukan terlebih dahulu, kemudian dibagi menjadi grid virtual dengan jarak yang seragam. Deformasi secara menyeluruh didapatkan dengan menghitung perpindahan pada setiap titik dalam grid virtual tersebut. Metode KGD menekankan optimalisasi pola tekstur permukaan pada setiap elemen agar hasil pengukuran deformasi menjadi lebih akurat. Gambar 3 menunjukkan skema ilustrasi dari subset persegi referensi dan subset yang terdistorsi (sebelum dan setelah deformasi) (Pan et al., 2009).



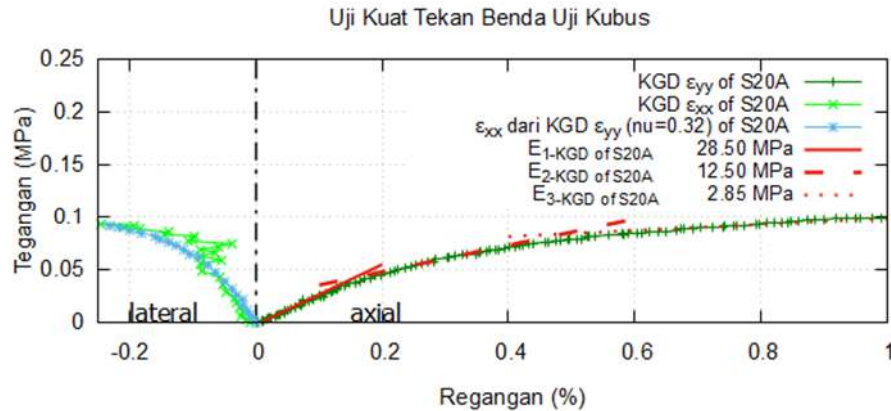
Gambar 3. Skema ilustrasi dari subset persegi referensi dan subset yang terdistorsi (sebelum dan setelah deformasi) (Pan et al., 2009).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis *post-processing* menghasilkan data regangan dan perpindahan area permukaan material beton bio-komposit yang sebelumnya telah di tandai dengan titik-titik bantu menggunakan cat semprot warna putih dan hitam. Metode KGD juga mampu menampilkan secara visual konsentrasi regangan benda uji secara *full field* selama proses pembebanan dalam bentuk warna-warna yang membedakan nilai regangan tertentu, baik regangan arah vertikal (ϵ_{yy}) dan arah horizontal (ϵ_{xx}). Sementara itu data beban selama pengujian di dapatkan dari alat uji elektromekanik *testing machine* (EMTM). Data beban, perpindahan, dan regangan benda uji kemudian di analisis untuk mendapatkan grafik tegangan-regangan, dan gaya-perpindahan yang kemudian dijelaskan sebagai berikut:

Tegangan-regangan dan sifat mekanik beton bio-komposit pada pengujian tekan

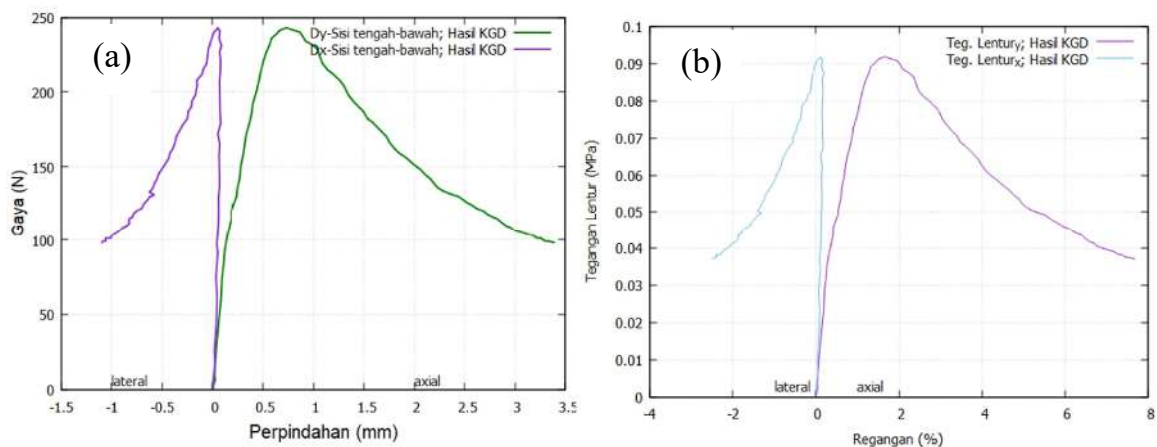
Gambar 4 menunjukkan grafik tegangan dan regangan pengujian kuat tekan beton bio-komposit dengan metode KGD. Dua fase utama yang dihasilkan dari metode KGD memperlihatkan regangan aksial dengan arah perpindahan vertikal (positif/ ϵ_{yy}) dan regangan lateral dengan arah perpindahan horizontal (negatif/ ϵ_{xx}). Dari hasil analisis kurva tegangan-regangan menunjukkan adanya transisi kekakuan material pada tahapan pembebanan yang berbeda, dimana E_1 merupakan respon awal elatis dengan nilai 28,50 MPa, E_2 mencerminkan deformasi plastis awal dengan nilai 12,50 MPa, dan E_3 menandakan fase pasca puncak (*softening*) dengan nilai 2,85 MPa. Sehingga dari hasil analisis transformasi nilai kekakuan material tersebut dapat disimpulkan bahwa letak kekuatan tekan berada pada area pertemuan antara fase deformasi plastis dan fase pasca puncak yaitu sekitar 0,078 MPa. Hasil uji ini menunjukkan bahwa kekakuan awal beton bio-komposit berbasis jerami gandum relatif rendah dibandingkan dengan beton normal konvensional yang umumnya memiliki modulus elastisitas antara 20 – 30 GPa (Neville, 1995). Hal ini menguatkan bahwa material yang diuji memiliki densitas rendah atau material ringan (530 kg/m^3) dengan karakteristik deformasi lebih besar pada beban rendah sehingga beton bio-komposit ini diperuntukkan untuk material pengisi (dinding bata). Hasil analisis *post-processing* dari metode KGD berupa regangan aksial dan lateral beton bio-komposit dapat dipakai untuk menentukan rasio Poisson. Dari hasil pengujian tekan beton bio-komposit didapatkan nilai rasio Poisson sebesar $\nu = 0,32$ yang menunjukkan konsistensi dengan perilaku material berpori atau material dengan komposit serat alami.



Gambar 4. Grafik tegangan dan regangan metode KGD pengujian kuat tekan beton bio-komposit

Gaya-perpindahan dan tegangan-regangan lentur beton bio-komposit

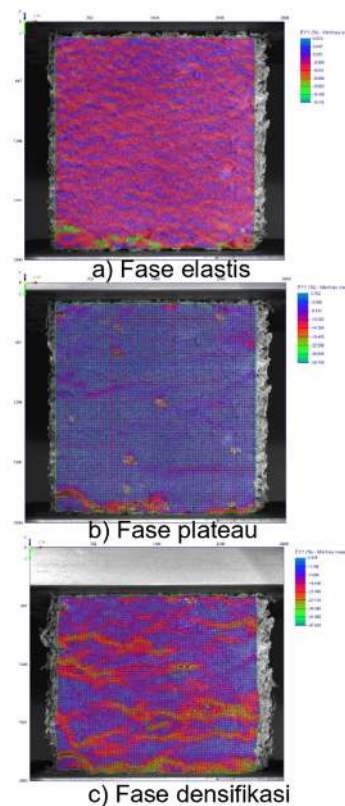
Data hasil pengujian lentur balok beton bio-komposit diperoleh dengan menerapkan *virtual gauge* pada sisi bawah specimen. Hubungan gaya dan perpindahan pada uji lentur beton bio-komposit menggunakan metode KGD ditunjukkan pada Gambar 5a. Peningkatan gaya bergerak secara linear hingga mencapai puncak sekitar 230 N pada perpindahan sekitar 1 mm. Kemudian pola grafik menunjukkan penurunan bertahap setelah melewati titik puncak (*maximum load*). Metode KGD juga memungkinkan untuk mendapatkan perpindahan lateral permukaan benda uji selama proses pembebanan, sehingga memungkinkan untuk dilakukan analisis rasio Poisson pada perilaku lentur balok uji. Sementara itu, gambar 5b menunjukkan hubungan tegangan-regangan lentur dengan puncak tegangan lentur sekitar 0,09 MPa pada regangan sekitar 2%. Perilaku lentur balok beton bio-komposit menunjukkan bahwa setelah mencapai titik beban maksimum, terjadi penurunan tegangan yang relatif landai hingga mencapai kondisi residual pada regangan sekitar 6%. Hal ini mengidentifikasi bahwa beton bio-komposit memiliki kemampuan redistribusi tegangan yang di akibatkan oleh kontribusi serat alami jerami gandum yang mampu memperlambat proses keruntuhan (*failure*).



Gambar 5. Grafik (a) gaya dan perpindahan, dan (b) tegangan dan regangan lentur hasil data metode KGD pengujian kuat lentur beton bio-komposit

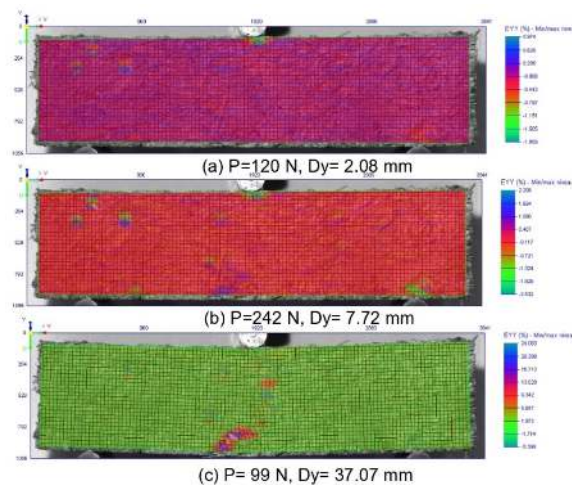
Visual deformasi beton bio-komposit melalui metode KGD

Kontribusi metode KDG dalam hal mampu memvisualisasikan regangan benda uji beton bio-komposit sangat berguna untuk analisis distribusi regangan pada area permukaan benda uji. Gambar 6 menunjukkan hasil analisis *post-processing* metode KGD selama proses pembebanan. Analisis citra menunjukkan bahwa perilaku deformasi benda uji kubus terbagi menjadi 3 fase, yaitu elastis, plateau dan densifikasi. Fase elastis ditandai dengan distribusi regangan yang masih merata dan berintensitas rendah pada benda uji pada tahap awal pembebanan. Kondisi ini mengidentifikasikan bahwa material masih pada kondisi linear elastis, dimana deformasi bersifat reversibel dan tegangan meningkat proporsional terhadap regangan. Ikatan antara binder dan serat masih bersinergi menahan beban yang ditandai dengan belum nampak retak awal dan deformasi plastis. Pada fase berikutnya yakni fase *plateau* (stabilisasi), area berwarna intens mulai nampak pada bagian bawah dan tengah specimen. Hal ini mengidentifikasikan terbentuknya retak mikro dan redistribusi tegangan pada matrik beton bio-komposit. Pada tahap *plateau*, peningkatan regangan terjadi dengan adanya tegangan yang relative konstan yang mengidentifikasi material bekerja dalam ham penyerapan energi akibat deformasi plastis dan efek *bridging* serat. Pada fase ini juga serat jerami memiliki peran penting menghambat laju retak, sehingga deformasi terus meningkat namun tanpa menyebabkan keruntuhan mendadak. Fase berikutnya adalah fase densifikasi atau kompaksi dimana rongga mikro mengalami penutupan, material matrik sudah tidak mampu menahan beban, dan material menunjukkan peningkatan kekakuan semu (*apparent stiffness*).



Gambar 6. Gambar *post-processing* metode KDG pada fase (a) elastis, (b) plateau, dan (c) densifikasi selama pengujian tekan benda uji kubus beton bio-komposit

Hasil *post-processing* pengujian lentur balok beton bio-komposit menggunakan metode KGD yang menampilkan distribusi regangan vertikal (ϵ_{yy}) pada tiga tingkat pembebanan dan perpindahan yang berbeda. Pada fase awal, distribusi regangan permukaan balok masih homogen yang menandakan regangan rendah dan perilaku elastis linier. Pada pembebanan 120 N dan deformasi awal 2,08 mm menunjukkan bahwa struktur masih mampu menahan gaya lentur tanpa terlihat retak yang signifikan. Respon awal balok masih didominasi oleh matrik dan serat alami masih belum secara aktif menahan beban. Pada pembebanan puncak, terjadi peningkatan intensitas regangan pada bagian tengah-bawah balok. Warna yang berubah dari merah menjadi orange, terutama pada posisi bawah-tengah balok menandakan intensitas regangan tinggi akibat retak lentur. Pola regangan tidak lagi merata dan mulai nampak adanya lokalisasi deformasi pada zona tarik bagian tengah-bawah balok. Pada fase ini serat alami mulai berperan menahan laju retak dan menjaga integritas balok meskipun telah mencapai beban maksimum. Selanjutnya, distribusi regangan berubah secara drastis dengan peningkatan regangan plastis dan redistribusi deformasi pada area retak setelah beban menurun. Deformasi vertikal yang meningkat sebesar 37,07 mm menunjukkan bahwa material mengalami deformasi besar tanpa keruntuhan tiba-tiba. Kontribusi serat alami dalam menghambat rambatan retak berfungsi yang menyebabkan material menjadi daktil.



Gambar 7. Gambar *post-processing* metode KDG pada regangan vertikal “y” (ϵ_{yy}), (a) $P = 120$ N, $D_y = 2,08$ mm, (b) $P = 242$ N, $D_y = 7,72$ mm, dan (c) $P = 99$ N, $D_y = 37,07$ mm

4. KESIMPULAN

Metode KGD, pada tahap *post-processing*, tidak hanya mampu menampilkan data perpindahan dan regangan selama proses pembebanan namun juga mampu menampilkan visual konsentrasi regangan baik arah aksial (ϵ_{yy}) dan lateral (ϵ_{xx}). Pada pengujian kuat tekan beton bio komposit menggunakan metode KGD diperoleh sifat fisik material berupa kuat tekan sebesar 0,078 MPa sehingga dapat disimpulkan material beton bio-komposit dalam pengujian ini cocok dipergunakan sebagai bahan pengisi dinding. Modulus Young’s dianalisis pada tiga fase berbeda yakni fase elastis (E1) sebesar 28,50 MPa, fase deformasi plastis awal (E2) sebesar 12,50 MPa dan fase pasca puncak (E3) sebesar 2,85 MPa. Nilai rasio Poisson didapatkan sebesar $\nu = 0,32$, megidentifikasi konsistensi beton bio-komposit sebagai material berpori dan memiliki densitas ringan (530 kg/m^3). Sementara itu, pengujian lentur balok bio-komposit dengan metode KGD didapatkan beban puncak 230 N pada perpindahan 1 mm, dan tegangan lentur sebesar 0,09 MPa pada regangan 2%. Konsentrasi regangan pada tiap-tiap fase baik pada pengujian tekan maupun

lentur beton bio-komposit secara signifikan mampu ditunjukkan dengan baik oleh metode KGD.

DAFTAR PUSTAKA

- Belayachi, N., Hoxha, D., & Slaimia, M. (2016). Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 125, 912–918.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.120>
- Bouaka, W., & Kriker, A. (2017). Crumb rubber impact to the mechanical performance of concrete based at round gravel. In D. G., F. S., S. C.-T., F. C., & A. M. (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1814). American Institute of Physics Inc.
<https://doi.org/10.1063/1.4976262>
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114–140.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Gdoutos, E. E. (2022). Digital Image Correlation (DIC). In *Solid Mechanics and its Applications* (Vol. 269, pp. 251–259). Springer Science and Business Media B.V.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5_12
- Hawkins, W. J., Herrmann, M., Ibell, T. J., Kromoser, B., Michaelski, A., Orr, J. J., Pedreschi, R., Pronk, A., Schipper, H. R., Shepherd, P., Veenendaal, D., Wansdronk, R., & West, M. (2016). Flexible formwork technologies – a state of the art review. *Structural Concrete*, 17(6), 911–935. <https://doi.org/10.1002/suco.201600117>
- Kline, J., & Kline, C. (2015). Cement and CO₂: What is Happening. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1289–1294. <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2339396>
- Liu, X., Liu, J., Liu, Y., & Li, Z. (2024). Measurement and program development of two-dimensional strain field based on images. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1, 3560–3565.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85200795324&partnerID=40&md5=f339633b232b311fd9de16f54798209d>
- Ma, M., Zhou, Y., Tam, V. W. Y., & Le, K. N. (2023). Life Cycle Assessment of the Environmental Impacts of Virgin Concrete Replacement by CO₂ Concrete in a Residential Building. In D. W., Z. L., & S. S.P. (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering: Vol. 356 LNCE* (pp. 479–482). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-3330-3_48
- Malathy, R., Shanmugam, R., Dhamotharan, D., Kamaraj, D., Prabakaran, M., & Kim, J. (2023). Lime based concrete and mortar enhanced with pozzolanic materials – State of art. *Construction and Building Materials*, 390, 131415.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131415>
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). Longman London.
- Nicolle, R. (2025). *A Pathway to Negative CO₂ Emissions by 2050: Case Study on the Contribution of the European Lime Industry to a Carbon Neutral Europe BT - 18th International Brick and Block Masonry Conference* (G. Milani & B. Ghiassi (eds.); pp. 891–901). Springer Nature Switzerland.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and*

Technology, 20(6), 62001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>

Parmo, P., Hanus, J.-L., Belayachi, N., & Bailly, P. (2023). Effect of aggregate/binder ratio on mechanical and energy absorption properties of a straw-lime composite material.

Construction and Building Materials, 400, 132613.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132613>

Santhosh, K. G., Subhani, S. M., & Bahurudeen, A. (2021). Cleaner production of concrete by using industrial by-products as fine aggregate: A sustainable solution to excessive river sand mining. *Journal of Building Engineering*, 42, 102415.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102415>

Wang, Y., & Qin, L. (2023). Progress of Application of Digital Image Correlation Method (DIC) in Civil Engineering. *Proceedings - 2023 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology, SCSET 2023*, 110–114.

<https://doi.org/10.1109/SCSET58950.2023.00034>