



Analisis Karakteristik Material Baja dengan Metode *Digital Image Correlation* (DIC)

Budi Suswanto¹, Data Iranata¹, *Yanisfa Septiarsilia^{1,2}

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

*yanisfa.septi@gmail.com

Received: 8 November 2023 Revised: 4 September 2024 Accepted: 12 September 2024

Abstract

The use of steel materials in building construction opens new opportunities for sustainable development, as steel exhibits corrosion resistance, durability, and reliability in terms of strength and ductility. Digital Image Correlation (DIC) is non-contact technique in which digital images of the surface of a test object are captured using high-resolution cameras. This study conducted measurements of strain distribution on the specimen's surface using the DIC method throughout the entire tensile testing process. The study particularly focuses on examining changes in strain distribution during the melting phase and the local deformation phase leading to fracture. In this research, a comparison will be made between the load-displacement curves obtained from experimental laboratory testing and the results analyzed using the DIC method for SS400-grade steel material. Based on the results of the tensile test and DIC analysis that have been conducted, conclusions have been drawn in the research. The tensile test results of SS400 steel material with a thickness of 6 mm, 8 mm, 10 mm, and 12 mm meet the quality requirements in the tested specification standards, and the results of the force-displacement curve between the experimental test results and the DIC method obtained a minimum deviation with a value below 10%. Therefore, it can be concluded that the DIC method exhibits a reasonably good level of accuracy, making it suitable for validating the results of experimental tests.

Keywords: *DIC method, Steel material, Material property*

Abstrak

Penggunaan material baja dalam konstruksi bangunan menjadikan peluang baru menuju pembangunan berkelanjutan, karena material baja memiliki sifat tahan lama dan handal dalam kekuatan dan daktilitas. Digital Image Correlation (DIC) merupakan teknik non-kontak dimana gambar digital permukaan benda uji ditangkap menggunakan kamera resolusi tinggi. Dalam penelitian, dilakukan pengukuran distribusi regangan di permukaan spesimen dengan menggunakan metode-DIC selama seluruh proses pengujian tarik material dan terutama meneliti perubahan distribusi regangan selama fase meleleh serta tahap deformasi lokal hingga gagal. Kemudian, dilakukan perbandingan kurva load-displacement hasil pengujian eksperimental laboratorium dengan hasil analisis menggunakan metode metode-DIC terhadap material baja dengan mutu SS400. Berdasarkan hasil penelitian dari uji tarik dan analisis DIC yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan dalam penelitian. Hasil pengujian tarik material baja dengan mutu SS400 ketebalan 6 mm, 8 mm, 10 mm, dan 12 mm memenuhi persyaratan mutu pada standar spesifikasi yang diuji, serta hasil kurva force-displacement antara hasil pengujian eksperimental dan metode-DIC didapatkan penyimpangan minimum dengan nilai dibawah 10%, hal ini dapat disimpulkan bahwa metode-DIC memiliki tingkat keakurasian yang cukup baik, sehingga dapat digunakan untuk memvalidasi hasil pengujian eksperimental.

Kata kunci: *Metode DIC, Material baja, Sifat mekanis material*

Pendahuluan

Di era saat ini, teknologi akan selalu berkembang untuk memenuhi kebutuhan manusia. Hal ini berpengaruh terhadap Pembangunan infrastruktur seperti gedung, jembatan, jalan, dermaga, dan lain sebagainya. Dalam pembangunan infrastuktur diperlukan konstruksi yang kuat dan efisien ditinjau dalam aspek waktu, pelaksanaan, dan biaya. Salah satu material yang memenuhi aspek-aspek tersebut yakni konstruksi baja (Lammirta & Tediarto, 2018).

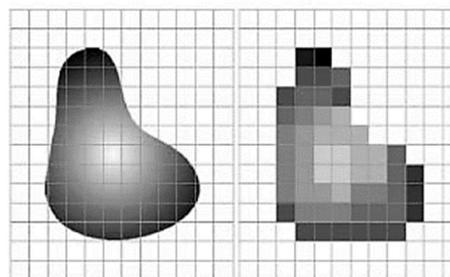
Penggunaan material baja dalam konstruksi bangunan menjadikan peluang baru menuju pembangunan berkelanjutan, karena material baja memiliki sifat tahan lama dan handal dalam kekuatan dan daktilitas, serta memudahkan proses konstruksi, sehingga dapat diaplikasikan pada area dengan tingkat kegempaan yang tinggi (Series & Science, 2020, Sharma *et al.*, 2017). Perkembangan teknologi dalam bidang konstruksi kini mulai menggunakan struktur bahan yang memiliki sifat praktis dan biaya minimal. Konstruksi baja diperlukan untuk mengurangi jumlah material yang tidak seimbang dengan kebutuhan. Saat ini, baja bahannya berkembang pesat khususnya di Indonesia (Series & Science, 2020).

Pada umumnya, uji tarik material digunakan untuk menentukan sifat mekanik material baja dari hasil kurva tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan dapat menentukan deformasi elastis dan plastis, sehingga dapat digunakan sebagai dasar perencanaan dan analisis struktur baja (Ho *et al.*, 2019). Adapun hasil pengujian yang didapat dalam uji tarik baja meliputi kekuatan tarik (*ultimate tensile strenght*), kekuatan leleh (*yield strenght or yield point*), elongasi (*elongation*), elastisitas (*elasticity*) dan pengurangan luas penampang (*reduction of area*) (Test *et al.*, 2016).

Metode *DIC* ditemukan pada awal tahun 1980an dan sepuluh tahun terakhir pengaplikasiannya dikembangkan, metode *DIC* merupakan teknik bidang penuh *non-contact* yang umum digunakan untuk mengukur geometri, perpindahan, dan regangan material dan struktur (Janeliukstis & Chen, 2021)(Farahani *et al.*, 2020). *Digital Image Correlation (DIC)* adalah teknik non-kontak dan non-destruktif, di mana gambar digital permukaan benda uji ditangkap menggunakan kamera resolusi tinggi. Selanjutnya gambar yang ditangkap diolah dan dianalisis menggunakan alat pengolahan gambar alat untuk mendapatkan bentuk permukaan, pengukuran linier, deformasi, dan regangan dalam bidang yang terkena gaya dan tekanan (Casita, 2017). Metode *DIC* merupakan metode yang ideal dalam mengkarakterisasi sifat

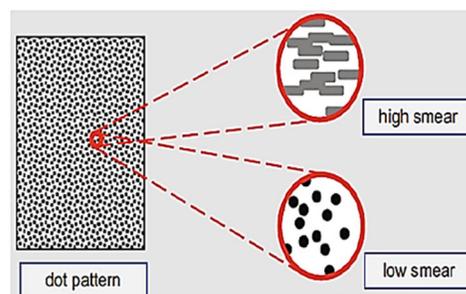
material dalam rentang elastis dan plastis. Metode *DIC* sudah banyak digunakan saat ini dengan tujuan untuk memproses data secara cepat terhadap nilai tegangan dan regangan, secara teoritis metode *DIC* dapat mencapai akurasi dan keandalan yang tinggi (Jain *et al.*, 2022)(Xu *et al.*, 2023)(Farahani *et al.*, 2018). Karena *DIC* merupakan metode *non-contact* yang tidak bergantung pada bahan yang diuji, sehingga dapat diaplikasikan pada berbagai macam karakter deformasi material.

Beberapa material yang dapat diuji menggunakan metode *DIC* antara lain logam, beton, sampel geologi, elektroda, dan sebagainya (Practices & Quanti, 2018). Dibandingkan dengan metode lain seperti *CT*, *SEM*, dan *AE*, *DIC* memiliki keunggulan terhadap rentang pengujian yang besar dan biaya yang lebih rendah (Chai *et al.*, 2020). Dalam *Digital Image Correlation (DIC)*, objek yang diolah adalah citra dari sampel, berupa gambar digital dua dimensi yang bersifat kontinyu. Kemudian, citra tersebut diubah menjadi bentuk diskrit, sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 1(Hidayat *et al.*, 2012).



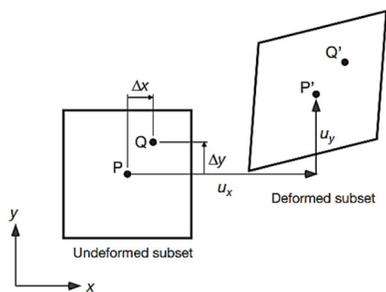
Gambar 1. Gambar kontinyu diubah menjadi gambar digital (Hidayat *et al.*, 2012)

Metode *DIC* membutuhkan penggunaan pola titik pada permukaan objek yang diinginkan, idealnya dengan kontras yang tinggi, seperti pola titik acak dengan latar belakang putih dan pola hitam. Pola titik dan ukuran pola juga harus berbeda untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, pola titik/*dot* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola titik metode *DIC* (Janeliukstis & Chen, 2021)

Umumnya, sistem *DIC* memerlukan satu hingga dua kamera digital dan perangkat lunak yang memanfaatkan algoritma registrasi gambar. Dengan menggunakan perangkat lunak ini, deformasi objek di bawah berbagai tingkat beban dapat dipantau dengan membandingkan gambar yang diambil saat deformasi terjadi dengan gambar referensi yang mencerminkan keadaan tanpa deformasi. Dalam penelitian ini, perangkat lunak *open source DIC* dua dimensi. Sensor kamera harus diposisikan di depan permukaan untuk diukur dengan metode korelasi gambar digital dua dimensi. Metode ini memerlukan kalibrasi dan pengolahan data untuk koreksi faktor pembesaran yang tidak seragam dan distorsi (Yoneyama *et al.*, 2005). *Ncorr*, digunakan untuk menginvestigasi mekanisme kegagalan geser. Perangkat lunak ini mengoperasikan dengan membagi gambar referensi ke dalam bagian-bagian kecil yang disebut sebagai *subset*. Keakuratan hasil dari metode *DIC* bergantung pada banyak parameter, diantaranya yakni kepadatan pola, ukuran pola, ukuran *subset*, tumpang tindih *subset*, jenis algoritma, dll (Venkatachalam *et al.*, 2018). Pergeseran *subset* merupakan parameter dalam Teknik ini untuk menentukan nilai deformasinya, ilustrasi mengenai *subset* dapat dilihat pada Gambar 3.

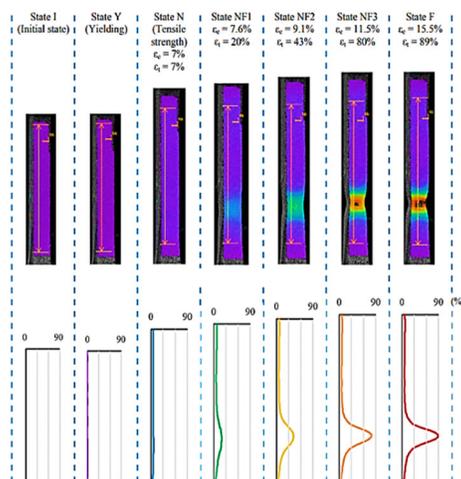


Gambar 3. *Subset* sebelum dan sesudah terjadinya deformasi (Yoneyama *et al.*, 2005)

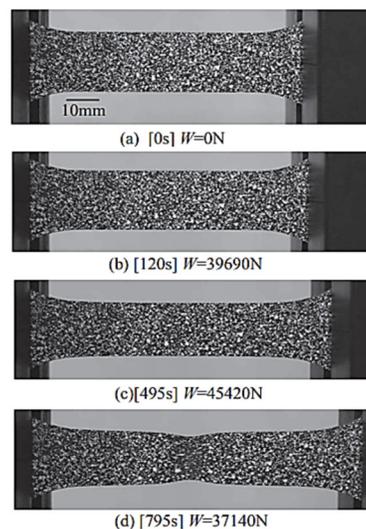
Tahapan penelitian menggunakan metode *DIC* yakni memperoleh gambar dari objek fisik yang diobservasi, gambar digital ditangkap secara terus menerus, menyimpannya dalam bentuk digital, kemudian dianalisis dan dikorelasikan lebih lanjut untuk mendapatkan pola deformasi sehingga didapatkan hasil kurva tegangan-regangan struktur (Blikharskyy *et al.*, 2022)(Kumar *et al.*, 2019). Metode *DIC* sangat luas dan dapat diterapkan pada berbagai bidang, pada bidang Teknik sipil, khususnya dalam penelitian material struktur. Selain penelitian terhadap material, metode ini dapat diaplikasikan pada inspeksi dan monitoring pada struktur, contohnya pada evaluasi jembatan, metode *DIC* dapat diterapkan terhadap pengujian kerusakan struktur, seperti frekuensi, defleksi, dan regangan (Yoneyama *et al.*, 2005).

Pada penelitian (Ho *et al.*, 2019), dilakukan perbandingan terhadap hasil pengujian tarik terhadap metode *DIC*, pada penelitian ini dilakukan studi kasus pada material baja dengan mutu S690, Gambar 4 merupakan tipe variasi regangan yang terjadi pada beberapa deformasi yang terjadi. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa analisis numerik menggunakan metode *DIC* menunjukkan hasil kurva tegangan-regangan yang terjadi serupa.

Penelitian serupa dilakukan oleh (Kato, 2015), dimana pada penelitian ini dilakukan pengukuran distribusi regangan menggunakan metode *DIC*, distribusi *displacement* yang terjadi pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.

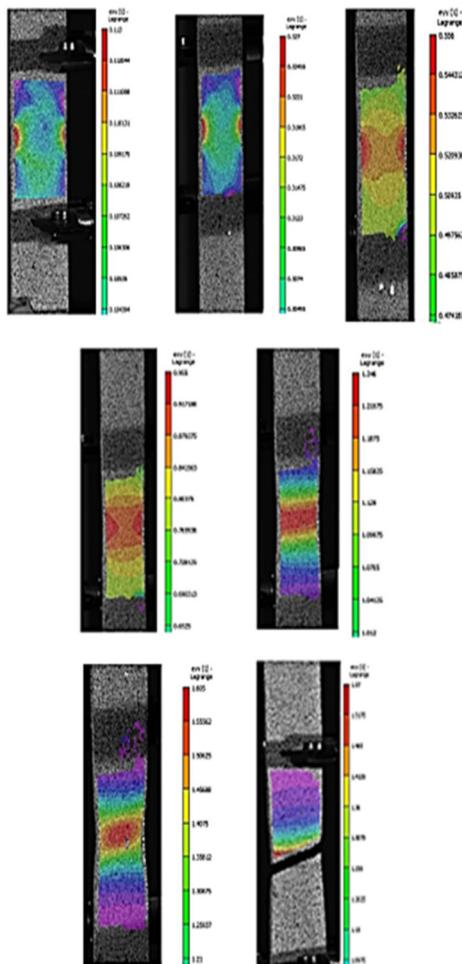


Gambar 4. Distribusi regangan terhadap beberapa deformasi yang terjadi pada spesimen material S690 (Ho *et al.*, 2019)



Gambar 5. Deformasi pada beberapa tahapan beban yang terjadi (Kato, 2015)

Jain *et al.*, 2022 juga melakukan pendekatan dalam pengukuran deformasi menggunakan metode *DIC*, dalam penelitiannya dilakukan pengujian material plat *stainless steel* mutu SS304. Adapun hasil kontur regangan pada berbagai kondisi deformasi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 6. Dalam kesimpulannya menunjukkan bahwa pendekatan tidak hanya mampu melakukan pengukuran deformasi dengan efisiensi tinggi, namun juga akurasi rata-rata hasil tegangan-regangan dapat mencapai 0,1%.



Gambar 6. Kontur regangan pada spesimen material baja mutu SS304 (Jain *et al.*, 2022)

Dalam pengujian tarik pada material baja, terjadi empat fase deformasi berikut: tahap deformasi elastis yang seragam, tahap leleh dengan peralihan dari deformasi elastis ke plastis, tahap deformasi plastis yang seragam, dan tahap deformasi lokal terakhir dengan *necking*. Distribusi regangan di permukaan benda uji tidak merata, terutama saat mencapai tahap leleh dan deformasi lokal sebelum patah.

Secara kuantitatif menganalisis sifat mekanik benda uji baja dari hasil pengujian tarik, diperlukan pengukuran distribusi regangan di permukaan benda uji. Pengukuran distribusi regangan di permukaan spesimen dengan menggunakan metode korelasi citra digital (*DIC*) selama seluruh proses pengujian tarik material dan terutama meneliti perubahan distribusi regangan selama fase leleh serta tahap deformasi lokal hingga patah akhir (Issue, 2015). Pengujian tarik spesimen komposit yang dilakukan oleh (Hidayat *et al.*, 2012) dengan metode *DIC* menunjukkan bahwa perbedaan distribusi tegangan antara hasil eksperimental dengan metode *DIC* sebesar 9,31%, hal ini disebabkan oleh beberapa hal antara lain penentuan kondisi cahaya dan *pixel* yang ideal.

Analisis karakteristik material dengan metode *DIC* merupakan analisis statis terhadap perilaku plastis, dimana spesimen diuji dengan tegangan tarik uniaxial, dalam hal ini *DIC* diadopsi untuk menganalisis pengambilan data dan karakteristik material, khususnya pada penelitian ini terhadap material baja. Metode *DIC* mengaplikasikan teori *FEM* (*Finite Element Method*) dengan meninjau mekanisme kegagalan yang dimodelkan berdasarkan kriteria kerusakan *GTN* terhadap formula/model matematika *FEM* (Farahani *et al.*, 2020).

Dalam penelitian ini, akan dilakukan perbandingan kurva tegangan-regangan hasil pengujian eksperimental laboratorium dengan hasil analisis menggunakan metode *Digital Image Correlation* (*DIC*) terhadap material baja dengan ketebalan spesimen sebesar 6 mm, 8 mm, 10 mm, dan 12 mm dengan mutu SS400. Sehingga akan didapatkan hasil prosentase penyimpangan hasil analisis data dengan metode *DIC* terhadap hasil uji eksperimental.

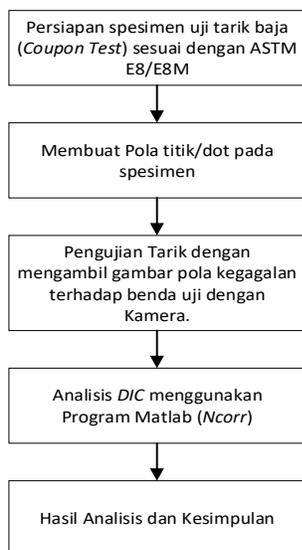
Metode

Dalam penelitian ini, akan dilakukan beberapa tahapan, tahapan utama yakni eksperimental pengujian baja (uji tarik) di laboratorium, kemudian akan dilakukan analisis data menggunakan metode *DIC* dan dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimental, sehingga didapatkan kesimpulan. Berdasarkan (Mani *et al.*, 2021), penelitian ini mengadopsi metode analisis *DIC*, dengan penyederhanaan *flowchart* metode *DIC* dapat dilihat pada Gambar 7.

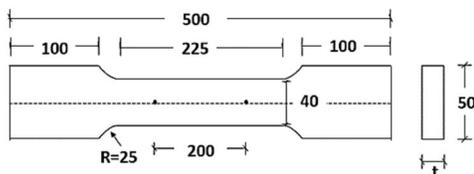
Persiapan spesimen dan alat

Sebelum pengujian tarik material dilakukan, maka akan dilakukan persiapan spesimen, yakni pembuatan benda uji/spesimen dari material baja,

bentuk dan ukuran *coupon test* berdasarkan standar ASTM E8/13 (E8/8M-13a, 2013), seperti pada penelitian (Sulamet-ariobimo *et al.*, 2016)(Mani *et al.*, 2021). Sketsa spesimen dideskripsikan pada Gambar 8.



Gambar 7. Diagram alir metode DIC dalam penelitian



Gambar 8. Sketsa spesimen coupon test

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap pelat baja dengan mutu yang sama, yakni SS400 dengan ketebalan yang berbeda-beda. Baja mutu SS400 adalah salah satu jenis baja canai panas yang digunakan dalam konstruksi struktural. Baja SS400, juga dikenal sebagai SS400 JIS 3101, tercakup dalam kode ASME bagian II-A dan memenuhi spesifikasi JIS untuk pelat baja yang digunakan dalam konstruksi umum, termasuk dalam kategori SA-36 (Pendidikan *et al.*, n.d.).

Spesifikasi baja dengan mutu SS400 ditunjukkan pada Tabel 1. Dalam tabel tersebut terdapat parameter minimum kuat leleh, kuat tarik, dan regangan. Jika data eksperimental tidak memenuhi spesifikasi material minimum, maka spesimen tidak dapat dikategorikan sebagai mutu SS400. Adapun empat spesimen yang digunakan dalam pengujian yakni pelat baja dengan tebal 6 mm, 8 mm, 10 mm, dan 12 mm. Detail Spesimen dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi material baja grade SS400

Parameter	Nilai	Satuan
Yield Strength (σ_y)	Thickness <16 mm : 245	MPa
Tensile Strength (σ_u)	400-510	MPa
Elongation min (ϵ)	Thickness 5 mm-16 mm : 17	%

Tabel 2. Detail spesimen dalam pengujian

No.	Kode	Ketebalan (mm)	Mutu
1	IC	6	SS400
2	IIA	8	
3	IIIA	10	
4	IVB	12	

Dengan metode DIC maka pada pengujian dilakukan pengecatan dan diberikan pola titik (*dot*) dan digunakan cat pilox warna putih sebagai latar belakangnya, sedangkan titik (*dot*) menggunakan spidol warna hitam. Gambar benda uji terdapat pada Gambar 9.

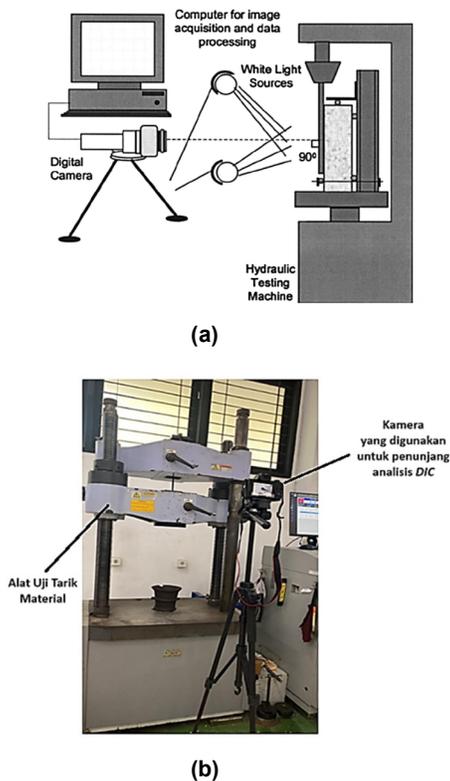


Gambar 9. Spesimen coupon test dengan Metode DIC

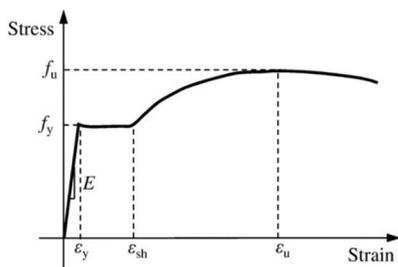
Skema representasi menggunakan metode DIC dapat diilustrasikan pada Gambar 9. Alat pengujian dalam penelitian eksperimental yakni Alat Uji Tarik dan Kamera untuk mengambil gambar pola kegagalan material yang bertujuan untuk digunakan dalam analisis data dengan metode DIC. Spesifikasi kamera yang digunakan yakni kamera Canon Tipe EOS M50. Gambar 10 merupakan dokumentasi alat dan kamera yang digunakan dalam pengujian.

Pengujian tarik material

Tata cara pelaksanaan pengujian tarik mengacu pada SNI 8389:2017 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2017). Penelitian dilakukan di Laboratorium Beton, Material Maju dan Komputasi Mekanik Departemen Teknik Sipil FT-SPK ITS. Hasil penelitian adalah kurva regangan-tegangan sebagai dalam Gambar 11 dan dalam pengujiannya spesimen akan ditarik hingga putus.



Gambar 10. (a) Set up pengujian dengan metode DIC (Kumar *et al.*, 2019) (b) Set up pengujian dalam penelitian



Gambar 11. Kurva tegangan-regangan material baja (Yun & Gardner, 2017)

Uji tarik merupakan metode dalam analisis mekanik yang digunakan untuk mengukur kekuatan suatu material terhadap gaya tarik dengan cara menguji material tersebut hingga akhirnya putus, sehingga didapatkan kurva tegangan-regangan material (Pendidikan *et al.*, n.d.). Pada penelitian ini karena akan dilakukan juga metode DIC sehingga dilakukan pengambilan gambar saat mekanisme kegagalan terjadi.

Analisis Digital Image Correlation (DIC) dengan Program Ncorr

Pengukuran deformasi menurut metode DIC dilakukan dengan menggunakan pola titik kontras

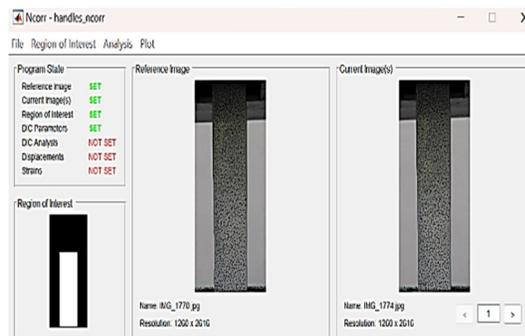
stokastik yang sebelumnya harus diterapkan pada area pengujian. Secara umum, metode ini mencakup pelacakan posisi relatif setiap titik selama deformasi (Blikharskyy *et al.*, 2022).

Dalam metode DIC, dilakukan pengambilan gambar dengan kamera, parameter penting terhadap kamera yang digunakan yakni spesifikasi panjang fokus, hal ini berkontribusi besar terhadap resolusi dan kedalaman gambar, menurut literatur, Sebagian besar aplikasi DIC menggunakan lensa dengan panjang fokus 24 mm – 25 mm (Janeliukstis & Chen, 2021). Selain itu, parameter yang menentukan yakni pola titik pada benda uji/spesimen, hal tersebut merupakan faktor utama dalam meminimalisir terjadinya *error* dan mengoptimalkan hasil *output* (Blikharskyy *et al.*, 2022). Adapun beberapa persyaratan terkait metode DIC yang direkomendasikan oleh (Blikharskyy *et al.*, 2022) terdapat pada Tabel 3.

Dalam analisis DIC pada penelitian ini digunakan program Matlab dengan bantuan *image processing toolbox Ncorr*. *Ncorr* merupakan program korelasi gambar digital 2D. *Ncorr* dikembangkan untuk menginvestigasi mekanisme kegagalan material. Untuk efisiensi, algoritme intensif komputasi ditulis dalam C++ dan diaplikasikan ke dalam program MATLAB (Blaber *et al.*, 2015). Interface program *Ncorr* pada Matlab dapat dilihat pada Gambar 12.

Tabel 3. Persyaratan teknik DIC (Blikharskyy *et al.*, 2022)

Pola DIC	Konsep
Kontras tinggi	Titik-titik hitam gelap pada latar belakang putih terang atau titik-titik putih terang pada latar belakang hitam gelap.
Cakupan 50%	Jumlah putih dan hitam yang sama di permukaan.
Konsistensi dimensi titik	Ukuran titik setidaknya 5 <i>pixel</i> .
Orientasi	Acak dan berulang.

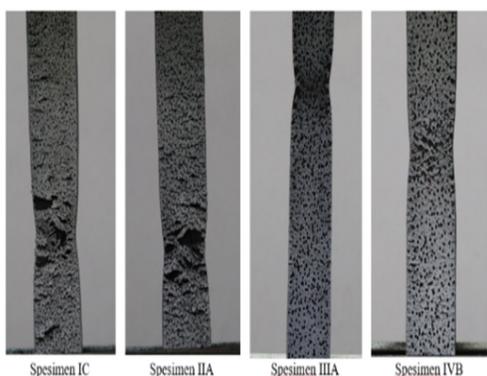


Gambar 12. Interface Program Matlab dengan Ncorr

Hasil dan Pembahasan

Beberapa hasil yang didapatkan dalam penelitian yang dilakukan, yakni hasil dari pengujian eksperimental dan dari metode *DIC* terhadap material pelat baja dengan ketebalan 6 mm (IC), 8 mm (IIA), 10 mm (IIIA), dan 12 mm (IVB) dengan mutu SS400, sehingga dari hasil tersebut dapat dibandingkan dan didapatkan kesimpulan dan dilakukan validasi terkait hasil metode *DIC*, berikut pembahasan hasil yang didapat.

Dalam metode *DIC*, gambar yang dianalisis merupakan pola gambar dari awal hingga akhir sebelum material mengalami putus. Gambar 13 merupakan kondisi akhir pada saat spesimen belum mengalami putus.



Gambar 13. Kondisi akhir masing-masing spesimen dalam pengujian Tarik

Tabel 4. Data pengujian tarik baja

No	Kode	Yield strength (σ_y)-MPa	Tensile strength (σ_u)-MPa	ϵ %
1	IC	380,24	458,61	29
2	IIA	344,16	467,59	36
3	IIIA	342,99	405,13	31
4	IVB	310,95	440,90	38

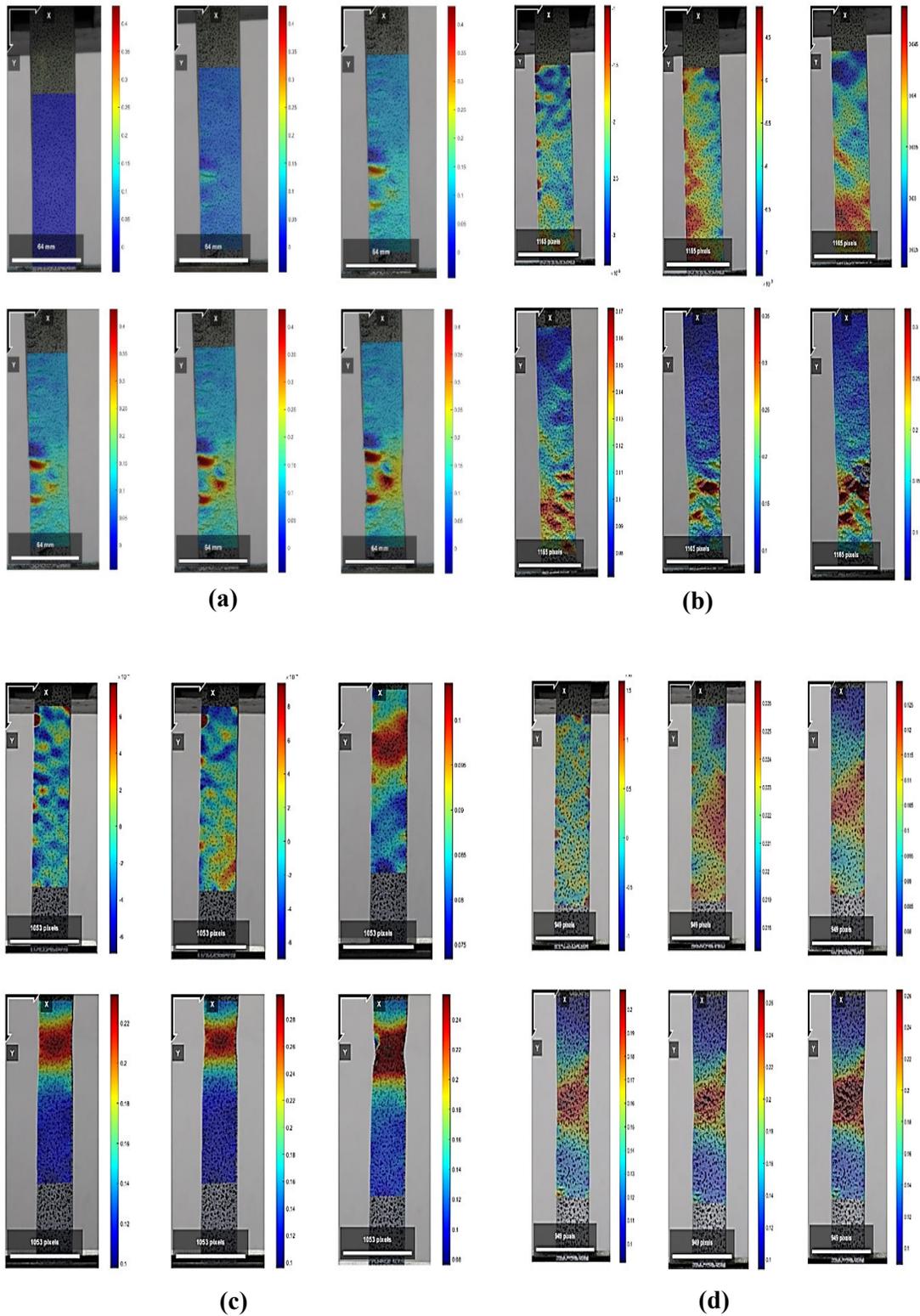
Dari hasil pengujian tarik pada Tabel 4 yang merupakan hasil pengujian eksperimental tarik baja. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen memenuhi mutu standar sesuai dengan spesifikasi grade SS400, diantaranya terhadap beberapa parameter, yaitu kuat leleh didapatkan nilai pada spesimen IC sebesar 380.24, spesimen IIA sebesar 344. 16 MPa, spesimen IIIA sebesar 342.99 MPa, dan spesimen IVB sebesar 310.95 MPa. Maka nilai kuat leleh pada masing-masing spesimen memenuhi kuat leleh minimal sebesar 245, sehingga dapat disimpulkan bahwa material memenuhi kriteria mutu SS400.

Ditinjau dari kuat tarik yang didapat sebesar nilai kuat tarik antara 400 MPa hingga 510 MPa, maka parameter kuat tarik memenuhi kriteria mutu, dan yang ketiga terhadap regangan didapatkan regangan material dengan nilai 29-38%, sehingga spesimen memenuhi kriteria karena pada spesifikasi mutu minimal regangan sebesar 17%.

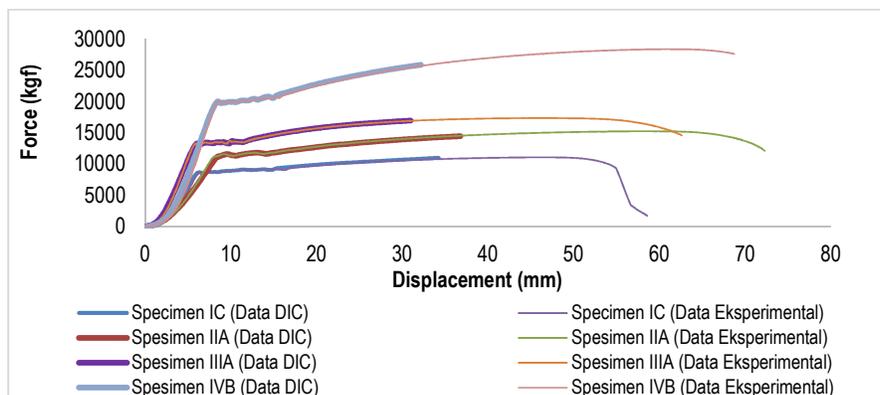
Gambar 14 menunjukkan kontur regangan pola kegagalan terhadap masing-masing spesimen dengan beberapa ketebalan yang diukur dengan analisis *DIC*. Metode *DIC* sangat membantu dalam mengukur distribusi regangan pada area plastis. Analisis pengukuran regangan yang terjadi dapat digunakan untuk memastikan hasil pengujian material sesuai. Masing-masing gambar menunjukkan letak tegangan maksimum dengan titik yang berbeda. Hal ini dapat dipengaruhi berbagai macam faktor. Dalam analisis *DIC* dibutuhkan ketelitian dalam input data, khususnya data skala terhadap data gambar yang diproses, jika terjadi kesalahan dalam input nilai skala, maka hasil analisis data perlu dilakukan skala ulang secara manual.

Gambar 15 menunjukkan perbandingan kurva *force-displacement* hasil pengujian eksperimental dengan metode *DIC* pada masing-masing spesimen, dalam hasil tersebut, nilai yang didapatkan dengan metode *DIC* merupakan nilai *displacementnya*. Jika dibandingkan hasil antara metode *DIC* dan pengujian eksperimental hampir setara. Terdapat penyimpangan minor dari analisis data *DIC* terhadap data eksperimental. Setelah dilakukan akumulasi data penyimpangan pada Spesimen IC sebesar 6,89%, Spesimen IIA sebesar 3,24%, Spesimen IIIA sebesar 0,84%, dan Spesimen IVB sebesar 4,02%.

Prosentase penyimpangan pada tiap spesimen berbeda-beda karena berbagai faktor, salah satunya yaitu kepadatan dan ketegasan dot (titik) pada spesimen. Hal ini ditunjukkan pada spesimen IIIA dimana pada spesimen tersebut pola dot lebih jelas dibandingkan spesimen yang lain dan memiliki nilai penyimpangan yang paling minimum yakni sebesar 0,84%. Metode *DIC* memiliki kelemahan tidak dapat menganalisis spesimen hingga tegangan *ultimate*/pada *peak point*, dikarenakan data gambar yang dianalisis merupakan data saat sebelum material mencapai *ultimate* karena gambar yang diambil tidak sampai pada *peak point* karena pengambilan gambar dengan cara *capture image*, sehingga pada saat posisi *post peak* dan *descending* tidak terekam. Jika dipaksakan untuk memproses data gambar terakhir saat terjadinya putus pada material, maka program akan mengalami *error* dalam analisisnya.



Gambar 14. Kontur $Strain_{yy}$ Output dari *Ncorr* Program (a). Spesimen IC, (b). Spesimen IIA, (c) Spesimen IIIA, (d). Spesimen IVB



Gambar 15. Diagram *force-displacement* Metode *DIC* dan pengujian eksperimental

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dari uji tarik dan analisis *DIC* yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan bahwa hasil pengujian tarik material baja terhadap empat spesimen dengan mutu SS400 ketebalan 6 mm, 8 mm, 10 mm, dan 12 mm memenuhi persyaratan mutu pada standar spesifikasi yang diuji terhadap beberapa parameter, yakni kuat leleh, kuat tarik, dan regangan. Penyimpangan *displacement* analisis *DIC* terhadap data pengujian yang terjadi pada Spesimen IC sebesar 6,89%, Spesimen IIA sebesar 3,24%, Spesimen IIIA sebesar 0,84%, dan Spesimen IVB sebesar 4,02%. Maka dapat disimpulkan bahwa metode *DIC* memiliki tingkat keakuratan yang cukup baik, sehingga metode *DIC* dapat digunakan untuk memvalidasi hasil pengujian eksperimental.

Metode *DIC* memiliki keunggulan dalam pengambilan data *full field displacement* pada area yang diinginkan, tanpa dilakukannya kontak langsung dengan spesimen yang diuji, dapat menentukan *displacement* maupun deformasi yang terjadi di segala arah dan titik untuk mengetahui karakteristik material, serta memiliki keakuratan yang tinggi. Metode *DIC* memiliki kelemahan yakni menuntut penggunaan kamera bersolusi tinggi dan cahaya yang tepat, jika pencahayaan kurang atau berlebihan menyebabkan kesalahan analisis. Analisis tidak dapat mencapai *post peak* karena saat pengambilan gambar digunakan metode *capture image*, dimana saat posisi *post peak* dan *descending* tidak terekam. Untuk penelitian selanjutnya dengan metode *DIC* disarankan metode pengambilan gambar dengan cara merekam (video).

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Riset Teknologi dan Pengabdian

Masyarakat yang telah mendanai penelitian dengan skema Penelitian Dasar - Penelitian Disertasi Doktor tahun 2023 dengan nomor kontrak induk: 112/E5/PG.02.00.PL/2023 tanggal 19 Juni 2023, dan kontrak Turunan nomor: 1893/PKS/ITS/2023 tanggal 20 Juni 2023.

Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2017). *SNI-8389-2017*.
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). *Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. March*. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- Blikharsky, Y., Kopiika, N., Khmil, R., & Selejdak, J. (2022). *applied sciences Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress – Strain State of RC Structures*.
- Casita, C. B. (2017). *Simulation of Damage Characteristics using Digital Image Correlation Technique – A review development and its implications for Structural monitoring*.
- Chai, J., Liu, Y., Ouyang, Y., Zhang, D., & Du, W. (2020). *Application of Digital Image Correlation Technique for the Damage Characteristic of Rock-like Specimens under Uniaxial Compression*. 2020. E8/8M-13a, A. (2013). *E8/8M-13a, ASTM*. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Farahani, B. V., Amaral, R., Tavares, P. J., Moreira, P. M. G. P., & Santos, A. (2020). *Material characterization and damage assessment of an AA5352 aluminium alloy using digital image correlation*. 55, 3–19. <https://doi.org/10.1177/0309324719892727>

- Farahani, B. V., Belinha, J., Amaral, R., Tavares, P. J., & Moreira, P. (2018). A digital image correlation analysis on a sheet AA6061-T6 bi-failure specimen to predict static failure. *Engineering Failure Analysis*, 90(November 2017), 179–196.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.011>
- Hidayat, S., Hadi, B. K., Syamsudin, H., Iryani, L., Sukmajaya, A., & Teknik, F. (2012). *Analisa Tegangan Di Sekitar Lubang Pada Pelat Pin-Loaded Dengan Menggunakan Metoda Digital Image Correlation (DIC)*. *Snttm Xi*, 16–17.
- Ho, H. C., Chung, K. F., Liu, X., Xiao, M., Nethercot, D. A., Engineering, E., Hong, T., Polytechnic, K., Kong, H., & Administrative, S. (2019). *Modelling tensile tests on high strength S690 steel materials undergoing large deformations*. 192(May), 305–322.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.057>
- Issue, S. (2015). *Journal of JSEM, Vol.15, Special Issue s43-s49 Copyright ©2015 JSEM.15*, 43–49.
- Jain, A., Mishra, A., Tiwari, V., Singh, G., & Singh, R. P. (2022). *Deformation Measurement of a SS304 Stainless Steel Sheet Using Digital Image Correlation Method*.
- Janeliukstis, R., & Chen, X. (2021). Review of digital image correlation application to large-scale composite structure testing. *Composite Structures*, 271(October 2020), 114143.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114143>
- Kato, A. (2015). *Journal of JSEM, Vol.15, Special Issue (2015) s43-s49 Copyright ©2015 JSEM. 15*, 43–49.
- Kumar, S. L., Aravind, H. B., & Hossiney, N. (2019). Digital Image Correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program Results in Engineering Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D M. *Results in Engineering*, 4(November), 100061.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100061>
- Lammirta, L., & Tediarto, L. S. (2018). Analisis Tegangan Dan Defleksi Pada Balok Kastela Dengan Buka-bukaan Rhomb Menggunakan Metode Elemen Hingga. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 1(1), 55. <https://doi.org/10.24912/jmts.v1i1.2242>
- Mani, C., Balasubramani, S., Karthikeyan, R., & Kannan, S. (2021). *Digital Image Correlation of Tensile Properties for Monel 400 / SS 316L Dissimilar Metal Welding Joints*.
- Pendidikan, S., Mesin, T., Teknik, F., Surabaya, U. N., Mesin, J. T., Teknik, F., & Surabaya, U. N. (n.d.). *Analisa Pengaruh Variasi Ketebalan Plat Terhadap Kekuatan Tarik Pada Sambungan Las Butt Joint Mild Steel SS 400 Afit Reni Prastiwi Mochamad Arif Irfa ' i Abstrak*. 37–44.
- Practices, G., & Quanti, U. (2018). *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*.
- Series, I. O. P. C., & Science, M. (2020). *The Efficiency of Steel Material as Buildings Construction The Efficiency of Steel Material as Buildings Construction*.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/879/1/012148>
- Sharma, V., Kumar, R., Singh, H., Ahmad, W., & Pratap, Y. (2017). *A Review Study on uses of steel in construction*. 1140–1142.
- Sulamet-ariobimo, R. D., Wahyuadi, J., Sukarnoto, T., Rustandi, A., Mujalis, Y., & Prayitno, D. (2016). Tensile properties analysis of AA1100 aluminium and SS400 steel using different JIS tensile standard specimen. *Revista Mexicana de Trastornos Alimentarios*, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.03.006>
- Test, T., Strenght, T., & Cell, L. (2016). *Analisis Pengujian Tarik (Tensile Test) Pada Baja ST37. 03(01)*, 9–13.
- Venkatachalam, S., Murthy, H., & Rao, B. C. (2018). *Mechanical Testing of Micro-specimens of Al6061-T6 Using DIC for Strain Measurement Mechanical testing of micro-specimens of Al6061-T6. November 2020*.
<https://doi.org/10.1007/s40799-018-0254-1>
- Xu, X., Jin, Z., Yu, Y., & Li, N. (2023). Damage source and its evolution of ultra-high performance concrete monitoring by digital image correlation and acoustic emission technologies. *Journal of Building Engineering*, 65(August 2022), 105734.
<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105734>
- Yoneyama, S., Kitagawa, A., Kitamura, K., Kikuta, H., & Corporation, H. Z. (2005). *Deflection distribution measurement of steel structure using digital image correlation*. 5880, 1–8.
<https://doi.org/10.1117/12.614364>
- Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 36–46.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>