

Kajian Distribusi Tegangan Sambungan Material *Fiber Reinforced Polymer* pada Kondisi Elastik Linier dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga

PRIMASARI, P¹., HERBUDIMAN, B².,
HARDONO, S³

¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Nasional

²Dosen, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Nasional

³Kepala Balai Jembatan dan Pelengkap Jalan
Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum
Email: putrifrimasari@gmail.com

ABSTRAK

Pengembangan fiber reinforced polymer untuk menjadi suatu material yang dapat diperhitungkan dalam konstruksi jembatan, yang dilakukan Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (Puslitbang Jalan dan Jembatan) merupakan suatu langkah penting untuk memajukan bidang infrastruktur teknik sipil. Penggunaan FRP masih terbatas pada aplikasi perkuatan jembatan. Untuk menjadikan suatu struktur utama jembatan, diperlukan kajian guna memahami perilaku dan mengetahui dasar-dasar perencanaannya. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran peningkatan konsentrasi tegangan pada sambungan spesimen FRP dan membandingkan grafik gaya terhadap deformasi hasil pemodelan dengan hasil eksperimental. Untuk itu, metode penelitian yang dilakukan ialah menganalisis spesimen FRP melalui pendekatan numerik menggunakan software Ansys Workbench.

Hasil analisis pemodelan menunjukkan peningkatan konsentrasi tegangan yang terbesar terdapat pada konfigurasi 5 lubang baut dengan nilai tegangan tekan sebesar 76,52%, dan luas sebaran lebih dari 1/2 D lubang. Selain itu, persentase perbedaan terbesar uji numerik terhadap uji eksperimental sekitar 12%.

Kata kunci: *fiber reinforced polymer, ANSYS Workbench versi 14, konsentrasi tegangan, sambungan.*

ABSTRACT

Development the fiber reinforced polymer to be a material which can be counted in construction of bridges, that is being conducted at the Center for Research and Development Road and Bridge is a important stride for developing Indonesian civil engineering infrastructure. Utilization of FRP is still limited to the application of strengthening bridges. For making a main structural of bridge, required to study for understanding behaviour and knowing their design basics. This research aims to give the description of increasing concentration of stress for FRP connection. And compare the force-deformation curves of the modelling to labour's test. Therefore, the method which is used to analyze the specimens approach modelling the specimen using Ansys Workbench.

Otherwise, the result showed the largest compressive stress is 76,52 %, and its spreading is more than a half of diameter of bolt hole. Beside that, the largest percentage difference between the modelling and experimental is about 12%.

Keywords: *fiber reinforced polymer, ANSYS Workbench version 14, stress concentration, connection*

1. PENDAHULUAN

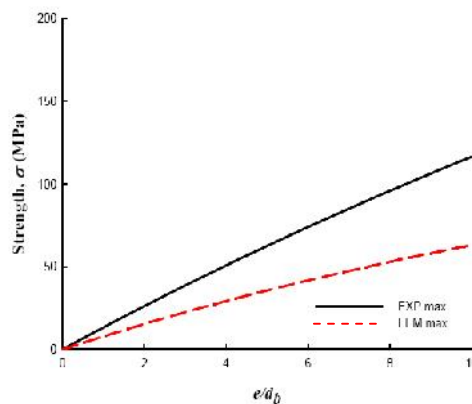
Jembatan sementara seperti jembatan *Bailey*, memiliki elemen yang relatif berat dan membutuhkan waktu yang lama untuk instalasi. Sehingga dibutuhkan teknologi material ringan pada jembatan sementara agar mudah untuk dibawa dan dirakit oleh manusia. Penggunaan dengan FRP memberikan keuntungan yang besar pada konstruksi jembatan sementara, karena kekuatan yang dapat diperhitungkan, waktu pemasangan yang relatif singkat, material yang ringan sehingga membutuhkan lebih sedikit pondasi, dan lebih membutuhkan pekerja dan alat-alat berat yang sedikit. Untuk menjadi suatu komponen jembatan yang struktural, masalah yang sering ditemukan salah satunya adalah mengenai sambungan yang memadai. Oleh sebab itu, akan ditinjau mengenai aspek distribusi tegangan yang terjadi pada spesimen bermaterial komposit FRP menggunakan metode FEM (*Finite Element Method*). FEM berperan mempermudah untuk mengubah suatu masalah dengan derajat tertentu, sehingga proses pemecahan masalahnya lebih sederhana.

Menurut Effendy, E. H. (2004), ANSYS merupakan salah satu *software* berbasis elemen hingga. Dengan latar belakang demikian, pada penelitian ini, analisis ANSYS dilakukan dengan pemilihan elemen solid, serta analisis yang dilakukan hanya sampai pada kondisi elastik linier, karena hasil perhitungan pada kondisi tersebut yang berupa gaya-gaya dalam yang umumnya digunakan untuk perancangan/desain.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Fibre Reinforced Polymers (FRP) merupakan material komposit terdiri dari polimer matrik yang melekat pada serat berkekuatan tinggi seperti, serat gelas, aramid, dan serat karbon. Kekuatan FRP dipengaruhi terhadap jenis serat, tipe serat, jumlah serat, dan jenis resin pada FRP. Menurut Thomas Keller (2003), tidak seperti material baja, beton, dan lainnya, pada komposit FRP termasuk ke dalam jenis material yang bersifat anisotropik (ortotropik termasuk jenis anisotropik) adalah komposit yang matriksnya memberikan penguatan yang tidak sama terhadap arah yang berbeda, misalnya nilai penguatan untuk arah transversal tidak sama dengan penguatan arah longitudinal. Untuk mendukung penelitian ini, penulis mengambil referensi berdasarkan penelitian pengaruh rasio e/d terhadap kekuatan

sambungan oleh Park JS (2009). Hasil penelitian tersebut baik eksperimental dan simulasi numerik memperlihatkan bahwa rasio e/d memberikan peningkatan secara linier terhadap kekuatan sambungan (**Gambar 1**).



Gambar 1. Pengaruh rasio e/d pada kekuatan sambungan PFRP (Park JS, 2009)

Metode elemen hingga adalah suatu metode pemaparan bagaimana perjalanan aksi hingga timbul reaksi dalam materi, atau metode untuk memperkirakan besar reaksi apa yang timbul dari materi tersebut. Kontinum dibagi-bagi menjadi bagian yang lebih kecil, maka elemen kecil ini disebut elemen hingga. Proses pembagian kontinum menjadi elemen hingga disebut proses diskretisasi (pembagian). Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga (bukannya kecil tak berhingga) dan umumnya mempunyai bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan dengan kontinumnya.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan ANSYS Workbench versi 14 dengan pilihan analisis *static structural*. Pemodelan benda uji digambar dengan AutoCAD versi 2008 dengan tampilan 3D. Fokus penelitian ini, untuk menganalisis distribusi tegangan material komposit FRP yang mengalami pembebanan dari luar.

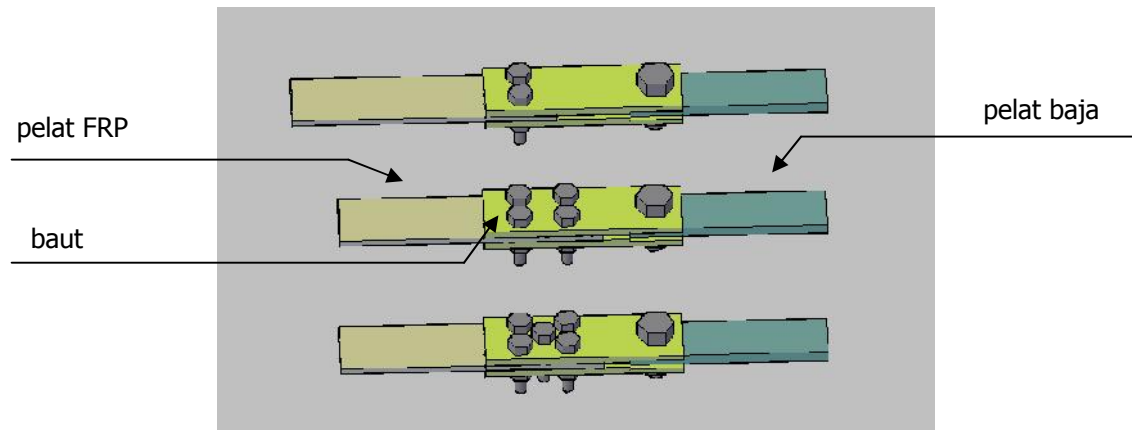
Selain menganalisis struktur, *software* ANSYS dapat juga digunakan untuk melakukan analisis termal, analisis fluida, analisis elektromagnet, dan gabungan dari disiplin-disiplin ilmu tersebut.

Analisis secara umum biasanya terdiri dari tahapan sebagai berikut:

1. Membuat model.
2. Mendefinisikan pembebanan dan menentukan solusi yang dibutuhkan.
3. Menganalisis hasil yang diperoleh.

Berikut adalah penjelasan tahap analisis:

1. Tahap pertama: spesifikasi spesimen.
Spesimen berupa pelat FRP, yang diapit antara pelat baja, dan dihubungkan dengan sebuah pelat baja lagi. Setelah itu, mendeskripsikan karakteristik mekanik pada spesimen FRP yang bersifat ortotropik, dimana mempunyai nilai-nilai dalam arah sumbu $x - y - z$. Setelah pada tahap tersebut selesai dilakukan, tahap selanjutnya membuat pemodelan spesimen digambar menggunakan AutoCAD versi 2008 seperti pada **Gambar 2**. Selanjutnya **Gambar 2** tersebut diekspor ke *software* ANSYS versi 14.

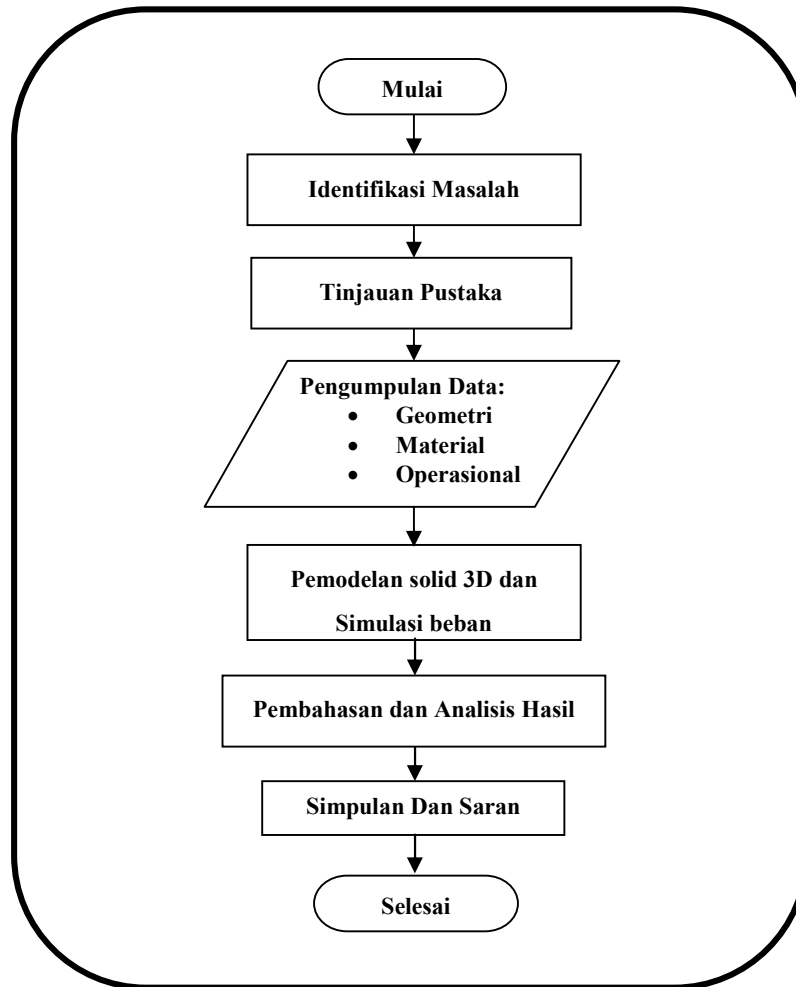


Gambar 2. Model solid 3D pelatbaja, pelat FRP, dan baut digambardenganAutoCAD versi 2008.

Kontak antar permukaan spesimen FRP dengan pelat baja dan baut didefinisikan sebagai *frictional* (dengan nilai $\mu = 0,2$), dan *bonded* didalam pemodelan. Ditetapkan beberapa kondisi batas sama pada seluruh spesimen. *Acceleration* searah dengan arah sumbu x dengan nilai $9800 \text{ mm}^2/\text{s}$, *fixed support* (jepit) diaplikasikan pada specimen baja, dan pengaturan *displacement* pada setiap permukaan specimen baja. *Displacement* digunakan dengan maksud agar spesimen yang akan dianalisis tidak mengalami gerak kearah sumbu y dan z , namun diperbolehkan untuk bergerak searah beban tarik (sumbu x). oleh sebab itu, nilai *displacement* arah sumbu x didefinisikan 0 mm. *Meshing* yang digunakan berukuran medium.

2. Tahap kedua: pembebanan.

Beban yang disimulasikan menggunakan hasil uji eksperimental. Hasil uji eksperimental berupa grafik *force* (MPa) terhadap *stroke* (mm). Beban yang digunakan merupakan *incremental load*. Dimana pembebanan terdiri dari 10 step. Pada pemodelan, beban berupa *pressure* dengan bernilai negatif, sehingga beban dianggap beban tarik. Solusi yang dibutuhkan tegangan, dan deformasi, guna untuk melihat peningkatan tegangan sambungan FRP dalam menahan beban yang disimulasikan dan membandingkan hasil pemodelan terhadap hasil eksperimental. Tahapan penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Bagan alir metode penelitian.

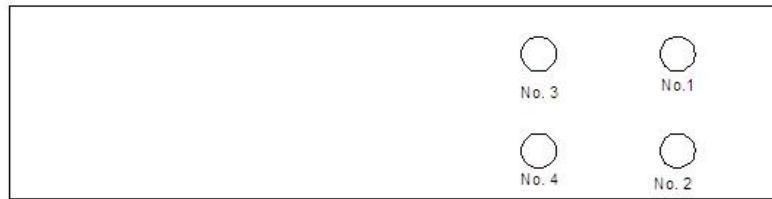
4. PEMBAHASAN DAN ANALISIS

Hasil yang akan didapatkan berupa kontur tegangan pada setiap spesimen, dan setiap warna tersebut mempunyai nilai-nilai batas tertentu. Tugas akhir ini lebih fokus pada spesimen FRP. Maka, dalam bab pembahasan ini material lain tidak diperhatikan.

Untuk memperjelas keterangan **Gambar 1**, maka dicantumkanlah gambar formasi konfigurasi lubang baut untuk 2 lubang baut seperti dapat dilihat pada **Gambar 3.a**, untuk 4 lubang baut seperti dapat dilihat pada **Gambar 3.b**, dan untuk 5 lubang baut seperti dapat dilihat pada **Gambar 3.c**. Dimensi pelat FRP adalah panjang = 400 mm, lebar = 100 mm, dan tebal = 9 mm.



4.a



4.b



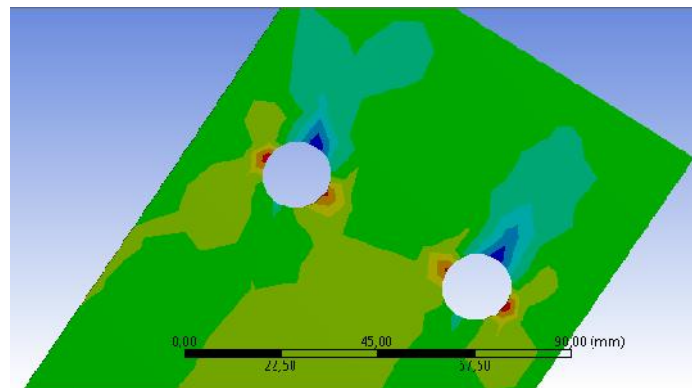
4.c

Gambar 4.a Letak lubang baut pada konfigurasi 2 lubang baut pada pelat FRP.

Gambar 4.b Letak lubang baut pada konfigurasi 4 lubang baut pada pelat FRP.

Gambar 4.c Letak lubang baut pada konfigurasi 5 lubang baut pada pelat FRP.

Peningkatan konsentrasi tegangan pada setiap konfigurasi lubang baut dianalisis pada step ke-10 pada daerah lubang baut. Untuk konfigurasi 2 lubang baut kontur tegangan normal pelat dapat dilihat pada **Gambar 5**.



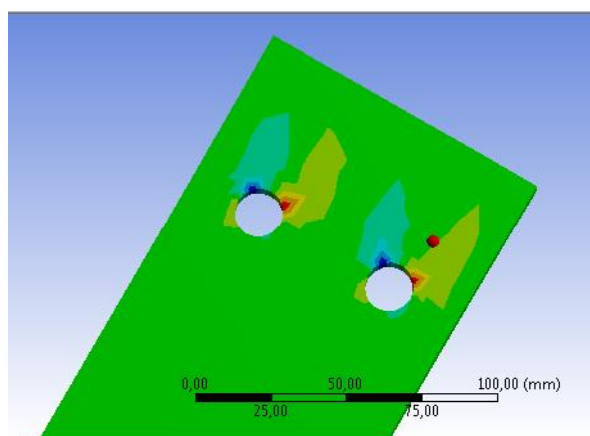
Gambar 5. Kontur tegangan normal pada konfigurasi 2 lubang baut.

Berdasarkan peningkatan kontur tegangan tersebut, terjadi tegangan tekan (warna biru), dan tegangan tarik (warna merah & warna kuning). Besar persentase peningkatan tegangan berdasarkan uji numerik dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Resume Nilai Konsentrasi Tegangan Normal untuk Konfigurasi 2 Lubang Baut

| Konfigurasi 2 Lubang Baut | | | |
|---------------------------|------------------------|------------------|----------------|
| Nomor Lubang Baut | Tegangan Rata-rata (%) | Sebaran Tegangan | Jenis Tegangan |
| Lubang Baut 1 | 56,11 | $\pm 1/2$ | tegangan tekan |
| | 34,58 | $< 1/4$ | tegangan tarik |
| | 30,25 | $< 1/4$ | tegangan tarik |
| Lubang Baut 2 | 54,81 | $\pm 1/2$ | tegangan tekan |
| | 31,19 | $< 1/4$ | tegangan tarik |
| | 35,75 | $< 1/4$ | tegangan tarik |

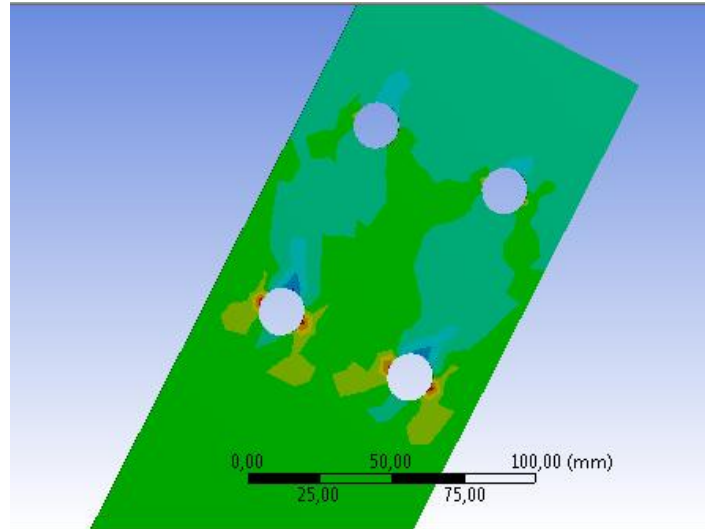
Untuk tegangan geser yang terjadi pada konfigurasi 2 lubang baut pada step ke-10 kontur tegangan geser pelat FRP dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Kontur tegangan geser pada konfigurasi 2 lubang baut.

Pada **Gambar 6** terlihat peningkatan kontur tegangan geser. Pada penelitian Adi, W. (2012), diketahui bahwa kuat geser FRP sebesar 40 MPa. Maka pada uji numerik ANSYS versi 14, diperoleh tegangan geser 40 MPa terjadi pada step ke-3 dengan gaya sebesar 21,42 kN untuk konfigurasi 2 lubang baut.

Untuk konfigurasi 4 lubang baut, peningkatan kontur tegangan normal dapat dilihat pada **Gambar 7** dibawah ini.



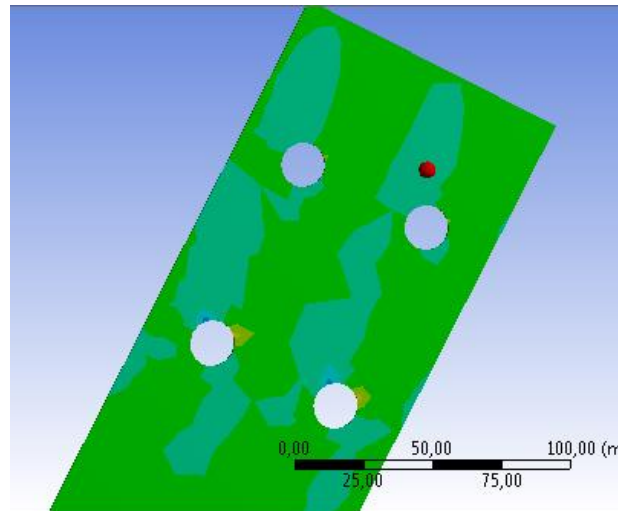
Gambar 7. Kontur tegangan normal pada konfigurasi 4 lubang baut.

Berdasarkan **Gambar 7**, persentase konsentrasi tegangan normal untuk baut ke-1 sampai baut ke-4 dapat dilihat pada **Tabel 2** dibawah ini.

Tabel 2. Resume Nilai Konsentrasi Tegangan Normal untuk Konfigurasi 4 Lubang Baut

| Konfigurasi 4 Lubang Baut | | | |
|---------------------------|------------------------|------------------|----------------|
| Nomor Lubang Baut | Tegangan Rata-rata (%) | Sebaran Tegangan | Jenis Tegangan |
| Lubang Baut 1 | 34,07 | < 1/2 | tegangan tekan |
| | 16,7 | < 1/16 | tegangan tarik |
| Lubang Baut 2 | 33,54 | ± 1/4 | tegangan tekan |
| | 25,69 | ± 1/16 | tegangan tarik |
| Lubang Baut 3 | 49,88 | > 1/2 | tegangan tekan |
| | 39,36 | ± 1/4 | tegangan tarik |
| | 37,51 | > 1/4 | tegangan tarik |
| Lubang Baut 4 | 44,46 | ± 1/2 | tegangan tekan |
| | 36,98 | ± 1/4 | tegangan tarik |
| | 38,93 | ± 1/4 | tegangan tarik |

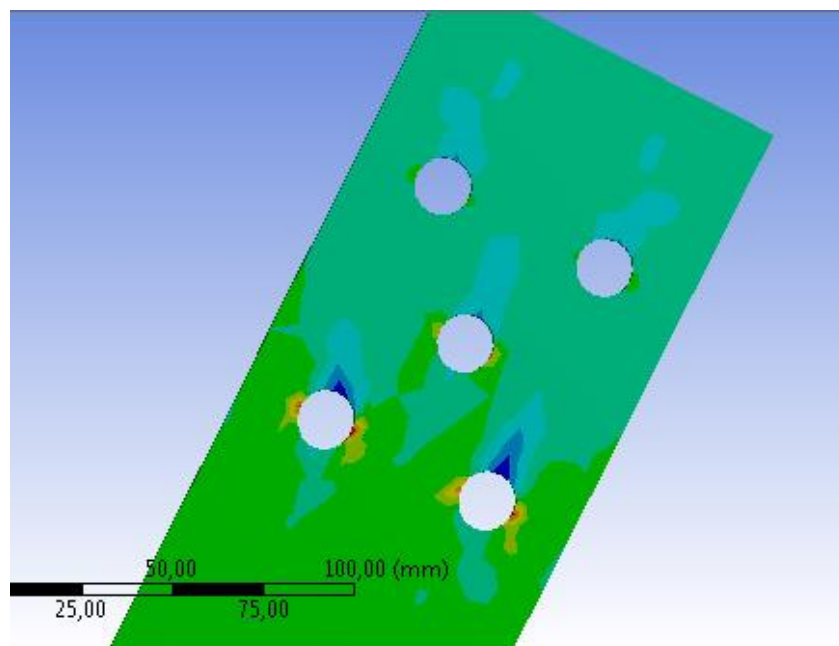
Sedangkan untuk tegangan geser pada konfigurasi 4 lubang baut, peningkatan tegangannya dapat dilihat pada **Gambar 8** dibawah ini.



Gambar 8. Kontur tegangan geser pada konfigurasi 4 lubang baut.

Berdasarkan **Gambar 8**, kuat geser FRP 40 MPa terjadi pada step ke-2 dengan gaya sebesar 35,082 kN untuk konfigurasi 4 lubang baut.

Sama halnya dengan konfigurasi 2 dan 4 lubang baut, untuk konfigurasi 5 lubang baut, peningkatan konsentrasi tegangan normalnya dapat dilihat pada **Gambar 9**.



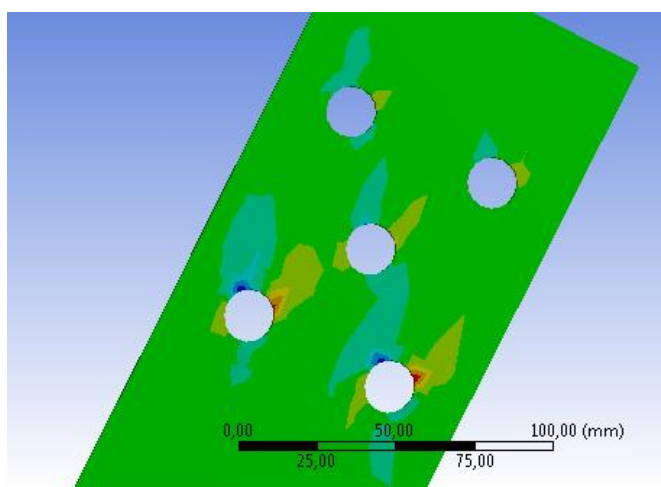
Gambar 9. Kontur tegangan normal pada konfigurasi 5 lubang baut.

Sedangkan untuk konsentrasi tegangan normal yang terjadi pada konfigurasi 5 lubang baut dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Resume Nilai Konsentrasi Tegangan Normal untuk Konfigurasi 5 Lubang Baut

| Konfigurasi 5 Lubang Baut | | | |
|---------------------------|------------------------|------------------|----------------|
| Nomor Lubang Baut | Tegangan Rata-rata (%) | Sebaran Tegangan | Jenis Tegangan |
| Lubang Baut 1 | 42,38 | > 1/2 | tegangan tekan |
| | 64,44 | < 1/16 | tegangantarik |
| Lubang Baut 2 | 44,34 | > 1/2 | tegangan tekan |
| | 65,76 | < 1/16 | tegangantarik |
| Lubang Baut 3 | 43,94 | > 1/2 | tegangan tekan |
| | 30,06 | ± 1/6 | tegangantarik |
| Lubang Baut 4 | 68,70 | > 1/4 | tegangan tekan |
| | 28,34 | ± 1/4 | tegangantarik |
| | 33,36 | > 1/4 | tegangantarik |
| Lubang Baut 5 | 76,52 | > 1/2 | tegangan tekan |
| | 32,59 | ± 1/4 | tegangantarik |
| | 29,67 | < 1/4 | tegangantarik |

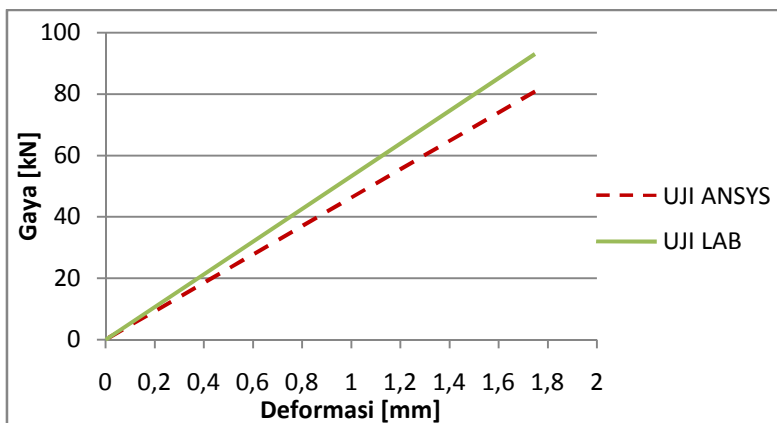
Sementara itu, peningkatan kontur tegangan geser untuk konfigurasi lubang baut terakhir, tampak pada **Gambar 10** dibawah ini.



Gambar 10. Kontur tegangan geser pada konfigurasi 5 lubang baut.

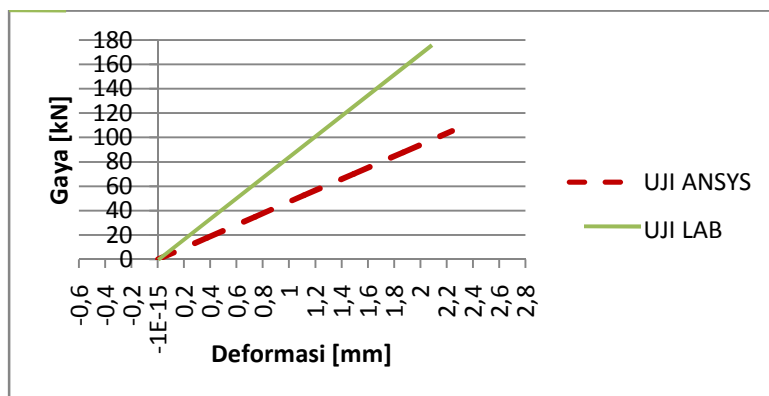
Berdasarkan **Gambar 10** diatas, kuat geser FRP sebesar 40 MPa, terjadi pada step ke-2 dengan gaya sebesar 32,58 kN untuk konfigurasi 5 lubang baut.

Dari analisis peningkatan kontur tegangan normal, dapat disimpulkan bahwa, tegangan yang mendominasi ialah tegangan tekan, dengan nilai tegangan terbesar 76,52 MPa. Sedangkan untuk gaya yang mengalami kuat geser FRP terbesar ialah 35,082 kN. Sesuai dengan tujuan penelitian, analisis selanjutnya mengenai perbandingan gaya (kN) terhadap deformasi (mm) pada uji numerik dan uji eksperimental. Berikut grafik gaya terhadap deformasi untuk konfigurasi 2 lubang baut (**Gambar 11**).



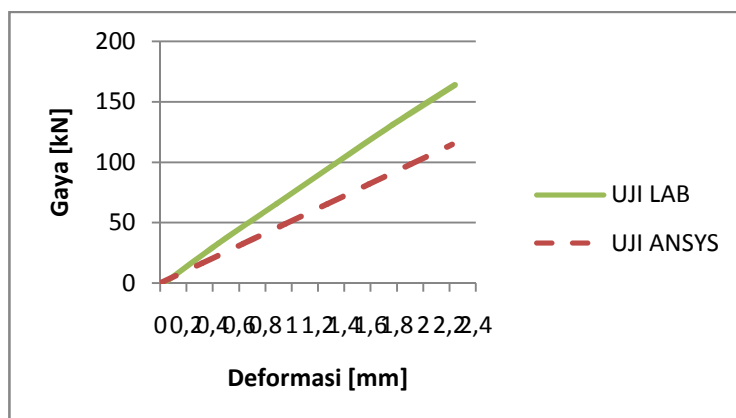
Gambar11. Grafik gaya terhadap deformasi untuk konfigurasi 2 lubang baut.

Pada **Gambar 11**, terlihat bahwa garis linier uji ANSYS (garis warna merah) hampir mendekati garis linier uji eksperimental (garis warna hijau), dengan persentase perbedaan sekitar 5%. Selanjutnya untuk konfigurasi 4 lubang baut, dapat dilihat pada **Gambar 11**.



Gambar12. Grafik gaya terhadap deformasi untuk konfigurasi 4 lubang baut.

Berbeda dengan konfigurasi 2 lubang baut, pada konfigurasi 4 lubang baut ini, analisis menggunakan ANSYS menunjukkan persentase perbedaan yang lebih besar sekitar 12% dari uji eksperimental. Perbandingan yang terakhir untuk konfigurasi 5 lubang baut dapat dilihat pada **Gambar 13** dibawah ini.



Gambar13. Grafik gaya terhadap deformasi untuk konfigurasi 5 lubang baut.

Persentase perbedaan untuk konfigurasi 5 lubang baut lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi 4 lubang baut, yakni sebesar 10%. Berdasarkan perbandingan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa, konfigurasi 2 lubang baut memiliki perbedaan paling kecil, yakni 5% terhadap uji eksperimental.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis peningkatan konsentrasi tegangan dan perbandingan gaya terhadap deformasi pada uji numerik dan uji eksperimental, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Distribusi tegangan untuk konfigurasi 2 lubang baut memiliki nilai tegangan tekan yang paling besar yaitu, 56,11%, dengan luas sebaran $\pm 1/2 D$ lubang, sedangkan untuk tegangan tarik yang paling besar yaitu, 35,75% dengan luas sebarannya $< 1/4 D$ lubang.
2. Distribusi tegangan untuk konfigurasi 4 lubang baut memiliki nilai tegangan tekan dan tarik yang paling besar, sebesar 49,88% dengan luas sebaran $> 1/2 D$ lubang, dan 39,36% dengan luas sebaran $\pm 1/4 D$ lubang.
3. Distribusi tegangan untuk konfigurasi 5 lubang baut memiliki nilai tegangan tekan dan tarik yang paling besar, sebesar 76,52% dengan luas sebaran $> 1/2 D$ lubang, dan 39,36% dengan luas sebaran $\pm 1/4 D$ lubang.
4. Kuat geser FRP sebesar 40 MPa terjadi pada gaya 21,42 kN untuk konfigurasi 2 lubang baut, 35,082 kN untuk konfigurasi 4 lubang baut, dan 32,58 kN untuk konfigurasi 5 lubang baut.
5. Berdasarkan grafik perbandingan gaya terhadap deformasi/*stroke*, hasil pemodelan menggunakan ANSYS versi 14 sesuai dengan literatur oleh Park, JS (2009). Dengan persentase perbedaan untuk konfigurasi 2 lubang baut 5%, 15% untuk konfigurasi 4 lubang baut, dan 10% untuk konfigurasi 5 lubang baut.

DAFTAR RUJUKAN

- WinarputroAdi. (2012). *Teknologi Jembatan Sementara Berbahan Dasar Material Komposit*, Puslitbang Jalan dan Jembatan.
- Park, JS (2009). *Experimental and Analytical Investigations on The Bolted Joints in Pultruded FRP Structural Member*. APFIS-Korea.
- Thomas Keller. (2003). *Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction*. Fiberline Composites A/S.
- Effendy, E.H. (2004). *Analisa Kekuatan dan Tegangan Thresher Arm Pada Kondisi Statis Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Jakarta: Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.