

Perbandingan Karakteristik Side Load Pegas Linier, Nonlinier, Tipe C, dan Tipe L pada Suspensi McPherson Menggunakan FEM

Sigit Setijo Budi^{1*}, Andre Budhi Hendrawan², Nur Aidi Ariyanto³, Faqih Fatkhqurrozak⁴, Firman Lukman Sanjaya⁵

¹²³⁴⁵Prodi S1 Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Harkat Negeri

¹²³⁴⁵Jln. Mataram No. 9, Kota Tegal, 52142, Indonesia

email: ¹seti08405@gmail.com

Abstrak – Pengembangan *electric city car* memerlukan sistem suspensi yang mampu memberikan kenyamanan dan stabilitas sekaligus meminimalkan gaya lateral pada komponen *strut*. Pada suspensi McPherson, deformasi vertikal pegas dapat menghasilkan *side load* akibat perubahan arah gaya selama proses kompresi. Penelitian ini bertujuan membandingkan karakteristik *side load* empat konfigurasi pegas, yaitu linier, nonlinier, tipe C, dan tipe L, dengan variasi jumlah ulir 11, 12, dan 13 menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Model pegas dianalisis pada *displacement* vertikal 50, 100, 150, 200, dan 250 mm. Gaya reaksi pada arah X, Y, dan Z digunakan sebagai parameter evaluasi, dengan gaya X dan Y sebagai indikator utama *side load*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa karakteristik gaya lateral dipengaruhi oleh bentuk geometri dan jumlah ulir. Pegas tipe L menunjukkan kecenderungan menghasilkan gaya lateral yang lebih besar, sedangkan pegas nonlinier memberikan respons lateral yang relatif rendah. Pada rentang *wheel travel* 50–200 mm, konfigurasi nonlinier 11 ulir menghasilkan gaya X sebesar 0,1–0,5 N dan gaya Y sebesar 23,9–95,6 N. Berdasarkan kriteria minimisasi gaya horizontal, pegas nonlinier 11 ulir merupakan konfigurasi yang paling potensial untuk mengurangi *side load* pada suspensi McPherson *electric city car*.

Kata Kunci – *electric city car*, McPherson, *side load*, pegas suspensi, FEMa.

IPENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik (*electric vehicle*) dalam satu dekade terakhir mendorong perubahan teknologi transportasi menuju sistem kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Pengembangan kendaraan listrik tidak hanya berkaitan dengan sumber energi dan sistem penggerak, tetapi juga mencakup subsistem yang menentukan kenyamanan, kestabilan, dan keandalan kendaraan. Salah satu subsistem tersebut adalah sistem suspensi yang berfungsi meredam gangguan akibat ketidakrataan permukaan jalan, mempertahankan kontak ban dengan jalan, serta mendukung kemampuan pengendalian kendaraan.

Sistem suspensi McPherson merupakan salah satu konfigurasi suspensi independen yang banyak digunakan pada kendaraan penumpang karena konstruksinya relatif sederhana, kompak, ringan, dan membutuhkan ruang pemasangan yang kecil. Pada konfigurasi ini, pegas dan *strut* bekerja secara bersamaan untuk menopang beban kendaraan dan mengarahkan gerakan relatif antara roda dan bodi kendaraan. Namun, pembebanan vertikal pada pegas dapat menghasilkan gaya lateral atau *side load*.

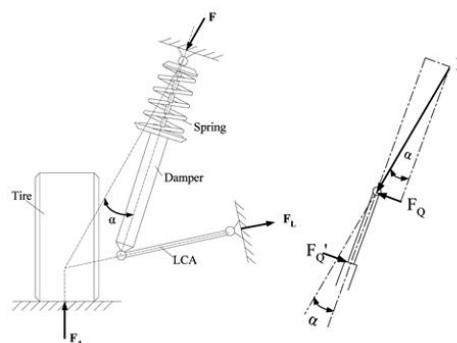
Gaya tersebut dapat meningkatkan gaya samping pada *strut* dan gesekan antara *damper rod* dengan komponen penuntunnya sehingga berpotensi memengaruhi kinerja dan umur komponen suspensi.

Permasalahan tersebut menjadi dasar perlunya optimasi karakteristik pegas pada suspensi McPherson. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan karakteristik *side load* pada beberapa konfigurasi geometri pegas dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Empat konfigurasi pegas, yaitu linier, nonlinier, tipe C, dan tipe L, dianalisis dengan variasi jumlah ulir 11, 12, dan 13. Pembebanan diberikan dalam bentuk *displacement* vertikal sebesar 50, 100, 150, 200, dan 250 mm. Gaya reaksi pada arah X, Y, dan Z digunakan untuk mengevaluasi respons struktur pegas, sedangkan gaya arah X dan Y digunakan sebagai indikator *side load*.

II. PENELITIAN YANG TERKAIT

Penelitian mengenai *side load* pada suspensi McPherson telah dilakukan melalui pendekatan optimasi geometri, simulasi dinamika kendaraan, maupun analisis numerik (Liu et al., 2008)

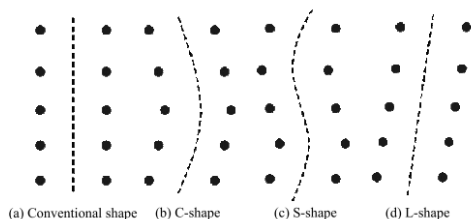
Gambar 1. *Sideload* Piston (Liu et al., 2008)



mengembangkan optimasi desain suspensi McPherson dengan *side load spring* dan menunjukkan bahwa konfigurasi pegas dapat digunakan untuk mengendalikan gaya lateral pada sistem suspensi (Choi et al., 2018). Choi menggunakan model *Kriging* dan dinamika multibodi untuk melakukan optimasi suspensi McPherson dengan tujuan meminimalkan *side load*, dan menunjukkan bahwa parameter geometri mempunyai pengaruh terhadap karakteristik gaya lateral (“Adv. Veh. Technol.,” 2002; Cho et al., 2021). Chang dan Han melakukan desain analitis serta optimasi *offset* pada *side load spring*

McPherson (Cadet & Paredes, 2024), sedangkan penelitian lainnya mengevaluasi pengaruh *side load spring* terhadap kenyamanan berkendara menggunakan simulasi dinamika multibodi (Stević et al., 2023).

Gambar 2. *Sideload* pada macam pegas(Ryu et al., 2010)



Cho et al. selanjutnya mengembangkan *C-type side load coil spring* dengan mempertimbangkan posisi sudut *end coil* dan bentuk *centerline* pegas untuk mengurangi *side load* (Zhang & Cai, 2020).

Selain pendekatan dinamika, FEM banyak digunakan untuk mengevaluasi respons mekanik pegas. (Kushwah et al., 2020) melakukan optimasi pegas suspensi kendaraan menggunakan FEM dengan variasi material, sedangkan (Juniani et al., 2024)(Budi et al., 2024). mengevaluasi umur lelah *coil spring* kendaraan menggunakan analisis elemen hingga (Dwi Ananto & Andoko, 2021). Penelitian sebelumnya oleh Budi et al. juga menganalisis pengaruh jumlah ulir pegas linier terhadap *side load* pada suspensi McPherson *electric city car* (Budi et al., 2017).

Berdasarkan penelitian tersebut, kajian terdahulu umumnya berfokus pada satu konfigurasi pegas atau parameter tertentu, seperti *offset*, bentuk *centerline*, jumlah ulir, material, atau umur lelah. Kajian komparatif yang membandingkan pegas linier, nonlinier, tipe C, dan tipe L secara langsung dengan kondisi pemodelan, material, pembebanan, dan metode analisis yang sama masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi *research gap* tersebut melalui analisis komparatif terhadap 12 konfigurasi pegas (linier, non linier, tipe C, dan Tipe L) menggunakan FEM. Perbandingan dilakukan berdasarkan gaya reaksi arah X dan Y untuk menentukan konfigurasi yang memiliki karakteristik *side load* paling rendah dan berpotensi diterapkan pada suspensi *electric city car*.

III. METODE PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis karakteristik *side load* pada pegas suspensi McPherson *electric city car*. Empat konfigurasi pegas yang dianalisis terdiri atas pegas linier, nonlinier, tipe C, dan tipe L. Masing-masing konfigurasi divariasikan berdasarkan jumlah ulir, yaitu 11, 12, dan 13 ulir, sehingga diperoleh 12 konfigurasi pegas yang dibandingkan.

Analisis dilakukan dengan mempertahankan parameter dasar dan material yang sama pada seluruh model. Dengan demikian, perbandingan hasil simulasi difokuskan pada pengaruh bentuk geometri dan jumlah ulir terhadap gaya yang timbul selama pegas mengalami pembebanan vertikal.

B. Geometri dan Material Pegas

Keempat konfigurasi pegas menggunakan panjang bebas 268 mm, diameter pegas 100 mm, dan diameter kawat 10 mm. Variasi jumlah ulir terdiri atas 11, 12, dan 13 ulir.

Tabel 1. Parameter geometri pegas

Parameter	Nilai
Panjang bebas	268 mm
Diameter pegas	100 mm
Diameter kawat	10 mm
Jumlah ulir	11, 12, 13
Konfigurasi	Linier, nonlinier, C, L

Material yang digunakan pada seluruh model adalah baja ST 37.

Tabel 2. Sifat material ST 37

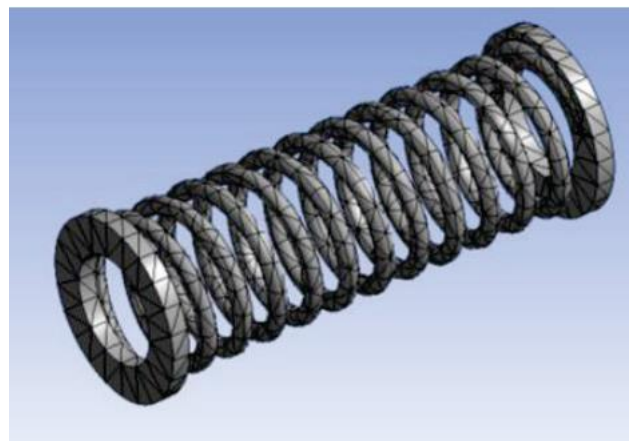
Parameter	Nilai
Massa jenis	7850 kg/m ³
Modulus elastisitas	207 GPa
Rasio Poisson	0,30
<i>Yield strength</i>	250 MPa
<i>Ultimate tensile strength</i>	460 MPa
<i>Plastic strain at UTS</i>	0,35

Sifat material yang digunakan meliputi massa jenis 7850 kg/m³, modulus elastisitas 207 GPa, rasio Poisson 0,30, *yield strength* 250 MPa, *ultimate tensile strength* 460 MPa, dan *plastic strain at UTS* 0,35.

C. Pemodelan dan Analisis FEM

Model tiga dimensi pegas dibuat menggunakan SolidWorks 2021, kemudian diproses untuk analisis menggunakan HyperMesh dan ANSYS. Tahapan analisis meliputi pembuatan geometri tiga dimensi, pendefinisian material, pembentukan *mesh*, penentuan kondisi batas, pemberian *displacement*, penyelesaian numerik, dan pengambilan gaya reaksi pada arah X, Y, dan Z.

Gambar 3. *Hypermesh* pegas suspensi



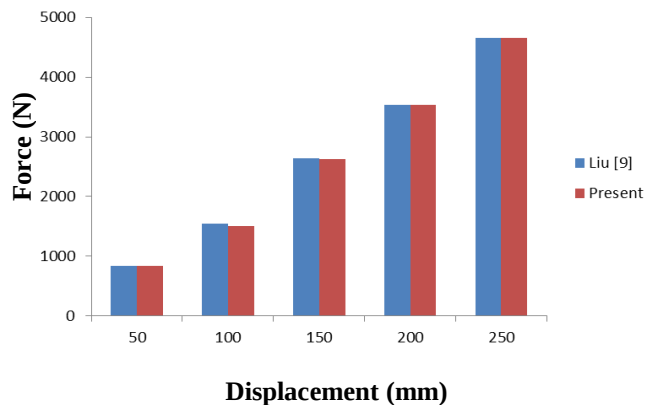
Karena geometri pegas berbentuk heliks tiga dimensi yang kompleks, digunakan elemen solid berbentuk tetrahedral. Pada model FEM tesis, *mesh* yang digunakan menghasilkan 5.727 *nodes* dan 2.180 *elements*.

Pembebanan diberikan dalam bentuk *displacement* vertikal pada pegas dengan variasi 50, 100, 150, 200, dan 250 mm. Hasil analisis berupa gaya reaksi pada tiga arah koordinat: Gaya dan digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi *side load*, sedangkan menunjukkan respons gaya pada arah vertikal.

D. Validasi dan Kriteria Evaluasi

Validasi model FEM dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap penelitian(Liu et al., 2008) Liu *et al.* (2008). Diagram alir tesis secara eksplisit menetapkan bahwa model dinyatakan memenuhi validasi apabila deviasi hasil tidak lebih dari 10%.

Gambar 4. Hasil Validasi Liu



Evaluasi *side load* didasarkan pada arah gaya yang dihasilkan oleh pegas. Arah X dan Y merupakan arah horizontal, sedangkan arah Z merupakan arah vertikal. Oleh karena itu, konfigurasi pegas yang menghasilkan gaya pada arah X dan Y semakin mendekati nol dipandang memiliki karakteristik *side load* yang lebih rendah.

Berdasarkan kriteria tersebut, hasil dari 12 konfigurasi dibandingkan pada setiap tingkat *displacement*. Konfigurasi dengan respons gaya horizontal paling rendah kemudian ditentukan sebagai alternatif pegas yang paling potensial untuk mengurangi *side load* pada suspensi McPherson *electric city car*.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi FEM

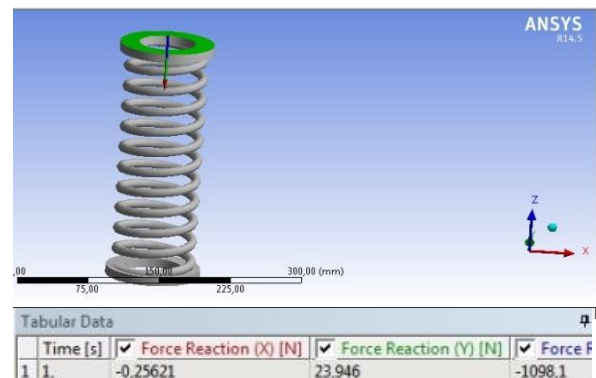
Simulasi FEM dilakukan terhadap 12 konfigurasi pegas, yang terdiri atas pegas linier, nonlinier, tipe C, dan tipe L dengan masing-masing jumlah ulir 11, 12, dan 13. Setiap model diberikan *displacement* vertikal 50–250 mm. Respons yang diperoleh berupa gaya pada arah X, Y, dan Z. Dalam penelitian ini, gaya X dan Y menjadi parameter utama untuk mengevaluasi *side load*, sedangkan gaya Z menunjukkan respons gaya vertikal.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan geometri dan jumlah ulir menghasilkan karakteristik gaya yang berbeda. Secara umum, gaya meningkat seiring bertambahnya *displacement*, tetapi tingkat peningkatannya berbeda pada setiap konfigurasi.

Pada pegas linier 11 ulir, *displacement* 50 mm menghasilkan gaya , , dan masing-masing sebesar 0,256 N, 23,9 N, dan

1098,1 N. Pada *displacement* 250 mm, gaya meningkat menjadi 1,28 N, 119,7 N, dan 5490,6 N.

Gambar 5 Pegas Linier



Pegas linier 12 ulir menghasilkan gaya 0,53 N, 25,1 N, dan 952,7 N pada 50 mm, kemudian meningkat menjadi 2,69 N, 125,88 N, dan 4763,5 N pada 250 mm. Sementara itu, pegas linier 13 ulir menghasilkan 0,26 N, 21,09 N, dan 840,79 N pada 50 mm serta 1,32 N, 105,4 N, dan 4203,9 N pada 250 mm.

Tabel 3. Hasil simulasi pegas linier

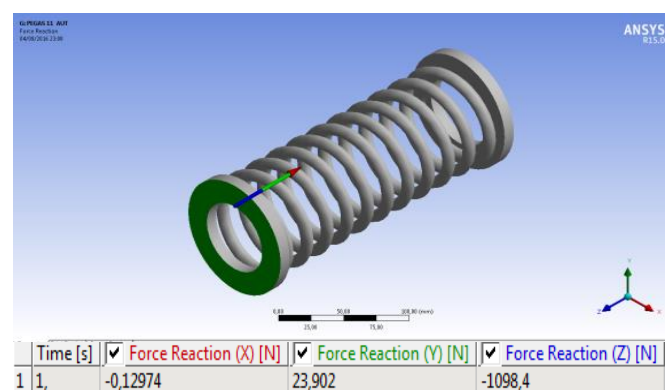
Ulir	Displacement	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
11	50	0,256	23,90	1098,1
11	250	1,28	119,70	5490,6
12	50	0,53	25,10	952,7
12	250	2,69	125,88	4763,5
13	50	0,26	21,09	840,79
13	250	1,32	105,40	4203,9

titik 100, 150, dan 200 mm tetap ditampilkan dalam grafik hasil FEM, tetapi tidak saya masukkan sebagai angka tabel sebelum kita mengambil nilainya langsung dari grafik/hasil ANSYS.

B. Karakteristik Pegas Nonlinier

Pegas nonlinier menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan pegas linier. Pada konfigurasi 11 ulir, gaya pada *displacement* 50 mm adalah 0,12 N pada arah X, 23,9 N pada arah Y, dan 1098,7 N pada arah Z. Ketika *displacement* mencapai 250 mm, gaya meningkat menjadi 0,64 N, 119,5 N, dan 5492,1 N.

Gambar 6 Pegas Nonlinier



Pada pegas nonlinier 12 ulir, gaya pada 50 mm adalah 0,25 N, 22,7 N, dan 873,8 N, sedangkan pada 250 mm menjadi 13,8 N, 100,2 N, dan 3823,7 N. Perubahan gaya arah X pada

konfigurasi ini menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan konfigurasi lainnya, terutama pada *displacement* besar.

Untuk nonlinier 13 ulir, gaya pada 50 mm adalah 0,3 N, 21,08 N, dan 840,7 N dan meningkat menjadi 1,5 N, 105,4 N, dan 4203,7 N pada 250 mm.

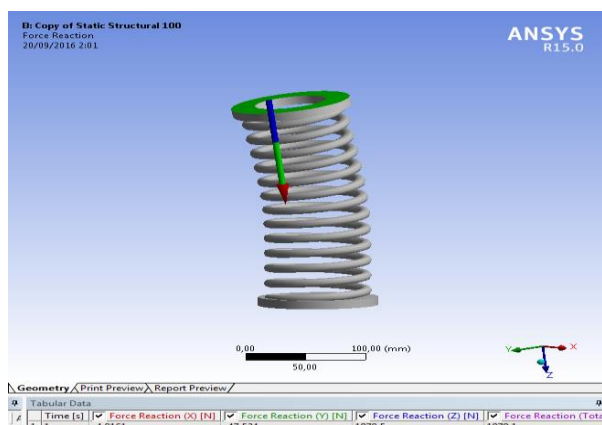
Tabel 4. Hasil simulasi pegas nonlinier

Ulir	Displacement	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
11	50	0,12	23,90	1098,7
11	250	0,64	119,50	5492,1
12	50	0,25	22,70	873,8
12	250	13,80	100,20	3823,7
13	50	0,30	21,08	840,7
13	250	1,50	105,40	4203,7

C. Karakteristik Pegas Tipe C

Hasil simulasi pegas tipe C menunjukkan bahwa perubahan jumlah ulir memberikan respons gaya yang berbeda. Pada konfigurasi C-13, gaya pada *displacement* 50 mm sebesar 3,16 N pada X, 25,23 N pada Y, dan 1113,1 N pada Z. Pada 250 mm, gaya meningkat menjadi 15,8 N, 126,14 N, dan 5565,7 N. Konfigurasi C-12 menghasilkan gaya 1,45 N, 23,1 N, dan 922,28 N pada 50 mm, sedangkan pada 250 mm menghasilkan 5,82 N, 92,4 N, dan 3689,5 N.

Gambar 7. Pegas Tipe C



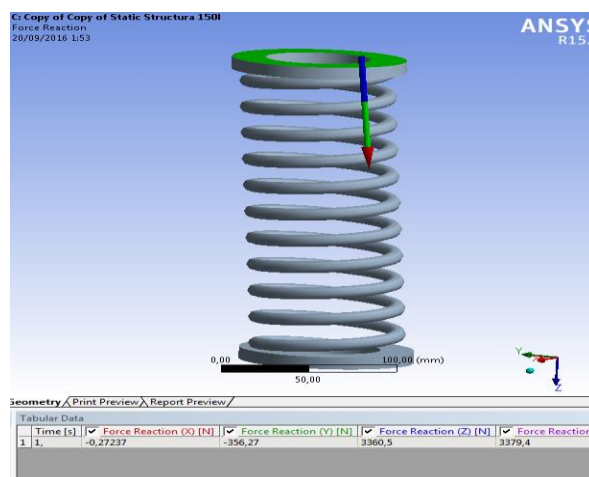
Hasil tersebut menunjukkan bahwa pegas tipe C mempunyai respons gaya lateral yang berbeda dari pegas linier dan nonlinier. Secara khusus, peningkatan *displacement* menyebabkan peningkatan gaya pada arah horizontal dan vertikal.

D. Karakteristik Pegas Tipe L

Pegas tipe L menunjukkan karakteristik *side load* yang paling menonjol. Pada L-11, *displacement* 50 mm menghasilkan gaya X sebesar 0,79 N dan gaya Y sebesar 118,76 N. Pada 250 mm, gaya X menjadi 0,46 N, sedangkan gaya Y meningkat hingga 593,79 N.

Pada L-12, gaya pada 50 mm adalah 0,43 N, 24,9 N, dan 952,38 N, sedangkan pada 250 mm menjadi 2,18 N, 124,6 N, dan 4761,9 N. L-13 menghasilkan gaya 0,89 N, 95,192 N, dan 896,49 N pada 50 mm, kemudian menjadi 4,45 N, 475,96 N, dan 4482,5 N pada 250 mm.

Gambar 8. Pegas Tipe L

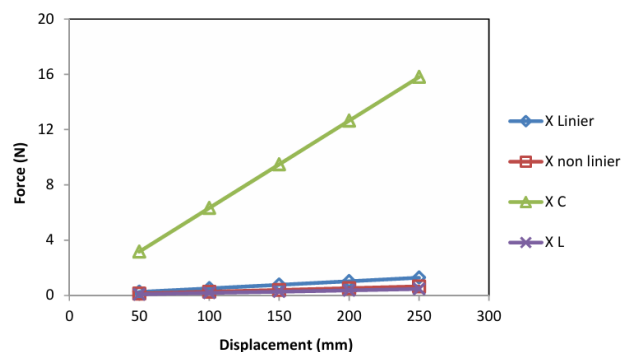


Hasil tersebut menunjukkan bahwa bentuk geometri tipe L dapat menghasilkan gaya lateral yang lebih besar, terutama pada konfigurasi L-11 dan L-13. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa bentuk *centerline* pegas mempunyai pengaruh terhadap arah gaya ketika pegas mengalami deformasi vertikal.

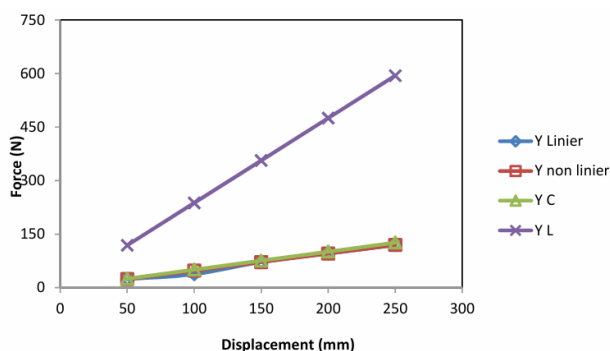
E. Perbandingan *Side Load* Antar Konfigurasi

Untuk memperjelas perbandingan, hasil simulasi kemudian dikelompokkan berdasarkan jumlah ulir. Tesis membandingkan gaya X dan Y untuk empat jenis pegas pada jumlah ulir 11, 12, dan 13 melalui grafik komparatif. Pada 11 ulir, distribusi gaya X dan Y menunjukkan kecenderungan yang berbeda antar geometri. Pola yang sama juga terlihat pada 12 dan 13 ulir.

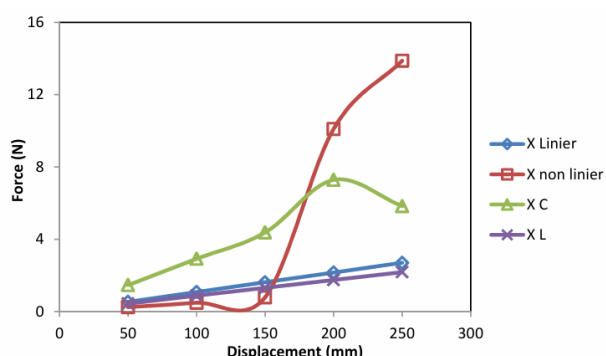
Gambar 1. Perbandingan gaya X untuk empat tipe pegas pada 11 ulir



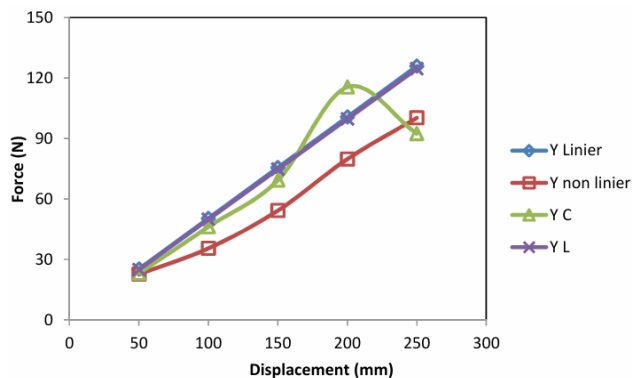
Gambar 2. Perbandingan gaya Y untuk empat tipe negas nada



Gambar 3. Perbandingan gaya X dan Y untuk empat tipe pegas pada 12 ulir



Gambar 4. Perbandingan gaya X dan Y untuk empat tipe pegas pada 13 ulir



Dari hasil komparatif tersebut terlihat bahwa jumlah ulir tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menentukan pegas dengan *side load* rendah. Pengaruh jumlah ulir bergantung pada geometri pegas yang digunakan. Hal tersebut terlihat pada pegas nonlinier 12 ulir yang menunjukkan perubahan gaya X cukup besar pada *displacement* 250 mm, sedangkan nonlinier 11 dan 13 ulir menunjukkan respons yang lebih rendah pada arah tersebut. Dengan demikian, terdapat interaksi antara geometri pegas, jumlah ulir, dan *displacement* terhadap karakteristik gaya lateral. Hal ini menjadi alasan utama mengapa analisis komparatif 12 konfigurasi diperlukan.

F. Penentuan Konfigurasi Pegas

Kriteria pemilihan konfigurasi didasarkan pada prinsip bahwa *side load* dapat diminimalkan apabila gaya pada arah X dan Y semakin mendekati nol. Arah X dan Y merupakan arah horizontal, sedangkan Z merupakan arah vertikal.

Berdasarkan hasil perbandingan, pegas nonlinier 11 ulir menunjukkan gaya arah X dan Y yang paling rendah secara keseluruhan, meskipun perbedaannya dengan beberapa konfigurasi lain relatif kecil. Tesis juga menyatakan bahwa konfigurasi nonlinier 11 ulir merupakan konfigurasi dengan gaya menuju X dan Y paling kecil dibandingkan konfigurasi lainnya.

Hal ini menjadi temuan utama penelitian karena menunjukkan bahwa pengurangan *side load* tidak hanya ditentukan oleh kekakuan atau jumlah ulir, tetapi juga oleh bentuk geometri pegas dan orientasi garis tengah pegas terhadap arah deformasi. Dengan mempertahankan parameter material dan dimensi dasar yang sama, perbedaan respons yang diperoleh menunjukkan adanya pengaruh konfigurasi geometri terhadap arah gaya reaksi.

Untuk rentang *wheel travel* 50–200 mm yang digunakan sebagai rentang kenyamanan pada tesis, nonlinier 11 ulir menunjukkan sebesar 0,1; 0,2; 0,3; dan 0,5 N pada *displacement* 50, 100, 150, dan 200 mm. Sementara itu, masing-masing sebesar 23,9; 47,8; 71,7; dan 95,6 N.

Dengan demikian, nonlinier 11 ulir dipilih sebagai konfigurasi paling potensial untuk meminimalkan *side load* pada sistem suspensi McPherson *electric city car*.

Pembahasan terhadap hasil penelitian dan pengujian yang diperoleh disajikan dalam bentuk uraian teoritik, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Hasil percobaan sebaiknya ditampilkan dalam berupa grafik ataupun tabel.

V KESIMPULAN

Hasil analisis FEM menunjukkan bahwa perbedaan geometri pegas, yaitu linier, nonlinier, tipe C, dan tipe L, menghasilkan karakteristik gaya *side load* yang berbeda pada suspensi McPherson *electric city car*. Perubahan jumlah ulir dari 11, 12, dan 13 ulir juga memengaruhi respons gaya pada arah X dan Y, tetapi pengaruh tersebut bergantung pada konfigurasi geometri pegas yang digunakan.

Berdasarkan perbandingan 12 konfigurasi dengan *displacement* vertikal 50–250 mm, pegas nonlinier 11 ulir menunjukkan karakteristik gaya horizontal yang paling rendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Pada rentang *displacement* 50–200 mm, konfigurasi tersebut menghasilkan gaya pada arah X dan Y yang relatif kecil sehingga menjadi konfigurasi yang paling potensial dalam mengurangi *side load* pada suspensi McPherson.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa geometri dan jumlah ulir perlu dipertimbangkan secara bersamaan dalam menentukan desain pegas untuk mengurangi *side load*. FEM dapat digunakan sebagai pendekatan numerik untuk melakukan evaluasi dan perbandingan berbagai konfigurasi pegas sebelum dilakukan pengujian eksperimental.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Advanced Vehicle Technology. (2002). *Advanced Vehicle Technology*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-5131-8.x5000-3>
- [2] Budi, S. S., Hendrawan, A. B., Saputra, I., & Ismail, R. (2024). Force-Displacement analysis of macpherson type L suspension spring for electric city car using finite element method. *AIP Conference Proceedings*, 3070(1), 5–9. <https://doi.org/10.1063/5.0199142>
- [3] Budi, S. S., Supriyadi, A., Makhrojan, A., Ismail, R., & Jamari, J. (2017). The effect of linear spring number at side load of McPherson suspension in electric city car. *AIP Conference Proceedings*, 1788(January). <https://doi.org/10.1063/1.4968329>
- [4] Cadet, G., & Paredes, M. (2024). Convergence analysis and mesh optimization of finite element analysis related to helical springs. *Mechanics and Industry*, 25. <https://doi.org/10.1051/meca/2024018>
- [5] Cho, S., Yeon, H., Kim, H., & Kim, C. W. (2021). Design of end coil angular position and centerline shape of C-type side load coil spring for reducing side load of MacPherson strut suspension. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(3), 1153–1160. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0228-6>
- [6] Choi, B. C., Cho, S., & Kim, C. W. (2018). Kriging Model Based Optimization of MacPherson Strut Suspension for Minimizing Side Load using Flexible Multi-Body Dynamics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(6), 873–879. <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0103-2>
- [7] Dwi Ananto, R. R., & Andoko. (2021). Coil spring type analysis using the finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1034/1/012016>
- [8] Juniani, A. I., Wibisono, F., Kurniawan, B. W., Indrawan, R., Hamzah, F., Sidi, P., Purnomo, D. A., Rachman, F., & Ardiana, T. (2024). Cad-Based 3D Printing Education To Enhance the Competence of Vocational Students of Smk Babat Lamongan. *Sawala : Jurnal Pengabdian Masyarakat Pembangunan Sosial, Desa Dan Masyarakat*, 5(1), 94–100. <https://doi.org/10.24198/sawala.v5i1.51152>
- [9] Kushwah, S., Parekh, S., & Mangrola, M. (2020). Optimization of coil spring by finite element analysis method of automobile suspension system using different materials. *Materials Today: Proceedings*, 42, 827–831. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.415>
- [10] Liu, J., Zhuang, D. J., Yu, F., & Lou, L. M. (2008). Optimized design for a MacPherson strut suspension with side load springs. *International Journal of Automotive Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0004-y>
- [11] Ryu, Y. I., Kang, D. O., Heo, S. J., Yim, H. J., & Jeon, J. I. (2010). Development of analytical process to reduce side load in strut-type suspension. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(1), 351–356. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-1103-z>
- [12] Stević, Z., Dimitrijević, S. P., Stević, M., Stolić, P., Petrović, S. J., & Radivojević, M. (2023). The Design of a System for the Induction Hardening of Steels Using Simulation Parameters. *Applied Sciences*.
- [13] Zhang, D., & Cai, Y. (2020). Simulation Analysis and Optimization of a Passenger Car Ride Comfort. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 811(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/811/1/012052>