

Optimasi Suhu *Hot Press* dan Komposisi Filler Cangkang Telur pada Pembuatan Biokomposit dengan Metode Taguchi

Intan Nazwa^a, Sunardi^{a,*}, Imron Rosyadi^a, Deni Purnomo^b, Erny Listijorini^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jend. Sudirman No.KM. 3, Kotabumi, Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten

^bBadan Riset dan Inovasi Nasional

Kawasan Sains dan Teknologi (KST) B.J. Habibie Serpong, Kota Tangerang Selatan, Banten

*E-mail: sunardi@untirta.ac.id

Abstract

The utilization of biomass waste as a reinforcing agent for biocomposites presents an attractive alternative in the development of environmentally friendly materials. This study aims to analyze the effect of varying percentages of chicken eggshell and crumb rubber fillers, as well as the hot press temperature, on the mechanical properties of the biocomposite, including the Modulus of Rupture (MOR), Modulus of Elasticity (MOE), and strain. The Taguchi method with an L9 orthogonal array design was employed to evaluate the effect of each factor and determine the optimum process combination. The research findings indicate that a 10% filler concentration yielded the highest stiffness, while a 20% filler concentration resulted in the largest strain value and demonstrated the best balance between strength and flexibility. A temperature of 170°C emerged as the most stable condition for most mechanical parameters, whereas a temperature of 190°C provided an increase in strength at higher filler compositions. From this study, it was ascertained that the optimal parameters are a 20% filler concentration and a temperature of 170°C (N1), yielding MOR, MOE, and strain values of 1473.53 MPa, 1186 MPa, and 2.86%, respectively. These findings affirm the critical importance of controlling the filler composition and processing parameters in producing biocomposites that are consistent and high-performing.

Kata kunci: biocomposite, eggshell powder, crumb rubber, hot press, Taguchi method

Abstrak

Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan penguat biokomposit menjadi alternatif yang menarik dalam pengembangan material ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi persentase filler cangkang telur ayam dan karet remah serta suhu hot press terhadap sifat mekanik biokomposit, meliputi *Modulus of Rupture* (MOR), *Modulus of Elasticity* (MOE), dan *strain*. Metode Taguchi dengan rancangan *orthogonal array* L9 digunakan untuk mengevaluasi efek masing-masing faktor serta menentukan kombinasi optimum proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *filler* 10% menghasilkan kekakuan tertinggi, sedangkan *filler* 20% memberikan nilai strain terbesar dan menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan fleksibilitas. Suhu 170°C menjadi kondisi paling stabil untuk sebagian besar parameter mekanik, sementara suhu 190°C memberikan peningkatan kekuatan pada komposisi filler yang lebih tinggi. Dari studi ini diketahui bahwa filler 20% dan suhu 170°C (N1) merupakan parameter yang optimal dengan nilai MOR, MOE, dan *strain* masing-masing 1473,53 MPa, 1186 MPa, dan 2,86%. Temuan ini menegaskan pentingnya kontrol komposisi filler dan parameter proses dalam menghasilkan biokomposit yang konsisten dan berkinerja baik.

Kata kunci: biokomposit, cangkang telur, karet remah, hot press, metode Taguchi

1. Pendahuluan

Perkembangan material komposit berbasis sumber daya alam terus mengalami peningkatan seiring dengan tuntutan terhadap material yang lebih ringan, ramah lingkungan, serta memiliki sifat mekanik yang kompetitif [1]. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah pemanfaatan limbah biomassa, seperti cangkang telur ayam sebagai bahan penguat (filler) pada biokomposit. Cangkang telur diketahui memiliki kandungan kalsium karbonat yang tinggi, yang berpotensi meningkatkan kekakuan material, sedangkan penambahan filler yang tepat dapat meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan terhadap deformasi [2, 3, 4]. Kombinasi keduanya memungkinkan terciptanya biokomposit yang tidak hanya bernilai guna tinggi tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular [5].

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sifat mekanik material komposit sangat dipengaruhi oleh jenis filler, persentase komposisi filler, serta parameter proses seperti suhu *hot press* [6, 7]. Variasi suhu selama proses pengepresan dapat memengaruhi kualitas ikatan antar fase, aliran matriks, homogenitas struktur, serta tingkat pengikatan

mekanis pada material [8]. Namun, karakteristik interaksi antara filler cangkang telur dalam konteks variasi suhu pengepresan masih belum banyak dikaji secara sistematis, terutama terkait dengan perilaku tarik dan lentur material [9]. Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk melakukan studi yang lebih terarah menggunakan metode eksperimen terstruktur.

Pendekatan *Design of Experiment* (DOE) metode Taguchi merupakan salah satu metode optimasi yang efisien untuk mengevaluasi pengaruh beberapa faktor sekaligus terhadap respons mekanik material [10]. Melalui penggunaan orthogonal array, metode ini tidak hanya mengurangi jumlah percobaan, tetapi juga mampu menentukan kondisi proses paling robust, yaitu yang memberikan performa terbaik sekaligus stabil terhadap variasi [11]. Penerapan metode Taguchi menjadi relevan dalam penelitian material biokomposit mengingat karakteristik material alami yang cenderung memiliki variabilitas tinggi [12].

Berdasarkan persoalan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi persentase filler (10%, 20%, 30%) dan suhu hot press (170°C, 180°C, 190°C) terhadap sifat mekanik biokomposit berupa *Modulus of Rupture* (MOR), *Modulus of Elasticity* (MOE), dan *strain*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan kombinasi level faktor optimum menggunakan analisis metode Taguchi guna memperoleh kondisi pembuatan biokomposit yang paling optimal dan stabil. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material biokomposit yang ekonomis, ramah lingkungan, serta memiliki performa mekanik yang dapat diterapkan pada berbagai aplikasi struktur ringan.

2. Material dan Metode Penelitian

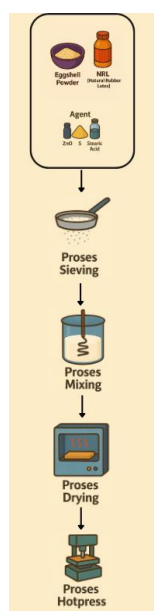
Untuk menentukan jumlah spesimen dan percobaan yang akan dilakukan, digunakan metode Taguchi, yaitu konsep *design of experiment* (DOE) [13]. Penggunaan orthogonal array merupakan salah satu pendekatan utama dalam merancang penelitian dengan metode Taguchi. Desain ini menawarkan keunggulan dalam menyederhanakan eksperimen yang melibatkan banyak faktor dengan jumlah level yang berbeda, sehingga jumlah percobaan dapat diminimalkan tanpa mengurangi kualitas informasi yang diperoleh [14, 15]. Tujuan utamanya adalah menghasilkan rancangan produk atau proses yang tahan terhadap gangguan (*robust*) sejak tahap perancangan awal [16]. Dengan demikian, variabilitas yang disebabkan oleh faktor-faktor tak terkendali (*noise*) dapat ditekan, kualitas produk lebih konsisten, dan biaya pengujian dapat dioptimalkan [17].

Pada penelitian ini akan melibatkan tiga faktor yang masing-masing memiliki tiga *level*, maka derajat kebebasan yang diperoleh adalah 8. Berdasarkan nilai derajat kebebasan tersebut, dipilih matriks ortogonal tiga tingkat (L9) sebagai rancangan percobaan. Melalui Orthogonal Array L9, diperoleh 9 kombinasi percobaan, sehingga jumlah sampel yang dibuat sebanyak 9 sampel.

Tabel 1. Data DOE Penelitian

Kode	Komposisi		Suhu (°C)
	Filler (%)	Matriks (%)	
M1	10	90	170
M2	10	90	180
M3	10	90	190
N1	20	80	170
N2	20	80	180
N3	20	80	190
O1	30	70	170
O2	30	70	180
O3	30	70	190

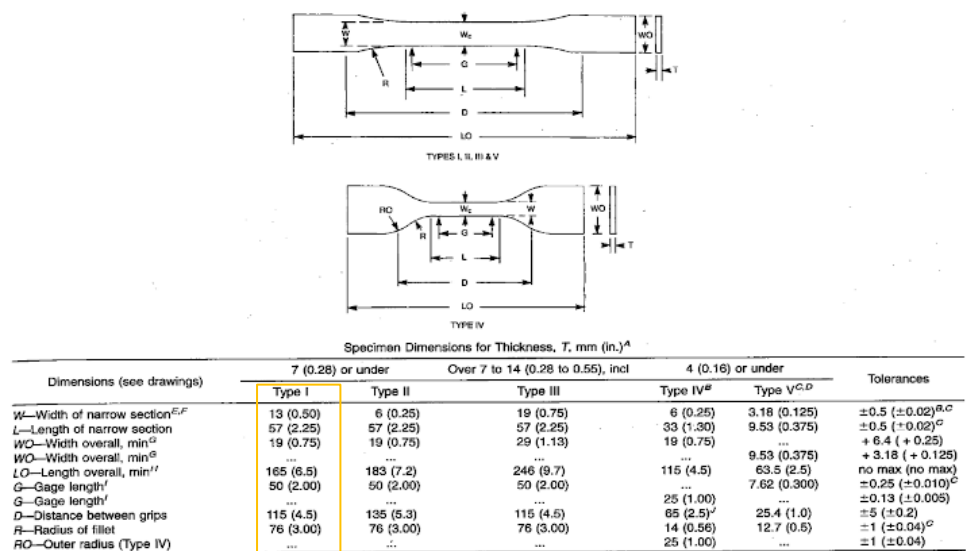
Berdasarkan kombinasi tersebut maka dibuatlah spesimen uji dengan proses pembuatan seperti berikut.



Gambar 1. Proses Pembuatan Material Komposit

Proses pembuatan spesimen diawali dengan mengayak karet remah menjadi ukuran 50 mesh, dan partikel cangkang telur 100 mesh. Tujuan dilakukannya pengayakan adalah untuk mempermudah proses pencampuran dan pengadukan dengan material lain. Selain itu, penggunaan partikel ini juga meningkatkan homogenitas biokomposit yang dihasilkan. Lalu dilanjutkan dengan pencampuran partikel. Setelah dicampur partikel dimasukan pada masing-masing cetakan. Selanjutnya, spesimen dimasukan dalam oven selama 4 jam pada suhu 100°C. Sampel kemudian diproses dalam mesin hotpress, proses ini melibatkan tekanan 10 MPa dan waktu 30 menit, sedangkan suhu divariasikan. Berdasarkan referensi yang didapat suhu yang digunakan adalah 170°C-190°C.

Pengujian mekanik yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji tarik dengan mengacu pada standar ASTM D638 Tipe I.



Gambar 2. Standar Ukuran Spesimen (ASTM D638) [18]

Pengujian Tarik (*Tensile Strength*) ini dilakukan di Laboratorium Material Teknik, Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Alat uji yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* (UTM). Dimana alat UTM yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

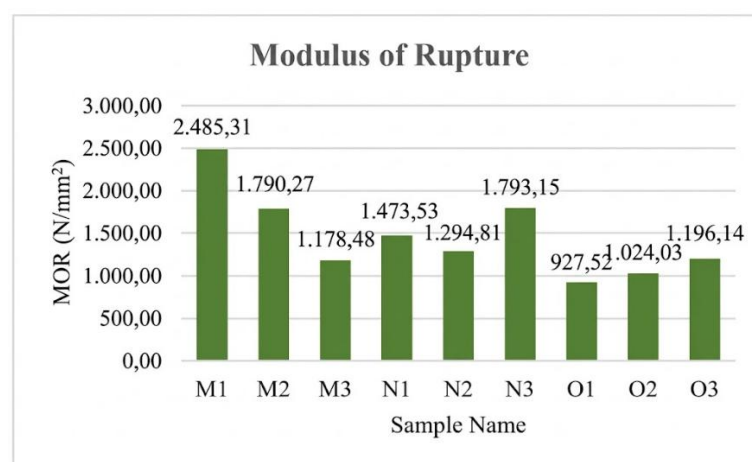
1. Nama Alat : Tensilon UTM RTH-2410
2. Merek : Tensilon
3. Kapasitas Maksimum : 100 kN (kilo Newton)

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari pengujian tarik dari material biokomposit dengan variasi filler cangkang telur dan karet remah dan temperatur *hotpress* dapat dilihat pada hasil dan pembahasan berikut.

3.1. Modulus of Rupture

Modulus of Rupture (MOR) adalah parameter mekanik yang menggambarkan kekuatan maksimum material dalam menahan beban lentur hingga titik patah. Nilai MOR merepresentasikan kemampuan material untuk menahan tegangan tarik terbesar yang terjadi pada sisi bawah spesimen ketika dibebani lentur. Semakin tinggi nilai MOR, semakin besar kekuatan patah material terhadap pembengkokan, yang menunjukkan bahwa material memiliki struktur internal yang lebih kuat dan tahan terhadap kegagalan akibat pembebanan statis. Oleh karena itu, MOR menjadi indikator penting dalam evaluasi sifat mekanik komposit [19]. Berikut adalah hasil dari MOR pada pengujian tarik yang telah dilakukan.

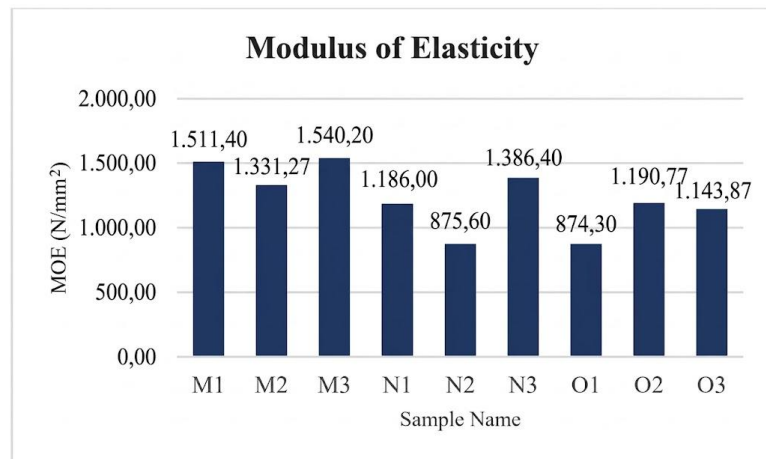


Gambar 3. Nilai *Modulus of Repture*

Pada komposisi filler 10%, nilai MOR menurun signifikan seiring peningkatan suhu hot press. Nilai tertinggi terdapat pada M1, menunjukkan bahwa 170°C merupakan suhu paling optimal untuk tingkat filler rendah. Ketika suhu meningkat ke 180-190°C, kekuatan lentur turun karena kemungkinan degradasi matriks karet alam cair atau ikatan antarfase yang melemah akibat panas berlebih. Hal ini menunjukkan bahwa pada filler rendah, struktur komposit lebih sensitif terhadap suhu tinggi. Pada komposisi filler 20%, tren MOR tidak linear terhadap suhu. Nilai MOR tertinggi muncul pada N3 (190°C), berbeda dengan kelompok M. Ini menunjukkan bahwa pada kadar filler lebih tinggi, suhu 190°C justru meningkatkan dispersi filler dan penyatuan matriks, sehingga memperbaiki ikatan *interfacial*. Sementara N2 menunjukkan nilai terendah, kemungkinan akibat ketidaksempurnaan curing pada 180°C yang belum optimal untuk komposisi filler 20%. Pada komposisi 30% filler, MOR cenderung meningkat dengan naiknya suhu *hot press*. Nilai terbaik terdapat pada O3 (190°C). Hal ini disebabkan meningkatnya fraksi filler yang membutuhkan suhu lebih tinggi untuk mendapatkan ikatan mekanis yang lebih padat, densifikasi struktur, serta membantu matriks untuk mengalir mengisi antar-ruang filler. Dengan demikian, suhu tinggi memberikan efek positif pada filler tinggi.

3.2. Modulus of Elasticity

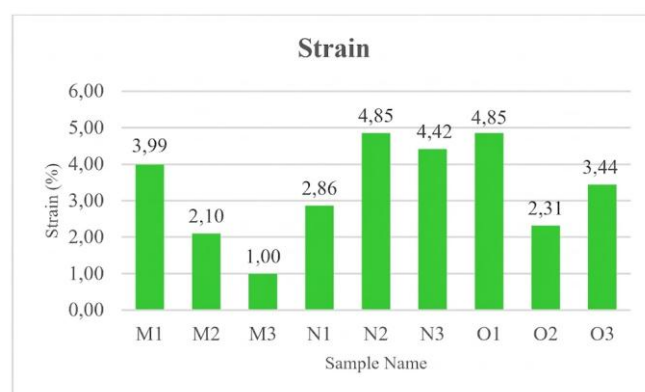
Modulus of Elasticity (MOE) atau modulus elastisitas adalah salah satu parameter mekanik yang menggambarkan kekakuan suatu material ketika diberi beban. Secara sederhana, MOE menunjukkan seberapa besar suatu material akan mengalami deformasi elastis (perubahan bentuk sementara) saat dikenai tegangan tertentu. Dalam konteks biokomposit, MOE digunakan untuk menilai seberapa efektif filler dan matriks berperan dalam memberikan kekakuan struktural, sehingga sangat penting dalam menentukan performa material pada aplikasi struktural atau beban lentur [20, 21]. Berikut adalah hasil dari MOE pada pengujian tarik yang telah dilakukan.

Gambar 4. Nilai *Modulus of Elasticity*

Secara umum, nilai MOE menunjukkan pola bahwa komposit dengan kandungan filler 10% (seri M) memiliki kekakuan tertinggi dibandingkan 20% (seri N) dan 30% (seri O). Pada kelompok 10% filler, M3 (1540,20 N/mm²) menunjukkan kekakuan tertinggi, diikuti oleh M1 (1511,40 N/mm²) dan M2 (1331,27 N/mm²). Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar filler rendah, struktur material lebih homogen dan interaksi antara karet alam cair sebagai matriks dengan filler cangkang telur/karet remah berjalan optimal, sehingga menghasilkan modulus elastisitas yang tinggi. Untuk 20% filler (seri N), nilai MOE menurun signifikan, misalnya N2 hanya mencapai 875,60 N/mm², yang merupakan nilai terendah pada seluruh sampel. Peningkatan filler menjadi 20% cenderung menyebabkan aglomerasi dan pencampuran yang kurang merata, sehingga mengurangi kekakuan material. Namun, sampel N3 (1386,40 N/mm²) masih menunjukkan nilai cukup tinggi, mengindikasikan bahwa suhu 190°C membantu meningkatkan ikatan antar fase meskipun kandungan filler lebih banyak. Pada 30% filler (seri O), nilai MOE tetap lebih rendah dibandingkan seri M, tetapi sedikit lebih baik dibandingkan beberapa sampel seri N. Nilai tertinggi pada seri ini adalah O2 (1190,77 N/mm²), menunjukkan bahwa suhu 180°C memberikan kondisi terbaik untuk penyatuan filler tinggi dengan matriks. Sampel O1 (874,30 N/mm²) menjadi yang terendah pada seri ini, mengindikasikan bahwa suhu 170°C kurang optimal untuk kadar filler tinggi. Material dengan 10% filler menunjukkan modulus elastisitas tertinggi dan paling stabil, dengan variasi yang kecil. Peningkatan filler menjadi 20% dan 30% cenderung menurunkan MOE karena struktur material menjadi kurang homogen, namun kondisi suhu hot press berperan penting dalam mengendalikan performa mekaniknya.

3.3. *Strain*

Strain atau regangan adalah besaran yang menggambarkan seberapa besar suatu material mengalami perubahan panjang ketika diberi beban tarik. *Strain* dihitung sebagai perbandingan antara pertambahan panjang terhadap panjang awal material, sehingga biasanya dinyatakan dalam persentase (%) [22]. Besaran ini menunjukkan tingkat kelenturan material dimana semakin besar nilai *strain*, semakin mampu material meregang sebelum mengalami kerusakan atau patah. Dalam pengujian tarik, *strain* menjadi indikator penting untuk menilai kemampuan deformasi biokomposit sebelum putus. Berikut adalah hasil dari *strain* pada pengujian tarik yang telah dilakukan.

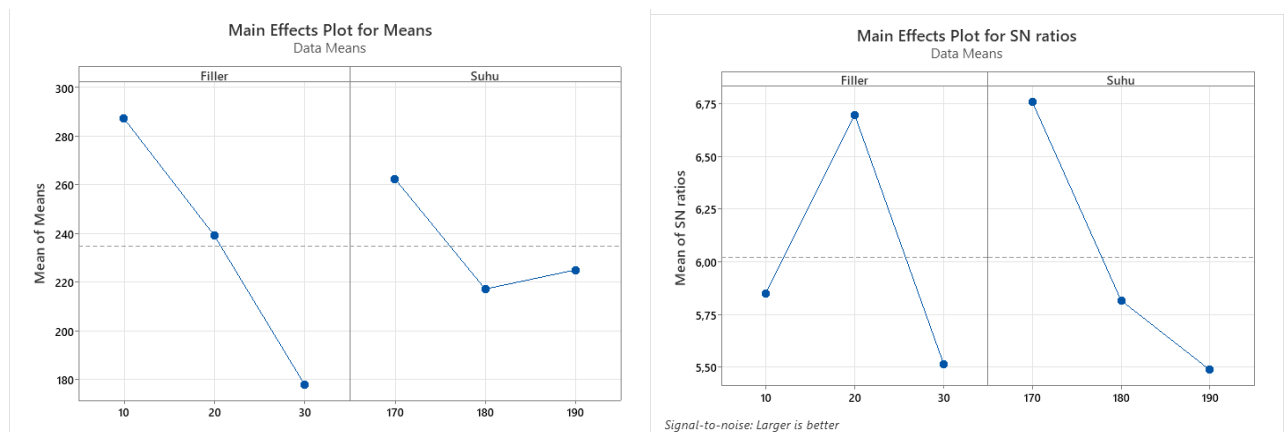
Gambar 5. Nilai *Strain*

Pada spesimen M menunjukkan nilai strain terendah, menandakan bahwa komposit dengan 10% filler memiliki sifat paling kaku. M1 memberikan strain tertinggi karena pada suhu 170°C matriks masih relatif lentur. Namun strain menurun drastis pada M2 dan terutama M3, menunjukkan meningkatnya kekakuan akibat suhu hot press yang lebih tinggi.

Error bar yang kecil pada M2 dan M3 menunjukkan struktur material yang lebih seragam pada suhu tinggi. Pada spesimen N menghasilkan strain tertinggi, menunjukkan bahwa komposisi 20% filler memberikan keseimbangan terbaik antara kekakuan dan kelenturan. N2 dan N3 memiliki nilai strain besar karena suhu 180-190°C menghasilkan pengikatan yang lebih homogen antar material. Namun error bar pada seri ini cukup besar, menandakan adanya variasi internal yang lebih tinggi antar sampel. Hal ini menunjukkan bahwa struktur komposit pada filler 20% lebih fleksibel tetapi kurang seragam. Pada O memperlihatkan pola strain yang fluktuatif akibat dominasi filler yang tinggi. O1 memiliki strain tinggi, namun nilainya turun signifikan pada O2 karena material menjadi lebih rapuh pada suhu 180°C. O3 menunjukkan peningkatan kembali karena suhu 190°C membantu pemadatan struktur meskipun masih tidak stabil.

3.4. Analisis DOE (Design of Experiment) – Taguchi

Pada tahap ini, metode *Design of Experiment* (DOE) dengan pendekatan *Taguchi* digunakan untuk menganalisis pengaruh masing-masing faktor proses terhadap sifat mekanik material biokomposit yang dihasilkan. Metode Taguchi dipilih karena mampu mengidentifikasi kombinasi level faktor paling optimum dengan jumlah percobaan yang efisien, sekaligus mengevaluasi sensitivitas sistem melalui perhitungan *Signal-to-Noise* (S/N) *ratio*. Faktor yang diuji dalam penelitian ini meliputi variasi persentase filler (10%, 20%, 30%) dan suhu hot press (170°C, 180°C, 190°C), yang keduanya terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap mekanisme ikatan serta performa tarik komposit. Dengan menggunakan analisis efek utama (*main effects plot*), metode Taguchi membantu menentukan level faktor optimum yang menghasilkan nilai kekuatan tarik terbaik sekaligus meminimalkan variasi atau noise pada hasil pengujian.



Gambar 6. Data Level Faktor Optimum Uji Tarik

Analisis *Main Effects Plots* menunjukkan adanya konflik antara optimasi kinerja absolut (*Data Means*) dan optimasi stabilitas (*SN Ratios*). Pada faktor suhu, level 170°C secara konsisten optimal karena menghasilkan rata-rata respons tertinggi (sekitar 262) dan SN Ratio tertinggi (6,75), mengindikasikan kinerja yang kuat dan paling *robust* (stabil terhadap variasi). Namun, pada faktor filler, terjadi *trade-off* dimana filler 10% memberikan rata-rata respons absolut tertinggi (288), tetapi Filler 20% menghasilkan SN Ratio tertinggi (6,7), menjadikannya level yang paling stabil. Dalam metodologi Taguchi, karena tujuan utamanya adalah mencapai *robustness* dalam produksi, kombinasi proses yang paling optimal untuk komposit ini adalah Filler 20% dan Suhu 170°C, karena memprioritaskan kualitas yang konsisten dibandingkan kinerja puncak absolut yang tidak stabil.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi persentase filler cangkang telur dan karet remah serta perubahan suhu hot press memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik biokomposit, khususnya pada nilai *Modulus of Rupture* (MOR), *Modulus of Elasticity* (MOE), dan *strain*. Komposisi filler rendah (10%) menghasilkan kekakuan dan kestabilan mekanik tertinggi, sedangkan filler 20% memberikan regangan terbesar dan menunjukkan keseimbangan yang baik antara kekuatan dan fleksibilitas material. Sementara itu, filler 30% menunjukkan performa yang kurang stabil akibat distribusi partikel yang tidak homogen. Dari sisi suhu proses, kondisi 170°C terbukti memberikan respons mekanik paling stabil, sedangkan suhu 190°C lebih menguntungkan untuk komposisi filler yang lebih tinggi. Melalui analisis metode Taguchi, diketahui bahwa filler 20% dan suhu 170°C (N1) merupakan parameter yang optimal dengan nilai MOR, MOE, dan *strain* masing-masing 1473,53 MPa, 1186 MPa, dan 2,86% hal ini karena memberikan performa yang paling *robust* terhadap variasi proses.

Daftar Pustaka

- [1] A. Setiawan, Daryono and T. Prihantoro, "Pengaruh sifat mekanik dari fraksi volume komposit berpenguat serat tandan kosong kelapa sawit," *TURBO*, vol. 10, no. 2, pp. 193-199, 2021.
- [2] W. Frącz, A. Pacana, D. Siwiec, G. Janowski and Ł. Bąk, "Reprocessing possibilities of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)-hemp fiber composites regarding the material and product quality," *Materials*, vol. 17, no. 1, p. 55, 2023.
- [3] T. Sritapunya, A. Rattanapan, S. Tuampoemsab and P. Sapsrithong, "Development of eco-friendly silane-treated rice flour/pbs biocomposites with enr-50 as a compatibilizer: a study on phase morphology, properties and biodegradation," *Polymers*, vol. 17, no. 16, p. 2213, 2025.
- [4] I. Iskandar and H. Wahyudi, "Pengaruh Fraksi Volume dan Ukuran Partikel Cangkang Telur Ayam terhadap Kekuatan Impak Komposit Polyester," *ROTASI*, pp. 21-27, 2023.
- [5] S. K. Tusi, H. Hamdollahpoor, M. M. Savadroodbari and M. S. Fathollahi, "Comparison of polymerization shrinkage of a new bulk-fill flowable composite with other composites: an in vitro study," *Clinical and Experimental Dental Research*, vol. 8, no. 6, pp. 1605-1613, 2022.
- [6] B. Pang, E. Luo, M. Du, L.-M. Kong, L. Zhao and J. Wu, "Fluorographene and carbon nanotubes fillers reinforced nitrile butadiene rubber with enhanced mechanical, wear and oil resistant properties," *Journal of Polymer Science*, vol. 62, no. 14, pp. 3287-3297, 2024.
- [7] M. E. Genovese, L. Puccinelli, G. Mancini, R. Carzino, L. Goldoni, V. Castelvetro and A. Athanassiou, "Rapid solvent-free microcrystalline cellulose melt functionalization with l-lactide for the fabrication of green poly(lactic acid) biocomposites," *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 10, no. 29, pp. 9401-9410, 2022.
- [8] T. Sui, E. Salvati, H. Zhang, K. V. Nyaza, F. Senatov, A. I. Salimon and A. M. Korsunsky, "Probing the complex thermo-mechanical properties of a 3d-printed polylactide-hydroxyapatite composite using in situ synchrotron x-ray scattering," *Journal of Advanced Research*, vol. 16, pp. 113-122, 2019.
- [9] S. Rabhi, N. Benghanem and S. Abdi, "Comparative study of two biocomposites: effect of date stone flour treated with potassium permanganate as a filler on the morphological and elastic properties," *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 7, pp. 1071-1089, 2022.
- [10] K. Wu and X. Wang, "Transition of rheological responses to linear-nonlinear dichotomy: the role of polymers in particle-filled solutions," *Macromolecules*, vol. 57, no. 14, pp. 6593-6605, 2024.
- [11] W. Xin, C. Yan, Y. Hu, J. Tang, X. Zhao and M. Chen, "S-s vitrimer composites via simplified fabrication: recyclable graphite flakes simultaneously enhance mechanical-thermal properties and suppress disulfide exchange," *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 226, no. 13, 2025.
- [12] N. F. Zaaba and H. Ismail, "The influence of different compounding sequence and peanut shell powder loading on properties of polylactic acid/thermoplastic corn starch biocomposites," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 413-422, 2019.
- [13] D. Cica, H. Çalışkan and P. Panjan, "Multi-objective optimization of hard milling using taguchi based grey relational analysis," *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, vol. 27, no. 2, 2020.
- [14] N. H. Padmaraj, L. G. Keni, K. N. Chethan, S. Hegde, I. R. Nithin, A. Kumar and A. Mendon, "Sliding wear characteristics of boron carbide and novel squid quill ash reinforced aluminium 6061 hybrid composites," *Istrazivanja I Projektovanja Za Privredu*, vol. 20, no. 2, pp. 590-596, 2022.
- [15] N. Jain and R. Kumar, "Multi-response optimization of process parameters in friction stir welded aluminum 6061-t6 alloy using taguchi grey relational analysis," *World Journal of Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 707-716, 2021.
- [16] X. Chen, J. Cai, L. Shao and B. Lyu, "Parameters optimization of active flexible tool-assisted shear thickening polishing method for concave surface," *Advanced Engineering Materials*, vol. 26, no. 11, 2024.
- [17] O. Tunçel, "Optimization of charpy impact strength of tough pla samples produced by 3d printing using the taguchi method," *Polymers*, vol. 16, no. 4, p. 459, 2024.
- [18] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D638-14," 2014.
- [19] S. Raghunath, M. Hoque and E. J. Foster, "On the roles of cellulose nanocrystals in fiber cement: implications for rheology, hydration kinetics, and mechanical properties," *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 29, pp. 10727-10736, 2023.
- [20] M. Ceraulo, "Mater-bi-based biocomposites reinforced with lemongrass: a comparison between leaf- and culm-derived particles," *Polymers*, vol. 17, no. 21, p. 2909, 2025.
- [21] H. A. K. Toprakçı, A. Turgut and O. Toprakçı, "A novel approach for fabrication of thermoplastic starch based biocomposites," *Tekstil Ve Mühendis*, vol. 26, no. 115, pp. 216-223, 2019.

- [22] J. N. Wacker, M. Vasiliu, I. Colliard, R. L. Ayscue, S. Y. Han, J. A. Bertke, M. Nyman, D. A. Dixon and K. E. Knope, "Monomeric and trimeric thorium chlorides isolated from acidic aqueous solution," *Inorganic Chemistry*, vol. 58, no. 16, pp. 10871-10882, 2019.