



Peningkatan Kekakuan Atap Galvalum Sinusiodal 1,8x0,81m, Tebal 0,25 mm dengan Lekukan Garis, Kapasitas 300 Lembar/Jam

Miftachul Huda¹, Syamsul Hadi^{2*}, Wisma Soedarmadji³

¹⁻²Program Studi Doktor Terapan Optimasi Desain Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Yudharta Pasuruan, Indonesia

Email: miftachulhuda@yudharta.ac.id¹, syamsul.hadi@polinema.ac.id², wisma@yudharta.ac.id³

*Penulis Korespondensi: syampol2003@yahoo.com

Abstract. *The main issue addressed in this study is the insufficient stiffness of a sinusoidal galvalum roof measuring 1.8 × 0.81 m with a thickness of 0.25 mm. The objective was to improve the roof's stiffness so that it could adequately withstand rainwater weight, wind loads, and human loads. The production process involved parametric finite element simulations to optimize profile stiffness, selection of aluminum-coated steel (Galvalum) consisting of 55% aluminum and 45% zinc, and roll-forming a sinusoidal profile with a wave height and depth of 20 mm. Additional curved lines, 2 mm deep and 10 mm wide, were introduced at the wave peaks and valleys to enhance structural rigidity. The process also included cutting the roof to a length of 1.8 m, bending tests to evaluate stiffness improvement, specification and brand printing, and quality inspection. The resulting roof exhibited a stiffness increase of 38.6% compared with the conventional profile. Production costs were IDR 3,222 per sheet, with a manufacturing time of 12 seconds per sheet. These results indicate that the modified sinusoidal galvalum roof provides greater stiffness and better performance at a standard support spacing of 1.2 m.*

Keywords: *Curvature; Finite Element; Roll-Forming; Sinusoidal Galvalume; Stiffness.*

Abstrak. Kekurang-kakuan atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm sebagai permasalahan yang dihadapi. Tujuan produksi untuk memperoleh kekakuan atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm yang cukup untuk bobot air hujan, beban angin, dan beban orang. Metode produksi meliputi: simulasi elemen hingga parametrik terhadap sifat kekakuan profil; pemilihan bahan baja lapis aluminium (Galvalum) dengan komposisi lapisan 55% Aluminium dan 45% Seng, tebal 0,25 mm; pengerolan bentuk gelombang sinus dengan tinggi bukit 20 mm dan kedalaman lembah 20 mm; jarak antar puncak bukit 76 mm, dengan garis lekukan pada puncak dan lembah gelombang kedalaman 2 mm selebar 10 mm; pemotongan panjang atap galvalum 1,8 m atau sesuai dengan pesanan; uji lentur untuk memperoleh peningkatan nilai/skala kekakuan; pencetakan tulisan spesifikasi dan merek; dan Pemeriksaan mutu dan dimensi atap gelombang sinusiodal. Hasil produksi berupa atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm dengan tambahan garis lekukan pada puncak dan garis lekukan pada lembah gelombang sedalam 2 mm, selebar 10 mm, kenaikan kekakuan mencapai 38,6%, total biaya produksi Rp 3.222,-/lembar, dan durasi proses 12 detik/lembar yang berimplikasi bahwa atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm lebih kaku pada jarak tumpuan standar 1,2 m.

Kata kunci: Elemen Hingga; Galvalum Sinusiodal; Kekakuan; Lekukan Garis; Pengerolan Profil.

1. LATAR BELAKANG

Kekurang-kakuan atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm menjadi kendala dalam pemakaiannya di lapangan untuk bobot air hujan, beban angin, dan beban orang yang umumnya menerpa atap tersebut. Jarak tumpuan standar tertentu, normalnya mampu menahan dengan kekakuan dan kekuatan cukup. Di suatu perusahaan terdapat upaya memproduksi yang lebih tipis untuk merebut pasar, karena penggunaannya ternyata bukan untuk atap, tetapi untuk dinding sekat proyek yang memungkinkan menggunakan atap galvalum sinusiodal yang lebih tipis, juga untuk atap bangunan kayu untuk suatu proyek yang tidak membutuhkan atas ukuran terutama ketebalan standar. Penggunaan atap logam gelombang pada bangunan industri,

komersial, gudang, dan rumah tinggal (Garifullin et al., 2021) telah berkembang luas karena bahan tersebut memiliki kombinasi bobot ringan, ketahanan korosi yang baik, kemudahan fabrikasi, dan kemudahan pemasangan. Dalam praktik konstruksi, lembaran Baja Lapis Aluminium Seng (Galvalum) umumnya dibentuk menjadi profil bergelombang, baik sinusoidal maupun trapezoidal (Wijanarko & Prasetyo, 2025), dua jenis bentuk gelombang tersebut yang banyak ditemui di pasaran bahan bangunan di Indonesia. Perilaku struktural bergantung pada profilnya (Tiwari et al., 2025), sehingga bentuk profil diperlukan yang dapat meningkatkan kekakuan dengan ketebalan yang sama. Profil sinusoidal dan trapezoidal banyak dipilih karena transisi bentuknya halus, estetik, dan relatif mudah diproduksi pada mesin *roll-forming* (Haroen et al., 2020). Karakteristik lembaran tipis membuat sistem atap tersebut tetap rentan terhadap lendutan berlebih, dan getaran saat menerima beban hujan deras atau hembusan angin.

Permasalahan utama pada sistem atap galvalum sinusoidal terletak pada keterbatasan kekakuan. Pada bentang antar-gording yang lebih besar, deformasi dapat meningkat secara signifikan terutama karena bobot angin, hujan dan orang, sehingga berpotensi menimbulkan kebocoran pada sambungan, menurunkan umur pakai (Tiwari et al., 2025) (Xie & Zhang, 2023). Dalam banyak kasus, perbaikan dilakukan dengan menambah tebal lembaran, memperpendek jarak gording, atau mengganti bahan ke mutu yang lebih tinggi. Akan tetapi, pendekatan tersebut umumnya menaikkan biaya bahan maupun struktur pendukung. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang mampu meningkatkan kekakuan tanpa pengaruh berat dan biaya yang besar.

Salah satu strategi yang menjanjikan adalah modifikasi geometri penampang melalui penambahan profil lekukan garis untuk meningkatkan kekuatan penampang dibawah momen lentur dan bisa memperpanjang dari jarak goding rangka atap nya (Franco & Batista, 2017). Pada lembaran tipis, lekukan garis dapat berperan sebagai Penambah kekakuan yang mengontrol distribusi tegangan, mengurangi deformasi lentur, dan meningkatkan stabilitas terhadap tekuk lokal dan keseluruhan (Ma, 2014) yang dapat menambah kestabilan saat aplikasi dan penggunaan. Di sisi manufaktur, pendekatan tersebut masih dapat diselaraskan dengan proses *roll-forming* yang umum digunakan pada industri atap logam.

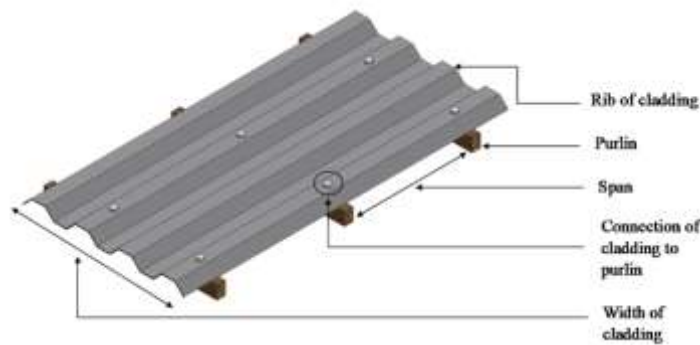
Meskipun beberapa penelitian telah membuktikan bahwa bentuk profile dan Penambah kekakuan (*stiffening*) dapat meningkatkan kinerja pelat tipis, kajian yang secara spesifik membahas peningkatan kekakuan atap galvalum sinusoidal melalui profil lekukan garis masih terbatas. Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya celah penelitian yang penting, khususnya untuk mengembangkan desain atap yang lebih kaku, stabil, dan efisien untuk kondisi iklim tropis.

2. KAJIAN TEORITIS

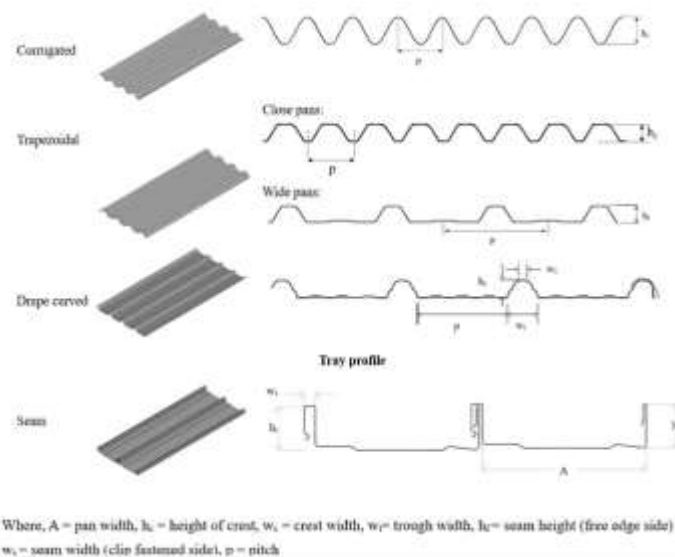
Penelitian terkait atap logam gelombang menunjukkan bahwa geometri gelombang merupakan faktor utama yang menentukan kekakuan spesifik sistem atap (Wijanarko & Prasetyo, 2025). Berbagai studi memperlihatkan bahwa profil bergelombang memiliki peningkatan kemampuan menahan beban lentur, Peningkatan menahan beban dan peningkata kekuatan tekuk dibanding pelat datar (Gao et al., 2026) karena adanya peningkatan momen inersia. Dalam konteks teknik mesin dan struktur, hasil tersebut menjadi dasar bahwa perubahan kecil pada bentuk penampang dapat memberikan pengaruh besar terhadap respons mekanik. Penelitian mengenai atap bergelombang juga menekankan bahwa kekakuan tidak hanya dipengaruhi oleh bentuk profil utama, Jarak tumpuan dan ketebalan bahan tetapi juga dipengaruhi oleh ketidaksempurnaan geometri (Pieper & Mahendran, 2023), karena cacat geometri juga membuat kekakuan menjadi tidak seragam. Secara umum kegagalan atap gelombang sinusoidal karena beban lentur terjadi karena adanya deformasi plastis pada puncak dan lembah profil (Garifullin, 2021), yang mana posisi puncak dan lembah gelombang merupakan area penahan beban yang utama.

Atap Gelombang berperan penting dalam kinerja struktural dari bangunan terutama untuk menghadapi beban angin, hujan dan orang di pasang dengan berbagai jenis bahan material atap harus tahan lama, harga terjangkau dan tahan cuaca, secara umum bisa dikategorikan atap logam dengan beban ringan batas masa 20 kg/m^2 dan beban berat dengan batas maksimal 60 kg/m^2 (Tiwari et al., 2025), sesuai dengan desain awal desain atap logam gelombang. Dari segi bahan atap logam gelombang telah berkembang mulai dari Baja Lapis Seng (Galvanis) yang telah secara luas dipakai untuk beberapa macam perusahaan manufaktur, baja lapis aluminium seng, baja lapis paduan aluminium, plat tembaga dan plat baja tahan karat (Xie & Zhang, 2023) (Elewa et al., 2019), baja lapis Seng dan baja lapis Aluminium Seng adalah bahan atap logam gelombang yang paling banyak dipakai di pasaran Indonesia, terkait dengan harga dan penggunaan yang lebih sesuai/dimintai.

Atap gelombang secara umum dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama yaitu: atap profile memanjang dan dinding vertikal (Tiwari et al., 2025). Atap profil memanjang banyak diaplikasikan pada atap bangunan pabrik dan/atau rumah tinggal, sedangkan dinding vertikal banyak diaplikasikan untuk dinding bangunan pabrik. Pemasangan atap dan dinding vertikal dari plat bergelombang menggunakan skrup yang dipasang ke rangka baja ringan sebagaimana Gambar 1. Sedangkan atap gelombang mempunyai bentuk gelombang dengan beberapa varian bentuk sebagaimana Gambar 2.



Gambar 1. Pemasangan Atap Gelombang.



Gambar 2. Kategori Atap Gelombang.

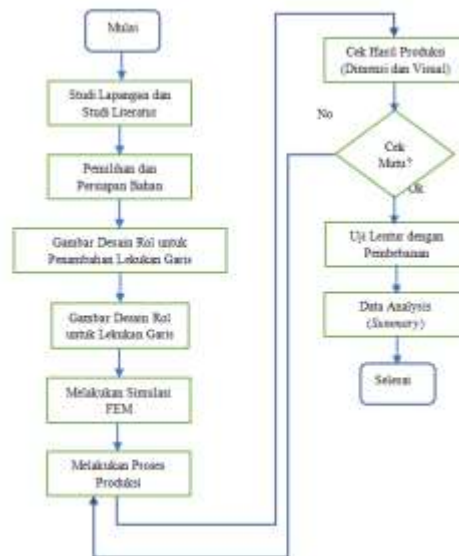
Peningkatan penampang yang diperkaku merupakan satu di antara tantangan dalam desain atap gelombang untuk memenuhi kondisi untuk peningkatan kekakuan, manufaktur, pengiriman, kondisi pemasangan dan mengurangi biaya (Franco & Batista, 2017), dengan produk yang lebih kaku juga bisa menjadikan mudah dalam pemasangan. Dengan penambahan lekukan memanjang (sepanjang produk) bisa meningkatkan tahanan terhadap mode tekuk lokal dan distorsional (Cao et al., 2026), untuk mencapai tujuan peningkatan kekakuan atap gelombang sinusoidal. Proses pembentukan dingin dengan rol adalah satu di antara proses yang paling produktif, hemat energi, hemat bahan dan untuk membuat produk dengan ketebalan bahan yang tipis (Timothy & Gauchey, 2025)(Fei & Zihuai, 2025), yang mana bahan logam dalam hal tersebut adalah Baja Lapis Aluminium Seng dibemgkokkan secara kontinyu dan bertahap dengan sudut bengkokkan yang berbeda pada masing-masing tahapan rol, sedikit demi sedikit melawati beberapa roll sampai bentuk geometri akhir tercapai (Murugesana et al., 2020) sesuai dengan desain geometri baik secara ukuran maupun visual. Proses manufaktur yang kontinyu, pembentukan dengan rol sangat cocok untuk produksi volume tinggi, karena

dapat mencapai kecepatan di atas 10 m/menit (Lee et al ., 2023) dengan produksi yang bekecepatan tinggi tersebut dapat memenuhi kecepatan dan ketepatan pengiriman sesuai dengan permintaan pelanggan, dengan proses manajemen rantai pasok, efisiensi operasional perusahaan manufaktur dapat meningkat untuk memenuhi pesanan (Kusuma & Pulansari, 2025), sehingga dapat bersaing dengan pesaing sejenis. Proses pembentukan dingin *roll forming* juga dapat menghasilkan profil kompleks dan optimasi parameternya dapat mencapai mutu tinggi dan menambah tingkat ke presisiannya (Wang, 2022) sesuai dengan persyaratan produk akhir yang diinginkan pelanggan.

Parameterisasi dan optimasi bentuk geometri secara sukses dapat meningkatkan kekakuan, mengurangi berat dan tetap mempertahankan kemampuan manufaktur (Jie Gong et al., 2023) dengan tebal yang sama, maka dengan geometri bentuk profil yang berubah dapat menahan beban yang lebih besar tanpa mengganggu dari kemampuan produksinya. Pada proses produksi pembentukan *roll forming*, beberapa parameter berpengaruh terhadap mutu hasil jadi diantaranya: kekuatan luluh, peningkatan sudut pembentukan, koefisien penguatan, jarak rol, yang mana kecepatan dan gesekan rol tidak terlalu berpengaruh (Hui & Wang., 2018), selain dari faktor tersebut, tentunya ada faktor lain yang berpengaruh terhadap mutu hasil jadi *roll forming* atap sinusoidal diantaranya adalah ketebalan bahan dan celah antara rol atas dan rol bawah, yang mana untuk proses pembentukan rol secara kontinyu lembaran logam ditekan secara tidak seragam di antara celah rol atas dan rol bawah (Wang et al ., 2018). Dalam proses manufaktur dengan pembentukan rol ditemukan bahwa kombinasi antara pengurangan celah rol saat pengaturan dan perubahan celah rol yang lebih elastis merupakan kombinasi model numerik yang penting untuk keakuratan dan telah dikembangkan dengan pegas pengendali rol (Reuther dkk., 2024), sehingga besarnya celah rol bervariasi akibat dari beban yang berubah karena ketebalan dan ketidakseragaman bahan bisa lebih terkontrol.

3. METODE PENELITIAN

Tipe produksi dilakukan eksperimen dengan melakukan pemilihan bahan, kemudian melakukan proses produksi dan dilanjutkan dengan pengujian lentur pada produk setelah dilakukan penambahan lekukan garis pada sisi puncak dan lembah gelombang, sesuai dengan diagram alir sebagaimana Gambar 3.



Gambar 3. Digram Alir Penelitian.

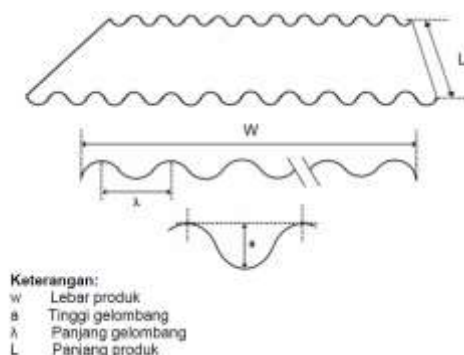
Bahan yang digunakan untuk produksi atap gelombang sinusoidal adalah: Baja Lapis Aluminium Seng (BJLAS) dengan *grade* G550 dengan spesifikasi (SNI 4096:2007) sebagaimana Tabel 1, dan Sifat mekanik (BJLAS G550-SNI 4096:2007) sebagaimana Tabel 2 (Wijanarko & Prasetyo, 2025). Profil gelombang sinusoidal sebagaimana Gambar 4.

Tabel 1. Komposisi Kimia Logam Dasar (BJLAS G550-SNI 4096:2007).

Element	Komposisi Kimia (% Berat Maksimum)
Carbon	0,2
Mangan	1,2
Posphor	0,04
Sulfur	0,03

Tabel 2. Sifat Mekanik (BJLAS G550-SNI 4096:2007, Wijanarko & Prasetyo, 2025).

Uji Tarik	Nilai
Kekukatan Luluh	550 (MPa)
Keluatan Tarik Minimum	550 (MPa)
Regangan Minimum (L0 = 50 mm)	2 %



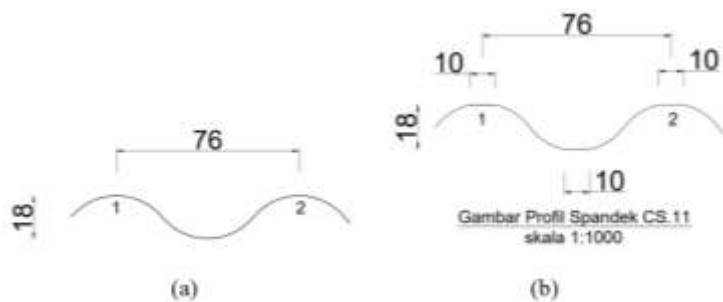
Gambar 4. Profil Gelombang Sinusoidal.

Proses produksi atap gelombang direncanakan dengan kapasitas produksi 300 lembar/jam dengan dimensi panjang 1,8 m dengan lebar 0,81 m menggunakan tebal plat 0,25 mm dari bahan Baja lapis Aluminium Seng (BJLAS) sebagaimana Gambar 5.

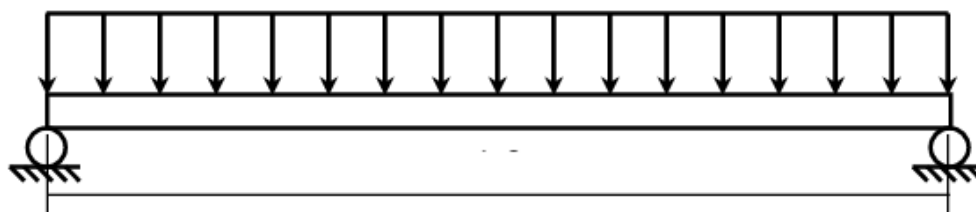


Gambar 5. Produksi Atap Galvalum Gelombang Sinusoidal Proses *Roll Forming*.

Selanjutnya dikembangkan model geometri atap galvalum sinusoidal dengan gelombang 11, variasi dimensi lekukan garis. Parameter desain yang dianalisis meliputi lekukan pada puncak gelombang, lembah gelombang, sepanjang atap gelombang sebagaimana Gambar 6. Model geometri kemudian dianalisis secara konseptual menggunakan prinsip momen inersia dan penempatan jauh dari sumbu netral untuk memperkirakan peningkatan kekakuan relatif sebagaimana Gambar 7 yang menggambar analisis benda bebas untuk menghitung defleksi. Dari tahap tersebut dipilih model-model yang paling prospektif untuk dianalisis lebih lanjut secara numerik.

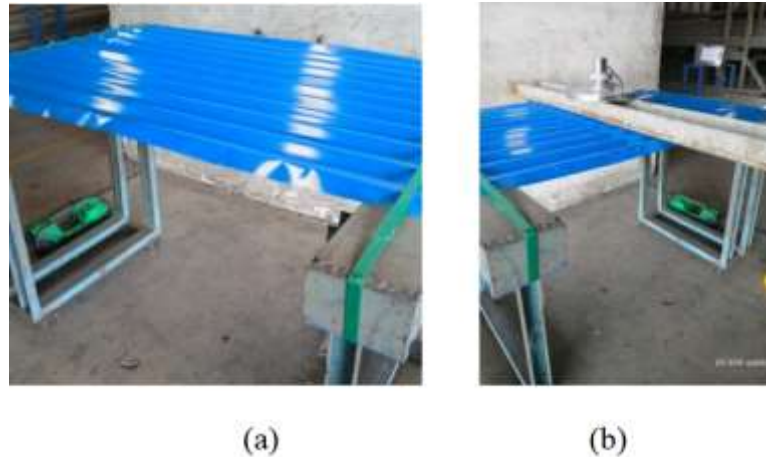


Gambar 6. (a) Gelombang Sinusoidal Standard, (b) Penambahan Lekukan Garis.



Gambar 7. Diagram Benda Bebas Untuk Analisis Defleksi.

Dari ilustrasi Gambar 7, maka secara aktual dilakukan pengujian lendutan sebagaimana Gambar 8.



Gambar 8. Pengujian Lentur Atap Gelombang Sinusoidal: (a) Sebelum Pembebanan
(b) Setelah Pembebanan.

Dengan jarak tumpuan (*gording*) yang sama sejauh 1 m, diukur kelendutan sebelum diberi beban, kemudian diberi beban secara bertahap dan diukur kelendutannya berapa mm untuk memvalidasi perhitungan dengan eksperimen pada produk atap gelombang. Tahap berikutnya adalah simulasi elemen hingga menggunakan model shell tiga dimensi untuk lembaran galvalum dengan ketebalan 0,25 mm dan mutu bahan G550. Beban yang diterapkan mencakup beban merata yang merepresentasikan hujan dan angin, beban titik yang merepresentasikan beban perawatan, dan analisis dinamik untuk memperoleh frekuensi natural. Keluaran utama simulasi meliputi kelendutan maksimum, tegangan Von Mises, faktor keselamatan *buckling*, frekuensi natural, dan *stiffness-to-weight ratio*. Hasil simulasi kemudian dipakai dasar untuk proses uji eksperimen lentur selanjutnya berdasarkan kriteria kekakuan, stabilitas, dan kemudahan manufaktur. Untuk menjaga validitas, hasil numerik dibandingkan dengan literatur yang relevan pada atap gelombang sinusoidal, dilakukan analisis sensitivitas terhadap perubahan dimensi lekukan untuk menilai kekokohan desain terhadap toleransi manufaktur. Metodologi tersebut didesain agar tidak hanya menghasilkan temuan teoretis, tetapi juga memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan prototip dan validasi eksperimental pada tahap penelitian selanjutnya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

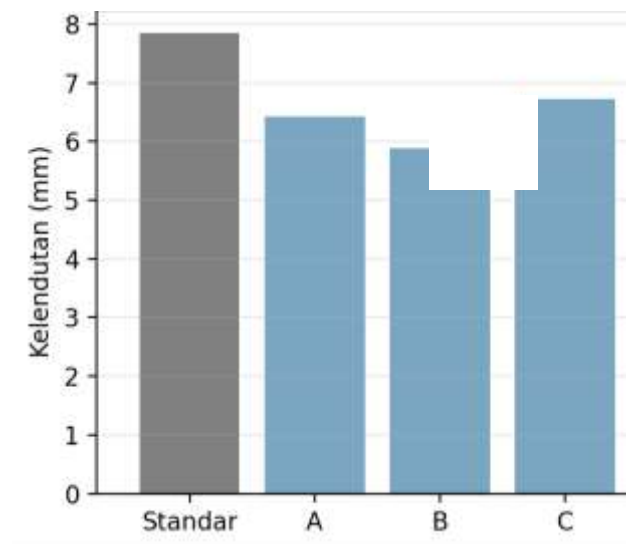
Hasil analisis konseptual menunjukkan bahwa penambahan profil lekukan garis mampu meningkatkan momen inersia efektif penampang atap galvalum sinusoidal. Konfigurasi lekukan garis pada area puncak dan lembah memberikan peningkatan tertinggi, yaitu 24,8% dibandingkan profil standar. Peningkatan tersebut terjadi karena lekukan menambah jarak efektif sebagian area penampang terhadap sumbu netral, sehingga kontribusi terhadap inersia

lentur menjadi lebih besar. Secara mekanik, fenomena tersebut konsisten dengan teori penampang elemen tipis berprofil. Hasil simulasi elemen hingga memperlihatkan penurunan kelendutan maksimum yang signifikan pada model dengan lekukan garis sepanjang atap gelombang 11. Pada model optimum, kelendutan berkurang 38,6% dibandingkan profil standar dan masih berada di bawah batas layanan $L/240$. Penurunan kelendutan tersebut menunjukkan bahwa modifikasi geometri tidak hanya meningkatkan kekakuan lokal, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap respons global sistem atap. Dalam konteks aplikasi, kondisi tersebut penting karena kelendutan yang lebih rendah membantu menjaga integritas sambungan dan pengurang risiko rembesan air. Dari sisi dinamik, frekuensi natural pertama meningkat hingga 29,3% pada konfigurasi optimum. Peningkatan frekuensi natural menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih kaku secara dinamik dan lebih jauh dari kemungkinan resonansi akibat eksitasi hujan maupun angin. Bagi atap tipis, aspek tersebut sangat penting karena getaran yang terlalu dekat dengan frekuensi eksitasi lingkungan dapat memunculkan kebisingan, kenyamanan yang buruk, dan potensi kerusakan jangka panjang. Dengan demikian, peningkatan frekuensi natural menjadi indikator bahwa profil lekukan garis tidak hanya memperbaiki kekakuan statik, tetapi juga kinerja dinamik.

Analisis tegangan menunjukkan bahwa tegangan Von Mises maksimum menurun pada model optimum, disertai peningkatan faktor keamanan buckling hingga 1,87. Penurunan tegangan tersebut mengindikasikan bahwa lekukan garis mampu redistribusi aliran tegangan dan mengurangi konsentrasi tegangan pada bagian tertentu dari penampang. Hal tersebut sangat relevan untuk lembaran tipis karena daerah konsentrasi tegangan sering menjadi titik awal kegagalan lokal. Oleh karena itu, desain lekukan garis tidak hanya harus kuat secara geometrik, tetapi juga selamat terhadap tekuk lokal dan kelelahan. Secara praktis, hasil tersebut memungkinkan pelebaran jarak *gording* dari 1,0 m menjadi 1,2 m tanpa melampaui batas deformasi layanan. Implikasi ekonominya adalah pengurangan jumlah elemen rangka dan efisiensi bahan, yang pada skala proyek besar dapat memberikan penghematan biaya konstruksi yang nyata. Ringkasan hasil evaluasi geometri dan kekakuan sebagaimana Tabel 3 dan perbandingan kelendutan/defleksinya sebagaimana Gambar 9.

Tabel 3. Ringkasan hasil evaluasi geometri dan kekakuan.

Model	Posisi Lekukan	Orientasi	ΔI eff (%)	w_max (mm)
Standar	-	-	0,0	7,85
A	Puncak	Longitudinal	18,2	6,42
B	Lembah	Longitudinal	14,3	6,72
C	Puncak+Lembah	Longitudinal	24,8	4,82



Gambar 9. Perbandingan Kelendutan Maksimum Antar Model.

Analisis kinerja struktural ditunjukkan dalam Tabel 4, bahwa model optimum tidak hanya menurunkan kelendutan, tetapi juga meningkatkan frekuensi natural dan faktor keamanan buckling. Hal tersebut memperkuat argumentasi bahwa lekukan garis berfungsi sebagai stiffener terintegrasi yang mengubah distribusi tegangan pada lembaran tipis.

Tabel 4. Hasil Simulasi Dinamik dan Stabilitas.

Model	f1 (Hz)	σ_{VM} maks (MPa)	Buckling Factor
Standar	8,2	285	1,12
A	9,1	267	1,28
B	8,7	292	1,08
C	10,6	231	1,87

Implikasi desain ditunjukkan dengan adanya peningkatan kekakuan sebagaimana Tabel 5 yang diperoleh memungkinkan penyesuaian desain sistem rangka atap. Dalam konteks aplikasi industri, penambahan lekukan garis pada lembaran dapat mengurangi kebutuhan elemen sekunder, selama sambungan dan toleransi manufaktur dikendalikan dengan baik. Oleh karenanya, konfigurasi optimum perlu dipadukan dengan evaluasi kelayakan produksi dan evaluasi biaya siklus hidup.

Tabel 5. Dampak Konfigurasi Optimum terhadap Parameter Desain.

Parameter	Konvensional	Optimum	Perubahan
Jarak <i>gording</i> (m)	1.20	1.55	+29%
Kelendutan (mm)	7.85	4.82	-38.6%
Frekuensi natural (Hz)	8.2	10.6	+29.3%
Buckling factor	1.12	1.87	+67.0%
Kebutuhan bahan rangka	100%	88%	-12%

Analisis sensitivitas sebagaimana Tabel 6 memperlihatkan bahwa kedalaman lekukan merupakan variabel paling dominan terhadap peningkatan kekakuan. Variasi kecil pada kedalaman memberi pengaruh yang lebih besar dibanding dengan perubahan lebar lekukan.

Temuan tersebut penting karena mengindikasikan bahwa toleransi manufaktur harus difokuskan pada kontrol kedalaman, bukan hanya geometri horizontal.

Tabel 6. Hasil analisis sensitivitas.

Variabel	Nominal	-10%	+10%	Efek terhadap STR
Lebar lekukan (mm)	10	+1.2%	-2.1%	Sedang
Kedalaman lekukan (mm)	1.0	-8.4%	+12.3%	Dominan
Posisi lekukan	Hybrid	-6.7%	+9.1%	Penting
Ketebalan (mm)	0.25	-22.0%	+28.0%	Kritis

Jika dibandingkan dengan studi *corrugated roof* yang hanya mengoptimalkan geometri utama, produksi menunjukkan bahwa penguatan berbasis lekukan garis dapat memberikan peningkatan kinerja tambahan pada lembaran yang sudah bergelombang. Dengan demikian, inovasi bukan terletak pada penggantian bentuk dasar sinusoidal, melainkan juga pada penyempurnaan mikro-geometri yang masih kompatibel dengan proses *roll-forming* industri. Secara praktis, hasil tersebut membuka peluang penerapan pada bangunan gudang, fasilitas industri, dan bangunan komersial dengan bentang menengah. Keuntungan utama adalah peningkatan kekakuan tanpa penambahan massa yang signifikan, sehingga efisiensi struktur dapat dipertahankan, tetapi implementasi akhir tetap harus mempertimbangkan akurasi manufaktur, mutu sambungan, dan kinerja jangka panjang terhadap korosi dan kelelahan. Estimasi biaya dan waktu penambahan kekakuan atap gelombang sinusoidal sebagaimana Tabel 7.

Tabel 7. Estimasi Biaya dan Waktu Penambahan Kekakuan Atap Gelombang Sinusoidal.

No.	Tahapan Proses	Biaya Produksi (Rp)	Durasi Proses (Detik)
1	Simulasi elemen hingga parametrik terhadap sifat kekakuan profil	644,4	2,44
2	Pemilihan bahan baja lapis aluminium (Galvalum) dengan komposisi lapisan 55% Aluminium dan 45% Seng, tebal 0,25 mm	483,3	1,80
3	Pengerolan bentuk gelombang sinus dengan tinggi bukit 20 mm dan kedalaman lembah 20 mm, jarak antar puncak bukit 76 mm, dengan garis lekukan pada puncak dan lembah gelombang kedalaman 2 mm selebar 10 mm	644,4	2,40
4	Pemotongan panjang atap galvalum 1,8 m atau sesuai dengan pesanan	161,1	0,60
5	Uji lentur untuk memperoleh peningkatan nilai/skala kekakuan	644,4	2,40
6	Pencetakan tulisan spesifikasi dan merek	161,2	0,60
7	Pemeriksaan mutu dan dimensi atap gelombang sinusoidal	483,2	1,80
	Jumlah	3.222,0	12,00
	Pajak 10%	322,2	
	Laba 15%	488,3	
	Total/Harga jual/unit	3.932,5	

Dengan geometri penampang baru atap logam bergelombang trapesium dengan menambah lekukan kecil hasilnya mengkonfirmasi bahwa dapat meningkatkan kekakuan tanpa

meningkatkan penggunaan bahan melalui analisis FEM (Wijanarko, dkk., 2025), dan setelah dilakukan analisis FEM, produksi dan uji lentur pada atap gelombang sinusiodal, terjadi peningkatan kekakuan dengan penambahan tekukan garis sepanjang atap gelombang pada puncak dan lembah gelombang. Percobaan dilakukan dengan rol pembentukan yang terdiri dari 6 stasiun, dengan jarak konstan 500 mm, kemudian dilakukan pengecekan secara visual ketidaksejajaran rol, kelurusan poros rol dapat dihasilkan produk standar (tidak ada cacat yang terlihat pada profil yang dihasilkan (Timothy dkk. 2025), sehingga dengan 23 *roll station* (yang lebih banyak) dan jarak antar rol 400-500 mm untuk produksi atap gelombang sinusiodal bisa menghasilkan produk secara dimensional sesuai dengan ukuran dan secara visual tidak ada cacat yang terjadi.

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan karakteristik ketahanan momen lentur lembaran sinusiodal 0,63 mm dan 1,0 mm yang sebagian besar lembaran yang dianalisis mengalami kegagalan akibat tekuk lokal pada puncak dan tengah bentangan (Garifullin dkk., 2021), dengan percobaan yang sama pada atap gelombang sinusiodal tebal 0,25 mm pada jarak bentang 1 m, dengan pembebanan di tengah bentangan lendutan terbesar terukur pada tengah bentangan dan berkurang lendutannya dengan geometri penambah kekakuan berupa garis tekukan puncak dan lembah sepanjang atap gelombang sinusiodal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil produksi berupa atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm dengan tambahan garis lekukan pada puncak dan garis lekukan pada lembah gelombang sedalam 2 mm, selebar 10 mm, kenaikan kekakuan mencapai 38,6%, total biaya produksi Rp 3.222,-/lembar, dan durasi proses 0,083 menit/lembar yang berimplikasi bahwa atap galvalum sinusiodal 1,8 x 0,81 m, tebal 0,25 mm lebih kaku pada jarak tumpuan standar 1,2 m.

Produksi menunjukkan bahwa penambahan profil garis lekukan pada atap galvalum sinusiodal merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan kekakuan, menurunkan kelendutan, meningkatkan frekuensi natural, dan memperbaiki stabilitas buckling. Konfigurasi optimum adalah model lekukan garis pada area puncak dan lembah gelombang dengan dimensi lekukan 10 mm. Model tersebut memberikan peningkatan momen inersia efektif 24,8%, reduksi kelendutan 38,6%, peningkatan frekuensi natural 29,3%, dan faktor keselamatan *buckling* 1,87. Perubahan mikro-geometri penampang lebih efisien dibandingkan dengan penambahan ketebalan bahan untuk meningkatkan kinerja struktural atap galvalum sinusiodal. Pendekatan tersebut tetap kompatibel dengan proses *roll-forming*, sehingga berpotensi diimplementasikan secara industri. Dengan demikian, produksi memberikan kontribusi teoritis

dan praktis dalam pengembangan desain atap logam ringan yang lebih kaku, stabil, dan efisien untuk bangunan di iklim tropis. Saran tindak lanjut atas simpulan adalah perlu dilakukan validasi eksperimental dengan bermacam/variasi ketebalan dalam skala penuh menggunakan prototip aktual dan dapat memasukkan optimasi multi-fisik agar desain tidak hanya unggul dari sisi kekakuan, tetapi juga memenuhi tuntutan kenyamanan dan ketahanan jangka panjang.

DAFTAR REFERENSI

- Cao, Q., Zhu, Y., & Zhang, J. H. (2026). Study on the stability and bearing capacity of high-strength steel C-section columns with complex longitudinal stiffeners. *Structures*, 86, Article 111255. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111255>
- Elewa, R. E., Afolalu, S. A., & Fayomi, O. S. J. (2019). Overview production process and properties of galvanized roofing sheets. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378, Article 022069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022069>
- Fei, H., & Zihuai, N. (2025). Status of research and development trend of roll forming technology. *Journal of Mechanical Engineering*, 61, 279.
- Franco, J. M. S., & Batista, E. M. (2017). Buckling behavior and strength of thin-walled stiffened trapezoidal CFS under flexural bending. *Thin-Walled Structures*, 117, 268–281.
- Gao, H., Zhai, X., & Wang, Y. (2026). Experimental and numerical investigation on dynamic response of sinusoidal corrugated steel plates subjected to out-of-plane impact loading. *Thin-Walled Structures*, 219, Article 114271. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.114271>
- Garifullin, M., Mela, K., Renaux, T., Izabel, D., Holz, R., & Fauth, C. (2021). Load-bearing capacity of cold-formed sinusoidal steel sheets. *Thin-Walled Structures*, 161(12), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107475>
- Gong, J., Ghabraie, K., Weiss, M., Sreenivas, A., & Rolfe, B. (2023). Manufacturing constrained shape optimisation of variable width flat web formed channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11806-2>
- Haroen, H. Z., Herm, H., Bert, H. H. S., & Mohen, M. M. (2020). Explicit and interaction direct strength methods for combined web crippling and bending moment failure of first-generation trapezoidal steel sheeting. *Thin-Walled Structures*, 157, Article 106927. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106927>
- Hui, X., & Wang, X. (2018). Forming quality analysis on the cold roll forming C-channel steel. *Materials*, 11, Article 1911. <https://doi.org/10.3390/ma11101911>
- Kusuma, Y., & Pulansari, F. (2025). Analisis pemesanan konsumen PT Kepuh Kencana Arum dengan metode root cause analysis. *Jurnal Hasil Penelitian dan Pengkajian Ilmiah Eksakta*, 4(1), 14–22. <https://doi.org/10.47233/jppie.v4i1.1783>
- Lee, J., Bong, H. J., Kim, C., Kim, D., & Lee, M. G. (2023). Investigation on a novel in-line incremental die forming process for sheet metals. *Thin-Walled Structures*, 193, Article 111281. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111281>

- Ma, G. Y. (2014). Elastic critical buckling modes and stress of cold-formed thin-walled lipped channel with multiple intermediate stiffeners. *Applied Mechanics and Materials*, 501–504, 470–473. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.470>
- Murugesana, M., Sajjadb, M., & Jung, D. W. (2020). Experimental and numerical investigation of cold roll forming process. *Materials Science and Engineering*, 758, Article 012067. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/758/1/012067>
- Pieper, L., & Mahendran, M. (2023). Numerical investigation and design of crest-fixed corrugated steel claddings under static wind uplift loading. *Thin-Walled Structures*, 182, Article 110270. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110270>
- Reuther, F., Dix, M., Kräusel, V., Psyk, V., & Porstmann, S. (2024). Model validation of hollow embossing rolling for bipolar plate forming. *International Journal of Material Forming*, 17, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01804-w>
- Timothy, S., & Gauchey, M. (2025). A cost-effective cold roll-forming FE model for industrial applications. *Material Forming—ESAFORM* 54, 989–994. <https://doi.org/10.21741/9781644903599-106>
- Tiwari, S., Roy, K., Fang, Z., & Lim, J. B. P. (2025). Metal roof cladding system under wind loading: State-of-the-art. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 257, Article 105939. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105939>
- Wang, J., Liu, H. M., Li, S. F., & Chen, W. J. (2022). Cold roll forming process design for complex stainless-steel section based on COPRA and orthogonal experiment. *Materials*, 15, Article 8023. <https://doi.org/10.3390/ma15228023>
- Wang, M., Yang, S. C., & Lu, G. L. (2018). Deformation characteristics of the sheet metal in the roll gap for the continuous roll forming process. *Materials Science Forum*, 932, 3–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.932.3>
- Wijanarko, W. Z. Y., & Prasetyo, A. B. (2025). Stiffness improvement of corrugated metal roofs through cross-sectional geometry modification. *Jurnal Inovasi Mesin*, 7(2), 1–6. <https://doi.org/10.15294/jim.v7i2.31504>
- Xie, Z., & Zhang, Y. (2023). Analysis of natural vibration characteristics of metal roof panel of large-span standing-seam metal roof system. *Buildings*, 13(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/buildings13112855>