

Pengembangan Mekanisme Pergerakan Louver untuk Prototipe Fasad Dinamis Adaptif

Development of a Louver Movement Mechanism for a Prototype of an Adaptive Dynamic Facade

Lukman Afif¹ & Muhammad Segi Sufia Purnama^{2*}

^{1,2}Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Indraprasta PGRI, Jakarta, 14240, Indonesia

*Corresponding author: ages125@gmail.com

Kata Kunci:

fasad dinamis;
fasad kinetic;
louver;
motor stepper;
mekanisme pergerakan;
prototipe fasad.

ABSTRAK

Fasad dinamis merupakan pendekatan dalam pengembangan bangunan adaptif yang memungkinkan elemen fasad merespons perubahan kondisi lingkungan secara aktif. Keberhasilan penerapannya tidak hanya ditentukan oleh performa lingkungan, tetapi juga oleh keandalan mekanisme pergerakan yang digunakan. Namun, penelitian mengenai mekanisasi fasad dinamis masih relatif terbatas dibandingkan kajian performa termal dan pencahayaan bangunan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi mekanisme pergerakan louver pada prototipe fasad dinamis menggunakan motor stepper sebagai sistem penggerak. Metode yang digunakan adalah *design development research* yang meliputi pengembangan desain louver, pemilihan material, pengembangan mekanisme, pembuatan prototipe, dan evaluasi sistem. Dua pendekatan mekanisasi yang diuji adalah sistem belt-driven dan sistem one motor-one-louver. Evaluasi dilakukan terhadap kemampuan pergerakan, distribusi beban mekanis, kemudahan pemeliharaan, dan kendala operasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem belt-driven menghasilkan beban mekanis yang lebih besar sehingga pergerakan louver kurang optimal, sedangkan sistem *one motor-one-louver* memberikan distribusi beban yang lebih merata dan pergerakan yang lebih stabil. Temuan ini menghasilkan *design lessons learned* yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan fasad kinetik dan adaptif pada bangunan tropis.

Keywords:

dynamic façade;
kinetic façade;
louver;
stepper motor;
movement mechanism;
facade prototype.

ABSTRACT

Dynamic façades are an approach to adaptive building design that enables façade elements to actively respond to changing environmental conditions. The successful implementation of dynamic façades is determined not only by their environmental performance but also by the reliability of the movement mechanisms employed. However, studies on the mechanization of dynamic façades remain relatively limited compared to research focusing on thermal and daylighting performance. This study aims to develop and evaluate louver movement mechanisms in a dynamic façade prototype using stepper motors as the driving system. The research adopted a *design development research* approach, encompassing louver design development, material selection, mechanism development, prototype fabrication, and system evaluation. Two mechanization approaches were tested: a belt-driven system and a one motor-one-louver system. The evaluation considered movement performance, mechanical load distribution, ease of maintenance, and operational constraints. The results indicate that the belt-driven system generated higher mechanical loads, resulting in less optimal louver movement, whereas the one motor-one-louver system provided more even load distribution and more stable movement. These findings provide *design lessons learned* that may serve as references for the development of kinetic and adaptive façades in tropical buildings.

PENDAHULUAN

Bangunan di wilayah tropis menghadapi intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun sehingga berpotensi meningkatkan beban panas pada ruang dalam dan kebutuhan energi untuk pendinginan (Hafizha, 2026). Kondisi tersebut mendorong pengembangan berbagai strategi desain pasif yang mampu mengendalikan masuknya panas dan cahaya matahari ke dalam bangunan. Salah satu strategi yang banyak diterapkan adalah penggunaan *shading device* pada fasad bangunan karena terbukti efektif dalam mengurangi radiasi matahari langsung sekaligus mempertahankan kualitas pencahayaan alami ruang dalam (Sari, 2026). Penentuan bentuk dan sudut perangkat peneduh menjadi faktor penting dalam mengoptimalkan kinerja fasad pada iklim tropis. Pengaturan sudut *shading device* berdasarkan lintasan matahari lokal diketahui mampu meningkatkan efektivitas perlindungan terhadap radiasi matahari sekaligus mendukung kenyamanan termal bangunan.

Seiring perkembangan teknologi bangunan, perangkat peneduh tidak lagi dirancang sebagai elemen statis, tetapi berkembang menjadi *dynamic facade* atau fasad dinamis yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan. Fasad dinamis merupakan bagian dari konsep *adaptive building envelope* yang memungkinkan elemen bangunan mengubah konfigurasi, bentuk, atau tingkat keterbukaannya sebagai respons terhadap perubahan radiasi matahari, temperatur, maupun kebutuhan kenyamanan pengguna. Penggunaan sistem adaptif pada fasad diketahui berpotensi meningkatkan kualitas lingkungan dalam ruang sekaligus mengurangi konsumsi energi bangunan melalui pengendalian cahaya dan panas yang lebih responsif. Selain meningkatkan performa bangunan, fasad dinamis juga memberikan fleksibilitas desain yang memungkinkan bangunan merespons kondisi lingkungan secara lebih efektif dibandingkan fasad konvensional (Teknik UMA, 2025).

Dalam konteks arsitektur kontemporer, pengembangan fasad dinamis tidak hanya berkaitan dengan performa lingkungan bangunan, tetapi juga melibatkan integrasi teknologi digital, sensor, sistem kontrol, dan mekanisme pergerakan. Penerapan sensor dan sistem kontrol pada fasad memungkinkan sistem merespons perubahan kondisi lingkungan secara otomatis sehingga berpotensi meningkatkan kenyamanan termal ruang. Perkembangan teknologi mikrokontroler dan sistem otomasi juga membuka peluang penerapan fasad adaptif yang lebih terjangkau dan mudah dikembangkan pada skala prototipe maupun bangunan sebenarnya.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian mengenai fasad dinamis masih berfokus pada evaluasi performa termal, pencahayaan alami, efisiensi energi, maupun integrasi teknologi kontrol. Kajian yang secara khusus membahas proses pengembangan mekanisme pergerakan elemen fasad, terutama pada tahap pengembangan prototipe, masih relatif terbatas. Informasi mengenai pemilihan sistem penggerak, distribusi beban mekanis, kemudahan pemeliharaan, serta kendala teknis yang muncul selama proses pengembangan belum banyak dilaporkan dalam literatur. Padahal aspek-aspek tersebut merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan implementasi fasad dinamis pada bangunan nyata. Tantangan dalam penerapan fasad kinetik tidak hanya berkaitan dengan kemampuan sistem merespons lingkungan, tetapi juga menyangkut keandalan mekanisme, efisiensi pergerakan, dan kemudahan perawatan selama masa operasional.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) pada aspek pengembangan mekanisme pergerakan fasad dinamis, khususnya yang berkaitan dengan proses perancangan dan pengujian prototipe. Sebagian besar penelitian terdahulu menitikberatkan pada evaluasi performa lingkungan bangunan, sementara kajian mengenai pengembangan mekanisme fasad masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi mekanisme pergerakan

louver pada prototipe fasad dinamis menggunakan motor stepper sebagai sistem penggerak. Pengembangan dilakukan melalui proses perancangan prototipe, pemilihan material, serta pengujian beberapa alternatif mekanisasi pergerakan louver. Kontribusi penelitian ini terletak pada identifikasi kelebihan dan keterbatasan pendekatan mekanisasi yang diterapkan pada prototipe, khususnya perbandingan antara sistem *belt-driven* dan sistem *one motor-one-louver*. Selain itu, penelitian ini menghasilkan pembelajaran desain (*design lessons*) terkait pemilihan sistem penggerak, distribusi beban mekanis, dan pertimbangan material yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan fasad adaptif pada bangunan tropis di masa mendatang.

KAJIAN LITERATUR

Perkembangan teknologi bangunan telah mendorong munculnya konsep fasad adaptif (*adaptive facade*) yang memungkinkan selubung bangunan merespons perubahan kondisi lingkungan secara dinamis. Berbeda dengan fasad konvensional yang bersifat statis, fasad adaptif mampu mengubah konfigurasi, bentuk, maupun karakteristik performanya untuk menyesuaikan perubahan kondisi eksternal dan kebutuhan pengguna. Kemampuan adaptasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan kenyamanan visual, kenyamanan termal, serta efisiensi energi bangunan (Zhang, 2022).

Salah satu bentuk pengembangan fasad adaptif adalah kinetik facade, yaitu fasad yang memanfaatkan elemen bergerak sebagai respons terhadap perubahan lingkungan. Konsep kinetik dalam arsitektur mengacu pada kemampuan suatu elemen bangunan untuk menghasilkan perubahan bentuk atau posisi melalui pergerakan tertentu. Pergerakan tersebut dapat berupa rotasi, translasi, lipatan (*folding*), ekspansi, maupun kombinasi dari beberapa jenis gerakan. Penerapan konsep kinetik pada fasad memungkinkan bangunan merespons perubahan posisi matahari secara lebih fleksibel dibandingkan sistem peneduh statis (Hosseini, 2019).

Dalam perkembangannya, fasad kinetik tidak hanya dipandang sebagai elemen estetis, tetapi juga sebagai komponen bangunan yang memiliki fungsi lingkungan dan performatif. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi fasad kinetik tidak hanya ditentukan oleh bentuk dan strategi kontrol, tetapi juga oleh mekanisme pergerakan yang digunakan untuk menghasilkan respons adaptif tersebut (Barrozi, 2016).

Mekanisme merupakan komponen utama yang memungkinkan fasad kinetik melakukan perubahan bentuk atau posisi. Dalam kajian fasad kinetik, mekanisme didefinisikan sebagai sistem yang menghubungkan elemen fasad dengan sumber gerak sehingga menghasilkan perubahan konfigurasi sesuai kebutuhan. Pengembangan mekanisme yang tepat menjadi faktor penting karena berkaitan langsung dengan stabilitas gerakan, keandalan sistem, kebutuhan energi, dan kemudahan pemeliharaan.

Berbagai penelitian mengelompokkan mekanisme pergerakan fasad ke dalam beberapa kategori utama, yaitu rotasi (*rotation*), translasi (*translation*), lipatan (*folding*), ekspansi (*expansion*), dan deformasi bentuk (*deformation*). Pada sistem louver, mekanisme yang paling umum digunakan adalah rotasi karena memungkinkan perubahan sudut bukaan secara kontinu untuk mengendalikan masuknya cahaya matahari dan radiasi panas. Sistem rotasi juga relatif sederhana dibandingkan mekanisme transformasi lainnya sehingga lebih mudah diterapkan pada tahap pengembangan prototipe (Brzizicki, 2024).

Selain jenis gerakan, konfigurasi mekanisme juga memengaruhi performa sistem. Beberapa sistem menggunakan satu aktuator untuk menggerakkan beberapa elemen sekaligus melalui sabuk (*belt*), roda gigi (*gear*), atau batang penghubung (*linkage*). Sistem lainnya menggunakan aktuator individual pada setiap elemen sehingga menghasilkan kontrol yang lebih fleksibel namun membutuhkan jumlah komponen yang lebih banyak.

Pemilihan konfigurasi mekanisme umumnya mempertimbangkan distribusi beban, kompleksitas kontrol, biaya, serta kemudahan perawatan sistem.

Pergerakan elemen fasad kinetik memerlukan sistem penggerak (*actuator*) yang mampu mengubah energi menjadi gerakan mekanis. Berbagai teknologi aktuator telah digunakan dalam pengembangan fasad adaptif, antara lain sistem hidrolik, pneumatik, motor listrik, serta material pintar (*smart materials*). Masing-masing sistem memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal kapasitas beban, presisi gerakan, kebutuhan energi, dan kompleksitas pemeliharaan (Mohtashami, 2022).

Motor listrik merupakan salah satu sistem penggerak yang paling banyak digunakan pada prototipe fasad kinetik karena relatif mudah diperoleh, mudah dikendalikan, dan memungkinkan integrasi dengan sistem mikrokontroler. Salah satu jenis motor yang umum digunakan adalah motor stepper yang memiliki kemampuan bergerak secara bertahap (*step-by-step movement*) sehingga menghasilkan posisi sudut yang lebih presisi dibandingkan motor DC konvensional. Karakteristik tersebut menjadikan motor stepper sesuai untuk mengendalikan perubahan sudut pada sistem louver yang membutuhkan tingkat akurasi tertentu.

Meskipun demikian, penggunaan motor stepper juga memiliki keterbatasan, terutama terkait kapasitas torsi dan peningkatan temperatur selama operasi yang berlangsung terus-menerus. Oleh karena itu, keberhasilan penerapan motor stepper pada fasad kinetik sangat dipengaruhi oleh desain mekanisme yang digunakan, distribusi beban pada elemen bergerak, serta strategi kontrol yang diterapkan. Pemahaman terhadap hubungan antara mekanisme pergerakan dan karakteristik aktuator menjadi penting untuk menghasilkan sistem fasad kinetik yang andal dan mudah dikembangkan lebih lanjut.

METODE PERANCANGAN

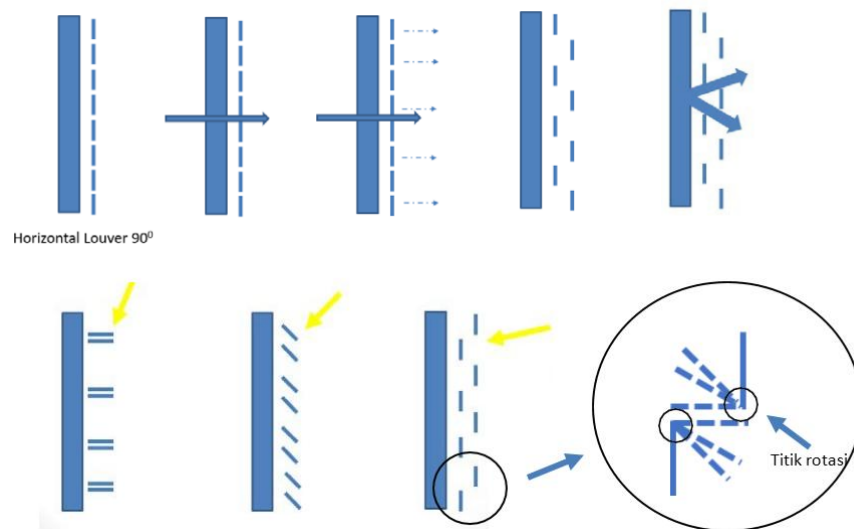
Penelitian ini menggunakan metode *design development research* yang berfokus pada proses pengembangan mekanisme pergerakan louver pada prototipe fasad dinamis. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian bukan untuk mengukur performa lingkungan bangunan, melainkan untuk mengembangkan dan mengevaluasi mekanisme kinetik yang memungkinkan elemen fasad bergerak secara terkontrol. Melalui pendekatan ini, proses perancangan, pembuatan, pengujian, dan evaluasi prototipe dilakukan secara bertahap untuk memperoleh pemahaman mengenai karakteristik mekanis dari sistem yang dikembangkan.

Metode pengembangan desain banyak digunakan dalam penelitian arsitektur dan teknologi bangunan ketika objek penelitian berupa prototipe, sistem, atau produk yang memerlukan proses iteratif antara perancangan dan evaluasi. Dalam penelitian ini, evaluasi dilakukan berdasarkan hasil observasi terhadap kemampuan pergerakan sistem, distribusi beban mekanis, kemudahan pemeliharaan, dan kendala operasional yang muncul selama proses pengembangan prototipe.

Penelitian dilaksanakan melalui lima tahapan utama yang meliputi perancangan louver, pemilihan material, pengembangan mekanisme pergerakan, pembuatan prototipe, dan evaluasi sistem.

1. Pengembangan Desain Louver

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengembangkan konsep louver berdasarkan hasil penelitian sebelumnya mengenai perangkat peneduh pada bangunan tropis. Bentuk louver horizontal dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam mengendalikan masuknya radiasi matahari sekaligus mempertahankan visibilitas pengguna ke arah luar bangunan. Pada tahap ini dilakukan pengembangan bentuk dan dimensi elemen louver yang akan digunakan pada prototipe.



Gambar 1. Proses Pengembangan Louver untuk Fungsi Visibilitas
Sumber: Penulis, 2026

2. Pemilihan Material

Tahap berikutnya adalah menentukan material yang digunakan sebagai elemen fasad dan struktur pendukung. Material aluminium dipilih karena memiliki karakteristik ringan, mudah dibentuk, serta cukup kuat untuk diaplikasikan pada sistem bergerak. Pertimbangan utama dalam pemilihan material adalah kemampuan material untuk mengurangi beban kerja sistem penggerak sehingga mekanisme dapat bekerja secara lebih efisien.

3. Pengembangan Mekanisme Pergerakan

Pada tahap ini dilakukan eksplorasi beberapa alternatif mekanisasi yang memungkinkan louver bergerak secara otomatis. Sistem penggerak menggunakan motor stepper yang dikendalikan melalui mikrokontroler Arduino. Dua pendekatan mekanisasi dikembangkan dan diuji pada prototipe, yaitu:

- Sistem *belt-driven*, yaitu satu motor menggerakkan beberapa elemen louver secara bersamaan melalui mekanisme sabuk.
- Sistem *one motor-one-louver*, yaitu setiap elemen louver digerakkan oleh satu motor stepper secara individual.

Kedua sistem dikembangkan untuk mengidentifikasi karakteristik mekanis masing-masing pendekatan dalam menggerakkan elemen fasad.

4. Pembuatan Prototipe

Prototipe fasad dinamis dibuat dalam bentuk modul berukuran 10 cm × 1m x 1m yang terdiri atas beberapa elemen louver horizontal. Setiap elemen dipasang pada rangka aluminium dan dihubungkan dengan sistem penggerak sesuai konfigurasi yang diuji. Motor stepper tipe 28BYJ-48 digunakan sebagai aktuator utama yang dikendalikan menggunakan Arduino UNO. Proses pembuatan prototipe mencakup pemasangan struktur rangka, elemen louver, sistem transmisi gerak, motor stepper, dan perangkat kontrol yang diperlukan untuk menjalankan skenario pergerakan.

5. Evaluasi Prototipe

Evaluasi dilakukan melalui observasi langsung terhadap kinerja mekanis prototipe selama proses pengoperasian. Aspek yang diamati meliputi:

- kemampuan sistem menghasilkan pergerakan louver,
- stabilitas gerakan yang dihasilkan,
- distribusi beban pada sistem penggerak,
- kemudahan perawatan dan penggantian komponen,
- kendala operasional yang muncul selama pengujian.

Hasil observasi digunakan untuk membandingkan karakteristik kedua sistem mekanisasi yang dikembangkan dan mengidentifikasi kelebihan serta keterbatasan masing-masing pendekatan.

Analisis data dilakukan secara deskriptif-kualitatif berdasarkan hasil observasi selama proses pengembangan dan pengujian prototipe. Data yang diperoleh dianalisis dengan membandingkan karakteristik sistem *belt-driven* dan sistem *one motor-one-louver* berdasarkan kemampuan pergerakan, distribusi beban mekanis, kemudahan pemeliharaan, dan kendala operasional yang ditemukan. Hasil analisis kemudian digunakan untuk merumuskan *design lessons learned* yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan mekanisme fasad dinamis pada penelitian selanjutnya.

HASIL DAN DISKUSI

Pengembangan Desain Louver

Pengembangan prototipe diawali dengan pemilihan bentuk louver yang akan digunakan sebagai elemen fasad dinamis. Berdasarkan hasil pengembangan desain sebelumnya, louver horizontal dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam mengendalikan masuknya radiasi matahari sekaligus mempertahankan visibilitas pengguna ke arah luar bangunan. Selain itu, sistem rotasi pada louver horizontal relatif lebih sederhana dibandingkan mekanisme kinetik lainnya sehingga lebih mudah diterapkan pada tahap pengembangan prototipe.

Prototipe dirancang dalam bentuk modul fasad berukuran sekitar 1,0 m × 1,1 m yang terdiri atas empat belas elemen louver berbahan aluminium. Material aluminium dipilih karena memiliki berat yang relatif ringan, mudah dibentuk, dan tersedia secara luas di pasaran. Penggunaan material ringan menjadi pertimbangan penting untuk mengurangi beban kerja sistem penggerak serta meningkatkan kemungkinan keberhasilan pergerakan elemen fasad.

Pada tahap awal pengembangan, ukuran modul dibatasi tidak lebih dari satu meter untuk menghindari lendutan pada elemen aluminium dan mengurangi beban mekanis yang harus ditanggung oleh motor penggerak. Pertimbangan ini menunjukkan bahwa dimensi modul tidak hanya ditentukan oleh kebutuhan desain, tetapi juga oleh kemampuan mekanisme yang digunakan untuk menggerakkan elemen fasad.

Pengembangan Sistem Penggerak

Salah satu aspek penting dalam fasad kinetik adalah pemilihan sistem penggerak (*actuator system*). Berbagai teknologi seperti sistem hidrolik, pneumatik, motor listrik, dan material adaptif dapat digunakan untuk menghasilkan pergerakan pada elemen fasad. Dalam penelitian ini, motor listrik dipilih sebagai sistem penggerak karena lebih mudah diperoleh, mudah dikontrol menggunakan mikrokontroler, dan memiliki kebutuhan pemeliharaan yang relatif rendah dibandingkan sistem hidrolik maupun pneumatik.

Motor stepper tipe 28BYJ-48 digunakan sebagai aktuator utama karena memiliki kemampuan menghasilkan pergerakan bertahap (*step-by-step movement*) yang sesuai untuk pengaturan sudut louver. Penggunaan motor stepper juga memungkinkan

pengendalian posisi yang lebih presisi dibandingkan motor DC konvensional. Sistem kontrol dikembangkan menggunakan Arduino UNO yang berfungsi mengatur urutan gerakan motor berdasarkan skenario yang telah diprogram.

Pengembangan sistem penggerak dilakukan melalui dua pendekatan mekanisasi, yaitu sistem *belt-driven* dan sistem *one motor-one-louver*. Kedua pendekatan tersebut dipilih untuk mengevaluasi pengaruh distribusi beban terhadap kemampuan pergerakan elemen fasad.

Evaluasi Sistem *Belt-Driven*

Alternatif pertama yang dikembangkan adalah sistem *belt-driven*, yaitu mekanisme yang menggunakan satu motor stepper untuk menggerakkan seluruh elemen louver dalam satu modul melalui sabuk transmisi. Pendekatan ini dipilih karena memiliki jumlah komponen yang lebih sedikit dan secara teoritis mampu menyederhanakan sistem kontrol.

Namun, setelah diterapkan pada prototipe, sistem ini menunjukkan beberapa keterbatasan. Beban mekanis yang harus ditanggung motor meningkat seiring bertambahnya jumlah elemen yang digerakkan secara bersamaan. Distribusi beban yang terpusat pada satu motor menyebabkan gerakan louver menjadi kurang stabil dan tidak mampu menghasilkan rotasi yang diharapkan pada seluruh elemen.

Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan satu aktuator untuk menggerakkan banyak elemen sekaligus memerlukan kapasitas torsi yang lebih besar dibandingkan kemampuan motor yang digunakan pada penelitian ini. Meskipun pendekatan *belt-driven* menawarkan kesederhanaan dari sisi jumlah komponen, sistem tersebut memiliki keterbatasan ketika diterapkan pada modul yang terdiri atas banyak elemen bergerak.

Dari perspektif pengembangan fasad kinetik, hasil ini memperlihatkan bahwa efisiensi mekanisme tidak selalu ditentukan oleh sedikitnya jumlah aktuator, tetapi juga oleh kemampuan sistem mendistribusikan beban gerak secara efektif.

Evaluasi Sistem *One Motor-One-Louver*

Berdasarkan kendala yang ditemukan pada sistem *belt-driven*, dilakukan pengembangan alternatif kedua berupa sistem *one motor-one-louver*. Pada sistem ini setiap elemen louver digerakkan oleh satu motor stepper secara individual sehingga beban mekanis tidak lagi terpusat pada satu aktuator.

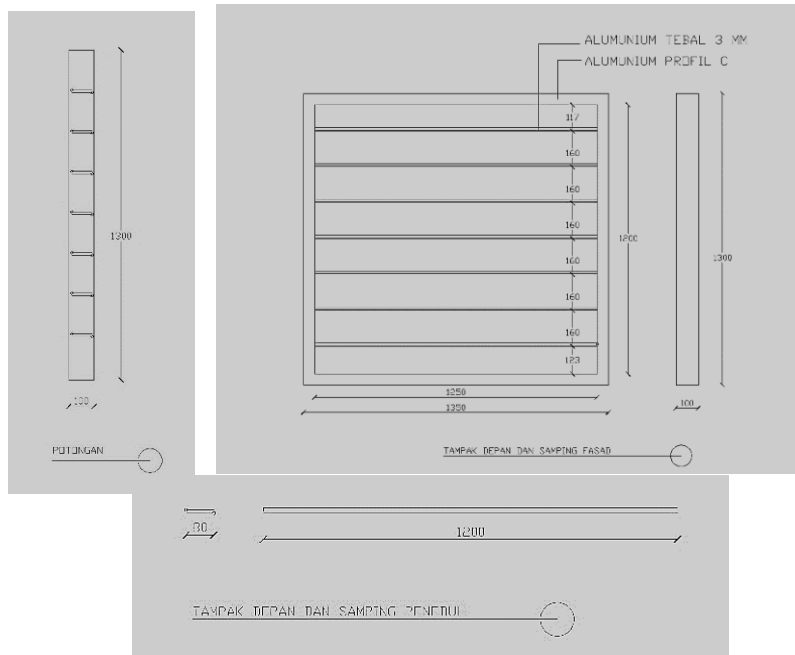
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pendekatan ini menghasilkan pergerakan yang lebih stabil dibandingkan sistem sebelumnya. Setiap motor hanya bertanggung jawab terhadap satu elemen sehingga kebutuhan torsi menjadi lebih kecil dan distribusi beban menjadi lebih merata. Selain itu, konfigurasi ini memungkinkan penggantian komponen dilakukan secara parsial apabila terjadi kerusakan pada salah satu aktuator.

Meskipun membutuhkan jumlah motor yang lebih banyak, sistem ini memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pengendalian gerakan. Setiap louver dapat dikontrol secara independen sehingga membuka peluang pengembangan pola gerak yang lebih kompleks pada penelitian selanjutnya.

Temuan ini sejalan dengan prinsip desain sistem kinetik yang menekankan pentingnya distribusi beban untuk meningkatkan keandalan mekanisme serta mempermudah proses pemeliharaan.

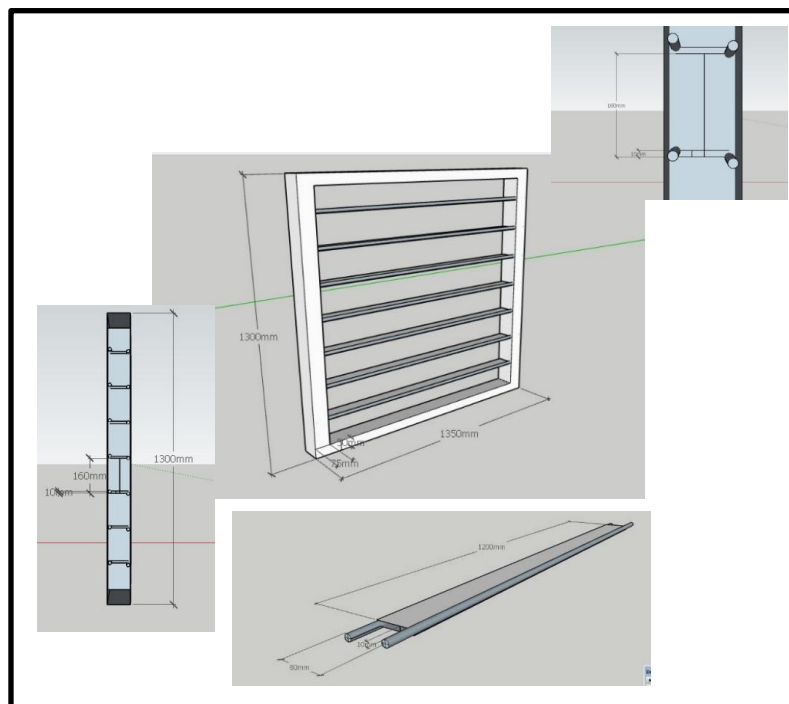
Temuan Pengembangan Prototipe (*Design Lessons Learned*)

Selain menghasilkan prototipe yang dapat bergerak, penelitian ini juga menghasilkan beberapa pembelajaran desain yang penting bagi pengembangan fasad kinetik di masa mendatang.



Gambar 3. Tampak Depan dan Samping dari Prototipe
Sumber: Penulis, 2026

Temuan pertama menunjukkan bahwa distribusi beban mekanis merupakan faktor utama dalam keberhasilan sistem pergerakan. Pendekatan yang memusatkan beban pada satu aktuator cenderung meningkatkan risiko kegagalan gerak ketika jumlah elemen yang dikendalikan semakin banyak. Sebaliknya, distribusi aktuator pada setiap elemen menghasilkan pergerakan yang lebih stabil dan mudah dikendalikan.



Gambar 4. Bentuk Tiga Dimensi dari Prototipe
Sumber: Penulis, 2026

Temuan kedua berkaitan dengan pemilihan material. Penggunaan aluminium berhasil mengurangi beban sistem karena bobotnya yang ringan, namun pada sudut tertentu menghasilkan refleksi cahaya yang berpotensi menimbulkan silau. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemilihan material pada fasad kinetik tidak hanya mempertimbangkan aspek struktural, tetapi juga aspek visual dan kenyamanan pengguna.



Gambar 5. Prototype beserta Sistem Gerak. (atas) tampilan prototype, (bawah kiri) sistem belt-driven, (bawah kanan) sistem one louver one motor
Sumber: Dokumentasi Penulis, 2026

Temuan ketiga berkaitan dengan karakteristik operasional motor stepper. Pengoperasian dalam durasi yang panjang menyebabkan peningkatan temperatur pada motor, sehingga perlu dipertimbangkan strategi kontrol yang lebih efisien untuk menjaga umur pakai sistem. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan fasad kinetik tidak hanya ditentukan oleh desain mekanis, tetapi juga oleh integrasi antara mekanisme dan sistem kontrol.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengembangan fasad kinetik memerlukan keseimbangan antara desain mekanisme, kapasitas aktuator, pemilihan material, dan strategi kontrol. Keempat aspek tersebut saling berkaitan dan berpengaruh terhadap keberhasilan implementasi sistem fasad adaptif pada bangunan tropis



Gambar 6. Motor Stepper
Sumber: Penulis, 2026

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan mekanisme pergerakan louver pada prototipe fasad dinamis melalui pendekatan *design development research* yang berfokus pada pengembangan dan evaluasi sistem mekanisasi. Hasil pengembangan menunjukkan bahwa mekanisme pergerakan merupakan komponen penting yang menentukan keberhasilan implementasi fasad kinetik, karena berperan dalam memastikan elemen fasad dapat bergerak secara stabil, terkontrol, dan mudah dipelihara.

Dua pendekatan mekanisasi yang dikembangkan dalam penelitian ini, yaitu sistem *belt-driven* dan sistem *one motor-one-louver*, menunjukkan karakteristik yang berbeda. Sistem *belt-driven* memiliki keunggulan dalam penyederhanaan jumlah aktuator, namun menghasilkan beban mekanis yang lebih besar pada motor penggerak sehingga pergerakan elemen fasad tidak dapat berlangsung secara optimal. Sebaliknya, sistem *one motor-one-louver* mampu mendistribusikan beban secara lebih merata sehingga menghasilkan pergerakan yang lebih stabil dan memudahkan proses pemeliharaan maupun penggantian komponen.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa keberhasilan pengembangan fasad kinetik tidak hanya ditentukan oleh pemilihan sistem penggerak, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik material dan strategi kontrol yang digunakan. Penggunaan material aluminium memberikan keuntungan berupa bobot yang ringan, namun berpotensi menimbulkan refleksi cahaya pada sudut tertentu. Selain itu, pengoperasian motor stepper secara kontinu menghasilkan peningkatan temperatur yang perlu diperhatikan dalam pengembangan sistem kontrol yang lebih efisien.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menghasilkan pemahaman mengenai kelebihan dan keterbatasan beberapa pendekatan mekanisasi pada prototipe fasad dinamis serta menghasilkan *design lessons learned* yang dapat menjadi referensi bagi pengembangan fasad kinetik di masa mendatang. Temuan penelitian menegaskan bahwa distribusi beban yang baik, pemilihan aktuator yang sesuai, serta integrasi antara

mekanisme dan sistem kontrol merupakan faktor penting dalam pengembangan fasad adaptif pada bangunan tropis.

Keterbatasan dan Penelitian Lanjutan

Penelitian ini terbatas pada pengembangan dan evaluasi mekanisme pergerakan pada skala prototipe sehingga belum membahas performa lingkungan bangunan seperti pencahayaan alami, pengendalian radiasi matahari, maupun efisiensi energi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada integrasi mekanisme kinetik dengan sensor lingkungan dan sistem kontrol adaptif, serta pengujian performa fasad terhadap aspek daylighting, kenyamanan termal, dan konsumsi energi pada bangunan tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada panitia penyelenggara konferensi internasional RE:FORM atas kesempatan yang diberikan untuk mempresentasikan hasil penelitian ini. Artikel ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari makalah yang telah dipresentasikan dalam konferensi tersebut. Penulis juga mengapresiasi para *reviewer* dan peserta konferensi yang telah memberikan masukan konstruktif sehingga kualitas artikel ini dapat ditingkatkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Hafizha, F., Yuniar, A., & Shaleha, N. R. (2026). Eksplorasi efisiensi energi dan termal material lokal berkelanjutan: Dasar penerapan arsitektur bioklimatik di Banjarmasin. *PAWON: Jurnal Arsitektur*, X(1), 74–95. <https://www.ejournal.itn.ac.id/pawon/article/download/16310/9000/>
- Sari, D. P., & Pratama, R. (2026). Analisis sudut shading device pada fasade tropis: Pendekatan berbasis lintasan matahari. *Jurnal Ruang*, X(1), 45–62. <https://jurnalruang.arsitektur.fatek.untad.ac.id/index.php/JURNALRUANG/article/view/329>
- Teknik UMA. (2025, Januari 29). Desain fasad dinamis yang mengikuti perubahan cuaca. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. <https://teknik.uma.ac.id/2025/01/30/desain-fasad-dinamis-yang-mengikuti-perubahan-cuaca/>
- Zhang, X., Zhang, H., Wang, Y., & Shi, X. (2022). Adaptive Façades: Review of Designs, Performance Evaluation, and Control Systems. *Buildings*, 12(12), 2112. <https://doi.org/10.3390/buildings12122112>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., & Lichtenberg, J. (2019). A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort. *Building and environment*, 153, 186–204.
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275–284.
- Brzezicki, M. (2024). A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics: A Motion/Deformation Analysis. *Sustainability*, 16(13), 5697. <https://doi.org/10.3390/su16135697>
- Mohtashami, N., Fuchs, N., Fotopoulou, M., Drosatos, P., Streblow, R., Osterhage, T., & Müller, D. (2022). State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBEs). *Energies*, 15(3), 829. <https://doi.org/10.3390/en15030829>