Jurnal Desain
unindra universitas indraprasta pgri
e-ISSN: 2339-0115, p-ISSN: 2339-0107
Vol.13 No.4 (2026), 1649-1663
https://doi.org/10.30998/jd.v13i4.3242

Motion-based design berbasis simulasi fisika untuk dekonstruksi kisi dalam pembentukan pola digital generatif

Muhammad Irfan Nurrachman[1,2]*, LMF Purwanto[1]
Program Studi Doktor Arsitektur Digital, Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV no. 1, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia[1],
Program Studi Desain Interior, Fakultas Humaniora dan Industri Kreatif, Universitas Kristen Maranatha[2]
Jalan Prof. drg. Surya Sumantri no. 65, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia
***Correspondence author:** irfan.nurachman@art.maranatha.edu*

Received:
16/04/2026
Final Revision:
15/08/2026
Accepted:
25/08/2026

This work is licensed under a CC-BY-NC

Abstrak.
Ketergantungan yang berkelanjutan pada sistem kisi Euclidean yang statis dinilai membatasi eksplorasi kompleksitas visual dan variasi organisasi spasial dalam praktik ornamentasi digital kontemporer. Penelitian ini menyoroti stagnasi metodologis dalam praktik *digital pattern making* dengan mengusulkan sebuah kerangka desain berbasis gerak yang memanfaatkan fitur *rigid body dynamics* sebagai medium generatif. Dengan menggunakan *Blender* 4.1, penelitian ini mengoperasionalkan sebuah alur kerja yang meliputi sintesis aditif, konfigurasi parametrik, dan simulasi fisika, yang melibatkan tiga motif dengan tingkat simetri yang berbeda (kompleks, sederhana, dan asimetris) berperan sebagai "agen desain" otonom. Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan dalam mendekonstruksi kisi statis menjadi pola yang dicirikan oleh *ordered randomness* (ketakteraturan yang terstruktur). Validasi empiris mengungkapkan pergeseran signifikan menuju kompleksitas otonom, dengan Variansi Rotasi (σ) mencapai 80,59° dan kepadatan spasial meningkat sebesar 171,65% hingga mencapai 284,19%. Temuan penelitian mengidentifikasi derajat simetri motif sebagai aturan mikro yang bersifat memengaruhi: simetri yang lebih sederhana memicu diversifikasi yang lebih tinggi, sementara asimetri memfasilitasi keterkuncian (*interlocking*) yang lebih unggul. Penelitian ini memberikan bukti orisinal mengenai simulasi fisika sebagai *enabling media* yang mereposisikan peran desainer dari pengatur langsung menjadi "pencari sistem" (*system-finder*) dalam organisasi visual yang otonom, sekaligus menjembatani prinsip-prinsip generatif dengan praktik keterampilan digital kontemporer.
Kata kunci: *Computational sublime, Generative Art, Motion-based design*, Ornamentasi Digital, *Rigid body dynamics*

Abstract.
The continued reliance on static Euclidean lattice systems is assessed to limit the exploration of visual complexity and spatial organization variation in contemporary digital ornamentation practices. This study addresses methodological stagnation in digital pattern-making practices by proposing a motion-based design framework that employs rigid body dynamics as a generative medium. Utilizing Blender 4.1, the research operationalizes a workflow comprising additive synthesis, parametric configuration, and physics simulation, in which three motifs with varying degrees of symmetry (complex, simple, and asymmetrical) function as autonomous "design agents." The results demonstrate a successful deconstruction of static grids into patterns characterized by ordered randomness. Empirical validation reveals a significant shift toward autonomous complexity, with Rotation Variance (σ) reaching 80.59° and spatial density increasing by 171.65% to 284.19%. The findings identify the motif's degree of symmetry as an influential micro-rule: simpler symmetries trigger higher levels of diversification, while asymmetry facilitates superior interlocking. This study provides empirical evidence of physics simulation as an enabling medium that repositions the designer's role from direct arranger to a "system-finder" within autonomous visual organizations, thereby bridging generative principles with practices of contemporary digital craftsmanship.
Keywords: *Computational sublime, Generative Art, Motion-based design, digital ornamentation, Rigid body dynamics*

Pendahuluan

Pola (pattern) merupakan salah satu elemen fundamental dalam desain, yang berwujud ornamentasi pada permukaan objek arsitektural dan interior melalui pengulangan satuan dasar yang dikenal sebagai motif (Adanova & Tari, 2019). Dalam konteks penelitian ini, motif dipahami sebagai satuan dasar geometris yang berfungsi sebagai agen desain dalam sistem generatif, bukan sebagai representasi simbolik, melainkan sebagai unit morfologis yang berinteraksi dan membentuk pola melalui mekanisme fisik tersimulasi. Meskipun demikian, dalam tradisi ornamentasi dan desain permukaan, motif tetap memiliki peran penting sebagai pembawa identitas visual dan nilai estetik yang membentuk karakter suatu pola. Penelitian ini tidak mengabaikan dimensi tersebut, tetapi menggeser fokus kajian pada bagaimana karakter geometris motif dapat berpartisipasi sebagai aturan mikro yang membentuk organisasi visual secara otonom melalui simulasi fisika.

Selain berfungsi sebagai elemen estetis, pola juga berperan sebagai medium representasi identitas budaya dan nilai simbolik tertentu (Balik & Allmer, 2016; Palaguta, 2020). Dalam praktik tradisional, pembentukan pola umumnya dilakukan melalui pendekatan manual berbasis media kertas yang bersifat aditif, statis, dan sangat bergantung pada intuisi perancang (Gill et al., 2024).

Transformasi digital telah menggeser praktik tersebut menuju desain yang dimediasi oleh komputer (Kuruçay & Karadağ, 2022). Namun, pergeseran ini juga memunculkan tantangan metodologis baru. Dalam banyak kasus, pembuatan pola digital (digital pattern making) masih bertumpu pada sistem asosiatif berbasis kisi Euclidean - yaitu struktur grid berbasis koordinat kartesian yang teratur, kaku dan prediktif. Kisi semacam ini cenderung menghasilkan susunan visual motif yang kaku, prediktif, dan relatif homogen/seragam sebagaimana yang banyak dijumpai pada penyusunan pola tradisional (I. Nurrachman & Djakaria, 2024; M. I. Nurrachman, 2024). Kondisi ini dinilai menghambat penciptaan pola yang lebih organik sekaligus mengindikasikan adanya stagnasi metodologis, medium digital masih digunakan terutama sebagai alat reproduksi, bukan sebagai sistem generatif yang mampu mengelola kompleksitas visual secara otonom (R. Oxman, 2006).

Penelitian ini berangkat dari argumen bahwa ketergantungan berlebihan pada pengorganisasian motif dalam kisi yang statis dapat membatasi kemampuan desainer dalam mengeksplorasi kompleksitas visual sebuah pola dalam skala dan variasi yang lebih luas. Pergeseran dari representasi statis menuju pendekatan berbasis dinamika telah lama dibahas dalam kajian desain digital. Kolarevic (2000) menekankan pentingnya gerak dan deformasi sebagai bagian integral dari proses pembentukan bentuk, ketika transformasi tidak lagi ditentukan oleh komposisi geometris semata, melainkan oleh parameter performatif dan proses dinamis. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan desain perlu bergeser dari representasi statis menuju pemodelan dinamis yang melibatkan waktu, gerak, dan gaya sebagai variabel utama. Selanjutnya, Oxman (2006) mengklasifikasikan pendekatan ini sebagai *motion-based design*, yaitu metode desain yang menempatkan pergerakan dan gaya sebagai mekanisme utama dalam generasi/penciptaan bentuk (Kolarevic, 2000; R. Oxman, 2006).

Melalui integrasi properti fisik seperti gravitasi, massa, dan gesekan, media digital berfungsi sebagai alat generatif yang memungkinkan terjadinya interaksi dinamis antarelemen (Arvin & House, 2002; N. Oxman & Rosenberg, 2007). Pendekatan ini membuka peluang eksplorasi bentuk yang melampaui logika pengulangan konvensional yang bersifat deterministik dan prediktif (Helenowska-Peschke, 2012; Leach, 2009).

Pergeseran metode tersebut juga berkaitan erat dengan konsep *emergence*, yaitu munculnya desain yang tak terduga, sebagai hasil dari interaksi lokal antarelemen dalam suatu sistem (Reid & Rhodes, 2018). Seperti yang dinyatakan Jowers et al. (2010), keterlibatan fenomena *emergence* mampu memperluas batas kreativitas dengan melampaui pendekatan linear tradisional. Prinsip ini sejalan dengan paradigma Generative Art, saat peran desainer mengalami redefinisi: desainer tidak lagi mengatur bentuk secara langsung, melainkan merancang seperangkat aturan dan kondisi awal yang memungkinkan sistem menghasilkan organisasi visual secara otonom (Dehlinger, 2020; Galanter, 2016; Monro, 2009). Dalam kerangka ini, desainer tidak lagi diposisikan sebagai pengatur langsung

elemen visual, melainkan sebagai perancang dan pengkaji sistem (*system-finder*) yang mengatur seperangkat aturan mikro untuk memungkinkan munculnya organisasi visual secara otonom. Proses tersebut dapat menghasilkan kualitas visual yang oleh McCormack & Dorin, (2001) disebut sebagai *computational sublime*, yakni keindahan yang lahir dari proses deterministik, tetapi menampilkan tingkat kompleksitas dan ketakterdugaan yang tinggi.

Meskipun pendekatan generatif berbasis simulasi fisika memiliki potensi besar, pemanfaatannya secara spesifik untuk pembentukan pola permukaan masih relatif terbatas. Kajian-kajian sebelumnya yang menggunakan pendekatan generatif cenderung berfokus pada replikasi motif tradisional melalui sistem kisi dan pengulangan yang relatif statis (I. Nurrachman & Djakaria, 2024; M. I. Nurrachman, 2024). Kondisi ini menyisakan kesenjangan dalam ranah *digital craftsmanship* (Toka, 2024), khususnya terkait eksplorasi organisasi visual otonom yang muncul dari interaksi berbagai tingkat simetri geometris. Di sisi lain, tantangan mengemas motif pada bidang dalam kondisi tertentu—seperti pencapaian keterkuncian (*interlocking*) dengan kepadatan tinggi—sering kali sulit diselesaikan melalui pendekatan manual ataupun parametrik yang bersifat statis. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini memanfaatkan *Bullet Physics Engine*, salah satu fitur pada Blender (Blain, 2023; Cao et al., 2020) yang digunakan untuk memediasi interaksi kinetik yang dinamis antarmotif yang memiliki tiga variasi simetri morfologis, yaitu kompleks, sederhana, dan asimetris.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan menawarkan kerangka metodologis desain berbasis gerak (*motion-based design*) untuk pembentukan pola digital generatif, yang memanfaatkan simulasi fisika sebagai mekanisme eksplorasi organisasi visual otonom. Kontribusi penelitian ini difokuskan pada perumusan alur kerja dan prinsip operasional desain, bukan pada pengembangan atau evaluasi perangkat lunak tertentu.

Dalam konteks desain permukaan kontemporer, tantangan utama tidak lagi terletak pada reproduksi motif secara digital, melainkan pada pengembangan metode yang mampu menghasilkan variasi visual baru tanpa kehilangan keterbacaan karakter ornamentasinya. Oleh karena itu, dekonstruksi kisi statis melalui simulasi fisika dipandang relevan sebagai upaya memperluas kemungkinan organisasi visual dalam praktik ornamentasi digital dan *digital craftsmanship*.

Dengan menggeser paradigma dari penempatan motif secara statis menuju *motion-based design*, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi peran simulasi berbasis fisika dalam memperkaya metode pembuatan pola digital. Melalui analisis kualitatif secara visual dan kuantitatif terhadap variasi orientasi dan kepadatan spasial, studi ini menunjukkan bahwa simulasi berbasis fisika berpotensi berfungsi sebagai enabling media yang menjembatani identitas visual pola yang dihasilkan secara tradisional dengan sistem generatif berkompleksitas tinggi. Pada akhirnya, penelitian ini menawarkan alur kerja yang terstruktur dan skalabel bagi pengembangan desain permukaan kontemporer, saat otonomi komputasional dan keterampilan digital beroperasi secara saling melengkapi.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis laboratorium digital dengan memanfaatkan lingkungan *physics simulation engine* pada Blender 4.1. Dalam penelitian ini, Blender diposisikan bukan sebagai objek kajian, melainkan sebagai lingkungan eksperimental (*enabling environment*) untuk mengimplementasikan kerangka desain berbasis gerak (motion-based design) yang diusulkan. Aplikasi pemodelan dan simulasi ini dipilih sebagai lingkungan simulasi karena menyediakan integrasi antara pemodelan prosedural, sistem fisika (*Bullet Physics Engine*), dan otomasi berbasis *scripting* dalam satu ekosistem terbuka (*open-source*) (Kogut, 2023; van Gumster & Lampel, 2022). Kombinasi ini memungkinkan eksplorasi simulasi *motion-based design*, melakukan pencatatan (*logging*) terhadap proses simulasi, sekaligus dapat direplikasi dalam konteks praktik desain digital dan *digital craftsmanship*. Metode ini dioperasionalkan sebagai eksperimen *design-through-research*, lingkungan perangkat lunak diperlakukan sebagai medium eksperimental untuk mengamati peralihan dari pengaturan parametrik yang ditentukan oleh desainer menuju organisasi visual yang muncul

melalui dinamika sistem (*emergence*). Pendekatan ini sejalan dengan paradigma Generative Art, yang menempatkan proses desain sebagai sistem otonom yang memediasi interaksi antarelemen, daripada sebagai proses penyusunan visual secara langsung oleh desainer.

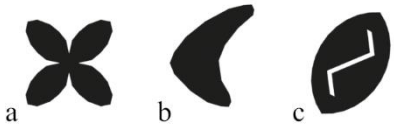
Instrumen utama dalam fase desain berbasis gerak adalah *Bullet Physics Engine*, yang dipilih karena kemampuannya dalam mensimulasikan *rigid body dynamics* secara stabil serta integrasinya yang kuat dengan pemodelan prosedural dan sistem parametrik Blender. Dalam konteks ini, motif yang digunakan diposisikan sebagai "agen desain" yang berinteraksi secara fisik di dalam sistem simulasi. Tiga morfologi motif yang berbeda—Kawung, Biji Kopi, dan Bumerang—digunakan untuk menguji respons sistem terhadap variasi tingkat simetri geometris. Secara keseluruhan, tahapan penelitian dibagi dalam empat fase utama sebagai berikut.

Fase 1: Definisi Morfologi Agen dan Aturan Mikro

Fase pertama berfokus pada pendefinisian elemen dasar sistem yang berfungsi sebagai agen desain otonom dalam simulasi. Tujuannya adalah untuk memahami bagaimana karakter geometris motif membentuk perilaku sistem pada tingkat mikro (motif) dan memengaruhi kemunculan organisasi visual pada tingkat makro (pola).

Kategorisasi Motif

Eksperimen yang dilakukan melibatkan tiga motif dengan karakteristik geometris yang berbeda (Gambar 1). Motif Kawung merepresentasikan simetri rotasional dan bilateral yang kompleks. Motif Biji Kopi dipilih karena bentuk elipsnya relatif sederhana, sehingga menghadirkan simetri yang lebih ringkas. Sementara itu, motif Bumerang berfungsi sebagai representasi bentuk asimetris. Variasi morfologi ini digunakan untuk menguji bagaimana perbedaan tingkat simetri memengaruhi efisiensi keterkuncian spasial (*spatial interlocking*) dan perilaku pengemasan mandiri dalam sistem.



Gambar 1. Morfologi agen desain yang digunakan dalam simulasi: (a) Kawung (simetri kompleks), (b) Bumerang (asimetris), dan (c) Biji Kopi (simetri sederhana), yang merepresentasikan variasi tingkat simetri geometris sebagai aturan mikro dalam sistem otonom.
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Ketiga motif tersebut dipilih untuk merepresentasikan spektrum simetri geometris yang berbeda, yaitu simetri kompleks, simetri sederhana, dan asimetri, sehingga respons sistem terhadap variasi morfologi agen dapat diamati secara terkendali. Penggunaan motif-motif tersebut tidak dimaksudkan sebagai representasi menyeluruh seluruh geometri ornamen, melainkan sebagai sampel yang mewakili variasi tingkat simetri tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengamatan pengaruh perbedaan tingkat simetri terhadap perilaku sistem, bukan pada penyusunan klasifikasi universal seluruh morfologi ornamen.

Pendekatan Sintesis Bentuk

Pendekatan desain aditif (pembuatan secara langsung/non parametrik) digunakan untuk membangun unit motif tunggal yang berfungsi sebagai agen generatif. Setiap motif dikonfigurasi sebagai objek tertutup dengan kondisi tertentu yang dapat diproses oleh mesin simulasi fisika Blender (Blender *physics engine*) secara konsisten dalam simulasi.

Fase 2: Konfigurasi Parameter Awal

Pada fase ini, sistem menetapkan konfigurasi awal yang berfungsi sebagai kondisi awal (*initial state*) sebelum dijalankannya simulasi berbasis gerak. Alih-alih disusun secara manual, konfigurasi ini dibangun melalui pendekatan parametrik, pendekatan desain asosiatif (R. Oxman, 2006) tersebut

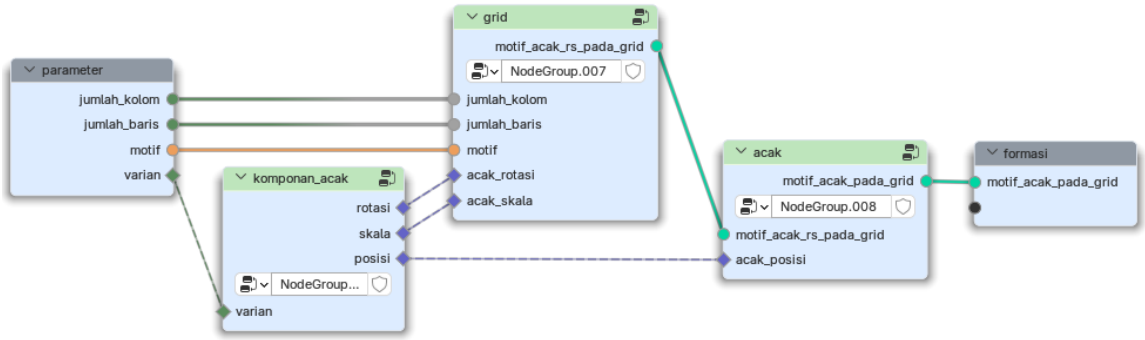
berperan sebagai "genotipe" pola yang nantinya akan diekspresikan secara "fenotip" melalui interaksi fisik. Implementasi desain asosiatif dalam pembentukan konfigurasi awal dilakukan menggunakan sistem *visual scripting* yang dimiliki *Blender*, yaitu *Geometry Nodes* (Gambar 2a), yang memungkinkan terbentuknya konfigurasi awal secara terotomasi melalui pengendalian parameter seperti jumlah objek, distribusi posisi awal, dan variasi skala motif.

Pengendalian Parameter

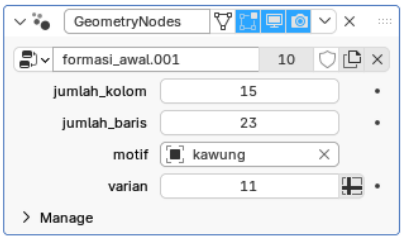
Antarmuka kendali (*control interface*) dalam algoritma pembentukan konfigurasi awal digunakan untuk mengatur berbagai parameter utama, seperti motif yang digunakan, jumlah baris dan kolom yang akan menentukan banyaknya motif yang digunakan serta variasi skala dan posisinya (Gambar 2b).

Variabel Independen

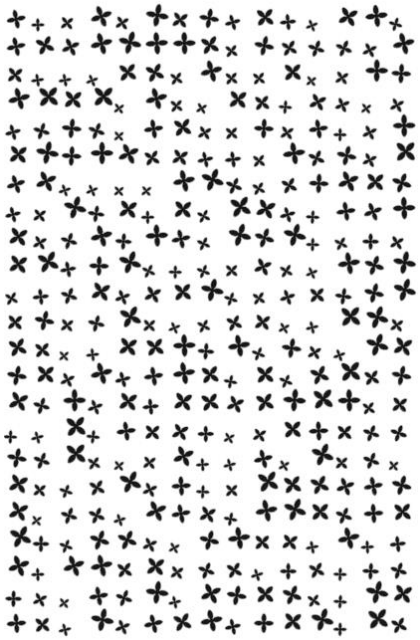
Nilai parameter *variant* yang berfungsi "mengacak" posisi dan rotasi motif digunakan untuk dapat menghasilkan sejumlah variasi formasi awal (Gambar 2c). Fitur ini berfungsi sebagai konfigurasi pembanding yang memungkinkan observasi konsistensi perilaku sistem ketika simulasi dijalankan dari kondisi awal yang berbeda.



a.



b.



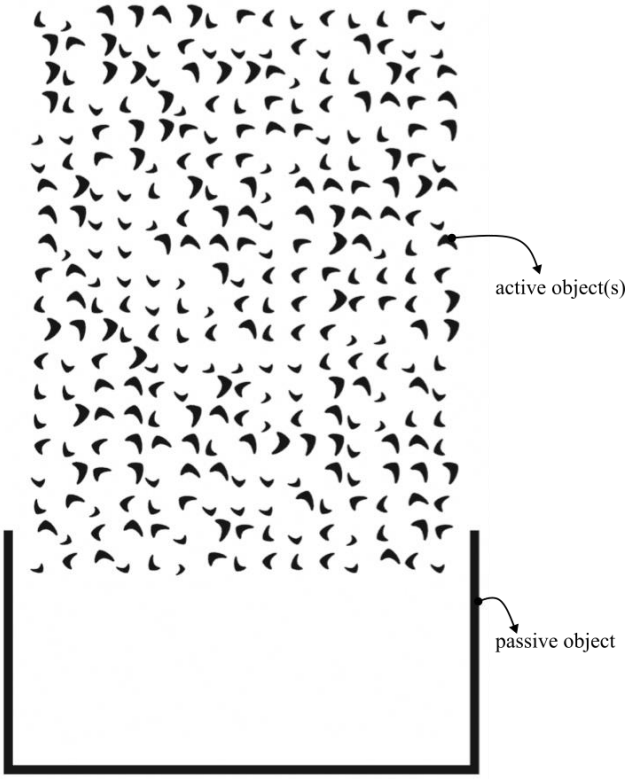
c.

Gambar 2. Konfigurasi parametrik formasi awal pola menggunakan *Geometry Nodes*: (a) logika pemrograman visual untuk distribusi prosedural agen motif, (b) antarmuka kendali untuk pengaturan parameter seperti jumlah objek, distribusi spasial, dan skala, serta (c) contoh variasi formasi awal teracak yang dihasilkan melalui perbedaan nilai *variant* sebelum simulasi berbasis fisika dijalankan.
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Fase 3: Eksekusi Sistem Otonom (*Motion-based design*)

Fase ini merupakan inti dari proses *emergence*. Pada tahap ini, desainer tidak lagi melakukan manipulasi visual langsung terhadap motif, melainkan mengatur parameter lingkungan fisik yang membentuk kondisi interaksi sistem. Motif-motif berinteraksi melalui mekanisme tumbukan, gesekan, dan gaya gravitasi dalam suatu proses yang dapat dipahami sebagai "negosiasi kinetik", yaitu penyelesaian konflik spasial melalui hukum fisika, bukan melalui penyelarasan manual.

Gambar 3 menggambarkan konfigurasi lingkungan sistem mengacu pada seperangkat parameter yang berfungsi sebagai "aturan ketat" (*strict rules*), sebagaimana dikemukakan oleh (Galanter, 2016), yang membatasi ruang kemungkinan sistem tanpa intervensi manual selama simulasi berlangsung.



Gambar 3. Pengaturan lingkungan sistem otonom yang digunakan dalam simulasi: integrasi motif (*active object*) dan wadah (*passive object*) dalam lingkungan simulasi berbasis fisika.
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Objek Aktif (*Active Objects*)

Motif didefinisikan sebagai objek aktif (*active object*) yang dipengaruhi oleh gravitasi dan dinamika fisik dari *passive object*.

Objek Pasif (*Passive Objects*)

Elemen pasif berfungsi sebagai wadah yang menampung hasil simulasi dan menstabilkan posisi akhir motif.

Parameter simulasi lainnya yang digunakan—termasuk gravitasi, massa objek, bentuk permukaan untuk tumbukan (*collision shape*), gesekan permukaan (*friction*), dan pembatasan translasi/rotasi (*translation/rotation lock*)—dirangkum pada Tabel 1 dan dirancang untuk mempertahankan keluaran pola dalam bidang dua dimensi. Meskipun simulasi dijalankan dalam lingkungan fisika tiga dimensi virtual, penerapan kendala translasi dan rotasi memastikan bahwa interaksi antarmotif menghasilkan keluaran berupa organisasi spasial dua dimensi. Dengan demikian,

simulasi tiga dimensi berfungsi sebagai medium proses, sementara keluaran akhir diperlakukan sebagai pola permukaan (*surface pattern*).

Tabel 1. Parameter simulasi rigid body pada Blender 4.1 yang digunakan sebagai aturan mikro dalam sistem otonom. Parameter-parameter ini berfungsi sebagai batasan fisik yang mengatur interaksi antarmotif selama simulasi, tanpa intervensi visual langsung dari desainer.

Kategori *Property*	**Parameter *Blender***	**Deskripsi Fungsional dalam Eksperimen**
Rigid Body World	*Gravity*	Gaya gravitasi utama yang menggerakkan motif ke arah "bawah" (sumbu Z negatif).
Active Object	*Mass*	Menentukan berat setiap motif, memengaruhi gaya tumbukan.
Passive Object	*Rigid Body Type: Passive*	Objek penahanan (wadah) yang menghentikan gerakan motif.
	Collision Shape	Mendefinisikan batas fisik sesuai bentuk *active dan passive object* untuk benturan yang akurat.
	Surface friction	Menentukan tingkat gesekan antara motif (*active object*) saat bersentuhan dengan alas dan dinding wadah/*passive object.*
Constraints	*Translation/Rotation Lock*	Membatasi gerakan (pergeseran hanya dalam sumbu X dan Z dan rotasi hanya pada sumbu Y) untuk mempertahankan output pola 2-D.

Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Untuk menjamin keterulangan eksperimen, simulasi dijalankan dengan parameter fisik yang ditetapkan secara tetap, yaitu gravitasi sebesar −9,8 m/s² pada sumbu vertikal, massa seragam untuk seluruh motif sebesar 1 kg, nilai gesekan (*surface friction*) sebesar 0,5, *sensivity margin* = 0,04, *collision shape* diatur sebagai *mesh*, dan tanpa restitusi (*bounciness* = 0). Simulasi dijalankan dalam lingkungan *rigid body world* dengan pengaturan *substeps* = 10 dan *solver iteration* = 10. Seluruh proses dieksekusi hingga *frame* ke-500 yang digunakan sebagai kondisi akhir sistem setelah fase transien interaksi selesai berlangsung.

Fase 4: Kerangka Observasi dan Pengukuran Kuantitatif

Observasi dan pengukuran dilakukan setelah sistem mencapai kondisi stabil pada *frame* ke-500. Data kuantitatif terkait posisi dan rotasi diekstraksi pada *frame* ke-1 dan *frame* ke-500. *Frame* ke-500 dipilih karena pada tahap tersebut sistem telah mencapai kondisi fisik yang relatif stabil, pergerakan motif dan konfigurasi spasial tidak lagi mengalami perubahan signifikan. Dengan demikian, *frame* ini merepresentasikan keadaan akhir sistem setelah proses interaksi dan negosiasi kinetik selesai berlangsung.

Untuk melengkapi deskripsi visual, penelitian ini menggunakan pendekatan analisis berlapis yang mencakup observasi kualitatif dan pengukuran kuantitatif.

Observasi Kualitatif

Analisis komparatif dilakukan untuk mengidentifikasi karakter visual utama dari pola yang terbentuk, baik dengan membandingkan kondisi awal dan akhir formasi motif, maupun melalui perbandingan antar variasi morfologi motif. Observasi ini bertujuan menelaah hubungan antara aturan mikro pada tingkat parametrik dan organisasi visual makro yang dihasilkan oleh sistem otonom.

Jumlah motif dalam simulasi ditetapkan sebanyak N = 345, yang berasal dari konfigurasi kisi awal (15 × 23) pada tahap penyusunan parametrik dengan mempertimbangkan daya tampung wadah. Wadah disusun sebagai bidang dua dimensi dengan batas pasif (*passive container*) yang membatasi pergerakan motif secara lateral.

Seluruh motif diperlakukan sebagai *rigid body* yang berinteraksi secara fisik di dalam sistem simulasi. Kendala translasi dan rotasi diterapkan untuk memastikan bahwa interaksi antarmotif menghasilkan organisasi spasial dua dimensi yang kohesif, sehingga proses transformasi visual dapat diamati sebagai fenomena pembentukan pola permukaan.

Untuk keperluan observasi temporal, data posisi dan orientasi setiap motif diekstraksi secara otomatis menggunakan *custom Python script* yang terintegrasi dengan *Spreadsheet Editor* pada Blender. Proses ini merekam koordinat posisi dan nilai rotasi Euler masing-masing motif pada *frame* awal (*frame* 1), *frame* akhir (*frame* 500), serta sejumlah *frame* di antaranya. Seluruh data diekstraksi tanpa intervensi manual sebagai dasar analisis perilaku sistem.

Pengukuran Kuantitatif

Pengukuran kuantitatif dilakukan untuk mengidentifikasi perilaku sistem yang memungkinkan terjadinya organisasi visual bermakna (*pattern formation*) sebagai hasil interaksi fisik antarmotif. Dua metrik utama digunakan sebagai indikator perilaku sistem, yaitu simpangan baku rotasi dan kepadatan spasial. Jumlah motif N = 345 digunakan secara konsisten pada seluruh eksperimen guna memastikan bahwa perubahan nilai metrik merefleksikan dinamika sistem, bukan variasi jumlah agen.

1. Simpangan baku Rotasi (σ).
   Metrik ini digunakan untuk mengukur tingkat diversifikasi dari orientasi motif. Metrik ini berperan sebagai indikator dekonstruksi dari susunan awal berbasis kisi menjadi pola hasil simulasi. Data rotasi Euler setiap motif diekspor pada *frame* 1 dan *frame* 500, kemudian dihitung simpangan baku (σ). Nilai σ = 0° merepresentasikan keseragaman orientasi absolut, sedangkan peningkatan nilai σ menunjukkan munculnya variasi terstruktur yang dihasilkan oleh sistem.
2. Kepadatan Spasial (D)
   Kepadatan spasial digunakan untuk mengevaluasi tingkat optimasi pengemasan (*packing*) oleh sistem. Metrik ini didefinisikan sebagai rasio jumlah motif (dalam penelitian ini N = 345) terhadap luas area yang ditempati (A), saat A dihitung berdasarkan batas maksimum dan minimum koordinat X dan Z dari formasi akhir:

$$A = (X_max - X_min) \times (Z_max - Z_min)$$

$$D = N / A$$

   Perhitungan luas tidak didasarkan pada luas total wadah, melainkan pada batas minimum dan maksimum posisi motif pada konfigurasi akhir sehingga area kosong di luar formasi tidak memengaruhi nilai kepadatan.

   Peningkatan nilai kepadatan spasial pada kondisi akhir simulasi dibaca sebagai indikator terjadinya pengemasan mandiri (*self-organizing packing*) yang muncul secara emergen sebagai hasil langsung dari interaksi fisik antarmotif, dibandingkan dengan penyusunan manual berbasis kisi yang bersifat statis dan berkepadatan lebih rendah.

Hasil dan Pembahasan

Transformasi Formasi melalui Dinamika Sistem Otonom

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penerapan desain berbasis gerak (*motion-based design*) pada *Blender* 4.1 mampu mentransformasikan formasi awal berbasis kisi menjadi pola dua dimensi yang dinamis. Transformasi ini terjadi melalui proses dekonstruksi yang sistematis terhadap susunan Euclidean awal, yang juga dimediasi oleh interaksi fisik antarmotif di dalam sistem simulasi. Pada seluruh morfologi motif yang diuji, hasil ini menunjukkan bahwa organisasi visual akhir tidak lagi bergantung pada pengarahan eksplisit desainer, melainkan muncul sebagai hasil langsung dari dinamika sistem otonom.

Dekonstruksi Kisi melalui Interaksi Fisik

Penerapan gaya gravitasi dalam *Blender* terlihat memicu rangkaian interaksi kinetik berupa tumbukan yang menggeser dan merotasi motif-motif. Interaksi ini secara bertahap meruntuhkan struktur kisi prediktif yang dibentuk pada fase desain asosiatif, sehingga keteraturan geometris awal digantikan oleh konfigurasi yang terbentuk melalui proses *emergence*. Dengan demikian, simetri manual tidak dihilangkan sepenuhnya, tetapi didekonstruksi dan dinegosiasikan ulang melalui hukum fisika.

Integritas Visual dalam Dua Dimensi

Penerapan batasan pergeseran dan rotasi memastikan bahwa meskipun interaksi berlangsung di dalam mesin fisika tiga dimensi, keluaran akhir tetap berupa pola dua dimensi yang kohesif. Pendekatan ini mencegah terjadinya tumpang tindih destruktif antarmotif serta mempertahankan karakteristik fungsional yang diperlukan dalam konteks ornamen permukaan.

Analisis Kuantitatif Transformasi Emergen

Hasil simulasi pada penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai evaluasi performa perangkat lunak, melainkan sebagai demonstrasi operasional dari kerangka metodologis desain berbasis gerak yang diusulkan, khususnya dalam mengelola transisi dari susunan statis menuju organisasi visual emergen.

Observasi visual terhadap transformasi formasi awal selanjutnya dianalisis melalui pengukuran kuantitatif pada tiga morfologi motif yang berbeda. Perlu ditegaskan bahwa metrik kuantitatif yang digunakan dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menggambarkan morfologi visual pola secara langsung, melainkan untuk mengidentifikasi perilaku sistem yang memungkinkan terjadinya organisasi spasial bermakna (pattern formation) sebagai hasil dari interaksi antarelemen dalam sistem otonom. Data kuantitatif (Tabel 2) menunjukkan bahwa sistem otonom merespons variasi simetri geometris secara berbeda, menghasilkan tingkat diversifikasi dan kepadatan spasial yang beragam.

Tabel 2. Perbandingan Kuantitatif Variasi Geometris (N = 345)

Morfologi Motif	Kepadatan awal (Di)	Kepadatan Akhir (Df)	Peningkatan Kepadatan (%)	Simpangan baku rotasi (*σ*)
Kawung (sirkular)	0,8618	2,5757	198,86%	72,85°
Bumerang (asimetris)	0,9083	3,4896	**284,19%**	69,95°
Biji kopi (simetri)	1,0305	2,7993	171,65%	**80,59°**

Sumber: Dokumentasi Peneliti (2025)

Nilai simpangan baku rotasi (σ) menunjukkan peningkatan dari kondisi awal (σ = 0°) pada seluruh kelompok motif, yang menandakan terjadinya dekonstruksi orientasi formal dari susunan awal berbasis kisi. Motif Biji Kopi mencapai nilai simpangan baku tertinggi (σ = 80,59°), yang dapat dikaitkan dengan simetri elipsnya yang sederhana. Bentuk yang relatif ramping dan minim tonjolan memungkinkan motif mempertahankan momentum sudut lebih lama selama tumbukan, sehingga menghasilkan distribusi orientasi yang lebih beragam sebelum mencapai kondisi stabil.

Sebaliknya, motif Bumerang menunjukkan nilai simpangan baku rotasi yang lebih rendah (σ = 69,95°), tetapi menghasilkan peningkatan kepadatan spasial tertinggi sebesar 284,19%. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa geometri asimetris memfasilitasi mekanisme keterkuncian spasial (*spatial interlocking*) yang lebih efisien, ketika motif dengan cepat menemukan konfigurasi stabil berkepadatan tinggi selama proses interaksi kinetik.

Temuan ini menunjukkan bahwa morfologi motif tidak hanya memengaruhi karakter visual akhir, tetapi juga berperan sebagai aturan mikro (micro-rules) yang mengarahkan jalannya proses

emergence. Motif dengan simetri yang lebih sederhana, seperti Biji Kopi, cenderung mempertahankan mobilitas rotasional lebih lama selama interaksi sehingga menghasilkan diversifikasi orientasi yang lebih tinggi. Sebaliknya, geometri asimetris pada motif Bumerang menghasilkan lebih banyak peluang keterkuncian lokal (local *interlocking*), yang mempercepat pembentukan konfigurasi stabil berkepadatan tinggi. Dengan demikian, pola emergen yang dihasilkan tidak semata-mata merupakan konsekuensi dari parameter fisik lingkungan, tetapi juga dari cara karakter morfologis setiap motif memediasi proses tumbukan, rotasi, dan negosiasi spasial di dalam sistem.

Peningkatan kepadatan spasial—yang berada dalam rentang 171,65% hingga 284,19%—dibaca sebagai indikator perilaku *self-organizing packing*. Temuan ini menunjukkan bahwa pergeseran peran desainer menjadi perancang sistem (*system-finder*) tidak mengurangi tingkat kontrol desain, melainkan memungkinkan dilakukannya optimasi spasial yang melampaui keterbatasan susunan manual berbasis kisi.

Peningkatan nilai simpangan baku rotasi (σ) dan kepadatan spasial (D) pada kondisi akhir simulasi menunjukkan bahwa sistem tidak sekadar mengalami pergeseran acak, melainkan bergerak menuju konfigurasi spasial yang lebih terorganisasi melalui interaksi fisik antarmotif. Secara visual, kecenderungan ini termanifestasi dalam pola dua dimensi yang menampilkan keseimbangan antara keteraturan dan variasi lokal, yang dapat dibaca sebagai bentuk *ordered randomness* alih-alih susunan deterministik berbasis kisi. Keterkaitan langsung antara indikator kuantitatif tersebut dan karakter visual yang dihasilkan memperkuat interpretasi bahwa kompleksitas pola muncul sebagai fenomena *emergence*, bukan hasil pengaturan bentuk secara eksplisit. Dalam kerangka ini, peran desainer beralih menjadi *system-finder*, saat kualitas visual yang mendekati *computational sublime* dipahami sebagai konsekuensi dari desain sistem, bukan sebagai tujuan yang ditentukan sejak awal.

Karakteristik Visual: *Computational sublime* dan *Emergence*

Pola yang terbentuk setelah sistem mencapai kondisi keseimbangan (Gambar 4) menampilkan struktur visual makro yang muncul sebagai hasil langsung dari aturan mikro yang ditetapkan melalui parameter simulasi.

Ordered Randomness dan Keteraturan Emergen

Meskipun posisi dan orientasi motif tampak tidak beraturan, ketakteraturan tersebut merupakan hasil deterministik dari interaksi fisik antarelemen. Pola yang dihasilkan menunjukkan karakter *ordered randomness*, variasi visual muncul dalam batasan hukum fisika yang dapat ditelusuri secara sistemik.

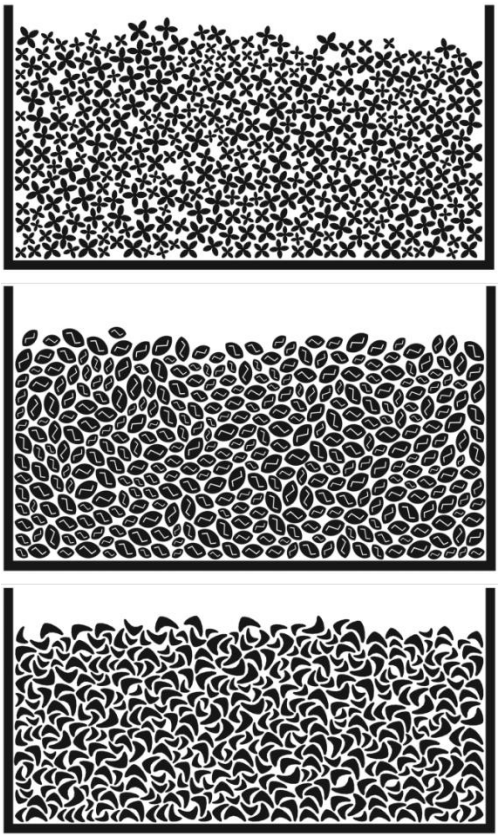
Berbeda dengan *procedural noise* yang menghasilkan variasi melalui fungsi matematis yang telah ditentukan sebelumnya, variasi pada penelitian ini muncul sebagai konsekuensi dari interaksi fisik antarmotif yang berlangsung secara situasional. Oleh karena itu, keteraturan yang muncul tidak berasal dari algoritma distribusi visual secara langsung, melainkan dari proses negosiasi kinetik yang dialami setiap agen dalam sistem.

Struktur Emergen Hasil Interaksi Fisik Antarmotif

Susunan motif di akhir simulasi tidak bergantung pada keadaan kisi yang telah ditentukan sebelumnya. Sebaliknya, organisasi visual yang terbentuk secara organik terjadi melalui interaksi fisik antaragen. Hal ini menegaskan bahwa stabilitas visual dicapai sebagai sifat emergen sistem, bukan sebagai hasil penerapan pedoman bentuk yang bersifat eksplisit.

Pengaruh Morfologi terhadap Ritme Pola yang Dihasilkan

Perbedaan tingkat simetri geometris memiliki pengaruh langsung terhadap ritme visual pola. Motif Biji Kopi dengan simetri sederhana menghasilkan tekstur visual yang lebih cair dan terdistribusi acak. Sebaliknya, motif Bumerang yang asimetris menunjukkan keterkuncian geometris yang lebih padat, sejalan dengan data capaian kepadatan spasial tertinggi pada analisis kuantitatif.



Gambar 4. Pola emergen akhir pada *frame* ke-500: perbandingan organisasi visual global pada berbagai morfologi motif setelah mencapai kondisi fisik stabil.
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Tekstur pola emergen menampilkan detail tekstur dari masing-masing pola. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, pola emergen memperlihatkan perbedaan ritme visual antarmorfologi motif interaksi dinamis antarmotif membentuk sistem keterkuncian yang padat, tetapi tetap variatif. Kualitas visual ini menunjukkan bahwa meskipun pola dibentuk oleh parameter fisik yang ketat, keluaran akhirnya memiliki karakter organik yang sulit dicapai melalui metode pengulangan manual.

Gambar 5. Detail tekstur pola emergen: (kiri) motif Kawung, (tengah) motif Biji Kopi, dan (kanan) motif Bumerang.
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

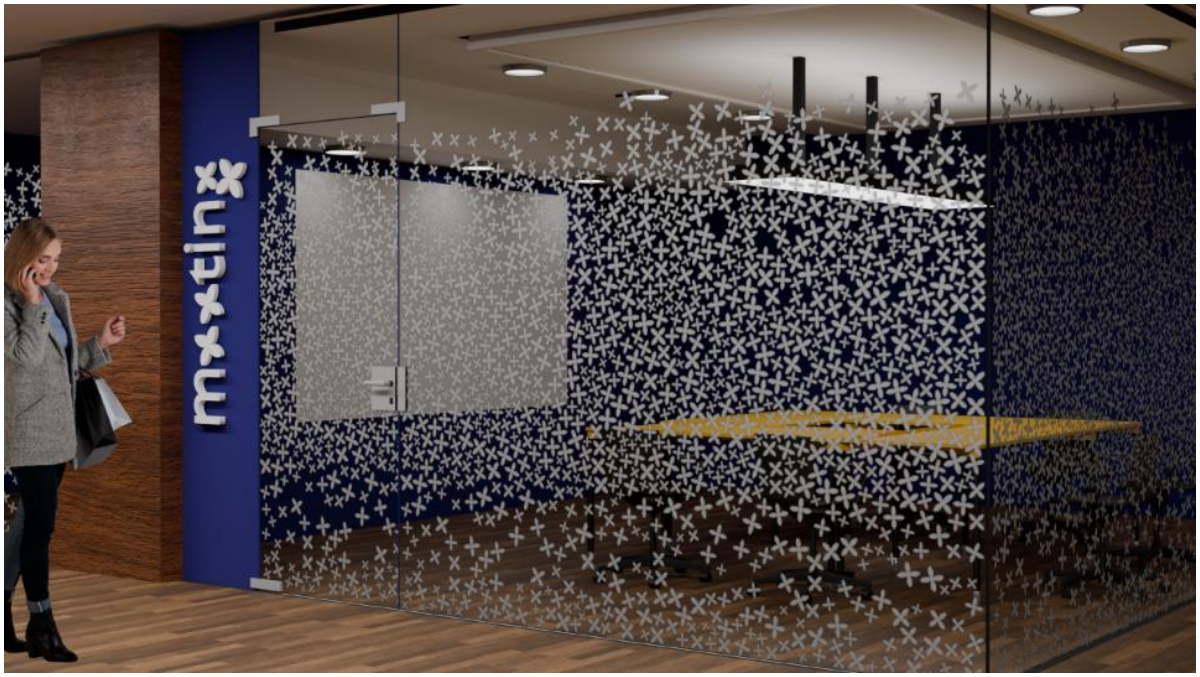
Seperti terlihat dalam Gambar 5, motif Kawung mempertahankan keterbacaan struktur radial meskipun mengalami dekonstruksi orientasi, sehingga menghasilkan ritme visual yang relatif seimbang. Motif Biji Kopi menunjukkan distribusi orientasi yang paling beragam, tercermin dari nilai simpangan baku tertinggi ($\sigma = 80{,}59°$), sehingga membentuk tekstur visual yang lebih cair dan tersebar. Sebaliknya, motif Bumerang memperlihatkan kecenderungan saling mengunci secara geometris yang

lebih kuat, sejalan dengan capaian kepadatan tertinggi (284,19%), menghasilkan pola yang tampak lebih padat dan terintegrasi.

Penerapan dan Implikasinya pada Desain

Untuk menjembatani hasil simulasi dengan aplikasi desain dan fabrikasi, konfigurasi akhir motif pada *frame* ke-500 dikonversi ke dalam format 2D menggunakan fitur yang dimiliki Blender untuk kemudian diekspor ke dalam format CAD berbasis kurva untuk keperluan dokumentasi, pengembangan pola, maupun proses fabrikasi digital seperti *CNC milling*, *laser cutting*, dan *digital printing*. Dengan alur kerja tersebut, simulasi fisika tidak berhenti sebagai instrumen eksplorasi visual, tetapi menghasilkan keluaran yang dapat diintegrasikan secara langsung ke dalam proses produksi dan fabrikasi desain permukaan.

Contoh penerapan praktis pola emergen yang dihasilkan diperlihatkan melalui visualisasi pada partisi kaca interior (Gambar 6). Penerapan ini memperlihatkan bagaimana distribusi motif hasil simulasi dapat menghasilkan keseimbangan antara kepadatan visual dan transparansi yang dibutuhkan untuk sebuah *matte glass film* pada sebuah partisi kaca.



Gambar 6. Visualisasi contoh penerapan pola Kawung pada partisi kaca yang dihasilkan melalui pendekatan *motion-based design*.
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Dibandingkan susunan berbasis kisi linier yang cenderung menghasilkan distribusi visual seragam, pola emergen yang dihasilkan melalui *motion-based design* memperlihatkan variasi kepadatan lokal yang lebih tinggi. Karakter ini memungkinkan terbentuknya gradien transparansi dan privasi secara alami, sehingga bidang partisi dapat tetap mempertahankan kontinuitas visual sekaligus mengurangi keterbacaan langsung antar ruang.

Simpulan

Penelitian ini berhasil membangun sebuah kerangka kerja metodologis untuk digital pattern making melalui integrasi pendekatan desain aditif, desain asosiatif, dan desain berbasis gerak (*motion-based design*) dalam satu ekosistem generatif terpadu. Kerangka yang diusulkan tidak dimaksudkan sebagai

demonstrasi penggunaan perangkat lunak tertentu, melainkan sebagai kontribusi metodologis dalam praktik desain, yang mengoperasionalkan simulasi fisika sebagai mekanisme desain untuk mengeksplorasi organisasi visual otonom. Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan utama dapat dirumuskan sebagai berikut.

Pergeseran Paradigma Metode Pembuatan Pola

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa transisi dari pola berstruktur kisi asosiatif yang statis menjadi pola hasil simulasi berbasis gerak (*motion-based design*) secara efektif telah mendekonstruksi susunan motif yang sebelumnya prediktif menjadi pola kompleks yang bersifat emergen. Perubahan/dekonstruksi ini divalidasi secara empiris melalui lonjakan yang signifikan pada peningkatan kepadatan spasial hingga 284,19% dan nilai simpangan baku rotasi (σ), dari 0° hingga mencapai 80,59°. Lonjakan nilai ini mengonfirmasi kemampuan sistem untuk secara otonom mendekonstruksi organisasi formal melalui interaksi kinetik pada berbagai profil geometris.

Desainer sebagai "*System-Finder*"

Selaras dengan paradigma *Generative Art*, pemanfaatan *Blender* sebagai *enabling media* secara fundamental mereposisi peran desainer. Desainer tidak lagi bertindak sebagai pengatur/pembuat langsung elemen visual (pola), melainkan sebagai "pencari sistem" (*system-finder*) yang mengendalikan berbagai aturan dalam suatu lingkungan simulasi berbasis fisika. Berdasarkan data yang diperoleh, penelitian ini menegaskan bahwa peran desainer tersebut memungkinkan tingkat optimasi spasial yang sangat tinggi—dibuktikan melalui peningkatan kepadatan spasial antara 171,65% hingga 284,19%. Hal ini dipandang dapat membantu desainer untuk menghasilkan pola dengan karakter visual yang berbeda secara konsisten dan lebih cepat. Tidak hanya sampai di sini, peran ini berlanjut hingga fase pasca-simulasi, ketika desainer menjalankan fungsi kuratorial yang krusial dalam mengarahkan keluaran emergen ini menjadi aplikasi arsitektural yang fungsional.

Emergence dan *Computational sublime*

Pola-pola yang dihasilkan menampilkan karakter visual khas berupa *ordered randomness*, bahwa posisi setiap motif merupakan jejak logis dari interaksi fisik yang dialaminya. Fenomena ini menunjukkan karakter visual yang dapat dibaca melalui kerangka *computational sublime*, saat derajat simetri motif mulai dari simetri rotasional kompleks (Kawung), bentuk elips yang disederhanakan (Biji Kopi), hingga geometri asimetris (Bumerang), memengaruhi ritme kepadatan akhir dan efisiensi keterkuncian. Temuan ini juga menunjukkan bahwa gaya fisik yang tersimulasi dapat dimanfaatkan sebagai variabel utama dalam pembentukan bentuk (*form origination*), sekaligus menjembatani keterlibatan langsung desainer pada pembuatan pola dengan otonomi komputasional yang berkompleksitas tinggi.

Keterbatasan dan Penelitian Lanjutan

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Ruang lingkup eksperimen dibatasi pada tiga morfologi motif tertentu serta seperangkat parameter simulasi berbasis fisika yang terfokus. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi gaya lingkungan yang lebih beragam—termasuk yang belum diterapkan pada penelitian ini, seperti pemanfaatan gaya resistif (*drag force*), serta medan turbulensi atau pusaran (*vortex fields*)—guna memperluas potensi *design space*. Selain itu, terdapat peluang besar untuk meneliti penerjemahan pola-pola hasil simulasi ke dalam prototipe fisik melalui fabrikasi digital, seperti CNC *milling* atau 3D *printing*. Kajian tersebut akan memvalidasi apakah estetika *computational sublime* dan sistem keterkuncian kompleks yang dikembangkan dalam laboratorium digital tersebut dapat mempertahankan integritas struktural dan kualitas estetikanya ketika direalisasikan dalam konteks material di dunia nyata.

Referensi

Adanova, V., & Tari, S. (2019). Analysis of Planar Ornament Patterns via Motif Asymmetry Assumption and Local Connections. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, *61*(3), 269–291. https://doi.org/10.1007/s10851-018-0835-8

Arvin, S. A., & House, D. H. (2002). Modeling architectural design objectives in physically based space planning. *Automation in Construction*, *11*(2), 213–225. https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00099-6

Balik, D., & Allmer, A. (2016). A critical review of ornament in contemporary architectural theory and practice. *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, *13*(1). https://doi.org/10.5505/itujfa.2016.73745

Blain, J. M. (2023). *The Complete Guide to Blender Graphics*. A K Peters/CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003400912

Cao, Y., Zhao, Y., Hu, Y., & Lin, B. (2020). Research on Physically-based Computer Animation. *2020 2nd International Conference on Information Technology and Computer Application (ITCA)*, 186–190. https://doi.org/10.1109/ITCA52113.2020.00046

Dehlinger, H. (2020). Generative Art. *Journal of Mathematics and the Arts*, *14*(1–2), 33–36. https://doi.org/10.1080/17513472.2020.1729058

Galanter, P. (2016). Generative Art Theory. In C. Paul (Ed.), *A Companion to Digital Art* (pp. 146–180). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118475249.ch5

Gill, S., Al Houf, H., Hayes, S., & Conlon, J. (2024). Evolving pattern practice, from traditional patterns to bespoke parametric blocks. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, *17*(2), 144–161. https://doi.org/10.1080/17543266.2023.2260829

Helenowska-Peschke, M. (2012). Applying Generative Modelling Tools to Explore Architectural Forms. *The Journal of Polish Society for Geometry and Engineering Graphics*, *23*, 43–49.

Jowers, I., Prats, M., Eissa, H., & Lee, J.-H. (2010). A study of *emergence* in the generation of Islamic geometric patterns. *Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design in Asia (CAADRIA 2010)*, 39–48. https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2010.039

Kogut, W. (2023). The analysis of *Blender open-source* software cloth simulation capabilities. *Journal of Computer Sciences Institute*, *26*, 83–87. https://doi.org/10.35784/jcsi.3091

Kolarevic, B. (2000). Digital Architectures. In M. J. Clayton & G. P. V. de Velasco (Eds.), *Proceedings of the 22nd Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture ACADIA 2000 : Eternity, Infinity and Virtuality in Architecture* (pp. 251–256). Association for Computer-Aided Design in Architecture. https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2000.251

Kuruçay, E., & Karadağ, İ. (2022). Computational Approaches in 21st Century Architectural Design: Defining Digital Representation Methods. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *10*(3), 1201–1217. https://doi.org/10.29130/dubited.900770

Leach, N. (2009). Digital Morphogenesis. *Architectural Design*, *79*(1), 32–37. https://doi.org/10.1002/ad.806

McCormack, J., & Dorin, A. (2001). Art, *emergence* and the *computational sublime*. *Proceedings of Second Iteration: A Conference on Generative Systems in the Electronic Arts. Melbourne: CEMA*, 67–81.

Monro, G. (2009). *Emergence* and Generative Art. *Leonardo*, *42*(5), 476–477. https://doi.org/10.1162/leon.2009.42.5.476

Nurrachman, I., & Djakaria, E. (2024). Penerapan Pola Parametrik Force Field pada Pembuatan Pola Motif Kawung untuk Elemen Bangunan. *Aksen : Journal of Design and Creative Industry*, *8*(2), 33–46. https://doi.org/10.37715/aksen.v8i2.4332

Nurrachman, M. I. (2024). Inovasi motif Nitik Gedhangan menggunakan pendekatan pemodelan parametrik. *Jurnal Desain*, *12*(1), 53–64. https://doi.org/10.30998/jd.v12i1.23234

Oxman, N., & Rosenberg, J. L. (2007). Material-based design computation an inquiry into digital simulation of physical material properties as design generators. *International Journal of Architectural Computing*, *5*(1), 26–44. https://doi.org/10.1260/147807707780912985

Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, *27*(3), 229–265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002

Palaguta, I. V. (2020). Studies of Ornament: Main Trends and Prospects. *Vestnik of Saint Petersburg University. Arts*, *10*(4), 571–585. https://doi.org/10.21638/spbu15.2020.403

Reid, J. B., & Rhodes, D. H. (2018). Classifying Emergent Behavior to Reveal Design Patterns. In *Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research* (pp. 727–740). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62217-0_50

Toka, M. (2024). Crafting the Computational: Artistic Production, Generative Systems, and Digital Fabrication. *Proceedings of the 2024 ACM Designing Interactive Systems Conference*, 24–29. https://doi.org/10.1145/3656156.3665122

van Gumster, J., & Lampel, J. (2022). Procedural Modeling with *Blender*'s Geometry Nodes. *Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Labs*, 1–2. https://doi.org/10.1145/3532725.3538516