



Stigmergy sebagai Strategi Transformasi Desain Arsitektur Berbasis Waktu

Stigmergy as a Time-Based Architectural Design Transformation Strategy

Nur Hadiyatun Nabawi^{1*}, Kristanti Dewi Paramita²

Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya^{1*}

Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia²

*Corresponding author: nhnabawi@unsri.ac.id

Article history

Received: 06 Apr 2026

Accepted: 10 Apr 2026

Published: 30 Apr 2026

Abstract

This article explains that conventional architecture still tends to see buildings as static objects, so changes after occupation are often treated merely as operational effects rather than as part of design strategy. This view limits the understanding of architecture as a system that continuously develops through interactions among users, materials, activities, and the environment. The study proposes a conceptual model by synthesizing the agent-medium-trace relationship, identifying five stigmergy systems in spatial contexts, and reformulating the link between system mechanisms and phases of temporal transformation. The results reveal four phases of spatial transformation—Activation, Intensification, Structural Shift, and Reconfiguration—which operate through five systems: controlling, guiding, protecting, direction, and zoning. The article's main contribution is the Strategic Temporal Transformation Matrix, which positions time as a strategic framework for understanding design transformation and supporting adaptive spatial and environmental systems that evolve gradually over time.

Keywords: adaptive spatial systems; design transformation; environmental design; stigmergy; time-based architecture

Abstrak

Tulisan ini membahas bagaimana arsitektur konvensional masih sering memandang bangunan sebagai objek statis, sehingga perubahan pasca-penggunaan dianggap sebagai dampak operasional, bukan sebagai bagian dari strategi desain. Pandangan ini membatasi pemahaman arsitektur sebagai sistem yang terus berkembang melalui interaksi antara pengguna, material, aktivitas, dan lingkungan. Penelitian ini mengembangkan model konseptual melalui sintesis hubungan *agent-medium-trace*, identifikasi lima sistem *stigmergy* dalam konteks spasial, serta reformulasi hubungan antara mekanisme sistem dan fase transformasi temporal. Hasil penelitian menunjukkan empat fase transformasi ruang, yaitu *activation*, *intensification*, *structural shift*, dan *reconfiguration*, yang bekerja melalui lima sistem utama: *controlling*, *guiding*, *protecting*, *direction*, dan *zoning*. Kontribusi utama artikel ini adalah *strategic temporal transformation matrix*, yang menempatkan waktu sebagai struktur strategis untuk memahami transformasi desain serta memberikan dasar konseptual bagi sistem spasial adaptif dan pendekatan desain lingkungan yang berkembang secara bertahap.

Kata kunci: sistem spasial adaptif; transformasi desain; desain lingkungan; *stigmergy*; arsitektur berbasis waktu

1. PENDAHULUAN

Tulisan ini membahas arsitektur sebagai sistem yang berkembang melalui waktu, bukan semata-mata sebagai objek statis yang berhenti setelah konstruksi selesai. Dalam praktik arsitektur konvensional, bangunan masih sering diposisikan sebagai produk akhir yang relatif tetap, sehingga perubahan yang terjadi setelah bangunan digunakan lebih banyak dipahami sebagai konsekuensi operasional daripada sebagai bagian dari strategi desain itu sendiri. Perspektif demikian menempatkan waktu hanya sebagai konteks eksternal yang mencatat perubahan, bukan sebagai dimensi yang turut membentuk sistem arsitektur. Padahal, dalam perspektif sistem kompleks, ruang tidak pernah sepenuhnya statis. Interaksi antara pengguna, aktivitas, material, dan lingkungan terus menghasilkan perubahan yang memengaruhi konfigurasi spasial dari waktu ke waktu. Dalam kerangka ini, bangunan lebih tepat dipahami sebagai proses yang terus berkembang daripada sebagai objek yang selesai pada tahap konstruksi (Heidrich dkk., 2017; Lee dkk., 2021; Lin dkk., 2025; Staehr dkk., 2025).

Dalam konteks tersebut, *stigmergy* menjadi relevan karena menawarkan cara pandang untuk menjelaskan bagaimana perubahan dapat berlangsung melalui interaksi tidak langsung berbasis jejak. Dalam mekanisme ini, tindakan agen meninggalkan *trace* pada suatu medium, dan jejak tersebut kemudian memicu respons lanjutan yang membentuk pola kolektif tanpa memerlukan kontrol terpusat (Nabawi dkk., 2022). Dalam arsitektur, cara kerja ini membuka kemungkinan untuk memahami transformasi ruang sebagai proses yang berkembang secara bertahap melalui akumulasi interaksi antara pengguna, lingkungan, dan sistem spasial. Dengan demikian, perubahan tidak hanya dipandang sebagai respons terhadap kondisi eksternal, tetapi juga sebagai bagian dari dinamika sistem yang dapat dipertimbangkan secara strategis dalam desain.

Perkembangan kajian mutakhir menunjukkan bahwa *stigmergy* telah dibahas luas dalam ranah sistem kompleks, khususnya dalam *swarm intelligence* dan *self-organization*, serta mulai diadopsi dalam arsitektur melalui pendekatan komputasional dan generatif, seperti desain berbasis *algoritma*, *parametric*

design, dan *material computation* (Dierichs & Menges, 2021; Heylighen, 2016a, 2016b; Semjén & Szép, 2025; Zhuang dkk., 2025). Perkembangan tersebut memperlihatkan bahwa konfigurasi ruang dapat dibentuk melalui relasi antareleman yang bekerja secara dinamis menyerupai mekanisme kolektif dalam sistem alami. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih memosisikan *stigmergy* sebagai metode generatif pada tahap eksplorasi bentuk, terutama dalam pembentukan geometri dan organisasi spasial. Di sisi lain, kajian mengenai *adaptive architecture*, *responsive systems*, dan *process-based design* telah menegaskan bahwa bangunan perlu memiliki kapasitas untuk merespons perubahan lingkungan maupun kebutuhan pengguna (Lee dkk., 2021; Lin dkk., 2025; Staehr dkk., 2025). Meski demikian, transformasi arsitektur dalam banyak penelitian masih lebih sering dipahami sebagai akibat dari kondisi eksternal setelah bangunan digunakan, bukan sebagai strategi desain yang telah diintegrasikan sejak tahap konseptual.

Kondisi tersebut menegaskan urgensi penelitian ini, yaitu perlunya kerangka konseptual yang dapat menjelaskan perubahan ruang bukan sekadar sebagai reaksi pasca-penggunaan, melainkan sebagai bagian dari logika desain yang bekerja sejak awal. Dalam konteks itu, masih terdapat gap riset dalam kajian arsitektur, yakni belum kuatnya formulasi yang mengintegrasikan mekanisme *stigmergy* dengan waktu sebagai struktur strategis transformasi. Meskipun *stigmergy* telah banyak dibahas dalam sistem kompleks, penerapannya dalam arsitektur masih jarang dirumuskan sebagai strategi transformasi desain berbasis waktu. Selain itu, dimensi temporal dalam arsitektur umumnya masih dipahami secara kronologis sebagai urutan perubahan dalam siklus bangunan, bukan sebagai kerangka strategis yang sejak awal mengarahkan perkembangan sistem arsitektur (Staehr dkk., 2025). Akibatnya, perubahan ruang cenderung dibaca sebagai respons pasif terhadap kondisi yang muncul kemudian, bukan sebagai bagian inheren dari desain yang dapat diantisipasi, diarahkan, dan dikembangkan secara bertahap.

Berdasarkan urgensi dan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan

kerangka konseptual yang menjelaskan bagaimana mekanisme *stigmergy* dapat digunakan sebagai strategi transformasi desain arsitektur berbasis waktu. Secara khusus, artikel ini merumuskan hubungan *agent-medium-trace* dalam konteks sistem spasial, mengidentifikasi sistem mekanisme yang membentuk transformasi ruang, serta menyusun fase transformasi temporal yang menjelaskan bagaimana perubahan berkembang secara bertahap. Dengan demikian, manfaat penelitian ini terletak pada kontribusinya dalam memperluas pemahaman teoretis mengenai transformasi arsitektur, sekaligus menawarkan dasar konseptual bagi pengembangan pendekatan desain yang menempatkan waktu bukan sekadar sebagai latar berlangsungnya perubahan, melainkan sebagai struktur internal yang mengarahkan evolusi ruang dalam sistem arsitektur.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan sintesis konseptual untuk merumuskan model strategi transformasi desain arsitektur berbasis waktu. Pendekatan ini tidak berfokus pada pengujian empiris atau evaluasi proyek tertentu, melainkan pada pengembangan kerangka teoretis melalui integrasi berbagai konsep yang berkaitan dengan transformasi arsitektur. Dengan demikian, fokus penelitian terletak pada pembentukan model konseptual yang menjelaskan bagaimana perubahan ruang dapat dipahami melalui mekanisme *stigmergy* dalam dimensi waktu.

Metode sintesis konseptual digunakan untuk menghubungkan teori mengenai *stigmergy*, dinamika sistem spasial, serta dimensi waktu dalam desain arsitektur. Melalui pendekatan ini, berbagai konsep yang berasal dari kajian sistem kompleks dan teori arsitektur dianalisis, dibandingkan, dan disusun kembali untuk membangun model konseptual yang menjelaskan mekanisme transformasi dalam sistem arsitektur. Material konseptual dalam penelitian ini berasal dari tiga sumber utama, yaitu teori *stigmergy* dan *self-organization* dalam sistem kompleks, kajian transformasi dan adaptasi dalam arsitektur, serta pemahaman

mengenai waktu sebagai struktur strategis dalam evolusi sistem spasial.

Kerangka konseptual yang digunakan dalam penelitian ini juga berangkat dari temuan penelitian sebelumnya yang mengeksplorasi mekanisme *stigmergy* dalam konteks pemrograman ruang arsitektur (Nabawi dkk., 2022). Dalam penelitian tersebut, mekanisme interaksi *stigmergy* dianalisis melalui hubungan antara *agent*, *medium*, dan *trace* dalam sistem spasial. Namun, penelitian ini tidak mengulang analisis tersebut sebagai pelaporan proyek, melainkan mengembangkan kerangka tersebut dengan memosisikan *stigmergy* sebagai mekanisme yang dapat menjelaskan transformasi desain arsitektur berbasis waktu. Dengan demikian, artikel ini menempati posisi sebagai pengembangan model konseptual, bukan duplikasi studi terdahulu.

Proses sintesis konseptual dalam penelitian ini dilakukan melalui tiga tahap utama:

- 1) Tahap pertama adalah analisis mekanisme *stigmergy* dalam kerangka interaksi *agent-medium-trace*. Pada tahap ini, *stigmergy* dipahami sebagai mekanisme koordinasi tidak langsung yang terjadi melalui jejak tindakan dalam suatu medium. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana pola interaksi tersebut dapat diterjemahkan ke dalam konteks sistem spasial arsitektur, sehingga hubungan antara agen, ruang, dan jejak dapat dibaca sebagai dasar terbentuknya perubahan konfigurasi ruang.
- 2) Tahap kedua adalah identifikasi sistem spasial yang dapat berfungsi sebagai lapisan mekanisme transformasi. Melalui tahap ini, berbagai pola interaksi dalam ruang dianalisis untuk memahami bagaimana perubahan konfigurasi spasial dapat terjadi melalui hubungan antara pengguna, lingkungan, dan elemen arsitektur. Hasil abstraksi pada tahap ini kemudian dirumuskan ke dalam lima sistem utama, yaitu *controlling*, *guiding*, *protecting*, *direction*, dan *zoning*, yang mewakili lapisan mekanisme dalam proses transformasi arsitektur.

- 3) Tahap ketiga adalah reformulasi hubungan antara mekanisme dan fase waktu untuk membangun model strategi transformasi desain. Pada tahap ini, mekanisme *stigmergy* yang telah diidentifikasi disusun kembali dalam kerangka temporal yang menggambarkan fase transformasi dalam sistem arsitektur. Reformulasi ini menghasilkan empat fase konseptual, yaitu *activation*, *intensification*, *structural shift*, dan *reconfiguration*, yang menjelaskan bagaimana perubahan berkembang secara bertahap melalui interaksi sistem spasial dan dimensi waktu.

Melalui ketiga tahap tersebut, penelitian ini menghasilkan model teoretis yang menjelaskan bagaimana transformasi arsitektur dapat dipahami sebagai proses yang berkembang secara bertahap melalui interaksi antara mekanisme *stigmergy* dan struktur temporal. Untuk memperjelas posisi model yang diusulkan, hasil sintesis ini kemudian dibaca secara silang dengan pendekatan *adaptive architecture*, *resilient design*, *parametric systems*, dan *process-based architecture*, sehingga kontribusi model dapat ditempatkan secara lebih jelas

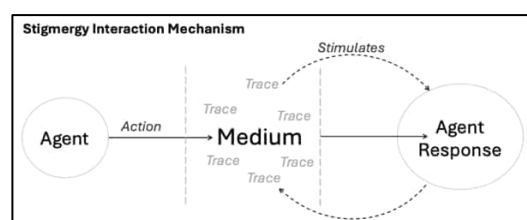
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil sintesis konseptual yang merumuskan model strategi transformasi desain arsitektur berbasis waktu melalui mekanisme *stigmergy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi dalam sistem arsitektur dapat dipahami melalui dua lapisan utama, yaitu lapisan mekanisme spasial dan lapisan fase temporal. Lapisan pertama menjelaskan sistem-sistem yang bekerja sebagai mekanisme interaksi dalam ruang, sedangkan lapisan kedua menunjukkan bagaimana perubahan berkembang secara bertahap melalui fase transformasi. Integrasi kedua lapisan tersebut menghasilkan model konseptual yang memandang transformasi arsitektur sebagai proses strategis, bukan sekadar urutan perubahan yang berlangsung secara kronologis. Dengan demikian, bagian ini tidak hanya menguraikan unsur-unsur pembentuk transformasi, tetapi juga menjelaskan kontribusi konseptual model yang

diusulkan terhadap pengembangan teori transformasi arsitektur berbasis waktu.

3.1 Identifikasi Sistem *Stigmergy* sebagai Mekanisme Dasar

Berdasarkan sintesis konseptual terhadap mekanisme *stigmergy* dalam konteks sistem spasial, proses transformasi desain arsitektur dapat dipahami melalui lima sistem utama yang berfungsi sebagai lapisan mekanisme interaksi, yaitu *controlling system*, *guiding system*, *protecting system*, *direction system*, dan *zoning system*. Kelima sistem ini menjelaskan bagaimana hubungan antara *agent*, *medium*, dan *trace* membentuk perubahan konfigurasi ruang secara bertahap dalam sistem arsitektur. Hubungan antara *agent*, *medium*, dan *trace* sebagai dasar mekanisme *stigmergy* dalam sistem spasial dapat dibaca secara konseptual sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Hubungan tersebut divisualisasikan untuk menunjukkan bagaimana jejak interaksi pada *medium* menjadi pemicu terbentuknya respons lanjutan dalam sistem. Dalam konteks ini, mekanisme *stigmergy* tidak dipahami hanya sebagai model interaksi abstrak, tetapi sebagai kerangka yang dapat diterjemahkan ke dalam pembacaan spasial mengenai bagaimana jejak interaksi menghasilkan pola perubahan ruang. (Boldini dkk., 2024; Nabawi dkk., 2022; Salman dkk., 2024).



Gambar 1. Representasi Konseptual Interaksi *Stigmergy*

Controlling system berfungsi sebagai mekanisme pengaturan yang menjaga keseimbangan interaksi dalam sistem spasial. Sistem ini mengarahkan bagaimana aktivitas dan perubahan dalam ruang berlangsung agar tidak menimbulkan konflik yang mengganggu koherensi sistem secara keseluruhan. Dalam pembacaan analitis, fungsi *controlling* menunjukkan bahwa transformasi tidak identik dengan keterbukaan tanpa batas, tetapi memerlukan perangkat pengarah yang menjaga agar perubahan tetap berada dalam struktur

yang dapat terbaca. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa mekanisme *stigmergy* dalam arsitektur bukan sekadar menghasilkan dinamika, tetapi juga mempertahankan keteraturan minimum agar interaksi lokal dapat berkembang menjadi pola kolektif yang stabil.

Selanjutnya, *guiding system* berperan dalam mengarahkan alur interaksi dan orientasi aktivitas dalam ruang. Sistem ini membentuk pola pergerakan, orientasi, dan hubungan antar ruang yang memfasilitasi interaksi antara pengguna, aktivitas, dan lingkungan. Dalam konteks hasil sintesis, sistem ini memperlihatkan bahwa perubahan spasial tidak berlangsung secara netral, tetapi bergerak mengikuti kecenderungan relasional tertentu. Dengan kata lain, transformasi tidak hanya terjadi karena adanya interaksi, tetapi karena interaksi tersebut dipandu menuju pola keterhubungan tertentu yang kemudian memperkuat jejak spasial. Hal ini sejalan dengan pemahaman bahwa pola kolektif dalam sistem stigmergi terbentuk melalui akumulasi respons yang saling memperkuat di dalam medium (Dias dkk., 2023; Salman dkk., 2024).

Sementara itu, *protecting system* berfungsi sebagai lapisan perlindungan yang menjaga stabilitas sistem terhadap gangguan eksternal maupun perubahan yang berpotensi melemahkan struktur spasial yang telah terbentuk. Berbeda dari mekanisme pengendalian yang mengatur arah interaksi, sistem ini bekerja dengan menjaga keberlangsungan organisasi ruang ketika transformasi mulai menyentuh struktur sistem secara lebih dalam. Secara analitis, fungsi *protecting* menunjukkan bahwa setiap transformasi yang berkelanjutan selalu memerlukan ambang stabilitas tertentu. Tanpa mekanisme ini, perubahan yang berlangsung terus-menerus berisiko menghasilkan fragmentasi ruang, bukan reorganisasi yang koheren.

Selain itu, *direction system* berperan dalam membentuk arah perkembangan atau arah perubahan konfigurasi ruang. Sistem ini menjelaskan bagaimana transformasi dapat berkembang secara bertahap melalui akumulasi interaksi yang terjadi dalam sistem. Dalam hal ini, arah perubahan tidak ditentukan oleh kontrol tunggal, tetapi muncul dari pola

hubungan yang terbentuk dari jejak interaksi sebelumnya. Temuan ini memperlihatkan kedekatan model dengan prinsip *self-organization*, yaitu bahwa struktur sistem dapat berkembang dari interaksi lokal tanpa kendali terpusat (Boldini dkk., 2024; Heylighen, 2016a). Dalam konteks arsitektur, hal tersebut berarti perubahan ruang dapat dipahami sebagai kecenderungan evolutif yang lahir dari dinamika internal sistem, bukan semata-mata dari keputusan formal yang ditetapkan secara eksternal.

Terakhir, *zoning system* berfungsi sebagai mekanisme diferensiasi ruang yang memungkinkan pembagian fungsi, aktivitas, dan intensitas interaksi dalam sistem arsitektur. Melalui sistem ini, hubungan antarelemen dalam ruang dapat terorganisasi secara lebih terstruktur. Fungsi *zoning* dalam model ini tidak berhenti pada pembagian ruang secara teknis, tetapi menunjukkan bagaimana diferensiasi spasial menjadi hasil dari proses transformasi yang berlangsung secara bertahap. Dalam arti ini, *zoning* merupakan bentuk artikulasi spasial dari akumulasi interaksi yang sebelumnya telah diarahkan, dikendalikan, dan distabilkan melalui sistem-sistem lain.

Kelima sistem *stigmergy* yang telah diuraikan di atas menunjukkan bahwa transformasi ruang dibentuk oleh lapisan mekanisme yang saling berkaitan. Untuk memperjelas fungsi masing-masing sistem dalam konteks transformasi spasial, ringkasan peran dan deskripsinya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sistem *Stigmergy* Diidentifikasi sebagai Mekanisme Berlapis yang Memengaruhi Transformasi Ruang Dalam Desain Arsitektur.

System	Peran dalam Transformasi	Deskripsi dalam Konteks Spasial
Controlling	Mengatur interaksi	Menjaga keseimbangan perubahan dalam sistem spasial agar tetap koheren
Guiding	Mengarahkan relasi ruang	Membentuk pola orientasi, sirkulasi, dan hubungan antar ruang
Protecting	Menjaga stabilitas sistem	Melindungi struktur spasial dari gangguan eksternal maupun disrupsi
Direction	Membentuk arah perubahan	Menentukan kecenderungan perkembangan konfigurasi ruang
Zoning	Mendiferensiasi ruang	Mengorganisasi pembagian ruang, fungsi, dan intensitas aktivitas

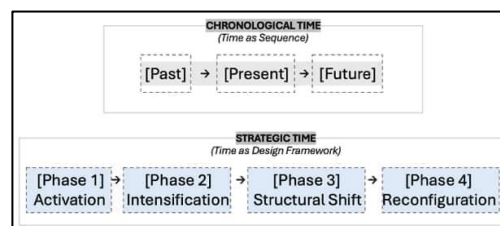
Kelima sistem tersebut tidak bekerja secara linear maupun terpisah, melainkan sebagai lapisan mekanisme yang saling berinteraksi dalam membentuk dinamika transformasi ruang. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan dalam arsitektur tidak cukup dijelaskan hanya sebagai fleksibilitas bentuk atau kemampuan responsif, tetapi sebagai hasil dari hubungan berlapis antara pengaturan, pengarahan, perlindungan, orientasi, dan diferensiasi ruang. Dengan demikian, kontribusi bagian ini terletak pada perumusan mekanisme dasar yang menjelaskan bagaimana *stigmery* dapat dibaca sebagai logika transformasi spasial, bukan semata sebagai analogi biologis atau metode generatif dalam eksplorasi desain (Dierichs & Menges, 2021; Nabawi dkk., 2022; Thomsen, 2022).

Hasil identifikasi ini menunjukkan bahwa transformasi ruang tidak berlangsung melalui satu mekanisme yang berdiri sendiri, melainkan melalui keterkaitan antara pengaturan, pengarahan, perlindungan, orientasi, dan diferensiasi ruang sebagai lapisan mekanisme yang saling memengaruhi. Dalam konteks tersebut, *stigmery* dapat dipahami sebagai logika transformasi spasial yang bekerja secara bertahap melalui interaksi antareleman dalam sistem arsitektur. Atas dasar itu, pembahasan berikutnya diarahkan pada bagaimana mekanisme-mekanisme tersebut berkembang dalam struktur perubahan yang lebih terorganisasi melalui fase transformasi temporal.

3.2. Formulasi Fase Transformasi Temporal

Berdasarkan sistem mekanisme yang telah diidentifikasi, transformasi desain arsitektur kemudian diformulasikan ke dalam serangkaian fase konseptual yang menggambarkan dinamika perubahan dalam sistem. Fase-fase ini tidak dimaksudkan sebagai urutan kronologis yang diukur berdasarkan durasi waktu tertentu, melainkan sebagai kerangka konseptual yang menjelaskan bagaimana konfigurasi ruang berkembang melalui akumulasi interaksi dalam sistem arsitektur. Dalam konteks ini, waktu dipahami sebagai struktur evolutif yang mengarahkan perubahan, bukan sekadar penanda sebelum dan sesudah. Perbedaan antara waktu kronologis dan waktu strategis menjadi

landasan untuk membaca transformasi bukan sebagai urutan peristiwa linear, melainkan sebagai perkembangan bertahap dalam sistem desain, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Pemahaman ini sejalan dengan kajian yang menempatkan waktu bukan hanya sebagai catatan perubahan, tetapi sebagai dimensi yang turut membentuk evolusi sistem spasial (DeLanda, 2016; Staehr dkk., 2025).



Gambar 2. Perbandingan antara waktu kronologis dan waktu strategis dalam transformasi arsitektur.

Sumber : Penulis, 2026.

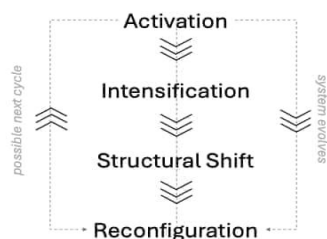
Fase pertama adalah *activation*, yaitu tahap awal ketika mekanisme interaksi mulai bekerja dalam sistem. Pada tahap ini, tindakan agen mulai menghasilkan jejak (*trace*) dalam medium ruang yang menjadi dasar bagi terbentuknya pola interaksi berikutnya. Fase ini menandai kondisi awal ketika perubahan belum terlihat secara signifikan, tetapi potensi transformasi telah mulai terbentuk melalui jejak awal dalam sistem. Secara analitis, fase ini menunjukkan bahwa transformasi tidak selalu dimulai dari perubahan yang tampak secara formal, melainkan dari pembentukan kondisi relasional yang memungkinkan perubahan berkembang.

Fase kedua adalah *intensification*, yaitu fase ketika interaksi dalam sistem meningkat dan menghasilkan akumulasi jejak yang semakin memengaruhi konfigurasi spasial. Pada tahap ini, hubungan antara aktivitas, ruang, dan lingkungan mulai membentuk pola yang lebih jelas, sehingga sistem mengalami modifikasi secara bertahap. Fase ini menunjukkan peningkatan intensitas interaksi yang membuat mekanisme transformasi menjadi lebih terbaca. Dalam konteks ini, waktu tidak bekerja sebagai pengukur lamanya perubahan, tetapi sebagai struktur yang menjelaskan bahwa transformasi memiliki tingkat intensitas yang berbeda pada setiap tahap perkembangannya.

Fase ketiga adalah *structural shift*, yaitu tahap ketika akumulasi interaksi menghasilkan

perubahan yang lebih signifikan dalam struktur spasial. Pada fase ini, pola yang terbentuk dari interaksi sebelumnya mulai memengaruhi organisasi ruang secara lebih luas, sehingga terjadi pergeseran dalam hubungan antar elemen, fungsi ruang, maupun struktur konfigurasi yang telah ada. Fase ini merupakan titik ketika perubahan tidak lagi bersifat minor, tetapi mulai mengubah susunan sistem secara nyata. Dari sini terlihat bahwa transformasi tidak cukup dipahami sebagai penyesuaian kecil yang terus-menerus, melainkan dapat mencapai ambang tertentu yang memicu perubahan struktural.

Fase terakhir adalah *reconfiguration*, yaitu kondisi ketika sistem mencapai konfigurasi baru yang relatif stabil sebagai hasil dari proses transformasi sebelumnya. Pada tahap ini, sistem spasial telah mengalami reorganisasi dan membentuk pola baru dalam struktur ruang, namun tetap membuka kemungkinan terjadinya transformasi lanjutan melalui siklus interaksi berikutnya. Dengan demikian, fase ini tidak menandai akhir perubahan, melainkan stabilisasi sementara dalam proses evolusi sistem. Pandangan ini dekat dengan gagasan bahwa arsitektur perlu dibaca sebagai proses yang terus berkembang, bukan sebagai objek yang berhenti pada satu bentuk final (Askar dkk., 2021; Staehr dkk., 2025). Setelah perbedaan antara waktu kronologis dan waktu strategis dipahami, transformasi arsitektur kemudian dapat dibaca melalui empat fase utama yang berkembang secara bertahap. Fase-fase tersebut divisualisasikan pada Gambar 3 untuk memperjelas urutan konseptual perubahan dalam sistem arsitektur *stigmergy*.



Stigmergy - Temporal Transformation Phases

Gambar 3. Fase-Fase Konseptual Transformasi Temporal dalam Sistem Arsitektur *Stigmergy*.

Keempat fase tersebut berfungsi sebagai kerangka strategis untuk memahami bagaimana perubahan ruang berkembang secara bertahap dalam sistem arsitektur. Kontribusi bagian ini

tidak hanya terletak pada penyusunan urutan fase, tetapi pada penegasan bahwa waktu dalam transformasi arsitektur perlu dipahami sebagai struktur internal yang mengorganisasi evolusi sistem. Dengan demikian, hasil sintesis ini memperjelas bahwa transformasi tidak sekadar berlangsung “di dalam waktu”, tetapi dibentuk oleh logika temporal yang memiliki tahapan relasional dan konsekuensi spasial yang berbeda pada setiap fase. (DeLanda, 2016; Lee dkk., 2021; Lin dkk., 2025).

Selain itu, temuan pada bagian ini menegaskan bahwa fase transformasi temporal tidak hanya berfungsi untuk menggambarkan tahapan perubahan, tetapi juga untuk menunjukkan bahwa waktu dalam arsitektur bekerja sebagai struktur strategis yang mengorganisasi evolusi ruang. Dengan demikian, transformasi tidak dipahami sebagai urutan kronologis yang netral, melainkan sebagai proses bertahap yang memiliki intensitas dan konsekuensi spasial yang berbeda pada setiap fase. Berdasarkan pemahaman tersebut, bagian selanjutnya merumuskan keterkaitan antara fase temporal dan sistem mekanisme dalam satu model operasional transformasi desain arsitektur berbasis waktu.

3.3. Matriks Transformasi Temporal Strategis

Bagian ini merumuskan hubungan antara lima sistem mekanisme *stigmergy* dan empat fase transformasi temporal dalam bentuk *Strategic Temporal Transformation Matrix* sebagai model konseptual transformasi desain arsitektur berbasis waktu. Matriks ini memperlihatkan hubungan antara sistem mekanisme dan fase temporal dalam proses transformasi ruang, serta menunjukkan bahwa perubahan arsitektur tidak berlangsung melalui progres linear, melainkan melalui interaksi berbagai mekanisme yang bekerja secara berbeda pada setiap fase. Dengan demikian, transformasi tidak dipahami sebagai urutan perubahan yang semata-mata ditentukan oleh waktu kronologis, tetapi sebagai dinamika sistem yang berkembang melalui relasi antara mekanisme spasial dan struktur temporal.

Integrasi antara lima sistem mekanisme *stigmergy* dan empat fase transformasi temporal dirumuskan dalam satu model operasional untuk menunjukkan hubungan

kerja keduanya dalam proses perubahan ruang. Hubungan tersebut disajikan pada Gambar 4 dalam bentuk *Strategic Temporal Transformation Matrix* sebagai representasi konseptual utama penelitian ini.

Strategic Temporal Transformation Matrix

Stigmergy System	Activation	Intensification	Structural Shift	Reconfiguration
Controlling	●	●		
Guiding		●		
Protecting			●	●
Direction	●	●		●
Zoning			●	●

Gambar 4. Matriks Transformasi Temporal Strategis Berdasarkan Mekanisme *Stigmergy* dalam Desain Arsitektur.

Dalam model ini, setiap sistem memiliki intensitas peran yang berbeda sesuai dengan fase transformasi yang sedang berlangsung. Pada fase *activation*, sistem *controlling* dan *direction* mulai bekerja sebagai struktur awal yang mengarahkan terbentuknya interaksi dalam sistem spasial. Fase ini menandai tahap awal ketika jejak interaksi mulai terbentuk dalam medium ruang dan mulai membuka kemungkinan terjadinya perubahan. Secara analitis, keterkaitan ini menunjukkan bahwa tahap awal transformasi memerlukan dua kondisi dasar, yaitu keteraturan minimum dan arah perkembangan. Tanpa keduanya, jejak yang terbentuk cenderung tetap tersebar dan belum berkembang menjadi pola perubahan yang bermakna.

Pada fase *intensification*, interaksi antar elemen dalam sistem meningkat dan menghasilkan akumulasi jejak yang semakin memengaruhi konfigurasi spasial. Pada tahap ini, sistem *guiding* mulai memainkan peran yang lebih dominan karena berfungsi membentuk pola orientasi, pergerakan, dan hubungan antar ruang, sementara *controlling* dan *direction* tetap berperan dalam menjaga konsistensi serta arah perkembangan sistem. Hubungan ini menunjukkan bahwa transformasi mulai bergerak dari tahap pembentukan kondisi menuju pembentukan pola. Dalam pengertian ini, perubahan tidak lagi berada pada level potensi, tetapi mulai menjadi kecenderungan relasional yang dapat dibaca dalam struktur ruang.

Selanjutnya, fase *structural shift* menunjukkan tahap ketika akumulasi interaksi menghasilkan perubahan yang lebih signifikan dalam struktur spasial. Pada fase ini, sistem *protecting* dan *zoning* menjadi lebih penting karena berperan dalam mengorganisasi ulang hubungan spasial, membentuk diferensiasi ruang, serta menjaga stabilitas sistem ketika perubahan struktur mulai terjadi. Fase ini menunjukkan bahwa transformasi tidak hanya memodifikasi permukaan relasi ruang, tetapi mulai memengaruhi konfigurasi sistem secara lebih mendasar. Di sini tampak bahwa perubahan struktural memerlukan bukan hanya intensitas interaksi, tetapi juga mekanisme yang mampu menstabilkan dan mengartikulasikan bentuk reorganisasi yang muncul.

Fase terakhir adalah *reconfiguration*, yaitu kondisi ketika sistem mencapai konfigurasi baru yang relatif stabil sebagai hasil dari proses transformasi sebelumnya. Pada tahap ini, *zoning* dan *protecting* berfungsi sebagai mekanisme yang mempertahankan konfigurasi spasial yang telah terbentuk, sementara *direction* tetap membuka kemungkinan evolusi lanjutan dalam sistem arsitektur. Dengan demikian, fase ini tidak menandai akhir perubahan, melainkan stabilisasi sementara dalam proses transformasi yang tetap terbuka terhadap siklus berikutnya. Pembacaan ini menegaskan bahwa stabilitas dalam arsitektur bukanlah kondisi final yang menutup perubahan, tetapi hasil sementara dari dinamika sistem yang terus berlangsung.

Melalui model matriks ini, transformasi desain arsitektur tidak lagi dipahami sebagai hasil akhir dari suatu proses yang berhenti pada bentuk tertentu, tetapi sebagai dinamika sistem yang berkembang melalui hubungan antara mekanisme spasial dan fase temporal. Matriks ini menjadi kontribusi utama artikel karena mengintegrasikan konsep *stigmergy* dan dimensi waktu dalam satu kerangka strategis yang menjelaskan bagaimana perubahan ruang dapat berkembang secara bertahap dalam sistem arsitektur. Dibandingkan dengan pendekatan yang hanya menekankan fleksibilitas, responsivitas, atau produksi variasi bentuk, model ini menawarkan pembacaan yang lebih relasional karena menunjukkan bagaimana perubahan dibentuk,

diarahkan, dan distabilkan melalui logika interaksi spasial berbasis jejak.

Melalui perumusan ini, *Strategic Temporal Transformation Matrix* menempati posisi sentral dalam penelitian karena memperlihatkan bahwa transformasi arsitektur berkembang melalui hubungan dinamis antara mekanisme spasial dan fase temporal. Matriks ini tidak hanya merangkum hasil sintesis konseptual, tetapi juga memperjelas bahwa perubahan ruang dapat dipahami sebagai proses strategis yang dibentuk, diarahkan, dan distabilkan melalui interaksi berbasis jejak dalam sistem arsitektur. Oleh karena itu, pembahasan berikutnya difokuskan pada penempatan model yang diusulkan dalam kaitannya dengan pendekatan desain arsitektur kontemporer untuk menegaskan kontribusi konseptual dan posisi kebaruannya.

3.4. Diskusi dan Implikasi terhadap Strategi Desain Arsitektur Kontemporer

Model yang diusulkan menunjukkan bahwa transformasi arsitektur tidak cukup dipahami sebagai urutan perubahan yang mengikuti durasi waktu, tetapi sebagai dinamika relasional yang berkembang melalui interaksi antara mekanisme spasial dan fase temporal. Dalam kerangka ini, lima sistem *stigmergy* yang telah diidentifikasi tidak bekerja sebagai komponen yang terpisah, melainkan sebagai lapisan mekanisme yang mengambil intensitas peran berbeda pada setiap fase transformasi. Karena itu, perubahan ruang tidak dipahami sebagai hasil dari satu faktor tunggal, tetapi sebagai konsekuensi dari hubungan dinamis antar sistem dalam struktur waktu yang terorganisasi. Pembacaan ini menggeser cara pandang terhadap transformasi arsitektur dari model kronologis menuju model strategis dan relasional.

Implikasi pertama dari model ini adalah perubahan posisi desain terhadap perubahan itu sendiri. Jika dalam pendekatan konvensional perubahan umumnya dibaca sebagai konsekuensi penggunaan bangunan setelah desain selesai, maka model ini menempatkan perubahan sebagai bagian inheren dari strategi desain. Dengan demikian, fokus tidak lagi terletak pada kapan perubahan terjadi, tetapi pada bagaimana perubahan itu dibentuk, diarahkan, distabilkan, dan direorganisasi

melalui interaksi antara *controlling*, *guiding*, *protecting*, *direction*, dan *zoning system*. Posisi ini menegaskan bahwa ruang dapat dirancang sejak awal sebagai sistem yang membuka kemungkinan evolusi secara bertahap, bukan sekadar merespons kondisi yang muncul kemudian.

Dibandingkan dengan *adaptive architecture*, model ini memiliki irisan pada pemahaman bahwa bangunan perlu mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan pengguna (Lee dkk., 2021). Namun, pendekatan adaptif pada umumnya masih menekankan respons terhadap stimulus eksternal yang terjadi selama bangunan beroperasi. Model dalam penelitian ini melangkah lebih jauh dengan memosisikan transformasi bukan semata sebagai kemampuan responsif, tetapi sebagai strategi desain yang telah diantisipasi sejak tahap konseptual melalui hubungan antara mekanisme *stigmergy* dan fase temporal. Dengan demikian, kebaruan model ini tidak hanya terletak pada kemampuan menjelaskan perubahan, tetapi pada cara perubahan tersebut ditempatkan sebagai bagian dari desain sejak awal.

Jika dibandingkan dengan *responsive systems*, perbedaannya terletak pada sumber dan logika transformasinya. Pendekatan responsif umumnya menekankan interaksi antara bangunan, pengguna, dan lingkungan melalui sensor, teknologi digital, atau material responsif, sehingga perubahan ruang lebih sering dipahami sebagai hasil operasional dari sistem yang telah diprogram sebelumnya (Lee dkk., 2021). Sementara itu, model yang diusulkan dalam penelitian ini tidak terutama bertumpu pada teknologi kontrol, tetapi pada akumulasi jejak interaksi yang berkembang melalui hubungan antara *agent*, *medium*, dan *trace*. Dalam arti ini, transformasi dipahami bukan sebagai reaksi sistem terhadap input tertentu, melainkan sebagai evolusi yang tumbuh dari dinamika relasional dalam sistem spasial.

Dalam hubungannya dengan *resilient design*, model ini juga memiliki perbedaan orientasi. *Resilient design* berfokus pada kemampuan sistem untuk bertahan, pulih, dan mempertahankan kinerja ketika menghadapi gangguan atau tekanan eksternal (Castaño-

Rosa dkk., 2022; Cerè dkk., 2017) Sebaliknya, model ini tidak memandang perubahan terutama sebagai gangguan yang harus diatasi, tetapi sebagai bagian normal dari dinamika sistem arsitektur yang memungkinkan terjadinya reorganisasi ruang. Dengan kata lain, fokus utama model ini bukan pemulihan menuju kondisi sebelumnya, melainkan perkembangan menuju konfigurasi baru yang relatif stabil. Dalam konteks tersebut, perubahan bukan diposisikan sebagai ancaman terhadap stabilitas, tetapi sebagai mekanisme yang justru membentuk stabilitas baru melalui fase *reconfiguration*.

Perbedaan lain tampak ketika model ini dibaca dalam kaitannya dengan pendekatan komputasional dan generatif, termasuk *parametric systems*. Pendekatan-pendekatan ini umumnya menekankan manipulasi variabel formal untuk menghasilkan variasi geometri dan konfigurasi bentuk, atau membangun sistem desain berbasis aturan yang memungkinkan eksplorasi bentuk secara luas ((Dierichs & Menges, 2021; Semjén & Szép, 2025; Zhuang dkk., 2025) Meskipun sama-sama berpijak pada relasi antarelemen, model yang diusulkan dalam artikel ini tidak berfokus pada variasi formal sebagai keluaran utama. Sebaliknya, perhatian utamanya terletak pada mekanisme interaksi dan akumulasi jejak sebagai dasar transformasi. Karena itu, transformasi dipahami bukan hanya sebagai hasil pengolahan bentuk, tetapi sebagai evolusi spasial yang tumbuh dari relasi antara pengguna, lingkungan, material, dan sistem ruang.

Kedekatan paling kuat justru terlihat pada *process-based architecture*, yang memandang arsitektur sebagai sistem yang terus berkembang melalui penggunaan, perubahan, dan interaksi dengan lingkungan, bukan sebagai objek final yang berhenti pada tahap penyelesaian desain (Staehr dkk., 2025). Pandangan ini sejalan dengan gagasan bahwa setiap komponen bangunan memiliki siklus perubahan yang berbeda sepanjang waktu (Askar dkk., 2021). Namun, model dalam penelitian ini melangkah lebih jauh dengan memberikan struktur operasional yang lebih jelas terhadap gagasan tersebut. Empat fase transformasi—*activation*, *intensification*, *structural shift*, dan *reconfiguration*—

menjelaskan bagaimana perubahan berkembang, sedangkan lima sistem *stigmergy* menjelaskan mekanisme yang bekerja di dalam tiap fase tersebut. Dengan demikian, gagasan arsitektur sebagai proses tidak berhenti pada tingkat konseptual, tetapi diperjelas menjadi model strategis yang dapat digunakan untuk membaca dan merancang perubahan ruang secara lebih sistematis.

Dalam konteks ini, posisi kebaruan model yang diusulkan terletak pada tiga aspek utama. Pertama, penelitian ini mereposisi *stigmergy* bukan hanya sebagai metode generatif atau analogi biologis, tetapi sebagai strategi desain yang menjelaskan bagaimana transformasi ruang dapat berkembang melalui interaksi tidak langsung dalam sistem arsitektur. Kedua, penelitian ini menempatkan waktu bukan sebagai durasi kronologis, melainkan sebagai struktur strategis yang mengarahkan evolusi sistem melalui fase-fase transformasi. Ketiga, penelitian ini mengintegrasikan prinsip *self-organization* dari sistem kompleks dengan arsitektur sebagai proses, sehingga perubahan ruang dipahami sebagai hasil interaksi mekanisme yang berlangsung bertahap dan berkelanjutan (Boldini dkk., 2024; Heylighen, 2016a, 2016b; Staehr dkk., 2025)). Dengan demikian, model yang diusulkan tidak hanya menjelaskan proses perubahan ruang, tetapi juga menyediakan kerangka teoretis bagi pengembangan strategi desain arsitektur yang lebih adaptif, relasional, dan terbuka terhadap evolusi dalam dimensi waktu.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menunjukkan bahwa model yang diusulkan memperluas cara pandang terhadap transformasi arsitektur dari pendekatan yang cenderung reaktif, formal, atau berbasis respons menuju strategi desain yang relasional dan berbasis waktu. Temuan tersebut menegaskan bahwa perubahan ruang dapat dipahami sebagai bagian inheren dari desain sejak tahap konseptual, bukan sekadar akibat dari kondisi eksternal setelah bangunan digunakan. Dalam hal ini, kontribusi artikel terletak pada penyediaan kerangka konseptual yang menempatkan *stigmergy* dan waktu sebagai dasar untuk membaca sekaligus merancang

evolusi ruang secara bertahap dalam sistem arsitektur.

4. KESIMPULAN

Artikel ini menunjukkan bahwa *stigmergy* dapat direposisi dari sekadar mekanisme generatif menjadi strategi transformasi desain arsitektur berbasis waktu. Secara lebih umum, temuan penelitian ini menegaskan bahwa transformasi desain arsitektur dapat dipahami sebagai proses strategis yang berkembang melalui hubungan antara mekanisme spasial dan struktur temporal, bukan sekadar sebagai urutan perubahan yang berlangsung secara kronologis. Berdasarkan sintesis konseptual yang dilakukan, penelitian ini mengidentifikasi lima sistem *stigmergy*—*controlling*, *guiding*, *protecting*, *direction*, dan *zoning*—sebagai mekanisme dasar yang membentuk perubahan konfigurasi ruang secara bertahap. Penelitian ini juga merumuskan empat fase transformasi temporal, yaitu *activation*, *intensification*, *structural shift*, dan *reconfiguration*, yang menjelaskan bagaimana perubahan berkembang dari pembentukan jejak awal hingga tercapainya konfigurasi baru yang relatif stabil. Integrasi antara kedua lapisan tersebut menghasilkan *Strategic Temporal Transformation Matrix* sebagai model konseptual untuk membaca transformasi arsitektur sebagai dinamika relasional antara mekanisme spasial dan fase temporal.

Temuan ini menegaskan bahwa *stigmergy* dalam arsitektur tidak lagi perlu dipahami hanya sebagai metode generatif atau analogi biologis, melainkan sebagai strategi desain untuk menjelaskan bagaimana ruang berkembang melalui interaksi tidak langsung berbasis jejak. Dalam kerangka ini, waktu juga tidak lagi diposisikan sebagai latar eksternal yang hanya mencatat perubahan, tetapi sebagai struktur strategis yang mengarahkan evolusi sistem arsitektur. Dengan demikian, manfaat utama temuan ini sebagai *state of the art* terletak pada perluasan cara pandang terhadap transformasi arsitektur, yaitu dari pendekatan yang cenderung reaktif, formal, atau berbasis respons menuju model yang memahami perubahan sebagai bagian inheren dari strategi desain sejak tahap konseptual. Melalui posisi tersebut, artikel ini menawarkan kontribusi konseptual dengan menghubungkan prinsip

self-organization dalam sistem kompleks dengan arsitektur sebagai proses, sehingga perubahan ruang dapat dipahami sebagai interaksi mekanisme yang berlangsung bertahap, berkelanjutan, dan terorganisasi.

Secara teoretis, penelitian ini memberikan kerangka baca sekaligus kerangka rancang bagi pengembangan pendekatan arsitektur yang lebih adaptif, relasional, dan terbuka terhadap evolusi ruang dalam dimensi waktu. Meskipun demikian, penelitian ini masih berada pada tataran sintesis konseptual. Karena itu, penelitian lanjutan perlu diarahkan pada pengujian model melalui studi kasus empiris, penerapan pada tipologi bangunan yang berbeda, serta pengembangan indikator operasional yang memungkinkan hubungan antara sistem mekanisme dan fase transformasi dibaca secara lebih terukur dalam praktik desain.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama (NHN) merupakan penulis utama yang berkontribusi pada konseptualisasi penelitian, pengembangan kerangka teoretis, analisis, penulisan draf awal, dan penyusunan naskah akhir.

Penulis kedua (KDP) berkontribusi pada pengembangan gagasan, penelaahan kritis substansi, dan penyempurnaan argumentasi akademik. Kedua penulis menyetujui versi akhir artikel.

REFERENSI

- Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2021). Adaptability of buildings: A critical review on the concept evolution. *Applied Sciences*, 11(10), 4483. <https://doi.org/10.3390/app11104483>
- Boldini, A., Civitella, M., & Porfiri, M. (2024). Stigmergy: From mathematical modelling to control. *Royal Society Open Science*, 11(9), 240845. <https://doi.org/10.1098/rsos.240845>
- Castaño-Rosa, R., Pelsmakers, S., Järventausta, H., Poutanen, J., Tähtinen, L., Rashidfarokhi, A., & Toivonen, S. (2022). Resilience in the built environment: Key characteristics for solutions to multiple crises. *Sustainable Cities and Society*, 87,

104259.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104259>
- Cerè, G., Rezgüi, Y., & Zhao, W. (2017). Critical review of existing built environment resilience frameworks: Directions for future research. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25, 173–189.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.09.018>
- DeLanda, M. (2016). *Assemblage theory*. Edinburgh University Press.
- Dias, C. S., Trivedi, M., Volpe, G., Araújo, N. A. M., & Volpe, G. (2023). Environmental memory boosts group formation of clueless individuals. *Nature Communications*, 14, 7324.
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-43099-0>
- Dierichs, K., & Menges, A. (2021). Designing architectural materials: From granular form to functional granular material. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(6), 065010. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac2987>
- Heidrich, O., Kamara, J. M., Maltese, S., Re Cecconi, F., & Dejaco, M. C. (2017). A critical review of the developments in building adaptability. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 35(4), 284–303.
<https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2017-0018>
- Heylighen, F. (2016a). Stigmergy as a universal coordination mechanism I: Definition and components. *Cognitive Systems Research*, 38, 4–13.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2015.12.002>
- Heylighen, F. (2016b). Stigmergy as a universal coordination mechanism II: Varieties and evolution. *Cognitive Systems Research*, 38, 50–59.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2015.12.007>
- Lee, J. H., Ostwald, M. J., & Kim, M. J. (2021). Characterizing smart environments as interactive and collective platforms: A review of the key behaviors of responsive architecture. *Sensors*, 21(10), 3417.
<https://doi.org/10.3390/s21103417>
- Lin, Y., Xu, L., Yang, W., Tian, L., & Chan, M. (2025). A systematic review on the research and development of adaptive buildings. *Buildings*, 15(10), 1593.
<https://doi.org/10.3390/buildings15101593>
- Nabawi, N. H., Paramita, K. D., & Yatmo, Y. A. (2022). Stigmergy mechanism as a form of architectural space programming. *Civil Engineering and Architecture*, 10(6), 2258–2289.
<https://doi.org/10.13189/cea.2022.100604>
- Salman, M., Garzón Ramos, D., & Birattari, M. (2024). Automatic design of stigmergy-based behaviours for robot swarms. *Communications Engineering*, 3, 30.
<https://doi.org/10.1038/s44172-024-00175-7>
- Semjén, Á. Á., & Szép, J. (2025). Integrating generative and parametric design with BIM: A literature review of challenges and research gaps in construction design. *Applications in Engineering Science*, 23, 100253.
<https://doi.org/10.1016/j.apples.2025.100253>
- Staehr, E. R., Stevik, T. K., & Houck, L. D. (2025). Adaptability in the building process: A multifaceted perspective across the life cycle of a building. *Buildings*, 15(7), 1119.
<https://doi.org/10.3390/buildings15071119>
- Thomsen, M. R. (2022). Computational design logics for bio-based design. *Architectural Intelligence*, 1, 13.
<https://doi.org/10.1007/s44223-022-00015-8>
- Zhuang, X., Zhu, P., Yang, A., & Caldas, L. (2025). Machine learning for generative architectural design: Advancements, opportunities, and challenges. *Automation in Construction*, 174, 106129.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106129>