

CONSTRUCTION EXPLORATION OF RECIPROCAL- DEPLOYABLE BAMBOO IN GRIDSHELL STRUCTURE SYSTEM

¹Charnele. ²Anastasia Maurina, ST., MT

*¹ Student in the Bachelor's (S-1) Study Program in Architecture
at Parahyangan Catholic University*

*² Senior lecturer in the Bachelor's (S-1) Study Program in Architecture
at Parahyangan Catholic University*

Abstract

Existence of the need for a semi-permanent or temporary shelters that are easily and quickly built for certain events, for this reason this study explored the potential of transformative wide-span structures with the development and development of usable and reciprocal structural systems in the form of bamboo gridshell roof structures, into an independent arrangement composed of configuration modules with computational assistance according to architectural design needs. This is done by knowing the adequate potential of structural systems, design patterns, and connection systems in several study objects that are evaluated by comparative methods on system structure, connections, trunk character, distribution load, structure locking system, and application.

The benefits of research on bamboo research for new materials in the engineering of bamboo materials that can increase the value of Indonesian locality by being able to be used by the community are needed in using bamboo materials for the development of permanent permanent shade.

In result, discussion of the criteria for structural systems according to research objectives analysis of the objects of the study where transformation structures based on character structures that can be used as reciprocal structures are supporting systems to provide stability and an independent locking system. both of these structures are flexible and easily duplicated structural systems so that according to the wide span structure, the structural system is designed to make a gridshell. this gridshell form is processed with computational help to effectively create reciprocal-deployable structure systems.

The research was explored, experiments were carried out on reciprocal patterns to find the most stable patterns and change the character of straight rods into reciprocal rods that could be deployed using elements such as scissors, which then developed the connection type with potential analyzers and displacement of each connection. The experiment produced a new structural system by collecting the second structural system obtained by a structure that can be transformed, has an independent locking system, and can stretch wide with a gridshell shape.

Keywords : *reciprocal, deployable, dome, gridshell, transformable*

EKSPLORASI KONSTRUKSI BAMBU RECIPROCAL- DEPLOYABLE GRIDSHELL

¹Charnele. ² Anastasia Maurina, ST., MT

¹ Mahasiswa S1 Program Studi Arsitektur Universitas Katolik Parahyangan

² Dosen Pembimbing S1 Program Studi Arsitektur Universitas Katolik Parahyangan

¹ *Corresponding author: charneloe@gmail.com*

Abstrak

Adanya keterbutuhan akan naungan semi-permanen atau sementara yang mudah dan cepat dibangun untuk sesuatu peristiwa tertentu. Pada penelitian ini menggali potensi struktur bentang lebar transformatif dengan menggabungkan dan mengembangkan sistem struktur konstruksi deployable dan reciprocal dalam bentuk struktur atap bidang gridshell bambu, menjadi sebuah konfigurasi mandiri tersusun dari variasi komposisi modul dengan bantuan komputasional mengikuti kebutuhan desain arsitektur. Hal ini dilakukan dengan mengetahui potensi sistem struktur, pola desain, dan sistem sambungan pada beberapa objek studi yang dievaluasi secara kualitatif dengan metode komparasi pada sistem struktur, sambungan, karakter batang, penyaluran beban, sistem penguncian struktur, dan deployability.

Manfaat penelitian berfokus pada penelitian struktur bambu untuk menjadi inovasi baru dalam keteknikan material bambu yang dapat meningkatkan nilai lokalitas Indonesia dengan dapat digunakan masyarakat terutama dalam menggunakan material bambu untuk pengembangan naungan sementara maupun permanen.

Pembahasan mengenai kriteria sistem struktur sesuai tujuan penelitian merupakan hasil dari analisa objek studi dimana struktur transformasi berdasarkan karakter struktur deployable sedangkan struktur reciprocal merupakan sistem yang menyokong untuk memberikan kestabilan dan sistem penguncian mandiri. Kedua struktur ini merupakan sistem struktur yang fleksible dan mudah diduplikasi sehingga untuk memenuhi fungsi sebagai struktur bentang lebar, sistem struktur didesain membentuk gridshell. Bentuk gridshell ini yang diolah dengan bantuan komputasional untuk membentuk sistem struktur reciprocal-deployable secara efektif.

Penelitian yang bersifat eksplorasi, eksperimen dilakukan pada pola reciprocal hingga menemukan pola paling stabil dan mengubah karakter batang lurus pada reciprocal menjadi batang deployable berupa scissor-like element, lalu mengembangkan jenis sambungan dengan analisa potensi dan kendala tiap sambungan. Eksperimen menghasilkan sistem struktur baru dengan menggabungkan kedua sistem struktur didapatkan struktur yang dapat bertransformasi, memiliki sistem penguncian mandiri, dan dapat membentang lebar dengan bentuk gridshell.

Kata-kata kunci: reciprocal, deployable, bidang lengkung, gridshell, transformatif

1. PENDAHULUAN

Kemudahan dan kecepatan pada konstruksi naungan dewasa ini menjadi acuan perkembangan teknologi struktur dalam bidang arsitektur. Terlebih lagi kebutuhan dalam waktu singkat akan naungan menjadi prioritas utama di tempat-tempat kritis seperti paska-bencana alam ataupun lokasi yang sulit dicapai. Terkadang kita juga membutuhkan naungan semi-permanen atau sementara yang mudah dan cepat dibangun untuk sesuatu peristiwa tertentu.

Pemilihan material konstruksi pun menjadi salah satu titik permasalahan, dimana material yang digunakan harus mudah ditemukan dan dikondisikan dalam iklim kita yaitu tropis. Faktor pertimbangan lain merupakan pemilihan sistem struktur yang mudah, ringan, dan cepat konstruksi menjadi solusi utama yang dapat menyelesaikan permasalahan naungan dengan sistem rangka Reciprocal berfungsi sebagai naungan kecil maupun naungan besar untuk fungsi umum. Selain itu, struktur deployable adalah struktur yang dapat bertransformasi bentuk dari kompak menjadi struktur yang lebih besar. Struktur ini relatif ringan dan mudah dalam segi transportasi. Karakteristik sistem struktur dengan hubungan sendi antar elemen membuka potensi sistem ini bertransformasi. Hal ini mendukung kecepatan dan kemudahan dari segi pemasangan dan pembongkaran struktur. Struktur deployable dapat berupa planar maupun spasial, mengikuti kebutuhan besaran naungan, juga dapat dikembangkan dengan penambahan beberapa komponen struktur.

Pengambilan beberapa objek studi mengenai desain struktur dan konstruksi reciprocal, deployable, gridshell, dengan penggabungan 2 jenis struktur-konstruksi dan lebih yaitu reciprocal-deployable, reciprocal gridshell, deployable gridshell, dan reciprocal-deployable gridshell pada masing masing kelompok diambil 2 objek studi.

Dengan kriteria konstruksi dalam penelitian dapat bertransformasi, memiliki sistem penguncian mandiri dan dapat membentuk bangunan bentang lebar dengan bidang lengkung. Pengembangan konstruksi bambu dengan mengkombinasikan potensi sistem konstruksi reciprocal-deployable, reciprocal gridshell, deployable gridshell dan reciprocal deployable gridshell dengan menganalisa masing masing dua objek studi.

Meneliti lebih lanjut konfigurasi struktur bambu reciprocal-deployable yang dapat membentang lebar dengan bentuk sistem gridshell, maka dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut: (1) potensi dan kendala sistem konstruksi pada studi preseden; (2) potensi dari penggabungan desain struktur reciprocal-deployable pada bentuk gridshell dalam pemenuhan kriteria struktur transformatif, memiliki sistem penguncian mandiri, dan dapat membentuk bentang lebar dengan bidang lengkung; dan (3) potensi pengembangan bentuk dari sistem struktur Reciprocal-Deployable dengan pendekatan komputasional.

Penelitian ini bertujuan untuk menggali potensi struktur bentang lebar transformatif dengan menggabungkan dan mengembangkan sistem struktur konstruksi deployable dan reciprocal dalam bentuk struktur atap bidang gridshell bambu, menjadi sebuah konfigurasi mandiri tersusun dari variasi komposisi modul dengan bantuan komputasional mengikuti kebutuhan desain arsitektur. Manfaat dari penelitian ini menjadi inovasi baru dalam keteknikan material bambu yang dapat meningkatkan nilai lokalitas Indonesia dan mengikuti perkembangan teknologi dengan memanfaatkan potensi analisa komputer sebagai pengembangan potensi bentuk tidak terbatas dari sistem struktur terhadap pengembangan naungan sementara maupun permanen. Sistem struktur diharapkan dapat menjadi alternatif pengembangan perencanaan di Arunika Waldorf yang berfungsi sebagai struktur atap bangunan aula bersama.

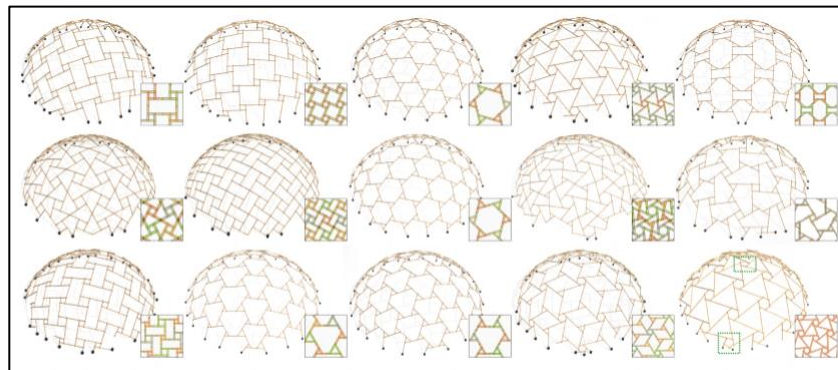
Metode penelitian yang digunakan adalah evaluatif dengan menganalisa data teori dengan data preseden. Membuat sintesa potensi dan kekurangan dari masing-masing objek studi. Hasil analisa ini kemudian dieksplorasikan untuk menemukan kriteria sistem struktur reciprocal-deployable membentuk struktur atap bidang gridshell dengan sistem struktur spasial. Selanjutnya menggunakan metode Riset Through Design dengan mengeksplorasi konfigurasi sistem struktur gabungan dan potensi-potensi pengembangannya melalui eksperimen berupa maket bentuk (analog) dan sistem komputer (komputasional).

2. KAJIAN TEORI

Bambu, Pemilihan bahan bangunan akan melalui analisa fungsional, teknis dan faktor ekonomi. Dewasa ini, faktor keberlanjutan menjadi isu yang terus diangkat dalam pemilihan bahan bangunan. Pada tahun 1990, Speth dan Ehrlich mengenalkan relasi keberlanjutan dengan populasi dunia. Pembangunan yang menjadi isu lingkungan, menjadi salah satu target keberlanjutan. Bambu, sebagai material yang mudah diperbaharui menjadi salah satu alternatif keberlanjutan untuk menggantikan bahan bangunan seperti beton, baja dan kayu.

Reciprocal, dalam buku *Reciprocal Frame Architecture*, Popovic Larsen menyatakan bahwa Reciprocal Frame merupakan tiga dimensional struktur secara umum digunakan sebagai struktur atap, secara konstan berupa hubungan mutual antara balok yang saling mendukung dalam sebuah sirkuit tertutup. Pada setiap bagian dalam balok didukung oleh balok lain. Pada bagian luar balok didukung oleh dinding luar, ring balok, atau kolom. Secara mutual radial, balok-balok diletakkan saling terkait mengelilingi dari tengah dari suatu poligon.

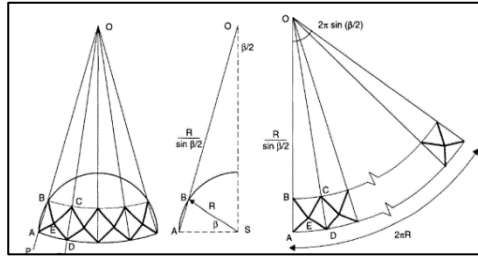
Menurut seorang dosen dari sekolah arsitektur di Nancy, France bernama Olivier Baverel meneliti bentuk geometri kompleks dari grid yang berulang. Kombinasi unit-unit geometri dalam radius dan panjang mengontrol curvatur dari struktur kompleks. Beliau menggunakan genetik algoritma untuk menggenerasi dan menentukan hubungan tiap unit pada struktur kompleks. Baverel menyebut struktur ini sebagai 'nexorades', berasal dari bahasa Latin 'nexor' yang berarti link.



Figur 1 Potensi Bentuk Gridshell dari Konstruksi Reciprocal
(sumber: jurnal penelitian, *Reciprocal Frame Structure Made Easy*)

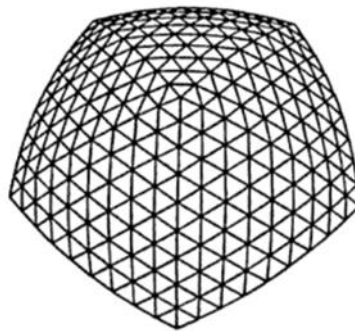
Deployable, Struktur Deployable dibandingkan dengan struktur lainnya memiliki keunggulan dalam kecepatan pemasangan, biaya tenaga kerja maupun ketersediaan sumber daya manusia yang terbatas, kemampuan untuk bongkar-pasang konstruksi, dan kemudahan dalam transportabilitas. Disamping itu, sistem struktur deployable membutuhkan sistem sambungan yang lebih canggih, mahal, bisa bergerak, memiliki mekanisme penguncian, dan mekanisme buka-tutup. Hal berbanding lurus dengan potensi struktur dalam beradaptasi, mobilitas, dan penghematan tenaga kerja.

Titik eksentrisitas atau pusat massa elemen batang deployable ditentukan melalui perhitungan circular pantograph yang memiliki panjang semi-batang setara dari derajat angular yang membagi radius pelengkungan struktur menjadi komponen-komponen scissor-like element.



Figur 1 Diagram Letak Eksentrisitas
(sumber : *Deployable Structures*, hal. 33)

Gridshell, Struktur cangkang memegang peranan penting dalam desain arsitektur dalam pengolahan geometri dan spasial terklasifikasikan kedalam : 1) lattice space structure, 2) continuous (bidang, cangkang, membran), dan 3) gabungan. Gridshell merupakan struktur bidang lengkung bentang besar dimana dapat terdiri dari batang lurus maupun batang lengkung, dan berupa double-curvature dengan bentuk sinklastik. Gridshell dibedakan dari jenis struktur bentuk-aktif lain yang sama-sama menahan beban terutama melalui kompresi. Struktur seperti ini disebut kerangka ruang melengkung. Contohnya termasuk kubah geodesik dan Zeiss-Dywidag, lamela, dan rangka barel. Struktur kubah merupakan struktur bentuk yang aktif menyalurkan beban secara tiga dimensional. Struktur kubah memiliki lengkungan ganda sehingga lebih kaku karena menghasilkan resistansi gaya internal (Faber,1963).



Figur 2 Struktur *gridshell* icosahedron
(sumber : *Space Structure 4 vol.1*, hal.1086)

Komputasional, Komputasional desain merupakan sebuah alat interaktif untuk memungkinkan pengguna dengan mudah merancang dan memvisualisasikan struktur Batang Reciprocal dalam tiga dimensional. Struktur Batang Reciprocal dibentuk oleh susunan batang dengan hirarki 2 tingkat. Di tingkat pertama, unsur-unsur mendasar yaitu batang dengan dimensi tertentu. Elemen tingkat kedua adalah unit batang Reciprocal, yang terdiri dari tiga atau lebih batang. Tahapan perencanaan berdasarkan pendekatan Daniel Piker ,sebagai berikut:

- a. Pendesainan bentuk awal,
- b. Membentuk ulang bidang menjadi konfigurasi jaring (mesh) sehingga membentuk perkiraan panjang batang yang akan digunakan,

- c. Pengaturan derajat kemiringan dan panjang batang untuk membuat persimpangan reciprocal, dan
- d. Dynamic relaxation untuk mengoptimalkan kemiringan batang dan perletakkannya.

3. METODA PENELITIAN

Metoda pengumpulan data menggunakan cara evaluasi mengenai pengertian dan karakteristik sistem struktur deployable, sistem struktur reciprocal, serta potensi penggabungan sistem struktur reciprocal dan deployable melalui buku, jurnal, maupun penelitian yang sudah pernah dilakukan.

Analisa data dilakukan secara kualitatif dikategorikan berdasarkan keunggulan dan kekurangan dari setiap objek studi melalui komparasi beberapa unsur bangunan terutama dalam hubungan keseluruhan elemen batang dalam sistem struktur dan sistem sambungan antar elemen batang. Setelah mendapatkan kriteria struktur yang sesuai dengan tujuan penelitian, dilakukan eksplorasi sistem struktur.

4. ANALISA

Pengambilan sampel objek studi didasarkan dengan sistem konstruksi yang telah diteliti mengenai konstruksi reciprocal, deployable, dan gridshell, dimana terdapat empat jenis konstruksi yang didapatkan dari hasil penggabungan dua atau lebih sistem konstruksi.

Skripsi oleh Bernadette Sudira, merupakan sebuah rangkaian tertutup yang menggabungkan sistem struktur deployable pada bagian badannya dan struktur reciprocal pada bagian atapnya sebagai sistem penguncian mandiri pada struktur. Kemampuannya untuk menjadi kompak memudahkan dalam transportabilitas.



Figur 3 Sambungan pada Struktur Reciprocal

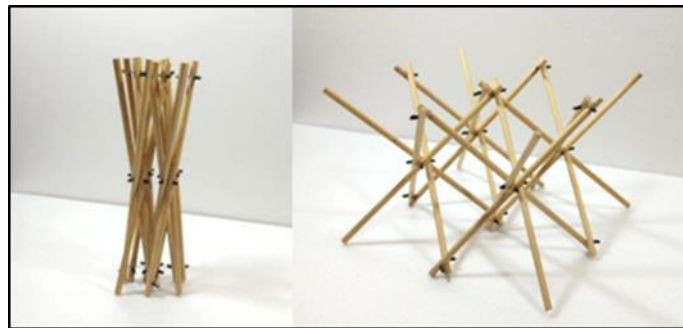
Sistem penguncian mandiri pada sistem reciprocal pada bagian atap bangunan memerlukan sambungan khusus berupa ring yang dikuncikan pada batang bambu sehingga pada saat struktur terbuka, batang bagian atas akan saling menopang. Sistem struktur ini membentuk konfigurasi tertutup sehingga tidak memungkinkan untuk menduplikasi modul ketiga arah, yaitu axis x, y, dan z.

Berdasarkan penelitian terhadap sambungan pada bangunan Geladak Lipat dan Bamboo Community Hall sebagai objek studi, menggunakan sambungan mur dan baut yang dibuat dua jenis sambungan, yaitu sendi dan jepit.

Skripsi oleh Yosafat Bakti, mengenai eksplorasi struktur yang dapat terduplikasi kedua arah dengan menggunakan sistem struktur reciprocal yang digunakan di tenda India (Yurt) untuk mencapai kestabilan, diduplikasi secara dua arah sebagai bidang atap atau membentuk ruang didalamnya. Sedangkan dalam sistem deployable memanfaatkan karakteristik sambungan sendi yang dapat bergerak.

Sistem struktur rancangan Bernadette Sudira mengenai struktur reciprocal-deployable menjadi dasar perancangan sistem struktur bangunan dengan penguncian mandiri pada sambungan atap. Berbeda dengan sistem struktur Bernadette yang menggunakan ring sebagai sambungan pada bagian atapnya, sistem struktur rancangan Yosafat tidak menggunakan ring melainkan menyederhanakan sambungan dengan menggunakan 2 batang as drat yang dibentuk (+).

Berdasarkan analisa terhadap maket yang dibuat berhasil membentuk sistem struktur yang stabil dan memiliki sistem penguncian mandiri. Modul yang telah dirancang dapat diduplikasi ketiga arah yaitu axis x, y dan z.



Figur 4 Dokumentasi Hasil Penelitian Yosafat

Da Vinci Dome, Bentuk gridshell dari pengolahan sistem struktur reciprocal jembatan Leonardo Da Vinci oleh Hiroji Murata di Jepang yang dibangun hanya oleh 3 orang. Sejak 1990-an, struktur bidang multiaksial ditemukan dari sudut pandang bentuk polihedral melihat bentuk-bentuk organik yang ada di alam. Struktur ini adalah struktur yang ditemukan oleh perpaduan pemikiran geometri dasar struktur polihedral dengan geometri non-Euclidean. Namun pertukangan dengan sambungan manual dan sederhana.

Pelengkungan bentuk planar menjadi bidang lengkung pada struktur reciprocal merupakan perubahan pada nexorades yaitu derajat kemiringan batang sedangkan pada kasus Da Vinci Dome ini, batang bilah bambu diikat(transformasi jadi lengkung) dengan batang lain dengan kata lain menggunakan batang lengkung untuk membentuk lengkung bidang lengkung akibat sistem sambungan tetap/fixed.



Figur 5 Bentuk Da Vinci Dome

KREOD Pavillion, Pavillion yang dibuat di London menambah ketertarikan masyarakat pada desain keberlanjutan tanpa melupakan faktor lain seperti estetika, fungsionalitas, ekonomis dan juga ramah lingkungan. Pavillion ini menarik dalam hal penggunaan komputasional dalam konstruksi, dimulai dari ukuran batang, banyak batang, hingga sambungan sudah terukur secara digital. Hal ini mendorong dunia arsitektur ke dalam kemajuan teknologi yang memadukan material lokal dengan teknologi.

Pavillion ini terbentuk dari batang-batang kayu yang terfabrikasi dengan sambungan paku antar batang sehingga tidak dapat dirubah maupun di-deploy. Berfungsi sebagai fasilitas umum yang dapat dipindah membentuk kebutuhan ruang.



Figur 6 KREOD Pavillion

Pavillion PUC-Rio, Perencanaan yang dilakukan melalui form-finding secara digital menggunakan sistem struktur deployable bambu yang membentang seluas 17x12m sekitar 200m². Struktur rangka menggunakan struktur komposit tekstil dan space frame bambu dengan penyokong kolom bipod bambu, struktur atap bidang pantograf gridshell berbentuk planar dan balok truss bambu active-bending. Berfungsi sebagai naungan aktifitas bersama seperti pertunjukan terbuka, kelas-kelas kesenian, maupun aktivitas pengajaran.

Pavillion bentang lebar yang berfungsi sebagai amfiteater terbuka dan fasilitas bersama lainnya. Dengan struktur atap bidang menggunakan sistem struktur deployable dengan permainan perletakan sambungan yang membentuk grid tartan pada struktur deployable berdampak pada bentuk atap yang dihasilkan dengan multi-curvature.

Skripsi oleh Ellen Gohtami, berfokus pada pengaruh tartan grid pada bentuk akhir struktur deployable dimana letak sambungan sendi dan karakteristik batang yang menerus maupun

pendek berpengaruh pada hasil percobaan bentuk yang terjadi. Hal ini memungkinkan bidang lengkung dapat ditemukan dari eksplorasi perletakan sambungan sendi dan penggunaan karakter batang tertentu yaitu dapat berupa kombinasi batang pendek dan menerus. Eksplorasi potensi pengembangan bentuk struktur dari grid pantograph. Aspek utama dalam sistem konstruksi pantograf adalah fleksibilitas konstruksi untuk dapat bergerak.

Modul	Pola Grid	Jenis Sambungan		Bentuk
		Mur-baut	Ikat	
1				
2				
3				
4				

Figur 7 Hasil Penelitian oleh Ellen Gohtami

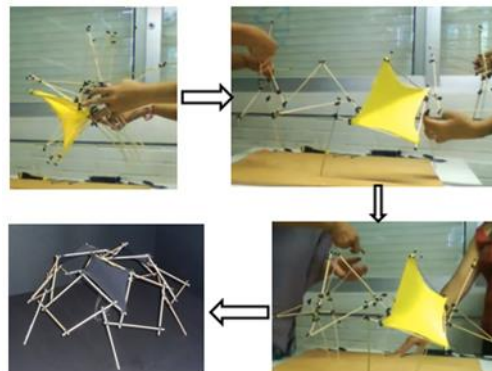
SmiA Eksperimen, penelitian ini berlandaskan pada pengolahan potensi morfologi struktur dan fungsi secara arsitektur. Struktur membrane deployable sebagai struktur yang dapat bertransformasi mengikuti kebutuhan arsitektur. Dengan pendekatan faktor keringan, adaptabilitas dan fleksibilitas struktur untuk mencapai kenyamanan baik pada eksterior maupun interior. Scissor-like Element yang dapat divariasikan letak eksentrisitas batang dan membuat potensi pengembangan bentuk akhir dari sistem deployable. Penggunaan Scissor-like Element yang disusun dalam grid segi 4 membuka secara tiga dimensional dengan dibantu struktur reciprocal pada bagian tengah modul sebagai ikatan angin menambah faktor kekakuan, dan membran sebagai elemen penguncian mandiri pada sistem struktur ini.



Figur 8 Modul Penelitian

Dalam perencanaan arsitektural, potensi duplikasi modul eksperimen memberikan banyak kemungkinan bentuk namun ada masalah drainase. Modul eksperimen dapat membentuk lengkungan untuk menggantikan struktur balok. Model dikembangkan berdasarkan pada prinsip duplikasi planar, namun dalam duplikasi bidang lengkung adanya permainan eksentrisitas batang. Semakin besar eksentrisitas semakin besar kelengkungannya.

PentaREC, penelitian dari bentuk dasar sistem struktur reciprocal batang membentuk pentagon menjadi 1 modul planar dengan duplikasi membalikan arah penyusunan batang dan membentuk sebuah gridshell. Kekurangannya, batang yang digunakan berupa batang menerus sehingga tidak memungkinkan untuk membentuk bentang lebar, sistem ini membentuk konfigurasi tertutup sehingga tidak bisa diduplikasi, dan sistem pengunciannya manual pada bagian atas struktur.



Figur 9 Sistem Deploy pada PentaREC

Penggunaan sistem sambungan diikat pada pusat reciprocal dan menggunakan sambungan sendi pada hubungan antar modul sehingga struktur dapat dibuka dan ditutup. Penggunaan membran pada struktur ini tidak mempengaruhi sistem kerja struktur. Beberapa batang elemen reciprocal berfungsi sebagai elemen kolom.

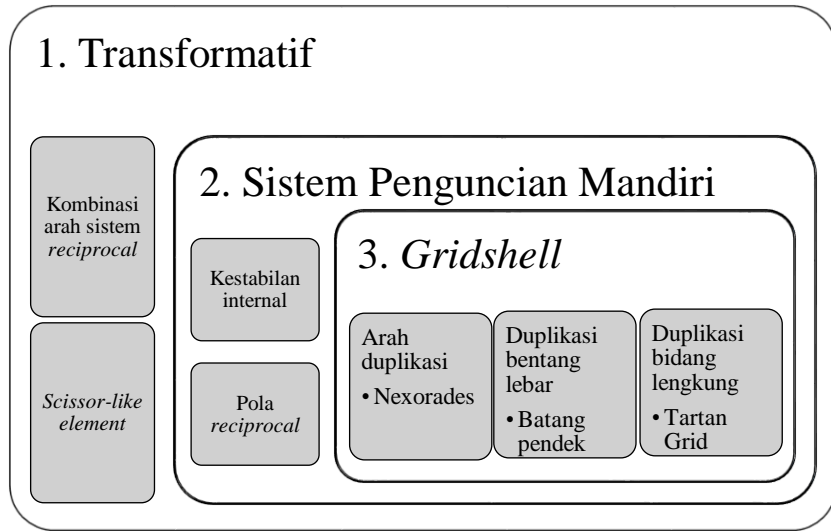
Berdasarkan analisa terhadap kedelapan objek studi, disimpulkan berdasarkan potensi dan kendala tiap objek studi diukur dari faktor kemampuan struktur bertransformasi, memiliki sistem penguncian mandiri, dan kemampuan untuk menduplikasi membentuk struktur bidang lengkung.

Tabel 1. Analisa Objek Studi

Struktur	Objek Studi	Potensi	Kendala
<i>Reciprocal Deployable</i>	Skripsi oleh Bernadette Sudira	<ul style="list-style-type: none"> - Membentuk sistem penguncian mandiri tanpa elementambahan - Dapat ditransformasi 	<ul style="list-style-type: none"> - Berupa konfigurasi tertutup sehingga tidak dapat diduplikasi - Tidak dapat membentuk bidang lengkung
	Skripsi oleh Yosafat Bakti	<ul style="list-style-type: none"> - Membentuk sistem penguncian mandiri tanpa elemen tambahan - Dapat ditransformasi - Dapat diduplikasi ketiga arah 	<ul style="list-style-type: none"> - Bentang bangunan terbatas dengan dimensi batang karena menggunakan batang menerus - Tidak dapat membentuk bidang lengkung
<i>Reciprocal Gridshell</i>	Da Vinci Dome	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat membentuk bangunan bentang lebar dengan membentuk bidang lengkung - Memiliki sistem penguncian mandiri 	Tidak dapat di transformasikan
	KREOD Pavillion	<ul style="list-style-type: none"> - Potensi bentuk tidak terbatas dengan komputasional - Memiliki sistem penguncian mandiri 	Tidak dapat ditransformasikan
<i>Deployable Gridshell</i>	Pavillion PUC-Rio	<ul style="list-style-type: none"> -Dapat transformasi -Potensi bentuk tidak terbatas dengan komputasional -Dapat membentuk bidang lengkung 	- Membutuhan elemen penguncian tambahan

<p>Skripsi oleh Ellen Gohtami</p>	<p>-Dapat transformasi -Potensi bentuk tidak terbatas dengan komputasional -Dapat membentuk bidang lengkung</p>	<p>- Membutuhan elemen penguncian tambahan</p>
<p>SmiA Eksperimen</p>	<p>- Dapat transformasi - Memiliki sistem penguncian mandiri - Dapat duplikasi kedua arah (sumbu x dan y) - Dapat membentuk bidang lengkung</p>	<p>-Membutuhkan elemen pengunci tambahan</p>
<p>PentaREC</p>	<p>- Dapat transformasi</p>	<p>- Sistem penguncian mandiri manual - Keterbatasan bentang(batang menerus) - Konfigurasi tertutup</p>

Berdasarkan analisa objek studi dihasilkan sintesa kriteria sistem struktur yang akan dikembangkan untuk mencapai tujuan penelitian. Sistem struktur yang dikembangkan merupakan sistem struktur yang dapat bertransformasi dari bentuk kompak menjadi bentuk akhir dengan sistem penguncian mandiri dengan mencapai stabilitas struktur, sistem struktur yang berbentuk gridshell diperlukan kemampuan untuk menduplikasi kedua arah dengan potensi membentuk bentang lebar dan bidang lengkung.



Figur 10 Diagram Kriteria Sistem Struktur

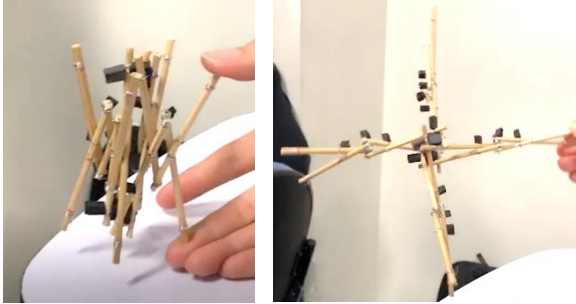
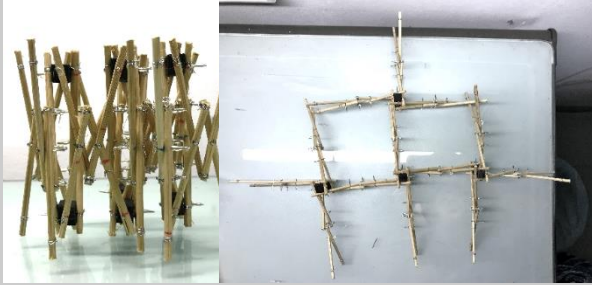
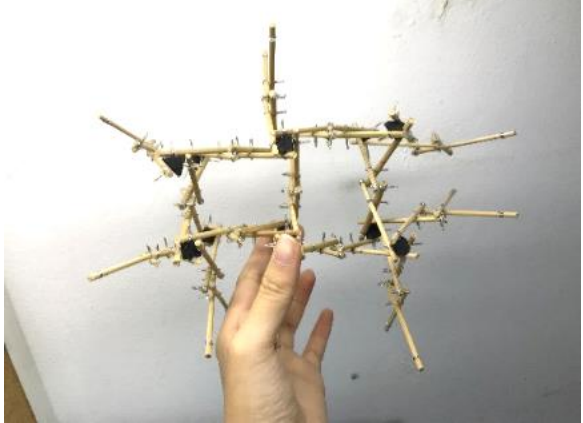
4.1 PENELITIAN SISTEM STRUKTUR

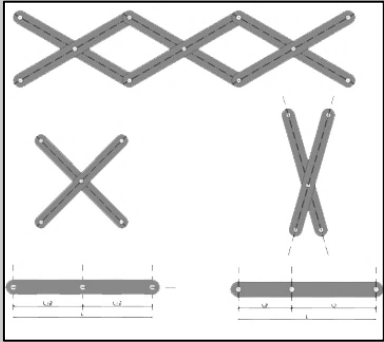

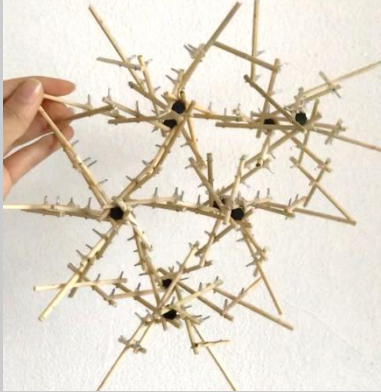

Dari kriteria pembentuk struktur terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi perancangan sistem struktur reciprocal-deployable gridshell. Pertama, sistem transformasi didapatkan dari kombinasi penyusunan batang juga menggunakan scissor-like element pada elemen batang sistem reciprocal. Karakteristik sistem deployable yang menggunakan sambungan sendi membuka potensi terhadap sistem struktur yang dapat bertransformasi.



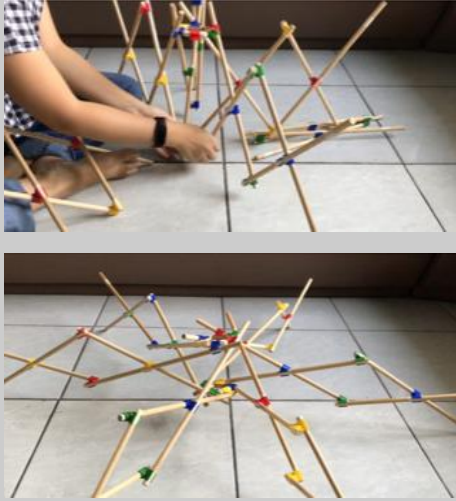
Berdasarkan kriteria transformatif, sistem penguncian mandiri, dan pembentuk gridshell dilanjutkan dengan penelitian sistem konstruksi melalui dua proses yaitu (1)perancangan maket kecil dengan skala 1:50 untuk menemukan sistem konstruksi sesuai kriteria dan (2)perancangan maket besar dengan skala 1:5 sebagai analisa pengembangan sistem sambungan pada konstruksi reciprocal-deployable.





Tabel 2. Penelitian Sistem Konstruksi

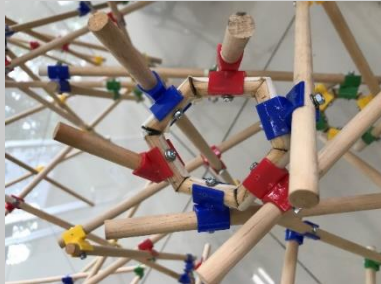


Tahapan	Gambar	Keterangan
Scissor-like Element		Pembuatan scissor-like element sebagai elemen batang reciprocal

<p>Konfigurasi Pola Reciprocal 4</p>		<p>Penggabungan elemen batang dalam susunan pola segi 4 <i>reciprocal</i>. Pola batang <i>scissor-like element</i> di susun membentuk pola penguncian ganda oleh sistem <i>reciprocal</i> dengan arah batang batang membentuk sistem penguncian yang saling meniadakan gaya.</p>
<p>Duplikasi Pola</p>		<p>Duplikasi Pola segi 4 <i>reciprocal</i> membuktikan kemampuan struktur untuk menduplikasi secara planar dan berpotensi membentuk struktur bentang lebar.</p>
<p>Percobaan Kombinasi Pola Reciprocal</p>		<p>Kombinasi pola <i>reciprocal</i> segitiga dengan segi 4 membentuk bidang planar dan tidak berpotensi untuk membentuk struktur bidang lengkung.</p>

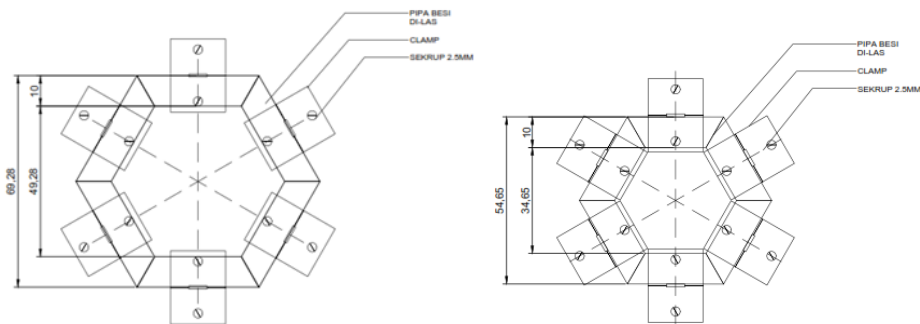
<p>Eksentrisitas Batang</p>		<p>Pengolahan eksentrisitas pada elemen batang membentuk pelengkungan batang reciprocal dan berpotensi untuk pengembangan bermacam potensi bentuk pelengkungan bidang.</p>
<p>Percobaan bidang lengkung dari pola reciprocal 4</p>		<p>Dengan batang yang diatur eksentrisitasnya, disusun mengikuti pola reciprocal 4.</p>
<p>Percobaan bidang lengkung dari pola reciprocal 3-6</p>		<p>Dengan batang yang diatur eksentrisitasnya, disusun mengikuti pola reciprocal 6-3.</p>
<p>Pembuatan sambungan reciprocal (maket)</p>		<p>Pertama, membuat sambungan reciprocal dengan laser cut sesuai dimensi berbentuk trapesium dan digrafir notasi pengelompokan sesuai dimensi.</p>

		<p>Selanjutnya, membuat hasil laser berbentuk trapesium menjadi rangkaian hexagonal dan pentagonal menggunakan lem epoxy. Dan setelah sekitar 12 jam didiamkan, sambungan dikelompokkan sesuai dimensi.</p>
<p><i>Pembuatan scissor-like element (maket)</i></p>		<p>Awalnya, mengukur tiap batang mengikuti dimensi eksentrisitas batang. Lalu, batang disatukan dengan perletakkan sambungan clamp sesuai dimensi yang sudah diukur sebelumnya.</p>
<p><i>Penyusunan modul reciprocal-deployable (maket)</i></p>		<p>Selanjutnya <i>scissor-like element</i> digabungkan dengan sambungan <i>reciprocal</i> berbentuk hexagonal.</p>

<p>Kegagalan sambungan</p>		<p>Namun sambungan clamp tidak kuat menahan batang rotasi/melintir.</p>
<p>Kegagalan sambungan deployable(1)</p>		<p>Sambungan <i>deployable</i> melintir dan membuat sistem terputus. (menggunakan sistem sambungan 1)</p>
<p>Kegagalan sambungan deployable(2)</p>		<p>Sambungan menggunakan pasak kayu pada clamp, namun tidak kuat menahan gaya transformasi sehingga dibutuhkan pengikat clamp dengan elemen batang.</p>
<p>Penyusunan modul reciprocal-deployable (maket)</p>		<p>Menyusun kembali <i>scissor-like element</i></p>
<p>Kegagalan sambungan reciprocal (1)</p>		<p>Sambungan clamp dengan batang menggunakan sekrup membuat batang melintir dan clamp pecah (menggunakan</p>

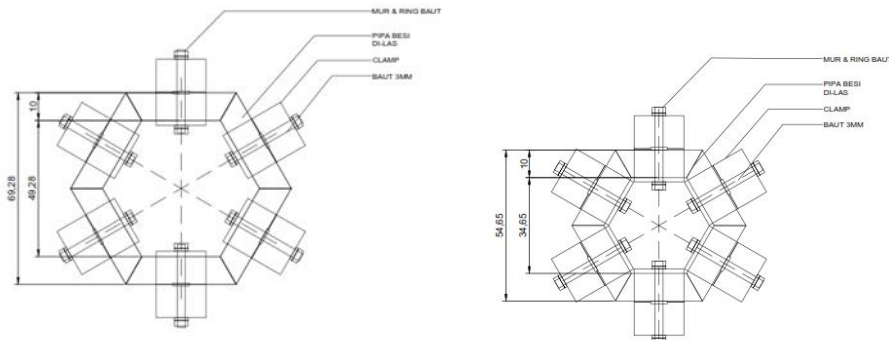
		<p>sistem sambungan A)</p>
<p>Kegagalan sambungan reciprocal(2)</p>		<p>Sambungan clamp dengan batang menggunakan mur-baut yang lebih kuat dari sebelumnya tetapi berdampak pada sambungan <i>reciprocal</i> yang menerima gaya puntir dari pergerakan sistem struktur (menggunakan sistem sambungan B)</p>
<p>Sambungan C reciprocal-deployable (maket)</p>		<p>Menggunakan sambungan yang terbuat dari pipa besi yang dibor mengikuti perletakkan mur-baut membentuk 6 titik dan 5 titik.</p>
<p>Pembuatan sambungan C</p>		<p>Sambungan ring dengan material besi ditandai sesuai dengan perletakan titik sambungan, lalu di paku sebagai pemberi tanda dan di bor mengikuti tanda. Setelah itu ring besi di amplas untuk menghilangkan besi yang tajam bekas pemboran.</p>

<p>Penyusunan Maket</p>		<p>Batang SLE dirangkai pada sambungan ring besi dengan mur dan baut sesuai pola <i>reciprocal</i>. (menggunakan sambungan C (<i>reciprocal</i>) dan sambungan 3 (<i>scissor-like element</i>)).</p>
<p>Pengaturan Diameter Sambungan</p>		<p>Penelitian mengenai diameter ring besi yang dinilai efektif terhadap sistem <i>reciprocal</i> dengan penambahan dan pengurangan dimensi diameter luar.</p>
<p>Maket Akhir</p>		<p>Sebelum transformasi</p>



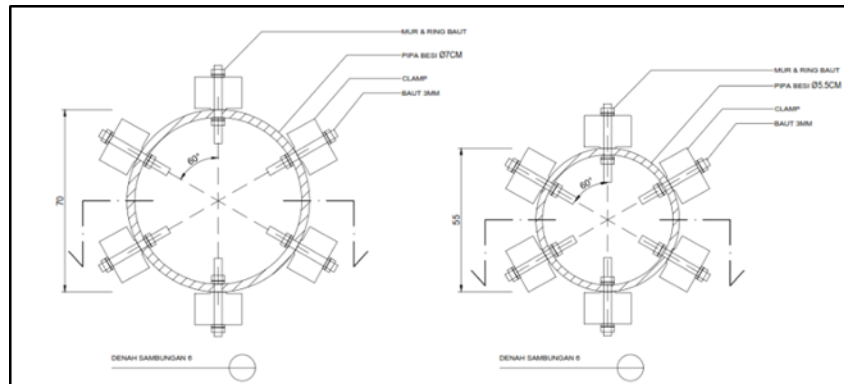
Figur 11 Gambar Detail Sambungan *Reciprocal A*

Lalu, percobaan kedua sambungan reciprocal mengganti elemen pengikat sekrup menjadi mur-baut sehingga saat sistem struktur ditransformasikan, mur baut yang bekerja sebagai pengikat antar sambungan reciprocal tipe B dengan elemen batang. Namun ternyata mur-baut menyalurkan gaya putar transformasi kepada sambungan reciprocal, sambungan reciprocal yang tidak kuat menahan gaya putar dan tarik membuat sambungan reciprocal B pecah akibat beban transformasi struktur. Zona kritis pada sambungan reciprocal B berada pada sambungan antara trapesium akibat sambungan yang dibuat dari potongan batang dan hanya mengandalkan pertemuan antar potongan batang yang berbentuk trapesium.



Figur 12 Gambar Detail Sambungan *Reciprocal B*

Pada percobaan sambungan reciprocal C, menggunakan pipa yang dipotong sejajar penampang membentuk ring dan di bor mengikuti kebutuhan untuk instalasi mur-baut dan sambungan clamp terhadap batang. Pada perancangan sistem struktur ini digunakan dua jenis sambungan, yaitu sambungan lima batang dan sambungan enam batang karena menggunakan sistem struktur reciprocal pentagonal dan hexagonal.



Figur 13 Gambar Detail Sambungan *Reciprocal C*

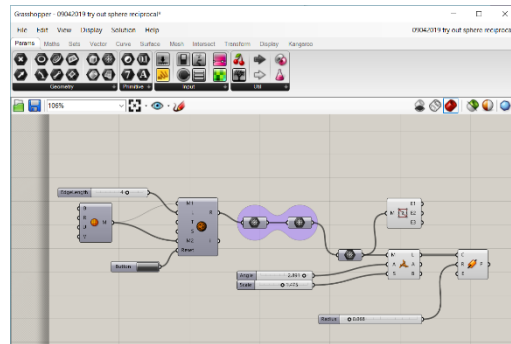
4.2 EKSPLOKASI DESAIN

Eksplorasi pada bentuk kubah sederhana, bentuk hasil memodifikasi sistem reciprocal pada perancangan konstruksi jembatan Da Vinci dengan menggunakan komponennya dibentuk sebuah struktur batang berbentuk kubah. Berdasarkan dari pengerjaan sebuah kubah oleh Hiroshi Murata disebut reciprocal-frame geodesic dome, dan prinsip matematikal geodesik dengan sebuah pola segilima pada pusat atas dan dilanjutkan dengan pola segienam.

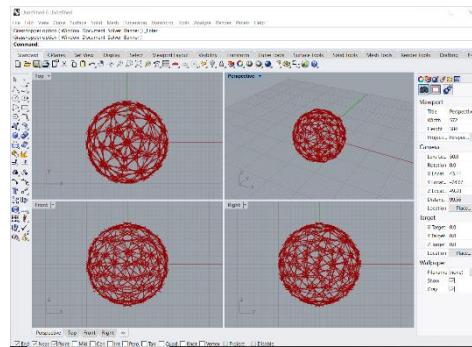
Geodesik merupakan kurva yang menggunakan efektivitas panjang batang. Secara bidang geodesik merupakan susunan garis lurus, sedangkan pada bentuk bola geodesik berupa lingkaran besar. Geodesik memiliki bentuk dasar dari icosahedron dimana tersusun dari panel panel berbentuk segitiga, yang secara planar akan membentuk bidang segitiga lebih besar. Pada penggabungan antara bidang segitiga besar akan membutuhkan 5 panel segitiga besar untuk mencapai bentuk efektif dari geodesik.

Potensi bentuk komputasional, menggunakan perangkat lunak rhinoceros yang di kembangkan melalui mesin generasi interaktif grasshopper dan dengan bantuan plug-in kangaroo 1. Rhinoceros berfungsi dalam mendesain bentuk bidang atap, lalu grasshopper membantu mengubah bidang menjadi konfigurasi mesh/jaring yang selanjutnya oleh kangaroo dilakukan perhitungan mengenai derajat batang, panjang batang, dan dimensi penampang batang.

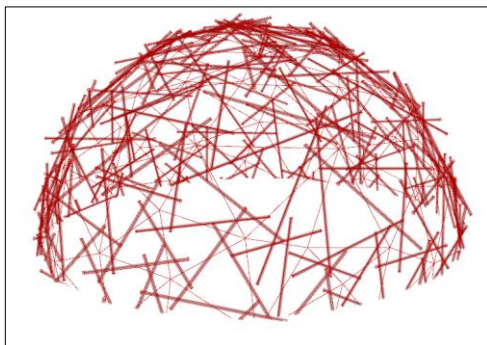
Hasil generasi kangaroo merupakan parameter yang dibuat berupa susunan batang membentuk sistem struktur reciprocal. Pada penelitian ini, parameter tersebut diolah kembali dengan perangkat lunak sketchup untuk membentuk sistem struktur reciprocal-deployable.



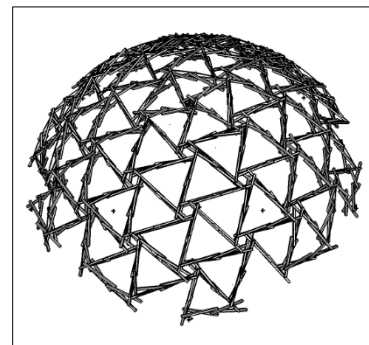
Figur 14 Coding Menggunakan Grasshopper dan Kangaroo



Figur 16 Pembentukan Geodesik dengan Batang Reciprocal



Figur 15 Gridshell Reciprocal Hasil Generasi Kangaroo



Figur 18 Gridshell Reciprocal-deployable Menggunakan Sketchup

Analisa deformasi sistem struktur, dilakukan pada dua tipe struktur, yaitu struktur gridshell reciprocal membentuk struktur atap bidang satu lapis dan struktur gridshell reciprocal-deployable dengan batang scissor-like element yang disusun mengikuti sistem reciprocal

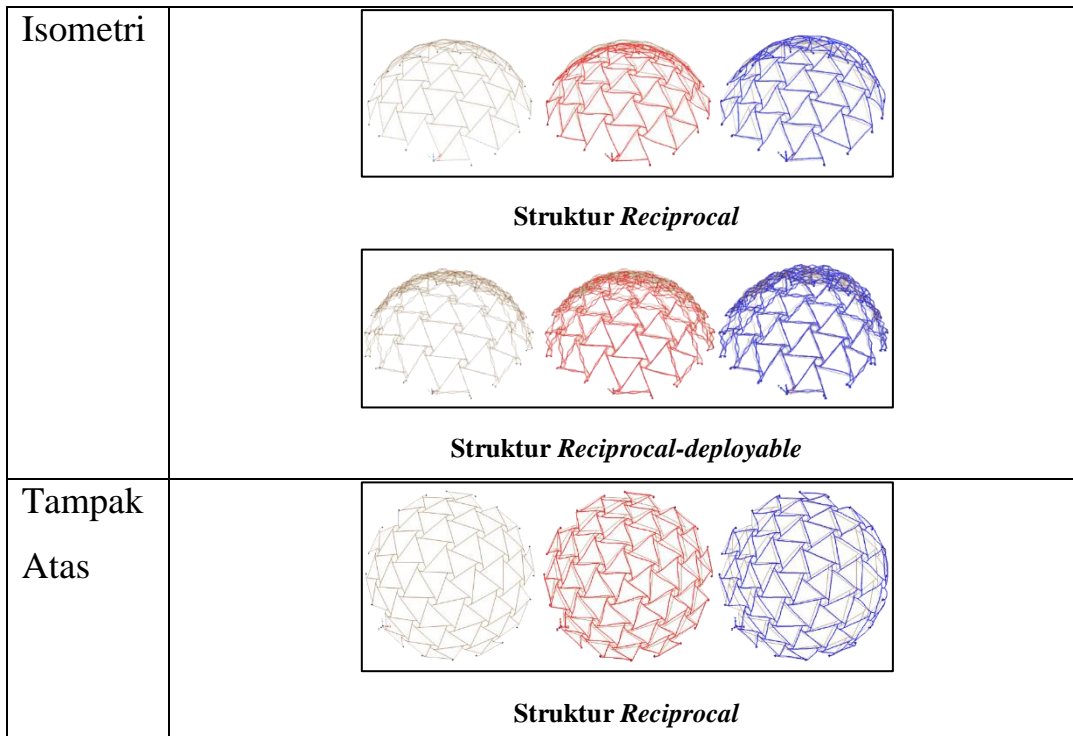
membentuk struktur atap dua lapis dengan sistem reciprocal sebagai elemen penstabil sistem struktur.

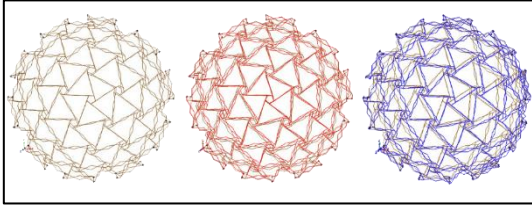
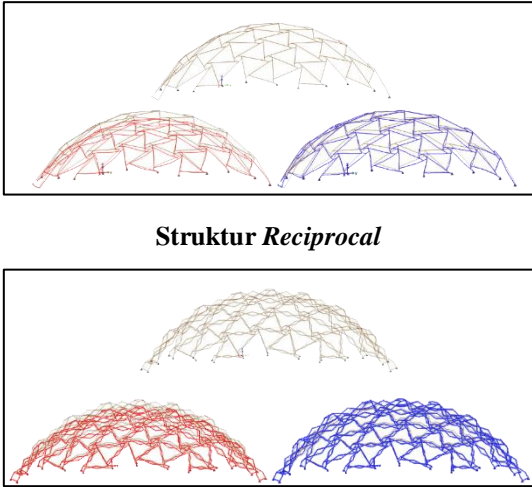


Sistem struktur gridshell dengan bentangan 12m digunakan sebagai bentuk analisa awal kekuatan struktur reciprocal dilihat dari seberapa struktur terdeformasi dan menghasilkan bending moment akibat beban berat batang sendiri, lalu deformasi struktur akibat gaya lateral yang dapat diakibatkan oleh gaya angin maupun gaya gempa. Terakhir, analisa terhadap gaya tarik dan gaya tekan yang dialami tiap elemen batang untuk mengetahui pendistribusian gaya tarik dan tekan yang terjadi.

Hasil dari keduanya dibandingkan dan didapat presentase perubahan deformasi sistem struktur, sebagai berikut:

Tabel 3. Analisa Deformasi Struktur

	<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	%
Periode (s)	0,066	0,068	3,03
Lendutan (mm)	1,821	2,3	26,30
Deformasi (mm)	2,35	4,66	98,30



	 <p style="text-align: center;">Struktur <i>Reciprocal-deployable</i></p>
<p>Tampak Samping</p>	 <p style="text-align: center;">Struktur <i>Reciprocal</i></p> <p style="text-align: center;">Struktur <i>Reciprocal-deployable</i></p>
<p>Keterangan</p> <p> Diagram Deformasi Gaya Gravitasiional</p> <p> Diagram Deformasi Gaya Lateral</p>	

Berdasarkan analisa diagram diatas, hasil perbandingan yang didapat dari sistem struktur model 1 (sistem struktur reciprocal) dan model 2 (sistem struktur reciprocal-deployable) ,sebagai berikut:

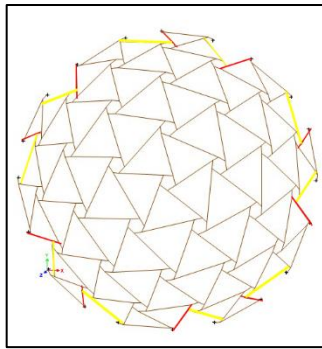
- Kekakuan relatif sama untuk kedua model, namun ada sedikit perbedaan yang tidak terlalu signifikan. Model 1 lebih kaku 3% dibanding dengan model 2
- Lendutan pada Model 1 lebih kecil dibandingkan dengan Model 2, perbedaan lendutan antara Model 1 dan Model 2 adalah sebesar 26%
- Deformasi lateral pada Model 1 jauh lebih kecil dibandingkan dengan Model 2, perbedaannya deformasi lateral antara Model 1 dan Model 2 adalah sebesar 98.3%
- Model 1 gaya aksial yang terjadi pada elemen-elemen nya didominasi tekan dengan proporsi 88.24% dan batang tarik sebesar 11.76%. Posisi batang tekan dan tarik terbesar terletak di bawah.

Analisa gaya tarik-tekan pada struktur, menunjukkan bahwa pada struktur reciprocal-deployable terdapat penambahan elemen batang yang menyalurkan beban secara tarik dibuktikan dalam penambahan jumlah batang tarik tidak berbanding lurus dengan penambahan jumlah batang

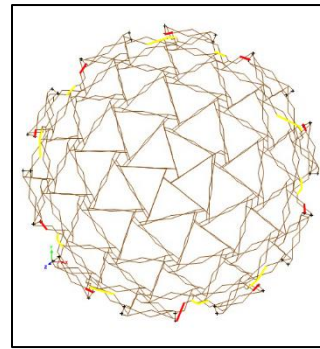
tekan. Secara keseluruhan, pada kedua struktur didominasi dengan batang tekan lebih dari 80% jumlah batang pada sistem struktur.

Berdasarkan analisa menggunakan etabs, diketahui bahwa batang dengan gaya tarik terbesar ditandai dengan warna kuning pada area bawah struktur dan batang dengan gaya tekan terbesar ditandai dengan warna merah (merujuk pada Figur 10 dan Figur 11).

Menurut diagram dibawah, baik pada sistem struktur reciprocal maupun pada sistem struktur reciprocal-deployable batang dengan gaya tarik terbesar dan batang dengan gaya tekan terbesar terjadi akibat hubungan saling meniadakan gaya akibat penyaluran beban dari elemen-elemen batang diatasnya.



Figur 16 gaya tarik terbesar (kuning) dan gaya tekan terbesar (merah) pada struktur *reciprocal*

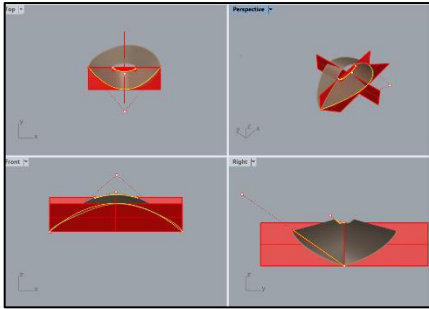


Figur 17 gaya tarik terbesar (kuning) dan gaya tekan terbesar (merah) pada struktur *reciprocal-deployable*

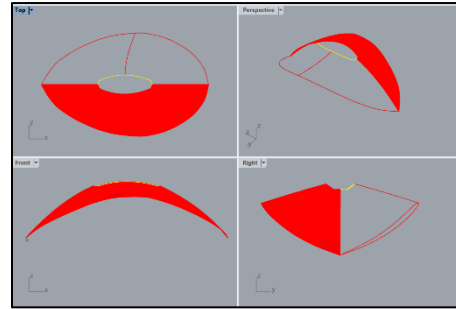
Berdasarkan hasil analisa struktur pada kedua model terdapat elemen batang tekan dengan gaya terbesar di daerah bawah kubah hal ini terjadi akibat distribusi gaya melingkar dan meridional sehingga gaya meridional yang selalu bersifat tekan yang digabungkan dengan gaya melingkar mengalami transisi pada sudut tertentu. Pada diagram tarik dan tekan ditemukan pola pengulangan elemen tekan dengan beberapa elemen tarik di bagian bawah kubah sebagai usaha menyeimbangkan sistem struktur. (Heyman,1977)

Eksplorasi pada bentuk aula Arunika, sebuah desain bangunan aula Arunika dijadikan sebagai objek kasus. Bangunan ini dirancang menggunakan material bambu, dengan bentuk hasil form-finding rhinoceros. Kebutuhan jenis struktur yang dapat dibongkar-pasang mendorong penelitian untuk meneliti lebih lanjut potensi bidang atap dengan menggunakan struktur reciprocal-deployable.

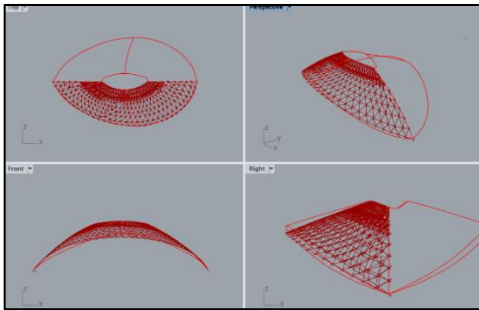
Dimulai dengan pembuatan ulang bentuk di rhinoceros dengan membentuk bidang-bidang mengikuti sumbu x,y, dan z untuk membuat kurva outline bentuk bidang atap (Figur 21) dilanjutkan dengan mengubah kurva-kurva menjadi sebuah network surface (Figur 22). Pertama, mengatur satu bidang pada satu parameter berp yang dihubungkan dengan perintah rebuild untuk membentuk berp menjadi koneksi sederhana berupa mesh (Figur 23). Lalu dilanjutkan pada perhitungan sistem reciprocal oleh kangaroo, dengan beberapa fitur pengolahan efektivitas melalui pengaturan derajat kemiringan batang, panjang batang, dan dimensi penampang batang sehingga dihasilkan bentuk reciprocal yang efektif (Figur 24).



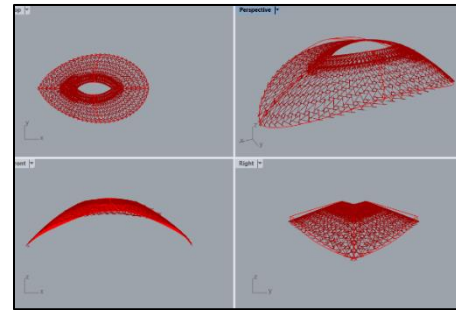
Figur 21 Pembuatan Kurva
(sumber : data pribadi)



Figur 22 Pembentukan NetworkSurface
(sumber : data pribadi)

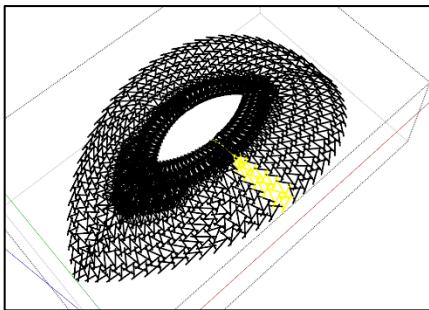


Figur 23 Pembentukan Mesh dari Berp
(sumber : data pribadi)

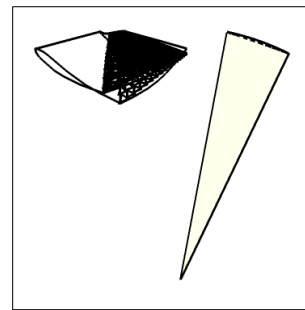


Figur 24 Pembentukan sistem reciprocal
(sumber : data pribadi)

Hasil dari pengambilan sampel berupa potongan pada bidang atap (figur 25) diduplikasi pada area kosong lalu dicari letak titik radius lengkung bidang seperti pada figur 26. Radius yang ditemukan kemudian dibentuk menjadi sebuah bidang kerja selanjutnya. Pada bidang dibuat garis bantu pada awal batang, akhir batang dan diantaranya untuk acuan titik eksentrisitas.



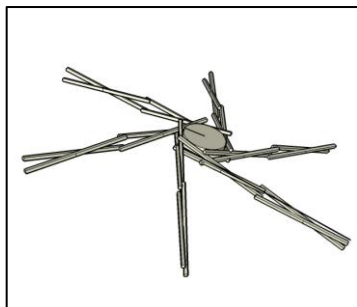
Figur 25 Pengambilan sampel struktur
(sumber : data pribadi)



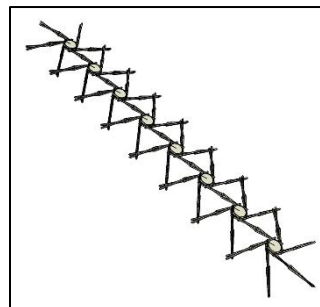
Figur 26 Sampel Radius Potongan
(sumber : data pribadi)

Dari konfigurasi scissor-like element yang ditemukan, disusun secara radial mengikuti pola reciprocal yang sebelumnya sudah terbentuk pada bidang atap, dengan tabung ditengah sebagai

elemen sambungan reciprocal seperti yang dapat dilihat pada figur 27. Setelah mendapatkan modul konstruksi reciprocal (figur 27), modul di duplikasi mengikuti sumbu z ke arah puncak bidang atap sehingga ditemukan konfigurasi sistem konstruksi reciprocal-deployable mengikuti pola sampel potongan mengacu pada gambar potongan figur 25 (figur 28).



Figur 27 Elemen SLE Diduplikasi Mengikuti Pola Reciprocal
(sumber : data pribadi)



Figur 28 Modul Reciprocal Diduplikasi mengikuti Potongan
(sumber : data pribadi)

5. KESIMPULAN

Kriteria konstruksi yang dicari terdapat pada objek studi SmiA Eksperimen dengan tambahan penggalian potensi sistem penguncian mandiri. Pengolahan titik eksentrisitas pada batang scissor-like element berdasarkan penelitian oleh Ellen Gohtami, ST. sedangkan sistem penguncian mandiri menggunakan struktur reciprocal oleh Yosafat Bakti, ST. dan Bernadette Sudira, ST., lalu penduplikasian struktur membentuk bidang atap lengkung menggunakan elemen batang pendek berdasarkan objek studi pada Da Vinci Dome dan KREOD Pavillion.

Berdasarkan kriterian struktur yang dicari, transportabilitas struktur dipengaruhi oleh persentase deployable batang dimana struktur dapat bentang 4 kali ukuran dari luas struktur saat tertutup dengan persentase deployable sebesar 25%, sistem penguncian mandiri yang dicapai merupakan hasil kerja saling meniadakan gaya antara sistem reciprocal, dan duplikasi membentuk bentang lebar lengkung hasil dari eksentrisitas batang yang berbeda-beda menggunakan batang pendek sehingga tidak terbatas dimensi batang

Pengembangan bentuk dengan sistem konstruksi reciprocal-deployable dapat diterapkan pada bidang atap dengan beragam bentuk, namun pada bentuk yang lebih kompleks dibutuhkan menyederhanaan bentuk terlebih dahulu setelah itu digenerasikan menjadi definisi reciprocal. Terakhir, penyusunan sistem konstruksi reciprocal deployable secara mandiri menggunakan komputasional

Penelitian yang bersifat eksplorasi ini dapat dikembangkan lebih lanjut dalam penelitian lanjutan mengenai definisi detail sambungan pada elemen tarik, tekan dan puntir. Kedua, penyempurnaan komputasional mengenai konfigurasi reciprocal-deployable, perhitungan konstruksi dan perhitungan dimensi elemen konstruksi untuk fabrikasi.

6. DAFTAR PUSTAKA

ASACHI, GHEORGHE. (2014). Deployable Structures for Architectural Applications. Romania : Technical University of Iasi.

AKGÜN, YENAL. (2010). A Novel Transformation Model for Deployable Scissor-Hinge Structures. Jerman : Universität Stuttgart.

CRUZ, PAULO J. DA SOUSA. (2016). Structures dan Architecture: Beyond their Limits. Crc Press Taylor&Francis Group : Portugal.

CHILTON, JOHN DAN GABRIEL TANG. (2017). Timber Gridshell : Architecture, Structure and Craft. Routledge Taylor&Francis Group : New York.

DWIANA, YOSAFAT B. (2018). Eksplorasi Desain Struktur Bambu Modular dengan Sistem Konstruksi Deployable. Skripsi tidak diterbitkan. Bandung : Universitas Katolik Parahyangan.

GELEZ, S., AUBRY, S., VAUDEVILLE, B. (2011). Behavior of a Simple Nexorade or Reciprocal Frame System. Perancis : International Journal of Space Structure.

GOHTAMI, ELLEN. (2018). Evaluasi dan Eksperimentasi Desain Modul, Pola dan Sambungan pada Konstruksi Bambu dengan Sistem Pantograf. Skripsi tidak diterbitkan. Bandung : Universitas Katolik Parahyangan

MAURINA, A., BUDIANASTAS, P., & CARISSA. (2017). Eksplorasi Struktur Bambu Dengan Konstruksi 'Deployable'. Bandung : Universitas Katolik Parahyangan.

MERCHAN, C.H.HERNANDEZ.(1984).Deployable Structures. Massachusetts Institute of Technology:Venezuela.

LARSEN, OLGA POPOVIC.(2008). Reciprocal Frame Arhitectural. Burlington:Eksevier Ltd.

PUGNALE, ALBERTO.(2011).The Principle of Structural Reciprocity. Aalborg University : Denmark.

RAJ, DHENESH, BINDU AGARWAL. (2014). Bamboo as Building Material.

ROCKWOOD, DAVID.(2015).Bamboo Gridshells.Routledge Taylor&Francis Group : New York.

SUDIRA, BERNADETTE. (2016). Eksplorasi Konstruksi Bambu Dengan Sistem Deployable. Skripsi tidak diterbitkan. Bandung : Universitas Katolik Parahyangan