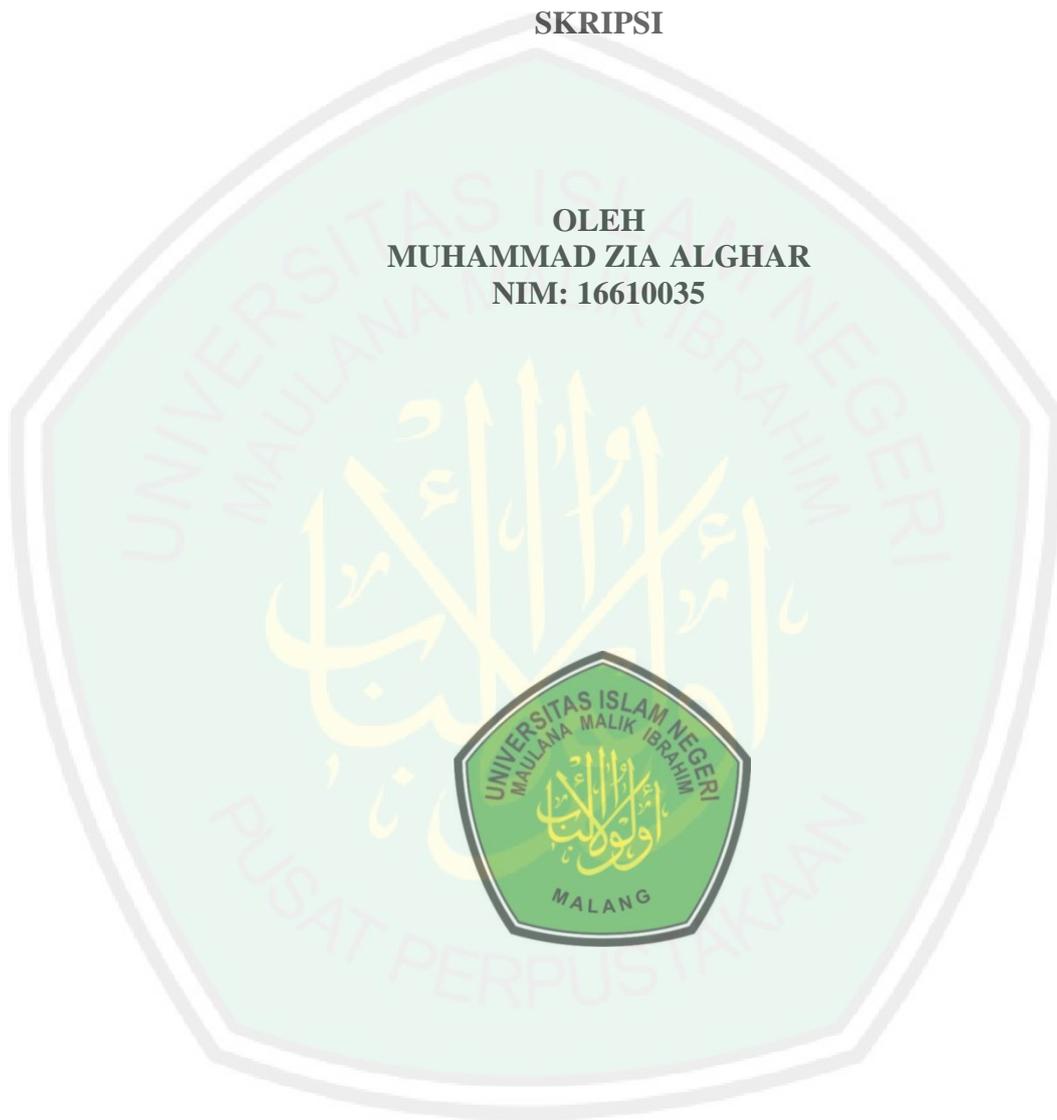


**PEMODELAN BATANG TANAMAN MENGGUNAKAN METODE
*DETERMINISTIC LINDENMAYER SYSTEM***

SKRIPSI

**OLEH
MUHAMMAD ZIA ALGHAR
NIM: 16610035**



**JURUSAN MATEMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2020**

**PEMODELAN BATANG TANAMAN MENGGUNAKAN METODE
*DETERMINISTIC LINDENMAYER SYSTEM***

SKRIPSI

**Diajukan Kepada
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Matematika (S.Mat)**

**OLEH
MUHAMMAD ZIA ALGHAR
NIM. 16610035**

**JURUSAN MATEMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2020**

**PEMODELAN BATANG TANAMAN MENGGUNAKAN METODE
DETERMINISTIC LINDENMAYER SYSTEM**

SKRIPSI

Oleh
Muhammad Zia Alghar
NIM: 16610035

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Tanggal 01 Desember 2020

Pembimbing I,



Juhari, M.Si

NIDT. 19840209 20160801 1 055

Pembimbing II



Ari Kusumastuti, M.Si., M.Pd

NIP. 19770521 200501 2 004

Mengetahui,
Ketua Jurusan Matematika



Dr. Usman Pagalay, M.Si
NIP. 19650414 200312 1 001

**PEMODELAN BATANG TANAMAN MENGGUNAKAN METODE
DETERMINISTIC LINDENMAYER SYSTEM**

SKRIPSI

Oleh
Muhammad Zia Alghar
NIM 16610035

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima sebagai Salah Satu Persyaratan
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Matematika (S.Mat)
Tanggal 31 Desember 2020

Susunan Dewan Penguji:

Penguji Utama : **Dr. Usman Pagalay, M.Si**
NIP. 19650414 200312 1 001

Ketua Penguji : **Dr. Hairur Rahman, M.Si**
NIP. 19800429 200604 1 003

Sekretaris Penguji : **Juhari, M.Si**
NIDT. 19840209 20160801 1 055

Anggota Penguji : **Ari Kusumastuti, M.Pd., M.Si**
NIP. 19770521 200501 2 004

Tanda Tangan

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

Mengetahui,
Ketua Jurusan Matematika

(.....)

Dr. Usman Pagalay, M.Si
NIP. 196504142003121001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Zia Alghar

NIM : 16610035

Jurusan : Matematika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Skripsi : *Pemodelan Batang Tanaman Menggunakan Metode Deterministic Lindenmayer System*

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar rujukan. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 17 November 2020
Yang membuat pernyataan,



Muhammad Zia Alghar
NIM 16610035

MOTTO

*“Dimanapun kamu berada dan dalam kondisi apapun,
jangan pernah tinggalkan shalat”*

(Ibu)

قُلْ إِنَّ صَلَاتِي وَنُسُكِي وَمَحْيَايَ وَمَمَاتِي لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ ﴿١٦٢﴾

Katakanlah: sesungguhnya sembahyangku, ibadatku, hidupku dan matiku hanyalah untuk Allah, Tuhan semesta alam. (Q.S. Al-An'am ayat 162)



PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan untuk:

Ibu tercinta Ida Nursaidah, Ayah tercinta Nunu Burhanuddin, dan adik-adikku tersayang M. Nabil Alamah, Helwa Alifia, dan Zahira Almayra yang selalu menjadi motivasi dan semangat bagi penulis dalam menuntut ilmu, mengabdikan, dan berjuang di tanah rantau.



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Puji dan syukur kepada Allah SWT, yang telah memberi rahmat, hidayah serta inayah-Nya kepada kita, khususnya kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan skripsi dengan judul **PEMODELAN BATANG TANAMAN MENGGUNAKAN METODE *DETERMINISTIC LINDENMAYER SYSTEM***.

Shalawat dan salam kepada baginda Nabi Besar Muhammad SAW, yang semoga kita semua senantiasa diberikan keberkahan dan syafaat-Nya hingga hari akhir nanti.

Penyusunan skripsi ini ditunjukkan sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan program Sarjana Matematika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang serta sebagai partisipasi penulis untuk menerapkan ilmu yang telah diperoleh ketika penulis masih menimba ilmu di Jurusan Matematika Fakultas Sains dan Teknologi.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini, baik secara langsung maupun tidak langsung, oleh karena itu perkenankan penulis berterimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Abd. Haris M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
2. Ibu Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3. Bapak Dr. Usman Pagalay, M.Si selaku Ketua Jurusan Matematika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Evawati Alisah, M.Pd selaku Dosen Wali yang selalu memberi semangat penulis dalam menimba ilmu di kampus tercinta.
5. Bapak Juhari, M.Si, Ibu Ari Kusumastuti M.Si., M.Pd., Ibu Intan Nisfulaila, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah membimbing serta mengarahkan penulis dalam menyusun skripsi.
6. Segenap Dosen Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
7. Kedua orang tua penulis, Ibu Ida Nursaidah, S.Ag dan Bapak Dr. H. Nunu Burhanuddin, Lc. M.Ag yang selalu memberi semangat, masukan, dan keteladanan baik secara moral maupun riil sejak penulis menjalani perkuliahan hingga menapaki tugas akhir
8. Adikku M. Nabil Alamah, Helwa Alifia El-Shafa, dan Zahira Almayra yang selalu mendoakan, menyemangati serta mengingatkan kakaknya.
9. Teman-teman jurusan Matematika 2016 yang telah memberikan semangat dan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
10. Mahad Sunan Ampel Al-Aly, UPKM El-Ma'rifah, Miracle, dan teman-teman kecilku telah memberikan pelajaran berharga tentang pengabdian, keikhlasan, dan arti bermasyarakat yang sesungguhnya.
11. Dan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah tulus membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Dan akhirnya skripsi ini telah rampung, namun masih jauh dari kata sempurna. Karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua belah pihak, demi kesempurnaan dan perbaikan karya ini.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca pada umumnya serta bagi pengembangan keilmuan di bidang matematika khususnya matematika terapan di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Dengan Mengharap Ridho dari Allah SWT penulis panjatkan do'a dan harapan mudah-mudahan segala amal baik semua pihak mendapatkan balasan dan semoga taufik dan hidayah senantiasa disampaikan.

Malang, 17 November 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGAJUAN	
HALAMAN PERSETUJUAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	
HALAMAN MOTTO	
HALAMAN PERSEMBHAN	
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
مستخلص البحث	xix
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
 BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1 Integrasi Al-Qur'an dengan <i>Lindenmayer System</i>	5
2.2 Pertumbuhan dan Percabangan Batang Tanaman.....	6
2.3 Transformasi Geometri.....	8
2.4 Rotasi	8
2.4.1 Rotasi pada Dimensi Dua	9
2.4.2 Rotasi pada Dimensi Tiga.....	10
2.5 Proyeksi	14
2.6 <i>Self Similiarity</i>	15
2.7 Fungsi Iteratif	16
2.8 Model Deterministik <i>L-System</i>	17
2.9 Postulat Leonardo da Vinci	21

2.10 Percabangan <i>L-System</i>	22
2.11 <i>L-system</i> Dimensi Tiga	23

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Langkah-Langkah Penelitian	24
3.2 Data Penelitian	25
3.2.1 Foto Objek.....	25
3.2.2 Pengukuran Sudut	26
3.2.3 Pengukuran Panjang Batang	27
3.2.4 Pengukuran Ketebalan Batang	29
3.3 Menyusun Model <i>L-System</i>	29
3.3.1 Pemilihan Huruf dan Simbol.....	30
3.3.2 Menentukan Aksioma Awal.....	30
3.3.3 Menentukan Aturan Produksi	30
3.3.4 Menentukan Iterasi.....	31
3.3.5 Melakukan Visualisasi	31

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Mengolah Data Pengukuran Sudut	33
4.1.1 Menentukan Nilai Besar Sudut	33
4.1.2 Menentukan Nilai Panjang Batang.....	34
4.1.3 Menentukan Ketebalan Batang	35
4.2 Menyusun Model <i>L-System</i>	35
4.2.1 Identifikasi Komponen Utama <i>L-system</i>	36
4.2.2 Penamaan Titik.....	39
4.2.3 <i>Parametric L-system</i>	41
4.2.4 Ketebalan dan Panjang Batang.....	45
4.3 Hasil Visualisasi	52
4.4 Hasil Pemodelan Lainnya.....	57
4.5 Pembahasan.....	66

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	68
5.2 Saran.....	68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

LEMBAR KONSULTASI SKRIPSI

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Percabangan batang monopodial	7
Gambar 2.2	Percabangan batang simpodial	7
Gambar 2.3	Percabangan batang dikotomus	8
Gambar 2.4	Rotasi pada dimensi dua	9
Gambar 2.5	Rotasi sumbu x pada dimensi dua	11
Gambar 2.6	Rotasi sumbu y pada dimensi tiga	12
Gambar 2.7	Rotasi sumbu z pada dimensi tiga	13
Gambar 2.8	Hubungan titik-titik koordinat	15
Gambar 2.9	Penafsiran grafis l -system	20
Gambar 2.10	Pengukuran rasio ketebalan batang	21
Gambar 2.11	Percabangan l -system	24
Gambar 2.12	Rotasi pada dimensi tiga	25
Gambar 3.1	Contoh pohon cemara yang akan dimodelkan	27
Gambar 3.2	Menentukan besar sudut pada objek	28
Gambar 3.3	Menentukan panjang batang pada objek	30
Gambar 3.4	<i>Flowchart</i> langkah-langkah penelitian	34
Gambar 4.1	Hasil iterasi generasi nol (g_0)	40
Gambar 4.2	Hasil iterasi generasi pertama (g_1)	40
Gambar 4.3	Hasil iterasi beberapa generasi	41
Gambar 4.4	Penamaan titik pada l -system	42
Gambar 4.5	Hasil iterasi beberapa generasi <i>parametric l-system</i>	46

Gambar 4.6	Hasil Iterasi generasi kewlima (g_5) <i>parametric l-system</i>	47
Gambar 4.7	Hasil Iterasi beberapa generasi <i>parametric l-system</i>	47
Gambar 4.8	Identifikasi <i>parametric l-system</i>	49
Gambar 4.9	Tampilan aturan produksi pada L-Studio	53
Gambar 4.10	Menentukan rasio, sudut, dan ketebalan pada L-Studio	53
Gambar 4.11	Tampilan aturan produksi pada L-Studio	54
Gambar 4.12	Tampilan penutup pada L-Studio	55
Gambar 4.13	Perbandingan arah putar pada batang tanaman	55
Gambar 4.14	Perbandingan panjang batang pada tanaman	56
Gambar 4.15	Visualisasi tanaman cemara	57
Gambar 4.16	Perbandingan tanaman cemara asli dengan visualisasi model <i>l-system</i> dalam dimensi tiga	59
Gambar 4.17	Visualisasi tanaman ketapang kencana	63
Gambar 4.18	Perbandingan tanaman ketapang kencana asli dengan visualisasi model	64
Gambar 4.19	Visualisasi model tanaman ketapang kencana dari berbagai sudut pandang	64
Gambar 4.20	Visualisasi tanaman trembesi	66
Gambar 4.21	Visualisasi model tanaman trembesi dari berbagai sudut pandang	67
Gambar 4.22	Perbandingan tanaman trembesi asli dengan visualisasi model <i>l-system</i> dalam dimensi tiga	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Percabangan batang monopodial	29
Tabel 3.2	Percabangan batang simpodial	29
Tabel 3.3	Percabangan batang dikotomus	29
Tabel 3.4	Rotasi pada dimensi dua	30
Tabel 3.5	Rotasi sumbu x pada dimensi dua	31
Tabel 4.1	Rotasi sumbu y pada dimensi tiga	39
Tabel 4.2	Rotasi sumbu z pada dimensi tiga	44
Tabel 4.3	Hasil perumusan sudut beserta arahnya	51
Tabel 4.4	Penjelasan aturan produksi pada <i>deterministic l-system</i>	52
Tabel 4.5	Aturan produksi pada <i>deterministic l-system</i> tanaman cemara	60
Tabel 4.6	Aturan produksi <i>deterministic l-system</i> tanaman ketapang kencana	64
Tabel 4.7	Aturan produksi pada <i>deterministic l-system</i> tanaman trembesi	67

DAFTAR SIMBOL

$F(l)$:	Menggambar ke depan sebesar l satuan, untuk $l > 0$
$+(a)$:	Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(a)$ sebesar a derajat
$-(a)$:	searah arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(a)$ sebesar a derajat
$\&(a)$:	Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\beta)$ sebesar a derajat
$\wedge(a)$:	Berputar searah arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\beta)$ sebesar a derajat
$/ (a)$:	Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\delta)$ sebesar a derajat
$\backslash (a)$:	Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\delta)$ sebesar a derajat
$/(a)$:	Berputar dengan matriks rotasi $R(\delta)$ sebesar 180° derajat
[:	Menyimpan letak saat ini kemudian bergerak sesuai perintah selanjutnya
]	:	Mengembalikan ke posisi semula yang disimpan pada simbol “[
!(x)	:	Menentukan ketebalan garis sebesar x

ABSTRAK

Alghar, Muhammad Zia. 2020. **Pemodelan Batang Tanaman Menggunakan Metode *Deterministic Lindenmayer System***. Skripsi. Jurusan Matematika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Juhari, M.Si, (II) Ari Kusumastuti, M.Si., M.Pd

Kata Kunci: Pemodelan, *Deterministic L-system*, Batang Tanaman, Parametrik

Pemodelan morfologi tanaman dapat dilakukan secara matematis yang meliputi akar, batang, daun, hingga bunga. Pemodelan batang tanaman menggunakan metode *Lindenmayer System (L-system)* merupakan penulisan kembali yang berulang untuk membentuk visualisasi dari suatu objek. Metode *Deterministic L-system* dilakukan dengan memprediksi kemungkinan bentuk batang tanaman menggunakan aturan penulisan berulang yang berdasarkan foto objek asli.

Tujuan dari penelitian ini adalah mencari model dari batang tanaman dengan Metode *Deterministic Lindenmayer System* yang nantinya akan divisualisasikan dalam ruang dimensi dua dan tiga. Penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi objek berupa batang pohon cemara yang diukur besar sudut, ketebalan, dan panjang batangnya. Kemudian dibangun modelnya secara deterministik dan parametrik dengan komponen *L-system*. Tahapan dilanjutkan dengan memvisualisasikan model secara dua dimensi dan tiga dimensi.

Hasil dari penelitian ini berupa visualisasi model batang tanaman yang telah mendekati aslinya. Penambahan warna, ketebalan batang, serta penulisan secara parametrik dilakukan untuk mendapatkan hasil yang menyerupai aslinya. Adapun iterasi yang dilakukan dibatasi kurang dari 20 iterasi saja sehingga simulasi berjalan optimal.

ABSTRACT

Alghar, Muhammad Zia. 2020. **Modeling of Plant Stems Using the Deterministic Lindenmayer System Method**. Thesis. Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Advisors: (I) Juhari, M.Si, (II) Ari Kusumastuti, M.Si., M.Pd

Keywords: Modeling, Deterministic L-system, Plant Stems, Parametric

Plant morphology modeling can be done mathematically which includes roots, stems, leaves, and flowers. Modeling of plant stems using the Lindenmayer System (L-system) method is an iterative rewrite to form a visualization of an object. The Deterministic L-system method is carried out by predicting the possible shape of a plant stem using an iterative writing rule based on a photograph of the original object. The purpose of this research is to find a model of plant stems with the Deterministic Lindenmayer System Method, which will later be visualized into two and three dimensional spaces. The research was conducted by identifying objects in the form of pine tree trunks which measured the angle, thickness and length of the trunk. Then a deterministic and parametric model is built with the L-system component. The step is continued by visualizing the model in two dimensions and three dimensions. The result of this research is a visualization of a plant stem model that is close to the original. The addition of color, thickness of the stem, and writing in a parametric manner to get results that resemble the original. The iteration is limited to less than 20 iteration is implemented so that the simulation runs optimally.

مستخلص البحث

الغار ,محمد ضياء. ٢٠٢٠. نموذج جذوع النباتية باستخدام طريقة نظام ليندنماير الاحتمية. البحث الجامعي. قسم الرياضيات، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية بمالانج. المشرف الأول: جوهري، الماجستير؛ المشرفة الثانية: أري كوسوما أستوتي، الماجستير.

الكلمات المفتاح : النموذج، نظام ل-الاحتمية، جذوع النباتية، الحدودي

يمكن إجراء النموذج المورفولوجي للنبات رياضيا والتي تشمل الجذور والجذوع والأوراق والأزهار. استخدم نموذج جذع النباتية بطريقة نظام ليندينمير (نظام ل) وهي إعادة كتابة تكرارية في تشكيل تصور للموضع. فيتم تنفيذ طريقة نظام ليندينمير الاحتمية بتنبأ الشكل المحتمل لجذع النبات استخدامها على قاعدة الكتابة التكرارية بناء على صورة الموضع الأصلي.

تهدف هذا البحث للعثور على نموذج جذع النبات باستخدام طريقة نظام ليندينمير الاحتمية، والتي سيتم تصورها لاحقا في البعدين اثنين وثلاثة الأبعاد. تم إجراء البحث من خلال تحديد الموضع على شكل جذوع أشجار الصنوبر والتي تقيس بها الزاوي والسماك وطول الجذع. فتم بناء هذا النموذج حتميا ومحدوديا بمركب نظام-ل، واستمر هذا النموذج تصورا في البعدين اثنين وثلاثة الأبعاد.

فظهرت نتيجة هذا البحث أن تصور نموذج جذع نباتي تقريبا من الأصل. استخدم بها إضافة اللون وسماكة الجذع وكتابة الحدودية للحصول على نتائج مشابهة من الأصل. فاقترنت التكرارية على أقل من ٢٠ مرات من التكراريات حتى تعمل المحاكاة بالشكل الأمثل.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penelitian tentang perkembangan tanaman dengan segala kompleksitasnya yang dihampiri dengan teori matematis, nampaknya sulit untuk dilakukan dengan persamaan matematika biasa dengan aspek geometri sebagai dasarnya. Perlu adanya pendekatan khusus pada pemodelan secara komputerisasi serta teknik visualisasi dalam persamaan matematis sehingga dihasilkan model tumbuhan yang realistis. (A. Lindenmayer, 1990)

Lindenmayer system atau yang biasa disebut dengan *L-system* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam kajian matematis pada ilmu pemodelan morfologi tanaman. Beberapa peneliti sudah menggunakan teori *L-system* baik dalam dimensi dua maupun dimensi tiga untuk memodelkan suatu tanaman. Misalnya penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Adam Runion dan Brendan Lane yang memodelkan tanaman dengan algoritma ruang berkoloni dengan Metode *L-system*. Penelitian lain dilakukan oleh Juhari, dalam jurnal berjudul “Pemodelan Pertumbuhan Batang Tanaman Jagung Menggunakan *Stochastic L-system*”, dari penelitian tersebut didapatkan solusi untuk pemodelan pertumbuhan tanaman jagung dalam visualisasi tiga dimensi menggunakan *L-system*.

Pada tahun 2011, Chandra Hadi Iswanto melakukan penelitian dengan metode *L-system*. Kajian tersebut berfokus pada pemodelan pertumbuhan batang tanaman menggunakan Metode *Stochastic L-system*. Adapun pada 2015 Juhari kembali melakukan penelitian dengan Metode *L-system*, namun penelitian ini

berpusat pada pertumbuhan batang tanaman yang divisualisasikan dengan Metode *Deterministic L-system* pada ruang berdimensi dua.

Adapun penelitian dalam skripsi ini mencoba untuk menyempurnakan penelitian sebelumnya dengan menggunakan Metode *Deterministic L-system* pada ruang berdimensi tiga. Metode ini akan memodelkan batang tanaman secara sederhana dan matematis dengan penulisan *l-system*. Metode deterministik digunakan agar memudahkan peneliti dalam memodelkan tanaman dengan *output* berupa visualisasi dalam ruang dua dimensi dan tiga dimensi.

Allah SWT menciptakan bumi dan berbagai isinya dengan penuh keteraturan serta kesempurnaan. Bumi dan semua makhluk yang berada di dalamnya termasuk ke dalam kesempurnaan dari ciptaan-Nya. Seperti berbagai tanaman di bumi yang tumbuh ke atas, tak luput dari keteraturan atas kekuasaan-Nya. Sebagaimana Allah SWT berfirman di dalam kalam-Nya

وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوَاسِيَ وَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ شَيْءٍ مَّوْزُونٍ ﴿١٩﴾

Dan Kami telah menghamparkan bumi dan menjadikan padanya gunung-gunung dan Kami tumbuhkan padanya segala sesuatu menurut ukuran. (Q.S. Al-Hijr :19)

Ibnu Katsir menyebutkan di dalam tafsirnya bahwa Allah SWT menciptakan bumi dan menjadikannya luas membentang, menegakkan gunung-gunung, menumbuhkan berbagai tanaman dan sayur-mayur di dalamnya yang sesuai untuk makhluk hidup di dalamnya. Selain itu, dijadikan-Nya tumbuhan-tumbuhan tersebut sebagai rezeki serta sebagai sarana kehidupan bagi manusia dan makhluk lainnya di bumi. (Ibnu Katsir, 2005)

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimana model dari batang tanaman menggunakan Metode *Deterministic L-system* ?
2. Bagaimana hasil visualisasi dari model batang tanaman menggunakan Metode *Deterministic L-system* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Untuk mengetahui model dari batang tanaman menggunakan Metode *Deterministic L-system*.
2. Untuk mengetahui hasil visualisasi dari model batang tanaman menggunakan Metode *Deterministic L-system*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun penelitian ini akan dibahas secara mendalam, maka penelitian ini perlu membatasi masalah pada:

1. Metode *Lindenmayer system* yang dimaksud dalam penelitian ini adalah menggunakan Metode *Deterministic L-system (DOL-system)*. Metode ini menghasilkan visualisasi dari *Lindenmayer system* berupa garis yang saling terhubung satu sama lain dalam ruang dimensi 2 dan dimensi 3.
2. Penelitian ini membatasi objek yang diteliti, yaitu pada batang dari jenis tanaman cemara, ketapang kencana, dan trembesi.

3. Penelitian ini membatasi hasil visualisasi berupa batang tanaman tanpa adanya akar, daun, dan bunga.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dalam penelitian pemodelan *deterministic l-system* pada batang tanaman adalah:

1. Menambah wawasan dari pemodelan *deterministic lindenmayer system* pada batang tanaman.
2. Dengan mengetahui visualisasi dari model batang tanaman menggunakan *deterministic L-system* maka dapat dijadikan referensi untuk dikembangkan ke penelitian menggunakan metode *stochastic L-system*.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Dalam bab ini akan dibahas mengenai kajian kepustakaan yang diawali dengan penjelasan integrasi Al-Qur'an dan *L-system* sebagai landasan utama dalam melakukan penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan penjelasan berbagai jenis batang tanaman secara morfologi. Adapun kajian matematis dalam penelitian ini dijelaskan dalam ruang lingkup geometri dan cabang ilmu yang akan digunakan. Selanjutnya ada pengertian tentang *lindenmayer system* dan komponen-komponennya serta penerapannya yang berpadu dengan ilmu geometri.

2.1 Integrasi Al-Qur'an dengan *Lindenmayer System*

Allah SWT menciptakan bumi dan seluruh isinya dengan sifat Maha Kuasa-Nya yang penuh keteraturan dan perhitungan. Mulai dari sistem yang terkecil dalam tubuh manusia hingga sistem terbesar di alam semesta, semuanya berjalan sesuai dengan keteraturan dan perhitungan-Nya. Keteraturan tersebut juga diciptakan-Nya dalam sistem pertumbuhan pada berbagai tanaman, baik secara fisiologi maupun morfologi. Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam Al-Quran surat Maryam ayat 94:

لَقَدْ أَحْصَاهُمْ وَعَدَّهُمْ عَدًّا ﴿٩٤﴾

Sesungguhnya Allah telah menentukan jumlah mereka serta menghitung mereka dengan hitungan yang teliti. (Q.S. Maryam: 94)

Marwan bin Musa menjelaskan dalam tafsirnya bahwa ayat ini menunjukkan ilmu-Nya Allah SWT meliputi semua makhluk yang ada di langit maupun di bumi. Dia menentukan semuanya, termasuk jumlah mereka beserta

jumlah amal mereka. Tidak salah dan tidak lupa, tidak ada sesuatu yang samar baginya (Musa, 2010).

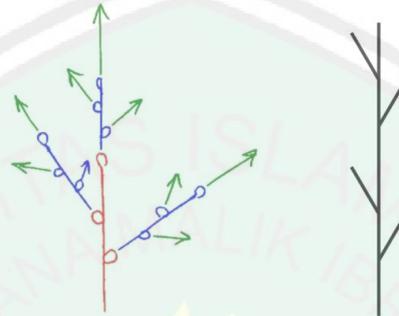
Secara matematis, ayat ini menunjukkan kekuasaan Allah SWT yang menciptakan sesuatu menurut perhitungan. Adapun Lindenmayer system merupakan salah satu ilmu yang akan mempelajari bagaimana keteraturan dan perhitungan dapat terbentuk pada morfologi tanaman secara matematis. Peneliti bermaksud menjadikan *L-system* sebagai salah satu media pembelajaran terhadap bukti-bukti kekuasaan Allah SWT pada tanaman yang sepatutnya kita syukuri.

2.2 Pertumbuhan dan Percabangan Batang Tanaman

Pertumbuhan merupakan proses penambahan ukuran, volume, dan jumlah sel yang bersifat *irreversible* (tidak dapat kembali ke asal). Pertumbuhan tanaman dapat terjadi pada setiap bagiannya. Pertumbuhan tanaman dipengaruhi oleh gen yang terdapat pada setiap tanaman. Secara spesifik, perbedaan gen dapat membuat jenis batang, daun, akar, dan cabang dari setiap tanaman menjadi berbeda. Pada batang tanaman, pertumbuhannya meliputi penambahan ukuran dan volume pada batang, dahan, maupun rantingnya. Ketika tanaman tersebut masih muda pertumbuhannya bersifat cepat dan akan melambat ketika sudah mulai dewasa hingga menua (Shipunov, 2011).

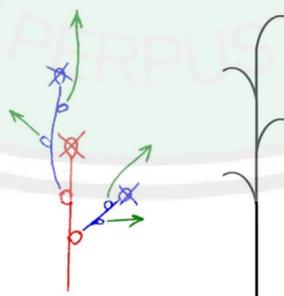
McGarry dalam artikelnya tahun 2016 menjelaskan bahwa percabangan batang merupakan tanda tumbuhnya suatu tanaman. Hampir semua tanaman melakukan percabangan. Hanya tumbuhan monokotil yang sedikit melakukan percabangan pada batangnya, seperti tebu, bambu, jagung, dan sebagainya. Pola percabangan pada batang pada umumnya dibedakan menjadi tiga, yaitu monopodial, simpodial, dan dikotomus.

Pada percabangan monopodial, batang utama akan nampak dengan jelas. Karena batang utama akan berukuran lebih besar, lebih tebal, dan lebih panjang daripada cabang-cabangnya. Percabangan ini memiliki ciri dimana dahan-dahan akan tumbuh pada semua percabangan di batang utama. Contohnya pada cemara, durian, salak, dan sebagainya.



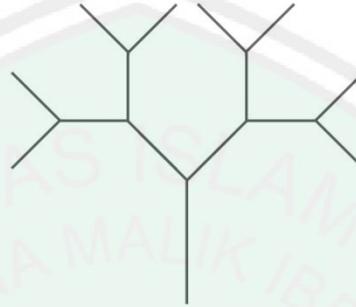
Gambar 2.1 Percabangan batang monopodial
Sumber gambar: Shipunov, 2011 dan McGarry, 2016

Perbedaan akan terlihat pada percabangan simpodial, karena batang utama dari percabangan ini akan sulit ditemukan. Percabangan ini memiliki ciri yaitu batang utama akan menghentikan laju pertumbuhannya, sehingga pertumbuhan pada cabangnya (dahan) akan lebih banyak. Batang utamanya hanya terlihat pada bagian dasar, sedangkan cabang-cabangnya berada di bagian atas. Percabangan ini dapat diamati pada tanaman jeruk, bougenvil, dan sejenisnya.



Gambar 2.2 Percabangan batang simpodial
Sumber gambar: Shipunov, 2011 dan McGarry, 2016

Pada percabangan dikotomi akan nampak cabang-cabang yang terbagi menjadi dua dengan sudut yang sama besar. Percabangan ini disebut juga dengan percabangan garpu. Terkadang ujung-ujung pada batang utama masih dapat terlihat pada percabangan ini. Adapun contoh dari percabangan dikotomi adalah pada tanaman paku.



Gambar 2.3 Percabangan batang dikotomus
Sumber gambar: McGarry, 2016

2.3 Transformasi Geometri

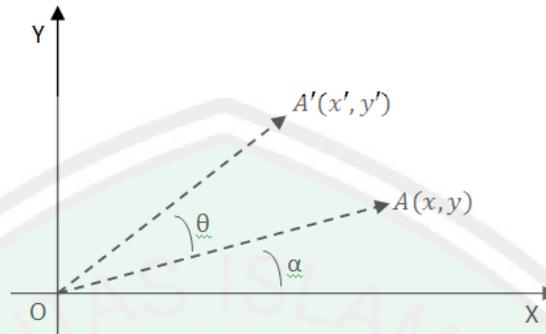
Transformasi geometri merupakan perumusan secara matematis terhadap pemindahan objek geometri (bidang datar, garis, titik) terhadap suatu bidang. Perubahan pada transformasi geometri mencakup kedudukan, arah, dan ukuran suatu objek. Perubahan objek pada transformasi geometri dapat dilakukan dengan pergeseran tanpa merubah bentuk (*translation*), proyeksi (*projection*), pencerminan (*reflection*), pemutaran (*rotation*), penskalaan (*dilatation*), serta pergeseran yang merubah bentuk (*shear*) (Kahfi, 1997).

2.4 Rotasi

Rotasi adalah salah satu pergeseran pada transformasi geometri dengan mengikuti busur lingkaran yang mempunyai titik rotasi atau titik pusat pada lingkaran. Rotasi memiliki dua arah, yaitu searah jarum jam (*clockwise*) dan

berlawanan arah jarum jam (*counter clockwise*). Rotasi dapat dilakukan pada objek geometri berdimensi dua maupun berdimensi tiga.

2.4.1 Rotasi pada Dimensi Dua



Gambar 2.4 Rotasi pada dimensi dua

Kahfi dalam bukunya Geometri Transformasi memisalkan $A(x, y)$ sembarang titik pada bidang koordinat. Kemudian $A(x, y)$ dikenai rotasi yang berlawanan arah jarum jam dengan sudut sebesar θ , sehingga menjadi $A'(x', y')$. Misalkan besar sudut antara sumbu X positif dan \overrightarrow{OA} adalah α . Maka penyelesaian dapat dilakukan secara vektor aljabar yaitu:

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{OA} &= x_i + y_j \\
 &= |\overrightarrow{OA}|(\cos \alpha)_i + |\overrightarrow{OA}|(\sin \alpha)_j \\
 &= |\overrightarrow{OA'}|(\cos \alpha)_i + |\overrightarrow{OA'}|(\sin \alpha)_j
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Di pihak lain didapatkan

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{OA'} &= x'i + y'j \\
 &= |\overrightarrow{OA'}|\{\cos(\theta + \alpha)\}_i + |\overrightarrow{OA'}|\{\sin(\theta + \alpha)\}_j
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \{(|\overline{OA}'| \cos \alpha) \cos \theta\}_i - \{(|\overline{OA}'| \sin \alpha) \sin \theta\}_i + \\
&\quad \{(|\overline{OA}'| \cos \alpha) \sin \theta\}_j - \{(|\overline{OA}'| \sin \alpha) \cos \theta\}_j
\end{aligned} \tag{1.2}$$

Dari persamaan (1.1) dan (1.2) dilakukan substitusi, sehingga

$$|\overline{OA}'| = (x \cos \theta - y \sin \theta)_i + (x \sin \theta - y \cos \theta)_j$$

Dengan demikian didapatkan

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta \tag{1.3}$$

$$y' = x \sin \theta - y \cos \theta \tag{1.4}$$

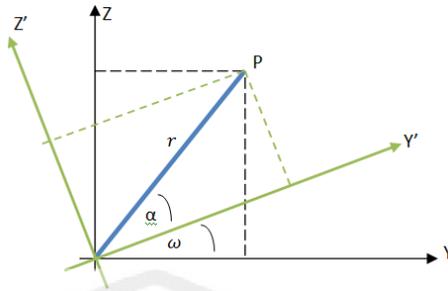
Apabila (1.3) dan (1.4) diubah dalam bentuk matriks, maka didapatkan

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

2.4.2 Rotasi pada Dimensi Tiga

Transformasi geometri dengan rotasi pada bidang tiga dimensi dimisalkan menggunakan aturan tangan kanan (Soebari, 1995). Sudut positif merupakan yang searah dengan jari tangan. Jari tengah menunjukkan sumbu x positif, telunjuk menunjukkan sumbu y positif, dan ibu jari menunjukkan sumbu z positif. Secara umum rotasi pada dimensi tiga tidak jauh berbeda dengan dimensi dua. Perbedaannya terletak pada penambahan sumbu z . Akibatnya terdapat tiga buah sumbu koordinat. Selain itu, pada dimensi tiga terdapat tiga macam rotasi yang dapat dilakukan, yaitu rotasi sumbu x , rotasi sumbu y , serta rotasi sumbu z . (Sulastri, 2007)

a. Rotasi terhadap sumbu x (ω)



Gambar 2.5 Rotasi sumbu x pada dimensi dua

Perhatikan bahwa

$$Y'_p = r \cdot \cos \alpha$$

$$Z'_p = r \cdot \sin \alpha$$

$$\begin{aligned} Y_p &= r \cdot \cos(\alpha + \omega) \\ &= r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega - r \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega \\ &= Y'_p \cdot \cos \omega - Z'_p \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} Z_p &= r \cdot \sin(\alpha + \omega) \\ &= r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \omega + r \cdot \cos \alpha \cdot \sin \omega \\ &= Z'_p \cdot \cos \omega + Y'_p \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (1.7)$$

Kemudian (1.6) dan (1.7) diubah ke dalam bentuk matriks, sehingga:

$$\begin{bmatrix} Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

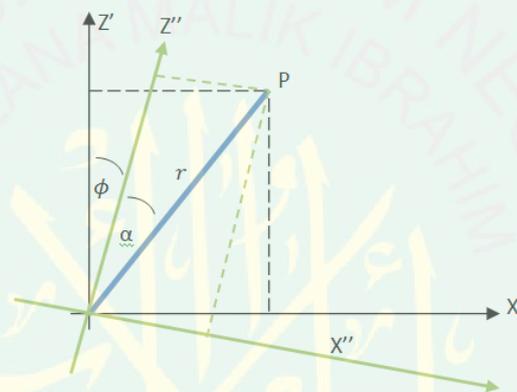
Selanjutnya matriks (1.8) diubah ke dalam bentuk invers matriks, sehingga:

$$\begin{bmatrix} Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega \\ -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Kemudian nilai $X'_p = X_p$ dimasukkan ke dalam matriks (1.9) Sehingga didapatkan:

$$\begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}$$

b. Rotasi terhadap sumbu y (ϕ)



Gambar 2.6 Rotasi sumbu y pada dimensi tiga

Perhatikan bahwa

$$\begin{aligned} X'_p &= r \cdot \sin(\alpha + \phi) = r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \phi + r \cdot \cos \alpha \cdot \sin \phi \\ &= X''_p \cdot \cos \phi + Z''_p \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} Z'_p &= r \cdot \cos(\alpha + \phi) = r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \phi - r \cdot \sin \alpha \cdot \sin \phi \\ &= Z''_p \cdot \cos \phi - X''_p \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (1.11)$$

Kemudian (1.10) dan (1.11) diubah kedalam bentuk matriks, sehingga:

$$\begin{bmatrix} X'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X''_p \\ Z''_p \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

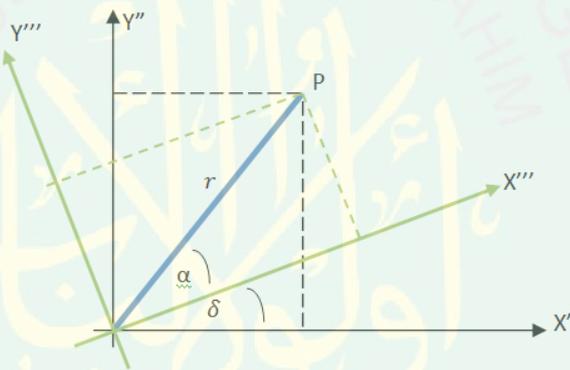
Selanjutnya matriks (1.12) diubah ke dalam bentuk invers matriks, sehingga:

$$\begin{bmatrix} X''_p \\ Z''_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Kemudian nilai $Y''_p = Y'_p$ dimasukkan ke dalam matriks (1.13) Sehingga didapatkan:

$$\begin{bmatrix} X''_p \\ Y''_p \\ Z''_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix}$$

c. Rotasi terhadap sumbu z (δ)



Gambar 2.7 Rotasi sumbu z pada dimensi tiga

Perhatikan bahwa

$$\begin{aligned} X''_p &= r \cdot \cos(\alpha + \delta) = r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta - r \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \\ &= X'''_p \cdot \cos \delta - Z'''_p \cdot \sin \delta \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} Y''_p &= r \cdot \sin(\alpha + \delta) = r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta + r \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ &= Y'''_p \cdot \cos \delta - X'''_p \cdot \sin \delta \end{aligned} \quad (1.15)$$

Kemudian persamaan (1.14) dan (1.15) diubah kedalam bentuk matriks dan kemudian dibentuk matriks invers, sehingga didapatkan

$$\begin{bmatrix} X'''_p \\ Y'''_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X''_p \\ Y''_p \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Kemudian nilai $Z'''_p = Z''_p$ dimasukkan ke dalam matriks (1.16) Sehingga didapatkan:

$$\begin{bmatrix} X'''_p \\ Y'''_p \\ Z'''_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X''_p \\ Y''_p \\ Z''_p \end{bmatrix}$$

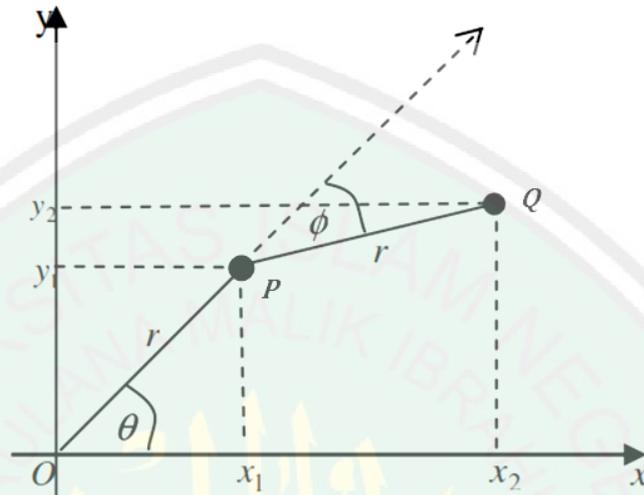
2.5 Proyeksi

Proyeksi merupakan perubahan suatu sistem (titik) yang dipetakan pada sebuah garis acuan, sehingga setiap sistem berada pada posisi sejajar terhadap garis acuan. Pada proyeksi akan didapatkan jarak terpendek terhadap suatu garis acuan. Secara matematis proyeksi menggunakan matriks tertentu terhadap titik. Translasi merupakan pergeseran suatu titik tetapi bentuknya tidak mengalami perubahan, karena pergeseran yang sama akan dialami oleh setiap titiknya. (Soebari, 1995).

Pada gambar 2.8 dimisalkan suatu titik P dan Q masing-masing memiliki koordinat (x_1, y_1) dan (x_2, y_2) , garis OP membentuk sudut θ dengan sumbu x positif dan garis tengah PQ dibentuk dari perpanjangan garis OP yang diputar searah jarum jam membentuk sudut ϕ . Jika diasumsikan $d(O,P) = d(P, Q) = r$, maka terdapat hubungan dari titik-titik koordinat tersebut yaitu :

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + r \cos(\theta - \phi) \\ &= r \cos(\theta) + r \cos(\theta - \phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_2 &= x_1 + r \sin(\theta - \phi) \\
 &= r \sin(\theta) + r \sin(\theta - \phi)
 \end{aligned}$$



Gambar 2.8 Hubungan titik-titik koordinat

2.6 Self Similarity

Pada geometri klasik, dua objek geometri disebut serupa apabila keduanya mempunyai bentuk yang sama meskipun ukurannya berbeda. Sehingga salah satu dari objek geometri didapat dari objek geometri lainnya dengan cara mengubah skala, menggeser, atau melakukan rotasi. Selain itu, faktor skala perbandingan dilakukan pada pembesaran dan penyusutan objek dengan menggunakan pecahan atau persen (Kahfi, 1997).

Sebuah keserupaan diri pada ruang Euclid adalah pemetaan linier pada $x \in \mathbb{R}^d$

$$T(x) = \lambda R_x + b \quad (1.17)$$

Dimana $\lambda \geq 0$ merupakan faktor skala, R adalah matriks rotasi dan b adalah vektor translasi. Refleksi juga termasuk ke dalam transformasi. Pada dua dimensi, notasi (1.17) ditulis sebagai $z = x + iy$ sebagai

$$T(z) = az + b$$

Dimana $a = \lambda e^{i\theta} \in \mathbb{C}$, sementara $\lambda = |a|$ dan θ merupakan besar sudut dari a . Kemudian T mengalami dilatasi oleh λ yang diikuti oleh rotasi dengan sudut θ yang dilanjutkan dengan translasi oleh $b \in \mathbb{C}$. (Treibergs, 2016)

2.7 Fungsi Iteratif

Iterasi merupakan langkah yang dilakukan dengan mengulangi secara terus menerus. Secara teknis, iteratif merupakan teknik perulangan atau menghitung secara berulang (Iswanto, 2011). Pada komputasi, teknik ini akan memanfaatkan kelebihan *computer* sebagai mesin hitung yang mampu melakukan perhitungan secara berulang dengan perintah yang sangat sederhana.

Secara matematis, iterasi menggunakan komposisi fungsi yang berulang-ulang terhadap dirinya sendiri. Perulangan dilakukan secara terus menerus bahkan hingga tak terhingga. Misal diberikan suatu fungsi $G(x)$, sehingga $G^2(x)$ merupakan iterasi kedua dari $G(x)$. Sementara iterasi ketiganya adalah $G(G(G(x)))$ yang menghasilkan $G^3(x)$. Sehingga $G^n(x)$ merupakan n-kali dari komposisi G (A. Lindenmayer, 1990).

Misalkan, jika $H(x) = x^2 + 2$ maka iterasi berikutnya adalah

$$H^2(x) = (x^2 + 2)^2 + 2$$

$$H^3(x) = ((x^2 + 2)^2 + 2)^2 + 2$$

$$H^4(x) = (((x^2 + 2)^2 + 2)^2 + 2)^2 + 2$$

Misalkan, jika $H(x) = \sqrt{x}$ maka iterasi berikutnya adalah

$$H^2 = \sqrt{\sqrt{x}}$$

$$H^3 = \sqrt{\sqrt{\sqrt{x}}}$$

$$H^4 = \sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{x}}}}$$

Adapun arti dari $H^2(x)$ bukan berarti mengangkat fungsi H sebanyak n kali, melainkan melakukan iterasi terhadap fungsi H sebanyak n kali.

2.8 Model Deterministik *L-System*

Model deterministik merupakan model matematika dimana gejala-gejala dapat diukur dengan kepastian tertentu. Pada model deterministik, peluang-peluang dari masing-masing kejadian terhadap kejadian selanjutnya tidaklah dihitung. Menyusun model deterministik lebih ringkas daripada menyusun sebuah model stokastik. Adapun dalam membuat suatu model, metode *deterministic l-system* mempunyai lebih dari satu aturan produksi yang berhubungan dengan aturan produksi lainnya. (A. Lindenmayer, 1990)

Secara umum *Lindenmayer system* adalah sebuah sistem penulisan kembali dengan aturan-aturan tertentu. *L-system* merupakan sebuah cabang ilmu

pada ilmu sistem dinamik yang diterapkan pada ilmu biologi, khususnya pada morfologi tanaman. Pada penerapannya, *l-system* biasa digunakan dalam memodelkan morfologi akar, batang, daun, bunga dan buah pada tanaman. *L-system* juga digunakan pada bidang arsitektur, pembuatan video game, hingga ranah perfilman 3 dimensi sebagai *augmented reality* (AR) dan *virtual reality* (VR) . Pemodelan *l-system* dilakukan dengan aturan penulisan ulang menggunakan berbagai string. Aplikasi komputasi matematis seperti Matlab, Java, dan C++ mempermudah dalam menyusun komponen *l-system*. (Leitner, 2010)

Pada *Deterministic L-system*, terdapat beberapa komponen utama yaitu huruf, aksioma, produksi. Berikut ini penjelasan dari komponen-komponen yang dimuat oleh Astrid Lindenmayer dalam bukunya.

1. Aksioma

Aksioma atau yang biasa disebut inisiator merupakan sebuah deret simbol (*string*) w yang terdiri dari simbol-simbol pada V . Himpunan *string* dari V dinotasikan V^* . Apabila diberikan $V = \{a,b,c\}$, maka contoh *string* yang memungkinkan untuk dibuat yaitu : $a,b,a,ba,acb,baac$, dan sebagainya. Panjang dari sebuah *string* w merupakan banyaknya simbol dalam *string*.

2. Produksi

Aturan penulisan kembali atau yang biasa disebut aturan produksi adalah suatu pemetaan simbol terhadap *string*. Misal pemetaan $a \in V$ terhadap *string* $w \in V^*$ dengan notasi :

$$P : a \mapsto w$$

Apabila tidak terdapat aturan produksi, maka dapat diasumsikan bahwa simbol ($a \in V$) dipetakan terhadap dirinya sendiri sehingga a berkedudukan sebagai konstanta L -system.

3. Huruf

Huruf merupakan himpunan hingga V dari simbol-simbol *alphabet*, contohnya pada bentuk a,b,c dan seterusnya, serta beberapa huruf (*character*) lainnya. Pada *deterministic l-system*, terdapat komponen lain selain huruf, aksioma, dan produksi, yaitu fungsi $\pi : P \rightarrow R$ yang merupakan pemetaan barisan produksi ke dalam barisan bilangan real non-negatif.

Misalkan diberikan L -system dengan komponen sebagai berikut :

$$V = \{a,b,c\}$$

$$w = b$$

$$p1 : a \rightarrow ca$$

$$p2 : b \rightarrow ac$$

$$p3 : c \rightarrow ab$$

Hasil produksi dari L -system didefinisikan sebagai barisan $\{g_n\}$, $n = 0,1,2,3,\dots,k$. dimana setiap generasi g_n adalah sebuah *string* dalam V^* yang berkembang dari generasi masing-masing simbol g_{n-1} dengan menerapkan semua aturan produksi untuk masing-masing simbol g_{n-1} . Generasi pertama g_0 adalah aksioma w . (Wright, 1996).

Penafsiran grafis pada *l-system* dilakukan setelah menyusun barisan huruf yang diatur dalam aturan produksi. Adapun simbol-simbol yang umum digunakan yaitu:

F : bergerak satu garis ke depan

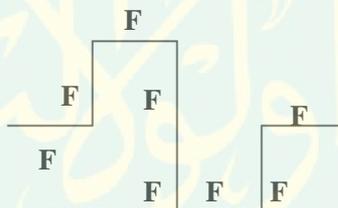
f : bergerak satu satuan ke depan tanpa menggambar garis.

$+$: rotasi melawan arah jarum jam (*counter clockwise*) dengan sudut δ .

$-$: rotasi searah jarum jam (*clockwise*) dengan sudut δ .

$|$: berputar 180°

Misalkan diberikan aksioma serta aturan produksi $V = \{F, +, -\}$, $w = F+F+F+F$, dan $p : F \rightarrow F+F-F-FF+F+F-F$. Penafsiran grafis dari string aturan produksi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.9 di bawah ini dengan asumsi sudut δ adalah $\pi/2$ radian.



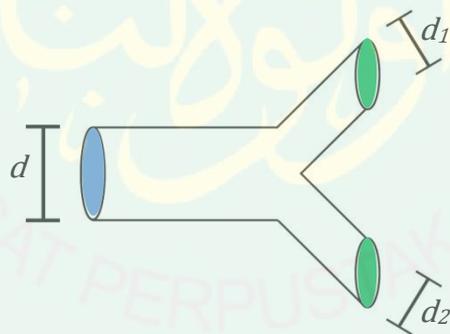
Gambar 2.9 Penafsiran grafis *l-system*
Sumber gambar: Juhari, 2013

Adapun cara menafsirkannya, pertama mengerjakan perintah F yaitu menggambar garis ke depan satu satuan sepanjang d . Kemudian menjalankan perintah simbol $+$ yaitu memutar arahnya berlawanan arah jarum jam sebesar δ . Setelah itu, dilanjutkan dengan menggambar F kembali sesuai arah yang ditentukan sebelumnya. Perintah simbol $-$ digunakan untuk memutar arahnya searah jarum jam sebesar δ dan dilanjutkan menggambar F kembali. Kemudian dilanjutkan perintah simbol $-$ kembali dan dilanjutkan menggambar F sebesar dua

satuan. Selanjutnya menjalankan perintah simbol + dan dilanjutkan menggambar F . Setelah itu, menjalankan perintah yang sama dan dilanjutkan menggambar F . Setelah memutar arah – dilanjutkan dengan perintah yang terakhir yaitu menggambar F sesuai dengan arah yang baru. Untuk menafsirkan grafis generasi selanjutnya, dapat dilakukan dengan cara sama. (Juhari, 2013)

2.9 Postulat Leonardo da Vinci

Leonardo da Vinci memberikan pernyataan pada catatannya pada no. 394, yang berbunyi “Semua cabang pohon pada setiap bagian ketinggian apabila disatukan memiliki ketebalan yang sama dengan batang dibawahnya” (Ritcher, 1970). Penjelasan dari da Vinci tersebut menggambarkan kondisi diameter sebelum dan sesudah percabangan, yang disimbolkan dengan d , d_1 , dan d_2 . Dimana d adalah diameter batang induk, d_1 dan d_2 adalah diameter batang anak.



Gambar 2.10 Pengukuran rasio ketebalan batang
Sumber gambar: Mandelbrot, 1982

Dari postulat da Vinci tersebut didapatkan luas dalam batang induk (lingkaran biru) akan sama dengan jumlah luas dalam batang anak (lingkaran hijau), sehingga

$$L_{induk} = L_1 + L_2 \quad (1.18)$$

Adapun da Vinci menggunakan luas lingkaran dalam menghitung ketebalan pada batang induk dan anak. Sehingga digunakan simbol jari-jari dari (1.18) untuk persamaan berikutnya.

$$\begin{aligned}\pi r_{induk}^2 &= \pi r_1^2 + \pi r_2^2 \\ r_{induk}^2 &= r_1^2 + r_2^2 \\ r_{induk}^2 &= 2r_{12}^2\end{aligned}\tag{1.19}$$

Implikasi dari hal ini yaitu apabila jari-jari kedua batang anak dijumlahkan maka akan sama dengan ketebalan batang induknya (Mandelbrot, 1982). Apabila dilakukan perbandingan batang induk terhadap batang anak pada persamaan (1.19) akan didapatkan

$$\begin{aligned}\frac{r_{induk}^2}{2r_{12}^2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{r_{induk}^2}{2r_{12}^2} &= 0.707106\end{aligned}\tag{1.20}$$

Sehingga didapatkan nilai 0.707106 sebagai rasio dari ketebalan batang pada tanaman. Rasio postulat da Vinci digunakan sebagai parameter dalam membentuk ketebalan batang pada *l-system* (Lindenmayer, 1990). Pada percabangan tiga batang, empat batang, dan seterusnya tetap menggunakan postulat da Vinci, akan tetapi rasio yang dihasilkan akan berbeda, menyesuaikan banyaknya percabangan induk batang.

2.10 Percabangan *L-system*

Lindenmayer memperkenalkan dalam bukunya suatu notasi untuk menggambarkan grafik menggunakan string dengan tanda kurung. Tujuannya adalah untuk menggambarkan struktur percabangan yang ditemukan pada banyak

tanaman. Mulai dari alga, sampai tanaman tingkat tinggi dengan menggunakan kerangka *L-system*. Sehingga untuk memodelkan struktur percabangan, ada penambahan karakter dalam *L-system*, dengan dua simbol baru, yaitu:

$[$: Menyimpan letak saat ini kemudian bergerak sesuai perintah selanjutnya.

$]$: Mengembalikan ke posisi semula yang disimpan pada simbol “[“.

Di bawah ini adalah conroh dari penggunaan simbol percabangan dengan komponen *L-system*:

V : $\{F, +, [,]\}$

w : F

p : $F \rightarrow F[+F][-F]$

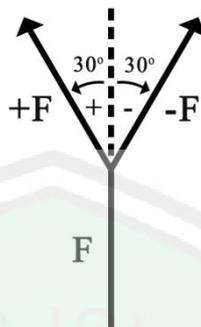
δ : 30°

kemudian akan didapatkan generasi pertama g_1 dengan string:

$F[+F][-F]$

Adapun cara untuk menafsirkannya, mula-mula menjalankan perintah F , yaitu menggambar segmen garis ke depan satu satuan. Simbol $[$ digunakan untuk menyimpan posisi saat ini. Sedangkan simbol $+$ digunakan untuk memutar arahnya berlawanan arah jarum jam sebesar $\delta = 30^\circ$. Setelah menjalankan kedua simbol tersebut, langkah selanjutnya yaitu menggambar F sesuai dengan arah yang telah ditentukan sebelumnya. Dilanjutkan menjalankan perintah simbol $]$ yaitu kembali ke posisi yang disimpan pada simbol $[$. Perintah terakhir yaitu menggambar F sesuai dengan arah sebelum perintah simbol $[$. Langkah-langkah

tersebut dapat juga diterapkan untuk generasi yang lebih tinggi. Adapun penafsiran grafisnya ditunjukkan pada gambar 2.11 (A. Lindenmayer, 1990)



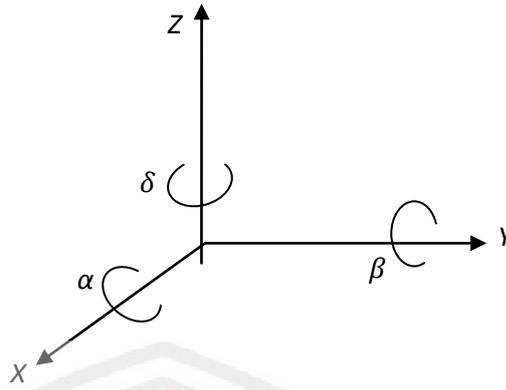
Gambar 2.11 Percabangan *l*-system
Sumber gambar: Lindenmyer, 1990

2.11 *L*-system Dimensi Tiga

Cara menafsirkan *L*-system secara grafis pada dimensi dua hanya membutuhkan sebuah sudut. Namun, dalam dimensi tiga, diperlukan sesuatu yang lebih kompleks, yaitu dengan menggunakan matriks rotasi berukuran 3 x 3. Sehingga penafsiran *l*-system dimensi tiga membutuhkan dua hingga tiga sudut. Perlakuan transformasi geometri pada sumbu x, y , dan z haruslah tepat. Rotasi yang digunakan pada dimensi tiga menggunakan persamaan di bawah ini.

$$[\bar{X} \ \bar{Y} \ \bar{Z}] = [\vec{X} \ \vec{Y} \ \vec{Z}]$$

Misalkan R adalah matriks rotasi. Sehingga untuk memutar sudut α , β , dan δ pada vector $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ dapat digunakan rotasi matriks seperti pada gambar 2.12 di bawah ini



Gambar 2.12 Rotasi pada dimensi tiga

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$$

$$R(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$R(\delta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini merupakan penjelasan mengenai metode penelitian yang dilakukan oleh peneliti, mulai dari pengambilan data dari objek, menentukan komponen *l-system*, membuat aturan produksi, hingga melakukan visualisasi. Metode pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif, sehingga variabel-variabel pada tanaman memiliki pengaruh pada hasil visualisasi dengan *l-system*

3.1 Langkah-Langkah Penelitian

Langkah pertama yang dilakukan untuk memodelkan tanaman menggunakan *deterministic l-system* adalah pengambilan gambar objek yang dimodelkan, yaitu berupa gambar yang difoto dari berbagai sisi. Setelah itu mengukur besar sudut, panjang batang, dan ketebalan batang dari setiap percabangan pada batang objek. Setelah pengukuran selesai, dilanjutkan dengan mencari nilai rata-rata dan rasio dari hasil pengukuran. Kemudian dilakukan identifikasi berbagai komponen *l-system* yang membangunnya, seperti aturan produksi, huruf, aksioma, dan komponen lainnya. Setelah itu dilanjutkan pada tahap simulasi dengan mengevaluasi hasilnya.

Proses simulasi dan evaluasi hasil pemodelan dilakukan dengan mengubah banyaknya iterasi, besar sudut, serta rasio yang digunakan. Peneliti melakukan simulasi program dengan bantuan aplikasi L-Studio agar lebih mendetail hasilnya. Perubahan jumlah iterasi bertujuan untuk mengetahui pertumbuhan tanaman beserta percabangannya untuk beberapa generasi. Ketika akan melakukan proses

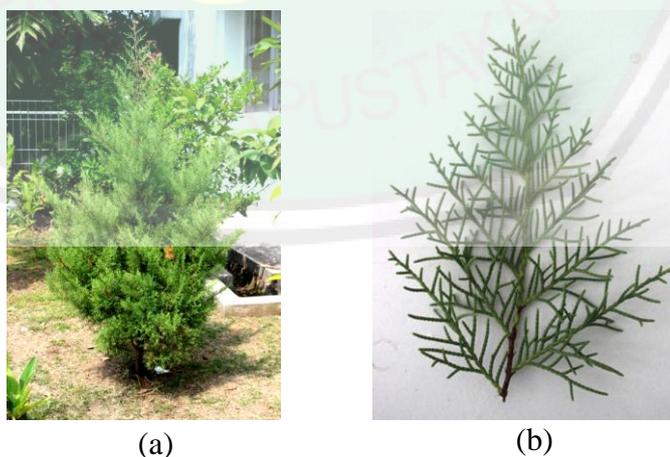
simulasi dan visualisasi, semua komponen *l-system* dimasukkan ke dalam program L-Studio.

3.2 Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan adalah beberapa foto dari tumbuhan cemara, hasil pengukuran sudut, ketebalan batang, serta panjang batang pada pohon cemara yang akan dimodelkan. Data-data tersebut digunakan sebagai dasar dalam membentuk pola *l-system* yang akan dibuat.

3.2.1 Foto Objek

Tahapan awal yang dilakukan adalah mengambil beberapa foto dari tumbuhan cemara dengan cabang yang terlihat jelas. Tujuannya agar lebih mudah dalam menunjukkan model *deterministic l-system*. Karena pemodelan akan dilakukan pada ruang dimensi dua dan dimensi tiga, maka peneliti mengambil gambar dari berbagai sisi dengan perbesaran yang berbeda. Selain itu peneliti mengambil gambar pada bagian batang utama, batang anak, dahan dan rantingnya seperti pada Gambar 3.1 dibawah ini.

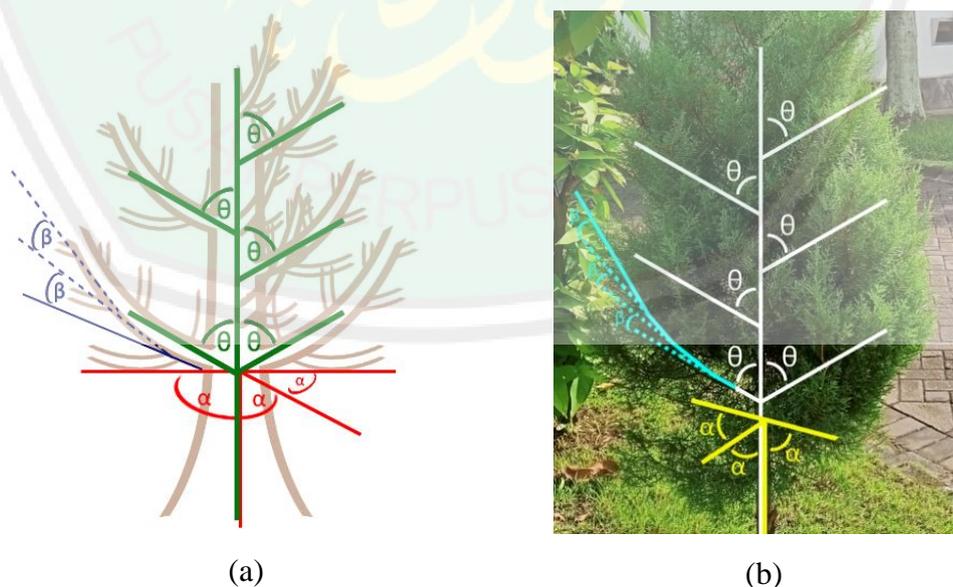


(a) Foto objek yang dimodelkan; (b) Identifikasi cabang dari objek

Gambar 3.1. Contoh pohon cemara yang akan dimodelkan

3.2.2 Pengukuran Sudut

Dari gambar yang sudah diambil, kemudian kita akan menentukan besar sudutnya, baik sudut dari cabang utama maupun sudut dari percabangan rantingnya. Kemudian kita juga akan menghitung sudut rata-ratanya untuk mencari pendekatan (aproksimasi) dari nilai δ . Jika pada penggunaan sudut asli masih belum menampilkan visualisasi yang mirip dengan objek, maka penggunaan sudut aproksimasi dilakukan pada program dan dilanjutkan dengan simulasi kembali. Adapun pengukuran dibagi kedalam menjadi tiga bagian. Bagian pertama merupakan pengukuran besar sudut dari induk batang terhadap anak batang dan diberi simbol α . Bagian kedua merupakan pengukuran dari beloknya batang. Sehingga batang akan terlihat belok dan tumbuh ke atas. Bagian ini diberi simbol β . Bagian ketiga akan membentuk kerangka batang dari tanaman cemara, seperti batang monopodial. Bagian ini diberi simbol θ . Pembagian tiga jenis sudut dilakukan karena hasil visualisasi model diharapkan berada dalam ruang tiga dimensi. Hasil pengukuran sudut dapat dilihat pada tabel berikut.



(a) Ilustrasi pengukuran besar sudut; (b) Sudut yang diukur pada objek

Gambar 3.2 Menentukan besar sudut pada objek

Sudut yang diukur (α)	Ukuran Sudut
Percabangan Pertama	0°
Percabangan Kedua	90°
Percabangan Ketiga	180°
Percabangan Keempat	270°

Tabel 3.1 Hasil pengukuran sudut pada bagian sudut α

Sudut yang diukur (β)	Kiri	Kanan
Ruas Pertama	5°	5,2°
Ruas Kedua	6°	6,8°
Ruas Ketiga	5,4°	5,2°
Ruas Keempat	5°	5,2°

Tabel 3.2 Hasil pengukuran sudut pada bagian sudut β

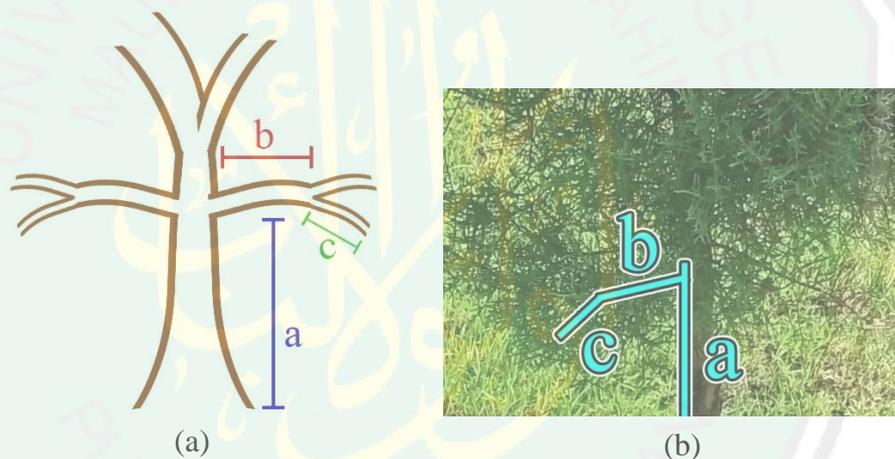
Sudut yang diukur (θ)	Kiri	Kanan
Cabang Pertama	65°	62°
Anak Cabang Pertama	52°	54°
Cabang Kedua	62°	63°
Anak Cabang Kedua	66°	64°
Cabang Ketiga	60°	62°
Anak Cabang Ketiga	64°	61°

Tabel 3.3 Hasil pengukuran sudut pada bagian sudut θ

3.2.3 Pengukuran Panjang Batang

Pada bagian ini dilakukan pengukuran pada bagian-bagian batang tanaman cemara. Bagian yang diukur meliputi panjang batang utama, panjang anak batang

pertama, dan panjang percabangan pada anak batang pertama (dahan). Kemudian, hasil dari ketiga batang tersebut dibandingkan satu sama lain, sehingga membentuk suatu rasio yang nantinya akan digunakan pada perumusan komponen *l-system*. Pengukuran panjang batang tidak menyeluruh, melainkan pada batang yang belum mengalami percabangan. Pengukuran pada panjang batang dibagi kedalam 3 bagian, yaitu panjang batang induk yang disimbolkan dengan (a), percabangan batang induk yang disimbolkan dengan (b), serta percabangan dari cabang induk (dahan) yang disimbolkan dengan (c). Ilustrasi pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.3, sedangkan Tabel 3.4 menunjukkan hasil pengukuran dari panjang batang pada objek.



(a) Ilustrasi pengukuran panjang batang; (b) Jenis batang diukur pada objek

Gambar 3.3 Menentukan panjang batang pada objek

Jenis Batang	Panjang Batang
Batang Induk (a)	17,20 cm
Percabangan batang induk (b)	15,50 cm
Percabangan dari cabang induk (c)	9,30 cm

Tabel 3.4 Hasil pengukuran panjang batang pada objek

3.2.4 Pengukuran Ketebalan Batang

Pada bagian ini, ketebalan batang dari tanaman cemara diukur. Mulai dari batang utama, cabangnya, dahannya, hingga rantingnya. Kemudian dilakukan perbandingan terhadap ketebalan batang induk dengan anaknya. Adapun teori yang dikemukakan Leonardo Da Vinci mengenai ketebalan batang akan dijadikan landasan terhadap pengukuran ketebalan batang tanaman cemara. Data-data yang diperoleh akan digunakan untuk membuktikan teori dari Da Vinci tersebut. Berikut ini hasil perhitungan ketebalan pada batang tanaman cemara.

Jenis Batang	Ketebalan Batang
Batang Induk	9,20 cm
Pecabangan kanan	6,40 cm
Percabangan kiri	6,20 cm
Anak percabangan kanan	4,50 cm
Anak percabangan kanan	4,60 cm
Anak percabangan kiri	4,40 cm
Anak percabangan kiri	4,50 cm

Tabel 3.5 Hasil pengukuran ketebalan batang pada objek

3.3 Menyusun Model *L-System*

Penyusunan model *l-system* dilakukan setelah data-data berupa gambar, panjang batang, ketebalan batang, serta besar sudut percabangan didapatkan. Kemudian dilakukan tahapan-tahapan dalam menyusun model *l-system* yang dimulai dari menentukan huruf dan aksioma awal, menentukan aturan produksi, melakukan iterasi dan visualisasi.

3.3.1 Pemilihan Huruf dan Simbol

Setelah objek, panjang batang, sudut, dan ketebalan batang sudah ditentukan, maka selanjutnya adalah pemilihan huruf dan simbol. Huruf yang digunakan dapat dipilih dari karakter *alphabet* (kecuali huruf F). Huruf yang digunakan haruslah lebih dari 1 huruf, karena metode yang digunakan adalah *Deterministic L-system* yang berarti visualisasi dilakukan secara 2 dimensi (memenuhi sumbu x dan y) serta tiga dimensi (memenuhi sumbu x , y , dan z).

3.3.2 Menentukan Aksioma Awal

Setelah huruf dan simbol ditentukan, kemudian kita akan menentukan aksioma awal. Aksioma awal dari *l-system* akan sangat berpengaruh kepada iterasi berikutnya. Oleh karena itu, dalam menentukan aksioma awal dibutuhkan beberapa kali percobaan untuk mendapatkan model dari aksioma awal (g_0) yang mendekati visualisasi objek. Penentuan aksioma awal dapat dilakukan secara deterministik pada awalnya untuk mendapatkan hasil yang mirip dengan objek, yang kemudian hasil deterministik tersebut akan dikembangkan kembali dengan menyesuaikan pada aturan produksi.

3.3.3 Menentukan Aturan Produksi

Pada tahap ini, komponen-komponen dari *deterministic l-system* mulai dimasukkan. Menentukan aturan produksi dimulai dengan mengamati tipe batang objek pada gambar. Kemudian menentukan banyaknya aturan produksi yang akan digunakan. Selanjutnya mulai menyusun rangkaian huruf dan besar sudut putaran yang menyesuaikan pada morfologi model batang. Dilanjutkan dengan menyusunnya secara dua dimensi menggunakan metode deterministik. Setelah

beberapa aturan produksi terbentuk, langkah selanjutnya adalah menentukan banyaknya iterasi.

3.3.4 Menentukan Iterasi

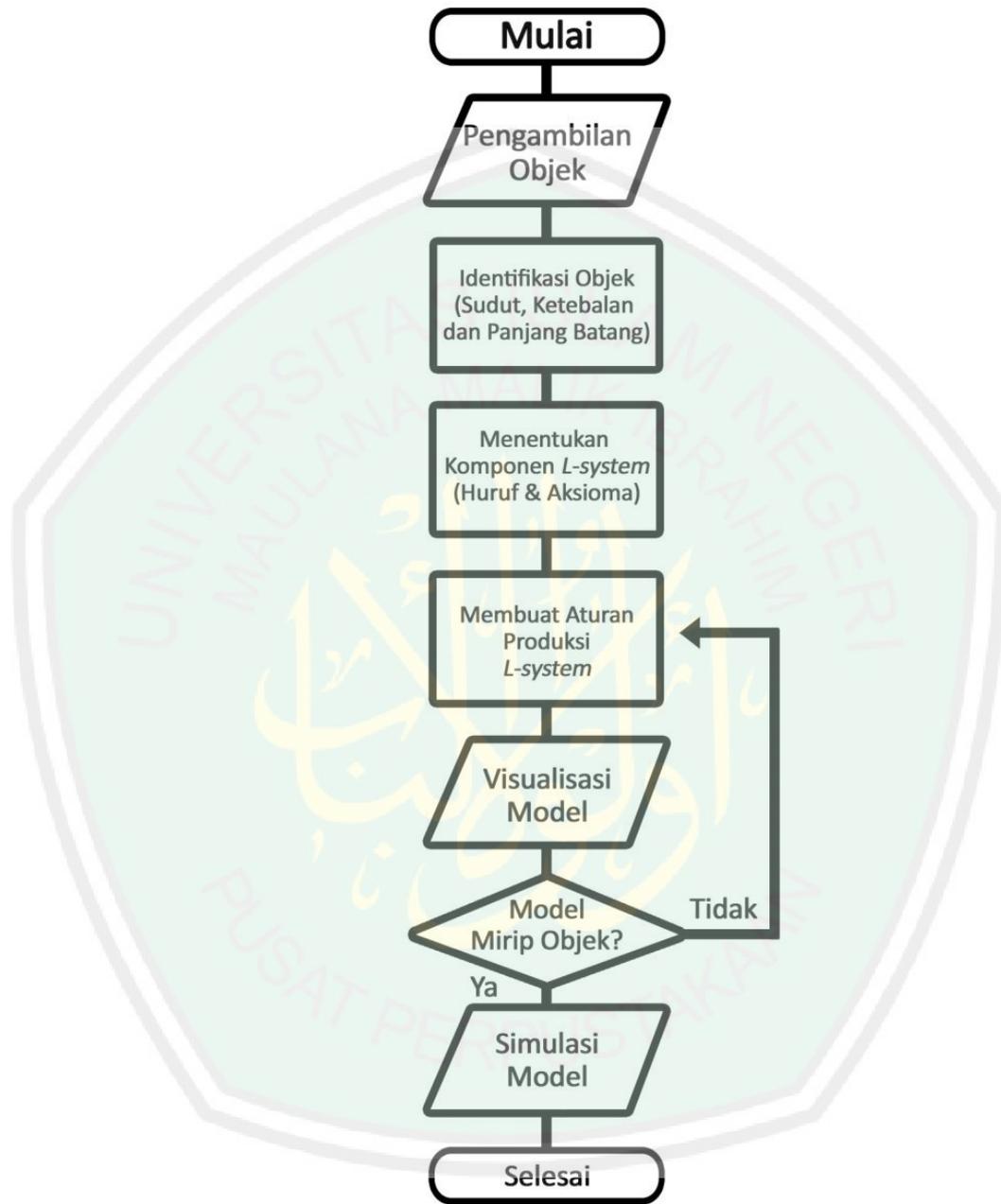
Tahapan selanjutnya adalah menentukan iterasi. Iterasi ditentukan dari angka yang bernilai rendah (1, 2, dan 3) hingga angka yang bernilai tinggi. Iterasi dilakukan beriringan dengan simulasi (*running*) program. Iterasi yang dilanjutkan simulasi dilakukan berulang kali hingga mendapatkan visualisasi yang mirip ataupun mendekati dengan objek aslinya. Biasanya iterasi dilakukan hingga mencapai 10 kali atau lebih. Semakin banyak iterasi membuat percabangan batang semakin kompleks, sehingga simulasi akan berlangsung lambat.

3.3.5 Melakukan Visualisasi

Tahapan terakhir yaitu melakukan visualisasi. Singkatnya tahapan ini merupakan tahapan simulasi dari hasil kodingan yang ada. Pada tahap ini kita harus memperhatikan secara detail hasil visualisasi, agar terlihat apakah hasilnya bersifat kontinu ataupun diskrit. Evaluasi terhadap hasil visualisasi perlu dilakukan. Apabila terdapat kekurangan dari model yang telah dihasilkan, maka semua langkah harus diulangi sampai didapatkan model yang mirip aslinya. Pada *deterministic l-system*, komponen probabilitas tidak perlu dimasukkan. Komponen probabilitas dimasukkan ketika simulasi sudah dianggap memenuhi kriteria model dan digunakan pada metode *stochastic l-system*.

Langkah-langkah yang ditempuh pada penelitian ini secara garis besar terdiri atas pengambilan data, pengolahan data, pembuatan model, simulasi model,

dan visualisasi model dengan menggunakan aplikasi L-Studio. Gambar 3.4 menunjukkan *flowchart* dari langkah-langkah penelitian.



Gambar 3.4 Flowchart langkah-langkah penelitian

BAB IV

PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai pengolahan hasil data pengukuran, simulasi, serta visualisasi batang tanaman menggunakan *deterministic l-system*. Tahapan yang dilakukan sesuai dengan yang telah diuraikan dalam bab 1 dengan tidak menyertakan pertumbuhan akar, bunga, dan daun. Adapun cara untuk mendapatkan model batang tanaman dengan menggunakan *deterministic l-system* terdiri dari beberapa tahap yang akan dijelaskan pada subbab berikut ini.

4.1 Mengolah Data Pengukuran Model

Pada bagian ini akan menjelaskan pengolahan data pengukuran ketebalan batang, panjang batang, dan besar sudut pada bab sebelumnya. Hasil dari pengolahan data ukuran sudut akan berupa nilai rata-rata yang akan digunakan saat membangun komponen utama *l-system*. Sedangkan data panjang dan ketebalan batang akan dibandingkan satu sama lain untuk mendapatkan suatu rasio perbandingan. Rasio ini akan digunakan ketika membangun komponen-komponen *parametric lindenmayer system*.

4.1.1 Menentukan Nilai Besar Sudut

Data-data besaran sudut pada tabel akan diolah kembali dengan cara mencari nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata digunakan karena pada saat membuat komponen *l-system*, besaran sudut yang digunakan harus dapat mewakili semua besaran sudut pada objek. Hal ini dilakukan agar visualisasi model dapat menyerupai objek aslinya. Pada bab sebelumnya telah dijelaskan tiga macam

besaran sudut. Adapun nilai rata-rata yang dicari adalah pada setiap bagiannya. Berikut ini adalah cara menghitung rata-rata besaran sudutnya.

$$\bar{x} = \frac{\sum X}{n}$$

$$\bar{x}_\alpha = \frac{90^\circ + 180^\circ + 360^\circ + 180^\circ}{4} = 90^\circ$$

$$\bar{x}_\beta = \frac{5^\circ + 5,2^\circ + 6^\circ + 6,8^\circ + 5,4^\circ + 5,2^\circ + 5^\circ + 5,2^\circ}{8} = 5,47^\circ$$

$$\bar{x}_\theta = \frac{65^\circ + 62^\circ + 52^\circ + 54^\circ + 62^\circ + 63^\circ + 66^\circ + 64^\circ + 60^\circ + 62^\circ + 64^\circ + 61^\circ}{12} = 61,25^\circ$$

4.1.2 Menentukan Nilai Panjang Batang

Pada tabel diberikan data nilai panjang batang tanaman cemara. Data tersebut akan diolah dengan cara mencari rasio perbandingan dari masing-masing panjang batang. Penggunaan rasio berfungsi sebagai salah satu komponen *l*-system pada metode *parametric l*-system. Rasio yang digunakan terbagi menjadi dua. Rasio pertama merupakan perbandingan panjang antara batang anak (b) dengan batang induk (a). Sementara rasio kedua merupakan perbandingan antara panjang percabangan batang anak (c) dengan batang anak (b). Adapun cara menentukan rasio panjang batang adalah sebagai berikut.

$$r_1 = \frac{b}{a} = \frac{15,50 \text{ cm}}{17,20 \text{ cm}} = 0,90$$

$$r_2 = \frac{c}{b} = \frac{9,30 \text{ cm}}{15,50 \text{ cm}} = 0,60$$

4.1.3 Menentukan Ketebalan Batang

Nilai panjang batang pada bab sebelumnya akan diolah dengan melakukan perbandingan setiap batang anak dengan masing-masing induknya. Tabel menunjukkan data batang sebanyak tujuh ketebalan batang, sehingga nantinya akan didapatkan hasil berupa enam buah rasio ketebalan batang. Kemudian keenam rasio ini akan diambil nilai rata-ratanya. Hal ini akan menghasilkan satu nilai rasio ketebalan batang yang utuh. Berikut ini adalah penghitungan keenam rasio ketebalan batang.

$$w_1 = \frac{6,40 \text{ cm}}{9,20 \text{ cm}} = 0,69 \quad w_4 = \frac{4,60 \text{ cm}}{6,40 \text{ cm}} = 0,71$$

$$w_2 = \frac{6,20 \text{ cm}}{9,20 \text{ cm}} = 0,67 \quad w_5 = \frac{4,40 \text{ cm}}{6,20 \text{ cm}} = 0,70$$

$$w_3 = \frac{4,50 \text{ cm}}{6,40 \text{ cm}} = 0,70 \quad w_6 = \frac{4,50 \text{ cm}}{6,20 \text{ cm}} = 0,72$$

$$\begin{aligned} w_{rasio} &= \frac{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6}{6} \\ &= \frac{0,69 + 0,67 + 0,70 + 0,71 + 0,70 + 0,72}{6} = 0,698 \end{aligned}$$

4.2 Menyusun Model *L-System*

Menyusun Model *L-system* dilakukan setelah pengolahan data besar sudut percabangan, panjang batang, serta ketebalan batang sudah didapatkan. Data yang sudah diolah akan digunakan pada saat menyusun komponen *deterministic l-system* maupun *parametric l-system*. Adapun tahapan dalam menyusun model *l-system* dimulai dari mengidentifikasi komponen *l-system*, melakukan penamaan titik, menyusun *parametric l-system*, hingga memasukkan nilai ketebalan batang.

4.2.1 Identifikasi Komponen Utama *L-system*

Identifikasi komponen utama pada *l-system* dibangun dari pengamatan secara sederhana pada objek yang akan diteliti. Secara morfologi pada gambar terlihat bahwa tanaman cemara yang akan diteliti memiliki pola dahan monopodial. Pola monopodial ini terbentuk pula pada bagian ranting hingga batang utama tanaman cemara. Sehingga pembuatan model *l-system* secara sederhana dilakukan dengan mengikuti pola monopodial pada tanaman. Komponen *L-system* yang dibentuk adalah sebagai berikut.

$$V = \{F, A, B, C, D, +, -, [,]\}$$

$$w = A$$

$$p_1 = A \rightarrow F[B]$$

$$p_2 = B \rightarrow F[+++++C]F[-----C][B]$$

$$p_3 = C \rightarrow F[D]$$

$$p_4 = D \rightarrow F[C]$$

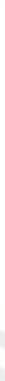
Pada komponen *L-system* di atas, digunakan simbol + dan - yang berarti berputar searah jarum jam 10 radian (+) dan berlawanan arah jarum jam (-). Pada aturan produksi pertama, (p_1) memetakan A menjadi $F[B]$, yang berarti maju satu satuan yang dilanjutkan dengan B satu satuan. Kemudian pada aturan produksi kedua (p_2), B dipetakan menjadi $F[+++++C]F[-----C][B]$, yang berarti B adalah maju satu langkah yang kemudian berputar 60° searah jarum jam yang dilanjutkan dengan C kemudian maju satu langkah F dan berputar 60° berlawanan

arah C yang dilanjutkan dengan pemetaan terhadap dirinya sendiri B . Kemudian pada aturan produksi ketiga (p_3), C memiliki arti maju sepanjang satu satuan yang dilanjutkan dengan D . Sementara D pada aturan produksi keempat (p_4) memiliki arti maju satu satuan yang dilanjutkan dengan C . Adapun C dan D saling memetakan satu sama lain, sehingga terbentuk pola l -system seperti pola pada morfologi tanaman monopodial. Adapun penjelasan generasi yang terbentuk dapat diamati pada tabel berikut ini

Generasi	Hasil Produksi
g_0	F
g_1	$F[F[+++++[C]]F[-----[C]]][B]$
g_2	$F[F[+++++[F[C]]F[-----F[C]]$ $[F[+++++[F]]F[-----[F]]][B]$
g_3	$F[F[+++++[F[C[C]]]F[-----F[C[C]]]$ $[F[+++++[F]]F[-----[F]]$ $[F[+++++[F[C]]F[-----F[C]]$ $[F[+++++[F]]F[-----[F]]][B]$

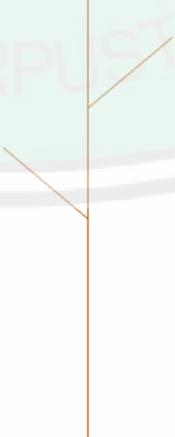
Tabel 4.1 Beberapa generasi *deterministic l-system*

Pada generasi L -system tersebut, A merupakan aksioma atau inisiator. Sementara generasi (g_0), (g_1), dan (g_2) merupakan iterasi atau hasil running dari program l -system yang sudah dibuat. Huruf A kemudian akan membentuk satu buah batang tanaman yang tegak ke atas pada iterasi pertama (g_0). Hal ini disebabkan oleh pemetaan A terhadap F yang kemudian tidak dilanjutkan oleh aturan produksi berikutnya. Hasil dari iterasi pertama ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



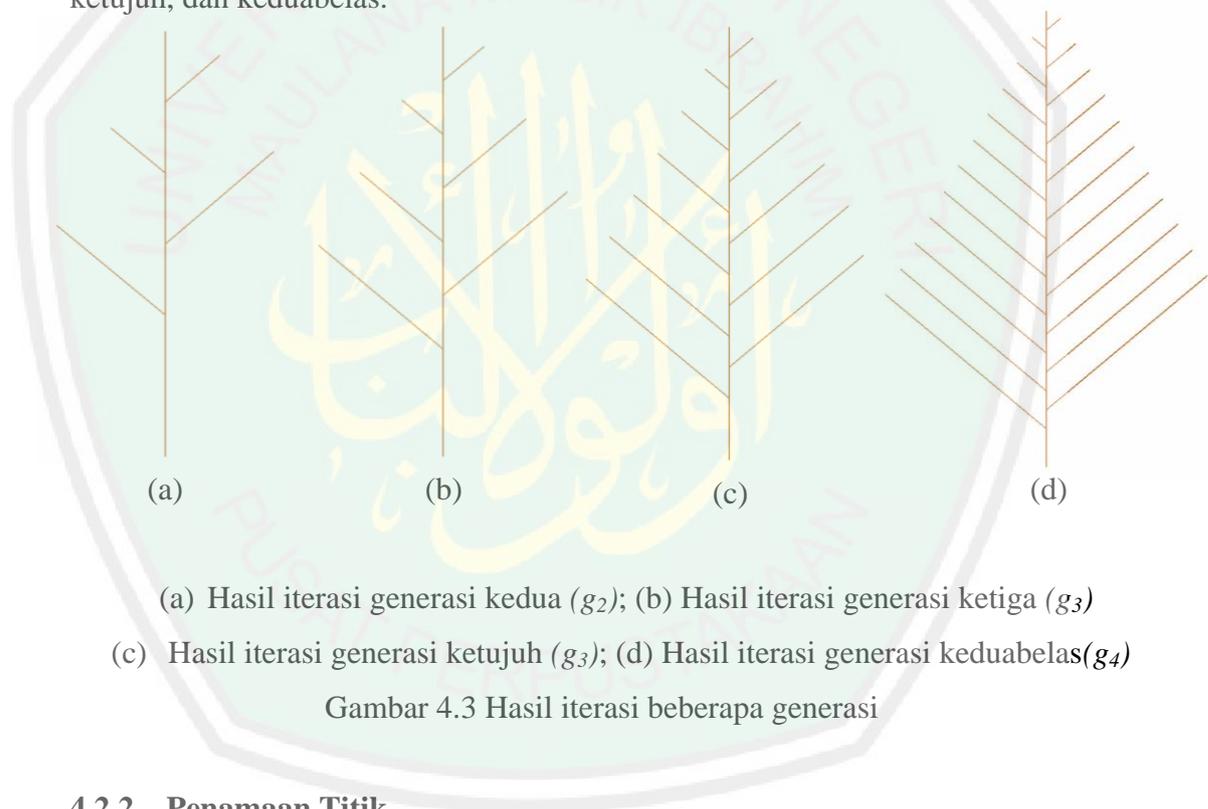
Gambar 4.1 Hasil iterasi generasi nol (g_0)

Selanjutnya pada generasi pertama (g_1), huruf A akan mulai membentuk cabangnya. Cabang yang terbentuk akan saling berlawanan arah, yaitu “++++” dan “----- A ”. Simbol “+” dan simbol “-” membuat batang tanaman berputar pada bidang xy sebesar 10° . Simbol “+” membuat batang tanaman berputar searah jarum jam sebesar 10° . Sedangkan simbol “-” membuat batang tanaman berputar sebaliknya. Huruf F berperan dalam menggambar panjang batang, sedangkan huruf B yang dipetakan kembali pada aturan produksi B akan membuat percabangan tumbuh terus menerus. Pemetaan $p_3 = C \rightarrow F[D]$ dan $p_4 = D \rightarrow F[C]$ memiliki peran dalam membuat cabang menjadi panjang. Adapun hasil penafsiran grafis generasi pertama dapat diamati pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.2 Hasil iterasi generasi pertama (g_1)

Pada generasi berikutnya, percabangan akan semakin banyak. Hal tersebut dipengaruhi oleh banyaknya iterasi yang dilakukan. Pada aturan produksi C ke D dan sebaliknya, akan membuat percabangan semakin ke atas semakin memendek batangnya. Sedangkan banyaknya percabangan dipengaruhi oleh huruf B terhadap aturan produksi $p_2 = B \rightarrow F[+++++C]F[-----C][B]$ yang memetakan dirinya sendiri. Sudut yang digunakan pada percabangan menggunakan sudut aproksimasi 60° , sehingga akan terlihat percabangan yang sama besarnya satu sama lain. Adapun Gambar 4.3 menunjukkan hasil iterasi dari generasi kedua, ketiga, ketujuh, dan keduabelas.



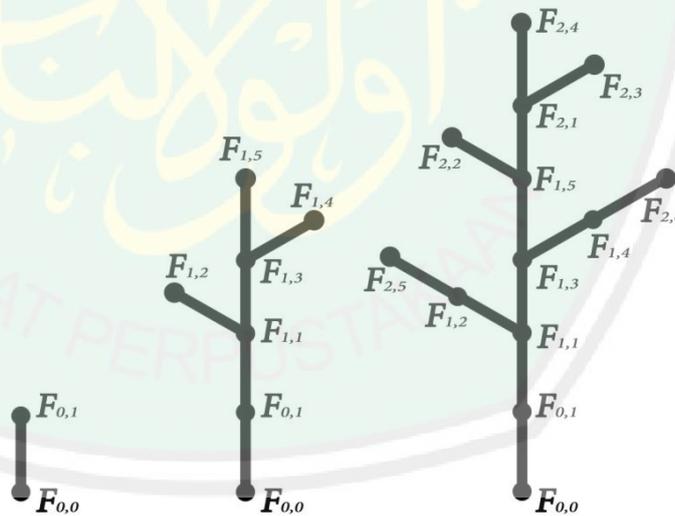
(a) Hasil iterasi generasi kedua (g_2); (b) Hasil iterasi generasi ketiga (g_3)
 (c) Hasil iterasi generasi ketujuh (g_7); (d) Hasil iterasi generasi keduabelas (g_{12})

Gambar 4.3 Hasil iterasi beberapa generasi

4.2.2 Penamaan Titik

Penamaan dilakukan untuk mempermudah peneliti dalam mendefinisikan langkah secara grafis. Sehingga peneliti dapat mengetahui titik-titik yang membangun garis-garis pada tiap generasinya. Titik-titik tersebut nantinya akan digunakan dalam menentukan besaran sudut pada masing-masing cabang. Pada

model *l-system* pada tabel, sudut yang digunakan pada semua cabang adalah sama besar (sudut aproksimasi). Namun, pada langkah berikutnya sudut yang digunakan adalah sudut asli dari data besaran sudut yang telah diolah. Penamaan titik dimulai dengan huruf A pada contoh Gambar 4.4. Masing-masing titik diberi nama $F_{0,0}$ dan $F_{0,1}$. Pada generasi selanjutnya, aksioma A diproduksi menjadi $F[F[+++++F[C]]F[-----F[C]][B]]$. Sehingga dapat diketahui bahwa huruf A yang diberi nama titik $F_{0,0}$ dan $F_{0,1}$ akan bertambah titiknya menjadi $F_{0,0}$, $F_{0,1}$, $F_{1,0}$, $F_{1,1}$, $F_{1,2}$, $F_{1,3}$, $F_{1,4}$. Kemudian dilanjutkan pada aturan produksi kedua yang membuat percabangan semakin tinggi dan banyak. Sehingga terdapat penambahan enam garis baru pada iterasi ketiga ini. Hal ini berarti terdapat tiga belas titik, yaitu $F_{0,0}$, $F_{0,1}$, $F_{1,0}$, $F_{1,1}$, $F_{1,2}$, $F_{1,3}$, $F_{1,4}$, $F_{1,5}$, $F_{2,1}$, $F_{2,2}$, $F_{2,3}$, $F_{2,4}$, $F_{2,5}$, $F_{2,6}$. Ilustrasi di atas dapat diamati pada Gambar 4.4 di bawah ini



(a)

(b)

(a) Penamaan titik iterasi pertama; (b) Penamaan titik iterasi kedua

Gambar 4.4 Penamaan titik pada *l-system*

4.2.3 Parametric L-system

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan visualisasi yang mendekati kenyataan diantaranya dengan cara memasukkan rasio ketebalan batang dan panjang batang. Untuk mencapai hal tersebut, peneliti menggunakan *parametric l-system*. Penggunaan *parametric l-system* juga mempermudah dalam memasukkan sudut percabangan yang diinginkan tanpa harus menuliskan beberapa simbol yang sama. Misal jika terdapat komponen *l-system* dengan sudut percabangan $\theta = 15^\circ$ maka penulisan string “++++F” memiliki makna berbelok berlawanan arah jarum jam atau ke kiri sebesar 60° dan dilanjutkan dengan menggambar F. Sedangkan dalam penulisan *parametric L-system* hanya cukup ditulis sebagai “+(60)F”. Berikut ini simbol-simbol yang dipakai pada *parametric l-system*.

- $F(l)$: Menggambar ke depan sebesar l satuan, untuk $l > 0$
- $+(a)$: Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\alpha)$ sebesar a derajat
- $-(a)$: Berputar searah arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\alpha)$ sebesar a derajat
- $\&(a)$: Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\beta)$ sebesar a derajat
- $\wedge(a)$: Berputar searah arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\beta)$ sebesar a derajat
- $\swarrow(a)$: Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\delta)$ sebesar a derajat

- $\backslash(a)$: Berputar melawan arah jarum jam dengan matriks rotasi $R(\delta)$ sebesar a derajat
- $!(x)$: Menentukan ketebalan garis sebesar x
- $\#(x,x,x)$: Menentukan warna (*red, green, blue*)

Perubahan generasi dari aturan produksi *L-system* pada Tabel 4.1 setelah memanfaatkan *parametric L-system* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Generasi	Hasil Produksi
g_0	F
g_1	$F[F+(60)[C]]F[-(60)[C]][B]$
g_2	$F[F+(60)F[C]]F[-(60)F[C]]$ [[$F+(60)[F]$] $F[-(60)[F]]$][B]]
g_3	$F[F+(60)F[C[C]]]F[-(60)F[C[C]]]$ [$F+(60)[F]$] $F[-(60)[F]]$ [$F+(60)F[C]$] $F[-(60)F[C]$] [$F+(60)[F]$] $F[-(60)[F]]$][B]]

Tabel 4.2 Beberapa Generasi *Parametric L-System*

Penyusunan model *l-system* diawali dengan huruf F yang kemudian dilanjutkan dengan memetakan huruf B pada aturan produksi $p_2 = B \rightarrow F+(60)C]F[-(60)C][B]$ terhadap huruf yang baru. Peneliti menggunakan huruf E , S , dan T sebagai aturan produksi baru untuk membentuk batang utama tanaman cemara. Penempatan huruf B nantinya akan menjadi cabang dari batang utama, sehingga letaknya akan berada disamping batang utama. Oleh sebab itu digunakan pula simbol “ \wedge , $\&$, $/$, \backslash ” pada setiap aturan produksi agar terbentuk model tanaman

cemara dalam ruang tiga dimensi. Adapun komponen *l-system* yang dihasilkan adalah

$$V = \{F, A, B, C, D, E, S, T, +, -, \&, /, \backslash, (,), [,]\}$$

$$w = A$$

$$p1 = A \rightarrow SF[E]$$

$$p2 = B \rightarrow F[+(60)^(5)C]F[-(60)^(5)C][^(5)B]$$

$$p3 = C \rightarrow F[^(5)D]$$

$$p4 = D \rightarrow F[^(5)C]$$

$$p5 = E \rightarrow F[[/(0)\&(90)B][/(90)\&(90)B]]$$

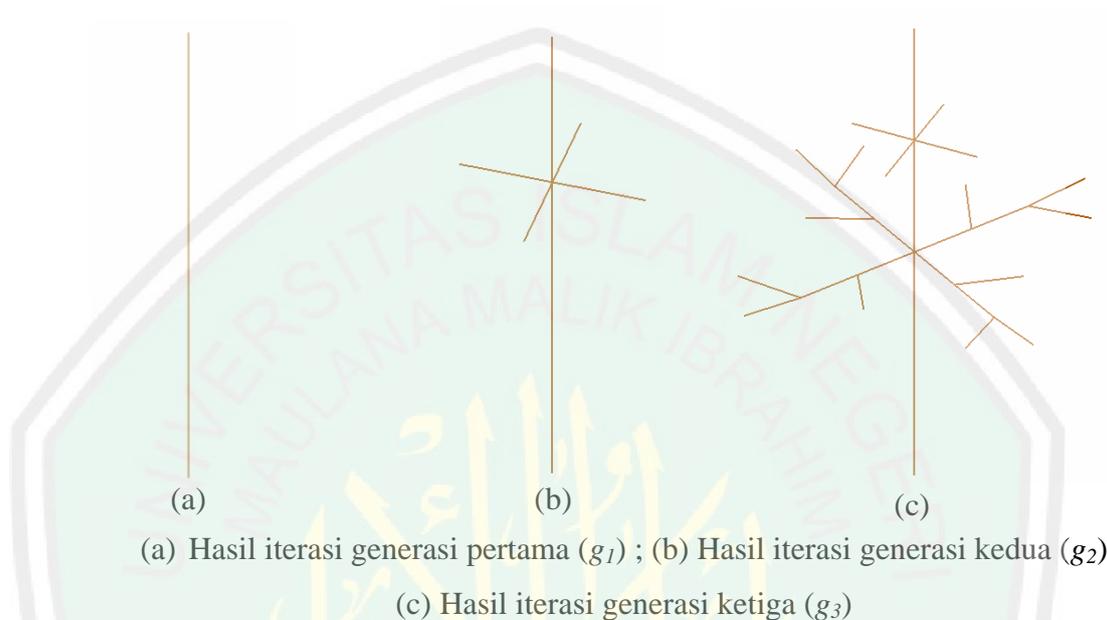
$$[[\backslash(90)\&(90)B][/(180)\&(90)B]][/(60)TE]$$

$$p6 = S \rightarrow TF$$

$$p7 = T \rightarrow F$$

Pada komponen *l-system* diatas, huruf *B* dipetakan terhadap aturan produksi *E*. Adapun huruf *B* dipetakan tegak lurus terhadap *E*, sehingga hasil pemodelan akan membuat *E* menjadi percabangan dari batang utama. Pada aturan produksi *E*, pemetaan *B* dilakukan sebanyak empat kali dengan sudut berpencah kedelapan arah mata angin. Ini bertujuan agar pertumbuhan cabang menyebar kesegala arah seperti objek yang diteliti. Kemudian aturan produksi *E* juga memetakan terhadap dirinya sendiri. Hal ini dimaksudkan untuk membentuk pucuk cemara yang semakin ke atas semakin mengerucut. Adapun huruf *S* dan *T*

dipetakan pada aturan produksi A dan E . Hal ini menyebabkan bagian batang utama dan pucuk akan bertambah panjang, sehingga hasil visualisasi akan terlihat tinggi dan proposional. Adapun hasil dari komponen tersebut dapat diamati pada Gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5 Hasil iterasi beberapa generasi *parametric l-system*

Pada generasi berikutnya, semakin bertambahnya iterasi membuat percabangan tanaman semakin banyak. Pemberian sudut putaran 5 derajat pada aturan produksi $p_2 = B \rightarrow F[+(60)^{(5)}C]F[-(60)^{(5)}C][^{(5)}B]$ akan berdampak pada melengkungnya tanaman cemara. Sehingga akan nampak percabangan tanaman cemara semakin melengkung menyerupai model aslinya. Perbedaan yang nampak dari pemberian 5 derajat ini terlihat pada generasi kelima pada Gambar 4.6. Pada percabangan pertama dari batang utama akan mempunyai cabang yang melengkung, tetapi pada pecabangan akhir dari batang utama (percabangan pucuk) kelengkungan itu akan tidak nampak.



Gambar 4.6 Hasil iterasi generasi kelima (g_5) *parametric l-system*

Pada generasi ketujuh (g_7), tanaman kembali bertambah tinggi dan membentuk cabang lagi dari tiap-tiap cabang yang terbentuk sebelumnya. Setiap cabang akan tumbuh cabang baru dengan besar sudut yang mengikuti aturan produksi $p_3 = C \rightarrow F^{(5)}D$ dan $p_4 = D \rightarrow F^{(5)}C$. Hal ini akan membuat percabangan pada ranting tanaman melengkung. Aturan produksi ke dua berupa $p_1 = A \rightarrow SF[E]$ membuat hasil visualisasi tanaman semakin tinggi dari tiap generasi. Adapun hasil generasi ketujuh dan kesepuluh dapat dilihat pada gambar berikut.



(a) Hasil iterasi generasi ketujuh (g_7); (b) Hasil iterasi generasi kesepuluh (g_{10})

Gambar 4.7 Hasil iterasi beberapa generasi *parametric l-system*

4.2.4 *Ketebalan dan Panjang Batang*

Adapun untuk menggambarkan ketebalan pada batang, peneliti mengacu kepada teori yang dikemukakan Honda yang menyatakan bahwa:

- Segmen batang setiap pohon adalah lurus
- Segmen induk menghasilkan dua segmen anak melalui satu proses percabangan
- Panjang dari dua segmen anak disebut sebagai rasio tetap r_1 dan r_2 , yang berhubungan dengan segmen induk.
- Segmen anak bercabang membentuk sudut konstan a_1 dan a_2 yang berhubungan dengan segmen induk (A. Lindenmayer, 1990)

Selain itu, teori lain yang digunakan sebagai acuan dalam ketebalan batang adalah postulat Leonardo Da Vinci yang pada penelitiannya mengatakan bahwa “Semua cabang pohon di bagian percabangannya apabila disatukan, akan sama ketebalannya dengan batang di bawahnya”. Hal tersebut memiliki arti bahwa setiap cabang induk dengan ketebalan tertentu akan membentuk dua cabang anak yang apabila ketebalan batangnya dijumlahkan akan sama dengan induknya. Hal ini telah dibahas pada bab sebelumnya. Adapun rasio yang diperoleh dari postulat da Vinci ini adalah 0.707.

Hasil rasio perhitungan ketebalan batang tanaman cemara pada subbab sebelumnya adalah 0,698. Sementara postulat Da Vinci menunjukkan nilai postulat sebesar 0,707. Hal ini menunjukkan bahwa hasil perhitungan pada objek sudah hampir mendekati hasil postulat Da Vinci. Namun, untuk mengurangi kesalahan pada pengukuran peneliti (*human error*), pada tahapan selanjutnya peneliti akan menggunakan rasio ketebalan batang dari postulat Da Vinci yang memiliki nilai ($w_r = 0,707$).

Beberapa aturan produksi pada tanaman cemara yang tercantum pada aturan produksi sebelumnya dapat ditulis sebagai berikut.

$$w = A(1,15)$$

$$r1 = 0.9; r2 = 0.6; wr = 0,691$$

$$a0 = 61.25; a1 = 5.47; a2 = 90$$

$$p1 : A(l,w) \rightarrow !(w*wr)F(l)[E(l*r1,w*wr)]$$

$$p2 : B(l,w):(l \geq 0.1) \rightarrow !(w*wr)F(l)[+(a0)^{(a1)}C(l*r2,w*wr)]F(wr) \\ [-(a0)^{(a1)}C(l*r1,w*wr)] \\ [^{(a1)}B(l*r2,w*wr2)F(l*r2,w*wr)]$$

$$p3 : C(l,w):(l \geq 0.0) \rightarrow !(w*wr)F(l)[^{(a1)}D(l*r2,w*wr)]$$

$$p4 : D(l,w):(l \geq 0.0) \rightarrow !(w*wr)F(l)[^{(a1)}C(l*r2,w*wr)]$$

$$p5 : E(l,w) \rightarrow !(w*wr)F(l)[\frac{1}{(a2) \& (l*a2)}B(l*r1,w*wr)] \\ [\frac{1}{(2*a2) \& (l*a2)}B(l*r1,w*wr)] \\ [\frac{1}{(0*a2) \& (l*a2)}B(l*r1,w*wr)] \\ [\frac{1}{(0.5*a2) \& (l*a2)}B(l*r1,w*wr)] \\ [\frac{1}{(0.666*a2)}FE(l*r1,w*wr)]$$

$$p6 : S(l,w) \rightarrow TF$$

$$p7 : T(l,w) \rightarrow F$$

Ilustrasi identifikasi pada *Parametric L-system* dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 4.8 Identifikasi *parametric l-system*

Ujung dari A menghasilkan ruas SF yang diikuti delapan buah percabangan E dan B pada setiap iterasi. Adapun simbol $l(w)$ merupakan ketebalan batang tanaman yang nilainya akan selalu turun sebesar $wr = 0.707$ pada setiap iterasinya. Adapun $A(l,w)$ akan membentuk batang utama dari tanaman dengan panjang l dan tebal w , sesuai dengan ketentuan awal yang dimasukkan yaitu $A(1,15)$. Sedangkan $B(l,w)$ adalah cabang yang pertama kali keluar dari batang induk, dengan besar sudut percabangan a_0 dan a_1 yang kemudian panjangnya menyesuaikan rasio dari panjang batang $A(l,w)$. Pada subbab sebelumnya, rasio ini dirumuskan dari perbandingan panjang b terhadap a sehingga $r_1 = a/b$ yang menghasilkan rasio 0,9. Sedangkan untuk perbandingan panjang b terhadap c digunakan rasio $r_2 = c/a$ yang menghasilkan rasio 0,6. Adapun ketebalan batangnya mengikuti postulat Da Vinci dimana ketebalan batang anak memiliki nilai 0.707 dari batang induknya, sehingga $wr_2 = 0.707$. Dalam hal ini, hasil perhitungan parameter huruf A terhadap r_1 diasumsikan bernilai 0,9 adalah sebagai berikut

$$A(1,15); A(0.9, 10.60); A(0.8, 7.49); A(0.7, 5.30)$$

Adapun pada $B(l,w)$ diberikan batasan pada panjang batangnya. Setiap satuan panjang pada perintah F akan direduksi dari nilai aslinya. Batasan yang diberikan adalah 0.1, sehingga $(l \geq 0.1)$. Batasan ini ditetapkan agar panjang cabang dapat dibatasi ketika terjadi perulangan pada iterasi-iterasi selanjutnya. Jika tidak demikian, maka perintah F akan tetap bernilai maju satu satuan sehingga panjang cabang tidak teratur.

Ruas-ruas pada batang B menghasilkan dahan dari batang induk B dengan pola menyesuaikan pada gambar. Ujung pada setiap dahan tersebut diberikan perpanjangan kembali dengan memetakannya terhadap C yang kemudian C memetakan kembali terhadap D . Adapun D memetakan kembali terhadap C dan C memetakan kembali terhadap D , begitupun seterusnya. Sehingga ujung dari setiap dahan akan terlihat mengecil dan meruncing karena adanya pemetaan yang berulang.

Aturan produksi E akan memuat B dengan memetakannya pada arah yang berbeda. B akan dipetakan pada sudut kelipatan 90° dengan simbol $(a_2 = 90)$. Pemetaan dibuat searah jarum jam (*clockwise*) dengan simbol $/(a_2)$ dan berlawanan arah jarum (*counter clockwise*) dengan simbol $\backslash(a_2)$. Penggunaan perbandingan terhadap sudut 90° diberikan agar B dapat dipetakan ke delapan arah dengan besaran sudut sama. Hasil perumusan sudut dijelaskan sebagai berikut

Sudut	Arah	Simbol
45°	CW	$/(0.5*a_2)$
90°	CW	$/(a_2)$
135°	CW	$/(1.5*a_2)$
180°	CW	$/(2.0*a_2)$
0°	CCW	$\backslash(0.0*a_2)$
45°	CCW	$\backslash(0.5*a_2)$
90°	CCW	$\backslash(a_2)$
135°	CCW	$\backslash(1.5*a_2)$

Tabel 4.3 Hasil perumusan sudut beserta arahnya

Secara umum peneliti menggunakan 3 jenis aturan produksi utama yaitu simbol, kondisi, dan produksi. Jenis aturan produksi tersebut dilakukan pada setiap huruf, sehingga diharapkan hasil visualisasi bisa menyerupai aslinya. Pada aturan produksi pemodelan pohon cemara, tidak digunakan aturan probabilitas, karena metode yang digunakan *Deterministic Lindenmayer System (DOL-system)*. Berikut ini adalah tabel penjelasan pada aturan produksi yang digunakan.

No	Kompoen	String
1	Simbol	$A(l,w)$
2	Kondisi	$(l \geq 0.1)$
3	Produksi	$!(w*wr)F(l)[E(l*r1,w*wr)]$

Tabel 4.4 Penjelasan aturan produksi pada *deterministic l-system*

Program yang digunakan untuk menampilkan hasil menggunakan bantuan aplikasi L-Studio. Aplikasi ini dirancang khusus untuk memvisualisasikan penggunaan pada *lindenmayer system*. Selain itu, aplikasi ini mendukung hasil visualiasi pada ruang dimensi tiga serta mampu menampilkan ketebalan pada batang. Kelebihan aplikasi ini juga terdapat pada pemberian warna pada komponen-komponen l-system dan gradasi warnapun dapat diberikan. Berikut ini adalah tampilan komponen-komponen *l-system* pada software L-Studio.

```

#define STEPS 25
#define r1 0.9
#define r2 0.6
#define wr 0.691
#define a0 61.25
#define a1 5.47
#define a2 90

Lsystem: 1
derivation length: STEPS
Axiom: A(1,15)
A(1,w) --> !(u*wr)SF(1)[E(1*r1,u*wr)]
B(1,w):(1>=0.1) --> !(u*wr)F(1)[+(a0)^(a1)C(1*r2,u*wr)]
F(w)[-(a0)^(a1)C(1*r1,u*wr)]
[(a1)B(1*r2,u*wr)F(1*r2,u*wr)]
C(1,w):(1>=0.0) --> !(u*wr)F(1)[^(a1)D(1*r2,u*wr)]
D(1,w):(1>=0.0) --> !(u*wr)F(1)[^(a1)C(1*r2,u*wr)]
E(1,w) --> !(u*wr)F(1)[[/(a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)][\ (a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)]
[[/(2*a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)][\ (0*a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)]]
[[/(0.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)][\ (0.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)]]
[[/(1.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)][\ (1.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,u*wr)]]
[[/(0.666*a2)TE(1*r1,u*wr)]]
S(1,w) --> TF
T(1,w) --> F

hononorphism
A --> F
B --> ,F;
C --> ,F;
D --> ,F;
E --> ,F;
S --> ,F;
T --> ,F;

```

Gambar 4.9 Tampilan aturan produksi pada L-Studio

Adapun *#define* pada awal program digunakan untuk menggambarkan suatu simbol beserta nilainya yang nantinya akan digunakan pada aturan produksi. Banyaknya iterasi yang dilakukan pada program ini adalah sebanyak 16 kali yang ditunjukkan pada string *STEPS*. Rasio panjang batang dari induk batang terhadap percabangan pertama (dahan) ditunjukkan pada r_1 dengan nilai 0.9 sedangkan rasio anak batang terhadap percabangannya lagi (ranting) ditunjukkan pada r_2 dengan nilai 0.6. Adapun wr_2 merupakan simbol dari postulat Leonardo Da Vinci sebagai rasio ketebalan batang induk terhadap batang anak. Sedangkan a_0 , a_1 , dan a_2 menggambarkan sudut putaran masing-masing 61.25° , 5.47° , dan 90° yang arah putarnya ditentukan oleh simbol-simbol pada tabel.

```

#define STEPS 25
#define r1 0.9
#define r2 0.6
#define wr 0.691
#define a0 61.25
#define a1 5.47
#define a2 90

```

Gambar 4.10 Menentukan rasio, sudut, panjang dan ketebalan batang pada *software* L-Studio

Setelah simbol-simbol ditentukan pada L-Studio, kemudian memasukkan fungsi pembuka pada aplikasi L-Studio. Penggunaan '*L-system = I*' diawal aturan produksi menandakan bahwa aturan produksi sudah dibuka. Kemudian memasukkan aturan produksi pada L-Studio. Penempatan urutan aturan produksi dimulai simbol, kondisi, dan produksi. Pada metode *stochastic l-system* terdapat aturan probabilitas yang diletakkan setelah sebelum produksi. Kemudian setiap aturan produksi ditempatkan pada paragraf yang berbeda, agar tidak terjadi kesalahan saat menjalankan program. Penggunaan huruf kapital dan huruf kecil pada *alphabet* memiliki pengaruh terhadap aturan produksi.

```
Lsystem: 1
derivation length: STEPS
Axiom: A(1,15)
A(1,w) --> !(w*wr)SF(1)[E(1*r1,w*wr)]
B(1,w):(1>=0.1) --> !(w*wr)F(1)[+(a0)^(a1)C(1*r2,w*wr)]
                    F(wr)[- (a0)^(a1)C(1*r1,w*wr)]
                    [^(a1)B(1*r2,w*wr)F(1*r2,w*wr)]
C(1,w):(1>=0.0) --> !(w*wr)F(1)[^(a1)D(1*r2,w*wr)]
D(1,w):(1>=0.0) --> !(w*wr)F(1)[^(a1)C(1*r2,w*wr)]
E(1,w) --> !(w*wr)F(1)[[/ (a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)][\ (a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)]
                [/(2*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)][\ (0*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)]
                [/(0.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)][\ (0.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)]
                [/(1.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)][\ (1.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr)]
                [/(0.666*a2)TE(1*r1,w*wr)]
S(1,w) --> TF
T(1,w) --> F
```

Gambar 4.11 Tampilan aturan produksi pada L-Studio

Bagian terakhir pada software L-Studio adalah *homomorphism*. Bagian ini digunakan untuk mendefinisikan kembali simbol-simbol pada aturan produksi menjadi *F* ataupun *f*. Sehingga simbol *alphabet* yang digunakan memiliki arti 'maju satu langkah' atau *F*. Selain itu, penggunaan warna dari setiap aturan produksi dapat dibedakan dengan menambahkan karakter , ataupun ; pada *F*. Kemudian program ditutup dengan *endlsystem* sebagai penanda bahwa program siap untuk dijalankan.

```

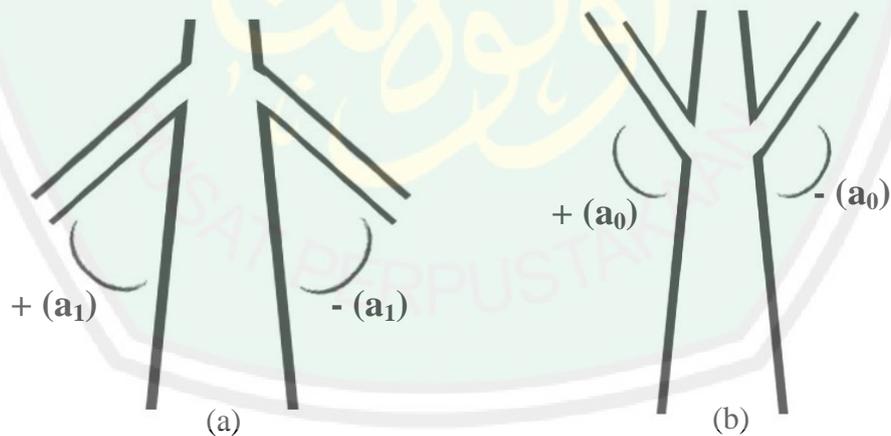
homomorphism
A --> F
B --> ,F;
C --> ,F;
D --> ,F;
E --> ,F;
S --> ,F;
T --> ,F;

```

Gambar 4.12 Tampilan penutup pada L-Studio

4.3 Hasil Visualisasi

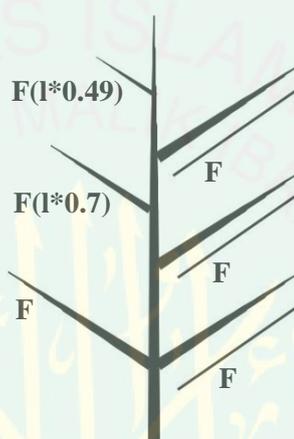
Hasil akhir dari pemodelan batang tanaman cemara didapatkan melalui beberapa running atau simulasi. Hal ini dilakukan agar didapatkan hasil visualisasi yang menyerupai tanaman aslinya. Beberapa simulasi yang dilakukan antara lain menentukan ketebalan batang, menentukan panjang batang, serta besaran sudut yang menyerupai aslinya. Nilai-nilai tersebut dimasukkan sebagai aksioma batang sesuai dengan objek. Apabila nilai-nilai tersebut tidak tepat, maka hasil visualisasi akan jauh dari tanaman yang diteliti. Sebagai contoh pada gambar 4.13 berikut ini



Gambar 4.13 Perbandingan arah putar pada batang tanaman

Adapun Gambar 4.13 di atas menjelaskan bahwa besaran sudut dan arah putar sudut menentukan hasil akhir visualisasi. Pada kedua gambar terlihat arah putar dari percabangan batang berlawanan arah. Pada gambar kiri, arah putar

sudut yang tidak tepat akan menyebabkan hasil visualisasi tanaman tumbuh ke bawah. Jika dilakukan iterasi yang berkelanjutan maka akan didapatkan hasil pertumbuhan dahan akan berlawanan dengan arah tumbuhnya batang, sehingga tanaman akan tampak seperti akar. Sedangkan pada gambar kanan, arah putar sudut sudah tepat, sehingga pada hasil visualisasi akan terlihat bahwa dahan tumbuh sesuai dengan arah tumbuhnya batang. Contoh simulasi lain yang kurang tepat terdapat pada Gambar 4.14 di bawah ini.

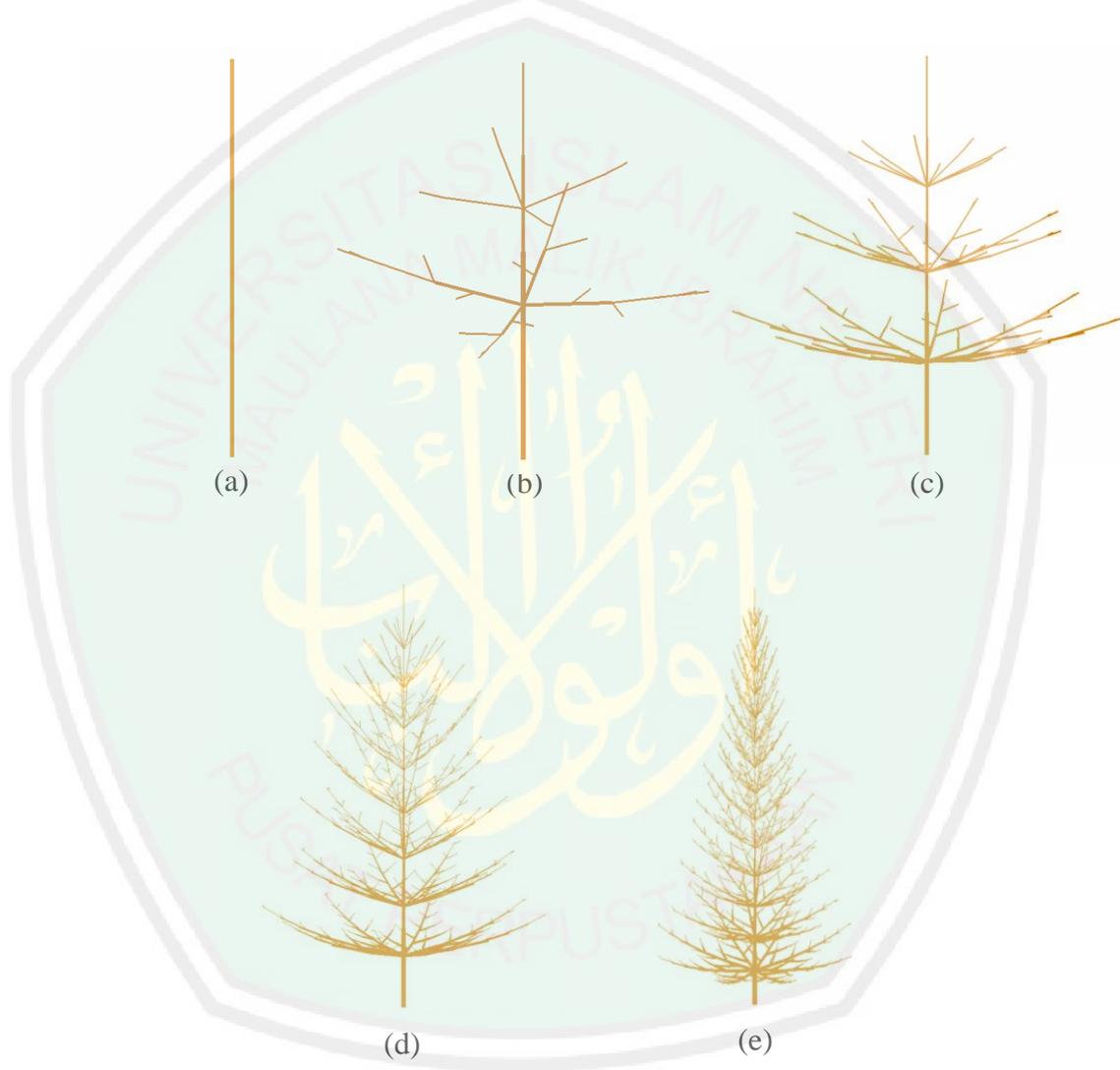


Gambar 4.14 Perbandingan panjang batang pada tanaman

Dari gambar tersebut terlihat bahwa panjang ranting dari kedua ruas memiliki panjang yang berbeda. Pada ruas kanan, tiap ranting memiliki panjang yang sama. Hal tersebut disebabkan perbandingan dari setiap ranting adalah sama, sehingga tidak ada rasio pada panjangnya ranting. Sedangkan pada ruas kiri, setiap ranting memiliki panjang yang berbeda. Hal tersebut disebabkan adanya rasio pada setiap ranting. Sehingga semakin banyak percabangan yang dibuat, panjang ranting akan tetap berbeda menyesuaikan rasio perbandingan dari panjang ranting sebelumnya.

Selanjutnya simulasi lainnya dilakukan dengan cara mengubah iterasi. Hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah bentuk model yang dibuat sudah sesuai

berdasarkan data yang didapatkan pada objek aslinya. Akan tetapi langkah ini kurang tepat, sebab sebanyak apapun iterasi yang dilakukan, tidak memiliki pengaruh terhadap ketebalan batang. Pengaruh yang didapatkan hanya pada panjang batang yang diinputkan. Berikut ini adalah hasil visualisasi dari model tanaman cemara pada iterasi pertama, ketiga, kelima, kedelapan, dan keenambelas

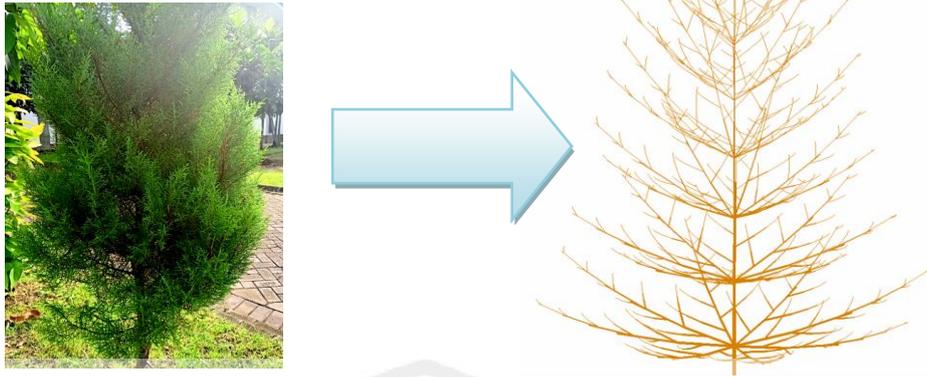


(a) Visualisasi dari iterasi Pertama; (b) Iterasi ketiga; (c) Iterasi kelima;
(d) Iterasi kedelapan; (e) Iterasi keenambelas

Gambar 4.15 Visualisasi tanaman cemara

Gambar di atas merupakan visualisasi akhir dari pertumbuhan batang tanaman cemara. Adapun visualisasi tersebut dilakukan hingga iterasi ke enam belas untuk mendapatkan hasil yang menyerupai model. Visualisasi dilakukan terbatas pada kurang dari dua puluh iterasi. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya error dan program yang tidak merespon karena terlalu banyaknya iterasi yang dilakukan. Adapun Perbandingan hasil visualisasi dengan objek tanaman cemara yang asli dapat diamati pada gambar berikut.





Gambar 4.16 Perbandingan Tanaman Cemara Asli dengan visualisasi model *L-system* dalam dimensi tiga

Ketika hasil visualisasi sudah mendekati objek aslinya, maka simulasi dihentikan. Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan metode *deterministic lindenmayer system (DOL-system)*. Penelitian ini dapat dilanjutkan pada ranah *stochastic lindenmayer system* apabila sudah menginput nilai-nilai probabilitas dari metode *deterministic l-system*, dengan kata lain metode stokastik adalah metode lanjutan dari metode deterministik. Hasil akhir dari metode deterministik dapat diamati pada Tabel 4.5 berikut

No	Simbol	Kondisi	Produksi
1	$A(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*wr2)SF(l)[E(l*r1,w*wr)]$
2	$B(l,w)$	$(l \geq 0.1)$	$!(w*wr2)F(l)[+(a0)^{(a1)}C(l*r1,w*wr)]$ $F(wr2)[-(a0)^{(a1)}C(l*r1,w*wr)]$ $[\wedge(a1)B(l*r2,w*wr2)F(l*r2,w*wr)]$
3	$C(l,w)$	$(l \geq 0.0)$	$!(w*wr2)F(l)[\wedge(a1)D(l*r2,w*wr)]$
4	$D(l,w)$	$(l \geq 0.0)$	$!(w*wr2)F(l)[\wedge(a1)C(l*r2,w*wr)]$
5	$E(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*wr2)F(l)[/((a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[\wedge(a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[/((2*a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$

			$[(0*a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[/(0.5*a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[(0.5*a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[(1.5*a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[(1.5*a2)\&(l*a2)B(l*r1,w*wr)]$ $[/(0.666*a2)TE(l*r1,w*wr)]$
6	$S(l,w)$	(tidak ada)	TF
7	$T(l,w)$	(tidak ada)	F

Tabel 4.5 Aturan produksi pada *deterministic l-system* Tanaman Cemara

4.4 Hasil Pemodelan Lainnya

Pada pemodelan terhadap tanaman lainnya, peneliti menggunakan langkah-langkah yang serupa. Dimulai dari mengamati objek, mengidentifikasi komponen utama *l-system*, melakukan simulasi dimensi dua, menambahkan komponen *parametric l-system* dan menjadikannya dimensi tiga, serta melakukan pengulangan simulasi hingga mendapatkan hasil visualisasi yang menyerupai objek aslinya. Berikut ini adalah beberapa hasil model tanaman beserta komponen-komponen *l-system*.

a). Tanaman Ketapang Kencana (*Terminalia mantaly*)

Adapun komponen-komponen *l-system* yang dibuat yaitu:

$$V = \{r1, r2, r3, wr, l, w, A, Y, Z, S, F, !, -, +, \&, ^, /, \backslash, (,), [,], * \}$$

$$\text{Aksioma } w = A(12,20) A(8,20) A(4,20) A(1,20)$$

Jumlah generasi : 5

$$r_1 = 0.8$$

$$r_2 = 0.5$$

$$r_3 = 0.3$$

$$w_r = 0.707$$

$$p_1 : A(l,w) \rightarrow !(w*0.5)SF(l)[-(70)Y(l*r1,w*wr)][+(70)Z(l*r1,w*wr)]$$

$$[-(60)^{(45)}(15)Y(l*r1,w*wr)][+(60)\&(45)(15)Z(l*r1,w*wr)]$$

$$[+(120)\&(135)(15)Y(l*r1,w*wr)]$$

$$[-(120)\&(225)(15)Z(l*r1,w*wr)]$$

$$[/(90)-(70)Y(l*r1,w*wr)][/(90)+(70)Z(l*r1,w*wr)]$$

$$p_2 : Y(l,w) \rightarrow !(w*0.3)SF(l)[\wedge(37.5)Y(l*r3,w*wr)][\&(37.5)Y(l*r3,w*wr)]$$

$$SF(l)[\wedge(20)Y(l*r3,w*wr)][\&(20)Y(l*r3,w*wr)]SF(l)$$

$$p_3 : Z(l,w) \rightarrow !(w*0.3)SF(l)[\wedge(37.5)Z(l*r3,w*wr)][\&(37.5)Z(l*r3,w*wr)]$$

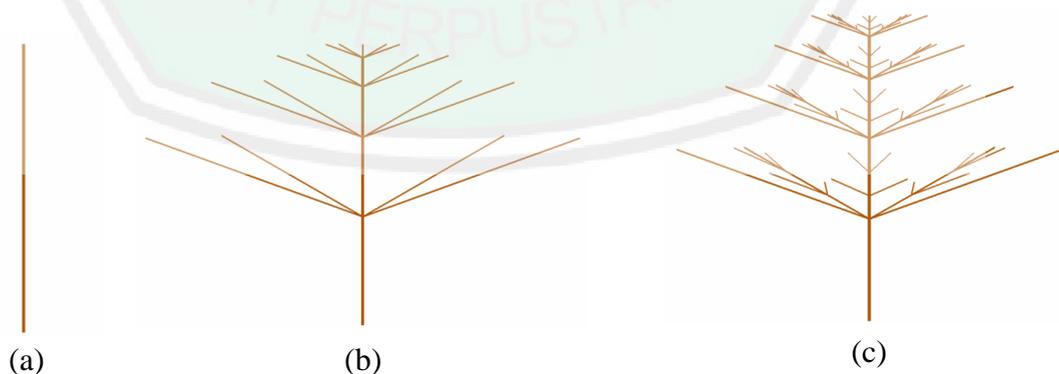
$$SF(l)[\wedge(20)Z(l*r3,w*wr)][\&(20)Z(l*r3,w*wr)]SF(l)$$

$$p_4 : S \rightarrow SSF$$

Pada komponen *l*-system dari tanaman ketapang kencana, peneliti menggunakan 4 kali aksioma dengan panjang batang yang berbeda. Hal ini dilakukan karena model dari tanaman ketapang kencana memiliki 4 tingkat pertumbuhan batangnya, sehingga pertumbuhan dari tingkatan pertama diperbanyak 4 kali. Adapun pada tingkatan awal, aksioma yang digunakan adalah $A(12,20)$, dengan nilai panjang batang adalah 12 dan ketebalannya adalah 20.

Pada tingkatan kedua, aksioma yang digunakan adalah $A(8,20)$ dengan nilai panjang batang 8 dan nilai ketebalan 20. Pada tingkatan ketiga, aksioma yang digunakan adalah $A(4,20)$ dengan nilai panjang batang 4 dan nilai ketebalan 20. Pada tingkatan terakhir, aksioma yang digunakan adalah $A(1,20)$ dengan nilai panjang batang 1 dan nilai ketebalan 20. Panjang batang memiliki nilai yang semakin turun dari tingkatan awal, sebagaimana panjang batang pada tanaman ketapang kencana yang semakin ke atas semakin tereduksi. Adapun ketebalan batang utamanya bernilai tetap dari setiap tingkatan. Ketebalan dahan pada hasil simulasi akan tetap mengecil pada setiap tingkatan, sesuai dengan input $w_r = 0.707$ yang memuat postulat ketebalan batang Leonardo Da Vinci.

Pada pemodelan tanaman ketapang kencana, metode yang digunakan adalah *deterministic lindenmayer system*. Penggunaan metode ini membuat tidak adanya nilai probabilitas yang digunakan pada saat simulasi. Adapun pada aturan produksi terakhir, S dipetakan terhadap SSF . Hal ini bertujuan agar terjadi perulangan dua kali pada S yang menyebabkan tumbuhnya batang yang panjang sebagai pembatas dari setiap tingkatan tanaman ketapang kencana. Berikut ini hasil visualisasi dari model tanaman ketapang kencana.





Visualisasi dari iterasi pertama; (b) Iterasi kedua; (c) Iterasi ketiga; (d) Iterasi keempat; (e) Iterasi kelima

Gambar 4.17 Visualisasi tanaman ketapang kencana

Hasil pemodelan tersebut didapatkan dari simulasi pada iterasi pertama, kedua, ketiga, keempat, dan kelima. Semakin banyak iterasinya menyebabkan semakin banyak percabangan yang terlihat pada setiap tingkatannya. Pada iterasi ke lima, simulasi dihentikan karena hasil visualisasi sudah menyerupai model. Adapun tabel *lindenmayer system* dari model tanaman ketapang kencana dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan perbandingan hasil visualisasi dengan model dapat diamati pada Gambar 4.18.

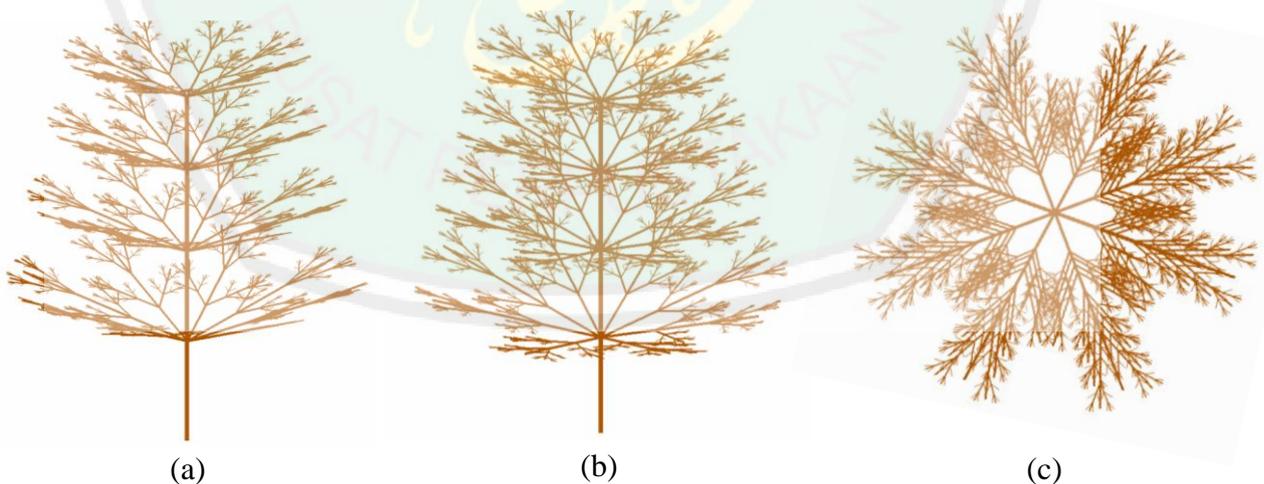
No	Simbol	Kondisi	Produksi
1	$A(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*0.5)SF(l)[-(70)Y(l*r1,w*wr)]$ $[+(70)Z(l*r1,w*wr)][-(60)^(45)/(15)Y(l*r1,w*wr)]$ $[+(60)\&(45)/(15)Z(l*r1,w*wr)]$ $[+(120)\&(135)\(15)Y(l*r1,w*wr)]$ $[-(120)\&(225)\(15)Z(l*r1,w*wr)]$ $[/ (90)-(70)Y(l*r1,w*wr)] / [(90)+(70)Z(l*r1,w*wr)]$
2	$Y(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*0.3)SF(l)[[^(37.5)Y(l*r3,w*wr)]$ $[\&(37.5)Y(l*r3,w*wr)]SF(l)[[^(20)Y(l*r3,w*wr)]$

			$[&(20)Y(l*r3,w*wr)]SF(l)$
3	$Z(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*0.3)SF(l)[\wedge(37.5)Z(l*r3,w*wr)]$ $[&(37.5)Z(l*r3,w*wr)]SF(l)[\wedge(20)Z(l*r3,w*wr)]$ $[&(20)Z(l*r3,w*wr)]SF(l)$
4	S	(tidak ada)	SSF

Tabel 4.6 Aturan produksi pada *deterministic l-system* tanaman ketapang kencana



Gambar 4.18 Perbandingan tanaman asli dengan visualisasi model



(a)

(b)

(c)

(a) Rotasi 90° terhadap bidang xz ; (b) Rotasi -45° terhadap bidang yz ;

(c) Rotasi 90° terhadap bidang yz ;

Gambar 4.19 Visualisasi model ketapang kencana dari berbagai sudut pandang

b). Tanaman Trembesi (*Samanea saman*)

Adapun komponen pada *l*-system yang dibuat yaitu:

$$V = \{a_0, a_1, r_1, r_2, w_r, l, w, A, B, C, S, F, !, -, +, ^, /, \backslash, (,), [,], *\}$$

$$\text{Aksioma } w = A(1,90)$$

Jumlah generasi : 10

$$r_1 = 0.9$$

$$r_2 = 0.6$$

$$a_0 = 25$$

$$a_1 = 10$$

$$w_r = 0.707$$

$$p_1 : A(l, w) \rightarrow !(w*0.4)-(10)SF(l*0.5)[+(a_0)/(90)C(l*r_2, w*wr)]$$

$$[-(a_1)/(90)A(l*r_1, w*wr)][^(a_0)/(90)C(l*r_1, w*wr)]$$

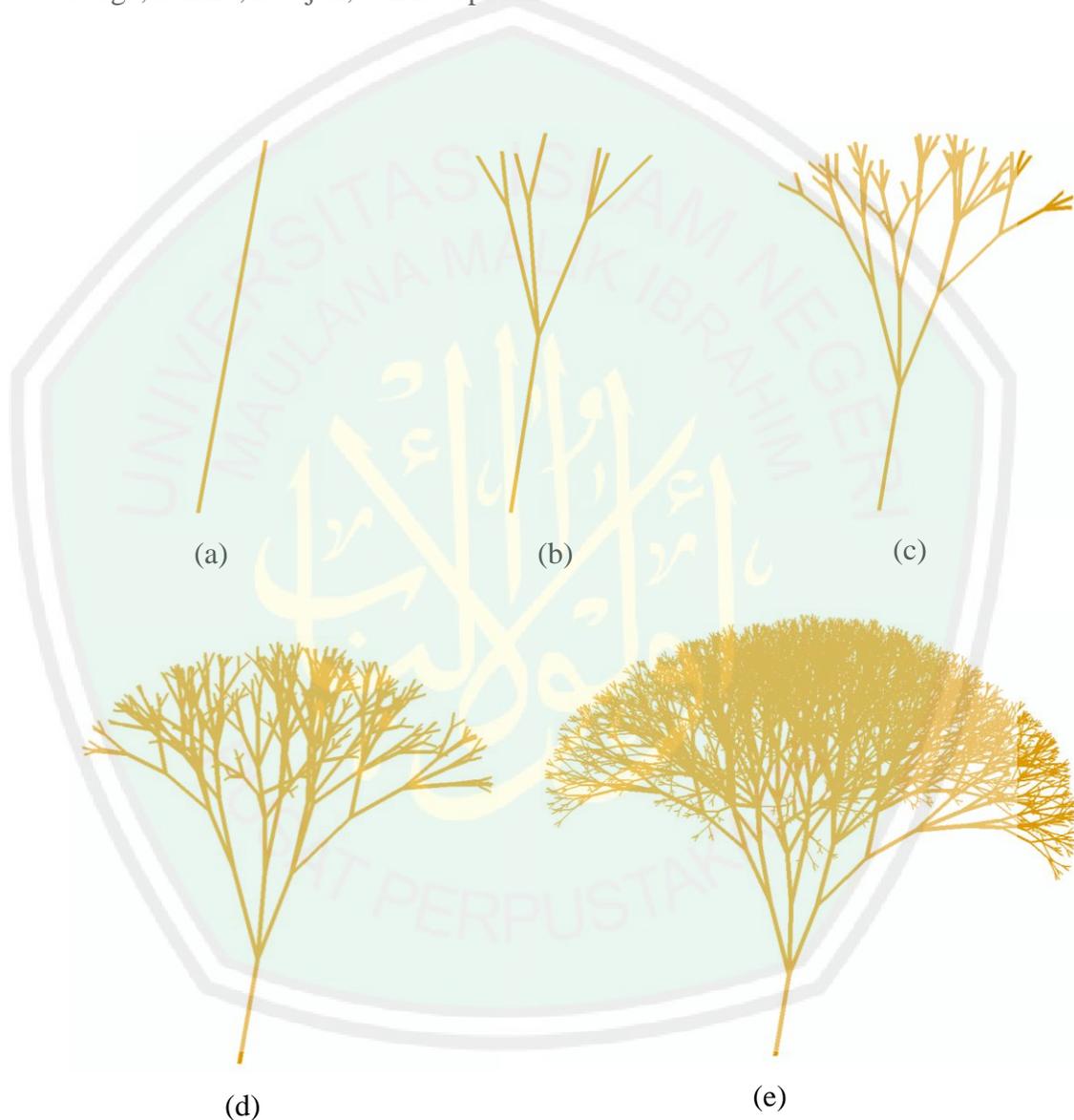
$$p_2 : B(l, w) \rightarrow !(w*0.4)SF(l)[-(a_0)C(l*r_2, w*wr)][+(a_1)C(l*r_1, w*wr)]$$

$$p_3 : C(l, w) \rightarrow !(w*0.4)SF(l)[+(a_0)A(l*r_2, w*wr)][-(a_0)A(l*r_1, w*wr)]$$

$$p_4 : S \rightarrow SF$$

Pada komponen *l*-system tanaman trembesi, peneliti menggunakan aksimoma $A(1,90)$ dengan panjang batang bernilai 1 dan ketebalan bernilai 90. Ketebalan batang akan semakin tereduksi dengan menggunakan $w_r = 0.707$ sebagai postulat ketebalan batang Leonardo Da Vinci. Pemodelan dilakukan

dengan metode *deterministic lindenmayer system*, sehingga tidak digunakan nilai probabilitas pada aturan produksi. Jumlah iterasi yang digunakan adalah sebanyak 10 iterasi, karena pada iterasi ke-10 visualisasi gambar sudah mendekati objek aslinya. Gambar menunjukkan rangkaian hasil visualisasi dari iterasi pertama, ketiga, kelima, ketujuh, dan kesepuluh.



(a) Visualisasi dari iterasi pertama; (b) Iterasi ketiga; (c) Iterasi kelima;

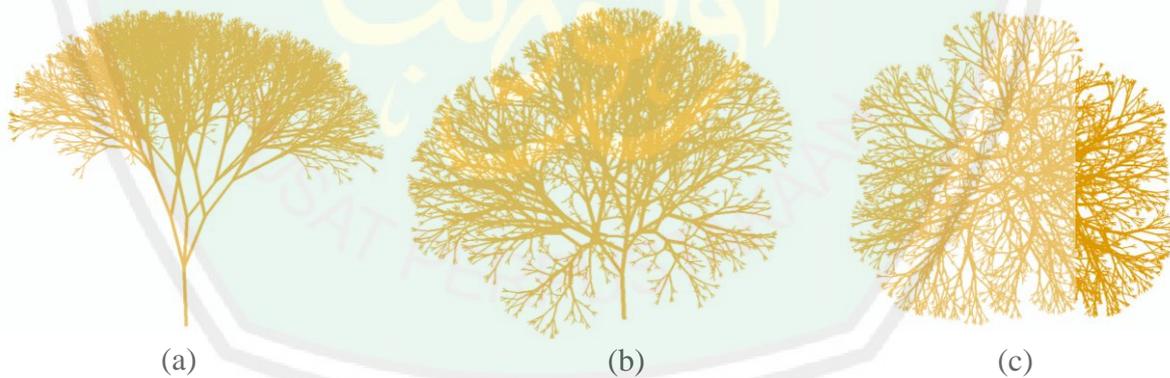
(d) Iterasi ketujuh; (e) Iterasi kesepuluh

Gambar 4.20 Visualisasi tanaman trembesi

No	Simbol	Kondisi	Produksi
1	$A(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*0.4)-(10)SF(l*0.5)[+(a0)/(90)C(l*r2,w*wr)]$ $[-(a1)\(90)A(l*r1,w*wr)]\wedge(a0)\(90)C(l*r1,w*wr)]$
2	$B(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*0.4)SF(l)[-(a0)C(l*r2,w*wr)]$ $[(a1)C(l*r1,w*wr)]$
3	$C(l,w)$	(tidak ada)	$!(w*0.4)SF(l)[+(a0)A(l*r2,w*wr)]$ $[-(a0)A(l*r1,w*wr)]$
4	S	(tidak ada)	SF

Tabel 4.7 Aturan produksi pada *deterministic l-system* tanaman trembesi

Hasil visualisasi dari komponen di atas dapat dilihat perbandingannya dengan model aslinya pada gambar 4.22. Gambar tersebut membandingkan beberapa bagian pada model aslinya. Adapun gambar 4.21 menunjukkan beberapa rotasi yang dilakukan terhadap hasil visualisasi tanaman trembesi.



(a) Rotasi 90° terhadap bidang xz ; (b) Rotasi -45° terhadap bidang yz ;

(c) Rotasi 90° terhadap bidang yz ;

Gambar 4.21 Visualisasi model tanaman trembesi dari berbagai sudut pandang



Gambar 4.22 Perbandingan tanaman trembesi asli dengan visualisasi model

l-system dalam dimensi tiga

4.5 Pembahasan

Pemodelan batang tanaman dengan metode *deterministic lindenmayer system*, merupakan pemodelan yang tingkatannya lebih ringkas dibandingkan menggunakan metode *stochastic lindenmayer system*, karena tidak adanya faktor probabilitas. Penggunaan metode parametrik membuat metode deterministik menjadi lebih efisien dan lebih mudah ketika simulasi berlangsung. Tahapan awal yang penting dalam memodelkan batang tanaman adalah menentukan komponen utama dari *l-system*, seperti menggunakan huruf *alphabet* dalam menentukan aturan produksi. Semua huruf dapat digunakan dalam aturan produksi, kecuali huruf *F* dan *f* yang masing-masing memiliki arti untuk menggambar garis ke depan sebesar satu satuan dan maju ke depan tanpa menggambar garis sebesar satu satuan. Selain itu, penggunaan simbol-simbol rotasi pada *l-system* perlu dipahami, karena pemodelan pada ruang dimensi dua akan menggunakan kombinasi 2 simbol (+, -), sedangkan pada ruang dimensi tiga akan menggunakan kombinasi dari 6 simbol (+, -, /, \, &, ^).

Pada pemodelan ini, peneliti menggunakan visualisasi secara tiga dimensi pada hasilnya. Oleh karena itu, hasil visualisasi ditampilkan dari sisi depan, sisi samping (putaran 90° sumbu *x*), sisi atas (putaran 90° sumbu *z*), dan sisi sedikit kebawah (putaran 45° sumbu *z*). Peneliti menilai bahwa dengan menampilkan ketiga sisi, maka hasil visualisasi akan terlihat menyerupai objek tanaman aslinya.

Penggunaan komputer sangat membantu dalam proses visualisasi model tanaman, baik dalam proses iterasi, menentukan aturan produksi, hingga perulangan dalam melakukan visualisasi. Software L-studio yang digunakan

peneliti membantu dalam merancang model deterministik sederhana secara dua dimensi dan digunakan juga oleh peneliti dalam membangun metode deterministik yang bersifat parametrik dalam ruang dimensi tiga. Penggunaan *parametric l-system*, membuat proses simulasi menjadi lebih cepat. Namun, penggunaan iterasi yang sangat banyak, akan membuat program berjalan lambat karena rumitnya alur rekursi yang disimulasikan. Selain itu, iterasi yang berlebihan akan membuat hasil visualisasi menjadi tidak menyerupai objek yang diteliti. Adapun dalam memodelkan tanaman cemara, tanaman ketapang kencana, dan tanaman trembesi, peneliti menggunakan iterasi sebanyak kurang dari 20 iterasi.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pemodelan batang tanaman menggunakan *deterministic l-system* dipengaruhi oleh bentuk batang, ketebalan batang, serta besar sudut dari setiap tanaman. Hal tersebut membuat aturan produksi dan kompeonen *l-system* untuk setiap tanaman akan selalu berbeda.
2. Hasil visualisasi dari model batang tanaman menggunakan *deterministic l-system* sudah mendekati model aslinya. Hasil visualisasi dapat ditunjukkan pada ruang dimensi dua dan dimensi tiga menggunakan program L-Studio.

5.2 Saran

Meskipun hasil pemodelan dari metode *deterministic lindenmayer system* terhadap batang tanaman sudah mendekati aslinya, namun masih terdapat permasalahan di dalamnya. Oleh karena itu, bagi pembaca yang ingin mengembangkan penelitian ini, peneliti menyarankan beberapa hal berikut:

1. Pemodelan tanaman ditambahkan dengan pemodelan pada daun, sehingga tanaman terlihat lebih nyata.
2. Pemodelan tanaman menggunakan metode *stochastic lindenmayer system* agar dapat memprediksi kemungkinan-kemungkinan yang dapat terbentuk dari model yang digunakan.

3. Pemodelan tanaman menggunakan software yang lebih terbaru pada metode *stochastic lindenmayer system* agar dapat memodelkan jenis tanaman yang memiliki batang melengkung seperti cendana.



DAFTAR PUSTAKA

- Iswanto, Chandra Hadi. 2011. *Penerapan Stochastic L-System pada Pemodelan Pertumbuhan Batang Tanaman*. Artikel Ilmiah Universitas Jember.
- Juhari. 2015. *Permodelan Petumbuhan Batang Tanaman dengan Menggunakan Deterministic L-System*. Artikel ResearchGate.
- Juhari, 2013. *Permodelan Pertumbuhan Tanaman Zea Mays L. Menggunakan Stochastic L-System*. Jurnal Cauchy. Vol 3. No.1.
- Kahfi, M.S. 1997. *Geometri Transformasi I*. Malang: FMIPA IKIP Malang.
- Katsir, Ibnu. 2005. *Tafsir Ibnu Katsir*. Jakarta: Pustaka Imam Asy-Syafi'i.
- Leitner, Daniel et. all. 2010. *A dynamic root system growth model based on L-System*. Article Plant Soil.
- Lindenmayer, A. 1990. *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Spinger-Verlag.
- Mandelbrot, Benoît. 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. San Fransisco: W.H. Freeman.
- Musa, Marwan bin. 2010. *Hidayatul Insan Bitafsiril Qur'an*. Bandung: (t.p).
- McGarry, Roisin. 2016. *Monopodial and sympodial branching architecture in cotton is differentially regulated by the Gossypium hirsutum Single Flower Truss and Self-Pruning orthologs*. Article New Phytologist.
- Ritcher, J.P. 1970. *The Notebooks of Leonardo da Vinci*. New York: Dover Publications
- Runions, Adam. 2007. *Modeling Trees with a Space Colonization Algorithm*. Article The Eurographic's Association 2007.
- Shipunov, Alexey. 2011. *Lecture 12, Introduction of Botany*. USA: University of Minot State.
- Soebari. 1995. *Geometri Analit*. Malang: FMIPA IKIP Malang.
- Sulastri, 2007. *Transformasi Bangun Ruang Tiga Dimensi menggunakan Visual Basic 6.0*. Jurnal Teknologi Informasi DINAMIK. Vol 12. No.1.

Treibergs. 2016. *Fractal, Self-Similarity and Hausdorff Dimensions*. USA: University of Utah.

Wright, D. J. 1996. *Dynamical Systems and Fractals Lecture*, diakses dari <http://klein.math.okstate.edu/dynamics/course.html> pada 31 Juli 2020.



Lampiran 1

Script Program L-System Tanaman Cemara menggunakan L-Studio

```
#define STEPS 16

#define r1 0.9

#define r2 0.6

#define wr2 0.691

#define a0 61.25

#define a1 5.47

#define a2 90

Lsystem: 1

derivation length: STEPS

Axiom: A(1,15)

A(1,w) --> !(w*wr2)SF(1)[E(1*r1,w*wr2)]

B(1,w):(1>=0.1) -->!(w*wr2)F(1)[+(a0)^(a1)C(1*r2,w*wr2)]F(wr2)
      [- (a0)^(a1)C(1*r1,w*wr2)] [^(a1)B(1*r2,w*wr2)
      F(1*r2,w*wr2)]

C(1,w):(1>=0.0) --> !(w*wr2)F(1)[^(a1)D(1*r2,w*wr2)]

D(1,w):(1>=0.0) --> !(w*wr2)F(1)[^(a1)C(1*r2,w*wr2)]

E(1,w) --> !(w*wr2)F(1)[[(a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr2)]
      [\ (a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr2)] [(2*a2)&(1*a2)
      B(1*r1,w*wr2)] [\ (0*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr2)]]
      [[(0.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr2)] [\ (0.5*a2)&(1*a2)
      B(1*r1,w*wr2)] [(1.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr2)]
      [\ (1.5*a2)&(1*a2)B(1*r1,w*wr2)]] [(0.666*a2)
      TE(1*r1,w*wr2)]

S(1,w) --> TF
```

```
T(l,w) --> F
homomorphism
A --> F
B --> ,F;
C --> ,F;
D --> ,F;
E --> ,F;
S --> ,F;
T --> ,F;
endsystem
angle factor: 8
initial color: 128
color increment: 1
initial line width: 2 pixels
line width increment: 0.3
viewpoint: 0,0,30
view reference point: 0,0,0
twist: 0
projection: parallel
front distance: -10000000.0
back distance: 10000000.0
scale factor: 0.9
z buffer: off
cue range: 0
shade mode: 1
light direction: 1.0,0.0,0.5
```

diffuse reflection: 10

tropism direction: 1.0,-0.5,0.0

initial elasticity: 0.00

elasticity increment: 0.0



Lampiran 2

Script Program L-System Tanaman Ketapang Kencana menggunakan L-Studio

```
#define STEPS 5

#define r1 0.8

#define r2 0.5

#define r3 0.3

#define wr 0.707

Lsystem: 1

derivation length: STEPS

Axiom: A(12,20)A(8,20)A(4,20)A(1,20)

A(1,w) --> !(w*0.5)SF(1)[-(70)Y(1*r1,w*wr)][+(70)Z(1*r1,w*wr)]
          [-(60)^(45)/(15)Y(1*r1,w*wr)]
          [(60)^(45)/(15)Z(1*r1,w*wr)][+(120)^(135)\(15)Y
          (1*r1,w*wr)][-(120)^(225)\(15)Z(1*r1,w*wr)]
          [/(90)-(70)Y(1*r1,w*wr)][/(90)+(70)Z(1*r1,w*wr)]

Y(1,w) --> !(w*0.3)SF(1)[^(37.5)Y(1*r3,w*wr)]
          [&(37.5)Y(1*r3,w*wr)]SF(1)[^(20)Y(1*r3,w*wr)]
          [&(20)Y(1*r3,w*wr)]SF(1)

Z(1,w) --> !(w*0.3)SF(1)[^(37.5)Z(1*r3,w*wr)]
          [&(37.5)Z(1*r3,w*wr)]SF(1)[^(20)Z(1*r3,w*wr)]
          [&(20)Z(1*r3,w*wr)]SF(1)

S --> SSF

homomorphism

A --> F

Y --> ,F;

Z --> ,F;
```

S --> ,F;
Endlsystem
angle factor: 8
initial color: 128
color increment: 1
initial line width: 2 pixels
line width increment: 0.3
viewpoint: 0,0,30
view reference point: 0,0,0
twist: 0
projection: parallel
front distance: -10000000.0
back distance: 10000000.0
scale factor: 0.9
z buffer: off
cue range: 0
shade mode: 1
light direction: 1.0,0.0,0.5
diffuse reflection: 10
tropism direction: 1.0,-0.5,0.0
initial elasticity: 0.00
elasticity increment: 0.0

Lampiran 3

Script Program L-System Tanaman Trembesi menggunakan L-Studio

```
#define STEPS 10

#define r1 0.9

#define r2 0.6

#define a0 25

#define a1 10

#define wr 0.707

Lsystem: 1
derivation length: STEPS
Axiom: A(1,90)
A(1,w) --> !(w*0.4)-(10)SF(1*0.5)[+(a0)/(90)C(1*r2,w*wr)]
          [-(a1)\(90)A(1*r1,w*wr)][^(a0)\(90)C(1*r1,w*wr)]
B(1,w) --> !(w*0.4)SF(1)[-(a0)C(1*r2,w*wr)][+(a1)C(1*r1,w*wr)]
C(1,w) --> !(w*0.4)SF(1)[+(a0)A(1*r2,w*wr)][-(a0)A(1*r1,w*wr)]
S --> SF
homomorphism
A --> F
B --> ,F;
C --> ,F;
S --> ,F;

endlsystem

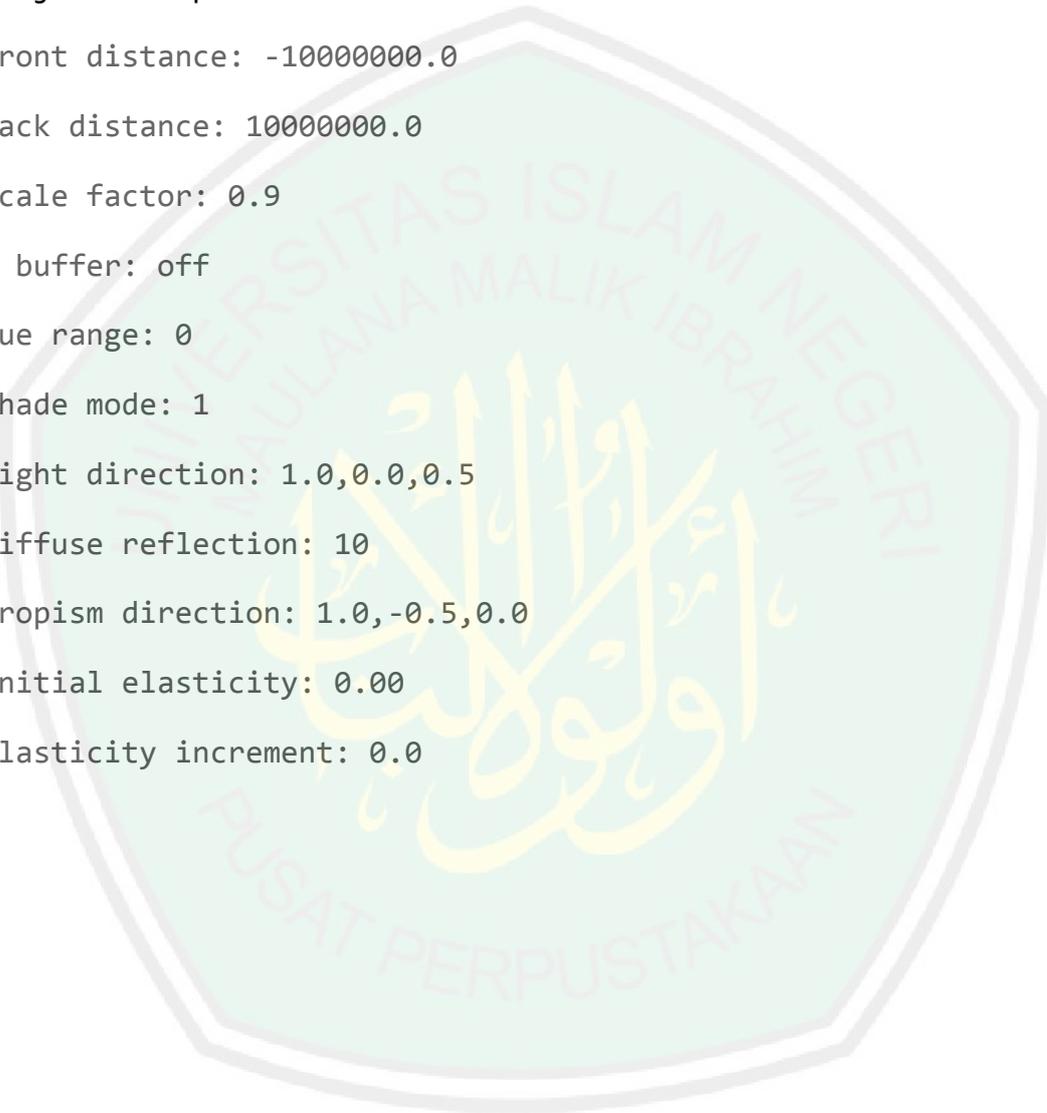
angle factor: 8

initial color: 128

color increment: 1

initial line width: 1 pixels
```

line width increment: 0.3
viewpoint: 0,0,30
view reference point: 0,0,0
twist: 0
projection: parallel
front distance: -10000000.0
back distance: 10000000.0
scale factor: 0.9
z buffer: off
cue range: 0
shade mode: 1
light direction: 1.0,0.0,0.5
diffuse reflection: 10
tropism direction: 1.0,-0.5,0.0
initial elasticity: 0.00
elasticity increment: 0.0



RIWAYAT HIDUP



Muhammad Zia Alghar lahir di Kota Bogor pada 14 Oktober 1998. Memiliki nama panggilan Zia. Alamatnya berada di Jalan Taman Cimanggu Poncol No.13, Kedung Waringin, Kota Bogor. Merupakan anak pertama dari Bapak H. Nunu Burhanuddin dan Ibu Ida Nursa'idah.

Pendidikan yang pernah ditempuh yaitu TK Darussa'adah. Kemudian melanjutkan sekolahnya di SD Tamansiswa dan lulus pada tahun 2010. Menempuh pendidikan SMP di Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Kota Bogor lulus pada tahun 2013. Melanjutkan pendidikan SMA di Sekolah Menengah Atas Negeri 2 Kota Bogor lulus pada tahun 2016.

Tahun 2016 melanjutkan studi ke jenjang pendidikan strata 1 di Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang mengambil jurusan Matematika Fakultas Sains dan Teknologi. Aktif mengikuti kegiatan pengabdian dan organisasi serta komunitas yang ada di dalam dan di luar (intra atau ekstra) kampus, seperti menjadi Musyrif Mahad Sunan Ampel Al-Aly (2016-2020), Pengurus HMJ Matematika UIN Malang (2016-2017), Pengurus LDK At-Tarbiyah (2016-2017), dan Pengurus UPKM El-Ma'rifah (2017-2020).

Prestasi-prestasi yang pernah diraihinya yaitu Juara 2 Lomba Poster MAN 2 Bogor, Juara 3 Marketing Scout Competition MAN 2 Bogor, Finalis Lomba Desain Poster FTTM ITB 2016, Juara 1 Debat Ilmiah Fakultas Saintek 2016.





KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Gajayana No. 50 Dinoyo Malang Telp./Fax.(0341)558933

BUKTI KONSULTASI SKRIPSI

Nama : Muhammad Zia Alghar
NIM : 16610035
Fakultas/Jurusan : Sains dan Teknologi / Matematika
Judul Skripsi : *Pemodelan Batang Tanaman Menggunakan Metode Deterministic Lindenmayer System*
Pembimbing I : Juhari, M.Si
Pembimbing II : Ari Kusumastuti, M.Pd, M.Si

No	Tanggal	Hal	Tanda Tangan
1	25 Agustus 2020	Konsultasi Bab I, Bab II, Bab III dan Bab IV	1.
2	26 Agustus 2020	Konsultasi Kajian Keagamaan pada Bab I dan Bab II	2.
3	10 September 2020	Revisi Bab I, Bab II, Bab III dan Bab IV	3.
4	10 September 2020	Revisi Kajian Keagamaan pada Bab I dan Bab II	4.
5	01 Oktober 2020	Konsultasi Bab III, Bab IV, Bab V	5.
6	02 Oktober	Konsultasi Kajian Keagamaan & Kepenulisan pada Bab II	6.
7	03 Oktober 2020	ACC Bab I, Bab II, Bab III, Bab IV, Bab V dan Kajian Keagamaan Bab I dan Bab II	7.
8	01 Desember 2020	Konsultasi Keseluruhan	8.
9	24 Desember 2020	Revisi Keseluruhan	9.
10	31 Desember 2020	ACC Keseluruhan	10.

Malang, 31 Desember 2020
Mengetahui,
Ketua Jurusan Matematika

Dr. Usman Pagalay, M.Si
NIP. 19650414 200312 1 001