

**SISTEM AGROFORESTRI BERBASIS KAKAO-LANGSAT:
SEBARAN AKAR, AKSES TERHADAP AIR DAN HARA
SERTA POTENSI MITIGASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM**

**COCOA-LANGSAT-BASED AGROFORESTRY SYSTEMS:
ROOT DISRIBUTION, ACCESS TO WATER AND
NUTRIENTS, AND MITIGATION POTENTIAL TO CLIMATE
CHANGE**

ABDUL RAHIM SALEH



**PROGRAM STUDI ILMU PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

**SISTEM AGROFORESTRI BERBASIS KAKAO-LANGSAT:
SEBARAN AKAR, AKSES TERHADAP AIR DAN HARA
SERTA POTENSI MITIGASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM**

Disertasi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program Studi Ilmu Pertanian

Disusun dan diajukan oleh

ABDUL RAHIM SALEH

P013171002

kepada

**PROGRAM STUDI ILMU PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

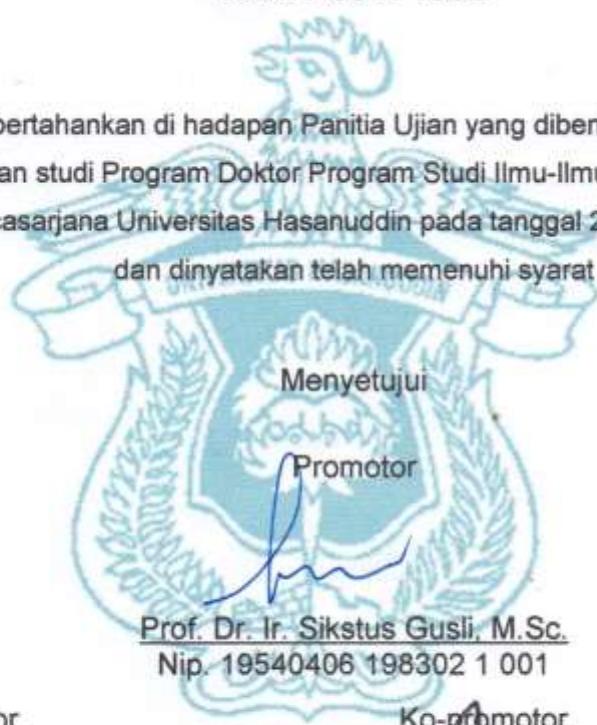
DISERTASI

SISTEM AGROFORESTRI BERBASIS KAKAO-LANGSAT: SEBARAN AKAR, AKSES TERHADAP AIR DAN HARA SERTA POTENSI MITIGASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM

ABDUL RAHIM SALEH

NIM: P03171002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
penyelesaian studi Program Doktor Program Studi Ilmu-Ilmu Pertanian Sekolah
Pascasarjana Universitas Hasanuddin pada tanggal 21 Maret 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat



Ko-promotor

Ambo Ala
Prof. Dr. Ir. Ambo Ala, MS.
Nip. 19541231 198102 1 006

Ketua Program Studi,

Almar
Prof. Dr. Ir. Darmawan Salman, MS
Nip. 19630606 198803 1 004

Ko-promotor

Fismaneswati
Dr. Ir. Fismaneswati, MP.
Nip. 19760302 200212 2 002

Dekan Sekolah Pascasarjana
Universitas Hasanuddin

Jompa
Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.
NIP 196703081990031001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Sistem Agroforestri Berbasis Kakao-Langsat: Sebaran Akar, Akses Terhadap Air dan Hara Serta Potensi Mitigasi Terhadap Perubahan Iklim” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Sikstus Gusli, M.Sc. sebagai promotor dan Prof. Dr. Ir. Ambo Ala, MS. sebagai kopromotor-1 serta Dr. Ir. Rismaneswati, MP sebagai kopromotor²). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Biodiversitas Journal of Biological Diversity, Volume 23 No. 1 (2022), DOI: 10.13057/biodiv/d230153 sebagai artikel dengan judul “Tree density impact on growth, roots length density, and yield in agroforestry based cocoa”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 22 Februari 2022



Abdul Rahim Saleh
NIM. P013171002

PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohim,

Saya bersyukur kepada Allah SWT. bahwa disertasi ini akhirnya dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian yang saya lakukan dapat terlaksana dengan sukses dan disertasi ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan Prof. Dr. Ir. Sikstus Gusli, M.Sc. sebagai promotor, sebagai Prof. Dr. Ir. Ambo Ala, MS. Sebagai kopromotor-1, dan Dr. Ir. Rismaneswati, MP sebagai kopromotor². Penelitian juga menyampaikan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir.Kaimuddin, M.Si., Prof. Dr. Ir. Nasaruddin, MS., Prof. Ir. Muhammad Arsyad, SP., M.Si., Ph.D. dan Dr. Ir. Muh. Jayadi, MP. sebagai tim penguji, serta Prof. Dr. Ir. Fadjry Djufry, M.Si., sebagai Penguji eksternal yang telah memberikan masukan/saran untuk perbaikan. Saya mengucapkan berlimpah terima kasih kepada mereka. Penghargaan yang tinggi juga saya sampaikan kepada Bapak Kepala Desa Kuajang dan anggota kelompok tani kakao terintegrasi ternak (Pak Anas, Sahabudin, Abdullah, Ambo Dalle, Abdul Rahman) yang telah mengizinkan kami untuk melaksanakan dan menyediakan berbagai keperluan penelitian di lapangan, dan kepada Pimpinan Laboratorium atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Soil Science, Universitas Hasanuddin.

Kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan, saya mengucapkan terima kasih atas beasiswa LPDP yang diberikan (2017) selama menempuh program pendidikan doktor. Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada pimpinan Universitas Sintuwu Maoso Poso yang telah memberikan izin menempuh program doktor, kepada pimpinan Universitas Hasanuddin dan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.

Kepada teman-teman seangkatan Program Doktor Ilmu Pertanian 2017 kalian teman-teman luar biasa dan seluruh pihak yang telah memberikan bantuan namun tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta (Hj. Norma dan Alm Hi. Muhammad Zain), Mertu (Hasnita dan Alm. Rustam Rahman), saya mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya

sampaikan kepada isteri tercinta Sri Sudewi dan ananda Zynercah Azkhaira Rahim dan Zhafran Khaery Salompe dan seluruh keluarga (kakak/adik, ipar, kemanakan, paman, tante, nenek dan kakek) atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Makassar, 21 April 2022

Abdul Rahim Saleh

ABSTRAK

ABDUL RAHIM SALEH. Sistem agroforestri berbasis kakao-langsat: sebaran akar, akses terhadap air dan hara serta potensi mitigasi terhadap perubahan iklim (dibimbing oleh Sikstus Gusli, Ambo Ala, Rismaneswati)

Sistem agroforestri berbasis kakao telah banyak diteliti. Namun, agroekologi agroforestri berbasis kakao-langsat belum diteliti, khususnya dari aspek sebaran akar, akses terhadap air dan hara, serta potensinya terhadap mitigasi perubahan iklim. Kami mempelajari (1) sebaran akar halus sebagai respon atas meningkatnya persaingan di bawah tanah berbatu dalam sistem agroforestri; (2) dampak kepadatan pohon dalam sistem agroforestri terhadap produktivitas agroforestri berbasis kakao pada tanah berbatu; dan (3) efektivitas sistem dalam menyerap dan menyimpan karbon untuk mitigasi perubahan iklim. Kami membandingkan sistem agroforestri kakao berdasarkan usia, yaitu agroforestri kakao muda (YCAF) dan tua (OCAF), dan sistem monokultur (Mono). Kami mengamati kepadatan panjang akar (KPA) kakao dan langsat dari jarak 0,4; 1,2; dan 1,7 m dari batang kakao pada kedalaman 0-10, 10-20, 20-30 dan, 30-40 cm, kerapatan pohon dalam sistem agroforestri, hasil biji kakao, produksi pohon naungan, serta potensi penyimpanan karbon. Kerapatan panjang akar (KPA) kakao berkorelasi positif dengan kerapatan isi tanah, dan terjadi pada semua kelas ordo, hal yang tidak terjadi pada akar halus langsat. Produksi biji kakao dua kali lipat lebih besar pada Mono. Namun, hasil konversi produksi buah yang dipanen dari pohon naungan mengompensasi kehilangan hasil biji kakao akibat penerapan sistem agroforestri. Biomassa pohon meningkat di atas dan di bawah tanah dari Mono ke YCAF (dari 18 menjadi 48 Mg ha⁻¹). Potensi cadangan karbon di sistem agroforestri kakao-langsat pada tanah berbatu 2,5 kali dibanding dengan sistem Mono, walaupun hanya 20% dibanding cadangan karbon di sistem hutan primer. Jika didesain dengan baik, sistem agroforestri kakao-langsat dapat meningkatkan hasil total yang lebih tinggi, selain manfaat tambahan dalam penyerapan karbon.

Kata kunci: Hasil biji kakao; agroforestri kakao-langsat, kerapatan panjang akar; biomassa pohon; cadangan karbon; tanah berbatu.

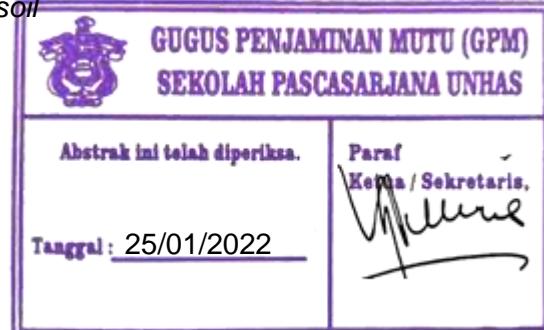


ABSTRACT

ABDUL RAHIM SALEH. Cocoa-langsat-based agroforestry systems: root distribution, access to water and nutrients, and mitigation potential to climate change (supervised by Sikstus Gusli, Ambo Ala, Rismaneswati)

Cocoa-based agroforestry has been studied widely. However, agroecology of cocoa-langsat-based agroforestry has not been investigated, specifically root distribution, access to water and nutrients, and its mitigation potential to climate change. We studied (1) fine-root distribution responding to increased below-ground competition in stony soils under agroforestry system; (2) tree density impact on cocoa-based agroforestry system on stony soil; and (3) the system effectiveness to store carbon for climate change mitigation. We compared cocoa agroforestry systems based on the system age, namely young- (YCAF) and old-cocoa agroforestry (OCAF), and cocoa monoculture (Mono). We measured cocoa and langsat root length density (RLD) 0.4, 1.2, and 1.7 m from the stem of cocoa at 0-10, 10-²⁰, 20-30 and 30-40 cm depths, tree density in the agroforestry systems, cocoa yield, productions obtained from the shade trees, and carbon stored potential. RLD of cocoa was positively correlated with soil density, and occurred in all classes of orders, which did not occur in langsat fine roots. Cocoa yield under Mono was doubled of the other systems. However, productions obtained from shade trees compensated cocoa yield loss from agroforestry systems. Tree biomass above- and below-ground increased from Mono (18 Mg ha^{-1}) to YCAF (48 Mg ha^{-1}). Potential carbon stored under cocoa-langsat agroforestry in stony soils was 2.5 times compared to Mono, although the figure is only 20% of that primary forest. If properly designed, cocoa-langsat agroforestry can improve overall yield in addition to extra carbon stored.

Key words: Cocoa yield; cocoa-langsat agroforestry systems; root length density; tree biomass; carbon stock; stony soil



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PENGESAHAN SEMINAR HASIL PENELITIAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH, DAN LAMBANG	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Produksi kakao di era pemanasan global	2
1.2 Agroforestri ke new-agroforestri berbasis kakao, adaptasi dan mitigasi perubahan iklim	3
1.3 Produksi biomassa dan penyimpanan karbon dalam sistem agroforestri	5
1.4 Peranan sistem akar, penyerapan air, transport dan biomassa karbon.....	6
1.5 Karakteristik tanah berbatu	9
1.6 Hipotesis umum	10
1.7 Garis besar disertasi	11
1.8 Daftar pustaka	13
BAB II ADAPTASI MORFOLOGI AKAR HALUS KAKAO DI BAWAH NAUNGAN POHON LANGSAT DALAM MENGEKSPLORASI TANAH BERBATU	19
2.1 Abstrak	19
2.2 Pendahuluan	19
2.3 Metode penelitian	21
2.3.1 Lokasi penelitian	21

2.3.2	Desain penelitian	21
2.3.3	Prosedur pengamatan	22
2.3.4	Pengambilan sampel tanah untuk pengamatan akar halus	25
2.3.5	Analisis Statistik	26
2.4	Hasil	27
2.4.1	Sifat fisik dan kimia tanah berbatu	27
2.4.2	Sifat morfologi akar halus berdasarkan kelas diameter	30
2.4.3	Hubungan antar parameter(sifat fisik tanah dan perkembangan akar)	35
2.5	Pembahasan	38
2.5.1	Distribusi dan perkembangan akar pada tanah berbatu ...	38
2.5.2	Dampak kehadiran batu terhadap perkembangan akar kakao	40
2.7	Kesimpulan	42
2.8	Daftar Pustaka	43
BAB III	STRUKTUR PERTUMBUHAN POHON, KERAPATAN PANJANG AKAR DAN PRODUKSI KAKAO PADA SISTEM AGROFORESTRI, TANAH BERBATU: PENGARUH KERAPATAN POHON	47
3.1	Abstrak	47
3.2	Pendahuluan	47
3.3	Metode penelitian	49
3.3.1	Lokasi penelitian	49
3.3.2	Desain penelitian	52
3.3.3	Prosedur penelitian	52
3.3.4	Analisis statistik	55
3.4	Hasil	56
3.4.1	Pengaruh perbedaan sistem terhadap kesuburan tanah	56
3.4.2	Struktur pohon kakao dan naungan dalam sistem budidaya kakao	56
3.4.3	Produksi kakao dan total produksi sistem	56
3.4.4	Hubungan antara hasil produksi sistem, kesuburan tanah dan tutupan kanopi pada skala plot	60
3.5	Pembahasan	61

3.5.1	Dampak kerapatan pohon terhadap kesuburan tanah	61
3.5.2	Produktivitas sistem agroforestri kakao	63
3.6	Kesimpulan	67
3.7	Daftar Pustaka	68
BAB IV	BIOMASA DAN C-TERSIMPAN PADA SISTEM AROFORESTRI BERBASIS KAKAO PADA TANAH BERBATU	73
4.1	Abstrak	73
4.2	Pendahuluan	73
4.3	Metode Penelitian	76
4.3.1	Lokasi Penelitian	76
4.3.2	Desain dan prosedur penelitian	76
4.3.3	Pengambilan sampel tanah untuk pengukuran karbon	78
4.3.4	Pengukuran biomassa pohon	79
4.3.5	Penghitungan cadangan C dalam biomasa dan nekromasa	81
4.4.6	Analisis statistik	81
4.4	Hasil	82
4.4.1	Biomasa di atas dan di bawah tanah dan sumber C	82
4.4.2	Biomasa tumbuhan bawah, buah kakao, buah non-kakao, nekromasa dan cadangan karbon	84
4.5	Pembahasan	87
4.5.1	Dampak pohon naungan pada biomassa, cadangan karbon pada tanah berbatu	87
4.5.2	Pengaruh kandungan batu terhadap kandungan karbon tanah	89
4.6	Kesimpulan	89
4.7	Daftar Pustaka	90
BAB V	PEMBAHASAN UMUM	94
5.1	Adaptasi akar kakao dan langsat di sistem agroforestri pada tanah berbatu	95
5.2	Sistem agroforestri adaptasi terhadap rendahnya kesuburan tanah berbatu	96

5.3 Rekomendasi untuk petani kakao	99
5.4 Ucapan terima kasih	103
5.5 Daftar Pustaka	104
LAMPIRAN-LAMPIRAN	151
CURRICULUM VITAE	152

DAFTAR TABEL

	Nomor urut	Halaman
2.1	Rasio volume batu (VB), kerapatan isi (KI) tanah dan kerapatan isi pada tiga sistem budidaya di Kecamatan Binuang. Mono (kakao monokultur); YCAF (agroforestri kakao berumur muda); OCAF: agroforestri kakao berumur tua	27
2.2	Kadar air dengan empat tingkat kedalaman tanah di tiga sistem budidaya kakao di Kecamatan Binuang. Mono: kakao dalam monokultur, YCAF: kakao agroforestri berumur muda, OCAF: kakao agroforestri berumur tua	28
2.3	Sifat kimia tanah di lokasi penelitian dikelompokkan ke dalam tiga sistem budidaya di Kecamatan Binuang. Kakao-mono: kakao dalam monokultur, YCAF: kakao agroforestri berumur muda, OCAF: kakao agroforestri berumur tua	30
2.4	Kerapatan panjang akar (cm dm^{-3}) kakao pada jarak horizontal batang (0,4;1,2;1,7 m) di tiga sistem budidaya. Kakao dalam monokultur (Mono); kakao agroforestri berumur muda (YCAF); kakao agroforestri berumur tua (OCAF)	33
2.5	Kerapatan massa akar kakao dan naungan (g dm^{-3}) pada tiga sistem budidaya di Kecamatan Binuang. Sistem Mono: kakao dalam monokultur, YCAF: kakao agroforestri berumur muda, OCAF: kakao agroforestri berumur tua	35
2.6	Korelasi pearson antara sifat fisik tanah dengan (volume batuan, massa batuan, kerapatan isi, kadar air tanah) dengan kerapatan panjang akar (KPA) dari lima kelas diameter akar	36
3.1	Rata-rata kerapatan pohon (KP), diameter batang setinggi dada (DBH), luas bidang dasar (LBD), tinggi pohon (TP), tutupan tajuk (TT), dan indeks keanekaragaman shannon (IKS) pada sistem kakao monokultur (Mono), sistem kakao agroforestr muda (YCAF), dan sistem kakao agroforestr tua (OCAF)	57
3.2	Rata-rata dan standar eror, perbedaan kandungan nitrogen daun (ND), fospor daun (PD), kalium daun (KD), dan luas daun spesifik (LDS) pada sistem kakao monokultur (Mono), sistem kakao agroforestr muda (YCAF), dan sistem kakao agroforestr tua (OCAF)	58
3.3	Rata-rata dan standar eror, hasil biji kakao dan hasil setara pohon (Tree equivalent yield-TEY) pada sistem kakao monokultur (Mono), sistem kakao agroforestr muda (YCAF), dan sistem kakao agroforestr tua (OCAF)	59

4.1	Karakteristik pohon di tiga sistem budidaya kakao yang berbeda. Sistem Mono; kakao monokultur; YCAF (agroforestri kakao muda) dan OCAF (agroforestri kakao tua)	77
4.2	Formula yang digunakan untuk mengukur biomasa pohon.....	80
4.3	Ukuran rata-rata dan standar error, biomasa di atas (AGB) dan di bawah tanah (BGB) pada sistem monokultur (Mono) dan sistem agroforestri kakao muda (YCAF) dan tua (OCAF).....	82
4.4	Rata-rata dan standar error, cadangan C dalam biomasa di atas dan di bawah permukaan tanah pada sistem kakao monokultur (Mono) dan sistem agroforestri kakao muda (YCAF) sistem agroforestri kakao tua (OCAF).....	83
4.5	Nekromassa, biomasa tumbuhan bawah, buah kakao, buah non-kakao, guguran serasah dari tiga sistem budidaya kakao yang berbeda. sistem kakao monokultur (Mono) dan sistem agroforestri kakao muda (YCAF) sistem agroforestri kakao tua (OCAF).....	84
4.6	Cadangan C dalam nekromassa, biomasa tumbuhan bawah, buah kakao, buah non-kakao, guguran serasah dari tiga sistem budidaya kakao yang berbeda; Sistem kakao monokultur (Mono) dan sistem agroforestri kakao muda (YCAF) sistem agroforestri kakao tua (OCAF).....	85

DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
2.1 (a) Pengambilan sampel tanah berukuran 20 cm x 20 cm x 20 cm untuk mengukur kerapatan isi tanah berbatu; (b) kandungan batu dalam tanah berbatu; (c dan d) pengukuran volume batu setelah dipisahkan dengan fraksi tanah	23
2.2 Penggalian sampel tanah untuk akar halus pada jarak 0.4, 1.2 dan 1.7 m dari pangkal pohon kakao, di kedalaman 0-10, 10-20, 20-30 dan 30-40 cm	25
2.3 Hubungan kedalaman tanah dengan; (a) kerapatan isi tanah; (b) persentase volume tanah	28
2.4 Hubungan kedalaman dengan kadar air tanah berbatu	29
2.5 Rasio urutan panjang akar halus pohon kakao dan langsat pada tiga sistem budidaya; (a) Akar halus kakao pada sistem Mono; (b) Sistem YCAF; (c) Sistem OCAF; (d) Akar halus pohon langsat pada sistem YCAF; (e) sistem OCAF.....	31
2.6 (a) kerapatan panjang akar (KPA) kakao (b) KPA langsat, pada tiga sistem budidaya kakao; monokultur kakao (Mono); agroforestri kakao muda (YCAF); agroforestri kakao tua (OCAF) terhadap; Huruf kecil yang berbeda menunjukkan perbedaan yang signifikan dari kelompok pohon antara sistem budidaya ($P < 0,05$).....	34
2.7 Pengaruh kedalaman terhadap: (a) kerapatan panjang akar (KPA) kakao; (b) KPA langsat.	36
2.8 Hubungan linear kerapatan panjang akar (KPA) dari lima kelas diameter akar halus kakao (2-5; 1 ⁻² ; 0.5-1; 0.25-0.50 dan <0.25 mm) terhadap (a) kerapatan isi tanah; (b) persentase volume batu dalam tanah berbatu	37
2.9 Hubungan linear kerapatan panjang akar (KPA) (a) lima kelas diameter akar halus kakao (2-5; 1 ⁻² ; 0.5-1; 0.25-0.50 dan <0.25 mm) terhadap kadar air tanah berbatu	38
3.1 Peta lokasi pengambilan sampel di Kecamatan Binuang, Kabupaten Polewali Mandar, Sulawesi Barat, Indonesia.	50
3.2 a. Rata-rata curah hujan bulanan (www.chc.ucsb.edu); (b) temperatur minimum/maksimum dan kelembaban relatif dilokasi penelitian priode 2011-2020 (www.power.larc.nasa.gov).....	51

3.3	(a) Korelasi tutupan tajuk dengan Hasil Equivalen Pohon (Tree equivalent yield-TEY); (b) Grafik produksi kakao dan total produksi dalam tiga sistem budidaya kakao	59
3.4	(a) Analisis komponen utama (AKU) untuk mengevaluasi hubungan antar variabel lingkungan pohon kakao; b) AKU untuk mengevaluasi hubungan antar variabel ditingkat sistem.....	60
4.1	Lokasi di Kecamatan Binuang, Kabupaten Polewali Mandar, Sulawesi Barat. Lokasi tersebut tersebar antara kordinat 03° 25' 30" S dan 119° 23' 09" W sampai 03° 25' 54" S dan 119° 22' 59" W....	76
4.2	Struktur pohon dalam sistem budidaya kakao (A) kakao monokultur; (B); agroforestri kakao muda (YCAF) dan, (C) agroforestri kakao tua	78
4.3	Titik pengambilan sampel tanah dalam plot penelitian mengikuti transek diagonal dalam plot. Terdiri dari tiga tingkat mengikuti transek, masing-masing tingkat terdiri dua titik sampel tanah yaitu pada jarak ~ 1 meter dari pangkal batang kakao dan pada tempat dimana akumulasi serasah bahan organik tinggi.....	79
4.4	Total karbon tersimpan di atas dan di bawah tanah dari tiga sistem budidaya kakao yang berbeda. sistem kakao monokultur (Mono) dan sistem agroforestri kakao muda (YCAF) sistem agroforestri kakao tua (OCAF) Huruf kapital yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik antara sistem agroforestri ($P <0,05$).....	86

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor urut	Halaman
1.1 Data rata-rata bulanan curah hujan (mm) priode 2011 – 2020	110
1.2 Data rata-rata bulanan temperatur minimum (°C) priode 2011-2020	110
1.3 Data rata-rata bulanan temperatur maksimum (°C) priode 2011-2020	111
1.4 Data rata-rata bulanan kelembaban udara relatif (%) priode 2011-2020	111
2.1a Kerapatan isi tanah dan kerapatan isi batu pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	112
2.1b Analisis sidik ragam kerapatan isi tanah kedalaman 0-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	112
2.1c Analisis sidik ragam kerapatan isi tanah kedalaman 20-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	113
2.1d Analisis sidik ragam kerapatan isi batu kedalaman 0-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	113
2.1e Analisis sidik ragam kerapatan isi batu kedalaman 20-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	113
2.2a Persentase volume batu pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	114
2.2b Analisis sidik ragam persentase volume batu kedalaman 0-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF) hasil transformasi Log Y	114
2.2c Analisis sidik ragam persentase volume batu kedalaman 20-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	114
2.3a Rata-rata kadar air tanah pada empat lapisan tanah (0-10 ; 10-20; 20-30 dan 30-40 cm) di tiga sistem budidaya kakao; Monokultur	115

kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF).	
2.3b Analisis sidik ragam kelembaban tanah kedalaman 0-10 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	115
2.3c Analisis sidik ragam kelembaban tanah kedalaman 10-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	116
2.3d Analisis sidik ragam kelembaban tanah kedalaman 20-30 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	116
2.3e Analisis sidik ragam kelembaban tanah kedalaman 30-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	116
2.4a Kadar hara tanah pada lapisan 0-10 cm di tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	117
2.4b Analisis sidik ragam konsentrasi C-org tanah kedalaman 0-10 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	117
2.4c Analisis sidik ragam konsentrasi N-org tanah kedalaman 0-10 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	117
2.4d Analisis sidik ragam C/N tanah kedalaman 0-10 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	118
2.4e Analisis sidik ragam konsentrasi P2O5 tanah kedalaman 0-10 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	118
2.5a Kadar hara tanah pada lapisan 10-20 cm di tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	118
25b Analisis sidik ragam konsentrasi C-org tanah kedalaman 10-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	119
25c . Analisis sidik ragam konsentrasi N-org tanah kedalaman 10-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono);	119

	Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	
25d	Analisis sidik ragam C/N tanah kedalaman 10-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	119
25e	Analisis sidik ragam konsentrasi P_2O_5 tanah kedalaman 10-20 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	120
2.6a	Kadar hara tanah pada lapisan 20-30 cm di tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	120
2.6b	Analisis sidik ragam konsentrasi C-org tanah kedalaman 20-30 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	121
2.6c	Analisis sidik ragam konsentrasi N-org tanah kedalaman 20-30 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	121
2.6d	Analisis sidik ragam C/N tanah kedalaman 20-30 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	121
2.6e	Analisis sidik ragam konsentrasi P_2O_5 tanah kedalaman 20-30 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	122
2.7a	Kadar hara tanah pada lapisan 30-40 cm di tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	122
2.7b	Analisis sidik ragam konsentrasi C-org tanah kedalaman 30-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF) hasil transformasi SQRT	122
2.7c	Analisis sidik ragam konsentrasi N-org tanah kedalaman 30-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	122
2.7d	Analisis sidik ragam C/N tanah kedalaman 30-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	123
2.7e	Analisis sidik ragam konsentrasi P_2O_5 tanah kedalaman 30-40 cm pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono);	123

Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	
2.8 Analisis ragam kerapatan panjang akar (KPA) kakao pada empat kelas diameter akar di tiga sistem budidaya kaka. Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	124
2.9 Hasil uji T kerapatan panjang akar (KPA) langsat pada empat kelas diameter akar di dua sistem agroforestri kakao. Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	125
2.10 Analisis ragam kerapatan massa akar (KMA) kakao pada di tiga sistem budidaya kaka. Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	126
2.11 Hasil uji T kerapatan massa akar (KPA) naungan di dua sistem agroforestri kakao. Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao Tua (OCAF)	126
3.1a Kerapatan pohon pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	127
3.1b Analisis sidik ragam kerapatan pohon kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan.	127
3.1c Analisis sidik ragam kerapatan pohon total, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan setelah ditransformasi dengan Y0.5	128
3.2a Diameter batang pohon pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan.	128
3.2b Analisis sidik ragam diameter batang pohon kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan.	129
3.2c Analisis sidik ragam diameter batang total, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	129
3.3a Luas bidang datar pohon pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	129
3.3b Analisis sidik ragam luas bidang dasar kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao	

muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan hasil transformasi LN-Y	130
3.3c Analisis sidik ragam luas bidang dasar total, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan hasil transformasi LN-Y	130
3.4a Tinggi pohon pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	131
3.4b Analisis sidik ragam tinggi pohon kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	131
3.4c Analisis sidik ragam tinggi pohon total, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan, Hasil transformasi 1/Y	131
3.5a H-index, tutupan tajuk dan diameter tajuk pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	132
3.5b Analisis sidik ragam H indeks, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	132
3.5c Analisis sidik ragam tutupan tajuk, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	133
3.5d Analisis sidik ragam diameter tajuk, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	133
3.6a Ringkasan Perhitungan hasil setara pohon dari produk non-kakao	134
3.6b Hasil biji kakao, hasil langsat setara pohon kakao dan hasil total setara biji kakao dalam formula hasil setara pohon (Tree equivalent yield/TEY) pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	135
3.6c Analisis sidik ragam hasil biji kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	135
3.6d Analisis sidik ragam hasil setara pohon kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	136

3.6e Uji-T hasil pohon non-kakao, pada dua sistem agroforestri; Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	136
3.7a Hasil hara ND (Nitrogen daun), PD (Posfor daun) dan KD (Kalium daun) tanaman kakao pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	137
3.7b Analisis sidik ragam kadar N-daun kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	137
3.7c Analisis sidik ragam kadar P-daun kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	138
3.7d Analisis sidik ragam kadar K-daun kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	138
3.8a Hasil Berat daun spesifik (BDS) dan Luas Daun Spesifik (LDS) tanaman kakao pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	138
3.8b Analisis sidik ragam berat daun spesifik (LDS) kadar K-daun kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan	139
3.8c Analisis sidik ragam Luas daun spesifik (LDS) kadar K-daun kakao, pada tiga sistem budidaya kakao; Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) dan empat ulangan $\lambda=0$	139
4.1a Rata-rata biomasa di atas tanah (AGB) dan di bawah tanah (BGB) ($Mg\ ha^{-1}$) tegakan kakao dan tegakan total pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	140
4.1b Analisis sidik ragam biomasa di atas tanah (AGB) ($Mg\ ha^{-1}$) tegakan tanaman kakao. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	141
4.1c Analisis sidik ragam biomasa di atas tanah (AGB) total tegakan pohon. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	141

4.1d	Analisis sidik ragam biomasa di bawah tanah (BGB) tegakan pohon kakao. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	141
4.1e	Analisis sidik ragam biomasa di atas dan di bawah tanah (AGB + BGB) total tegakan pohon. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	141
4.1f	Analisis ragam Rasio tajuk ; akar kakao tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	142
4.1g	Analisis ragam Rasio tajuk ; akar kakao tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	142
4.2a	Rata-rata biomasa di atas tanah (AGB) dan di bawah tanah (BGB) ($Mg\ ha^{-1}$) tegakan kakao dan tegakan total pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	143
4.2b	Analisis ragam Rasio tajuk ; akar total tegakan tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	144
4.2c	Analisis ragam C tersimpan dalam AGB kakao pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	144
4.2d	Analisis ragam C tersimpan dalam AGB ($Mg\ C\ ha^{-1}$) kakao pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	144
4.2e	Analisis ragam C tersimpan dalam BGB ($Mg\ C\ ha^{-1}$) pohon kakao pada tiga sistem budidaya; Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	145
4.2f	Rata-rata C tersimpan dalam BGB ($Mg\ C\ ha^{-1}$) dalam total tegakan pada tiga sistem budidaya; Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	145
4.2g	Analisis ragam C tersimpan dalam BGB total tegakan pada tiga sistem budidaya; Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	145
4.2h	Analisis ragam C tersimpan dalam AGB + BGB kakao pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	146
4.2i	Analisis ragam C tersimpan dalam AGB+BGB total tegakan pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	146
4.3a	Rata-rata nekromasa, Biomasa TB (Tumbuhan bawah), guguran seresah, biomasa biji kakao, kulit dan total buah kakao ($Mg\ C\ ha^{-1}$)	

pada tiga sistem budidaya: Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	147
4.3b Hasil analisis ragam nekromasa pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	147
4.3c Hasil analisis ragam dalam biomasa tumbuhan bawah pada tiga sistem budidaya; Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) hasil transformasi SQRT	148
4.3d Hasil analisis ragam guguran serasah pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	148
4.3e Hasil analisis ragam biomasa buah kakao ($Mg\ ha^{-1}$) pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	148
4.4a Rata-rata nekromasa, Biomasa TB (Tumbuhan bawah), guguran seresah, biomasa biji kakao, kulit dan total buah kakao ($Mg\ C\ ha^{-1}$) pada tiga sistem budidaya: Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	149
4.4b Hasil analisis ragam dalam C tersimpan dalam nekromasa pada tiga sistem budidaya; Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	149
4.4c Hasil analisis ragam C tersimpan dalam biomasa tumbuhan bawah pada tiga sistem budidaya; Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	149
4.4d Hasil analisis ragam C tersimpan dalam guguran serasah pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	150
4.4e Hasil analisis ragam rata-rata buah kakao (kulit, plasenta dan biji) pada tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF) hasil transformasi $SQRT+0,5$	150
4.5a Rata-rata C-pool organik tanah berbatu ($MG\ C\ ha^{-1}$), Biomasa TB (Tumbuhan bawah), guguran seresah, biomasa biji kakao, kulit dan total buah kakao ($Mg\ C\ ha^{-1}$) pada tiga sistem budidaya: Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	151
4.5b Hasil total karbon organik tanah ($Mg\ C\ ha^{-1}$) pada kedalaman 0 - 20 cm tiga sistem budidaya. Kakao monokultur (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF)	151

DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH, DAN LAMBANG

Lambang/Singkatan	Arti dan Penjelasan
Mono	Kakao Monokultur tanpa naungan
YCAF	<i>Young Cocoa Agroforestry</i> atau agroforestri kakao berumur muda
OCAF	<i>Old Cocoa Agroforestry</i> atau agroforestri kakao berumur tua
RLD (KPA)	<i>root length density</i> (kepadatan panjang akar)
KMA	kerapatan massa akar
Mg	<i>Million grams</i>
ha	Satuan luas hektar
m	Satuan panjang meter
KP	kerapatan pohon
AGB	<i>Above Ground Biomass</i> atau biomasa di atas tanah
BGB	<i>Below Ground Biomass</i> atau biomasa di bawah tanah
VB	volume batu
ρ	kerapatan isi
DBH	<i>diameter at breast height</i> (diameter batang setinggi dada)
LBD	luas bidang dasar
TP	tinggi pohon
TT	tutupan tajuk
IKS	indeks keanekaragaman shannon
g	gram
cm	centi meter
C	carbon (karbon)
N	nitrogen

C/N	Perbandingan antara banyaknya kandungan C terhadap N
P ₂ O ₅	Unsur Fosfor
K	Kalium
ZA	Amonium Sulfat
SP36	Super fosfat 36%
pH	derajar keasaman
JHB	Jarak Horizontal batang
π	<i>phi</i> (3,14)
BA	<i>Basal Area</i>
RAK	rancangan acak kelompok
SOC	<i>Soil Organic Carbon</i> atau Kandungan C-organik tanah
TEY	<i>Tree equivalent ratio</i> atau hasil setara pohon
z	ketebalan lapisan tanah
ρ^{th}	kerapatan isi tanah
°C	derajat celsius
LDS	Luas daun spesifik
GV	<i>Gliricidia value</i> yaitu produksi pakan setara kambing selama setahun
FWG	Fresh weight <i>gliricidia</i> atau <i>Bobot segar gliricidia</i>
ND	nitrogen daun
PD	fosphor daun
KD	kalium daun

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

Agroforestri adalah sistem tertua dalam sejarah bercocok tanam (Wang *et al.*, 2014), yang berperan besar menstabilkan laju degradasi hutan tropis akibat praktir pertanian secara intensif dari sistem monokultur (Azam-Ali, 2003), mencegah praktik tebang/bakar tradisional pada pembukaan lahan hutan tropik (Hauser dan Gichuru 1994). Kakao dibudidayakan pertama kali dengan sistem ini sejak awal ditemukannya ribuan tahun lalu di lembah tropis amazon (Motamayor *et al.*, 2002; Vaast dan Somarriba, 2014). Konversi hutan tropis menjadi titik tolak pengembangan kakao dalam suatu wilayah, dimana kesuburan tanah yang menyertainya menopang produksi pohon kakao, (Somarriba *et al.*, 2004). Saat ini, luas areal penanaman kakao telah mencapai 10 juta ha, menopang kehidupan ekonomi bagi 6 juta keluarga petani kecil (Vaast dan Somarriba, 2014; Wickramasuriya dan Dunwell, 2018; Dawoe *et al.*, 2016) menghasilkan 4,7 juta ton biji kakao pada tahun 2018 untuk memenuhi kebutuhan dunia yang masih mengalami devisit 0.2 juta ton tahun 2020 (ICCO, 2020).

Pohon naungan dalam sistem agroforestri berperan besar di tengah perubahan iklim dan peristiwa cuaca ekstrim yang menjadi ancaman serius bagi produktivitas tanaman kakao (De Almeida dan Valle, 2007). Kehadiran naungan menciptakan iklim mikro, menjadi lebih sesuai untuk tanaman asli lembah amazon tersebut (Motamayor *et al.*, 2002; Asigbaase *et al.*, 2019). Tutupan tajuk pohon naungan menurunkan evaporasi dari dalam tanah (Radersma dan Ong, 2004) berkontribusi positif dalam perbaikan kesuburan tanah melalui rantai pasok bahan organik dan aktivitas mikroorganisme (Rigal *et al.*, 2019). Disisi lain, pohon naungan juga menekan tanaman lain yang tumbuh di bawahnya serta meningkatkan penggunaan air dan mengurangi intersepsi air hujan dalam sistem (Radersma dan Ong, 2004).

Karakteristik tanah berbatu berasosiasi negatif dengan pertumbuhan dan produksi kakao, bahkan jenis tanah ini tidak direkomendasikan untuk budidaya tanaman (Ruf, 2011). Lahan miring yang berbatu rentan mengalami erosi, sehingga diperlukan tutupan vegetasi yang rapat untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan. Keanekaragaman pohon dalam sistem agroforestri berperan meningkatkan tutupan tanah berbatu, melindungi tanah dari erosi dan penguapan.

Bab ini mengkaji beberapa permasalahan dalam sistem agroforestri kakao yang dikembangkan pada tanah berbatu dan merumuskannya dalam suatu hipotesis untuk diteliti pada bab-bab selanjutnya.

1.1. Produksi kakao di era pemanasan global

Kenaikan suhu global diperkirakan akan terus terjadi sebagai respon dari perubahan iklim, diikuti laju evapotranspirasi potensial yang membutuhkan lebih banyak air, menyebabkan meningkatnya cekaman kekeringan tanaman kakao selama musim kemarau (Läderach *et al.*, 2013; Schroth *et al.*, 2016). Cekaman kekeringan yang disertai peningkatan suhu memicu daun tanaman kakao menjadi menggulung (Asante *et al.*, 2017) dan mengalami penurunan kandungan klorofil, menyebabkan pelambatan laju fotosintesis (Daymond dan Hadley, 2004) dan pohon kakao kehilangan kemampuannya untuk berproduksi dengan baik (Asante *et al.*, 2017). Kekeringan membawa dampak merugikan terhadap budidaya tanaman kakao secara intensif di Pulau Kalimantan, Sulawesi dan wilayah lain di Asia Tenggara, dan diperkirakan terus bertambah ke tingkat yang lebih parah karena pemanasan iklim di sekitar katulistiwa (Moser *et al.*, 2010).

Di Indonesia, hasil penelitian menunjukkan bahwa kekeringan memengaruhi hasil kakao. Petani di Sulawesi melaporkan bahwa penurunan produksi mencapai 38% dari produksi rata-rata kakao setelah dilanda *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO) yang menyebabkan kekeringan pada tahun 1997 dan 2002 (Schwendenmann *et al.*, 2010). Selain itu, perubahan iklim juga dapat mengubah tahapan dan tingkat perkembangan hama dan patogen kokao, mengubah resistensi inang dan menghasilkan perubahan fisiologi patogen inang dan perubahan interaksi hama (Kwapong dan Frimpong, 2004), sehingga menciptakan hama dan penyakit baru.

1.2. Agroforestri ke new-agroforestri berbasis kakao sebagai upaya mitigasi terhadap perubahan iklim

Tanaman kakao berasal dari kawasan hutan Amazon Brasil, banyak dibudidayakan di bawah naungan hutan primer maupun sekunder (Schneider *et al.*, 2017; Rajab *et al.*, 2016), sebagai upaya mempertahankan kelestarian hutan alam yang heterogen dan melindungi lahan tropis dari agen kerusakan (De Almeida dan Valle, 2007). Seiring perkembangannya, sistem budidaya tradisional ini semakin banyak mengalami perubahan dengan menghilangkan naungan dari tanaman asli hutan (Schwendenmann *et al.*, 2010). Di Ghana dan Pantai Gading, lahan perkebunan kakao dinaungi dengan tanaman buah yang sengaja ditanam oleh petani sebagai pengganti tanaman hutan asli seperti jenis jeruk (*C. Sinensis*), alpukat (*Persea americana*), jambu biji (*Psidium guayava*), mangga (*Anacardium occidentale*) (Tondoh *et al.* 2015), tumpang sari kelapa sawit (*Elaeis spp.*), karet (*Ficus elastica*) dengan kakao (*Theobroma cacao*) atau kopi (*Coffea spp.*) (Schroth *et al.*, 2016). Penggunaan pohon naungan dari spesies yang memiliki pertumbuhan cepat dan mampu menyuplai nitrogen seperti pohon legum *Gliricidia ssp.* atau *Erythrina ssp.*, yang berperan sebagai naungan bagi tanaman kakao muda sekaligus menyuplai hara seperti nitrogen (Kohler *et al.*, 2010). Populasi naungan berangsur-angsur dikurangi bahkan dihilangkan sama sekali (Rajab *et al.*, 2016), dengan alasan untuk mengurangi persaingan merebut sumber daya seperti cahaya, air dan hara antara pohon kakao dengan pohon naungan yang berpotensi mengurangi produksi kakao (Schwendenmann *et al.*, 2010).

Perubahan sistem budidaya kakao dari tumpangsari tanaman hutan menjadi sistem monokultur justru terjadi di era perubahan iklim global, yaitu era dimana perubahan kondisi cuaca rata-rata di bumi meningkat, seperti peningkatan suhu global, kejadian gelombang panas, kekeringan, banjir, badai, dan cuaca ekstrim lainnya terjadi lebih intensif. Hasil tanaman berupa produk makanan, pakan dan serat menurun drastis pada suhu di atas 30 °C, sehingga suhu panas dan kekeringan menjadi pembatas utama produksi tanaman (Ronald, 2011). Perubahan iklim menurunkan kesuburan tanah dan menyebabkan cekaman kekeringan (Lawal dan Omonona 2014), memicu peningkatan serangan hama dan penyakit (Gateau-Rey *et al.*, 2018).

Keberagaman dan perbedaan spesies tanaman dalam sistem agroforestri menentukan level manfaat yang diperoleh, yang sangat ditentukan pada pemilihan

spesies naungan dan iklim lokal (Beer *et al.*, 1998; Isaac *et al.*, 2005). Sistem agroforestri kakao berdampak positif terhadap kesuburan tanah, meningkatkan konsentrasi karbon dan nitrogen tanah (Blaser, *et al.*, 2017; Wartenberg *et al.*, 2019). Meskipun sistem agroforestri kakao menyebabkan perbaikan unsur hara tanah di bawah naungan, namun hal ini tidak berdampak pada peningkatan pertumbuhan, dan justru terjadi penurunan pertumbuhan dan hasil (Blaser, *et al.*, 2017; Wartenberg *et al.*, 2019). Peneliti lain memberikan hasil yang kontras, dimana pertumbuhan dan hasil kakao yang positif (Isaac *et al.*, 2007). Hasil biji kakao yang dicatat di sistem agroforestri tidak menunjukkan perbedaan dengan hasil monokultur (Rajab *et al.*, 2016). Perbedaan kesimpulan ini kemungkinan akibat penggunaan spesies pohon naungan yang berbeda. Sifat tertentu dari masing-masing spesies seperti tinggi tanaman, luas tutupan kanopi, kandungan hara serasah serta sistem perakaran yang berbeda, menimbulkan dampak yang berbeda terhadap pertumbuhan kakao.

Semua komponen dalam sistem agroforestri seperti tanaman budidaya, pohon naungan dan tumbuhan bawah saling berinteraksi. Interaksi antar-komponen ini ditentukan oleh manajemen sistem, termasuk jenis dan karakteristik fungsional dari spesies yang ditanam, jarak dan kepadatan populasi, stratifikasi, dan aplikasi pupuk. Interaksi di atas permukaan tanah termasuk paparan spesies yang berbeda di berbagai strata sistem agroforestri terhadap iklim dan cuaca (Niether *et al.*, 2018). Sementara beberapa naungan dalam sistem agroforestri dapat mendukung fungsi fisiologis pohon kakao (Baligar *et al.*, 2008) dan memperpanjang umur ekonomi dengan cara menciptakan lingkungan yang sesuai (Läderach *et al.*, 2013), kepadatan naungan mengurangi cahaya untuk keperluan fotosintesis menyebabkan pertumbuhan terhambat dan menurunkan hasil kakao (Schneider *et al.*, 2017).

Secara umum, sistem agroforestri dilaporkan sebagai model tumpang sari yang dapat meningkatkan jasa ekosistem seperti keanekaragaman hayati, mengurangi kecepatan angin, menurunkan suhu, memperbaiki kesuburan tanah dan meningkatkan pendapatan petani (Schneider *et al.*, 2017; Blaser *et al.*, 2017; Bai *et al.*, 2017; Monroe *et al.*, 2016). Manfaat lain sistem agroforestri meliputi peningkatan kandungan bahan organik tanah, peningkatan laju infiltrasi dan peningkatan daur ulang unsur hara (Tscharntke *et al.*, 2011), mencegah bocornya hara keluar dari sistem (Notaro *et al.*, 2014).

1.3. Produksi biomasa dan penyimpanan karbon dalam sistem agroforestri

Perubahan sistem penggunaan lahan dari berbasis kehutanan dikonversi menjadi lahan pertanian dan padang rumput memengaruhi pertukaran gas rumah kaca melalui penguapan karbon lebih besar ke atmosfir (Kumar dan Nair 2011). Peran penting tanaman seringkali hanya dipandang secara ekonomi sebagai sarana pemenuhan kebutuhan pangan, sementara peran penting lainnya terabaikan. Susunan tanaman dalam sistem agroforestri turut memelihara biomasa di atas dan di bawah tanah (Seneviratne *et al.*, 2015). Sistem agroforestri petani kecil di Claveria, Filipina memiliki tingkat akumulasi karbon yang tinggi dari biomasa di atas permukaan tanah, dimana cadangan karbon tertinggi diamati di hutan alam diikuti oleh kebun yang dikelola masyarakat, sedangkan yang terendah ditemukan di padang rumput (Kumar dan Nair 2011).

Keanekaragaman pohon yang tinggi memiliki tingkat akumulasi C yang tinggi. Kombinasi tanaman budidaya dengan tanaman pohon menyimpan C pada tingkat yang lebih tinggi dibanding hanya berisi tanaman semusim atau padang rumput yang memiliki akumulasi C terbatas (Tomich *et al.*, 2002). Tanaman semusim hanya mengakumulasi karbon melalui akar dan retensi residu tanaman, sedangkan tanaman tahunan mengakumulasi karbon melalui akar, serasah, dan biomasa di atas permukaan tanah. Besaran biomasa suatu sistem sangat bervariasi, dipengaruhi oleh umur tanaman, komposisi spesies, kepadatan tanaman, dan praktik manajemen yang diterapkan petani serta pengaruh jenis tanah dan iklim setempat (Ramos *et al.*, 2018).

Pohon naungan berpengaruh positif terhadap kesuburan tanah, namun mengurangi pertumbuhan kakao. Biomasa kakao di atas tanah yang tumbuh di sistem monokultur lebih tinggi 19% dibanding yang tumbuh tepat di bawah pohon naungan (Wartenberg *et al.*, 2019). Hasil yang sama ditemukan oleh Blaser *et al.* (2017), yaitu tingkat pertumbuhan pohon kakao menurun dengan meningkatnya tutupan pohon pelindung di tingkat plot. Sementara, hasil penelitian (Isaac *et al.*, 2007) pada tanaman kakao berumur muda menunjukkan produksi biomassa di atas tanah lebih tinggi pada sistem agroforestri. Sejauh mana masing-masing spesies pohon naungan memengaruhi pertumbuhan kakao masih menyisakan pertanyaan, yang kemungkinannya menimbulkan persaingan dalam mendapatkan cahaya atau faktor lain, seperti persaingan memperebutkan hara dan air.

1.4. Peranan sistem akar, penyerapan air, transport dan biomasa karbon

Interaksi di bawah permukaan tanah dalam sistem agroforestri kurang jelas dibandingkan interaksi di atas tanah, dan sebagian besar belum diselidiki. Karakteristik agroforestri tersusun dari berbagai spesies pohon meningkatkan sumber masukan bahan organik dalam bentuk serasah (Wartenberg *et al.* 2017), bahan organik terakumulasi di bawah tegakan sistem agroforestri hampir setara dengan bahan organik di hutan alam setelah mengalami gangguan manusia yang berdampak pada berkurangnya aliran permukaan, meningkatkan infiltrasi air hujan serta mencegah erosi (Notaro *et al.* 2014), meminimalkan kehilangan unsur hara melalui pencucian dan erosi (Wartenberg *et al.*, 2017).

Rambut akar atau akar halus dari tanaman tahunan banyak terkonsentrasi pada cabang lateral yang keluar dari akar utama. Jenis akar ini berperan penting dalam penyerapan air dan hara, dan pada tingkat ekosistem memberikan kontribusi yang signifikan terhadap siklus biogeokimia (Pregitzer *et al.*, 2002). Kemampuan tanaman berkayu menyerap air dan hara sangat tergantung pada faktor-faktor lain, seperti dinamika akar halus (tingkat kematian dan pertumbuhan kembali) serta perubahan musim. Dalam sistem kakao-agroforestri, siklus akar halus memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap daur ulang hara, di mana persaingan antara pohon naungan dan tanaman kakao dalam menyerap air dan hara tergantung pada pola waktu pertumbuhan kembali akar halus (Muñoz dan Beer 2001).

Evaluasi pertumbuhan akar halus pohon kakao pada tingkat plot telah banyak dilakukan (diantaranya; Niether *et al.*, 2019; Rajab *et al.*, 2016) Namun, untuk lebih memahami interaksi antar spesies dalam agroforestri kakao, dibutuhkan kajian mendalam terutama sistem perakaran masing-masing spesies yang menentukan bentuk interaksinya dengan kakao. Hasil kajian Wartenberg *et al.* (2019), menemukan dampak pohon naungan terhadap kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman kakao dalam sistem berbeda secara signifikan, namun interaksi masing-masing spesies naungan terhadap pertumbuhan kakao dalam penggunaan sumber daya di bawah tanah seperti hara dan air masih menyisakan ruang untuk diteliti. Pohon naungan yang berbeda spesies kemungkinan memiliki interaksi yang berbeda atau kurang kompatibel dengan pohon kakao (Asare *et al.*, (2017). Wartenberg *et al.* (2019) merekomendasikan untuk melakukan

pengukuran kelembaban tanah yang lebih dalam dikombinasikan dengan informasi tambahan mengenai kedalaman perakaran, sehingga mampu melihat dinamika persaingan di wilayah perakaran dalam mengekstrak sumber daya di agroforestri kakao.

Perakaran tanaman terdistribusi ke kedalaman lapisan tanah memandu proses infiltrasi air, sedangkan lahan yang terbebas dari distribusi akar memiliki kerapatan tanah yang tinggi berkontribusi dalam menghambat laju infiltrasi air (Jiang *et al.*, 2018). Proses ini menentukan cadangan air tersimpan untuk tanaman. Kepadatan vegetasi dalam sistem agroforestri memengaruhi sifat fisik tanah menjadi lebih baik yang berdampak pada laju infiltrasi lebih cepat dan distribusi air lebih luas ke seluruh profil tanah (Jiang *et al.* 2019).

Rambut akar mengalami regenerasi secara kontinyu dalam tempo yang singkat, dimana pertumbuhan rambut akar baru bersamaan dengan berakhirnya masa penuaan rambut akar yang tua (Noordwijk *et al.*, 2015; Persson, 1983). Regenerasi rambut akar berperan dalam siklus hara dalam sistem agroforestri (Muñoz dan Beer 2001). Pemanasan global yang dipicu oleh peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer menjadi faktor pembatas laju produksi, umur dan proses dekomposisi rambut akar tanaman memengaruhi cadangan karbon di dalam tanah (Eissenstat *et al.*, 2000).

Sistem akar dari tanaman tahunan memiliki skala ukuran dan urutan percabangan yang berbeda mulai dari akar kasar yang berlignin di sekitar pangkal batang hingga akar halus, baik yang berlignin maupun tidak berlignin pada bagian ujung akar. Akar halus (diameter < 2 mm) memiliki fungsi heterogen dan merupakan bagian yang paling dinamis dari sistem akar tanaman berkayu (Paulitz, 2002; Guo *et al.*, 2008). Akar paling ujung dan halus tidak mengembangkan pertumbuhan sekunder, berperan dalam penyerapan air dan hara dan memiliki umur pendek, sedangkan akar lainnya dalam ukuran yang lebih besar mengembangkan pertumbuhan sekunder, terlibat dalam pengangkutan air dan hara dan memiliki umur lebih panjang dari akar halus (McCormack *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016).

Komponen tanaman budidaya menciptakan interaksi biofisik dengan tanaman pohon pelindung, memanfaatkan sumberdaya yang sama sehingga menciptakan persaingan, atau saling berbagi dalam memanfaatkan sumberdaya yang melimpah seperti hara dan air yang keduanya ditentukan oleh posisi distribusi dari akar halus (Nygren *et al.*, 2013). Niether *et al.*, (2019) mendapatkan

distribusi akar halus dua spesies dalam sistem agroforestri terkonsentrasi pada lapisan tanah permukaan sampai kedalaman 25 cm sehingga berpotensi dalam persaingan perebutan sumber daya yang sama. Penyebaran akar tanaman sangat dipengaruhi oleh jenis spesies, faktor edafik dan interfensi pemeliharaan tanaman (Akinnifesi *et al.*, 1998). Lapisan tanah menyediakan cadangan air dan hara bagi tanaman, sehingga menentukan jangkauan perakaran tanaman (Varma dan Concepts, 2014; Huck dan Taylor, 1982). Jangkauan dan distribusi akar yang dalam menggambarkan kemampuan tanaman memperoleh air dan hara dari lapisan tanah yang dalam, serta meminimalisir pencucian hara N (nitrogrn) di dalam tanah (Chen *et al.*, 2019).

Menurut Muñoz dan Beer (2001), rendahnya produksi akar halus antara Oktober dan Januari di Kosta Rica mungkin merupakan hasil dari distribusi internal karbon untuk produksi biji yang membutuhkan waktu enam bulan untuk berkembang dan matang, dan dipanen pada bulan Desember-Januari. Penerapan manajemen juga turut memengaruhi produksi akar halus kakao, pemangkasan yang dilakukan pada sebagian cabang non produktif dari tanaman kakao dapat mengurangi produksi akar halus kakao karena terjadi pengalihan produk fotosintat ke bagian atas untuk pemulihan luka dan pertumbuhan tunas baru atau dengan kata lain terjadi persaingan internal antara *flushing* dan pertumbuhan akar (Muñoz dan Beer, 2001).

Faktor iklim turut andil dalam siklus produksi akar halus dilaporkan oleh Muñoz dan Beer (2001). Pertumbuhan aktif ujung akar kakao (pada kedalaman tanah 0-10 cm) lebih rendah pada bulan kering dan lebih tinggi pada bulan basah (Kummerow *et al.*, 1982). Oleh karena itu, peningkatan sementara dalam produksi akar halus ini tampaknya menjadi bagian dari siklus fenologis normal (Muñoz dan Beer, 2001), karena pembentukan ujung akar baru dalam kakao yang ditanam dalam larutan hara dilaporkan hanya selama musim hujan di Costa Rica (Almeida dan Valle, 2007). Selain itu, hasil mengenai dinamika akar halus dari perkebunan kakao yang dinaungi menunjukkan bahwa jumlah hara yang diserap tanaman kakao yang disediakan dari pupuk organik atau anorganik mengalami peningkatan di awal musim hujan dibanding di akhir musim (Muñoz dan Beer, 2001). Sejauh mana pengaruh faktor iklim menginterfensi perkembangan akar kedua spesies dalam sistem agroforestri yang akhirnya berdampak pada pertumbuhan tanaman kakao, juga masih membutuhkan kajian lebih lanjut.

Pertumbuhan kakao dikontrol oleh iklim, terutama curah hujan. Rata-rata curah hujan yang dibutuhkan untuk pertumbuhan kakao berkisar 1400 dan 2000 mm pertahun; curah hujan yang lebih rendah menyebabkan defisit air tanah yang menekan pertumbuhan dan hasil tanaman kakao (Lahive *et al.*, 2019). Namun, distribusi curah hujan tahunan seringkali lebih penting daripada jumlah curah hujan tahunan, dan jenis tanah memberikan sifat retensi air yang berbeda yang mengubah sensitivitas pohon kakao terhadap defisit air tanah. Periode kering yang berkepanjangan di mana curah hujan kurang dari 100 mm per bulan lebih dari 3 bulan dapat memiliki pengaruh negatif pada pertumbuhan dan hasil tanaman kakao. Tingkat evapotranspirasi 949 mm per tahun diukur pada kakao berumur 13 tahun dan 6 tahun yang tumbuh di bawah naungan pohon *Gliricida* di Indonesia (Falk, 2004; Kohler *et al.*, 2010). Laju evapotranspirasi kakao bervariasi antara musim, dimana 1,6 mm hari⁻¹ pada musim hujan dan 3,2 mm hari⁻¹ pada musim kemarau (Radersma dan de Ridder, 1996).

Peristiwa kekeringan dipastikan menjadi bagian dalam siklus tahunan kakao, sehingga diperlukan pemahaman mengenai kontribusi perakaran yang berada pada kedalaman tanah yang berbeda di sistem agroforesri. Jangkauan perakaran tanaman memberikan kemampuan pada tanaman untuk mentolerir dan menghindari kekeringan sekaligus meningkatkan efisiensi dalam memperoleh air dan hara. Kakao memiliki sistem perakaran dangkal yang menempati lapisan tanah atas dan kemungkinan membatasi potensi mengakses air pada lapisan tanah bagian bawah selama periode kekeringan (Nygren *et al.*, 2013; Kummerow *et al.*, 1982). Arsitektur akar dan distribusi akar dalam profil tanah penting dalam menentukan penyerapan air dan unsur hara.

1.5. Karakteristik tanah berbatu

Tanah berbatu (*stony soil*) adalah tanah yang mengandung batu, yang tersebar di permukaan atau tertanam dalam lapisan tanah (Nikiforoff, 1984). Sifat fisik tanah, termasuk keberadaan dan kelimpahan batuan, turut memengaruhi persediaan air di dalam tanah dan perkembangan perakaran tanaman. Tanah berbatu sangat rentan kehilangan unsur hara akibat pencucian (Carrick *et al.*, 2013). Kerapatan massa tanah dilaporkan menghambat perkembangan akar secara vertikal ke lapisan bawah (Cascaredo *et al.*, 2021; Kormanek *et al.*, 2015). Selain itu,

kandungan batu membatasi perkembangan akar (Hlaváčiková *et al.*, 2018; Morandage *et al.*, 2021).

Tanaman yang tumbuh di atas tanah berbatu rentan mengalami kekeringan, air tanah mudah hilang karena memiliki kemampuan menyimpan air yang sangat rendah (Carrick *et al.*, 2013; Hlaváčiková *et al.*, 2018), permeabilitas cepat (Carrick *et al.*, 2013) memicu pencucian hara. Ketersediaan air untuk tanaman dalam tanah berbatu sangat dipengaruhi oleh persentase volumetrik dari fragmen batuan serta jenis batuan (Cousin, *et al.*, 2003). Batu kapur dapat menyimpan air hingga 90% air tersedia bagi tanaman, namun batu jenis basalt memiliki ketersediaan air mendekati nol (Poesen dan Lavee 1994). Sebagian besar penelitian mengesampingkan kandungan batu dalam tanah, dengan penelitian yang hanya fokus pada material tanah saja.

Kepadatan populasi tanaman di dalam sistem agroforestri, kemungkinan menciptakan interaksi antar spesies semakin besar. Informasi bentuk interaksi di bawah tanah berbatu dalam sistem agroforestri berupa kompetisi atau saling melengkapi sering hanya bergantung pada pengamatan petani terhadap kinerja tanaman komersial mereka. Diperlukan penelitian untuk mempelajari distribusi horizontal dan vertikal perakaran masing-masing spesies dalam sistem agroforestri untuk mengakses sumber daya di dalam tanah berbatu. Keteraturan pola tanam di beberapa stasiun penelitian agroforestri di beberapa negara memudahkan pekerjaan dalam penelitian agroforestri. Namun, jarak tanam yang cenderung tidak beraturan di area perbukitan seperti kebun kakao yang dikelola petani di Pulau Sulawesi akan memberikan informasi yang berbeda.

1.6. Hipotesis umum

Berdasarkan studi literatur yang telah dijabarkan, maka kami merangkum beberapa hipotesis untuk dijawab dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Produksi akar halus dalam sistem agroforestri meningkat sebagai respon atas meningkatnya persaingan di bawah tanah berbatu.
2. Ada pemisahan sebaran akar secara vertikal antara pohon kakao dan pohon naungan.

3. Peningkatan kepadatan pohon dalam sistem agroforestri menurunkan produksi kakao di atas tanah berbatu.
4. Diversifikasi meningkatkan produksi sistem agroforestri setara dengan sistem monokultur.
5. Dengan meningkatnya kapadatan pohon dari sistem monokultur ke sistem agroforestri kakao pada tanah berbatu, biomasa di atas dan di bawah tanah, serta cadangan C dan penyerapan C meningkat.

Untuk menjawab hipotesis ini, maka dilakukan pengukuran sebagai berikut:

- a. Inventarisasi struktural tegakan di atas permukaan tanah;
- b. Biomasa dan penyimpanan C di atas dan di bawah tanah;
- c. Produktivitas di atas permukaan tanah dan hasil biji kakao dan non-kakao;
- d. Pola distribusi vertikal dan horizontal akar pohon kakao dan pohon naungan (langsat);
- e. Pembagian kelas diameter akar halus pohon kakao dan langsat pada setiap kedalaman 10 cm lapisan tanah sampai kedalaman 40 cm; dan
- f. Sifat kimia dan fisik tanah setiap 10 cm lapisan tanah sampai kedalaman 40 cm, kecuali kandungan batu dan kerapatan isi tanah dilakukan pada setiap 20 cm

1.7. Garis besar disertasi

Disertasi ini dibagi menjadi tiga sub-penelitian yang berfokus pada aspek kerapatan pohon terhadap produktivitas dan produksi biomasa dan penyimpanan karbon, adaptasi perakaran kakao di bawah tanah berbatu. Semua ini disajikan pada Bab 2, 3 dan 4.

Bab 2:

Adaptasi morfologi akar halus kakao di bawah naungan pohon langsat dalam mengeksplorasi tanah berbatu

Pada bab ini dibahas analisis pengaruh kepadatan tanah berbatu dan kepadatan pohon naungan terhadap pola distribusi akar halus dan bentuk adaptasi morfologi akar halus kakao dan pohon naungan di berbagai sistem agroforestri yang diamati.

Kami melakukan pembagian kelas diameter akar pohon kakao dan pohon naungan yang terdistribusi secara horizontal dan vertikal dan pengamatan biomasa akar halus yang berdiameter lebih kecil dari 5 mm.

Hipotesis yang diuji adalah:

1. Produksi akar halus meningkat sebagai respon atas meningkatnya persaingan di bawah tanah berbatu dalam sistem agroforestri; dan
2. Ada pemisahan sebaran akar secara vertikal antara pohon kakao dan pohon naungan.

Bab 3:

Struktur pertumbuhan pohon, kerapatan panjang akar dan produksi kakao pada sistem agroforestri, tanah berbatu: Pengaruh kerapatan pohon

Pada Bab ini, tiga sistem budidaya kakao (monokultur, agroforestri kakao muda dan agroforestri kakao tua) dibandingkan pada kerapatan pohon, karakteristik perkembangan individu pohon, produksi biji kakao dan hasil pohon non-kakao setara biji kakao. Lebih lanjut, peran sistem agroforestri mempertahankan keanekaragaman hayati dan stabilitas produksi dan pendapatan petani. Hipotesis yang akan dijawab pada bab ini adalah:

1. Peningkatan kepadatan pohon dalam sistem agroforestri menurunkan produksi kakao di atas tanah berbatu; dan
2. Diversifikasi meningkatkan produksi sistem agroforestri setara dengan sistem monokultur.

Bab 4:

Biomasa dan C-tersimpan pada sistem aroforestri berbasis kakao pada tanah berbatu

Pada bab ini akan menjawab hipotesis: "Dengan meningkatnya kapadatan pohon dari sistem monokultur ke sistem agroforestri kakao pada tanah berbatu, biomasa di atas dan di bawah tanah, serta cadangan dan penyerapan karbon meningkat".

1.7. Daftar pustaka

- Abou Rajab, Yasmin Joana Monna. 2016. 'Shade Trees in Cacao Agroforestry Systems : Influence on Roots and Net Primary Production. PhD'. 163.
- Akinnifesi, F. K., B. T. Kang, and D. O. Ladipo. 1998. 'Structural Root Form and Fine Root Distribution of Some Woody Species Evaluated for Agroforestry Systems'. *Agroforestry Systems* 42(2):121–38.
- Almeida, Alex-Alan. and R. Raul. Valle. 2007. 'Ecophysiology of the Cacao Tree'. *Braz. J. Plant Physiol* 19(4):425–48.
- De Almeida, Alex Alan F. and Raúl R. Valle. 2007. 'Ecophysiology of the Cacao Tree De Almeida, A. A. F., & Valle, R. R. (2007). Ecophysiology of the Cacao Tree. Brazilian Journal of Plant Physiology, 19(4), 425–448. [Https://Doi.Org/10.1590/S1677-04202007000400011](https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011)'. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19(4):425–48.
- Anim-Kwapong, G. J. and E. B. Frimpong. 2004. 'Vulnerability and Adaptation Assessment Under the Netherlands Climate Change Studies Assistance Programme Phase 2 (NCCSAP2)'. *Cocoa Research Institute of Ghana* 2:1–30.
- Asante, Winston Adams, Emmanuel Acheampong, Edward Kyereh, and Boateng Kyereh. 2017. 'Farmers' Perspectives on Climate Change Manifestations in Smallholder Cocoa Farms and Shifts in Cropping Systems in the Forest-Savannah Transitional Zone of Ghana'. *Land Use Policy* 66(March):374–81.
- Asare, Richard, Rebecca Ashley Asare, Winston Adams Asante, Bo Markussen, and Anders RÆbild. 2017. 'INFLUENCES of SHADING and FERTILIZATION on ON-FARM YIELDS of COCOA in GHANA'. *Experimental Agriculture* 53(3):416–31.
- Asigbaase, Michael, Sofie Sjogersten, Barry H. Lomax, and Evans Dawoe. 2019. 'Tree Diversity and Its Ecological Importance Value in Organic and Conventional Cocoa Agroforests in Ghana'. *PLoS ONE* 14(1):1–19.
- Azam-Ali, SN. 2003. 'PRODUCTION SYSTEMS AND AGRONOMY | Multicropping'. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* 978–84.
- Baligar, V. C., James A. Bunce, and Marshall Elson. 2008. 'Photosynthetic Photon Flux Density , Carbon Dioxide Concentration , and Vapor Pressure Deficit Effects on Photosynthesis in Cacao Seedlings'. *PHOTOSYNTHETICA* 46(2):216–21.
- Beer, J., R. Muschler, D. Kass, and E. Somarriba. 1998. 'Shade Management in Coffee and Cacao Plantations'. *Agroforestry Systems* 38:139–64.
- Blaser, W. J., J. Oppong, E. Yeboah, and J. Six. 2017. 'Shade Trees Have Limited Benefits for Soil Fertility in Cocoa Agroforests'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 243(October 2016):83–91.
- Carrick, Sam, David Palmer, Trevor Webb, John Scott, and Linda Lilburne. 2013. 'Stony Soils Are a Major Challenge for Nutrient Management Under Irrigation Development'. 1–8.

- Cascaredo, CA, LC Huerta, and SR Ortiz. 2021. 'FINE ROOT DENSITY ACROSS SOIL PROFILES IN TROPICAL'. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24.
- Chen, Si, Eric van der Graaff, Nanna Karkov Ytting, and Kristian Thorup-Kristensen. 2019. 'Evaluation of Deep Root Phenotyping Techniques in Tube Rhizotrons'. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B- Soil and Plant Science* 69(1):62–74.
- Cousin, Isabelle, Bernard Nicoullaud, and Caroline Coutadeur. 2003. 'Influence of Rock Fragments on the Water Retention and Water Percolation in a Calcareous Soil'. *Catena* 53(2):97–114.
- Dawoe, Evans, Winston Asante, Emmanuel Acheampong, and Paul Bosu. 2016. 'Shade Tree Diversity and Aboveground Carbon Stocks in Theobroma Cacao Agroforestry Systems: Implications for REDD+ Implementation in a West African Cacao Landscape'. *Carbon Balance and Management* 11(1):1–13.
- Daymond, AJ and P. Hadley. 2004. 'The Effects of Temperature and Light Integral on Early Vegetative Growth and Chlorophyll Fluorescence of Four Contrasting Genotypes of Cacao (*Theobroma Cacao*)'. *Annals of Applied Biology* 145(3):257–62.
- Eissenstat, D. M., C. E. Wells, R. D. Yanai, and J. L. Whitbeck. 2000. 'Building Roots in a Changing Environment: Implications for Root Longevity'. *New Phytologist* 147(1):33–42.
- Falk, Ulrike. 2004. *Turbulent Fluxes of CO₂, H₂O and Energy in the Atmospheric Boundary Layer above Tropical Vegetation Investigated by Eddy-Covariance Measurements*.
- Gateau-Rey, Lauranne, Edmund V. J. Tanner, Bruno Rapidel, Jean Philippe Marelli, and Stefan Royaert. 2018. 'Climate Change Could Threaten Cocoa Production: Effects of 2015-16 El Niño-Related Drought on Cocoa Agroforests in Bahia, Brazil'. *PLoS ONE* 13(7):1–17.
- Guo, Dali, Robert J. Mitchell, Jennifer M. Withington, Ping Ping Fan, and Joseph J. Hendricks. 2008. 'Endogenous and Exogenous Controls of Root Life Span, Mortality and Nitrogen Flux in a Longleaf Pine Forest: Root Branch Order Predominates'. *Journal of Ecology* 96(4):737–45.
- Hana, Hlaváčiková, Vilim Novák, Zdeněk Kostka, Michal Danko, and Jozef Hlavčo. 2018. 'The Influence of Stony Soil Properties on Water Dynamics Modeled by the HYDRUS Model'. *J. Hydrol. Hydromech* 66(2):181–88.
- Hauser, S. and P. Gichuru. 1994. 'Root Distribution of *Dactyladenia* (*Acioa*) Barteri and *Senna* (*Cassia*) Siamea in Alley Cropping on Ultisol. II. Impact on Water Regime and Consequences for Experimental Design'. Pp. 9–21 in *Agroforestry Systems*. Vol. 26. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Hosseini Bai, Shahla, Stephen J. Trueman, Tio Nevenimo, Godfrey Hannet, Peter Bapiwai, Mathew Poienou, and Helen M. Wallace. 2017. 'Effects of Shade-Tree Species and Spacing on Soil and Leaf Nutrient Concentrations in Cocoa Plantations at 8 Years after Establishment'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 246(June):134–43.

- Huck, Morris G. and Howard M. Taylor. 1982. *The Rhizotron as a Tool for Root Research*. Vol. 35.
- ICCO. 2020. 'World Cocoa Bean Production, Grindings and Stocks Gross. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics'. in /CCO. Vol. XLVI. Cocoa year 2019/20.
- Isaac, M. E., A. M. Gordon, N. Thevathasan, S. K. Opong, and J. Quashie-Sam. 2005. 'Temporal Changes in Soil Carbon and Nitrogen in West African Multistrata Agroforestry Systems: A Chronosequence of Pools and Fluxes'. *Agroforestry Systems* 65(1):23–31.
- Isaac, M. E., V. R. Timmer, and S. J. Quashie-Sam. 2007. 'Shade Tree Effects in an 8-Year-Old Cocoa Agroforestry System: Biomass and Nutrient Diagnosis of Theobroma Cacao by Vector Analysis'. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78(2):155–65.
- Jiang, Xiao Jin, Chunfeng Chen, Xiai Zhu, Sissou Zakari, Ashutosh Kumar Singh, Wanjun Zhang, Huanhuan Zeng, Zi Qiang Yuan, Chenggang He, Shuiqiang Yu, and Wenjie Liu. 2019. 'Use of Dye Infiltration Experiments and HYDRUS-3D to Interpret Preferential Flow in Soil in a Rubber-Based Agroforestry Systems in Xishuangbanna, China'. *Catena* 178(March):120–31.
- Jiang, Xiao Jin, Wenjie Liu, Chunfeng Chen, Jiaqing Liu, Zi Qiang Yuan, Baocheng Jin, and Xiayang Yu. 2018. 'Effects of Three Morphometric Features of Roots on Soil Water Flow Behavior in Three Sites in China'. *Geoderma* 320(October 2017):161–71.
- Kohler, Michael, Diego Dierick, Luitgard Schwendenmann, and Dirk HOlscher. 2010. 'Water Use Characteristics of Cacao and Gliricidia Trees in an Agroforest in Central Sulawesi, Indonesia'. *Ecohydrology* 3(November 2010):238–45.
- Kormanek, Mariusz, Tomasz Głab, Jacek Banach, and Grzegorz Szewczyk. 2015. 'Effects of Soil Bulk Density on Sessile Oak Quercus Petraea Liebl. Seedlings'. *European Journal of Forest Research* 134(6):969–79.
- Kumar, B. Mohan and P. K. Ramachandran Nair. 2011. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems, Advances in Agroforestry 8*. Vol. 8. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Kummerow, J., M. Kummerow, and W. Souza da Silva. 1982. 'Fine-Root Growth Dynamics in Cacao (*Theobroma Cacao*)'. *Plant and Soil* 65(2):193–201.
- Läderach, P., A. Martinez-Valle, G. Schroth, and N. Castro. 2013. 'Predicting the Future Climatic Suitability for Cocoa Farming of the World's Leading Producer Countries, Ghana and Côte d'Ivoire'. *Climatic Change* 119(3–4):841–54.
- Lahive, Fiona, Paul Hadley, and Andrew J. Daymond. 2019. 'The Physiological Responses of Cacao to the Environment and the Implications for Climate Change Resilience. A Review'. *Agronomy for Sustainable Development* 39(5):1–22.
- Lawal, Justina Oluyemisi and Bolarin Titus Omonona. 2014. 'The Effects of Rainfall and Other Weather Parameters on Cocoa Production in Nigeria'. *Comunicata Scientiae* 5(4):518–23.

- Liu, Bo, Junxia He, Fanjiang Zeng, Jiaqiang Lei, and Stefan K. Arndt. 2016. 'Life Span and Structure of Ephemeral Root Modules of Different Functional Groups from a Desert System'. *New Phytologist* 211(1):103–12.
- McCormack, M. Luke, Ian A. Dickie, David M. Eissenstat, Timothy J. Fahey, Christopher W. Fernandez, Dali Guo, Heljä-Sisko Helmisaari, Erik A. Hobbie, Colleen M. Iversen, Robert B. Jackson, Jaana Leppälammi-Kujansuu, Richard J. Norby, Richard P. Phillips, Kurt S. Pregitzer, Seth G. Pritchard, Boris Rewald, and Marcin Zadworny. 2015. 'Redefining Fine Roots Improves Understanding of Below-Ground Contributions to Terrestrial Biosphere Processes'. *New Phytologist* 207(3):505–18.
- Monroe, Paulo Henrique Marques, Emanuela Forestieri Gama-Rodrigues, Antonio Carlos Gama-Rodrigues, and José Raimundo Bonadie Marques. 2016. 'Soil Carbon Stocks and Origin under Different Cacao Agroforestry Systems in Southern Bahia, Brazil'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 221:99–108.
- Morandage, Shehan, Jan Vanderborght, Mirjam Zörner, Gaochao Cai, Daniel Leitner, Harry Vereecken, and Andrea Schnepf. 2021. 'Root Architecture Development in Stony Soils'. *Vadose Zone Journal* 20(4):1–17.
- Moser, G., C. Leuschner, D. Hertel, D. Hölscher, M. Köhler, D. Leitner, B. Michalzik, E. Prihastanti, S. Tjitrosemito, and L. Schwendenmann. 2010. 'Response of Cocoa Trees (*Theobroma Cacao*) to a 13-Month Desiccation Period in Sulawesi, Indonesia'. *Agroforestry Systems* 79(2):171–87.
- Motamayor, J. C., A. M. Risterucci, P. A. Lopez, C. F. Ortiz, A. Moreno, and C. Lanaud. 2002. 'Cacao Domestication I: The Origin of the Cacao Cultivated by the Mayas'. *Heredity* 89(5):380–86.
- Muñoz, F. and J. Beer. 2001. 'Fine Root Dynamics of Shaded Cacao Plantations in Costa Rica'. *Agroforestry Systems* 51(2):119–30.
- Niether, Wiebke, Ulf Schneidewind, Michael Fuchs, Monika Schneider, and Laura Armengot. 2019. 'Below- and Aboveground Production in Cocoa Monocultures and Agroforestry Systems'. *Science of the Total Environment* 657:558–67.
- Nikiforoff, CC. 1984. 'Stony Soil and Their Classification'. Pp. 347–63 in.
- Noordwijk, M. Van, G. Lawson, K. Hairiah, and J Wilson. 2015. 'Root Distribution of Trees and Crops : Competition and / or Complementarity'. Pp. 221–57 in *Tree-crop interactions: agroforestry in a changing climate*. 2nd ed. Wallingford, UK, CAB International, edited by C. K. Ong, C. R. Black, and Julia Wilson. Wallingford: NERC.
- Notaro, Krystal de Alcantara, Erika Valente de Medeiros, Gustavo Pereira Duda, Aline Oliveira Silva, and Patrícia Maia de Moura. 2014. 'Agroforestry Systems, Nutrients in Litter and Microbial Activity in Soils Cultivated with Coffee at High Altitude'. *Scientia Agricola* 71(2):87–95.
- Nygren, Pekka, Humberto A. Leblanc, Miaoer Lu, and Cristina A. Gómez Luciano. 2013. 'Distribution of Coarse and Fine Roots of *Theobroma Cacao* and Shade Tree *Inga Edulis* in a Cocoa Plantation'. *Annals of Forest Science* 70(3):229–39.

- Paulitz, Timothy C. 2002. 'Fine Roots of Trees – a New Perspective'. *New Phytologist* 154:267–73.
- Persson, Hans Å. 1983. 'The Distribution and Productivity of Fine Roots in Boreal Forests'. *Plant and Soil* 71(1–3):87–101.
- Poesen, J. and H. Lavee. 1994. 'Rock Fragments in Top Soils: Significance and Processes'. *Catena* 23(1–2):1–28.
- Pregitzer, Kurt S., Jared L. DeForest, Andrew J. Burton, Michael F. Allen, Roger W. Ruess, and Ronald L. Hendrick. 2002. 'Fine Root Architecture of Nine North American Trees'. *Ecological Monographs* 72(2):293–309.
- Radersma, Simone and Chin K. Ong. 2004. 'Spatial Distribution of Root Length Density and Soil Water of Linear Agroforestry Systems in Sub-Humid Kenya: Implications for Agroforestry Models'. *Forest Ecology and Management* 188(1–3):77–89.
- Rajab, Yasmin Abou, Christoph Leuschner, Henry Barus, Aiyan Tjoa, and Dietrich Hertel. 2016. 'Cacao Cultivation under Diverse Shade Tree Cover Allows High Carbon Storage and Sequestration without Yield Losses'. *PLoS ONE* 11(2):1–22.
- Ramos, Helen Monique Nascimento, Steel Silva Vasconcelos, Osvaldo Ryohei Kato, and Débora Cristina Castellani. 2018. 'Above- and Belowground Carbon Stocks of Two Organic, Agroforestry-Based Oil Palm Production Systems in Eastern Amazonia'. *Agroforestry Systems* 92(2):221–37.
- Rigal, Clément, Jianchu Xu, and Philippe Vaast. 2019. 'Young Shade Trees Improve Soil Quality in Intensively Managed Coffee Systems Recently Converted to Agroforestry in Yunnan Province, China'. *Plant and Soil* (Uep 2007).
- Ronald, Pamela. 2011. 'Plant Genetics, Sustainable Agriculture and Global Food Security'. *Genetics* 188(1):11–20.
- Ruf, François Olivier. 2011. 'The Myth of Complex Cocoa Agroforests: The Case of Ghana'. *Human Ecology* 39(3):373–88.
- Schneider, M., C. Andres, G. Trujillo, F. Alcon, P. Amurrio, E. Perez, F. Weibel, and J. Milz. 2017. 'COCOA and TOTAL SYSTEM YIELDS of ORGANIC and CONVENTIONAL AGROFORESTRY VS. MONOCULTURE SYSTEMS in A LONG-TERM FIELD TRIAL in BOLIVIA'. *Experimental Agriculture* 53(3):351–74.
- Schroth, Götz, Arzhvaël Jeusset, Andrea da Silva Gomes, Ciro Tavares Florence, Núbia Aparecida Pinto Coelho, Deborah Faria, and Peter Läderach. 2016. 'Climate Friendliness of Cocoa Agroforests Is Compatible with Productivity Increase'. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21(1):67–80.
- Schroth, Götz, Peter Läderach, Armando Isaac Martinez-Valle, Christian Bunn, and Laurence Jassogne. 2016. 'Vulnerability to Climate Change of Cocoa in West Africa: Patterns, Opportunities and Limits to Adaptation'. *Science of the Total Environment* 556:231–41.
- Schwendenmann, Luitgard, Edzo Veldkamp, Gerald Moser, Dirk Hölscher, Michael

- Köhler, Yann Clough, Iswandi Anas, Gunawan Djajakirana, Stefan Erasmi, Dietrich Hertel, Daniela Leitner, Christoph Leuschner, Beate Michalzik, Pavel Propastin, Aiyen Tjoa, Teja Tscharntke, and Oliver van Straaten. 2010. 'Effects of an Experimental Drought on the Functioning of a Cacao Agroforestry System, Sulawesi, Indonesia'. *Global Change Biology* 16(5):1515–30.
- Seneviratne, H. T. J., V. D. W. Sumanasekara, and Dmmr Dissanayake. 2015. 'Role of Agroforestry in Achieving Food and Nutritional Security , Climate Change Mitigation and Environmental Resilience : A Review'. *NBRO Symposium 2015 'Innovation for Resilient Environment'*.
- Somarriba, E., CA Harvey, M. Samper, F. Anthony, J. Gonzalez, C. Staver, and RA Rice. 2004. 'Biodiversity Conservation in Neotropical Coffee'. Pp. 198–226 in *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Lanscap*, edited by G. Schroth, G. da Fonseca, C. Harvey, C. Gascon, H. Vasconcelos, and A. Izac. ISLAND PRESS.
- Tomich, Thomas P., Hubert de Foresta, Rona Dennis, Quirine Ketterings, Daniel Murdiyarno, Cheryl Palm, Fred Stolle, Suyanto, and Meine van Noordwijk. 2002. 'Carbon Offsets for Conservation and Development in Indonesia?' *American Journal of Alternative Agriculture* 17(3):125–37.
- Tondoh, Jérôme Ebagnérin, François N. guessa. Kouamé, Arnauth Martinez Guéi, Blandine Sey, Armand Wowo Koné, and Noël Gnessougou. 2015. 'Ecological Changes Induced by Full-Sun Cocoa Farming in Côte d'Ivoire'. *Global Ecology and Conservation* 3:575–95.
- Vaast, Philippe and Eduardo Somarriba. 2014. 'Trade-Offs between Crop Intensification and Ecosystem Services: The Role of Agroforestry in Cocoa Cultivation'. *Agroforestry Systems* 88(6):947–56.
- Varma, Ajit and Applied Concepts. 2014. *Root Engineering*. Vol. 40.
- Wang, B. J., W. Zhang, P. Ahanbieke, Y. W. Gan, W. L. Xu, L. H. Li, P. Christie, and L. Li. 2014. 'Interspecific Interactions Alter Root Length Density, Root Diameter and Specific Root Length in Jujube/Wheat Agroforestry Systems'. *Agroforestry Systems* 88(5):835–50.
- Wartenberg, Ariani C., Wilma J. Blaser, Andreas Gattinger, James M. Roshetko, Meine Van Noordwijk, and Johan Six. 2017. 'Does Shade Tree Diversity Increase Soil Fertility in Cocoa Plantations?' *Agriculture, Ecosystems and Environment* 248(March):190–99.
- Wartenberg, Ariani C., Wilma J. Blaser, James M. Roshetko, Meine Van Noordwijk, and Johan Six. 2019. 'Soil Fertility and Theobroma Cacao Growth and Productivity under Commonly Intercropped Shade-Tree Species in Sulawesi, Indonesia'. *Plant and Soil*.
- Wickramasuriya, Anushka M. and Jim M. Dunwell. 2018. 'Cacao Biotechnology : Current Status and Future Prospects'. *Plant Biotechnology* 16:4–17.

BAB II

ADAPTASI MORFOLOGI AKAR HALUS KAKAO DI BAWAH NAUNGAN POHON LANGSAT DALAM MENGEKSPLORASI TANAH BERBATU

2.1 Abstrak:

Sistem agroforestri berbasis kakao (*Theobroma cocoa L.*) menggunakan pohon langsat (*Lansium domesticum*) sebagai naungan telah lama diperlakukan oleh petani di Sulawesi (Indonesia), yang berpotensi menciptakan persaingan di bawah tanah. Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh sifat fisik tanah berbatu (*stony soil*) terhadap sifat morfologi akar halus kakao dan langsat serta persaingan antara keduanya. Sampel tanah diambil dari tiga sistem budidaya kakao: kakao monocultur (Mono); kakao agroforestri muda (YCAF) dan kakao agroforestri tua (OCAF). Pengamatan distribusi akar secara horizontan pada tiga jarak dari pangkal batang kakao (0.4, 1.2 dan 1.7 m), dan secara vertikal masing-masing; 0-10, 10-20, 20-30 dan 30-40 cm. Akar halus dipisahkan dalam lima kelas orde berdasarkan diameter (< 0.25; 0.25 – 0.50; 0.50- 1.0; 1-2 dan 2-5 mm). Hasil kami KPA kakao dari orde 1 tertinggi di sistem Mono sebesar 88 cm dm⁻³ menurun di sistem OCAF sebesar 79 cm dm⁻³ dan terendah di sistem YCAF (49 cm dm⁻³), sementara itu, KPA langsat dicatat adalah 42 dan 70 cm dm⁻³ masing-masing untuk sistem YCAF dan OCAF dari akar orde 4 meskipun secara umum perbedaannya tidak signifikan. Kedalaman lapisan tanah, volume batu dan kerapatan isi tanah berdampak negatif terhadap kadar air tanah sehingga menghambat perkembangan akar. Tidak terdapat segregasi antara akar kakao dengan akar langsat pada kedua sistem agroforestri, sehingga akar dari kedua spesies tersebut mengeksplorasi lapisan tanah yang sama, berpotensi menciptakan persaingan dalam menyerap air dan hara. Namun persaingan tersebut dapat diartikan lain, sebagai peningkatan efisiensi pemanfaatan sumber daya yang berpeluang meningkatkan produktivitas sistem agroforestri kakao.

Kata kunci: Tanah berbatu; kerapatan panjang akar; persaingan akar.

2.2 Pendahuluan

Petani di Sulawesi Barat, Indonesia, telah membudidayakan kakao pola agroferstri di lahan miring dengan pohon buah-buahan sebagai naungan. Langsat merupakan pohon dominan yang tumbuh di barisan pohon kakao, memberikan jasa lingkungan yang cocok untuk tanaman strata bawah. Naungan berfungsi menyaring cahaya berlebih, menurunkan suhu udara, menyumbangkan serasah

organik, dan menambah sumber pendapatan petani dalam sistem agroforestri (Tscharntke *et al.*, 2011; Cardinael *et al.*, 2017) sehingga tanah yang didominasi fraksi batu menjadi lebih produktif. Masih terdapat kesenjangan pengetahuan mengenai dampak kehadiran fragmen batuan dalam tanah berbatu terhadap perkembangan akar kakao dan pohon naungan di sistem agroforestri kakao.

Tanah berbatu didefinisikan sebagai campuran fragmen tanah dengan frakmen kasar (Hana *et al.*, 2018). Fraksi tanah merupakan partikel mineral kecil di bawah 2 mm, sedangkan fragmen batuan adalah partikel mineral yang lebih besar dari 2 mm (Cools dan De Vos 2013). Komposisi batu yang tinggi berdampak pada sifat-sifat tanah seperti meningkatnya diameter dan kerapatan pori makro tanah, meningkatnya kerapatan isi (Meng *et al.*, 2018), menyebabkan kemampuan tanah menyimpan air lebih rendah dan tingkat permeabilitas sedang sampai cepat (Carrick *et al.*, 2013). Jumlah air yang hilang dapat mencapai 23% (Hana *et al.*, 2018, mengalir ke lapisan tanah yang lebih dalam, mengangkut unsur hara melalui pencucian unsur hara (Carrick *et al.*, 2013). Selain itu, kerapatan isi tanah berbatu yang lebih tinggi dibandingkan tanah pertanian lainnya menjadi penghambat perkembangan akar melalui fraksi lapisan tanah di bagian bawah (Cascaredo *et al.*, 2021; Kormanek *et al.*, 2015).

Akar berperan dalam mengatur kemampuan tanaman menyerap air dan unsur hara, serta sebagai parameter banyaknya bahan organik yang ditransfer oleh tanaman ke dalam tanah (Makkonen dan Helmisaari 1999; An dan Osawa 2021). Kandungan batu dalam tanah berbatu menciptakan hambatan terhadap pertumbuhan akar yang menjelajahi lapisan tanah yang lebih dalam (Morandage *et al.*, 2021), distribusi akar halus terbatas pada kedalaman 40 cm di tanah berbatu (Hana *et al.*, 2018), membatasi akses tanaman ke air dan hara, dan menyebabkan penurunan pertumbuhan dan pengurangan produksi hasil tanaman (Valentine *et al.*, 2012; Morandage *et al.*, 2021). Ketahanan penetrasi tanah adalah salah satu faktor terpenting (Kirby dan Bengough, 2002) yang menentukan kemampuan akar untuk mengatasi ketahanan tanah terhadap eksistensi akar. Akar dapat menunjukkan karakteristik dan perubahan yang berbeda dengan morfologi aslinya, dalam merespon kekuatan dan pemadatan tanah (Correa *et al.*, 2019). Tingkat perpanjangan akar menurun dengan meningkatnya kepadatan tanah (Houlbrooke *et al.*, 1997; Tracy *et al.*, 2012), dan kerapatan panjang akar (KPA) berkurang dengan meningkatnya resistensi penetrasi (Pardo *et al.*, 2000).

Tanaman merespon kondisi lingkungan tanah yang tidak menguntungkan dengan memodifikasi perkembangan akar (Potocka dan Szymanowska 2018). Informasi mengenai dampak keberadaan fraksi batuan yang memengaruhi kerapatan isi tanah dan respon morfologi akar halus kakao terhadap sifat fisik tanah berbatu masih terbatas. Urutan akar halus berdasarkan diameter memberikan informasi mengenai kemampuan tanaman dalam merespon perubahan lingkungan fisik di sekitarnya berupa kerapatan isi tanah, ketersediaan air, dan unsur lingkungan tanah lainnya (Upadhyaya *et al.*, 2005). Variasi diameter akar halus memiliki fungsi dan peran yang berbeda-beda (Wang *et al.*, 2021), peningkatan kerapatan isi menyebabkan penurunan diameter akar halus hingga 0,2 mm, dimana akar halus pada kisaran diameter tersebut berperan sebagai akar penyerap yang menyerap unsur hara dan air dari dalam tanah (Kormanek *et al.*, 2015).

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh sifat fisik tanah berbatu (stony soil) terhadap sifat morfologi akar halus kakao dan langsat serta persaingan antara keduanya. Hasil penelitian ini membantu memahami adaptasi spesifik akar halus kakao di lingkungan tanah berbatu di sistem agroforestri. Penelitian ini menguji hipotesis sebagai berikut: (1) produksi akar halus meningkat sebagai respon atas meningkatnya persaingan di bawah tanah berbatu dalam sistem agroforestri; dan (2) ada pemisahan sebaran akar secara vertikal antara pohon kakao dan pohon naungan.

2.3 Metode penelitian

2.3.1 Lokasi penelitian

Lokasi pengambilan sampel adalah perkebunan kakao di Kecamatan Binuang, Kabupaten Polewali Mandar, Sulawesi Barat. Lokasi tersebut tersebar antara kordinat $03^{\circ} 25' 30''$ S dan $119^{\circ} 23' 09''$ W sampai $03^{\circ} 25' 54''$ S dan $119^{\circ} 22' 59''$ W (Gambar 2.1), berada pada ketinggian antara 100 sampai 350 m di atas permukaan lau (dpl). Tanaman kakao ditanam dalam sistem monokultur dan sistem agroforestri di bawah pohon langsat yang mayoritas ditemui di lokasi penelitian berfungsi sebagai naungan dan beberapa pohon dalam jumlah yang sedikit seperti rambutan, durian dan aren.

2.3.2 Desain Penelitian

Penelitian ini didesain berdasarkan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan membandingkan tiga sistem budidaya kakao yang terdiri dari: Monokultur kakao (Mono); Agroforestri kakao muda (YCAF); dan Agroforestri kakao tua (OCAF). Masing-masing sistem budidaya diulang sebanyak empat kali sehingga terdapat 12 unit perlakuan.

2.3.3 Prosedur pengamatan

Pengukuran kerapatan isi tanah berbatu. Aktivitas pengambilan sampel dilakukan di dalam plot percobaan berukuran 20 m x 20 m. Plot ini merupakan lokasi pengambilan sampel tanah dan akar yang dibahas di Bab ini, dan pengamatan lain yang akan dibahas pada bab-bab selanjutnya.

Kerapatan isi tanah berbatu dapat dinyatakan sebagai jumlah massa jenis fragmen tanah dan fragmen batu (Novák dan Hlaváciková 2019), sedangkan kerapatan isi tanah adalah kerapatan isi fraksi tanah dalam tanah berbatu tanpa mengikutsertakan fraksi batu (Mehler *et al.*, 2014). Pengukuran dilakukan di lapangan dan di laboratorium *soil science*, Universitas Hasanuddin. Kerapatan isi tanah berbatu diukur dengan menggunakan contoh tanah berukuran 20 cm x 20 cm x 20 cm. Sampel tanah digali secara hati-hati untuk meminimalkan pemedatan.



Gambar 2.1.(a) Pengambilan sampel tanah berukuran 20 cm x 20 cm x 20 cm untuk mengukur kerapatan isi tanah berbatu; (b) kandungan batu dalam tanah berbatu; (c dan d) pengukuran volume batu setelah dipisahkan dengan fraksi tanah

Sampel tanah berbatu ditimbang untuk menghitung berat basah sampel. Setelah itu, fragmen batu dan tanah dipisahkan dengan cara disaring menggunakan saringan berdiameter 5 mm (Gambar 2.1b). Fraksi tanah yang lolos dari saringan 5 mm masih mengandung batu yang berukuran antara >2 mm sampai 5 mm (2-5 mm), maka sisa batu dalam campuran tanah dilakukan menggunakan sub-sampel. Sub-sampel diambil 20% dari total berat tanah, jumlah yang sama untuk sub-sampel batu berukuran >5 mm yang diambil sedemikian rupa sehingga mewakili seluruh ukuran batu. Berat kering tanah dan batu ditentukan setelah diovenkan pada suhu 105°C selama 48 jam (Gusli *et al.*, 2020) (prosedur yang sama dilakukan untuk mengukur berat kering batu >5 mm). Setelah mendapatkan berat kering tanah, sub-sampel tanah yang sama direndam selama 30 menit kemudian disaring menggunakan saringan berukuran 2 mm. Batu kerikil berukuran 2-5 mm dikeringkan kembali selama 48 jam pada suhu 105°C, selanjutnya berat batu kerikil 2-5 mm ditimbang untuk mendapatkan berat kering. Hasil berat kering batu kerikil 2-5 mm digunakan sebagai faktor koreksi berat kering sub-sampel tanah. Berat kering sub-sampel tanah adalah berat kering sub-

sampel yang lolos saringan 5 m dikurangi dengan berat kering kerikil berukuran 2-5 mm, sedangkan berat kering total batu adalah hasil penjumlahan berat kering batu ukuran 2-5 mm dengan berat kering batu ukuran >5 mm.

Volume batu berukuran >5 mm diukur di lapangan dengan cara memasukkan seluruh batu ke dalam gelas ukur yang berisi air (Gambar 2.1c). Volume batu adalah selisih antara tinggi permukaan air dalam gelas ukur sebelum dan setelah batu dimasukkan dalam gelas ukur. Prosedur yang sama dilakukan dalam menghitung volume batu kerikil berukuran >2 mm (Gambar 2.1d). Pengukuran volume total tanah (V_{Th}) mengikuti Novák dan Hlaváčiková (2019) (persamaan 2.1):

$$V_{Th} = V_T - V_B \quad (2.1)$$

Dimana, V_T adalah volume total tanah berbatu (volume tanah + batu) dan V_B adalah volume Batu.

Rock volume (Rv) dalam tanah berbatu merupakan karakteristik fisik penting dari tanah berbatu (*stoniness*), merupakan rasio fraksi batu terhadap volume total tanah berbatu, dinyatakan dalam satuan volumetrik Rv ($L^3 L^{-3}$). Rv dihitung menggunakan persamaan yang ditawarkan oleh Poesen dan Lavee (1994) (persamaan 2.2):

$$Rv = Rm \frac{\rho_b^T}{\rho_b^{Th}} \quad (2.2)$$

Dimana, Rm adalah *rock mass* atau rasio massa batu adalah rasio berat kering fraksi batu (m_d^B) dengan berat kering total tanah berbatu (m_d^T) mengikuti Ravina dan Magier (1984) (Persamaan 2.3):

$$Rm = \frac{m_d^B}{m_d^T} \quad (2.3)$$

Selanjutnya, kerapatan isi total tanah berbatu (ρ_b^T) ($g cm^{-3}$) dihitung menggunakan (Novák dan Hlaváčiková 2019) (Persamaan 2.4):

$$\rho_b^T = (1 - R_v) \rho_b^{Th} + R_v \rho_b^{Bx} \quad (2.4)$$

Dimana, ρ_b^{Th} adalah kerapatan isi tanah ($g cm^{-3}$), dan ρ_b^{Bx} adalah kerapatan isi batu hasil perhitungan ($g cm^{-3}$). Kerapatan isi tanah dihitung menggunakan persamaan yang ditawarkan oleh Mehler *et al.*, (2014) (Persamaan 2.5):

$$\rho_b^{Th} = \frac{m_d^{Th}}{V_{Th}} = \frac{\rho_b^{Br} (m_d^T - m_d^B)}{\rho_b^{Br} V_T - m_d^B} \quad (2.5)$$

Dimana, massa kering tanah (m_d^{Th}), massa kering total tanah berbatu (m_d^T), massa fraksi batu (m_d^B), volume tanah (V_{Th}), volume total tanah berbatu (V_T), kerapatan isi batu referensi (ρ_b^{Br}) yang ditetapkan pada 2,70 g cm⁻³.

2.3.4 Pengambilan sampel tanah untuk pengamatan akar halus

Sampel tanah untuk mengekstrak akar halus dieskavasi dari tiga sistem penggunaan lahan, masing-masing empat ulangan, di bawah dua pohon kakao per ulangan, tiga tingkat jarak dari pangkal batang kakao (0,4; 1,2; dan 1,7 m). Menggunakan ring sampel khusus berdiameter 70 mm, kami mengumpulkan sampel tanah pada kedalaman 0-10, 10-20, 20-30 dan 30-40 cm (Gambar 2.2)



Gambar 2.2. Penggalian sampel tanah untuk akar halus pada jarak 0,4, 1,2 dan 1,7 m dari pangkal pohon kakao, di kedalaman 0-10, 10-20, 20-30 dan 30-40 cm

Sampel tanah dari-masing-masing kedalaman lapisan tanah direndam dalam ember selama 2 jam dengan air untuk membantu memisahkan tanah dan memudahkan pemisahan akar. Setelah tanah dalam rendaman melunak, diaduk dan dituang melalui ayakan 0.1 mm, sambal disiram dengan air mengalir. Akar dan serpihan organik yang masih tersisa dikemas dalam plastik. Akar dipisahkan dari

sisa-sisa organik menggunakan forsep dan disortir berdasarkan warna, dan kelenturan, akar yang mati dengan tingkat kelenturan rendah atau mudah patah dihilangkan). Akar halus ditebarkan di atas kertas milimeter untuk dipindai menggunakan kamera *Canon EOS tipe M₃*. Panjang dan diameter akar halus diukur dari foto digital yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak Image-J. Selanjutnya, pembagian panjang akar halus menjadi lima kelas diameter dengan sedikit memodifikasi metode yang digunakan oleh Han *et al.* (2016). Akar halus orde 5 (diameter 2-5 mm), orde 4 (diameter 1-2 mm), orde 3 (diameter 0,5-1 mm, orde 2 (diameter 0,25-0,5 mm) dan orde 1 (diameter <0,25 mm). Kerapatan panjang akar (KPA), dari masing-masing orde dihitung menggunakan persamaan 2.6:

$$KPA = \frac{\text{panjang akar cm}}{\text{volume tanah cm}^{-3}} \quad (2.6)$$

Dimana, volume tanah yang digunakan adalah 385 cm³ setara dengan volume tabung berdiameter 70 mm dan tinggi 10 cm. Dalam penelitian ini, data KPA dikonversi dalam cm dm⁻³.

2.3.5 Analisis Statistik

Semua data panjang akar halus ditransformasikan ke dalam transformasi akar kuadrat, sedangkan data tanah menggunakan transformasi dari Box-Cox (Box dan Cox, 1964) sehingga data yang diperoleh memenuhi unsur normalitas data normal. Analisis varians dari rumus rancangan acak kelompok diterapkan untuk analisis akar dan tanah menggunakan software SPSS 24. Uji lanjut yang diterapkan jika hasil analisis sidik ragam menunjukkan indikasi perbedaan nyata yang ditunjukkan dengan nilai F hitung lebih tinggi dari nilai F tabel atau nilai signifikansinya lebih kecil dari 0.05. Uji lanjut yang digunakan adalah uji beda nyata jujur (BNJ).

2.5 Hasil

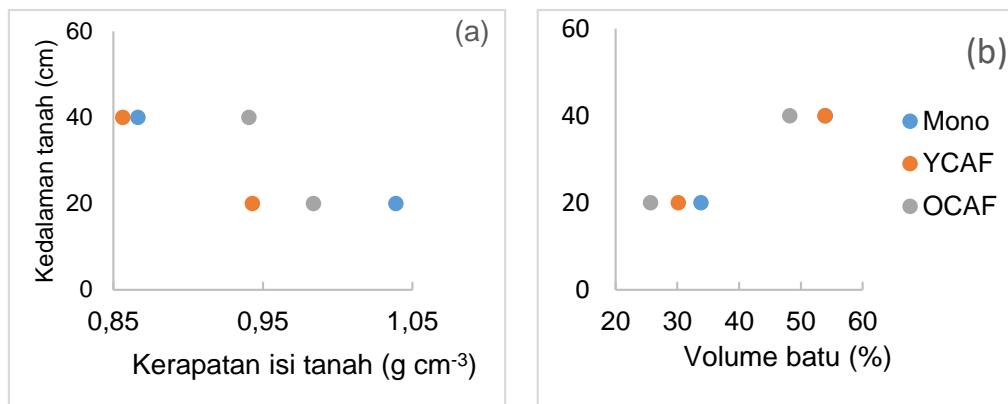
2.5.1 Sifat fisik dan kimia tanah berbatu

Hasil analisis ragam kerapatan isi tanah (fraksi tanah dalam tanah berbatu) (Lampiran 2.1b-c) dan persentase volume batu antara tiga sistem budidaya kakao tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada kedalaman 0-20 cm maupun kedalaman 20-40 cm lapisan tanah (Lampiran 2.2b-c). Volume batu pada 0-20 cm berada pada kisaran 26-34%, sedangkan pada kedalaman 20-40 cm berkisar antara 39- 50% (Tabel 2.1). Kerapatan isi tanah pada lapisan atas berada pada kisaran $0.94 - 1.04 \text{ g cm}^{-3}$ dan menurun pada lapisan tanah bagian bawah pada kisaran $0.86 - 0.94 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabel 2.1). Kerapatan isi tanah menurun dengan bertambahnya kedalaman tanah (Gambar 2.3a), sedangkan persentase volume batu meningkat dengan bertambahnya kedalaman lapisan tanah (Gambar 2.3b).

Tabel 2.1. Rasio volume batu (VB), kerapatan isi (ρ) tanah dan kerapatan isi batu pada tiga sistem budidaya di Kecamatan Binuang. Mono (kakao monokultur); YCAF (agroforestri kakao berumur muda); OCAF: agroforestri kakao berumur tua.

Parameter pengamatan	Kedalaman	Sistem budidaya kakao			Nilai F Anova
		Mono	YCAF	OCAF	
Rasio volume batu (%)	0-20	34	30	26	0.31 ns
	20-40	54	54	48	0.85 ns
ρ tanah (g cm^{-3})	0-20	1.04	0.94	0.98	4.73 ns
	20-40	0.87	0.86	0.94	1.53 ns
ρ batu (g cm^{-3})	0-20	2.6	2.41	2.55	0.51 ns
	20-40	2.35	2.34	2.59	2.55 ns

a,b,c: pada baris menunjukkan indikasi perbedaan yang signifikan menurut uji BNJ (Beda nyata jujur)



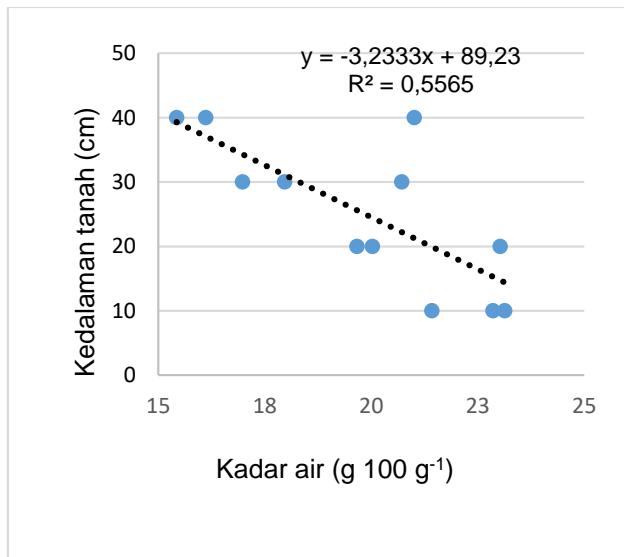
Gambar 2.3. Hubungan kedalaman tanah dengan; (a) kerapatan isi tanah; (b) persentase volume tanah.

Hasil analisis ragam kadar air tanah disajikan pada Lampiran 2.3.b-e. Hasil analisis sidik ragam menunjukkan perbedaan yang tidak nyata antara tiga sistem budidaya kakao pada semua lapisan tanah kecuali lapisan 30-40 cm. Kadar air secara signifikan lebih tinggi pada sistem Mono dibanding dua sistem agroforestri kakao yang dicatat pada lapisan 30-40 cm (Tabel 2.2).

Tabel 2.2. Kadar air dengan empat tingkat kedalaman tanah di tiga sistem budidaya kakao di Kecamatan Binuang. Mono: kakao dalam monokultur, YCAF: kakao agroforestri berumur muda, OCAF: kakao agroforestri berumur tua

Kedalaman (cm)	Kadar air ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$)			Nilai F Anova
	Mono	YCAF	OCAF	
0-10	22.9	21.4	23.1	0.36 ^{ns}
10-20	23.0	19.7	20.0	2.04 ^{ns}
20-30	20.7	17.0	18.0	2.44 ^{ns}
30-40	21.0 ^a	16.1 ^b	15.4 ^b	8.14*

a,b: huruf kecil yang berbeda pada kolom menunjukkan indikasi perbedaan secara signifikan (uji BNJ, $p < 0.05$)



Gambar 2.4. Hubungan kedalaman dengan kadar air tanah berbatu

Hasil analisis ragam kadar hara tanah yang terdiri dari; pH, C-org tanah, kadar N-tanah, rasio C/N dan P₂O₅ disajikan pada Lampiran 2.4 - 2.7. Dari seluruh hasil analisis ragam yang dilakukan pada parameter kimia tanah, hanya C-org tanah pada lapisan 0-10 dan 10-20 (Lampiran 2.4b dan 2.5b) dan kadar P₂O₅ pada lapisan 0-10 dan 10-20 cm (Lampiran 2.4e dan 2.5e) yang menunjukkan perbedaan yang nyata antara tiga sistem budidaya kakao. Konsentrasi C-org tertinggi dicatat di sistem YCAF sebesar 2.32%, secara signifikan lebih tinggi dibanding sistem OCAF (1.66%), namun tidak berbeda dengan sistem Mono (1.80%) di lapisan tanah 0-10 cm, hal yang sedikit berbeda di catat pada lapisan tanah 10-20 cm, dimana konsentrasi C-org tanah tertinggi pada sistem YCAF lebih tinggi secara signifikan dibanding sistem Mono, namun tidak signifikan dibanding sistem OCAF (Tabel 2.3).

Table 2.3. Sifat kimia tanah di lokasi penelitian dikelompokkan ke dalam tiga sistem budidaya di Kecamatan Binuang. Kakao-mono: kakao dalam monokultur, YCAF: kakao agroforestri berumur muda, OCAF: kakao agroforestri berumur tua

Parameter	Kedalaman	MONO	YCAF	OCAF	Nilai F Anova
pH H ₂ O (1;2.5)		6.26	6.31	6.4	
C-org (%)		1.80 ^{ab}	2.32 ^a	1.66 ^b	7.86 *
N total (%)	0-10	0.15	0.2	0.15	3.42 ns
C/N		11.87	11.63	11.68	0.03 ns
P ₂ O ₅ (g100g ⁻¹)		21.29 ^{ab}	22.4 ^a	15.74 ^b	7.86 *
pH H ₂ O (1;2.5)		5.86	5.97	5.84	
C-org (%)		1.41 ^b	2.05 ^a	1.45 ^{ab}	5.31 *
N total (%)	10-20	0.13	0.18	0.14	1.22 ns
C/N		10.67	12.59	10.87	0.92 ns
P ₂ O ₅ (g100g ⁻¹)		18.25 ^a	20.25 ^a	14.07 ^b	11.03 *
pH H ₂ O (1;2.5)		5.89	6.15	6.45	
C-org (%)		2.07	2.1	1.85	0.30 ns
N total (%)	20-30	0.18	0.16	0.14	2.09 ns
C/N		11.78	13.28	12.93	0.42 ns
P ₂ O ₅ (g100g ⁻¹)		18.67	19.3	16.95	0.33 ns
pH H ₂ O (1;2.5)		5.93	6.05	6.23	
C-org (%)		1.72	1.98	1.55	0.51 ns
N total (%)	30-40	0.15	0.16	0.13	2.11 ns
C/N		12.47	11.85	12.91	0.25 ns
P ₂ O ₅ (g100g ⁻¹)		20.63	18.42	16.03	1.14 ns

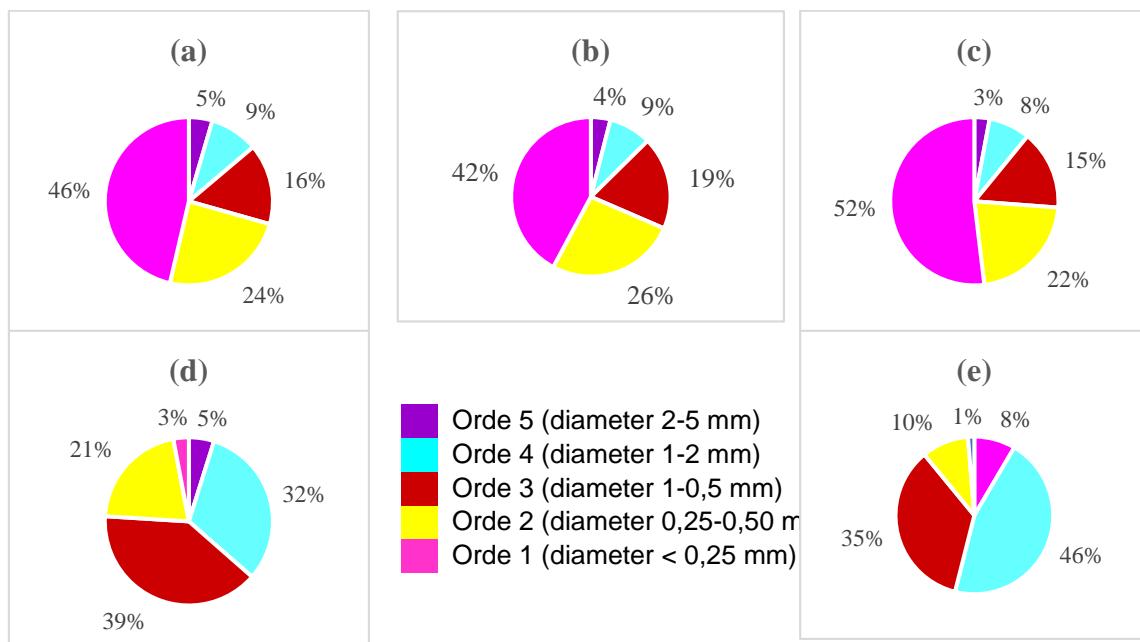
a,b,c: pada baris yang sama menunjukkan indikasi perbedaan yang signifikan ($p < 0.05$) menurut uji BNJ (Beda Nyata Jujur)

Kandungan P₂O₅ juga dicatat tertinggi pada sistem YCAF di dua lapisan tanah bagian atas, lebih tinggi secara signifikan dengan sistem OCAF, namun tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan sistem Mono (Tabel 2.3.).

2.5.2 Sifat morfologi akar halus berdasarkan kelas diameter

Rasio akar halus kakao tertinggi terdapat pada kelas akar orde 1 mm dengan persentase 42-52%, sedangkan rasio terendah terdapat pada kelas akar orde 5 (Gambar 2.5a, b dan c). Rasio akar halus pohon langsat tertinggi dari kelas orde 3 sebesar 39% pada sistem YCAF, dan kelas diameter orde 2 sebesar 46% pada

sistem OCAF, dan rasio kelas diameter terendah tercatat pada orde 1 sistem agroforestri (Gambar 2.5d dan 2.4e).



Gambar 2.5. Rasio urutan panjang akar halus pohon kakao dan langsat pada tiga sistem budidaya; (a) Akar halus kakao pada sistem Mono; (b) Sistem YCAF; (c) Sistem OCAF; (d) Akar halus pohon langsat pada sistem YCAF; (e) sistem OCAF.

Hasil sidik ragam kerapatan panjang akar (KPA) pada lima kelas orde dirangkum pada Lampiran 2.8. Sidik ragam menunjukkan bahwa tiga sistem budidaya kakao tidak berpengaruh nyata terhadap seluruh kelas orde akar kakao pada kedalaman 0-10 cm, kecuali orde 3 di JHB 1,2 m. Hal yang sama di catat pada kedalaman 10-20 cm, dimana tiga sistem budidaya kakao yang berbeda tidak berpengaruh nyata terhadap KPA kakao di seluruh kelas orde akar kakao, kecuali kelas orde 1 di JHB 1,7 m. Sementara pada kedalaman 20-30 cm, pengaruh nyata dari tiga sistem budidaya kakao diampti pada orde 2 JHB 0,4; orde 3, 4 dan 5 pada JHB 1,7 m, sedangkan pada kedalaman 30-40 cm, tiga sistem budidaya kakao menyebabkan perbedaan nyata pada KPA kakao kelas prdo 1, 2 dan 3 (Lampiran 2.8). Secara umum, hasil BNJ menunjukkan bahwa sistem Mono memberikan hasil KPA kakao lebih tinggi secara signifikan dibanding dua sistem lainnya, kecuali pada kelas orde 3 di kedalaman 0-10, sistem YCAF memberikan hasil KPA lebih tinggi dan secara siknifikan berbeda dengan sistem Mono namun, tidak berbeda dengan sistem OCAF (Tabel 2.4).

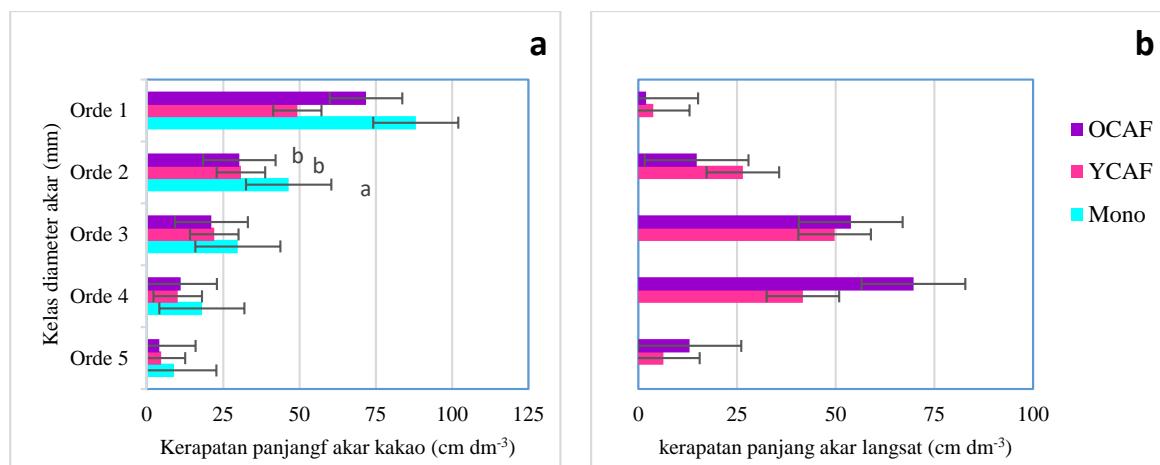
Hasil uji-T KPA naungan disajikan pada Lampiran 2,9. Seluruh kelas orde akar naungan pada kedalaman 0-10 cm, umumnya tidak berbeda nyata di dua sistem agroforestri kakao, kecuali orde 4 di JHB 0,4 m. Sementara itu, pada kedalaman 10-20 cm perbedaan yang nyata dicatat pada pada orde 1 pada JHB 1,2 dan orde 4 pada JHB 1,7 m, sedangkan pada kedalaman 20-30 cm, perbedaan nyata dari hasil uji-T KPA naungan dicatat pada orde 5 pada JHB 1,7 m (Lampiran 2,9). Dari hasil uji-T yang menunjukkan perbedaan yang nyata tersebut, KPA naungan di sistem OCAF memberikan hasil yang lebih tinggi dibanding sistem YCAF, kecuali KPA naungan dari kelas orde 1 (JHB 1,2 di kedalaman 10-20 cm), sistem YCAF menunjukkan hasil KPA naungan lebih tinggi dibanding sistem OCAF (Tabel 2.4).

Tabel 2.4. Kerapatan panjang akar (cm dm⁻³) kakao pada jarak horizontal batang (0,4;1,2;1,7 m) di tiga sistem budaya. Kakao dalam monokultur (Mono); kakao agroforestri berumur muda (YCAF); kakao agroforestri berumur tua (OCAF).

Jarak horizontal batang	Kedalaman	Jarak Horizontal batang 0,4 m						Jarak Horizontal batang 1,2 m						Jarak Horizontal batang 1,7 m						
		Kakao			Naungan			Kakao			Naungan			Kakao			Naungan			
		Mono	YCAF	OCAF	YCAF	OCAF	Mono	YCAF	OCAF	YCAF	OCAF	Mono	YCAF	OCAF	YCAF	OCAF	YCAF	OCAF	YCAF	OCAF
Orde 1	0-10	137	107	163	3	1	115	110	184	2	7	81	35	180	3	1				
	10-20	87	104	49	1	1	130	104	77	18	1	151 ^a	12 ^b	42 ^b	3	3				
	20-30	59	53	50	3	1	36	39	30	4	5	85	9	28	6	1				
	30-40	61	8	40	0	0	19	8	13	0	1	98 ^a	3 ^b	5 ^b	2	3				
Rata-rata ordi 1		86	68	75	2	1	75	65	76	6	3	103	14	64	3	2				
Orde 2	0-10	81	57	74	34	12	96	77	58	11	16	45	17	60	37	6				
	10-20	41	44	39	33	15	60	74	29	26	20	53	16	19	60	12				
	20-30	43 ^a	31 ^a	14 ^b	20	17	16	21	23	23	16	61	9	14	48	16				
	30-40	22	5	27	7	9	11	11	6	0	17	28 ^a	8 ^{ab}	0.3 ^b	18	22				
Rata-rata ordi 2		47	34	39	23	13	46	46	29	15	17	47	13	23	41	14				
Orde 3	0-10	69	44	42	76	83	39 b	65 a	47 b	67	58	27	15	34	115	92				
	10-20	35	27	48	72	43	39	33	18	71	46	34	17	16	62	67				
	20-30	21	29	9	22	57	25	15	23	37	45	27 ^a	4 ^b	6 ^b	27	35				
	30-40	13	4	11	13 ^y	47 ^x	14	13	0	0	39	15 ^a	0 ^b	0 ^b	34	36				
Rata-rata ordi 3		37	30	23	46	57	34	30	19	44	47	20	11	13	59	57				
Orde 4	0-10	33	18	11	56 ^y	176 ^x	24	22	26	142	170	19	15	18	135	211				
	10-20	25	14	24	37	41	26	18	6	45	43	21	10	14	38	74				
	20-30	14	2	6	22	31	11	5	17	3	14	26 ^a	3 ^b	2 ^b	7	17				
	30-40	10	7	9	7	25	6	8	0	0	11	2	0	0	9	22				
Rata-rata ordi 4		21	10	12	31	68	17	13	12	48	60	17	7	9	47	81				
Orde 5	0-10	3	6	6	7	14	12	7	4	11	12	3	7	8	14	30				
	10-20	9	8	8	9	3	20	13	4	5	14	12	4	0	11	20				
	20-30	7	0	3	10	25	9	6	13	5	3	22 ^a	1 ^b	1 ^b	2	19				
	30-40	7	0	2	4	12	3	5	0	0	0	0	0	0	0	3				
Rata-rata ordi 1		7	3	5	7	14	11	8	5	5	7	9	3	2	7	18				

a,b,c: pada baris yang sama menunjukkan indikasi perbedaan yang signifikan antara KPA kakao; x,y pada baris yang sama menunjukkan indikasi perbedaan yang signifikan antara KPA naungan menurut uji BNJ (Beda nyata jujur). Orde 1 (diameter < 0.25 mm); Orde 2 (0.25-0.50 mm); Orde 3 (0.5-1 mm) dan Orde 4 (1-2 mm).

Secara umum, hasil KPA kakao di sistem Mono cenderung lebih tinggi dibanding sistem OCAF dan YCAF (Gambar 2.6a), sedangkan KPA naungan yang dicatat di sistem OCAF memberikan hasil KPA naungan lebih tinggi dibanding sistem YCAF (Gambar 26b). Perbedaan umur sistem agroforestri, tidak berpengaruh terhadap KPA kakao di kedua sistem agroforestri (Tabel 2.4 dan gambar 2.6a). KPA tertinggi terdapat pada akar halus orde 1, dan menurun dengan meningkatnya kelas diameter akar kakao (Gambar 2.6a). KPA naungan menunjukkan pola yang berbeda dengan KPA kakao di tingkat sistem budidaya. KPA naungan tertinggi dari kelas orde 4, nilai KPA naungan menurun dengan berkuranya kelas orde akar di dua sistem kakao agroforestri (gambar 2.6b).



Gambar 2.6. (a) kerapatan panjang akar (KPA) kakao (b) KPA langsat, pada tiga sistem budidaya kakao; monokultur kakao (Mono); agroforestri kakao muda (YCAF); agroforestri kakao tua (OCAF) terhadap; Huruf kecil yang berbeda menunjukkan perbedaan yang signifikan dari kelompok pohon antara sistem budidaya ($P < 0,05$).

Hasil analisis ragam Kerapatan Massa Akar (KMA) kakao dirangkum dalam Lampiran 2.10, sedangkan KMA naungan dirangkum dalam Lampiran 2.11. Sidik ragam pada KMA kakao yang dicatat pada seluruh JHB tidak menunjukkan perbedaan yang nyata antara sistem budidaya, sedangkan KMA kakao yang diukur pada empat tingkat kedalaman, hanya kedalaman 20-30 cm yang menunjukkan perbedaan yang nyata. Secara umum, sistem budidaya berpengaruh nyata terhadap KMA kakao (Lampiran 2.10). Rata-rata KMA kakao pada sistem Mono seberat $0,65 \text{ g dm}^{-3}$ secara signifikan lebih tinggi dibanding di sistem YCAF sebesar $0,31 \text{ g dm}^{-3}$ dan sistem OCAF sebesar $0,24 \text{ g dm}^{-3}$ (Tabel 2.5).

Tabel 2.5. Kerapatan massa akar kakao dan naungan (g dm^{-3}) pada tiga sistem budidaya di Kecamatan Binuang. Sistem Mono: kakao dalam monokultur, YCAF: kakao agroforestri berumur muda, OCAF: kakao agroforestri berumur tua

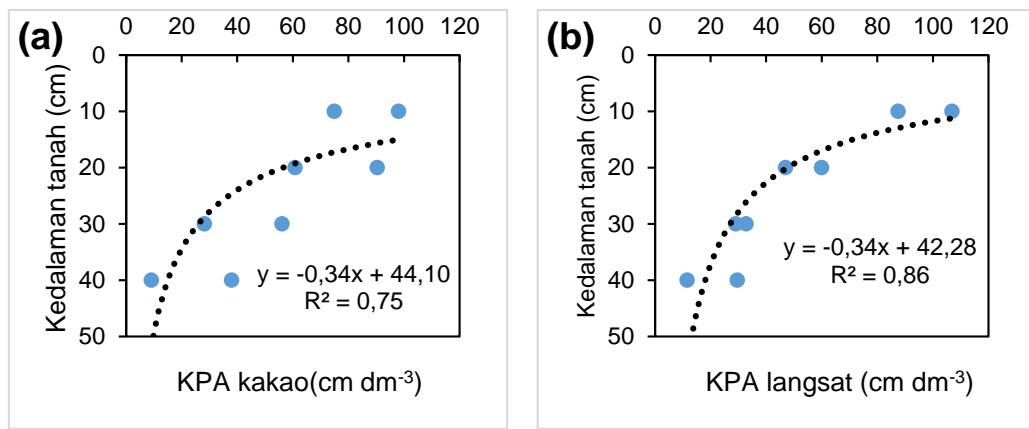
Perlakuan	Kerapatan massa akar (g dm^{-3})				
	Kakao		Naungan		
	Mono	YCAF	OCAF	YCAF	OCAF
0,4 m	0,55	0,31	0,30	0,33 ^y	0,75 ^x
1,2 m	0,76	0,34	0,26	0,27	0,57
1,7 m	0,77	0,32	0,20	0,45 ^y	0,96 ^x
0-10	0,86	0,49	0,45	0,77	1,53
10-20	0,82	0,50	0,26	0,38	0,65
20-30	0,73 ^a	0,11 ^b	0,21 ^{ab}	0,18 ^y	0,52 ^x
30-40	0,18	0,13	0,04	0,08	0,31
Sistem	0,65 ^a	0,31 ^b	0,24 ^b	0,35 ^y	0,75 ^x

a,b,c: pada kalom menunjukkan indikasi perbedaan yang signifikan (Uji Tukey, $p < 0.05$)

Sementara itu, hasil uji-T KMA naungan di dua sistem agroforestri menunjukkan perbedaan yang nyata pada JHB 0,4 m dan JHB 1,7 m. Selain itu hasil uji-T juga berbeda nyata pada kedalaman 20-30 cm dan secara keseluruhan, sistem budidaya memberikan perbedaan nyata terhadap KMA naungan (Lampiran 2.11). KMA naungan di sistem OCAF memberikan hasil KMA tertinggi yang berbeda secara signifikan dengan sistem YCAF (Tabel 2.5).

2.5.3 Hubungan sifat fisik tanah dan perkembangan akar

Perkembangan akar pada pohon kakao maupun naungan sangat dipengaruhi oleh kedalaman lapisan tanah. KPA kakao dan naungan mengalami penurunan dengan bertambahnya kedalaman lapisan tanah (Gambar 2.7).



Gambar 2.7. Pengaruh kedalaman terhadap: (a) kerapatan panjang akar (KPA) kakao; (b) KPA langsat

Analisis korelasi menunjukkan bahwa kerapatan panjang akar dari orde tinggi ke rendah merespon secara nyata kondisi fisik tanah. KPA kakao menunjukkan hubungan yang signifikan dengan kerapatan isi tanah (Tabel 2.6 dan Gambar 2.8a). KPA kakao meningkat mengikuti peningkatan kerapatan isi tanah. Tetapi, kehadiran batu dengan persentase tinggi dalam volume menghambat perkembangan akar, ditunjukkan dengan pola hubungan yang negatif antara KPA kakao dengan persentase volume batu dalam tanah berbatu (Tabel 2.6 dan Gambar 2.8b).

Table 2.6. Korelasi pearson antara sifat fisik tanah dengan (volume batuan, massa batuan, kerapatan isi, kadar air tanah) dengan kerapatan panjang akar (KPA) dari lima kelas diameter akar

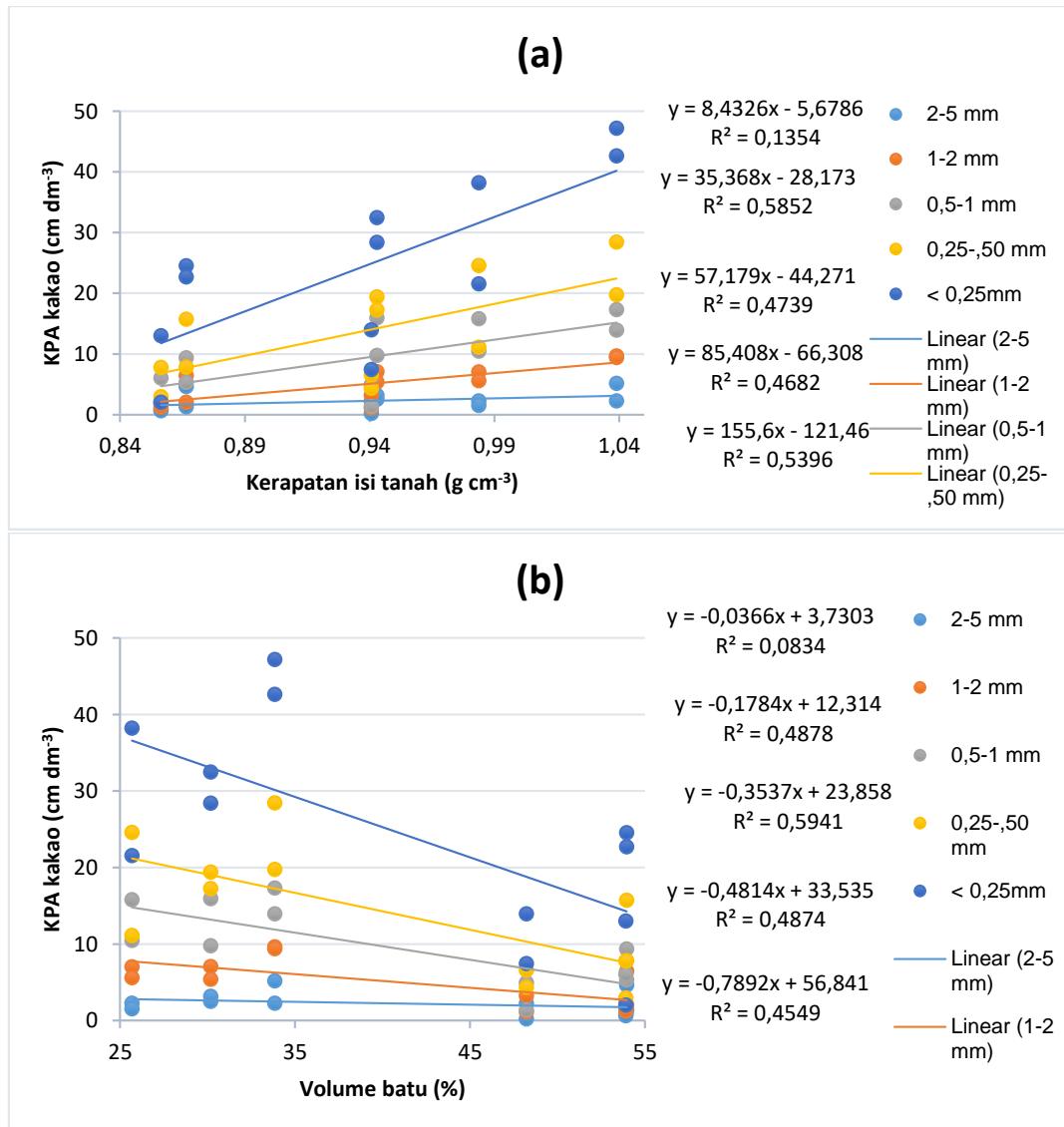
Parameter KPA	Rasio volume batu	Kerapatan isi tanah	Kadar air tanah
Diameter akar kakao D 2-5 mm	ns	ns	(+)
Diameter akar kakao D 1-2 mm	(-)	(+)	(+)
Diameter akar kakao D 05-1 mm	(-)	(+)	(+)
Diameter akar kakao D 0,25-0,50 mm	(-)	(+)	(+)
Diameter akar kakao D < 0,25_mm	(-)	(+)	(+)
Diameter akar langsat D 2-5 mm	(-)	ns	ns
Diameter akar langsat 4 D 1-2 mm	(-)	(+)	ns
Diameter akar langsat 3 D 05-1 mm	(-)	ns	ns
Diameter akar langsat D 0,25-0,50 mm	ns	ns	ns
Diameter akar langsat D < 0,25_mm	(-)	ns	ns

ns: non significant
(+) Korelasi positif

(-). Korelasi negatif

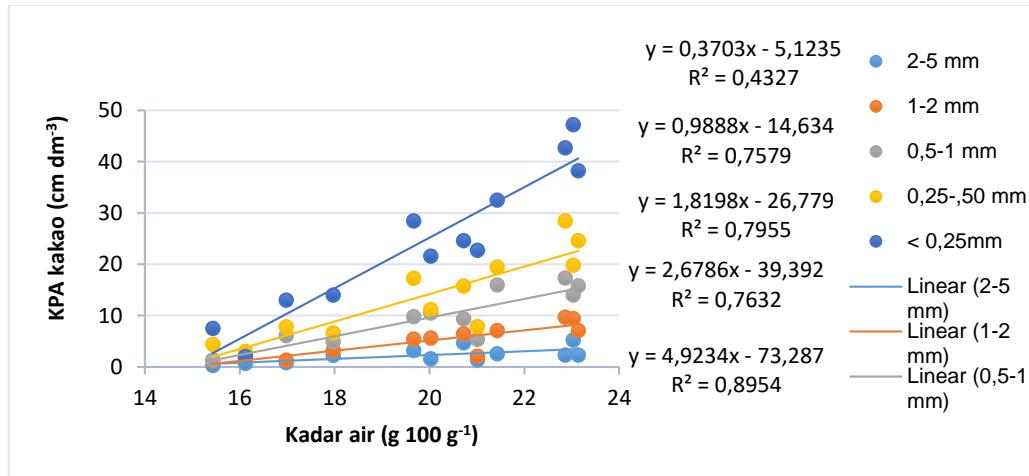
Persentase volume batu membangun hubungan negatif terhadap kadar air tanah dan berpengaruh negatif dengan kerapatan isi tanah. Selanjutnya,

peningkatan volume batu dan penurunan kerapatan isi tanah menurunkan kandungan air, sehingga persediaan air untuk tanaman berkurang.



Gambar 2.8. Hubungan linear kerapatan panjang akar (KPA) dari lima kelas diameter akar halus kakao (2-5; 1-2; 0.5-1; 0.25-0.50 dan <0.25 mm) terhadap (a) kerapatan isi tanah; (b) persentase volume batu dalam tanah berbatu

Hubungan positif dan signifikan antara KPA dengan kadar air tanah terjadi pada seluruh kelas diameter akar halus kakao (Tabel 2.6 dan Gambar 2.9), menunjukkan bahwa perkembangan akar kakao sangat tergantung pada kelembaban atau pasokan air tanah. Selain itu, perkembangan akar langsat tidak dipengaruhi oleh kondisi kadar air tanah (Tabel 2.6).



Gambar 2.9. Hubungan linear kerapatan panjang akar (KPA) (a) lima kelas diameter akar halus kakao (2-5; 1-2; 0.5-1; 0.25-0.50 dan <0.25 mm) terhadap kadar air tanah berbatu

2.6 Pembahasan

2.6.1 Distribusi dan perkembangan akar pada tanah berbatu

Akar tanaman berperan dalam mengeksplorasi lapisan tanah untuk menyerap hara dan air. Akar tanaman merespon kondisi tanah yang heterogen dengan mengubah percabangan atau anatomi akar yang biasanya diikuti dengan perilaku fisiologis tanaman. Tingginya konsentrasi akar halus pada lapisan tanah atas yang dicatat di semua sistem budidaya (Gambar 2.6) adalah respon alamia dari kesuburan tanah di lapisan tersebut (Tabel 2.3), dimana kandungan bahan organik, N dan P yang tinggi pada lapisan tersebut (Upadhaya *et al.*, 2005; Rajab *et al.*, 2018).

KPA pada semua kelas orde akar ditemukan sangat tinggi di lapisan atas 0-10 cm sampai 10-20 cm dan secara umum mengalami pengurangan hingga kedalaman 30-40 cm (Tabel 2.4). Pola seperti ini umum ditemukan pada berbagai jenis lingkungan tanah (Archer *et al.*, 2002; Rajab *et al.*, 2016; Niether *et al.*, 2019). Menurut Fitter (2002), kepadatan akar di lapisan tanah bagian atas dibanding lapisan tanah bawah terjadi akibat ketersediaan sumber daya yang melimpah. Pola perkembangan akar yang ditemukan dalam penelitian ini sangat heterogen (Tabel 4) adalah bukti bahwa sumber daya air, dan nutrisi tidak merata dalam profil tanah.

Sebagian besar unsur hara, terutama N dan P, dihasilkan dari penguraian bahan organik, terjadi di lapisan tanah bagian atas dan menurun dengan bertambahnya kedalaman tanah (Upadhyaya *et al.*, 2005; Rajab *et al.*, 2018). Selain itu, pola perakaran kakao yang dangkal mungkin menguntungkan untuk mengekstrak air tanah yang dihasilkan dari aliran bawah permukaan dan aliran batang yang mungkin hanya mencapai lapisan tanah bagian atas (Schwendenmann *et al.*, 2010). KPA kakao pada lapisan 0-10 cm kedalaman tanah tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan di tiga sistem budidaya, dan perbedaan tersebut tidak terjadi dengan bertambahnya JHB menuju pohon tetangga (Tabel 2.4). Hasil serupa untuk panjang akar pohon menurut jarak dari barisan pohon diamati oleh (Livesley *et al.*, 2000). Pohon kakao di bawah semua kondisi pertumbuhan mampu mengembangkan sistem akar halus yang tersebar luas dan merata di dekat permukaan di seluruh area plot (Nygren *et al.*, 2013; Rajab *et al.*, 2016; Niether *et al.*, 2019). Pengukuran akar sampai jarak 1,7 m dari pangkal batang nampaknya belum cukup memberikan perbedaan perkembangan akar.

Distribusi horizontal yang tidak signifikan dari akar kakao di tiga sistem budidaya sebagai isyarat distribubusi hara yang baik di tiga sistem budidaya tersebut. Akar berkembang di sekitar pohon kopi dilaporkan oleh Defrenet *et al.* (2016) sebagai respon atas keberadaan unsur hara (Niether *et al.*, 2019), lebih lanjut dijelaskan bahwa akar kakao berkembang didekat pangkal batang kakao ke arah pohon kakao berikutnya bahkan mencapai 4,8 m dari pangkal batang (Nygren *et al.*, 2013; Niether *et al.*, 2019). Kami tidak melakukan pengamatan pada akar kasar (diameter > 5 mm). Tetapi penelitian sebelumnya melaporkan bahwa sistem akar halus berkembang sedekat mungkin dengan akar kasar untuk memungkinkan pemindahan karbohidrat dari akar kasar ke akar halus (Nygren *et al.*, 2013). Pohon kakao dalam semua kondisi pertumbuhan mampu mengembangkan sistem akar halus menyebar diseluruh area plot secara homogen (misalnya, (Nygren *et al.*, 2013; Rajab *et al.*, 2016; Rajab *et al.*, 2018). Pemisahan akar kakao berdasarkan kelas diameter akar dan pengaruh kehadiran batu masih terkendala oleh ketersediaan literatur.

Meskipun faktanya, bahwa lapisan tanah merupakan sumber penting untuk penyerapan hara dan air, tidak banyak yang diketahui tentang pola distribusi akar vertikal (Lehmann, 2003) di tanah berbatu. KPA kakao di sistem Mono lebih tinggi dibandingkan dengan sistem YCAF, sedangkan akar pohon naungan dalam

sistem OCAF hampir 3 kali lipat. Nilai biomasa akar kakao yang rendah yang dicatat pada sistem agroforestri dapat dijelaskan dengan pergantian akar halus yang sangat cepat pada kondisi hangat dan lembab yang tidak memungkinkan akumulasi biomasa akar halus yang besar (Kummerow *et al.*, 1982). Dalam penelitian ini, akar mati tidak diperhitungkan sehingga tidak dapat menjelaskan lebih lanjut.

2.5.2. Dampak kehadiran batu terhadap perkembangan akar kakao

Hasil kami menunjukkan, bahwa kandungan batu mencapai 30% pada lapisan atas (Tabel 2.1), adalah angka yang tinggi untuk kegiatan budidaya tanaman ataupun pohon. Beberapa peneliti memberi batas optimum antara 10-20% kandungan batu dalam tanah untuk pertumbuhan tanaman. Volume batu yang menempati tanah berbatu berkisar 10-20% untuk sejumlah tanaman seperti sereal, tanaman umbi-umbian, sayuran) Wollny (1897), yang menggambarkan hubungan kandungan fragmen batuan pada kadar air serta suhu tanah. Kandungan batu dalam tanah tidak lebih dari 20% adalah jumlah maksimum untuk pertumbuhan pohon, jumlah yang lebih besar dari itu berdampak pada pertumbuhan akar terkait keterbatasan ruang jelajah, selain itu, memicu kenaikan suhu dalam tanah, dan penurunan kapasitas lapang pada tanah berbatu (Poesen dan Lavee 1994). Saini dan Grant (1980) melaporkan bahwa volume batu dalam tanah 12% untuk menghasilkan kentang (*Solanum tuberosum L.*) yang optimum.

Rasio volume batu meningkat di lapisan tanah bawah, mengurangi ruang untuk fragmen tanah yang akibatnya menurunkan kerapatan isi tanah serta menyebabkan kadar air di lapisan tanah bawah menurun (Tabel 2.1). Hasil ini membenarkan laporan Van Wesemael *et al.* (2000) yang menemukan pola hubungan negatif antara kandungan fragmen batuan volumetrik dan kerapatan isi tanah ini, serta hubungan positif antara kerapatan isi tanah dengan perkembangan biomassa akar di bawah tanah.

Akar halus berkembang pada lapisan tanah atas yang memiliki kerapatan isi tanah lebih tinggi (Gambar 2.9). Sangat sedikit akar halus yang mampu menjalar ke lapisan tanah bagian bawah. Kehadiran fraksi batu dalam jumlah besar adalah penghalang akar merambat ke lapisan tanah bawah, dengan cara menghindar dengan melengkung ketika mereka menghadapi permukaan batu yang padat (Fakih *et al.*, 2017). Peneliti sebelumnya melaporkan bahwa kerapatan isi

membatasi perkembangan akar (Cascaredo *et al.*, 2021). Akar halus tanaman Oak (*Quercus petraea* Lieibl) secara mekanis tidak memiliki kemampuan menembus permukaan tanah yang padat (Kormanek *et al.*, 2015).

Rasio akar halus kakao lebih tinggi pada kelas diameter orde rendah (orde 1 dan 2) adalah bentuk adaptasi dalam memaksimalkan penyerapan air dan hara, Mucha *et al.* (2020) melaporkan bahwa aktivitas akar berubah dengan berubahnya diameter akar halus, akar yang berdiameter lebih kecil dari 0,5 mm adalah akar yang berfungsi sebagai akar penyerap untuk menyerap air dan hara dari dalam tanah. Akar halus orde rendah terbentuk sebagai hasil percabangan akar orde tinggi, yang kemungkinan dipicu oleh rintangan tanah yang keras dan sedikit air.

Akar langsat yang dominan adalah akar dari kelas diameter orde 4 (diameter 1-2 mm), berpeluang besar menembus lapisan tanah yang lebih padat. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa diameter akar meningkat pada tanah yang padat (Popova *et al.*, 2016; Correa *et al.*, 2019). Peningkatan diameter akar dianggap memiliki sifat mekanik yang menguntungkan, seperti tekanan pertumbuhan akar aksial yang lebih besar, ekspansi akar radial, dan laju pertumbuhan potensial akar (Kolb *et al.*, 2017; Potocka dan Pulka 2018). Akibatnya, akar yang lebih tebal memiliki kemampuan yang lebih besar untuk mengeksplorasi tanah yang padat (Clark *et al.*, 2003; Bengough *et al.*, 2011).

Kehadiran batu merupakan fenomena yang sangat penting, terutama di tanah dengan kontur miring. Sekalipun perakaran kakao (KPA) menurun di sistem agroforestri di tanah berbatu, tetapi mekanisme yang mendasarinya belum terlalu jelas. Kekayaan pori makro pada tanah berbatu dan akar langsat yang berukuran lebih besar seharusnya memandu akar menjalar ke lapisan tanah yang lebih dalam, namun hal tersebut tidak ditemukan dalam penelitian ini. Kadar air tanah dan terbatasnya fraksi tanah di lapisan tanah bawah serta kehadiran akar tanaman lain (naungan) kemungkinan menjadi faktor pembatas bagi perkembangan akar kakao disitem agroforestri. Faktor-faktor fisik yang lain belum diukur, seperti dinamika suhu dalam tanah berbatu, serta proses biologi dan geokimia yang mengikutinya adalah tantangan besar untuk penelitian lebih lanjut.

2.7 Kesimpulan

Secara umum, produksi akar halus kakao di sistem Mono lebih tinggi dibanding sistem agroforestri kakao di lahan berbatu. KPA kakao dari orde 1 sebesar 88 cm dm^{-3} di sistem Mono menjadi 72 cm dm^{-3} di sistem OCAF dan terendah di sistem YCAF (49 cm dm^{-3}). Distribusi perakaran kakao dan akar pohon naungan ditemukan tumpang tindih dimana akar kakao dan pohon naungan langsung berada pada lapisan tanah yang sama. Hasil ini berbeda dengan yang dihipotesiskan, sehingga berpotensi menciptakan persaingan antara kedua pohon dalam sistem agroforestri pada lahan berbatu. Meskipun akar pohon terkait dalam sistem agroforestri bersaing dengan akar kakao, akar tersebut meningkatkan eksplorasi spasial tanah secara mendalam yang berpeluang meningkatkan hasil sistem secara keseluruhan.

2.8 Daftar Pustaka

- Abou Rajab, Yasmin Joana Monna. 2016. 'Shade Trees in Cacao Agroforestry Systems : Influence on Roots and Net Primary Production. PhD'. : 163.
- An, Ji Young, and Akira Osawa. 2021. 'Seasonal Patterns of Fine Root Dynamics and Their Contribution to Net Primary Production in Hinoki Cypress (*Chamaecyparis Obtusa*) and Konara Oak (*Quercus Serrata*) Forests'. *Trees - Structure and Function* 35(1): 255–71. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02030-6>.
- Archer, N. A.L., J. N. Quinton, and T. M. Hess. 2002. 'Below-Ground Relationships of Soil Texture, Roots and Hydraulic Conductivity in Two-Phase Mosaic Vegetation in South-East Spain'. *Journal of Arid Environments* 52(4): 535–53.
- Box, G. E., and D. R. Cox. 1964. 'An Analysis of Transformations'. *Journal of the American Statistical Association* 26(2): 211–52.
- Cardinael, Rémi et al., 2017. 'Increased Soil Organic Carbon Stocks under Agroforestry: A Survey of Six Different Sites in France'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 236: 243–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>.
- Carrick, Sam et al., 2013. 'Stony Soils Are a Major Challenge for Nutrient Management Under Irrigation Development'. : 1–8.
- Cascaredo, CA, LC Huerta, and SR Ortiz. 2021. 'FINE ROOT DENSITY ACROSS SOIL PROFILES IN TROPICAL'. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24.
- Cools, Nathalie, and Bruno De Vos. 2013. 12 Developments in Environmental Science *Forest Soil. Characterization, Sampling, Physical, and Chemical Analyses*. 1st ed. © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-098222-9.00015-7>.
- Correa, José, Johannes A. Postma, Michelle Watt, and Tobias Wojciechowski. 2019. 'Soil Compaction and the Architectural Plasticity of Root Systems'. *Journal of Experimental Botany* 70(21): 6019–34.
- Defrenet, Elsa et al., 2016. 'Part of a Special Issue on Root Biology: Root Biomass, Turnover and Net Primary Productivity of a Coffee Agroforestry System in Costa Rica: Effects of Soil Depth, Shade Trees, Distance to Row and Coffee Age'. *Annals of Botany* 118(4): 833–51.
- Fakih, Mahmoud, Jean Yves Delenne, Farhang Radjai, and Thierry Fourcaud. 2017. 'Modeling Root Growth in Granular Soils: Effects of Root Stiffness and Packing Fraction'. *EPJ Web of Conferences* 140: 14013.
- Fitter, Alastair. 2002. 'Characteristics and Functions of Root Systems'. In *Plant Roots: The Hidden Half*, eds. Y Waisel, A Eshel, and U Kafkafi. New York: New York: Marcel Dekker, 15–32.
- Gusli, Sikstus et al., 2020. 'Soil Organic Matter, Mitigation of and Adaptation to Climate Change in Cocoa-Based Agroforestry Systems'. *Land* 9(9): 1–19.
- Han, Eusun, Timo Kautz, and Ulrich Köpke. 2016. 'Precrop Root System Determines Root Diameter of Subsequent Crop'. *Biology and Fertility of Soils* 52(1): 113–18.

- Hana, Hlaváčiková *et al.*, 2018. 'The Influence of Stony Soil Properties on Water Dynamics Modeled by the HYDRUS Model'. *J. Hydrol. Hydromech* 66(2): 181–88.
- Houlbrooke, D. J., E. R. Thom, R. Chapman, and C. D.A. McLay. 1997. 'A Study of the Effects of Soil Bulk Density on Root and Shoot Growth of Different Ryegrass Lines'. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 40(4): 429–35.
- Image_J, 2019. Software Image-J. <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>. Accessed 2019.02.02.
- Kirby, J. M., and A. G. Bengough. 2002. 'Influence of Soil Strength on Root Growth: Experiments and Analysis Using a Critical-State Model'. *European Journal of Soil Science* 53(1): 119–27.
- Kolb, E, V Legue, and MB Bogaat-Triboulot. 2017. 'Physical Root-Soil Interactions'. *Physical Biology* 14(065004).
- Kormanek, Mariusz, Tomasz Głab, Jacek Banach, and Grzegorz Szewczyk. 2015. 'Effects of Soil Bulk Density on Sessile Oak Quercus Petraea Liebl. Seedlings'. *European Journal of Forest Research* 134(6): 969–79.
- Livesley, S. J., P. J. Gregory, and R. J. Buresh. 2000. 'Competition in Tree Row Agroforestry Systems. 1. Distribution and Dynamics of Fine Root Length and Biomass'. *Plant and Soil* 227(1–2): 149–61.
- Makkonen, Kirsi, and Heljä Sisko Helmisaari. 1999. 'Assessing Fine-Root Biomass and Production in a Scots Pine Stand - Comparison of Soil Core and Root Ingrowth Core Methods'. *Plant and Soil* 210(1): 43–50.
- Mehler, Knut, Ingo Schöning, and Markus Berli. 2014. 'The Importance of Rock Fragment Density for the Calculation of Soil Bulk Density and Soil Organic Carbon Stocks'. *Soil Science Society of America Journal* 78(4): 1186–91.
- Meng, Chen *et al.*, 2018. 'Characteristics of Rock Fragments in Different Forest Stony Soil and Its Relationship with Macropore Characteristics in Mountain Area, Northern China'. *Journal of Mountain Science* 15(3): 519–31.
- Morandage, Shehan *et al.*, 2021. 'Root Architecture Development in Stony Soils'. *Vadose Zone Journal* 20(4): 1–17.
- Mucha, Joanna *et al.*, 2020. 'Fine Root Classification Matters: Nutrient Levels in Different Functional Categories, Orders and Diameters of Roots in Boreal Pinus Sylvestris across a Latitudinal Gradient'. *Plant and Soil* 447(1–2): 507–20.
- Niether, Wiebke *et al.*, 2019. 'Below- and Aboveground Production in Cocoa Monocultures and Agroforestry Systems'. *Science of the Total Environment* 657: 558–67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.050>.
- Novák, V., and H. Hlaváčiková. 2019. 'Stony Soils'. In *Applied Soil Hydrology, Theory and Applications of Transport in Porous Media*, Springer Nature Switzerland AG, 263–82. www.springer.com.
- Nygren, Pekka, Humberto A. Leblanc, Miaoer Lu, and Cristina A. Gómez Luciano. 2013. 'Distribution of Coarse and Fine Roots of Theobroma Cacao and Shade Tree Inga Edulis in a Cocoa Plantation'. *Annals of Forest Science* 70(3): 229–39.
- Pardo, Alessandra, Mariana Amato, and Fabrizio Quaglietta Chiarandà. 2000.

- 'Relationships between Soil Structure, Root Distribution and Water Uptake of Chickpea (*Cicer Arietinum* L.). Plant Growth and Water Distribution'. *European Journal of Agronomy* 13(1): 39–45.
- Poesen, J., and H. Lavee. 1994. 'Rock Fragments in Top Soils: Significance and Processes'. *Catena* 23(1–2): 1–28.
- Popova, Liyana *et al.*, 2016. 'Plant Root Tortuosity: An Indicator of Root Path Formation in Soil with Different Composition and Density'. *Annals of Botany* 118(4): 685–98.
- Potocka, Izabela, and Joanna Szymanowska-Pulka. 2018. 'Morphological Responses of Plant Roots to Mechanical Stress'. *Annals of botany* 122(5): 711–23.
- Rajab, Yasmin Abou *et al.*, 2016. 'Cacao Cultivation under Diverse Shade Tree Cover Allows High Carbon Storage and Sequestration without Yield Losses'. *PLoS ONE* 11(2): 1–22.
- . 2018. 'Effects of Shade Tree Cover and Diversity on Root System Structure and Dynamics in Cacao Agroforests: The Role of Root Competition and Space Partitioning'. *Plant and Soil* 422(1–2): 349–69.
- Ravina, Israela, and Joshua Magier. 1984. 'Hydraulic Conductivity and Water Retention of Clay Soils Containing Coarse Fragments'. *Soil Science Society of America Journal* 48(4): 736–40.
- Saini, GR, and WJ Grant. 1980. 'LONG-TERM EFFECTS OF INTENSIVE CULTIVATION ON SOIL QUALITY IN THE POTATO-GROWING AREAS OF NEW BRUNSWICK (CANADA) AND MAINE (U.S.A.)'. *CANADIAN JOURNAL ON SOIL SCIENCE* 60(August): : 421-428.
- Schwendenmann, Luitgard *et al.*, 2010. 'Effects of an Experimental Drought on the Functioning of a Cacao Agroforestry System, Sulawesi, Indonesia'. *Global Change Biology* 16(5): 1515–30.
- Tracy, Saoirse R. *et al.*, 2012. 'Quantifying the Impact of Soil Compaction on Root System Architecture in Tomato (*Solanum Lycopersicum*) by X-Ray Micro-Computed Tomography.' *Annals of botany* 110(2): 511–19.
- Tscharntke, Teja *et al.*, 2011. 'Multifunctional Shade-Tree Management in Tropical Agroforestry Landscapes - A Review'. *Journal of Applied Ecology* 48(3): 619–29.
- Upadhyaya, K., H. N. Pandey, P. S. Law, and R. S. Tripathi. 2005. 'Dynamics of Fine and Coarse Roots and Nitrogen Mineralization in a Humid Subtropical Forest Ecosystem of Northeast India'. *Biology and Fertility of Soils* 41(3): 144–52.
- Valentine, Tracy A. *et al.*, 2012. 'Soil Strength and Macropore Volume Limit Root Elongation Rates in Many UK Agricultural Soils.' *Annals of botany* 110(2): 259–70.

- Wang, Zhiqiang et al., 2021. 'Divergent Scaling of Fine-Root Nitrogen and Phosphorus in Different Root Diameters, Orders and Functional Categories: A Meta-Analysis'. *Forest Ecology and Management* 495(March): 119384. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119384>.
- Van Wesemael, Bas, Mark Mulligan, and Jean Poesen. 2000. 'Spatial Patterns of Soil Water Balance on Intensively Cultivated Hillslopes in a Semi-Arid Environment: The Impact of Rock Fragments and Soil Thickness'. *Hydrological Processes* 14(10): 1811–28.