

**DINAMIKA FISIKA TANAH AKIBAT ALIH GUNA LAHAN HUTAN
MENJADI LAHAN KAKAO**



Prof. Dr. Anthon Monde, M.P.

**Pidato ilmiah Dalam rangka pengukuhan Guru Besar bidang Pertanian
23 Januari 2025**

**UNIVERSITAS TADULAKO
JANUARI, 2025**

Assalamu alaikum Wr. Wb.

Selam sejahtera bagi kita sekalian, Syalom, Om Swastyastu, Namobudaya, Salam Kebajikan. Yang terhormat Bapak Rektor Univ. Tadulako, Bapak/ibu Wakil Rektor Universitas Tadulako, Yang saya hormati bapak Ketua Senat, Sekretaris dan Anggota Senat Akademik Universitas Tadulako

Yang saya hormati Ketua Dewan Guru besar, Sekretaris dan Anggota Dewan Guru Besar

Yang saya hormati Bapak/Ibu Dekan, Direktur Pasca sarjana, Ketua lembaga

Yang saya hormati Para Kepala Biro Univ. Tadulako,

Yang saya hormati Para Wakil Dekan, Wakil Direktur, Sekretaris Lembaga

Yang saya hormati Para dosen, Tendik, Tamu undangan, serta segenap hadirin yang saya muliakan

Puji syukur kehadiran Tuhan Maha Kuasa, atas Rahmat yang begitu besar yang dilimpahkan kepada saya, dan hadirin sekalian sehingga bisa hadir di ruang yang megah ini.

Pertama-tama, saya ucapkan selamat datang kepada seluruh hadirin. Semoga bapak, ibu, dan saudara-saudara sekalian senantiasa dalam keadaan sehat. Pada kesempatan orasi ilmiah hari ini, saya akan menyampaikan orasi dengan tema khusus **Dinamika Fisika Tanah** pada konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian yang selama ini menjadi focus penelitian saya.

DINAMIKA FISIKA TANAH AKIBAT ALIH GUNA LAHAN HUTAN MENJADI LAHAN KAKAO (*THEOBROMA CACAO L.*)

1. Pendahuluan

Alih guna lahan dari hutan menjadi perkebunan kakao telah menjadi isu penting dalam pengelolaan sumber daya lahan. Proses ini tidak hanya mengubah fungsi ekosistem, tetapi juga memengaruhi sifat fisika tanah. Dalam kondisi alami, hutan menyediakan penutup tanah yang stabil, melindungi tanah dari erosi, dan menjaga keseimbangan ekosistem. Namun, konversi lahan untuk tujuan pertanian, khususnya perkebunan kakao, dapat menyebabkan perubahan signifikan pada struktur tanah, porositas, infiltrasi, dan sifat hidrologi tanah (Gupta dan Larson, 2021; Monde *et al.*, 2008)). Pemahaman terhadap dinamika fisika tanah akibat alih guna lahan ini penting untuk mengelola lahan secara berkelanjutan.

Apabila alih guna lahan ini tidak terencana dengan baik maka akan menimbulkan dampak yang masif terhadap lingkungan dan mengganggu aktivitas kehidupan masyarakat. Alih guna lahan akan mengakibatkan berubahnya kapasitas tanah menyerap air saat terjadi hujan. Kondisi alami memungkinkan air dapat menyebar atau terdistribusi keseluruhan permukaan dan adanya cekungan-cekungan alami memungkinkan air masuk dalam tanah secara maksimal. Demikian pula drainase alami memungkinkan air aliran permukaan tersebar dan tersalurkan dengan baik sehingga tidak terjadi penumpukan/menghindari terjadinya banjir. Sebaliknya pada kondisi lahan pertanian terjadi perubahan sifat fisika tanah banyak yang berubah terutama dalam hal kemampuan tanah menyerap air hujan, tanah mudah jenuh air sehingga meningkatkan aliran permukaan dan erosi tanah. Adanya modifikasi kondisi permukaan tanah membuat saluran-saluran aliran permukaan terkonsentrasi pada titik tertentu sehingga saluran meluap karena daya tampung melebihi kapasitas.

2. Karakteristik Fisika Tanah pada Ekosistem Hutan

Tanah dalam ekosistem hutan umumnya memiliki struktur yang stabil dan mendukung berbagai fungsi ekosistem. Struktur tanah hutan biasanya bersifat granular, di mana partikel tanah membentuk agregat kecil yang stabil. Struktur ini memungkinkan porositas yang tinggi, baik untuk pori makro yang mendukung aliran air/udara maupun pori mikro yang menyimpan air dalam tanah (Brady dan Weil, 2016). Tekstur tanah di hutan cenderung beragam, tergantung pada jenis batuan induk dan tingkat pelapukan, tetapi sering kali mendukung infiltrasi yang baik. Tanah dengan tekstur lempung, misalnya, memiliki keseimbangan antara kapasitas retensi air dan drainase, yang sangat ideal untuk pertumbuhan vegetasi hutan.

Tanah pada lahan hutan merupakan hasil interaksi antara faktor pembentukan tanah, termasuk vegetasi, iklim, organisme tanah, topografi, dan waktu. Lahan hutan mendukung keberadaan ekosistem yang kompleks dan memiliki tanah yang umumnya kaya akan bahan organik, baik di lapisan atas maupun pada lapisan di bawahnya. Tanah ini memiliki fungsi ekologis penting dalam mendukung siklus karbon, air, dan siklus nutrisi.

Kondisi karakteristik utama tanah pada lahan hutan:

a. Struktur Tanah

Struktur tanah di lahan hutan mencakup agregasi partikel tanah (pasir, debu, dan liat) yang membentuk berbagai jenis struktur, seperti granular, blok, atau prismatic. Dalam ekosistem hutan, struktur tanah sangat dipengaruhi oleh:

- ❖ **Aktivitas Biologi:** Mikroorganisme, akar tanaman, dan fauna tanah (seperti cacing tanah) yang membantu pembentukan agregat tanah.
- ❖ **Bahan Organik:** Dekomposisi daun, ranting, dan bahan organik lainnya meningkatkan kestabilan agregat tanah.

Struktur di Lapisan Atas (Horizon O dan A): Granular atau remah: Umum ditemukan di lapisan atas tanah hutan karena bahan organik tinggi. Agregat ini meningkatkan infiltrasi air dan pergerakan udara. Struktur ini mendukung aktivitas akar dan mempercepat siklus nutrisi.

Struktur di Lapisan Bawah (Horizon B): Blok subangular atau prismatic: Sering ditemukan di lapisan bawah, yang lebih kaya akan mineral. Struktur ini lebih padat dibandingkan horizon atas tetapi tetap mendukung drainase air.

Stabilitas struktur tanah di lahan hutan penting untuk melindungi tanah dari erosi dan mempertahankan fungsi ekosistem, terutama di kawasan dengan lereng curam.

b. Porositas Tanah

Porositas tanah adalah proporsi ruang kosong (pori-pori) di antara partikel tanah yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan air dan udara. Dalam kondisi alami hutan, tanah memiliki porositas tinggi yang mendukung fungsi ekosistem.

Jenis Pori-pori di Tanah Hutan: Makropori (Poros Besar) Terbentuk dari aktivitas akar tanaman dan fauna tanah. Berfungsi untuk drainase air yang cepat dan menyediakan udara bagi mikroorganisme aerobik. Sangat penting di kawasan hutan tropis yang menerima curah hujan tinggi. Mikropori (Poros Kecil): Terdapat pada agregat tanah halus dan bahan organik. Berfungsi untuk menyimpan air kapiler yang dapat diakses oleh tanaman.

Porositas tanah hutan umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan tanah di lahan pertanian, karena minimnya gangguan mekanis seperti pengolahan tanah. Selain itu, keberadaan bahan organik juga meningkatkan total porositas dan kapasitas tanah menyimpan air.

Fungsi Porositas dalam Ekosistem Hutan: Mendukung infiltrasi air, mencegah limpasan permukaan yang berlebihan, dan mengisi cadangan air tanah. Menyediakan habitat bagi organisme tanah. Menjaga keseimbangan siklus karbon dengan mendukung dekomposisi bahan organik secara aerobik.

c. Tekstur Tanah

Tekstur tanah mengacu pada persentase relatif dari pasir, debu, dan liat yang membentuk tanah. Dalam kondisi alami hutan, tekstur tanah bervariasi tergantung pada batuan induk, iklim, dan vegetasi.

Ciri-ciri Tekstur Tanah di Hutan: Tanah Bertekstur Halus (Lempung atau Lempung Berliat); Sering ditemukan di hutan tropis basah; Tinggi kapasitas menahan air dan nutrisi; Meskipun drainasinya lambat, bahan organik hutan meningkatkan aerasi dan permeabilitas. Tanah Bertekstur Kasar (Pasir atau Lempung Berpasir); Umum ditemukan di hutan sabana atau hutan dengan curah hujan rendah; Memiliki drainase yang cepat tetapi rendah dalam kapasitas menyimpan air dan nutrisi.

Pengaruh Vegetasi pada Tanah; Vegetasi hutan meningkatkan agregasi partikel tanah melalui eksudat akar dan aktivitas fauna tanah, memperbaiki kemampuan tanah dalam mempertahankan nutrisi; Tekstur tanah yang kasar pada lahan hutan sering kali dimitigasi oleh kandungan bahan organik yang tinggi, yang meningkatkan kapasitas pertukaran kation (CEC) dan kemampuan tanah menyimpan air.

d. Interaksi Struktur, Porositas, dan Tekstur

Ketiga karakteristik ini saling berhubungan untuk mendukung fungsi ekosistem hutan:

- ❖ Struktur tanah menentukan distribusi pori-pori besar dan kecil, yang memengaruhi porositas tanah.
- ❖ Tekstur tanah memengaruhi kapasitas tanah menyimpan air dan nutrisi, tetapi struktur tanah dan bahan organik dapat meningkatkan fungsi tanah meskipun teksturnya kurang ideal.
- ❖ Porositas yang tinggi di lahan hutan membantu menjaga keseimbangan siklus hidrologi, mencegah erosi, dan mempertahankan keanekaragaman hayati mikroba tanah.

e. Kandungan Bahan Organik dan Perannya terhadap Agregasi Tanah

Bahan organik tanah memainkan peran krusial dalam menjaga stabilitas struktur tanah di ekosistem hutan. Kandungan bahan organik yang tinggi berasal dari dekomposisi serasah daun, ranting, dan akar tumbuhan. Bahan organik ini bertindak sebagai perekat alami yang memperkuat agregasi tanah, meningkatkan kemantapan struktur, dan memperbaiki kemampuan tanah untuk menahan air dan nutrisi (Bot dan Benites, 2005). Selain itu, bahan organik juga mendukung aktivitas biologis tanah, seperti cacing tanah dan mikroorganisme, yang berkontribusi pada pembentukan pori tanah dan sirkulasi udara.

f. Infiltrasi Air dan Kapasitas Retensi Tanah di Hutan

Hutan memiliki kemampuan yang luar biasa dalam mengatur siklus hidrologi, terutama melalui infiltrasi air dan kapasitas retensi tanah. Penutup vegetasi alami melindungi tanah dari pukulan langsung air hujan, sehingga mengurangi risiko pemadatan dan erosi. Porositas

tanah yang tinggi memungkinkan air hujan meresap dengan cepat ke dalam tanah, mengisi pori-pori dan mencegah aliran permukaan yang berlebihan (Hillel, 2008). Selain itu, kemampuan retensi tanah di ekosistem hutan didukung oleh bahan organik yang berfungsi seperti spons, menyimpan air untuk digunakan oleh tanaman selama periode kering.

Studi menunjukkan bahwa tanah hutan tropis, meskipun sering kali memiliki kadar liat tinggi, tetap mampu mendukung infiltrasi dan retensi air yang baik berkat tingginya kandungan bahan organik dan keberadaan akar tanaman yang menciptakan jalur makropori (Lal, 2003). Hal ini menjadikan tanah hutan sebagai reservoir air alami yang penting untuk keberlanjutan ekosistem dan mitigasi banjir.

3. Pengaruh Konversi Lahan Hutan Terhadap Sifat Fisika Tanah

a. Struktur Tanah

Konversi lahan dari hutan ke perkebunan kakao sering kali melibatkan pembukaan lahan secara mekanis yang merusak struktur tanah. Aktivitas ini mengakibatkan penurunan stabilitas agregat tanah dan peningkatan *bulk density* (kepadatan isi tanah), yang selanjutnya menurunkan kemampuan tanah untuk mendukung infiltrasi dan aerasi (Lal, 2003). Pengolahan tanah untuk perkebunan kakao juga dapat memicu degradasi tanah jika tidak dikelola dengan benar.

Konversi lahan, seperti penggundulan hutan, penanaman tanaman baru, dan aktivitas pengolahan tanah, membawa dampak signifikan terhadap struktur tanah. Struktur tanah yang baik sangat penting untuk menjaga fungsi tanah, seperti infiltrasi air, pertukaran gas, dan stabilitas agregat tanah.

Stabilitas Agregat Tanah

Penggundulan hutan dapat mengurangi stabilitas agregat tanah secara signifikan. Hutan menyediakan tutupan vegetasi yang melindungi tanah dari erosi dan meningkatkan bahan organik melalui serasah daun. Ketika hutan digunduli, kehilangan bahan organik mengurangi agregasi partikel tanah. Proses ini mengakibatkan:

- ❖ Peningkatan erosi tanah – Partikel tanah menjadi lebih rentan terbawa oleh air hujan.
- ❖ Penurunan porositas tanah – Tanah yang kehilangan agregat stabil akan memiliki pori-pori yang lebih kecil, mengurangi kemampuan tanah menyerap air.
- ❖ Peningkatan sedimentasi – Partikel halus yang terbawa erosi dapat menyumbat badan air, menurunkan kualitas air di sekitar kawasan tersebut.

Menurut penelitian oleh Lal (1997), penggundulan hutan di daerah tropis mengurangi kandungan bahan organik tanah hingga 50% dalam waktu 10 tahun. Bahan organik sangat penting untuk pembentukan agregat yang stabil karena berperan sebagai perekat antara partikel-partikel tanah.

Perubahan Bulk Density (Kepadatan Isi) Tanah

Tanaman kakao sering digunakan dalam sistem agroforestri. Namun dapat menyebabkan perubahan *bulk density* tanah, terutama bila dilakukan tanpa pengelolaan tanah yang baik. Perubahan *bulk density* ini terjadi karena (Monde *et al.*, 2008),:

- ❖ Penurunan vegetasi alami – Penanaman kakao biasanya melibatkan pembersihan vegetasi awal, yang mengurangi biomassa akar di tanah.
- ❖ Pemadatan tanah akibat aktivitas manusia – Penyiapan lahan, proses pemeliharaan tanaman seperti pemupukan dan pemanenan dapat meningkatkan tekanan pada tanah, terutama bila alat berat digunakan.

Hasil penelitian Adu-Bredu *et al.* (2011) menunjukkan bahwa *bulk density* tanah di kebun kakao yang sudah tua (di atas 10 tahun) meningkat sebesar 15% dibandingkan dengan hutan primer. Kepadatan yang tinggi ini mengurangi ruang pori tanah, sehingga membatasi infiltrasi air dan penetrasi akar.

Kemantapan Struktur Akibat Aktivitas Pengolahan Tanah

Pengolahan tanah yang intensif, seperti membajak dan mencangkul, dapat merusak kemantapan struktur tanah. Aktivitas ini memecah agregat tanah menjadi partikel-partikel lebih kecil, yang mudah terbawa erosi. Dampak lain dari aktivitas pengolahan tanah meliputi:

- ❖ Penurunan kadar bahan organik – Pembalikan tanah mengakibatkan dekomposisi bahan organik lebih cepat, sehingga mengurangi bahan perekat alami untuk membentuk agregat.
- ❖ Kerusakan mikroorganisme tanah – Pengolahan tanah mengganggu habitat mikroorganisme yang berperan penting dalam agregasi tanah.
- ❖ Penurunan kemampuan tanah menahan air – Tanah yang terganggu memiliki kapasitas penahanan air lebih rendah.

Sebagai contoh, penelitian Six *et al.* (2000) menemukan bahwa sistem pengolahan tanah tanpa olah tanah (no-tillage) mempertahankan kemantapan agregat tanah hingga 40% lebih baik dibandingkan dengan sistem pengolahan tanah konvensional.

Konversi lahan membawa dampak besar terhadap struktur tanah. Penggundulan hutan, penanaman kakao, dan aktivitas pengolahan tanah dapat mengubah stabilitas agregat, *bulk density*, dan kemantapan struktur tanah. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan tanah yang bijaksana untuk meminimalkan dampak negatif terhadap tanah dan mendukung keberlanjutan lingkungan.

b. Perubahan Porositas dan Ruang Pori Tanah

Penurunan porositas tanah menjadi salah satu dampak utama dari alih guna lahan. Pemadatan tanah akibat aktivitas manusia seperti penggunaan alat berat dan pengelolaan kebun dapat mengurangi ruang pori makro tanah (Hillel, 2008). Akibatnya, pergerakan air dan udara di dalam tanah menjadi terhambat, yang dapat memengaruhi pertumbuhan akar tanaman kakao.

Aktivitas pertanian intensif seperti pembajakan, pemupukan, dan irigasi dapat memengaruhi distribusi ruang pori tanah. Ruang pori tanah terdiri atas pori makro (besar) dan pori mikro (kecil). Pengelolaan tanah yang buruk dapat menyebabkan:

- ❖ *Penurunan pori makro* – Aktivitas seperti pemadatan mekanis mengurangi jumlah pori besar, yang penting untuk infiltrasi air.

- ❖ *Peningkatan pori mikro* – Dekomposisi bahan organik yang tidak merata menghasilkan partikel kecil yang menyumbat pori besar, mengubahnya menjadi pori mikro.

Menurut penelitian oleh Dexter (2004), pengolahan tanah yang berulang menyebabkan redistribusi pori-pori, dengan peningkatan kepadatan di lapisan bawah tanah. Hal ini menghambat pergerakan air dan oksigen, yang berujung pada penurunan produktivitas tanaman.

Pemadatan tanah pada perkebunan kakao sering kali terjadi akibat penggunaan alat berat dan lalu lintas manusia selama pemeliharaan tanaman. Penurunan porositas makro mengurangi infiltrasi air dan sirkulasi udara di dalam tanah. Studi oleh Asare *et al.* (2015) menunjukkan bahwa perkebunan kakao di wilayah tropis mengalami penurunan porositas makro sebesar 10–20% dibandingkan dengan hutan alami. Penurunan ini juga memengaruhi pertumbuhan akar tanaman karena ruang untuk ekspansi akar terbatas.

c. Perubahan Sifat Hidrologi Tanah

Alih guna lahan memengaruhi sifat hidrologi tanah, termasuk infiltrasi dan kapasitas retensi air. Tanah yang kehilangan penutup vegetasi alami akan mengalami penurunan infiltrasi dan peningkatan aliran permukaan (*runoff*), yang pada akhirnya meningkatkan risiko erosi (Morgan, 2005). Selain itu, kapasitas air tersedia untuk tanaman dapat menurun akibat perubahan struktur tanah.

d. Dinamika Suhu Tanah dan Penutup Lahan

Hilangnya naungan dari hutan menyebabkan peningkatan suhu tanah di perkebunan kakao. Peningkatan suhu ini dapat mengakibatkan penguraian bahan organik tanah yang lebih cepat, sehingga mengurangi stabilitas agregat tanah (Bot dan Benites, 2005). Perubahan ini juga memengaruhi aktivitas biologis tanah, yang merupakan komponen penting dalam menjaga kualitas tanah.

4. Mitigasi dan Pengelolaan Berkelanjutan

Pengelolaan tanah yang baik dapat meminimalkan dampak negatif dari alih guna lahan. Teknik seperti penggunaan mulsa, agroforestri kakao, dan praktik konservasi tanah dapat membantu mempertahankan struktur tanah dan mengurangi erosi (Van Noordwijk *et al.*, 2016). Selain itu, rehabilitasi lahan melalui penanaman kembali pohon-pohon peneduh dapat mengembalikan fungsi ekologis tanah. Dalam upaya untuk mengelola lahan kakao secara berkelanjutan, strategi pemeliharaan kualitas tanah sangat penting. Langkah-langkah pemeliharaan termasuk pemilihan jenis tanaman penutup tanah, teknik pengolahan tanah yang ramah lingkungan, penggunaan bahan organik, dan metode konservasi tanah.

Alih guna lahan hutan menjadi perkebunan kakao di Indonesia telah memberikan contoh nyata bagaimana sifat fisik tanah berubah. Sebuah studi menunjukkan bahwa tanah di wilayah konversi mengalami peningkatan bulk density sebesar 20% dan penurunan infiltrasi air hingga 30% dibandingkan tanah hutan alami (Rachman *et al.*, 2020). Kasus ini menekankan pentingnya strategi pengelolaan yang berkelanjutan.

Alih guna lahan dari hutan menjadi perkebunan kakao membawa dampak signifikan terhadap dinamika fisika tanah, termasuk perubahan struktur, porositas, dan sifat hidrologi. Untuk mencegah degradasi lebih lanjut, diperlukan pengelolaan yang berkelanjutan seperti

agroforestri dan konservasi tanah. Dengan demikian, produksi kakao dapat dilakukan tanpa mengorbankan kualitas lingkungan.

Penelitian telah menunjukkan bahwa penerapan strategi pemeliharaan kualitas tanah ini dapat membantu mempertahankan kesuburan tanah, meningkatkan ketersediaan air tanah, serta mengurangi erosi dan pencemaran tanah. Dengan pemeliharaan kualitas tanah yang baik, lahan kakao dapat dikelola secara berkelanjutan dengan tetap memperhatikan keseimbangan ekosistem.

Daftar Pustaka

- Adu-Bredu, S., Næss, S., & Akwasi, A. (2011). "Soil bulk density under cocoa agroforestry systems." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 40(2), 195-202.
- Asare, R., Afari-Sefa, V., & Osei-Owusu, Y. (2015). "Impact of cocoa farming on soil porosity and structure." *International Journal of Soil Science*, 10(1), 15-23.
- Beare, M. H., & Coleman, D. C. (2002). *Soil Organic Matter and Ecosystem Services*. Kluwer Academic Publishers.
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The Importance of Soil Organic Matter*. FAO.
- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Charman, P. E. V., & Murphy, B. W. (2007). *Soils: Their Properties and Management*. Oxford University Press.
- Dexter, A. R. (2004). "Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, and density." *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- Dumanski, J., & Peiretti, R. (2013). *Agro-Environmental Sustainability*. Elsevier.
- Fageria, N. K. (2007). *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press.
- FAO. (2006). *Guidelines for Soil Description* (4th ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gupta, S. C., & Larson, W. E. (2021). *Soil physical properties and crop production*. CRC Press.
- Hartemink, A. E. (2006). *Soil Fertility Decline in the Tropics*. CABI.
- Hillel, D. (2008). *Soil in the Environment: Crucible of Terrestrial Life*. Academic Press.
- Hoffmann, U., & Behrendt, H. (2013). *Impact of Land Use Change on Soil Properties*. Springer.
- Lal, R. (2015). *Soil Management: A Global Perspective*. Taylor & Francis.
- Lal, R. (2020). *Soil and Water Conservation for Sustainable Development*. Springer.
- Monde A., Sinukaban N., Murtlaksono K., dan Pandjaitan N H., 2008. *Dinamika Kualitas Tanah, Erosi, dan Pendapatan Petani Akibat Alih guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Kakao di DAS Novu, Sulawesi Tengah*. Forum Pascasarjana Vol. 31 No, 3. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor
- Montanarella, L., & Toth, G. (2012). *Soil Conservation and Sustainable Agriculture*. Elsevier.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing.
- Pimentel, D., & Kounang, N. (2000). *Land Degradation and Sustainability*. Springer.
- Rachman, A., Arsyad, S., & Sunarti, R. (2020). *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press.
- Six, J., Feller, C., & Denef, K. (2000). "Soil organic matter, biota, and aggregation in temperate and tropical soils." *Plant and Soil*, 30(3), 43-57.
- Tan, K. H. (2005). *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. Taylor & Francis.

- Van Noordwijk, M., Lusiana, B., & Leimona, B. (2016). *Agroforestry for Sustainable Land-use*. Springer.
- Wild, A. (1993). *Soils and the Environment: An Introduction*. Cambridge University Press.
- Zougmore, R., et al. (2004). *Managing Soil and Water for Food Security*. CABI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur saya haturkan ke hadirat **Tuhan Yang Maha Pengasih**, yang dengan limpahan kasih dan karunia-Nya telah memberikan kekuatan, kesehatan, dan kesempatan kepada saya untuk menuntaskan perjalanan ini. Tanpa bimbingan dan pertolongan-Nya, langkah ini takkan pernah sampai sejauh ini.

Pada kesempatan yang penuh kebahagiaan ini, dengan hati yang penuh rasa hormat dan syukur, izinkan saya menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi besar dalam hidup dan perjalanan akademik saya.

Pertama-tama, saya mengucapkan rasa hormat dan penghargaan yang mendalam kepada **Rektor dan Wakil Rektor, Ketua dan Sekretaris Senat, Ketua Dewan Guru Besar Universitas Tadulako** yang telah menciptakan lingkungan akademik yang kondusif dan mendukung, serta memimpin institusi ini dengan penuh dedikasi demi kemajuan pendidikan.

Kepada **Dekan Fakultas Pertanian** beserta **para Wakil Dekan**, terima kasih atas kepemimpinan dan dukungan yang diberikan kepada saya selama proses penyiapan dan pengajuan berkas pengusulan Jabatan Fungsional guru besar ke Dikti dan bahkan sejak menempuh pendidikan sebelumnya.

Dengan penuh rasa cinta dan penghormatan, ucapan terima kasih ini saya persembahkan kepada **orang tua tercinta**, almarhum **Bapak Yohanis Sampe** dan almarhumah **Ibu Lince Rance** dan paman saya almarhum **Drs. Andriyas Rande**. Kalian adalah pilar utama dalam hidup saya, yang selalu mendampingi setiap langkah dengan doa-doa tulus yang tak pernah putus. Meski kini telah berpulang, warisan cinta, nilai-nilai kehidupan, dan teladan kerja keras kalian selalu hidup dalam hati dan langkah saya. Kehadiran kalian tetap terasa nyata dalam setiap pencapaian ini.

Ucapan terima kasih yang tak kalah besar saya haturkan kepada **mertua tercinta**, almarhum **Bapak Simon Banne** dan **Ibu Adolfina Limbong**, atas kasih sayang, dukungan moril, dan doa yang selalu mengiringi perjalanan saya. Kehadiran kalian melengkapi kekuatan dan semangat saya untuk terus maju.

Kepada **istri tercinta, Frida Pare, S.Pd.**, sosok yang dengan setia mendampingi saya di setiap masa, baik dalam suka maupun duka, saya ucapkan terima kasih atas cinta yang tiada henti, kesabaran, pengorbanan, dan pengertian yang diberikan. Engkaulah tiang penopang keluarga, inspirasi saya dalam menjalani hidup, dan pelita yang menerangi setiap langkah saya.

Kepada anak-anak kami yang tercinta, **Rian, Bela, dan Valencia**, kalian adalah cahaya kebahagiaan dan kekuatan terbesar saya. Terima kasih telah menjadi sumber semangat yang selalu mendorong saya untuk terus berusaha dan memberikan yang terbaik. Masa depan kalian adalah motivasi saya untuk tak pernah berhenti belajar dan berkarya.

Saya juga ingin menyampaikan rasa syukur dan terima kasih kepada saudara-saudara saya: **Soleman Songgo, Ruth Sampe, Elis Yohanes, Estepanus Salu, Agustina Dolok, Siana Buntu, dan Maria Lalek**, yang selalu hadir dengan doa, dukungan moril, dan cinta kasih yang tak terhingga. Kalian adalah keluarga yang memberikan kekuatan dalam setiap langkah perjalanan hidup saya.

Ucapan terima kasih ini juga saya tujukan kepada para kolega di Fakultas Pertanian, yang telah menjadi mitra diskusi, teman seperjuangan, dan pendukung dalam perjalanan akademik saya. Secara khusus, saya ingin menyampaikan apresiasi mendalam kepada **Prof. Fathurrahman, Prof. Efendy**, yang telah memberi motivasi yang diberikan telah membentuk dasar-dasar pengetahuan dan sikap profesional saya dan **Prof. Abdul Rahim Thaha, Dr Ir. Murniati M.S., dan Ibu Ir. Nur Afni** yang telah menjadi pembimbing saya selama jenjang S1.

Saya juga menghaturkan rasa hormat kepada para pembimbing saya di jenjang S2 **di Unhas, Dr. Ir. Anna K. Pairunan dan Prof. Solo Samosir**, atas arahan, perhatian, dan dukungan yang diberikan dengan penuh kesabaran selama proses penelitian dan penulisan tesis saya.

Terakhir, rasa terima kasih yang sebesar-besarnya saya persembahkan kepada para pembimbing disertasi saya, **Prof. Naik Sinukaban, Prof. Kukuh Murtilaksono, dan Dr. Nora S. Pandjaitan**, yang telah menjadi mentor luar biasa selama saya menempuh pendidikan **doktora di IPB**. Kalian telah memberikan arahan, motivasi, dan koreksi yang sangat berharga, serta menunjukkan kesabaran yang luar biasa dalam membimbing saya hingga tuntas.

Perjalanan ini tentu tidaklah mudah, tetapi berkat dukungan, cinta, doa, dan pengorbanan dari semua pihak yang telah disebutkan, saya dapat melewati setiap tantangan dengan semangat dan keyakinan. Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan dan kasih yang telah kalian berikan, melimpahkan berkah-Nya kepada kita semua, dan senantiasa memberikan rahmat dalam setiap langkah kita ke depan.

Hormat saya,

[Prof. Dr. Ir. Anthon Monde, M.P.]

