

Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi:

Kuantifikasi jasa lingkungan air dan karbon pola agroforestri pada hutan rakyat di wilayah sungai Jeneberang

*M. Siarudin, Edy Junaidi, Ary Widiyanto, Yonky Indrajaya, Ni'matul Khasanah,
Lisa Tanika, Betha Lusiana, James M Roshetko*



**World
Agroforestry
Centre**

Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi:

Kuantifikasi jasa lingkungan air dan karbon pola agroforestri pada hutan rakyat di wilayah sungai Jeneberang

M. Siarudin, Edy Junaidi, Ary Widiyanto, Yonky Indrajaya, Ni'matul Khasanah,
Lisa Tanika, Betha Lusiana, James M Roshetko

Working paper no. 184

Canada





Correct citation:

Siarudin M, Junaidi E, Widiyanto A, Indrajaya Y, Khasanah N, Tanika L, Lusiana B, Roshetko JM. 2014. *Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Kuantifikasi jasa lingkungan air dan karbon pola agroforestri pada hutan rakyat di wilayah sungai Jeneberang*. Working paper 184. Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program. 67p. DOI: 10.5716/WP14391.PDF.

Titles in the Working Paper Series aim to disseminate interim results on agroforestry research and practices and stimulate feedback from the scientific community. Other publication series from the World Agroforestry Centre include: Agroforestry Perspectives, Technical Manuals and Occasional Papers.

Published by the World Agroforestry Centre
Southeast Asia Regional Program
PO Box 161, Bogor 16001
Indonesia

Translated by Ariyantri E. Tarman

Tel: +62 251 8625415
Fax: +62 251 8625416
Email: icraf-indonesia@cgiar.org
Website: http://worldagroforestry.org/regions/southeast_asia

© World Agroforestry Centre 2014
Working Paper 184

Photos:

The views expressed in this publication are those of the author(s) and not necessarily those of the World Agroforestry Centre.

Articles appearing in this publication may be quoted or reproduced without charge, provided the source is acknowledged.

All images remain the sole property of their source and may not be used for any purpose without written permission of the source.

Tentang Penulis

Mohamad Siarudin (Didien) menjadi peneliti di Badan Litbang Kehutanan, Kementerian Kehutanan sejak tahun 2004 dan ditugaskan pada Balai Penelitian Teknologi Agroforestry, Ciamis (sebelumnya bernama Balai Penelitian Kehutanan Ciamis). Didien memperoleh gelar Sarjana Kehutanan dari Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada (UGM) dan gelar Master dibidang Perencanaan Wilayah dan Kota di Institut Teknologi Bandung (ITB) serta Media dan Governance di Keio University, Jepang. Pada tahun 2004 – 2009, Didien terlibat dalam beberapa penelitian di bidang social forestry baik di hutan rakyat maupun di kawasan hutan Negara. Sejak tahun 2012, Didien tergabung dengan Kelompok Peneliti Sumber Daya Lingkungan yang salah satu penelitiannya fokus pada jasa lingkungan karbon pada system agroforestri di hutan rakyat.

Edy Junaidi memulai karirnya sebagai peneliti di litbang Kehutanan Makassar pada Tahun 2002 dengan kepakaran di bidang konservasi tanah dan air dalam pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS). Pada Tahun 2009, Edy menerima gelar master dibidang pengelolaan DAS dari Institut Pertanian Bogor (IPB) dengan tesis tentang pemanfaatan model hidrologi dalam bidang pengelolaan DAS. Pada tahun 2007, Edy dipindahkan tugas di Litbang Kehutanan Ciamis dan bergabung dengan kelompok peneliti Sumber Daya Lingkungan. Semenjak itu, Edy banyak terlibat penelitian dibidang jasa lingkungan hutan rakyat dan agroforestry, serta penelitian tata ruang dibidang lanskap agroforestry. Bidang penelitian yang digeluti Edy sekarang berupa pemanfaatan model hidrologi dan pemanfaatan GIS dalam pengelolaan DAS dan lanskap agroforestry.

Ary Widiyanto menjadi peneliti di Kementerian Kehutanan sejak tahun 2009 dan bertugas di Balai Penelitian Teknologi Agroforestry (BPTA) Ciamis. Berlatar belakang sarjana kehutanan dari Institut Pertanian Bogor (IPB), Ary banyak terlibat pada penelitian-penelitian di bidang sumber daya lingkungan hutan seperti kajian tata air, siklus hara, karbon dan hasil hutan. Saat ini sedang menempuh pendidikan S2 di Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta.

Yonky Indrajaya memulai karirnya sebagai penelitian di Litbang Kehutanan Surakarta pada tahun 2002 dengan fokus penelitian tentang hidrologi hutan dan pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS). Pada tahun 2006, Yonky menerima gelar master dalam bidang perencanaan wilayah dari Institut Teknologi Bandung (ITB) dan University of Groningen (RuG) Belanda dengan tesis tentang pengelolaan DAS berkelanjutan. Pada tahun 2007, Yonky dipindahkan tugas di Litbang Kehutanan Ciamis dan bergabung dengan kelompok peneliti Jasa Lingkungan. Yonky banyak terlibat di penelitian hutan rakyat dan agroforestry khususnya pada aspek ekonomi semenjak dia memulai sekolahnya di Wageningen University, Belanda di bidang ekonomi lingkungan pada tahun 2009.

Bidang penelitian yang digeluti Yonky sekarang adalah bidang manajemen hutan dan perubahan iklim.

Ni'matul Khasanah bergabung dengan ICRAF sejak 2002 and banyak terlibat dalam studi pemodelan berbagai macam sistem agroforestry menggunakan model Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry (WaNuLCAS). Ni'ma memperoleh gelar Master dibidang Agroklimatologi dari Institute Pertanian Bogor (IPB). Saat ini, Ni'ma terlibat dalam penelitian-penelitian dalam ruang lingkup manajemen sumber daya alam yang berkaitan dengan issue-issue perubahan iklim dan pengelolaan daerah aliran sungai.

Lisa Tanika bergabung dengan ICRAF sejak 2008 sebagai ecological modeler terutama pemodelan Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan menggunakan Model Generic River Flow (GenRiver). Lisa dengan latar belakang pendidikan sebagai sarjana sains di bidang Matematika dan Master dibidang Klimatologi Terapan dari Institut Pertanian Bogor (IPB) banyak terlibat dalam berbagai penelitian dalam bidang hidrologi khususnya dalam penilaian kondisi DAS dengan menggunakan model GenRiver. Saat ini, topik-topik penelitian hidrologi terkait perubahan tutupan lahan dan perubahan iklim menjadi fokus utama penelitian.

Betha Lusiana berkecimpung di bidang pemodelan selama lebih dari 15 tahun. Betha memperoleh gelar Dr dari Universitas Hohenheim, Jerman. Saat ini Betha menjabat sebagai Kepala Unit Ecological Modelling di ICRAF. Unit ini bertanggung jawab atas kegiatan pengambilan data dan pemodelan di bidang keanekaragaman hayati, karbon, dan pengelolaan daerah aliran sungai. Topik penelitian yang diminati terkait dengan pemanfaatan model simulasi untuk pengelolaan sumber daya alam, khususnya bagaimana meningkatkan penggunaan model dan hasil keluaran model dalam menyusun kebijakan pengelolaan sumber daya alam.

James M Roshetko adalah Senior Integrated Natural Resource Management Scientist di World Agroforestry Centre (ICRAF) dan Winrock International. Dia menjabat Kepala Unit Pohon dan Pasar ICRAF Asia Tenggara dengan 33 tahun pengalaman, termasuk 16 tahun di Indonesia dan 27 tahun di Asia Selatan dan Tenggara. Jim sekarang menjabat sebagai Pimpinan Tim Senior proyek Agroforestry and Forestry in Sulawesi: Linking Knowledge with Action yang didanai oleh CIDA. Minat penelitian dan pengembangannya berfokus pada sistem berbasis pohon yang dikelola petani skala kecil sebagai sistem pengelolaan pertanian dan sumber daya alam yang viabel dan berkontribusi secara nyata pada tujuan ekonomi lokal juga lingkungan secara global.

Abstrak

Agroforestri sebagai salah satu bentuk tutupan vegetasi yang menyerupai hutan memiliki potensi untuk mengatur tata air. Sistem agroforestri juga memiliki potensi yang lain yaitu menambat karbon melalui proses produksi biomassa. Tulisan ini merupakan hasil penelitian yang dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Balantieng, yang secara administratif berada di tiga kabupaten, yaitu: Kabupaten Bulukumba, Kabupaten Bantaeng, dan Kabupaten Sinjai, namun sebagian besar wilayahnya berada di Kabupaten Bulukumba. Lokasi yang merupakan salah satu lokasi kegiatan Proyek AgFor ini juga mewakili daerah dengan tutupan lahan hutan yang masih relatif terjaga. Tujuan dari tulisan ini adalah mengkaji potensi agroforestri dalam menambat karbon dan menjaga fungsi DAS. Tingkat deforestasi kawasan hutan alam di DAS Balantieng mencapai 3,9 ha/th pada kurun 1989-1999 dan 98,3 ha/tahun pada kurun 1999-2009. Sistem penggunaan lahan agroforestri Balangtieng cukup berkembang, mencapai 57 % dari total luas DAS Balangtieng. Dengan total luasan ini, agroforestri mampu menyerap 1.481.101 ton karbon atau 76 % dari cadangan karbon total di seluruh wilayah DAS Balangtieng. Namun demikian perubahan penggunaan lahan secara keseluruhan di wilayah ini menyebabkan terjadinya emisi karbon sebesar 20.164 ton CO₂-eq/th pada kurun waktu 1989-1999 dan 136.193 ton CO₂-eq/th pada kurun waktu 1999-2009. Berdasarkan hasil survei pengetahuan ekologi lokal, penurunan tingkat produksi kebun coklat akibat serangan hama penyakit menyebabkan petani tertarik untuk menggantinya dengan pola sistem cengkeh (*Syzygium Aromaticum* (L.) Merrill & Perry) dan karet (*Hevea braziliensis*). Berdasarkan temuan ini disusun skenario perubahan penggunaan lahan: Skenario I: Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS; Skenario II: Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS; Skenario III: Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%; Skenario IV: Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50% dan *Skenario Business as Usual* (BAU) yang merepresentasikan kondisi perubahan penggunaan lahan yang sama seperti periode tahun 1999 – 2009. Hasil pemodelan dengan menggunakan model hidrologi GenRiver menunjukkan hasil yang sama untuk semua skenario (I, II, III dan IV). Kemampuan DAS meredam aliran puncak (*buffering peak indicator*) pada skenario I, II, III dan IV lebih tinggi dibandingkan dengan skenario BAU, yang menunjukkan perubahan sistem coklat menjadi sistem cengkeh di bagian hulu DAS meningkatkan kemampuan menyimpan air pada saat musim hujan. Temuan ini perlu diverifikasi dengan data lapangan di tingkat plot. Dari sisi penambatan karbon, seluruh skenario (I, II, III dan IV) menurunkan tingkat emisi dan penurunan terbesar terjadi apabila diimbangi dengan pengurangan laju deforestasi skenario III dan IV). Dengan

demikian perubahan sistem agroforestri coklat menjadi cengkeh dan kopi seperti yang diinginkan masyarakat diprediksi tidak akan memberikan dampak negatif pada fungsi tata air dan memberikan efek positif yaitu penurunan emisi karbon di DAS Balantieng.

Abstract

*Agroforestry systems as a land use systems that mimics forests support ecosystem services by maintaining watershed function in particular regulating water in the landscape. Also through biomass production, agroforestry systems can sequester large amounts of carbon. This paper studied the potential of agroforestry systems to sequester carbon and maintain hydrological function in the Balantieng Watershed, South Sulawesi, which spreads across the districts of Bantaeng, Bulukumba and Sinjai; but is mostly in the jurisdiction of Bulukumba. We estimated the carbon stocks and the hydrological condition in current situation and, using scenario analysis, projected the changes in both ecosystem services with changes in land cover. The forest vegetation under the area is relatively intact, with deforestation rate of 3.9 hectare/year⁻¹ and 98.3 ha/year⁻¹ between the period 1989-1999 and 1999-2009, respectively. The agroforestry systems in Balantieng watershed cover around 57 % of the total area mainly in form of agroforestry coffee, cacao and clove. In total, the agroforestry systems stored 1.48 Giga ton of carbon or 76 % of the total landscape carbon stocks. The amount of carbon emitted during the period of 1989-1999 and 1999-2009 were 20.17 and 136.19 ton CO₂-eq.year⁻¹, respectively. Interviewing farmers in the area, most farmers intend to convert cacao systems into clove (*Syzygium aromaticum* (L.) Merrill & Perry) or rubber (*Hevea brasiliensis*) due to the widespread occurrence of pests and disease that reduce cacao yields. Based on that trend we developed the following land use change scenarios: I – 50% of coffee and cacao systems converted to clove in the upstream and rubber systems in the middle- and down-stream; II - 25% of coffee and cacao agroforestry systems converted to clove in the upstream and monoculture rubber in the middle- and down-stream; III – 50% of coffee and cacao systems converted to clove in the upstream and monoculture rubber systems in the middle- and down-stream, with a reduction of deforestation by 50%; IV – 25% of coffee and cacao systems converted to clove in the upstream and monoculture rubber systems in the middle- and down-stream, with a reduction of deforestation by 50%; and Business as Usual (BAU) that reflect a land cover change similar to what it has been in the period 1999 – 2009. The scenario analysis using GenRiver showed relatively similar results for all scenarios (I, II, III and IV). The buffering peak indicators were slightly higher for scenario I, II, III and IV compared to BAU. This result reflects that changing cacao systems to clove systems in the upstream slightly increased buffering ability during high intensity rainfall, showing the landscape's ability to*

store more water. This finding should be verified with actual plot-level measurements. In terms of the ability to store carbon, all scenarios (1, 2, 3 and 4) reduced emission with the highest reduction reached when deforestation rate were also reduced (scenario 3 and 4). Overall, the study shows that converting cacao agroforestry systems to clove or rubber systems would not have negative effects to watershed function and would have positive effects on carbon sequestration in Balantieng watershed.

Kata kunci: agroforestri; Balantieng – Sulawesi Selatan; fungsi daerah aliran sungai; model GenRiver; penambatan karbon.

Ucapan Terima Kasih

Report ini disusun oleh Balai Penelitian Teknologi Agroforestry bekerja sama dengan ICRAF-SEA dalam proyek **“Kehutanan dan Agroforestri: Menghubungkan pengetahuan dengan tindakan (Proyek AgFor)”** yang didanai oleh **Canadian International Development Agency (CIDA)**, Kanada.

Daftar Isi

1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	2
1.3. Output.....	3
2. Metodologi	3
2.1. Lokasi dan Waktu	3
2.2. Pengumpulan Data	5
2.3. Analisis Data	14
3. Hasil dan Pembahasan.....	24
3.1. Kondisi Umum Lokasi Penelitian.....	24
3.2. Sistem Penggunaan Lahan	27
3.3. Struktur dan Keragaman Jenis Hutan Rakyat.....	30
3.4. Cadangan Karbon pada Skala Plot di DAS Balantieng.....	38
3.5. Estimasi Cadangan Karbon dan Dinamika Cadangan Karbon pada Skala Lanskap di DAS Balantieng	43
3.6. Kondisi Tata Air di DAS Balantieng	44
3.7. Hasil Air dan Karbon pada beberapa Skenario Perubahan Penggunaan Lahan	49
4. Kesimpulan	53
Daftar Pustaka	55

Daftar Gambar

Gambar 1. Peta DAS Balantieng, Sulawesi Selatan.....	3
Gambar 2. Layout plot pengukuran cadangan karbon pola agroforestri	6
Gambar 3. Diagram alur proses hidrologi pada GenRiver	12
Gambar 4. Salah seorang petani menunjukkan pohon karet yang ditanamnya diantara pohon coklat yang mulai tidak produktif.....	14
Gambar 5. Metode klasifikasi citra	14
Gambar 6. Kurva massa ganda hubungan antara komulatif hujan dan komulatif debit.....	19
Gambar 7. Kurva kestabilan aliran (debit ke-t dan debit ke-t +1).....	21
Gambar 8. Kondisi sungai utama DAS Balantieng bagian hulu (A), tengah (B) dan hilir (C)	25
Gambar 9. Curah hujan rata-rata bulanan dan nilai dugaan evapotranspirasi potensial di DAS Balantieng	27
Gambar 10. Sistem kelapa (A) yang banyak terdapat di DAS hilir; sistem coklat di DAS tengah (B); sistem cengkeh (C) dan kopi (E) yang banyak terdapat di daerah DAS hulu.....	27
Gambar 11. Peta Tutupan Lahan DAS Balantieng.....	29
Gambar 12. Sebaran jumlah pohon berdasarkan famili	32
Gambar 13. Sebaran jumlah pohon untuk setiap SPL berdasarkan pemanfaatan pohon	36
Gambar 14. Jumlah pohon berdasarkan kerapatan kayu pada masing-masing SPL	37
Gambar 15. Cadangan karbon berbagai SPL	38
Gambar 16. Jenis nekromasa berkayu yang dijumpai pada plot pengukuran.....	40
Gambar 17. Persentase komponen penyusun cadangan karbon di atas permukaan tanah	42
Gambar 18. Hidrograf debit simulasi dan observasi	45
Gambar 19. Kurva kumulatif antara hujan dan debit (simulasi dan observasi)	46
Gambar 20. Perbandingan aliran yang menyumbang debit sungai pada masing-masing periode	47
Gambar 21. Fraksi evapotranspirasi dan debit periode tahun 1989 – 2009.....	48
Gambar 22. Grafik Hubungan Indikator Fungsi DAS dengan fraksi debit total	48

Daftar Tabel

Tabel 1. Pengamatan tata air dan cadangan karbon pada berbagai pola tutupan lahan berbasis pohon di DAS Balantieng	4
Tabel 2. Skenario perubahan penggunaan lahan	13
Tabel 3. Data iklim, hidrologi dan Jenis tanah DAS Balantieng yang tersedia	17
Tabel 4. Analisis data hujan	18
Tabel 5. Nilai faktor perkalian evapotranspirasi potensial harian	22
Tabel 6. Luasan ordo tanah pada masing-masing sub DAS pada DAS Balantieng	23
Tabel 7. Parameter nilai potensial intersepsi, ambang batas kekeringan dan BD/BD ref	23
Tabel 8. Parameter model Genriver yang digunakan pada analisis DAS Balantieng	24
Tabel 9. Jumlah produksi dan luas perkebunan di Kabupaten Bulukumba.....	25
Tabel 10. Pembagian luas DAS Balantieng menurut kelas kelerengan	26
Tabel 11. Pembagian luas DAS Balantieng menurut Ordo tanah	26
Tabel 12. Hasil klasifikasi tutupan lahan berdasarkan citra landsat tahun 2009	28
Tabel 13. Luas tutupan lahan DAS Balantieng Tahun 1989, 1999 dan 2009	30
Tabel 13. Jumlah tumbuhan pada semua plot penelitian.....	31
Tabel 14. Jumlah jenis dan sebaran kelas diameter pohon pada tiap SPL	33
Tabel 15. Jumlah pohon, kepadatan rata-rata dan basal area untuk setiap SPL	34
Tabel 16. Jumlah pohon berdasarkan pemanfaatannya untuk setiap SPL.....	35
Tabel 17. Kerapatan jenis kayu dan sebarannya pada berbagai SPL	37
Tabel 18. Komponen penyusun cadangan karbon di atas permukaan tanah	39
Tabel 19. Cadangan karbon di atas permukaan tanah masing-masing Sistem Penggunaan Lahan di DAS Balantieng	41
Tabel 20. Komponen penyusun cadangan karbon di bawah permukaan tanah.....	42
Tabel 21. Cadangan karbon pada hutan rakyat pola agroforestri di DAS Balantieng.....	43
Tabel 22. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng pada tahun 1989 - 2009	44
Tabel 23. Hasil indikator statistik.....	45
Tabel 24. Analisis neraca air DAS Balantieng Tahun 1989-2009	46
Tabel 25. Perubahan debit dan evapotranspirasi	47
Tabel 26. Analisis neraca air pada Skenario 1 dan Skenario 2	49
Tabel 27. Perubahan fungsi DAS yang dinyatakan dalam persentasi terhadap kondisi baseline.....	49
Tabel 28. Analisis neraca air pada Skenario 3 dan Skenario 4	50
Tabel 29. Perubahan fungsi DAS yang dinyatakan dalam persentasi terhadap kondisi baseline.....	50
Tabel 30. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 1	51
Tabel 31. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 2	51
Tabel 32. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 3	52
Tabel 33. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 4	53

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Pengelolaan sumberdaya alam seringkali dianjurkan untuk mengikuti batas alaminya (Daerah Aliran Sungai/DAS) agar dapat memberikan manfaat yang berkesinambungan (Gregersen *et al.*, 2007).

Beberapa manfaat yang dapat diberikan oleh suatu DAS diantaranya adalah: air bersih, air irigasi, dan pembangkit listrik; bahan mentah untuk produk kayu, produk pertanian; rekreasi dan obyek wisata; penyerapan karbon dan keanekaragaman hayati.

Pengelolaan sumber daya air mengikuti batas alami DAS karena secara alami DAS akan menampung air hujan dan mengalirkannya melalui sungai untuk diteruskan hingga ke laut (Lal, 2000). Dalam pengelolaan DAS, terdapat tiga aspek yang perlu diperhatikan, yaitu masukan, proses, dan keluaran. Pengelola DAS dapat memanipulasi aspek proses (yaitu penutupan penggunaan lahan) di DAS yang dapat mempengaruhi keluaran (hasil air). Perubahan penggunaan lahan secara nyata berpengaruh terhadap fungsi DAS seperti kualitas air, debit air, pengendali erosi dan sedimentasi di daerah hilir, sehingga perlu mengkaji tipe penggunaan yang bersifat spesifik pada setiap DAS.

Penelitian tentang bagaimana respon perubahan penggunaan lahan (seperti vegetasi) terhadap hasil air telah banyak dilakukan (Bruijnzeel, 1990; Andreassian, 2004; Bruijnzeel, 2004). Pengaruh penutupan lahan vegetasi hutan terhadap hasil air memiliki hasil yang bervariasi (Andreassian, 2004).

Pengurangan vegetasi dalam suatu unit lahan akan meningkatkan atau menurunkan hasil air tahunan total dengan hasil maksimal pada saat terjadinya pengurangan vegetasi tersebut (Bruijnzeel, 2004).

Reforestasi dan konservasi tanah dapat mengurangi aliran puncak, namun belum ada penelitian yang menunjukkan pengaruh vegetasi terhadap aliran bawah (Bruijnzeel, 2004).

Agroforestri sebagai salah satu bentuk tutupan vegetasi yang menyerupai hutan memiliki potensi untuk mengatur tata air terutama debit puncak dalam DAS (Noordwijk *et al.*, 2004). Walaupun tidak dapat sepenuhnya menggantikan fungsi hidrologis hutan alam (Widianto *et al.*, 2004), air limpasan permukaan pada agroforestri kopi menurun sejalan dengan bertambahnya umur tanaman kopi.

Agroforestri dengan sistem pertanaman pohon yang terpecah dapat berfungsi sebagai pengatur drainasi dalam dan salinitas di Australia (Lefroy and Stirzaker, 1999). Penanaman pohon (termasuk dalam sistem agroforestri) dapat mengurangi terjadinya perubahan muka air tanah (*water table*) yang cukup nyata dalam sistem aliran bawah permukaan (Smettem and Harper, 2009).

Pengelolaan DAS juga memiliki potensi untuk mitigasi perubahan iklim melalui pengelolaan tanah yang bertujuan untuk menambatkan karbon maupun mengurangi emisi. Di satu sisi, tanah dapat

mempengaruhi emisi gas rumah kaca (GRK) melalui proses: erosi dan deposisi, (2) pencucian dari karbon organik, dan (3) mineralisasi humus (Kimble and Lal, 2000). Di sisi lain, tanah dapat pula menambat karbon melalui proses: (1) produksi biomassa, (2) air tanah dan dinamika energi, dan (3) agregasi (Kimble and Lal, 2000).

Berbagai penelitian tentang karbon yang tersimpan dalam biomassa agroforestri telah banyak dilakukan (Nair *et al.*, 2009). Albrecht and Kandji (2003) misalnya menyebutkan bahwa jumlah C yang dapat disimpan dalam sistem agroforestri di daerah tropis adalah antara 12 – 228 ton ha⁻¹ dengan nilai tengah sebanyak 95 ton ha⁻¹. Hasil penelitian Roshetko *et al.* (2002) di Pakuan Ratu, Lampung menyebutkan bahwa sistem agroforestri di sekitar pekarangan (homegarden systems) dapat menyimpan karbon dengan kisaran 30 - 123 ton C ha⁻¹ tergantung pada sistem pengelolaan yang diterapkan. Penelitian yang dilakukan oleh Ginoga *et al.* (2004) di Kabupaten Ciamis menunjukkan bahwa pola agroforestri dapat menyerap karbon antara 25-42 ton ha⁻¹. Wardah *et al.* (2011) dalam penelitiannya di Taman Nasional Lore Lindu, Sulawesi Tengah menemukan bahwa sistem agroforestri kompleks yang ada di zona penyangga dapat menyimpan karbon antara 126 – 209 ton ha⁻¹. Sementara itu, pada pola agroforestri tradisional di tempat yang sama hanya menyimpan karbon antara 42 – 83 ton ha⁻¹. Sebuah studi yang cukup komprehensif pada beberapa pola penggunaan lahan di Indonesia menunjukkan bahwa pola agroforestri dapat menyimpan karbon antara 17 – 114 ton ha⁻¹ (Swallow *et al.*, 2007).

Seberapa besar pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap hasil air dan emisi/sekuestrasi GRK yang terjadi dalam suatu DAS penting untuk dilakukan agar dapat dilakukan pengelolaan DAS yang lebih komprehensif. Hasil dari penelitian ini diharapkan akan berkontribusi bagi para pengambil kebijakan di Kabupaten Bulukumba dalam penyusunan rencana pembangunan di wilayahnya, khususnya di DAS Balantieng. Pembangunan berorientasi ekonomi yang rendah emisi dan tata air yang menjamin ketersediaan air bersih bagi para penduduk yang tinggal di DAS merupakan tantangan bagi pengambil kebijakan untuk dapat merumuskan kebijakan yang tepat.

1.2. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

- Mengukur neraca air di DAS Balantieng
- Mengukur cadangan karbon pada skala sistem penggunaan lahan berbasis pohon dan skala lanskap di DAS Balantieng
- Menyusun proyeksi hasil air dan karbon pada DAS Balantieng berdasarkan beberapa skenario perubahan tutupan lahan.

1.3. Output

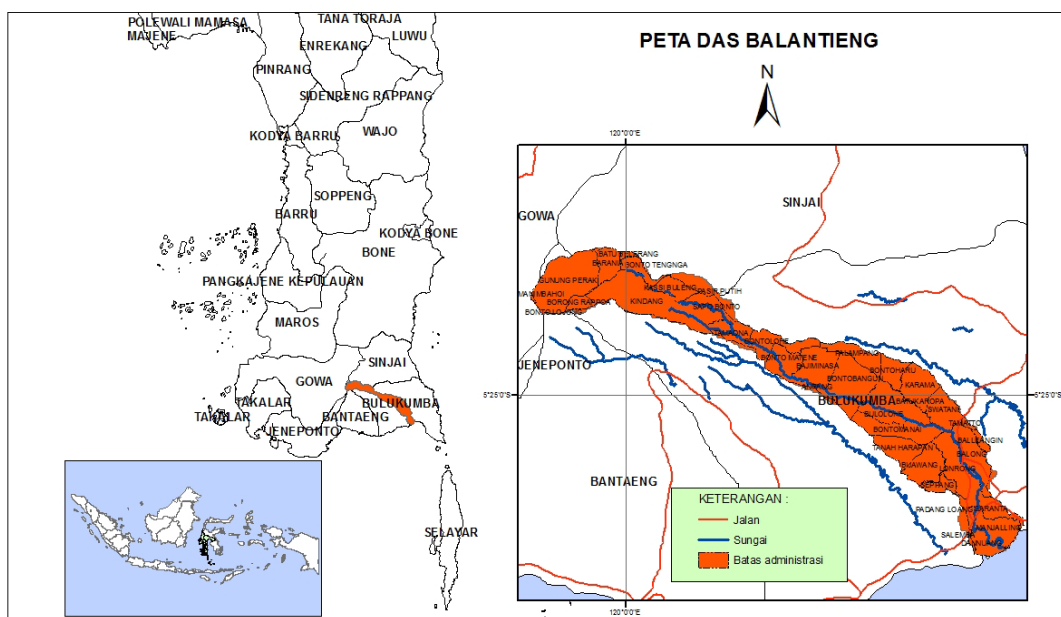
Output yang akan dihasilkan dari penelitian ini adalah:

- Kondisi neraca air dari waktu ke waktu di DAS terpilih pada DAS Balantieng
- Cadangan karbon pada berbagai pola agroforestri di DAS Balantieng
- Cadangan karbon pada skala lanskap DAS Balantieng
- Proyeksi hasil air dan karbon pada DAS terpilih berdasarkan beberapa skenario perubahan tutupan lahan

2. Metodologi

2.1. Lokasi dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di DAS Balantieng, yang secara administratif berada di tiga kabupaten, yaitu: Kabupaten Bulukumba, Kabupaten Bantaeng, dan Kabupaten Sinjai. Sebagian besar wilayah DAS ini berada di Kabupaten Bulukumba. Lokasi ini dipilih karena mewakili DAS yang berada di Kabupaten Bulukumba, yang merupakan salah satu lokasi kegiatan AgFor. Lokasi ini juga mewakili daerah dengan tutupan lahan hutan yang masih relatif terjaga. Lokasi penelitian ini disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Peta DAS Balantieng, Sulawesi Selatan

Pengamatan air dan karbon didasarkan pada pola-pola tutupan lahan berbasis pohon yang ada di DAS Balantieng (Tabel 1). Pengamatan kajian tata air (kondisi tanah dan biofisik tutupan lahan) dilakukan pada 15 plot yang mewakili masing-masing pola tutupan lahan. Sedangkan pengamatan cadangan karbon dilakukan pada pola agroforestri (13 pola) dengan ulangan masing-masing 3 plot (mewakili tegakan berumur muda, pertengahan dan tua) sehingga terdapat 39 plot pengukuran cadangan karbon.

Tabel 1. Pengamatan tata air dan cadangan karbon pada berbagai pola tutupan lahan berbasis pohon di DAS Balantieng

NoSistem penggunaan lahan			Jumlah plot pengamatan		Posisi pada Daerah Aliran Sungai	
			Cadangan karbon	Karakteristik tanah**		
				Tanah terganggu		Tanah tidak terganggu
1	Hutan	Hutan tidak terganggu	-	1 plot	Hulu	
2		Hutan bekas tebangan	-	1 plot	Hulu	
3	Sistem Cengkeh	Agroforestri (AF) sederhana cengkeh	5 plot	5 plot	1 plot	Hulu
4		AF kompleks cengkeh	3 plot	3 plot	1 plot	Hulu dan tengah
5	Sistem kopi	AF sederhana kopi	3 plot	3 plot	1 plot	Upstream
6	Sistem coklat	AF sederhana coklat	3 plot	3 plot	1 plot	Hulu
7	Sistem kelapa	AF kompleks coklat	3 plot	3 plot	1 plot	Tengah dan hilir
8		Monokultur kelapa	3 plot	3 plot	1 plot	Hilir
9		AF sederhana kelapa	3 plot	3 plot	1 plot	Hilir
10		AF kompleks kelapa	3 plot	3 plot	1 plot	Hilir
11	Sistem jambu mete	AF sederhana jambu mete	3 plot	3 plot	1 plot	Tengah
12	Kebun campuran		4 plot	4 plot	1 plot	Tengah dan hilir
13	Sistem gmelina	AF sederhana gmelina	3 plot	3 plot	1 plot	Tengah
14	Sistem karet	Monoculture karet	3 plot	1 plot	1 plot	Tengah dan hilir
Total			39 plot	37 plot	14 plot	

Keterangan: * mewakili tegakan berumur muda, pertengahan, dan tua

** *bulk density*, tekstur tanah, pH KCl, N, C organik

Kegiatan pengambilan data di lapangan dilaksanakan pada bulan September 2013, dengan beberapa persiapan (penyiapan rancangan survei dan koordinasi dengan pemerintah daerah setempat) yang dilaksanakan sejak bulan Juli 2013. Analisis laboratorium dilaksanakan mulai bulan September sampai dengan bulan Desember 2013. Pengolahan data dan analisis serta penulisan *working paper* ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2013 sampai dengan bulan Maret 2014.

2.2. Pengumpulan Data

Jenis data yang digunakan data primer maupun data sekunder. Data primer meliputi data karbon tersimpan dalam biomassa (di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah/ tanah) pola agroforestri yang ada di DAS Balantieng. Data sekunder meliputi data iklim, hidrologi dan tanah yang diperoleh dari lembaga terkait seperti Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) dan dinas pertanian.

Untuk menentukan perubahan penggunaan lahan terhadap hasil air dan emisi yang terjadi diperlukan beberapa peta antara lain: peta sejarah penutupan lahan, peta tata ruang wilayah, peta penunjukkan kawasan dan perairan, peta perkebunan, peta pertambangan, peta jalan, peta sungai, peta batas administrasi, peta ketinggian, demografi, rencana pembangunan jangka menengah daerah. Sementara itu, selain mengukur karbon tersimpan dalam biomassa penutupan lahan tertentu, digunakan pula data sekunder karbon tersimpan dalam berbagai tutupan lahan dari laporan, jurnal. Data peta dan data sekunder pendukung lainnya diperoleh dari: Bakosurtanal, Bappeda Kab. Bulukumba, Dinas Litbang dan Perpustakaan Daerah Kab. Bulukumba, Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Kab. Bulukumba, Dinas Tata Ruang dan Cipta Karya Kab. Bulukumba, Dinas Kehutanan dan Perkebunan Kab. Bulukumba, dan Badan Pusat Statistik Kab. Bulukumba.

Pengukuran cadangan karbon

Pengukuran cadangan karbon pada penelitian ini menggunakan metode Cara Cepat dan Terpadu untuk Menilai Cadangan Karbon pada bentang lahan (*RaCSA/Rapid Carbon Stock Appraisal*) (Lusiana et al., 2005, Hairiah *et al.*, 2011). Pengukuran biomassa dilakukan pada 5 komponen, yaitu: biomassa pohon, biomassa tanaman bawah, nekromas, seresah dan bahan organik tanah. Prosedur pengukurannya masing-masing adalah sebagai berikut:

a. Biomassa pohon

- Melakukan pengukuran diameter setinggi dada (130 cm di atas permukaan tanah) pada seluruh pohon diameter setinggi dada > 5 cm sampai dengan 30 cm pada plot ukur 5 m x 20 m. Pohon dengan ukuran diameter > 30 cm diukur pada plot 20 m x 100 m (Gambar 2). Masing-masing pohon dicatat nama lokal dan nama latinnya.
- Bila terdapat tunggul bekas tebangan yang masih hidup dengan tinggi > 50 cm dan diameter > 5 cm maka diukur diameter batang dan tingginya.
- Sebagai dasar pengukuran biomassa, setiap jenis pohon yang diukur dicari data berat jenisnya berdasarkan data berat jenis *Global Wood Density Database* (Zanne *et al.*, 2009) atau Seng (1990).

- Jika data berat jenis tidak ditemukan, dilakukan pengukuran berat jenis secara langsung dengan cara mengambil sampel cabang sepanjang 5 cm. Sampel dikeringkan dalam oven dengan suhu 100°C selama 48 jam kemudian ditimbang beratnya. Sampel dihitung volumenya dengan rumus silinder berdasarkan diameter sampel dan panjang sampel. Berat jenis sampel dihitung dengan persamaan berikut:

$$BJ = \frac{BK}{V} \quad (1)$$

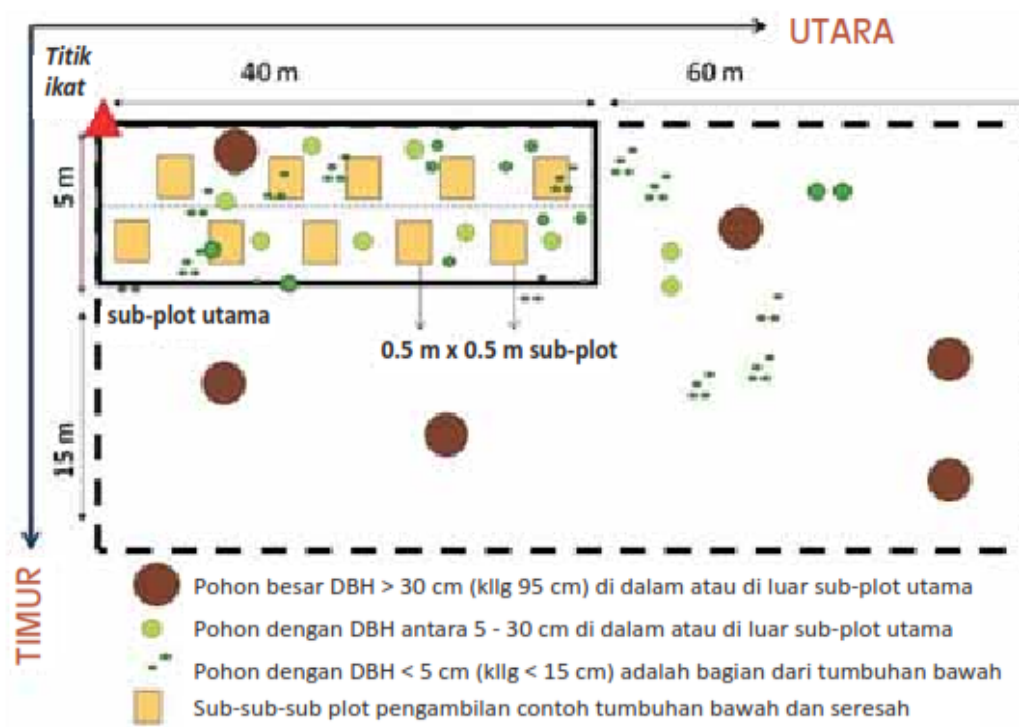
Dimana:

BJ : berat jenis (gr/cm³)

BK : berat kering sampel (gr)

V : volume sampel (cm³)

- Biomassa per pohon dihitung dengan persamaan Chave *et al.* (2005)
- Estimasi kandungan karbon juga dapat dilakukan dengan menghitung 0,47 dari berat biomassa pohon (IPCC, 2006)
- Kandungan karbon akar diperhitungkan sebagai 20% dari kandungan karbon di atas tanah (IPCC, 2006)



Gambar 2. Layout plot pengukuran cadangan karbon pola agroforestri

b. Biomassa tanaman bawah dan seresah

- Membuat petak berukuran 0,5 m x 0,5 m (dengan ulangan 6 petak) pada sub plot utama 5 m x 20 m (Gambar 2).
- Memotong semua tumbuhan bawah yang ada pada petak 0,5 m x 0,5 m. Tumbuhan bawah yang diambil yaitu tumbuhan hidup berupa anakan pohon yang berdiameter < 5cm, herba dan rumput-rumputan.
- Memisahkan batang dan daun pada tumbuhan bawah yang diambil, serta memasukkannya ke dalam kantong kertas kemudian di beri label kode sub plotnya.
- Menimbang berat basah atau berat segar daun dan batang, sebagai berat basah total (BBT).
- Mengambil sampel biomassa daun dan batang masing-masing sekitar 100-300 gram. Jika berat batang dan daun kurang dari 100 gram, maka diambil seluruhnya sebagai sampel. Sampel ini ditimbang sebagai berat basah sampel (BBS).
- Mengeringkan sampel biomassa daun dan batang dalam oven dengan suhu 80°C selama 48 jam. Selanjutnya sampel yang sudah dikeringkan ditimbang sebagai berat kering sampel (BKS).
- Biomassa total tanaman bawah (per masing-masing bagian daun dan batang) dihitung berdasarkan berat kering total (BKT) dengan persamaan berikut:

$$BKT = \frac{BKS \times BBT}{BBS} \quad (2)$$

Dimana : BKT = berat kering total (gr/0,25 m²)

BBT = berat basah total (gr/0,25 m²)

BBS = berat basah sampel (gr)

BKS = berat kering sampel (gr)

- Pengambilan seresah dilakukan pada petak yang sama dengan pengambilan sampel tanaman/tumbuhan bawah. Proses pengambilan sampel dan pengeringannya di laboratorium juga mengikuti prosedur yang sama.

c. Nekromasa berkayu

Nekromasa adalah bagian tanaman mati pada permukaan tanah. Nekromasa dapat dibedakan menjadi nekromasa berkayu dan nekromasa tidak berkayu. Nekromasa tidak berkayu adalah seresah daun yang masih utuh dan bahan organik lainnya yang telah terdekomposisi sebagian yang berukuran > 2 mm.

- Nekromasa berkayu dengan ukuran diameter 5 cm sampai dengan 30 cm diukur pada plot 5 m x 40 m, sedangkan nekromasa dengan ukuran diameter > 30 cm dilakukan pada plot 20 m x 100 m.
- Mengukur diameter (atau lingkar batang) dan panjang atau tinggi pohon yang mati berdiri atau roboh, tunggul tanaman mati, cabang dan ranting. Pengukuran diameter batang pohon yang mati berdiri dilakukan pada ketinggian 130 cm dari permukaan tanah. Pengukuran diameter pada pohon yang mati rebah ranting dan tunggul, dilakukan pada kedua ujungnya.
- Apabila terdapat batang nekromasa yang melintang melebihi batas plot, pengukuran dilakukan sampai pada batas plot yang ada.
- Mengambil contoh kayu nekromasa yang diamati dengan ukuran 10 cm x 10 cm x 10 cm, ditimbang berat basahanya dan dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 80°C selama 48 jam untuk pengukuran berat jenis nekromasa.
- Melakukan penaksiran bagian nekromasa yang belum terlapuk, sebagai contoh 100 % untuk yang masih utuh, dan 50 % untuk yang sudah terlapuk setengahnya.
- Berat nekromasa yang berupa batang pohon yang masih bercabang dihitung dengan menggunakan persamaan allometrik Chave et al. (2005), sedangkan untuk batang pohon yang tidak bercabang dihitung dengan volume silinder berikut:

$$BK = \frac{\rho \pi H D^2}{40} \times \% \text{pelapukan} \quad (3)$$

Dimana: BK = berat kering nekromasa (kg/nekromas)

π = 3,14

ρ = berat jenis (gram/cm³)

H = panjang atau tinggi batang nekromasa (m)

D = diameter batang nekromasa (cm)

d. Bahan organik tanah

Pengukuran bahan organik tanah dilakukan dengan mengambil contoh tanah untuk diukur berat isi (BI) tanah, tekstur persentase kandungan liat, pasir dan debu, dan pH tanah. Contoh tanah yang diambil ada 2 macam, yaitu: 1) Contoh tanah terganggu yang digunakan untuk analisis kandungan C organik; 2) Contoh tanah utuh (tidak terganggu) untuk pengukuran BI tanah.

Cara pengambilan contoh tanah terganggu:

- Tanah diambil dengan menggunakan cangkul (atau bor tanah) pada plot yang sama dengan plot pengambilan tumbuhan bawah dan seresah. Pengambilan contoh tanah ini dilakukan secara komposit pada 3 titik di setiap plot 5 m x 40 m. Contoh tanah diambil pada 3 kedalaman: 0-10 cm, 10-20 cm dan 20-30 cm.
- Contoh tanah per kedalaman dari 3 titik pengambilan contoh dimasukkan ke dalam ember plastik dan dicampur rata. Campuran contoh tanah tersebut diambil sampelnya sekitar 1 kg, dimasukkan ke dalam kantong plastik dan diberi label.
- Sesampai di camp/laboratorium, tanah dikeringanginkan dan diayak dengan ayakan berukuran lubang pori 2 mm. Tanah yang lolos ayakan dimasukkan ke dalam 2 kantong plastik dan diberi label. Satu kantong tanah dianalisis di laboratorium dan satu kantong lainnya untuk arsip.
- Cara pengambilan contoh tanah tidak terganggu:
- Contoh tanah tidak terganggu diambil pada sub plot yang berdekatan dengan contoh tanah terganggu. Pengambilan sampel pada setiap titik dilakukan pada 3 kedalaman yang sama dengan contoh tanah terganggu. Hindari tempat yang mengalami pemadatan (misalnya jalan setapak atau tempat yang terinjak-injak selama pengambilan contoh tumbuhan bawah atau seresah).
- Seresah kasar yang ada di atas permukaan tanah disingkirkan, kemudian ring sampel tanah ditancapkan ke permukaan tanah, ditekan pelan-pelan sehingga masuk ke kedalaman tanah yang diinginkan.
- Ring sampel bagian atas ditutup, kemudian tanah disekitar ring sampel berjarak 5 cm digali perlahan. Tanah pada bagian bawah ring sampel dipotong dengan menggunakan pisau kemudian ring diangkat perlahan agar tanah tetap utuh di dalam ring sampel.
- Ring sampel dibalik dan diletakkan pada permukaan yang datar. Tanah yang menempel pada bagian luar ring dibersihkan, dan tanah pada permukaan atas ring diratakan kemudian ditutup dengan tutup ring sampel.
- Pengambilan sampel pada kedalaman berikutnya mengikuti prosedur yang sama.
- Sampel tanah selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk dianalisis lebih lanjut.

Pengukuran neraca air

Pendugaan neraca air pada skala DAS dilakukan dengan menggunakan model GenRiver (Farida dan van Noordwijk, 2004, van Noordwijk *et. al*, 2003, Van Noordwijk *et al*, 2011), suatu model aliran sungai dan penggunaan lahan. GenRiver merupakan model yang didasarkan pada proses hidrologis dalam suatu bentang lahan, baik itu DAS maupun sub-DAS. Model ini dapat digunakan pada kondisi dimana data hidrologi yang tersedia relatif sedikit. Dengan menggunakan model ini kita dapat melakukan simulasi aliran sungai harian pada berbagai skala, seperti plot, sub-DAS maupun DAS. Pengaruh perubahan lahan terhadap aliran sungai harian juga dapat disimulasikan dengan baik oleh model ini (Lusiana *et. al*, 2008).

Bagian utama dari GenRiver meliputi neraca air pada skala plot (*patch level water balance*) berdasarkan curah hujan dan modifikasi sifat fisik tanah dan penutupan lahan. Plot – plot ini memiliki kontribusi terhadap aliran sungai melalui aliran permukaan pada saat terjadinya hujan (*surface quick flow*), aliran air dalam tanah yang terjadi setelah hujan (*soil quick flow*) dan aliran dasar (*base flow*) yang berasal dari pelepasan air tanah secara bertahap menuju sungai (*gradual release of groundwater*).

Komponen utama model GenRiver dan proses-proses yang terlibat sebagai berikut (Farida dan van Noordwijk, 2004, van Noordwijk *et. al*, 2003, Van Noordwijk *et al*, 2011):

a. Curah hujan harian

Curah hujan untuk skala sub- DAS dapat diambil dari data empiris atau menggunakan data bangkitan dari pembangkit data acak (random generator) yang mempertimbangkan pola temporal (seperti model rantai Markov) atau model yang mempertimbangkan korelasi ruang (spatial correlation) dari hujan pada waktu tertentu.

b. Intensitas hujan dan waktu untuk infiltrasi

Intensitas hujan dihitung dari rata – rata data empiris intensitas hujan (mm/jam) dengan mempertimbangkan koefisien variasi dari kumpulan data tersebut. Lamanya hujan menentukan waktu yang tersedia untuk proses infiltrasi. Namun parameter ini dapat dimodifikasi dengan mempertimbangkan intersepsi oleh kanopi dan lamanya penetes air dari kanopi (*dripping phase*) dengan penetapan awal (*default*) 30 menit.

c. Intersepsi

Kapasitas penyimpanan air terintersepsi merupakan fungsi linier dari luas area daun dan ranting dari berbagai tipe penutupan lahan. Evaporasi dari air yang terintersepsi (*interception-evaporation*) mempunyai prioritas sesuai dengan kebutuhan transpirasi tanaman.

d. Infiltrasi dan aliran permukaan

Proses infiltrasi dihitung berdasarkan nilai minimum dari: (a) kapasitas infiltrasi harian dan waktu yang tersedia untuk infiltrasi (ditentukan oleh intensitas hujan dan kapasitas penyimpanan lapisan permukaan tanah), (b) jumlah air yang dapat disimpan oleh tanah pada kondisi jenuh dan jumlah air yang dapat memasuki zona air tanah pada rentang waktu satu hari. Apabila kondisi pertama yang terjadi maka model akan menghasilkan aliran permukaan yang dibatasi oleh infiltrasi (*infiltration limited runoff*), sedangkan pada kondisi kedua aliran permukaan yang terjadi merupakan aliran jenuh permukaan (*saturation overland flow*).

e. Evapotranspirasi

Total evapotranspirasi yang digunakan pada model ini mengikuti evapotranspirasi potensial Penman – Monteith dengan faktor koreksi yang dipengaruhi oleh: (a) air yang terintersepsi oleh kanopi, (b) kondisi tutupan lahan yang terkait dengan sensitivitas setiap jenis penutupan lahan terhadap kekeringan, (c) faktor pembobot pada evapotranspirasi potensial harian yang mengikuti fenologi dan pola tanam, (d) relatif potensial evapotranspirasi (bulanan) untuk setiap tipe penutupan lahan.

f. Redistribusi air tanah

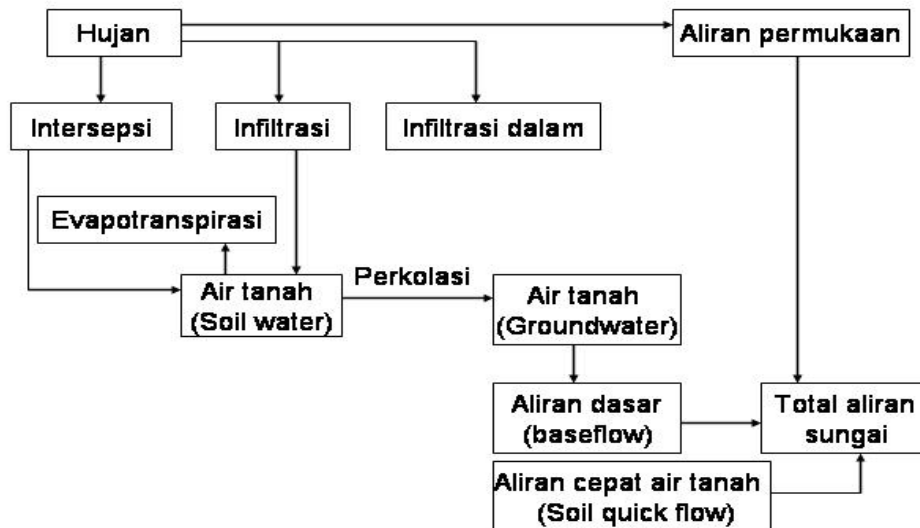
Selama kejadian hujan, tanah dapat mencapai kondisi jenuh air, namun sehari setelah hujan kondisi akan kembali pada kapasitas lapang (kondisi air tanah setelah 24 jam dari kejadian hujan lebat). Perbedaan antara kondisi jenuh dan kapasitas lapang dipengaruhi oleh: (a) transpirasi, (b) adanya aliran air ke zona bawah, (c) adanya aliran air ke sungai sebagai aliran cepat air tanah (*soil quick flow*) apabila air yang ada melebihi kapasitas lapang.

g. Pelepasan air tanah menuju sungai (melalui aliran dasar)

h. Jarak (*routing distance*)

Jarak titik pengamatan atau *outlet* DAS ditentukan dari titik pusat masing– masing sub-DAS. Waktu tempuh (*routing time*) dari masing–masing sub-DAS dapat diturunkan dari data jarak dan asumsi rata-rata kecepatan aliran air.

Inti model Genriver adalah neraca air yang ada pada tingkat plot, yang bersumber dari hujan tingkat lokal serta dimodifikasi berdasarkan tutupan lahan dan perubahannya serta karakter jenis tanah. Hasil dari model skala plot ini adalah aliran permukaan, aliran cepat dan aliran lambat (Van Noordwijk *et al*, 2011).



Gambar 3. Diagram alur proses hidrologi pada GenRiver

Kegiatan penggunaan model GenRiver dilakukan melalui tahapan-tahapan berikut:

a. Persiapan data

Ada tiga jenis data yang digunakan dalam model GenRiver, yaitu data iklim (curah hujan rata-rata dan nilai PET), data hidrologi (debit sungai) dan data spasial (peta jaringan sungai, peta tutupan lahan dan peta jenis tanah). Data iklim dan data spasial digunakan sebagai masukan model, sedangkan data hidrologi digunakan untuk proses kalibrasi dan validasi model.

b. Pemrosesan informasi spasial yang dihasilkan dalam analisis spasial

Pada tahapan ini, berbagai fitur hidrologis ditentukan seperti batas sub-DAS, saluran drainase, jarak (panjang anak sungai sampai ke sungai utama), sebaran tutupan lahan tiap sub DAS dan sebaran jenis tanah pada tiap sub DAS.

c. Kalibrasi dan validasi model

kalibrasi model adalah untuk menduga nilai parameter-parameter dalam model, sehingga hasil simulasi debit oleh model mendekati nilai debit yang sebenarnya (Kobold, 2008). Parameter-parameter yang harus diduga nilainya dalam model GenRiver sekitar 13 parameter. Sedangkan validasi bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan model dalam mendekati kondisi DAS yang sebenarnya. Kriteria yang digunakan validasi model yaitu *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) (*reference*) dan koefisien korelasi.

Nilai efisiensi Nash-Sutcliffe (NSE) menggambarkan seberapa tepat perbandingan antara debit hasil simulasi dengan debit pengamatan (Moriassi, 2007). Persamaan perhitungan NSE:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \right]$$

Dimana : Y_i^{obs} adalah debit pengamatan pada hari ke-I,
 Y_i^{sim} adalah debit hasil simulasi model hari ke-I
 Y_{mean} adalah rata-rata debit pengamatan
 n adalah banyaknya pengamatan

Sebaran nilai NSE adalah $(-\infty, 1)$, dimana nilai 1 berarti cocok secara sempurna (Moriassi, 2007)

Proyeksi hasil air dan karbon berdasarkan beberapa skenario perubahan tutupan lahan

Penyusunan skenario perubahan penggunaan lahan dilakukan berdasarkan informasi yang diperoleh dari masyarakat mengenai preferensi perubahan penggunaan lahan dan juga berdasarkan asumsi penurunan laju deforestasi. Informasi dari masyarakat diperoleh pada saat pengukuran karbon tersimpan dalam tiap-tiap Sistem Penggunaan Lahan (SPL) di DAS Balantieng. Potensi perubahan SPL berdasarkan informasi dari masyarakat adalah adanya keinginan masyarakat untuk merubah AF coklat-kopi menjadi AF cengkeh di hulu DAS Balantieng, dan menjadi monokultur karet di bagian tengah dan hilir DAS Balantieng. Sementara itu, laju deforestasi yang cukup tinggi pada periode 1999-2009 diasumsikan dapat dikurangi sebesar 50% pada periode 2009 – 2019 (Tabel 2).

Tabel 2. Skenario perubahan penggunaan lahan

Kode	Deskripsi
Skenario 1	Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS
Skenario 2	Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS
Skenario 3	Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%
Skenario 4	Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%



Gambar 4. Salah seorang petani menunjukkan pohon karet yang ditanamnya diantara pohon coklat yang mulai tidak produktif

2.3. Analisis Data

Analisis spasial penggunaan lahan dan perubahan penggunaan lahan

Peta penutupan lahan dalam penelitian ini diperoleh dari data sekunder hasil analisis citra LANDSAT yang dilakukan oleh ICRAF (World Agroforestry Centre) di Sulawesi Selatan. Klasifikasi citra satelit dilakukan dengan menggunakan metode pendekatan berbasis objek klasifikasi. Untuk menduga tingkat ketepatan peta penggunaan lahan secara kuantitatif digunakan metode Kappa. Dalam metode ini informasi dari penutupan lahan dibandingkan dengan titik sampel yang diperoleh di lapangan. Metode klasifikasi citra dapat dilihat pada Gambar 5.



(Sumber: Jeanes, et al., 2004).

Gambar 5. Metode klasifikasi citra

Untuk menganalisis perubahan penggunaan lahan, digunakan model simulasi penggunaan lahan Markov yang telah banyak digunakan oleh para peneliti (Burnham, 1973; Takada *et al.*, 2010). Model ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu: matriks transisi dan matriks transisi probabilitas.

Berdasarkan sejarah penggunaan lahan, kita dapat mengestimasi probabilitas perubahan dari satu kelas penggunaan lahan ke kelas penggunaan lahan lainnya. Matriks transisi merupakan matriks yang berisi perubahan penggunaan lahan dari satu kelas penggunaan lahan yang satu ke kelas penggunaan lahan lainnya dalam dua periode observasi. Sementara itu, matriks transisi probabilitas merupakan probabilitas suatu lahan yang berubah dari satu kelas ke kelas lainnya.

Luas penggunaan lahan pada waktu ke t dinotasikan dengan vektor baris $\mathbf{x}_t = [x_{it}]$, dimana x_{it} merupakan kelas penggunaan lahan $i = \{1, \dots, n\}$. Pada waktu $t + c$, kelas penggunaan lahan direpresentasikan dengan vektor baris $\mathbf{x}_{t+c} = [x_{j,t+c}]$, dimana $x_{j,t+c}$ merupakan kelas penggunaan lahan $j = \{1, \dots, n\}$. Jumlah tahun antara waktu t dan waktu berikutnya yang diobservasi direpresentasikan dengan c . Matriks transisi penggunaan lahan disajikan dalam matriks \mathbf{A} sebagai berikut:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Matriks \mathbf{A} merupakan matriks $n \times n$ yang terdiri dari suatu area yang pada waktu t merupakan kelas penggunaan lahan i , dan berubah menjadi kelas penggunaan lahan j pada waktu $t + c$. Untuk memudahkan dalam melakukan analisis skenario penggunaan lahan, maka dibuatlah matriks probabilitas penggunaan lahan \mathbf{P} , yang diperoleh dari matriks \mathbf{A} , yang mengindikasikan proporsi dari kelas penggunaan lahan i pada waktu t menjadi kelas penggunaan lahan j pada waktu $t + c$:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Element dari matriks \mathbf{P} , yaitu p_{ij} merupakan probabilitas dari penggunaan lahan i menjadi penggunaan lahan j selama kurun waktu c tahun:

$$p_{ij} = a_{ij} / x_{it}$$

Dimana penjumlahan dari semua elemen dalam tiap baris matriks \mathbf{P} merupakan unity. Matriks probabilitas penggunaan lahan dapat digunakan untuk memprediksi distribusi penggunaan lahan dan menghasilkan proyeksi penggunaan lahan berdasarkan persamaan berikut:

$$\mathbf{x}_{t+c} = \mathbf{x}_t \mathbf{P}$$

Tiap penggunaan lahan memiliki rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa yang dinotasikan sebagai vektor $\mathbf{s}_t = [s_{it}]$, dimana s_{it} merupakan rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa dari kelas penggunaan lahan $i, j = \{1, \dots, n\}$. Untuk mengetahui perubahan rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa dari kelas penggunaan lahan i menjadi j , maka vektor \mathbf{s}_t yang merupakan vektor berdimensi $n \times 1$ dikalikan dengan vektor berdimensi $1 \times n$ yang semua elemennya merupakan 1. Hasil dari perkalian ini menghasilkan matriks \mathbf{F} , yang merupakan matriks $n \times n$. Matriks perbedaan rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa kelas penggunaan lahan \mathbf{D} diperoleh dengan melakukan pengurangan matriks \mathbf{F} dengan matriks \mathbf{F}' : $\mathbf{D} = \mathbf{F} - \mathbf{F}'$:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}$$

Untuk mengetahui total perubahan karbon tersimpan dalam biomassa dalam area maka elemen matriks \mathbf{D} dalam satu baris i dikalikan dengan elemen matriks \mathbf{P}' dalam satu kolom j dan elemen dalam vektor \mathbf{x}_t . Hasil dari perkalian tersebut kemudian dijumlahkan dan dikalikan dengan bilangan masa karbon dalam molekul CO_2 yaitu sebesar 44/12 untuk mengetahui total emisi dan sequestrasi karbon dalam wilayah yang dianalisis. Skenario perubahan penggunaan lahan/SPL dilakukan dengan merubah elemen pada matriks \mathbf{P} pada baris dan kolom yang sesuai dengan perubahan yang diinginkan.

Analisis pengukuran cadangan karbon

Pengolahan dan analisis data pengamatan cadangan karbon dilakukan menurut metode RaCSA (Hairiah *et al.*, 2011) dengan beberapa tambahan analisis. Biomassa per pohon dihitung dengan persamaan allometrik jenis-jenis pohon menurut Krisnawati *et al.* (2012) atau menurut literatur lainnya. Jika jenis pohon yang diamati tidak didapatkan persamaan allometriknya, maka digunakan persamaan umum (Chave *et al.*, 2005). Data berat jenis kayu yang digunakan dalam perhitungan persamaan allometrik merujuk pada data berat jenis Seng (1990) dan Global Wood Density Database (2013). Estimasi kandungan karbon dalam biomassa dilakukan dengan menghitung 0,47 dari berat biomassa pohon (IPCC, 2006). Kandungan karbon akar diperhitungkan sebagai 20% dari kandungan karbon di atas tanah (IPCC, 2006).

Perhitungan emisi dan sequestrasi karbon mengacu pada perubahan penggunaan lahan berdasarkan peta penutupan lahan tahun 1989, 1999, dan 2009. Jumlah cadangan karbon rata-rata yang tersimpan dalam tiap sistem penggunaan lahan (SPL) dibuat berdasarkan perhitungan langsung di lapangan dan

studi pustaka (Ekadinata, *et al.* 2010). Jumlah SPL di DAS Balantieng adalah sebanyak 17 SPL (pada tahun 1989 dan 1999), dan berkurang menjadi 16 SPL pada tahun 2009. Karena deliniasi peta terhadap SPL dilakukan berdasarkan citra satelit, maka konsekuensinya ada satu kelas yang tidak dapat diidentifikasi karena tertutup oleh awan (*no data*).

Analisis neraca air

Pengolahan dan analisis data hidrologi dilakukan menurut prosedur model GenRiver (Noordwijk *et al.*, 2011). Persiapan data untuk parameter model termasuk analisis data iklim (curah hujan dan evapotranspirasi), data debit dan spasial data (jenis tanah, penggunaan lahan dan karakteristik DAS.

a. Analisis data iklim dan curah hujan

Data iklim yang diperoleh berupa data suhu rata-rata harian. Sedangkan data curah hujan dan hidrologi sungai di DAS Balantieng yang tersedia berupa data harian. Kualitas data yang diperoleh cukup bagus, tetapi memerlukan perbaikan dan pembersihan sebelum dapat dimanfaatkan dalam penelitian ini. Informasi mengenai sumber, periode waktu dan tahun ketersediaan dari masing-masing data disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data iklim, hidrologi dan Jenis tanah DAS Balantieng yang tersedia

Data	Sumber	Periode	Keterangan
Curah hujan	St. Bonto Ngiling	Harian	Tahun 1990-2010
	St. Bulu-bulu Galung	harian	Tahun 1990-2010
	St. Onto	harian	Tahun 1990-2010
	St. Padang Loang	harian	Tahun 1990-2010
Suhu	St. Matajang	harian	Tahun 1993-2011
Tinggi muka air	St. Bonto Manai	Harian	Tahun 1990-2010

Data curah hujan dari 4 stasiun dianalisa dengan menggunakan metode poligon Thiessen, untuk memperoleh data rata-rata harian DAS. Sedangkan data hidrologi sungai diperoleh dalam bentuk data tinggi muka air harian dan sebagian data debit, sehingga harus dianalisa terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan regresi power untuk memperoleh data debit harian. Data harian suhu dianalisa untuk memperoleh nilai potensial evapotranspirasi (PET) bulanan DAS dengan menggunakan metode Thornwaite.

Data hujan yang diperoleh dari data rata-rata harian 4 stasiun yang terdapat di DAS Balantieng dilakukan analisa untuk mendapatkan data prediksi hujan selama 11 tahun untuk periode tahun 2011 – 2020 untuk keperluan model dengan menggunakan rainfall simulator. Hasil analisa menunjukkan nilai prediksi yang baik.

b. Analisis data hujan dan data debit sungai

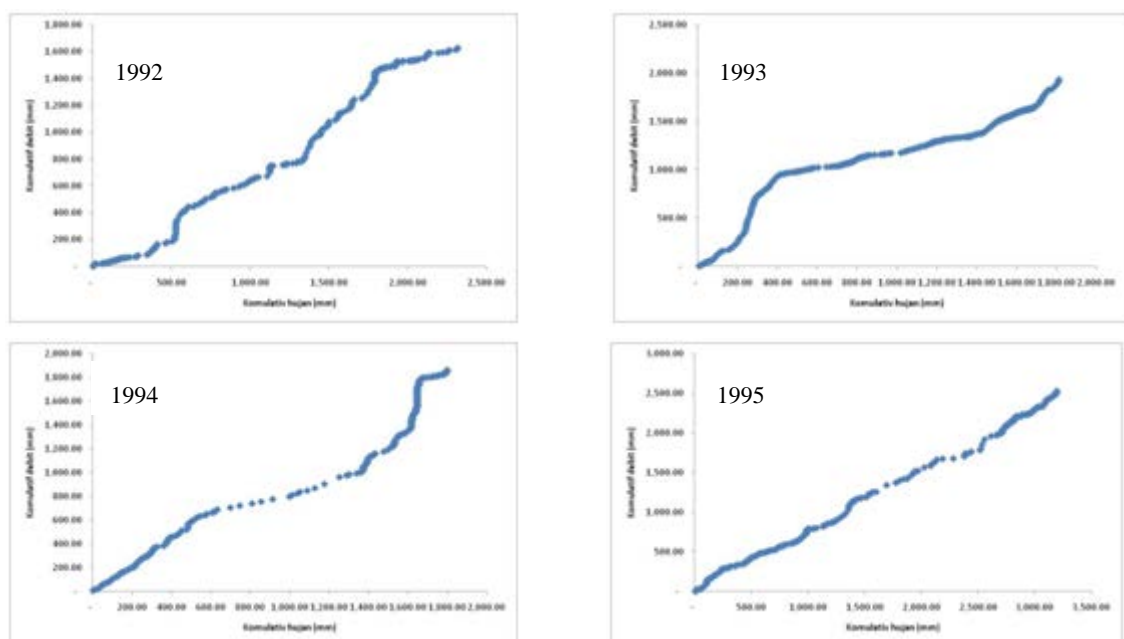
Sebelum mempergunakan pasangan data ini lebih lanjut, terlebih dahulu dilakukan pengujian konsistensi dan sensitivitas data melalui analisis hubungan hujan dan debit sungai. Pada kondisi normal, selisih antara pengurangan total hujan dengan total debit akan menghasilkan nilai berkisar antara 500 – 1.500 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa pasangan data hujan dan debit yang bisa digunakan untuk analisa adalah pada tahun 1992 – 1993, 1995 – 1996, 1998 – 1999 dan 1999 – 2000.

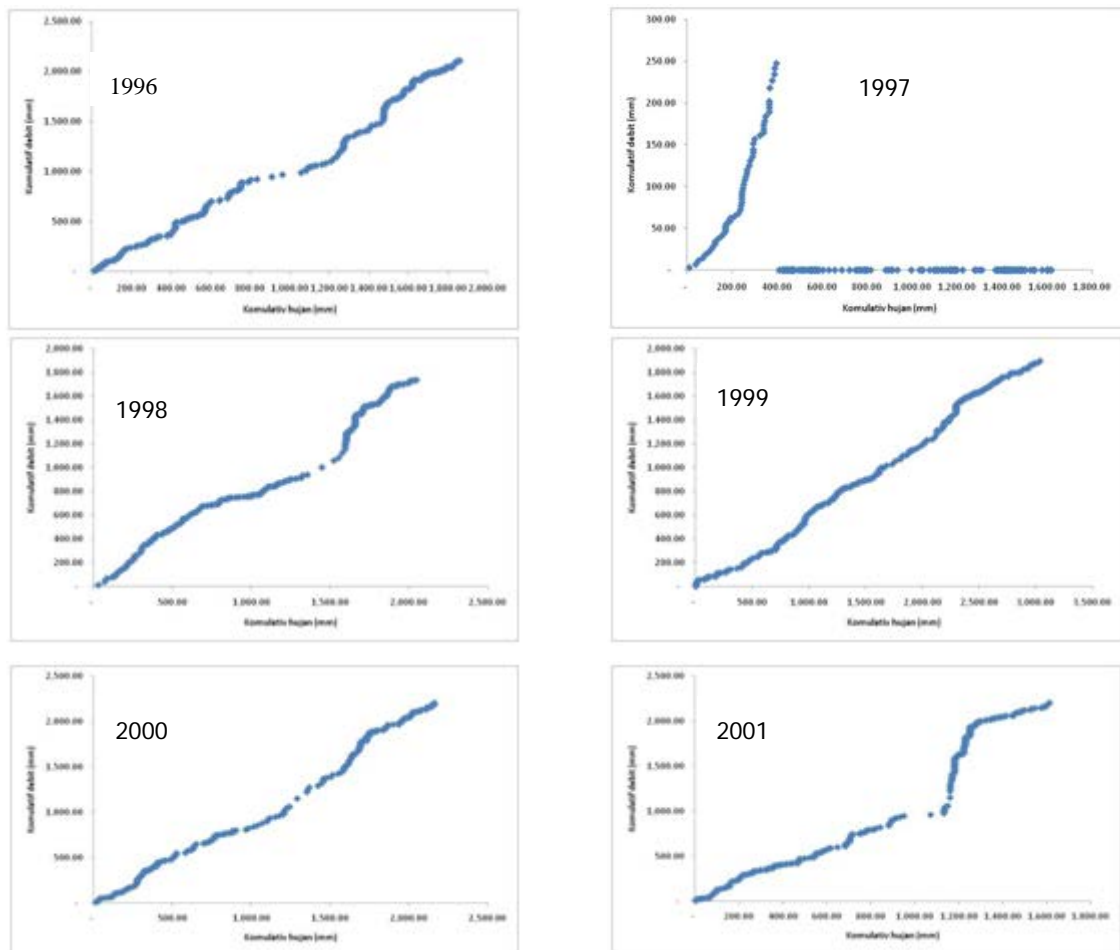
Tabel 4. Analisis data hujan

Tahun	Hujan (P) mm	Debit (Q) mm	P-Q mm
1992 - 1993	2292,00	1629,25	662,75
1993 - 1994	1844,00	1813,24	30,76*
1994 - 1995	1624,00	1862,33	-238,33*
1995 - 1996	3156,00	2526,76	629,24
1996 - 1997	1920,60	2111,17	-190,57*
1997 - 1998	1652,50	1271,83	380,67*
1998 - 1999	3348,55	1895,32	1453,23
1999 - 2000	2414,15	1735,77	678,38
2000 - 2001	2634,60	2204,41	430,19*

Keterangan: * data tidak digunakan karena tidak masuk pada kisaran nilai 500-1500 mm

Untuk mengetahui konsistensi pasangan data hujan dan debit sungai yang digunakan dilakukan analisis lanjutan dengan kurva massa ganda. Sedangkan untuk mengetahui kestabilan kualitas data debit sungai digunakan uji kurva kestabilan data debit sungai.





Gambar 6. Kurva massa ganda hubungan antara komulatif hujan dan komulatif debit

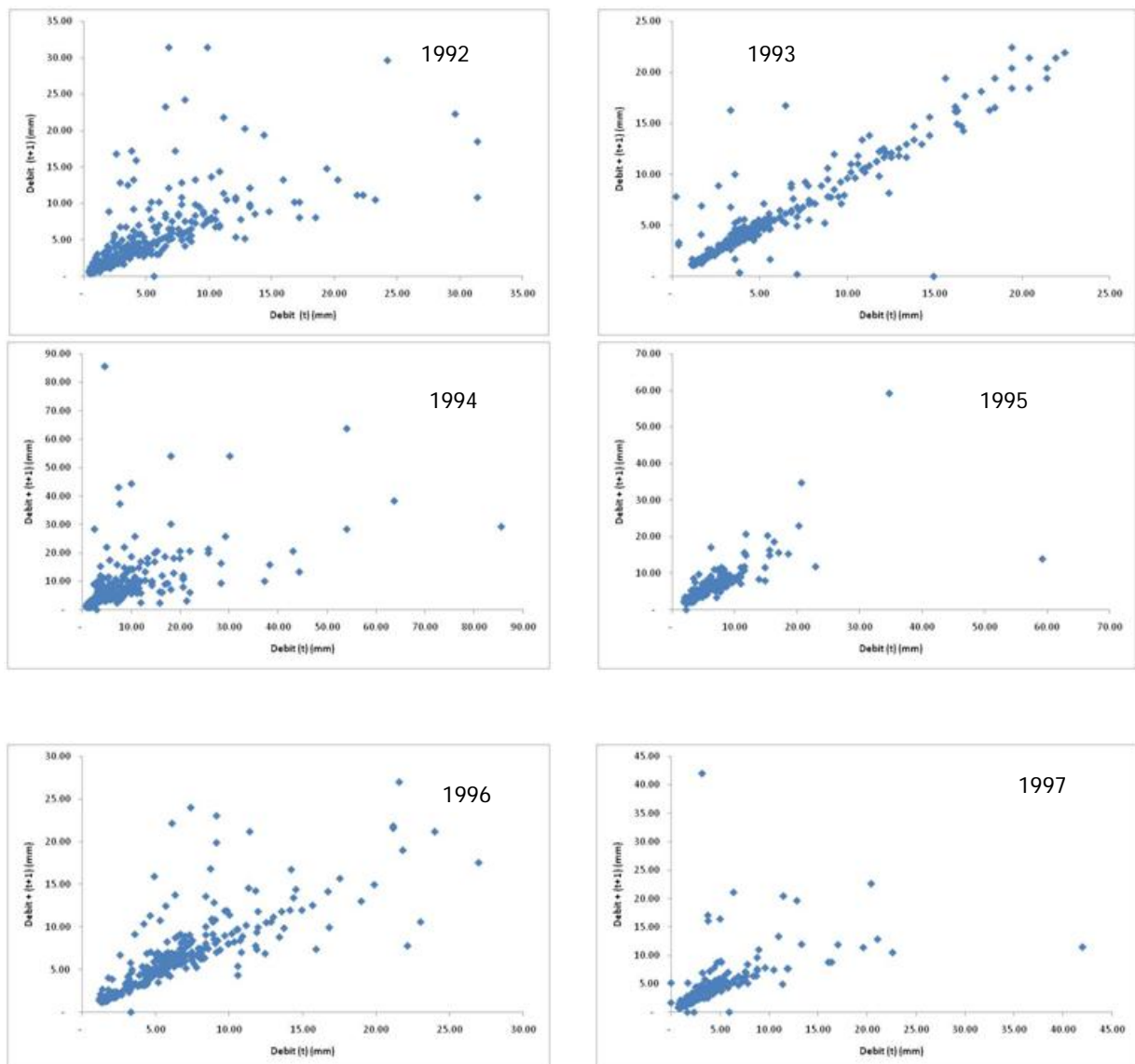
Hasil analisa kurva massa ganda dapat dilihat pada Gambar 6. Pada analisa ini dilakukan perhitungan komulatif hujan dan komulatif debit, di mana konsistensi data ditunjukkan oleh penyimpangan garis kurva dibanding garis lurus. Semakin jauh penyimpangan menunjukkan data tidak konsisten. Hasil analisa kurva massa ganda menunjukkan kurva massa ganda untuk tahun 1995 dan tahun 1999 penyimpangan paling kecil dengan garis lurus. Sehingga pasangan data hujan dan data debit tahun 1995 dan 1999 menunjukkan konsistensi data yang cukup baik.

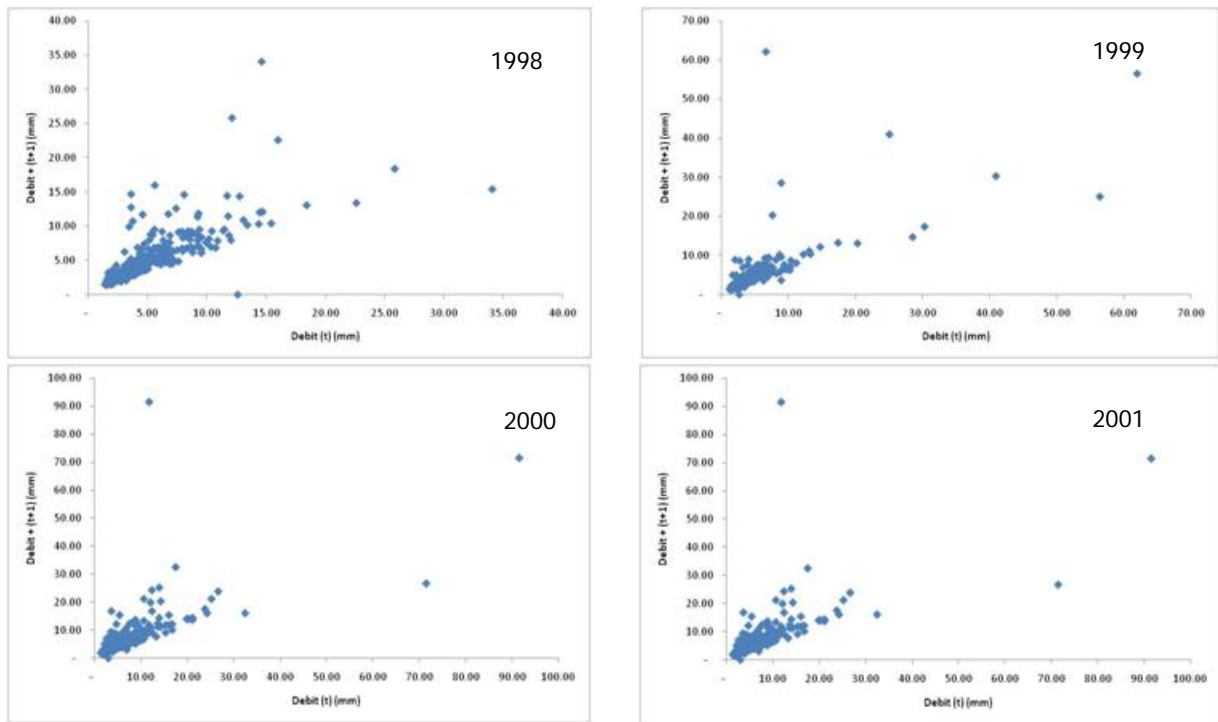
Gambar 6. menunjukkan kurva hubungan antara debit ke-t dengan dengan debit ke-t+1. Hasil kurva yang mengumpul pada suatu nilai tertentu menunjukkan kualitas data debit yang digunakan stabil. Hasil analisa menunjukkan untuk data debit tahun 1995, 1999, 2000 dan 2001 menunjukkan kurva yang mengumpul pada suatu nilai. Sehingga pada tahun-tahun tersebut menunjukkan data debit cukup stabil.

c. Analisis spasial data

Tool yang digunakan untuk proses analisis karakteristik DAS adalah arcHydro. Sedangkan input yang digunakan berupa citra DEM (*Digital Elevation Model*) yang berasal dari SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Dua tahapan penting untuk mengetahui karakteristi DAS yaitu (1) *Terrain processing* dan *watershed processing* dan (2) menyusun karakteristik DAS. Tujuan utama dilakukan proses tahapan pertama untuk mendeliniasi batas DAS dan batas sub DAS, serta menentukan titik centroid masing-masing sub DAS. Sedangkan tahapan kedua bertujuan untuk mengetahui sebaran penggunaan lahan, sebaran jenis tanah dan panjang aliran masing-masing sub DAS.

Hasil analisa nilai faktor perkalian evapotranspirasi potensial harian untuk masing-masing penggunaan lahan terdapat pada Tabel 5.





Gambar 7. Kurva kestabilan aliran (debit ke- t dan debit ke- $t+1$)

Tabel 5. Nilai faktor perkalian evapotranspirasi potensial harian

Tipe Tutupan lahan	Faktor perkalian evapotranspirasi potensial harian											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Agroforestri coklat-kopi	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Agroforestri jambu mete	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Agroforestri cengkeh	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Agroforestri kelapa	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Padang rumput	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Lahan terbuka	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Hutan bekas tebangan - kepadatan tinggi	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Hutan bekas tebangan – kepadatan rendah	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Kebun campuran dan agroforestri gmelina	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Tidak ada data	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tanaman lainnya	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Sawah	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,30	0,50	0,50	0,50	0,80
Monokultur karet	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Agroforestri randu	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Pemukiman	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Perdu	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Hutan tidak terganggu	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Badan air	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Ordo tanah Entisol dan Inseptisol mendominasi DAS (Tabel 6). Ordo ini hampir tersebar merata pada seluruh DAS. Nilai BD/BD ref berkisar antara 0,61 untuk hutan dan 1,21 untuk karet monokultur (Tabel 7). Hasil kalibrasi penyesuaian nilai input parameter untuk model dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 6. Luasan ordo tanah pada masing-masing sub DAS pada DAS Balantieng

Sub DAS	Luas (km ²)	Routing Distance (km)	Luas (Km ²)		
			Andisol	Entisol	Inseptisol
1	28,67	53,39	-	28,59	-
2	16,72	46,49	1,11	15,58	-
3	24,23	41,04	22,57	1,61	-
4	10,70	23,83	0,06	-	10,62
5	7,42	22,40	-	0,00	7,42
6	2,45	18,29	-	0,31	2,15
7	44,66	27,04	7,68	15,60	21,35
8	31,48	13,96	-	10,12	21,37
9	19,83	14,17	-	0,05	19,68
10	16,20	3,74	-	10,44	5,72
Total			31,43	82,31	88,32

Tabel 7. Parameter nilai potensial intersepsi, ambang batas kekeringan dan BD/BD ref

Tutupan lahan	Potensial Intersepsi (mm per hari)	Ambang batas kekeringan	BD/BDref
Agroforestri coklat-kopi	2,75	0,60	1,05
Agroforestri jambu mete	2,00	0,70	1,17
Agroforestri cengkeh	2,25	0,60	0,79
Agroforestri kelapa	2,00	0,70	0,95
Padang rumput	1,40	0,40	1,12
Lahan terbuka	0,50	0,95	1,12
Hutan bekas tebangan - kepadatan tinggi	3,00	0,50	0,80
Hutan bekas tebangan – kepadatan rendah	2,50	0,50	0,80
Kebun campuran dan agroforestri gmelina	2,50	0,60	1,02
Tanaman lainnya	1,20	0,85	1,05
Sawah	1,00	0,90	1,11
Monokultur karet	2,00	0,55	1,21
Agroforestri randu	2,25	0,60	1,12
Pemukiman	0,05	0,01	1,30
Perdu	1,50	0,40	1,10
Hutan tidak terganggu	4,00	0,40	0,61
Badan air	0,00	1,00	1,20

Tabel 8. Parameter model Genriver yang digunakan pada analisis DAS Balantieng

Parameter*)	Nilai Model	Nilai akhir	Satuan
RainMaxIntDripDur (i)	0,5	4,5	Mm
InterceptEffectontrans(i)	0,8	0,03	Mm
RainIntensMean	30	30	mm per hari
RainIntensCoefVar	0,3	0,27	-
MaxInfRate (i)	720	600	mm per hari
MaxInfSubsoil (i)	120	200	mm per hari
PerFracMultiplier (i)	0,1	0,18	-
MaxDynGrWatStore (i)	300	100	Mm
GWReleaseFracVar (i)	0,1	0,17	-
Tortuosity (i)	0,5	0,33	-
Dispersal Factor (i)	0,5	0,2	-
River Velocity (i)	0,4	0,28	m per detik

*) Definisi masing-masing parameter mengacu pada manual model GenRiver (van Noordwijk *et al.*, 2012)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Kabupaten Bulukumba terletak di bagian selatan pulau Sulawesi dan berjarak kurang lebih 153 kilometer dari ibukota Propinsi Sulawesi Selatan, Makassar. Terletak antara 05°20' – 05°40' lintang selatan dan 119°58' – 120°28' bujur timur. Kabupaten Bulukumba terdiri dari 10 Kecamatan, yaitu: Kajang, Bulukumpa, Rilau Ale, Kindang, Gantarang, Bontobahari, Herlang, Ujung Bulu, Ujung Loe dan Bontotiro yang terbagi ke dalam 27 kelurahan dan 103 desa dengan total luas 1.154,7 km². Kabupaten Bulukumba memiliki batas administrasi sebelah Utara; Kabupaten Sinjai, sebelah Timur; Teluk Bone, sebelah Selatan; Laut Flores dan sebelah Barat; Kabupaten Bantaeng (BPS Kabupaten Bulukumba, 2012).

Wilayah Kabupaten Bulukumba hampir 95,4 persen berada pada ketinggian 0 sampai dengan 1.000 meter diatas permukaan laut (dpl) dengan tingkat kemiringan tanah umumnya 0-40°. Terdapat sekitar 32 aliran sungai yang dapat mengairi sawah seluas 23.365 ha, sehingga merupakan daerah potensi pertanian. Curah hujannya rata-rata 152 mm/bulan (1.824 mm/tahun) dan rata-rata hari hujan 10 hari per bulan (BPS Kabupaten Bulukumba, 2012).

Penduduk Kabupaten Bulukumba tahun 2011 berjumlah 398.531 jiwa, sebanyak 211.092 jiwa perempuan dan 187.439 jiwa laki-laki. Kepadatan penduduk Kabupaten Bulukumba pada tahun 2011 yaitu 345 orang per km² dan luas tutupan hutan 8471,5 ha atau 67,46% dari total luas daratan. Jumlah angkatan kerja sebanyak 169.567 jiwa, dengan mayoritas bekerja pada sektor pertanian (58,5%), disusul perdagangan, rumah makan, dan hotel (14,4%), jasa kemasyarakatan (10,5%), industri pengolahan (8,2%) dan lain-lain (8,3%) (BPS Kabupaten Bulukumba, 2012).

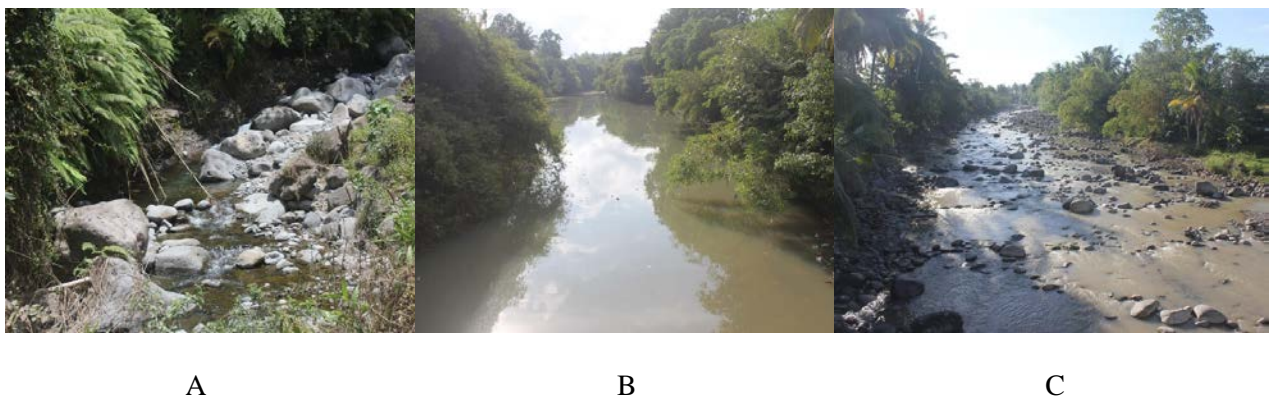
Komoditi unggulan dari Kabupaten Bulukumba adalah dari sektor perkebunan, yang terdiri dari kelapa, cengkeh, kopi, lada/merica dan coklat/kakao. Sedangkan komoditi karet dikelola oleh pihak swasta. Jumlah produksi dan luas perkebunan yang ada di Kabupaten Bulukumba dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Jumlah produksi dan luas perkebunan di Kabupaten Bulukumba

Total	Karet	Kelapa	Cengkeh	Kopi	Lada	Coklat	Lainnya
Luas (ha)	0	12.205	4.648	5.197	2.350	7.253	7.840
Produksi (ton)	0	217	17	207	45	603	41

Sumber: BPS Kabupaten Bulukumba (2012) dengan modifikasi

Kegiatan penelitian “Kuantifikasi Jasa Lingkungan Air dan Karbon Pola Agroforestri pada Hutan Rakyat di Wilayah DAS Jeneberang” dilaksanakan di DAS Balantieng, yang merupakan salah satu DAS di Wilayah Sungai (WS) Jeneberang. DAS Balantieng yang mempunyai luas sekitar 202,35 km², di mana secara geografis terletak pada 121° BT dan 5°25' LS. Secara administratif terletak pada 4 Kabupaten di Propinsi Sulawesi Selatan, yaitu Bulukumba, Bantaeng, Gowa dan Sinjai yang meliputi 37 desa dalam 6 kecamatan. Kecamatan-kecamatan tersebut yaitu Bulukumba, Gantarang Kindang, Ujung Bulu, Bissapu, Tompobulu dan Sinjai Barat.



Gambar 8. Kondisi sungai utama DAS Balantieng bagian hulu (A), tengah (B) dan hilir (C)

Kelas kelerengan DAS Balantieng, yang mempunyai panjang sungai utama sekitar 53,39 km, beragam dari kelas I sampai V. Kelas I menempati wilayah paling luas yaitu 60,93 % dari luas DAS, diikuti kelas II sebesar 13,2 %, kelas V sebesar 11,83 %, kelas III sebesar 7,55 % dan kelas IV sebesar 6,49 %.

Tabel 10. Pembagian luas DAS Balantieng menurut kelas kelerengan

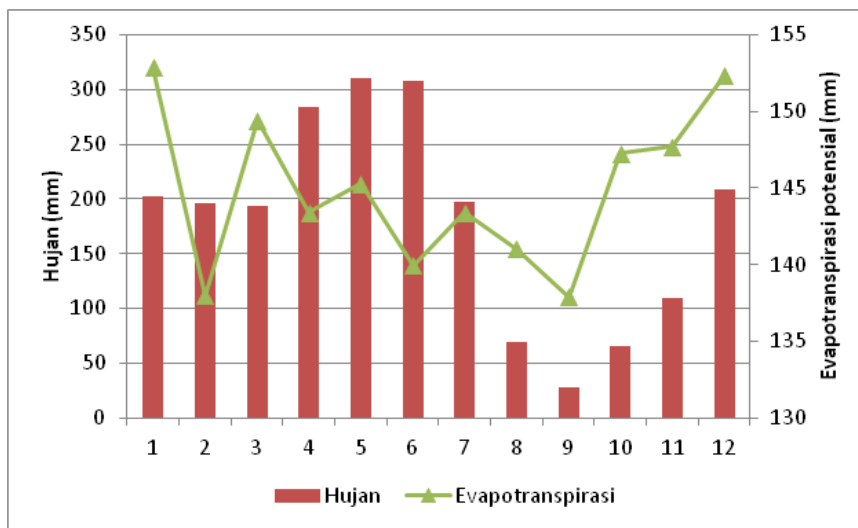
No	Kemiringan	Kelas	Keterangan	Luas	
				Km ²	%
1	0 - 8 %	I	Datar - berombak	123,29	60,93
2	8-15 %	II	Berombak - bergelombang	26,71	13,20
3	15-25 %	III	Bergelombang- berbukit	15,28	7,55
4	25-40 %	IV	Berbukit - bergunung	13,12	6,49
5	> 40 %	V	Bergunung curam	23,94	11,83
Jumlah				202,35	100

DAS Balantieng terdiri dari 3 ordo tanah yaitu Inseptisol, Entisol dan Andisol. Dari 3 ordo yang tersebar pada DAS Balantieng terdapat 2 ordo yang mendominasi yaitu Inseptisol dengan luas 43,73 % dari luas DAS dan Entisol sekitar 40,70 % luas DAS.

Tabel 11. Pembagian luas DAS Balantieng menurut Ordo tanah

No	Ordo	Luas	
		Km ²	%
1	Andisol	31,52	15,58
2	Entisol	82,35	40,70
3	Inseptisol	88,48	43,73
Jumlah		202,35	100

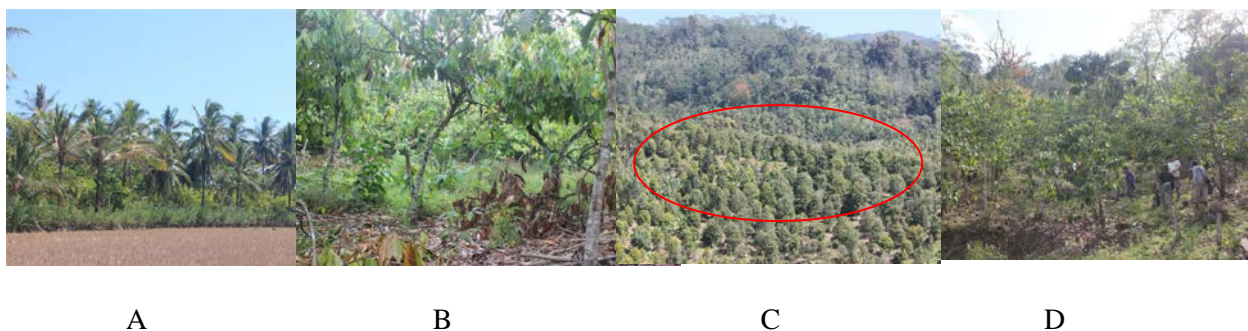
Secara umum DAS Balantieng berdasarkan klasifikasi iklim menurut Mohr (1993) masuk dalam golongan daerah agak basah (golongan II) dan berdasarkan klasifikasi Schmidt-Ferguson (1951) termasuk golongan B (basah). Berdasarkan data curah hujan tahun 1990 - 2010 dan data stasiun Matajang pada tahun 1990 - 2010, curah hujan tahunan di DAS Balantieng bervariasi antara 1.581 – 5.032 mm per tahun dengan rata-rata curah hujan 2.270 mm per tahun. Curah hujan harian tertinggi berkisar antara 56 – 151 mm per hari. Balantieng mempunyai perbedaan kondisi musim basah dan musim kering yang jelas, dimana sekitar 75% musim basah terjadi pada bulan November sampai Juli. Sedangkan pada musim kering terjadi pada bulan Agustus - Oktober. Potensi evapotranspirasi rata-rata (*evapotranspiration*) sebesar 1.739 mm per tahun.



Gambar 9. Curah hujan rata-rata bulanan dan nilai dugaan evapotranspirasi potensial di DAS Balantieng

3.2. Sistem Penggunaan Lahan

Berdasarkan analisis citra satelit, setidaknya ada 18 Sistem Penggunaan Lahan (SPL) yang ada di DAS Balantieng. Jika dilihat dari letaknya di DAS Balantieng, maka jenis-jenis SPL yang ditemukan di lapangan dapat dikelompokkan menjadi lima: 1) Bagian bawah/hilir DAS meliputi SPL kelapa (monokultur, agroforestri sederhana dan multistrata), 2) Bagian bawah dan tengah meliputi SPL coklat multistrata, kebun campuran dan monokultur karet, 3) Bagian tengah DAS meliputi jambu mete (agroforestri sederhana) dan gmelina (agroforestri sederhana), 4) Bagian tengah dan atas DAS meliputi SPL agroforestri coklat sederhana dan cengkeh multistrata, dan 5) Bagian atas DAS yang terdiri dari SPL agroforestri cengkeh sederhana, agroforestri kopi sederhana, hutan sekunder (bekas tebangan) dan hutan tidak terganggu.



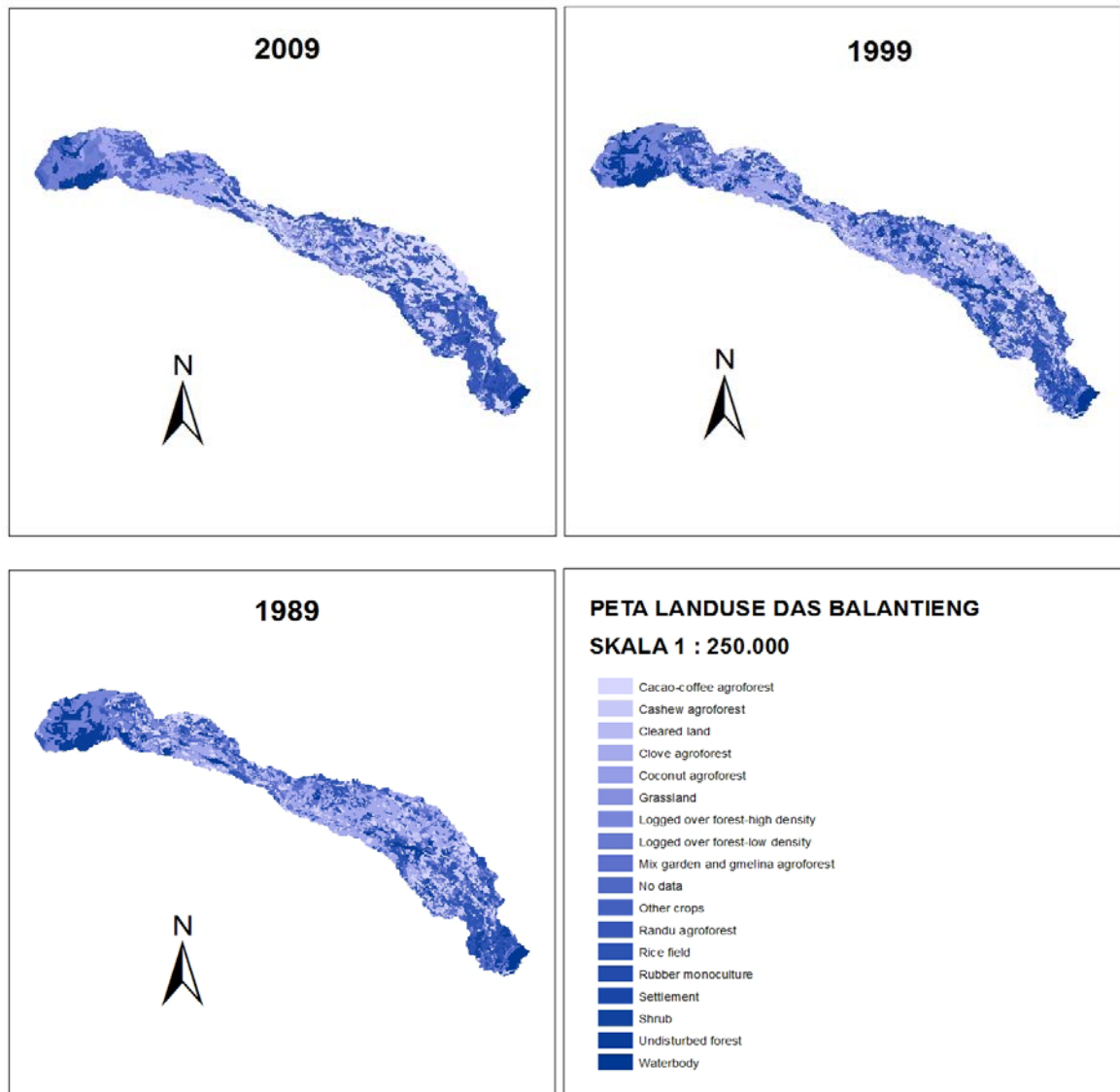
Gambar 10. Sistem kelapa (A) yang banyak terdapat di DAS hilir; sistem coklat di DAS tengah (B); sistem cengkeh (C) dan kopi (E) yang banyak terdapat di daerah DAS hulu

Tabel 12. Hasil klasifikasi tutupan lahan berdasarkan citra landsat tahun 2009

No	Tutupan Lahan	Luas (ha)				
		DAS Hulu	DAS Tengah	DAS Hilir	Total	%
1	Agroforestri coklat-kopi	156,81	2542,29	1595,80	4294,89	21,22
2	Agroforestri jambu mete		31,41	217,72	249,12	1,23
3	Agroforestri cengkeh	2422,93	1023,27		3446,20	17,03
4	Agroforestri kelapa	107,93	249,27	253,66	610,86	3,02
5	Padang rumput	137,63	136,55	362,52	636,71	3,15
6	Lahan terbuka			48,57	48,57	0,24
7	Hutan bekas tebangan - kepadatan tinggi	1123,80			1123,80	5,55
8	Hutan bekas tebangan – kepadatan rendah	342,75	0,18	1,79	344,72	1,70
9	Kebun campuran dan agroforestri gmelina	854,78	990,83	914,66	2760,27	13,64
10	Tidak ada data	7,36		0,44	7,80	0,04
11	Tanaman lainnya	636,04	322,48	715,48	1674,00	8,27
12	Sawah	507,76	1110,32	1898,66	3516,74	17,38
13	Monokultur karet			97,36	97,36	0,48
14	Agroforestri randu					-
15	Pemukiman	7,87	100,57	403,13	511,58	2,53
16	Perdu		2,81	40,98	43,79	0,22
17	Hutan tidak terganggu	606,05		5,85	611,90	3,02
18	Badan air	49,95	13,37	194,36	257,68	1,27
Grand Total		6961,65	6523,34	6750,99	20235,97	100,00

Analisis perubahan penggunaan lahan di DAS Balantieng diperoleh dengan membandingkan data luas masing-masing tutupan lahan yang tersedia tahun 1989, 1999 dan 2009 (Tabel 13). Pada peta tutupan lahan tahun 1989, kondisi dan situasi tutupan lahan hutan di DAS Balantieng adalah sekitar 20,39 %, namun kemudian tampak terjadi deforestasi hingga tahun 2009. Laju deforestasi terjadi cukup besar pada tahun 1999 – 2009 dengan penurunan luas hutan tak terganggu hingga hampir 1.000 ha.

Pada tutupan lahan agroforestri, terutama tipe agroforestri coklat-kopi, terjadi peningkatan yang cukup luas sekitar 12,4 % selama periode 20 tahun (Gambar 11). Pada periode tahun 1999 – 2009 terjadi peningkatan tipe kebun campuran dan agroforestri gmelina. Sedangkan areal lahan pertanian sawah yang semula terjadi kenaikan pada periode tahun 1989 – 1999 sebesar 1,35 %, namun pada periode tahun 1999 – 2009 terjadi penurunan sebesar 0,77 %.



Gambar 11. Peta Tutupan Lahan DAS Balantieng

Komoditas coklat dan kopi merupakan komoditas unggulan pada masa ini, sehingga masyarakat sangat antusias menanam coklat dan kopi. Sementara itu, luasan agroforestri jambu mete mengalami penurunan yang cukup tajam, yaitu dari 1.269 pada tahun 1989 menjadi hanya 249 ha pada tahun 2009. Menurunnya profitabilitas dan kendala produksi menyebabkan masyarakat merubah lahannya menjadi SPL lain yang dianggap lebih menguntungkan.

Tabel 13. Luas tutupan lahan DAS Balantieng Tahun 1989, 1999 dan 2009

No	Sistem Penggunaan Lahan	1989		1999		2009	
		Luas (ha)	%	Luas (ha)	%	Luas (ha)	%
1	Agroforestri coklat-kopi	1.783,34	8,81	1.949,42	9,63	4.294,89	21,22
2	Agroforestri jambu mete	1.269,16	6,27	1.062,40	5,25	249,12	1,23
3	Agroforestri cengkeh	4.269,54	21,10	3.940,30	19,47	3.446,20	17,03
4	Agroforestri kelapa	529,46	2,62	933,45	4,61	610,86	3,02
5	Padang rumput	236,46	1,17	462,61	2,29	636,71	3,15
6	Lahan terbuka	202,47	1,00	434,77	2,15	48,57	0,24
7	Hutan bekas tebangan - kepadatan tinggi	1.653,40	8,17	1.439,30	7,11	1.123,80	5,55
8	Hutan bekas tebangan -kepadatan rendah	839,13	4,15	829,45	4,10	344,72	1,70
9	Kebun campuran dan agroforestri gmelina	2.663,66	13,16	1.968,28	9,73	2.760,27	13,64
10	Tidak ada data	7,80	0,04	7,80	0,04	7,80	0,04
11	Tanaman lainnya	596,03	2,95	612,16	3,03	1.674,00	8,27
12	Sawah	3.399,13	16,80	3.673,04	18,15	3.516,74	17,38
13	Monokultur karet	79,36	0,39	79,67	0,39	97,36	0,48
14	Agroforestri randu	100,67	0,50	168,08	0,83	0,00	-
15	Pemukiman	127,00	0,63	203,41	1,01	511,58	2,53
16	Perdu	588,30	2,91	619,37	3,06	43,79	0,22
17	Hutan tidak terusik	1.633,37	8,07	1.594,79	7,88	611,90	3,02
18	Badan air	257,68	1,27	257,68	1,27	257,68	1,27
Grand Total		20.235,97	100,00	20.235,97	100,00	20.235,97	100,00

3.3. Struktur dan Keragaman Jenis Hutan Rakyat

Keanekaragaman jenis pohon

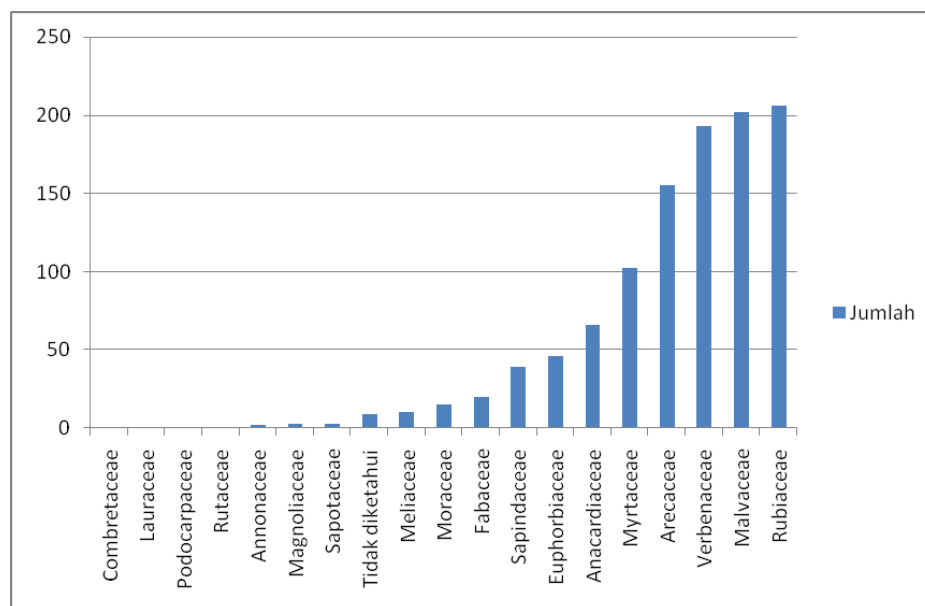
Kegiatan analisis vegetasi untuk menghitung cadangan karbon dan keanekaragaman jenis dilakukan pada 12 pola tanam yang berbeda, yaitu: agroforestri sederhana coklat, agroforestri sederhana jambu mete, agroforestri kompleks cengkeh, agroforestri sederhana cengkeh, agroforestri kompleks kelapa, agroforestri sederhana kelapa, monokultur kelapa, agroforestri sederhana kopi, agroforestri sederhana gmelina, kebun campuran dan monokultur karet. Berdasarkan kegiatan eksplorasi di lapangan, pada 39 plot dengan ukuran 5 m x 40 m untuk tumbuhan dengan diameter 2 – 30 cm dan ukuran 50 m x 40 m untuk tumbuhan dengan diameter >30 cm, ditemukan 40 jenis tumbuhan dengan jumlah total 1.075 pohon dengan jumlah bervariasi sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Jumlah tumbuhan pada semua plot penelitian

No	Jenis		Famili	Jumlah
	Nama lokal	Nama ilmiah		
1	Akasia	<i>Acacia sp</i>	<i>Fabaceae</i>	6
2	Alpukat	<i>Persea gratissima</i>	<i>Lauraceae</i>	1
3	Aren	<i>Arenga pinnata</i>	<i>Arecaceae</i>	8
4	Baek	(belum diketahui)	(belum diketahui)	1
5	Bonde	(belum diketahui)	(belum diketahui)	1
6	Cempaka	<i>Michelia champaka</i>	<i>Magnoliaceae</i>	3
7	Cengkeh	<i>Syzygium aromaticum</i>	<i>Myrtaceae</i>	95
8	Durian	<i>Durio zibethinus</i>	<i>Malvaceae</i>	22
9	Duwet	<i>Syzygium cumini</i>	<i>Myrtaceae</i>	1
10	Gamal	<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Fabaceae</i>	5
11	Gmelina	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Verbenaceae</i>	183
12	Jabon	<i>Neolamarckia cadama</i>	<i>Rubiaceae</i>	2
13	Jambu air	<i>Syzygium aquea</i>	<i>Myrtaceae</i>	5
14	Jati	<i>Tectona grandis</i>	<i>Verbenaceae</i>	8
15	Jeruk Bali	<i>Citrus grandis</i>	<i>Rutaceae</i>	1
16	Coklat	<i>Theobroma cacao</i>	<i>Malvaceae</i>	178
17	Kakne	(belum diketahui)	(belum diketahui)	3
18	Karet	<i>Hevea brasiliensis</i>	<i>Euphorbiaceae</i>	46
19	Kayu Cina	<i>Podocarpus spp.</i>	<i>Podocarpaceae</i>	1
20	Kelapa	<i>Cocos nucifera</i>	<i>Arecaceae</i>	143
21	Ketapang	<i>Terminalia catappa</i>	<i>Combretaceae</i>	1
22	Kopi	<i>Coffea sp</i>	<i>Rubiaceae</i>	205
23	Langsat	<i>Lansium domesticum</i>	<i>Meliaceae</i>	7
24	Mangga	<i>Mangifera indica</i>	<i>Anacardiaceae</i>	21
25	Mete	<i>Anacardium occidentale</i>	<i>Anacardiaceae</i>	43
26	Naknasak	(belum diketahui)	(belum diketahui)	3
27	Nangka	<i>Artocarpus heterphyllus</i>	<i>Moraceae</i>	11
28	Petai	<i>Parkia spesiosa</i>	<i>Fabaceae</i>	6
29	Petai Cina	<i>Leucaena leucecephala</i>	<i>Fabaceae</i>	1
30	Pinang	<i>Pinanga patula</i>	<i>Arecaceae</i>	4
31	Rambutan	<i>Nephelium lappaceum</i>	<i>Sapindaceae</i>	39
32	Randu	<i>Ceiba pentandra</i>	<i>Malvaceae</i>	2
33	Rao	<i>Dracontomelon dao</i>	<i>Anacardiaceae</i>	2
34	Rapo-rapo jawa	(belum diketahui)	(belum diketahui)	1
35	Salam	<i>Syzygium polyanthum</i>	<i>Myrtaceae</i>	1
36	Sawo	<i>Manilkara kauki</i>	<i>Sapotaceae</i>	3
37	Sengon	<i>Paraserianthes falcataria</i>	<i>Fabaceae</i>	2
38	Srikaya	<i>Annona squamosa</i>	<i>Annonaceae</i>	2
39	Sukun	<i>Artocarpus altilis</i>	<i>Moraceae</i>	4
40	Suren	<i>Toona sureni</i>	<i>Meliaceae</i>	3
Total				1.074

Dari Tabel 13 dapat dilihat bahwa tiga jenis tumbuhan dengan jumlah terbanyak adalah Kopi (*Coffea sp*) sebanyak 205 pohon, gmelina (*Gmelina arborea*) sebanyak 183 pohon dan Coklat *Theobroma cacao* sebanyak 178 pohon. Sedangkan jenis dengan jumlah paling sedikit adalah Alpukat (*Persea gratissima*) baik, bonde, duwet (*Syzgium cumini*) jeruk Bali (*Citrus grandis*), kayu Cina (*Podocarpus spp.*), ketapang (*Terminalia catappa*) petai Cina (*Leucaena leucacephala*) rapo-rapo jawa dan salam (*Syzygium polyanthum*), masing-masing sebanyak 1 pohon.

Berdasarkan familinya, total ditemukan 18 famili dan 5 tumbuhan yang belum diketahui familinya. Dari 18 famili yang ada, 5 famili dengan jumlah pohon terbanyak adalah berturut-turut dari famili *Rubiaceae*, *Malvaceae*, *Verbenaceae*, *Arecaceae* dan *Myrtaceae*. Sebaran jumlah tumbuhan untuk tiap famili dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Sebaran jumlah pohon berdasarkan famili

Jumlah jenis terbanyak ditemukan pada penggunaan lahan dengan pola tanam kebun campuran (*mix garden*) dengan 21 jenis tumbuhan, sedangkan jumlah jenis paling sedikit ditemukan pada monokultur karet (*rubber monokultur*) yang hanya ditemukan 1 jenis tumbuhan yaitu kayu karet. Sedikit berbeda dengan monokultur kelapa (*coconut monokultur*) yang ditemukan jenis lain selain kelapa yaitu Mete (*Anacardium occidentale*) meskipun jumlahnya hanya 1 pohon. Jumlah tumbuhan untuk masing-masing SPL selengkapnya bisa dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Jumlah jenis dan sebaran kelas diameter pohon pada tiap SPL

No	Sistem penggunaan lahan	Jumlah jenis*	Jumlah pohon menurut kelas diameter*			
			2-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	> 30 cm
1.	Agroforestri kompleks coklat	17	35	22	7	14
2.	Agroforestri sederhana coklat	8	24	18	5	**
3.	Agroforestri sederhana jambu mete	8	8	14	13	**
4.	Agroforestri kompleks cengkeh	11	47	34	5	9
5.	Agroforestri sederhana cengkeh	8	44	37	8	2
6.	Agroforestri kompleks kelapa	15	35	13	14	45
7.	Monokultur kelapa	2	**	**	17	**
8.	Agroforestri sederhana kelapa	5	16	11	10	55
9.	Agroforestri sederhana kopi	6	149	2	2	**
10.	Agroforestri sederhana gmelina	5	119	40	12	5
11.	Kebun campuran	21	49	30	15	44
12.	Monokultur karet	1	**	8	22	15

Keterangan: * = perhitungan dilakukan pada plot 5x40 m; ** = Tidak ditemukan

Pada SPL agroforestri kopi dan cengkeh tidak ditemukan pohon dengan diameter >30 cm, yang mengindikasikan bahwa rerata diameter pohon karet dan cengkeh dibawah 30 cm. Hal yang sedikit berbeda ditemukan pada monokultur karet yang tidak memiliki pohon dengan kelas diameter 2-10 cm yang menunjukkan umur pohon karet mayoritas yang ditemukan pada usia sedang sampai tua. Sedangkan pada SPL monokultur kelapa hanya ditemukan satu kelas diameter yaitu 20-30 cm.

Meskipun memiliki jumlah jenis terbanyak (Tabel 13), total jumlah pohon pada SPL kebun campuran hanya 138 pohon, lebih sedikit dibandingkan agroforestri gmelina (176 pohon) dengan jumlah jenis 5 dan agroforestri kopi (153 pohon) dengan jumlah jenis 6. Kepadatan terbesar ditemukan pada agroforestri gmelina dengan kepadatan 2.875 individu/ha dan terkecil pada monokultur kelapa yaitu 283 ha. Nilai kepadatan sangat dipengaruhi oleh manajemen pengelolaan lahan, seperti jarak tanam dan tindakan silvikultur, khususnya penjarangan. Pada sistim monokultur dengan jarak tanam yang teratur maka nilai kepadatan akan cenderung rendah, sebagaimana terlihat pada monokultur kelapa dan monokultur karet (Tabel 15).

Tabel 15. Jumlah pohon, kepadatan rata-rata dan basal area untuk setiap SPL

No	Sistem penggunaan lahan	Kepadatan (individu/ha)	BA pohon pokok (m ² /ha)	BA pohon asosiasi (m ² /ha)	BA total	Rasio BA pokok/BA total
1.	Agroforestri kompleks coklat	1090	3.61	13.01	16.62	0.22
2.	Agroforestri sederhana coklat	1175	7.43	6.23	13.66	0.55
3.	Agroforestri sederhana jambu mete	583	12.79	2.41	15.20	0.84
4.	Agroforestri kompleks cengkeh	1086	7.42	6.10	13.51	0.59
5.	Agroforestri sederhana cengkeh	892	9.08	3.47	12.55	0.80
6.	Agroforestri kompleks kelapa	1108	16.26	9.09	25.35	0.64
7.	Monokultur kelapa	283	11.40	1.06	12.46	0.91
8.	Agroforestri sederhana kelapa	708	14.49	7.58	22.07	0.68
9.	Agroforestri sederhana kopi	2550	4.27	1.98	6.24	0.79
10.	Agroforestri sederhana gmelina	2875	23.91	4.08	27.98	0.87
11.	Kebun campuran	1230			25.81	
12.	Monokultur karet	525	24.50	0.00	24.50	1.00

Keterangan :

- 1) BA = Basal area/Luas bidang dasar
- 2) Penghitungan kepadatan dan basal area menggunakan plot berukuran 5 x 40 m
- 3) Nilai di atas adalah nilai rata-rata dari masing-masing SPL

Basal area total terbesar dijumpai pada SPL kebun campuran (27,98 m²/ha) dan terendah pada SPL agroforestri kopi (6,24 m²/ha). Pada kebun campuran, di mana jumlah pohon penyusun sangat banyak, jarak tanam tidak teratur dan umur tanaman yang sangat bervariasi sangat sulit dipisahkan antara pohon pokok dan tanaman campurannya, sehingga BA pada kebun campuran dihitung tanpa memisahkan komponen tanaman penyusunnya.

Basal area suatu area sangat dipengaruhi oleh jumlah dan diameter pohon penyusunnya. Semakin banyak pohon dengan diameter yang besar akan menghasilkan nilai BA yang besar pula. Hal ini bisa dilihat dari Tabel 15, dimana monokultur kelapa dengan jumlah pohon hanya 17 memiliki BA yang lebih tinggi dibandingkan pada agroforestri kopi, dengan jumlah pohon jauh lebih banyak, (153 pohon) dan hanya berbeda sedikit dengan agroforestri sederhana cengkeh dan coklat.

Monokultur karet, dengan umur yang relatif seragam dan kisaran diameter yang tidak berbeda jauh, memiliki BA pohon yang terbesar dengan rasio basal area tanaman pokok dengan tanaman selingan (RBPS) 1 (satu), yang menunjukkan bahwa jumlah jenis pada 3 plot monokultur karet hanya ditemukan satu jenis tumbuhan. RBPS terkecil ditemukan pada agroforestri kompleks coklat sebesar 0.16 (plot 6) dan RBPS terbesar adalah 1. Selain pada monokultur karet, RBPS dengan nilai 1 juga ditemukan pada agroforestri sederhana gmelina (plot 37), agroforestri sederhana cengkeh (plot 20) dan monokultur kelapa (plot 12).

Menurut Hairiah *et al.* (2006), RBPS digunakan sebagai dasar penentuan kelas tutupan lahan, dimana semakin tinggi (>0.85) nilai RBPS berarti SPL tersebut cenderung monokultur. Rasio basal area tanaman pokok dengan tanaman selingan < 0.4 menunjukkan bahwa sistem penggunaan lahan tersebut sudah rapat dan banyak jenis pohon yang ditanam. Hairiah *et al.* (2006) menemukan bahwa perkebunan mahoni dan pinus memiliki RBPS yang hampir sama (sekitar 0.95) karena perkebunan

pinus dan mahoni dikelola oleh Perum PERHUTANI yang memprioritaskan tanaman pokok dari pada tanaman selingan.

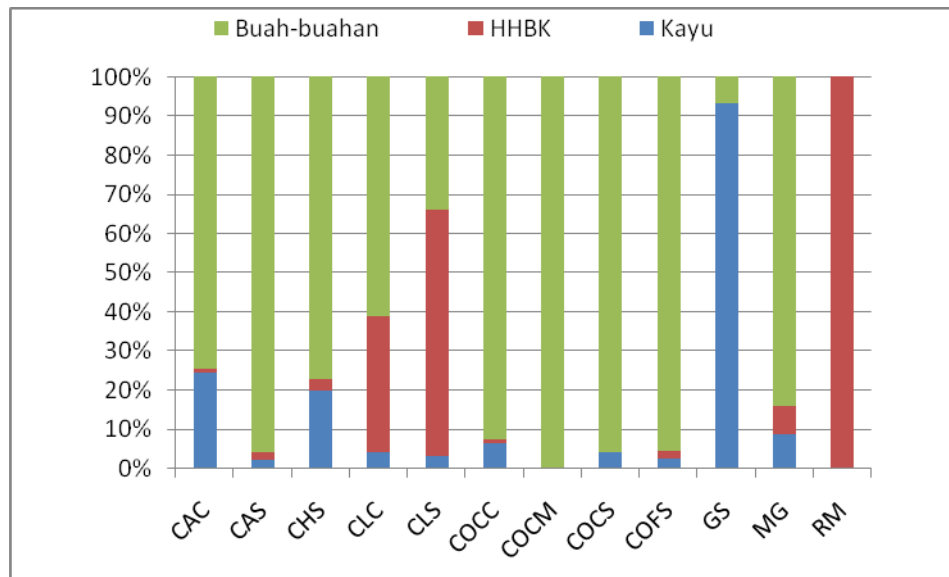
Hasil penelitian ini juga tidak berbeda jauh dengan kriteria dan hasil penelitian Hairiah *et al.* (2006) tersebut. Pada Tabel 15 terlihat bahwa RBPS terbesar dijumpai pada sistem monokultur (kisaran RBPS 0,91 – 1), kemudian berturut-turut lebih kecil pada agroforestri sederhana (kisaran RBPS 0,55 – 0,87) dan agroforestri kompleks (kisaran RBPS 0,22 – 0,64).

Tabel 16. Jumlah pohon berdasarkan pemanfaatannya untuk setiap SPL

No	Sistem penggunaan lahan	Kategori pohon		
		Kayu	HHBK	Buah-buahan
1.	Agroforestri kompleks coklat	13	1	45
2.	Agroforestri sederhana coklat	1	1	34
3.	Agroforestri sederhana jambu mete	4	1	22
4.	Agroforestri kompleks cengkeh	4	26	46
5.	Agroforestri sederhana cengkeh	3	35	22
6.	Agroforestri kompleks kelapa	6	1	57
7.	Monokultur kelapa			17
8.	Agroforestri sederhana kelapa	4		49
9.	Agroforestri sederhana kopi	4	3	97
10.	Agroforestri sederhana gmelina	148		6
11.	Kebun campuran	6	1	70
12.	Monokultur karet		33	
Total		193	102	465

Keterangan/*remarks*: penghitungan menggunakan plot berukuran 5 x 40 m

Berdasarkan jumlahnya, kategori dengan jumlah terbanyak adalah jenis buah-buahan (61,2%), disusul kayu (25,4%) dan HHBK (13,4%). Untuk kategori buah-buahan didominasi oleh Coklat (*Theobroma cacao*) (205 pohon), kayu didominasi oleh Gmelina (*Gmelina arborea*) (157 pohon), dan HHBK didominasi oleh cengkeh (*Syzigium aromaticum*) (65 pohon). Sebaran jumlah pohon untuk setiap SPL berdasarkan pemanfaatan pohon dapat dilihat pada Tabel 16 dan Gambar 13.



Gambar 13. Sebaran jumlah pohon untuk setiap SPL berdasarkan pemanfaatan pohon

Keterangan: CAC = Agroforestri (AF) kompleks coklat; CAS = AF sederhana coklat; CHS = AF sederhana jambu mete; CLC = AF kompleks cengkeh; CLS = AF sederhana cengkeh; COCC = AF kompleks kelapa; COCM = Monokultur kelapa; COCS = AF sederhana kelapa; COFS = AF sederhana kopi; GS = AF sederhana gmelina; MG = Kebun campuran; RM = Monokultur karet

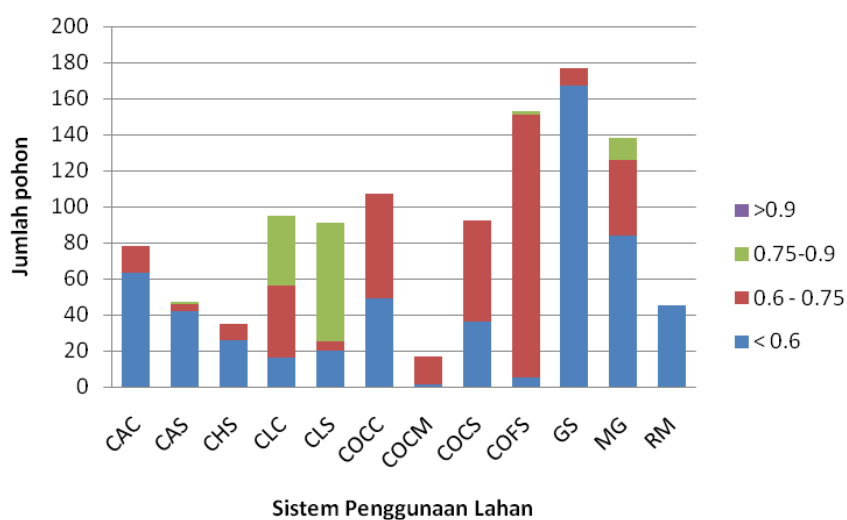
Sebaran jenis pohon berdasarkan kerapatan kayu

Pembagian kelas diameter ini berdasarkan pembagian kelas diameter yang dilakukan oleh Kurniawan dkk (2010) dan Markum *et al.* (2013), yang membagi kayu kedalam empat kategori yaitu kayu ringan (kerapatan <0,6), kayu sedang (kerapatan 0,6-0,75), kayu berat (kerapatan 0,75-0,9) dan kayu sangat berat (kerapatan >0,9). Kerapatan dan sebarannya untuk setiap SPL dapat dilihat pada Tabel 17.

Kerapatan kayu terendah adalah sebesar 0,28 g/cm³ yaitu kayu randu (*Ceiba pentandra*) pada plot mete agroforestri sederhana dan tertinggi sebesar 0,81 yaitu kayu sawo (*Manilkara kauki*) pada plot kebun campuran. Secara keseluruhan, kerapatan kayu terbanyak adalah kayu ringan dengan kerapatan <0,6 g/cm³ (51,5%), kemudian berturut-turut kayu sedang dengan kerapatan 0,6-0,75 g/cm³ (37,3%) dan kayu berat dengan kerapatan 0,75-0,9 g/cm³ (11,2%). Dari keseluruhan plot tidak ditemukan kayu berat (kerapatan >0,9 g/cm³). Jumlah pohon berdasarkan kerapatan kayu pada masing-masing SPL dapat dilihat pada Gambar 13.

Tabel 17. Kerapatan jenis kayu dan sebarannya pada berbagai SPL

No	SPL	Persentase jumlah pohon berdasar kelas kerapatan kayu (%)				Kerapatan min	Kerapatan max	Kerapatan rata-rata < 0,6 g/cm ³
		< 0,6 g/cm ³	0,6 – 0,75 g/cm ³	0,75-0,9 g/cm ³	>0,9 g/cm ³			
1.	Agroforestri kompleks coklat	80,8	19,2	0,0	0,0	0,33	0,74	0,44
2.	Agroforestri sederhana coklat	89,4	8,5	2,1	0,0	0,43	0,80	0,47
3.	Agroforestri sederhana jambu mete	74,3	25,7	0,0	0,0	0,28	0,60	0,46
4.	Agroforestri kompleks cengkeh	16,8	42,1	41,1	0,0	0,33	0,80	0,60
5.	Agroforestri sederhana cengkeh	22,0	5,5	72,5	0,0	0,43	0,80	0,70
6.	Agroforestri kompleks kelapa	45,8	54,2	0,0	0,0	0,28	0,73	0,54
7.	Monokultur kelapa	5,9	94,1	0,0	0,0	0,56	0,60	0,59
8.	Agroforestri sederhana kelapa	39,1	60,9	0,0	0,0	0,43	0,60	0,54
9.	Agroforestri sederhana kopi	3,3	95,4	1,3	0,0	0,33	0,80	0,60
10.	Agroforestri sederhana gmelina	94,4	5,6	0,0	0,0	0,36	0,70	0,43
11.	Kebun campuran	60,9	30,4	8,7	0,0	0,36	0,81	0,58
12.	Monokultur karet	100,0	0,0	0,0	0,0	0,54	0,54	0,54
Total		51,5	37,3	11,2	0,0			



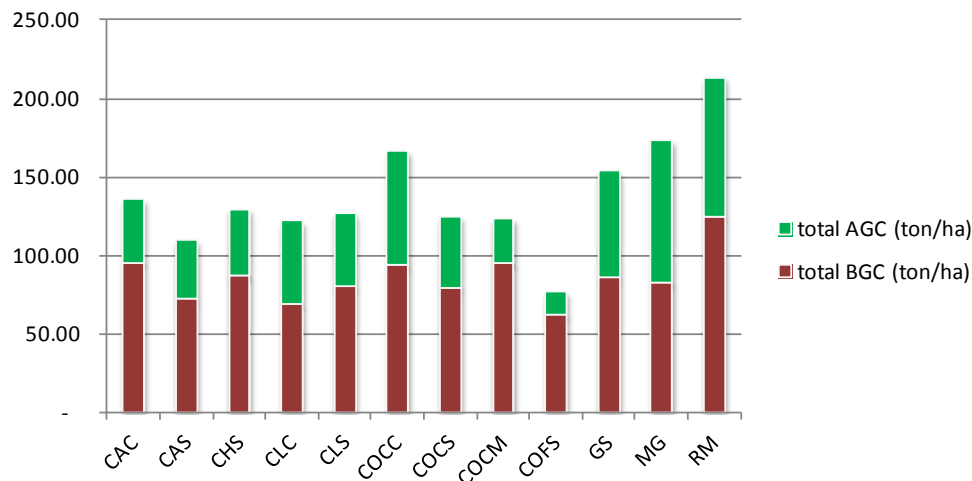
Gambar 14. Jumlah pohon berdasarkan kerapatan kayu pada masing-masing SPL

Keterangan: CAC = Agroforestri (AF) kompleks coklat; CAS = AF sederhana coklat; CHS = AF sederhana jambu mete; CLC = AF kompleks cengkeh; CLS = AF sederhana cengkeh; COCC = AF kompleks kelapa; COCM = Monokultur kelapa; COCS = AF sederhana kelapa; COFS = AF sederhana kopi; GS = AF sederhana gmelina; MG = Kebun campuran; RM = Monokultur karet

3.4. Cadangan Karbon pada Skala Plot di DAS Balantieng

Cadangan karbon tersimpan pada masing-masing Sistem Penggunaan Lahan

Cadangan karbon bervariasi pada masing-masing SPL, tergantung komposisi jenis, kelas diameter dan kepadatan vegetasi penyusunnya, nekromasa yang tersimpan, serta bahan organik tanah. Gambar 15 menunjukkan total cadangan karbon (diatas dan dibawah permukaan tanah: akar_tanah) tertinggi ada pada monokultur karet (RM) yang mencapai 213,61 ton/ha, sementara terkecil pada agroforestri kopi (COFS) hanya 77,37 ton/ha. Tingginya cadangan karbon pada monokultur karet diduga karena kondisi tegakan yang karet yang sudah berumur lebih dari 8 tahun dengan diameter pohon relatif seragam, yaitu rata-rata 25,2 cm, dengan kerapatan kayu 0,49 gr/cm³ sehingga total biomassa pohon per satuan luas relatif tinggi. Cadangan karbon di atas tanah pada SPL ini hampir sama dengan kebun campuran (MG) yang terdiri dari berbagai jenis dengan basal area yang tinggi (Tabel 15). Cadangan karbon di atas tanah pada monokultur karet adalah 89,3 ton/ha sedangkan pada kebun campuran 90,6 ton/ha. Namun demikian, monokultur karet memiliki cadangan karbon dibawah permukaan tanah yang tertinggi, yaitu mencapai 124,36 ton/ha sehingga menghasilkan total cadangan karbon tertinggi.



Gambar 15. Cadangan karbon berbagai SPL

Keterangan: AGC = Cadangan karbon di atas permukaan tanah; BGC = Cadangan karbon di bawah permukaan tanah; CAC = Agroforestri (AF) kompleks coklat; CAS = AF sederhana coklat; CHS = AF sederhana jambu mete; CLC = AF kompleks cengkeh; CLS = AF sederhana cengkeh; COCC = AF kompleks kelapa; COCM = Monokultur kelapa; COCS = AF sederhana kelapa; COFS = AF sederhana kopi; GS = AF sederhana gmelina; MG = Kebun campuran; RM = Monokultur karet

Cadangan karbon di atas tanah pada agroforestri kopi sebesar 13,9 ton ha⁻¹. Nilai ini lebih rendah dibandingkan dengan nilai yang didapatkan pada agroforestri sistem di Sumberjaya, Lampung; yakni sebesar 26 ton ha⁻¹ pada sistem kopi monokultur dan 69 ton ha⁻¹ pada sistem kopi dengan naungan. Rendahnya cadangan karbon pada kopi diduga karena karakteristik pohon kopi itu sendiri yang terdiri dari rumpun berbatang kecil. Satu rumpun pohon kopi terdiri dari 2 hingga 7 batang dengan rata-rata diameter 3,3 cm. Kondisi ini menyebabkan agroforestri kopi memiliki basal area terkecil di antara SPL lainnya, yaitu hanya 4,27. Meskipun kerapatan kayu kopi relatif tinggi, yaitu 0,6 g/cm³, namun basal area yang rendah menghasilkan total biomassa yang tetap rendah.

Komponen penyusun karbon tersimpan di atas permukaan tanah

Komponen cadangan karbon di atas permukaan tanah yang diukur pada penelitian ini adalah pohon, tumbuhan bawah, nekromasa tidak berkayu (seresah) dan nekromasa berkayu. Persentase cadangan karbon terbesar terdapat pada pohon, yaitu mencapai 99, 21%. Komponen lain menunjukkan

cadangan karbon yang sangat kecil (kurang dari 1 %), yaitu nekromasa berkayu, ekromasa tidak berkayu, dan tumbuhan bawah dengan persentase berturut-turut 0,77%, 0,02% dan 0,01%.

Secara lebih rinci, komponen cadangan karbon di atas permukaan tanah masing-masing SPL lahan disajikan dalam Tabel 18. Mengingat persentase cadangan karbon yang sangat dominan (99%), maka dinamika cadangan karbon antar SPL ditentukan oleh cadangan karbon pohon itu sendiri. Cadangan karbon di atas permukaan tanah pada kebun campuran dan monokultur karet adalah yang tertinggi. Sebagaimana dibahas sebelumnya, pada kedua SPL ini basal area pohonnya juga tertinggi sehingga menghasilkan cadangan biomassa dan karbon yang tinggi pula.

Tabel 18. Komponen penyusun cadangan karbon di atas permukaan tanah

Sistem Penggunaan Lahan (SPL)	Komponen cadangan karbon di atas permukaan tanah				Total
	Pohon (ton/ha)	Tumbuhan bawah (ton/ha)	Nekromasa tidak berkayu (ton/ha)	Nekromasa berkayu (ton/ha)	
Agroforestri kompleks coklat	40,22	0,003	0,014	0,11	40,35
Agroforestri sederhana coklat	37,60	0,002	0,013	-	37,61
Agroforestri sederhana jambu mete	42,72	0,003	0,010	-	42,74
Agroforestri kompleks cengkeh	52,29	0,002	0,014	0,43	52,73
Agroforestri sederhana cengkeh	46,69	0,004	0,008	0,31	47,01
Agroforestri kompleks kelapa	72,20	0,002	0,012	0,58	72,79
Monokultur kelapa	29,04	0,004	0,006	-	29,05
Agroforestri sederhana kelapa	45,37	0,002	0,008	0,35	45,73
Agroforestri sederhana kopi	13,91	0,002	0,010	1,77	15,66
Agroforestri sederhana gmelina	67,60	0,004	0,010	0,32	67,94
Kebun campuran	89,62	0,002	0,011	0,99	90,62
Monokultur karet	89,23	0,006	0,007	-	89,25
Rata-rata	52,21	0,003	0,01	0,40	52,63
Persentase (%)	99,21	0,01	0,02	0,77	

Tumbuhan bawah pada seluruh SPL memiliki cadangan karbon yang relatif rendah dibanding komponen lainnya, yaitu rata-rata 0,003 ton/ha atau hanya 0,01% dari total cadangan karbon di atas permukaan tanah. Berdasarkan observasi di lapangan, tumbuhan bawah yang ada setiap SPL adalah berupa rumput liar atau tumbuhan yang tidak dibudidayakan. Tumbuhan bawah berupa rumput liar segar dan tidak memiliki bagian berkayu ini menyebabkan biomassa (berat kering) yang rendah (kadar air tinggi) sehingga cadangan karbonnya pun rendah.

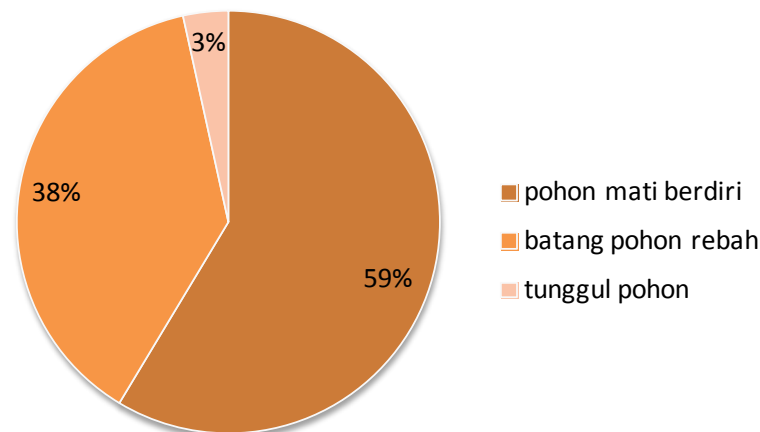
Tingkat kerimbunan tumbuhan bawah bervariasi, dengan cadangan karbon berkisar antara 0,002-0,006 ton/ha. Cadangan karbon tumbuhan bawah tertinggi tampak pada monokultur karet, diduga karena rimbunnya tumbuhan bawah pada tegakan karet yang cukup terbuka dengan jarak tanam yang teratur. Beberapa SPL yang menunjukkan cadangan karbon tumbuhan bawah relatif tinggi juga didapat pada SPL tegakan dengan akses cahaya relatif terbuka seperti agroforestri sederhana cengkeh, monokultur kelapa, dan agroforestri sederhana gmelina.

Beberapa SPL menunjukkan cadangan karbon tumbuhan bawah yang relatif rendah dibandingkan SPL lainnya, seperti pada agroforestri coklat, agroforestri kelapa, agroforestri sederhana cengkeh, agroforestri kopi dan kebun campuran. Pada sistem kebun campuran, rendahnya cadangan karbon tumbuhan bawah diduga karena tajuk yang relatif rapat sehingga sedikit cahaya yang masuk ke lantai bawah dan menyebabkan tumbuhan bawah tidak tumbuh dengan optimal. Pada agroforestri coklat, tampak serasah daun Coklat yang belum terdekomposisi seringkali menutupi lantai hutan sehingga

tumbuhan bawah juga seringkali tidak tumbuh lebat. Demikian juga pada SPL agroforestri kelapa yang seringkali dikombinasikan dengan tanaman Coklat dengan tajuk rapat dan seresah yang menutupi lantai hutan.

Nekromasa tidak berkayu menyediakan cadangan karbon yang lebih tinggi dari tumbuhan bawah, dengan rata-rata 0,01 ton/ha atau 0,02 % dari total cadangan karbon di atas permukaan tanah. Nekromasa tidak berkayu yang dijumpai berupa seresah daun dan ranting-ranting kecil yang berasal dari vegetasi yang terdapat diplot pengukuran. Dengan demikian variasi cadangan karbon nekromasa tidak berkayu menggambarkan produksi seresah dari pohon-pohon penyusunnya. Hal ini dapat dilihat pada cadangan karbon pada beberapa SPL yang relatif tinggi dibanding SPL lainnya seperti pada agroforestri coklat, agroforestri kompleks cengkeh, dan agroforestri kompleks kelapa. Sebagaimana dibahas sebelumnya, agroforestri coklat (baik sederhana maupun kompleks) menghasilkan guguran daun relatif banyak yang menutupi lantai tanah. Sementara pada kelapa monokultur, agroforestri sederhana kelapa dan agroforestri sederhana cengkeh menunjukkan cadangan karbon yang relatif lebih rendah dibanding SPL lainnya. Hal ini diduga berkaitan dengan tajuk yang lebih sedikit/terbuka pada sistem ini sehingga menghasilkan produksi seresah yang sedikit.

Di antara komponen cadangan karbon di atas permukaan tanah selain pohon, nekromasa berkayu menunjukkan cadangan karbon yang tertinggi (dibandingkan dengan nekromasa tidak berkayu dan tumbuhan bawah). Rata-rata cadangan karbon dari nekromasa berkayu tersebut adalah 0,4 ton/ha atau 0,77% dari total cadangan karbon di atas permukaan tanah. Nekromasa berkayu yang dijumpai pada plot pengukuran sebagian besar berupa pohon mati berdiri (59%) dan batang pohon mati rebah (38%), serta sebagian kecil berupa tunggul pohon bekas tebangan (3%) (Gambar 16). Rendahnya jenis nekromasa berkayu yang berupa tunggul pohon menunjukkan aktifitas tebangan pohon yang rendah. Hal ini diduga berkaitan dengan jenis-jenis yang dibudidayakan oleh masyarakat di wilayah DAS Balantieng yang merupakan jenis perkebunan penghasil bukan kayu (kelapa, coklat, coklat, cengkeh dll).



Gambar 16. Jenis nekromasa berkayu yang dijumpai pada plot pengukuran

Cadangan karbon dari nekromasa berkayu juga bervariasi antar SPL. Tampak cadangan karbon nekromasa tertinggi terdapat pada agroforestri kopi. Jenis nekromasa yang banyak terdapat pada plot pengukuran agroforestri ini berupa batang rebah yang tampak sudah cukup lama, dengan tingkat kelapukan 40-50%. Beberapa SPL tidak dijumpai nekromasa berkayu seperti agroforestri sederhana coklat, agroforestri jambu mete, monokultur kelapa, dan monokultur karet.

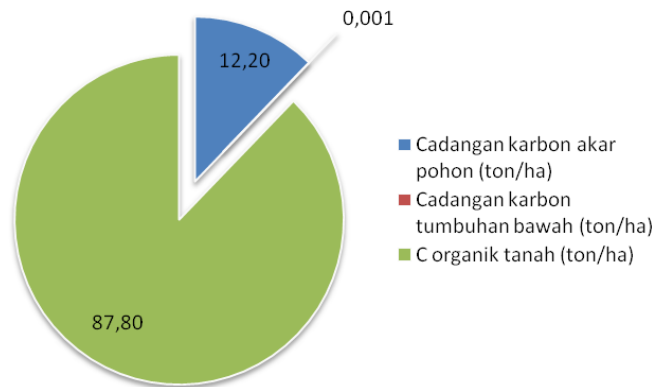
Berdasarkan analisis citra satelit pada peta tutupan lahan tahun 1989, 1999 dan 2009, didapatkan 16 sistem penggunaan lahan yang ada di DAS Balantieng. Dengan menggunakan data pengukuran cadangan karbon pada skala plot masing-masing sistem (dan juga berdasarkan studi literatur), didapatkan cadangan karbon di atas permukaan tanah pada ke-16 sistem penggunaan lahan di DAS Balantieng sebagaimana disajikan pada Tabel 19. Data cadangan karbon di atas permukaan tanah ini yang kemudian dijadikan data dasar dalam perhitungan cadangan karbon dan dinamika cadangan karbon pada skala lanskap.

Tabel 19. Cadangan karbon di atas permukaan tanah masing-masing Sistem Penggunaan Lahan di DAS Balantieng

No	Sistem Penggunaan Lahan	Cadangan karbon di atas permukaan tanah (ton/ha)	Sumber
1	Agroforestri coklat-kopi	31,21	Diolah dari data primer
2	Agroforestri jambu mete	42,74	Diolah dari data primer
3	Lahan terbuka	1,49	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
4	Agroforestri cengkeh	49,87	Diolah dari data primer
5	Agroforestri kelapa	49,19	Diolah dari data primer
6	Padang rumput	1,49	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
7	Hutan bekas tebangan-kepadatan tinggi	189,64	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
8	Hutan bekas tebangan-kepadatan rendah	189,64	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
9	Kebun campuran	90,62	Diolah dari data primer
10	Tanaman lainnya	0,99	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
11	Agroforestri randu	42,5	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
12	Sawah	0,99	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
13	Monokultur karet	41	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
14	Pemukiman	27,42	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
15	Perdu	22,11	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
16	Hutan tidak terganggu	284,13	Ekadinata, <i>et al.</i> (2010)
17	Badan air	0	

Komponen penyusun karbon tersimpan di bawah permukaan tanah

Cadangan karbon di bawah permukaan tanah yang diukur pada penelitian ini adalah akar pohon, akar tumbuhan bawah dan C-organik tanah. Rata-rata cadangan karbon di bawah permukaan tanah di lokasi penelitian adalah 85,56 ton/ha. Gambar 17 menunjukkan bahwa C-organik tanah merupakan komponen yang menyediakan cadangan karbon di bawah permukaan yang terbesar yaitu sebesar 75,12 ton/ha (87,8% dari total cadangan karbon di bawah permukaan tanah), disusul akar pohon sebesar 10,44 ton/ha (12,2%), dan sejumlah sangat kecil dari akar tumbuhan bawah 0,001 ton/ha (0,001%).



Gambar 17. Persentase komponen penyusun cadangan karbon di atas permukaan tanah

Tabel 20 menunjukkan bahwa cadangan karbon di bawah permukaan tanah yang tertinggi terdapat pada lahan monokultur karet, disusul agroforestri kompleks coklat, monokultur kelapa, dan agroforestri kompleks kelapa. Pola agroforestri kopi, agroforestri kompleks cengkeh dan agroforestri sederhana coklat termasuk SPL yang memperlihatkan cadangan karbon terendah.

Variasi cadangan karbon dari akar pohon antar SPL mengikuti variasi yang ada pada cadangan karbon yang berasal dari pohon, mengingat biomassa akar dihitung berdasarkan estimasi menurut IPCC (2006) yaitu sebesar 20% dari biomassa pohon. Demikian juga dengan variasi cadangan karbon akar tumbuhan bawah yang mengikuti variasi cadangan karbon tumbuhan bawah sebagaimana pada Tabel 18.

Tabel 20. Komponen penyusun cadangan karbon di bawah permukaan tanah

Sistem Penggunaan Lahan	Komponen cadangan karbon di bawah permukaan tanah			
	Akar pohon (ton/ha)	Akar tumbuhan bawah (ton/ha)	C-organik tanah (ton/ha)	Total
Agroforestri kompleks coklat	8,04	0,0006	87,48	95,52
Agroforestri sederhana coklat	7,52	0,0005	64,76	72,28
Agroforestri sederhana jambu mete	8,54	0,0006	78,38	86,93
Agroforestri kompleks cengkeh	10,46	0,0004	58,66	69,12
Agroforestri sederhana cengkeh	9,34	0,0009	70,93	80,27
Agroforestri kompleks kelapa	14,44	0,0003	79,36	93,80
Monokultur kelapa	5,81	0,0008	89,06	94,87
Agroforestri sederhana kelapa	9,07	0,0005	70,25	79,33
Agroforestri sederhana kopi	2,78	0,0004	58,92	61,70
Agroforestri sederhana gmelina	13,52	0,0008	72,16	85,68
Kebun campuran	17,92	0,0004	64,95	82,88
Monokultur karet	17,85	0,0012	106,52	124,36
Rata-rata	10,44	0,001	75,12	85,56

Kandungan C-organik pada monokultur karet menunjukkan nilai tertinggi dibandingkan dengan SPL lainnya. Sistem kelapa monokultur dan agroforestri kompleks coklat termasuk SPL lainnya yang menunjukkan kandungan C-organik relatif lebih tinggi. Tingginya C-organik pada monokultur karet diduga karena pada lokasi tersebut terdapat pemeliharaan intensif termasuk perlakuan pemupukan pada tanaman karet. Sementara pada system agroforestri sederhana cengkeh dan agroforestri kopi

menunjukkan nilai C-organik terendah. Lokasi kedua system tersebut terdapat di daerah dataran tinggi dengan topografi pegunungan yang memiliki kelereng relatif tinggi. Hal ini diduga menyebabkan banyaknya erosi sehingga kesuburan tanah menurun.

3.5. Estimasi Cadangan Karbon dan Dinamika Cadangan Karbon pada Skala Lanskap di DAS Balantieng

Estimasi cadangan karbon pada skala lanskap

Berdasarkan interpretasi citra lansat tahun 2009, total luas area sistem penggunaan lahan agroforestri di DAS Balantieng adalah 11.458 ha atau 57 % dari total luas DAS Balantieng (Tabel 21). Berdasarkan perhitungan rata-rata cadangan karbon masing-masing SPL, didapatkan total cadangan karbon dari SPL agroforestri di DAS Balantieng adalah sebesar 1,5 Mega ton karbon. Total cadangan karbon pada DAS Balantieng pada seluruh tutupan lahan (dengan memasukkan SPL non-agroforestri seperti hutan negara (baik dalam bentuk lahan bekas tebangan maupun hutan tidak terusik, lahan persawahan, padang rumput, pemukiman dan lahan terbuka) adalah 1,95 Mega ton. Dengan demikian, sistem pola agroforestri cukup efektif dalam menyerap karbon, terbukti dengan hanya luas 57 %, tetapi mampu menyerap 76 % dari serapan karbon total di seluruh wilayah DAS Balantieng.

Tabel 21. Cadangan karbon pada hutan rakyat pola agroforestri di DAS Balantieng

SPL	Luas area* (ha)	Rata-rata cadangan karbon pada skala plot (ton/ha)		Cadangan karbon skala lanskap (ton)		Total cadangan karbon (ton)
		Di atas permukaan tanah	Di bawah permukaan tanah	Di atas permukaan tanah	Di bawah permukaan tanah	
Agroforestri coklat-kopi	4.294,89	31,21	76,51	134.043,52	328.602,03	462.645,55
Agroforestri jambu mete	249,12	42,74	86,92	10.647,39	21.653,51	32.300,90
Agroforestri cengkeh	3.446,20	49,87	74,7	171.861,99	257.431,14	429.293,13
Agroforestri kelapa	610,86	49,19	89,33	30.048,20	54.568,12	84.616,33
Kebun campuran dan agroforestri gmelina	2.760,27	90,62	72,94	250.135,67	201.334,09	451.469,76
Monokultur karet	97,36	89,25	124,36	8.689,38	12.107,69	20.797,07
Total	11.458,70			605.426,15	875.696,59	1.481.122,74

Keterangan: * Berdasarkan analisis citra lansat tahun 2009

Berdasarkan luas area per SPL, sistem agroforestri coklat-kopi merupakan SPL yang memiliki total cadangan karbon tertinggi di Wilayah DAS Balantieng, yaitu mencapai 462.638 ton. SPL jenis ini SPL lain yang memiliki cadangan karbon total di atas 400.000 ton adalah sistem kebun campuran dan agroforestri gmelina dan agroforestri cengkeh. Berdasarkan analisis citra lansat tahun 2009 serta observasi di lapangan, sistem coklat banyak terdapat di Tengah dan DAS Hilir, sedangkan jenis kopi banyak terdapat di DAS Hulu. Sistem cengkeh banyak terdapat di daerah DAS Hulu serta sebagian di DAS Tengah. Sementara sistem kebun campuran terdapat merata di seluruh wilayah DAS Balantieng.

Emisi dan sekuestrasi karbon pada DAS Balantieng (1989-2009)

Tabel 22 menunjukkan peningkatan emisi yang cukup besar pada tahun 1999-2009 dibandingkan tahun 1989-1999. Hal ini terutama disebabkan oleh tingkat deforestasi yang lebih tinggi pada tahun 1999-2009 dibandingkan 10 tahun sebelumnya. Awal masa reformasi pada akhir tahun 90-an dan euphoria desentralisasi menyebabkan sebagian masyarakat menduduki hutan negara dan merubahnya menjadi penggunaan lahan lain yang memiliki cadangan karbon lebih rendah. Akibatnya, emisi karbon menjadi tinggi pada era ini. Total emisi DAS Balantieng pada tahun 1989-1999 adalah sebesar 30.729 ton CO₂ eq per tahun dengan sequestrasi sebesar 10.565 ton CO₂ eq per tahun. Sehingga, total net emisi (setelah dikurangi dengan sekuestrasi adalah sebesar 20.164 ton CO₂ eq per tahun.

Tabel 22. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng pada tahun 1989 - 2009

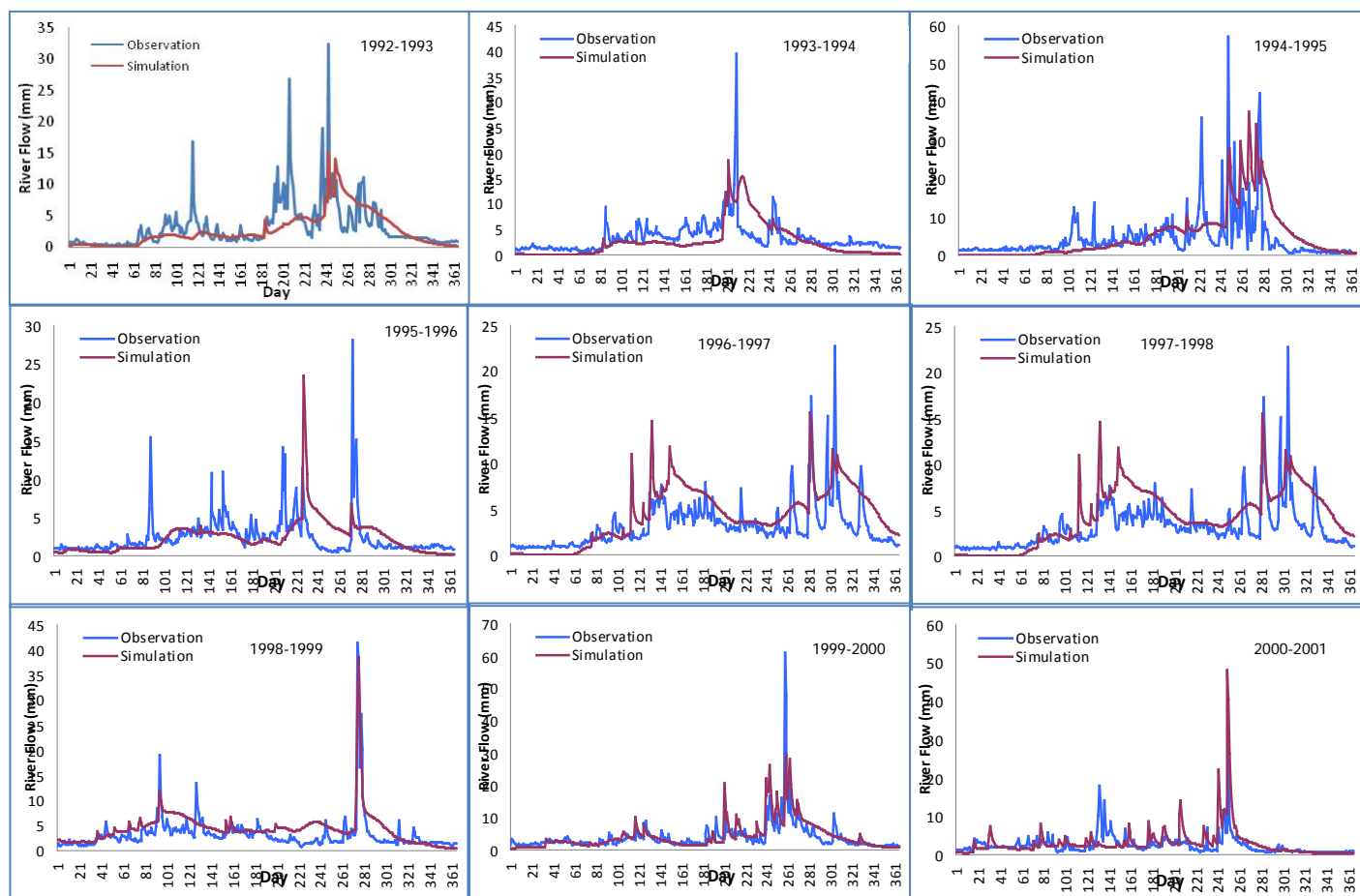
No	Variabel	Nilai	
		1989-1999	1999-2009
1	Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	1,52	9,4
2	Sekuestrasi per-Ha Luasan (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	0,5221	2,67
3	Total Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	30.729	190.174
4	Total Sekuestrasi (ton CO ₂ -eq/tahun)	10.565	53.980
5	Net Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	0,9965	6,73
6	Net Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	20.164	136.193

Sementara itu, pada tahun 1999-2009, total emisi di DAS Balantieng adalah sebesar 190.174 ton CO₂ eq per tahun dengan sekuestrasi sebesar 53.980 ton CO₂ eq per tahun. Sehingga, total net emisinya adalah sebesar 136.193 ton CO₂ eq per tahun. Perubahan penggunaan lahan terjadi lebih dinamis pada tahun 1999-2009 yang terlihat dari jumlah emisi dan sekuestrasi yang relatif lebih tinggi pada masa ini dibandingkan dekade sebelumnya.

3.6. Kondisi Tata Air di DAS Balantieng

Validasi Model

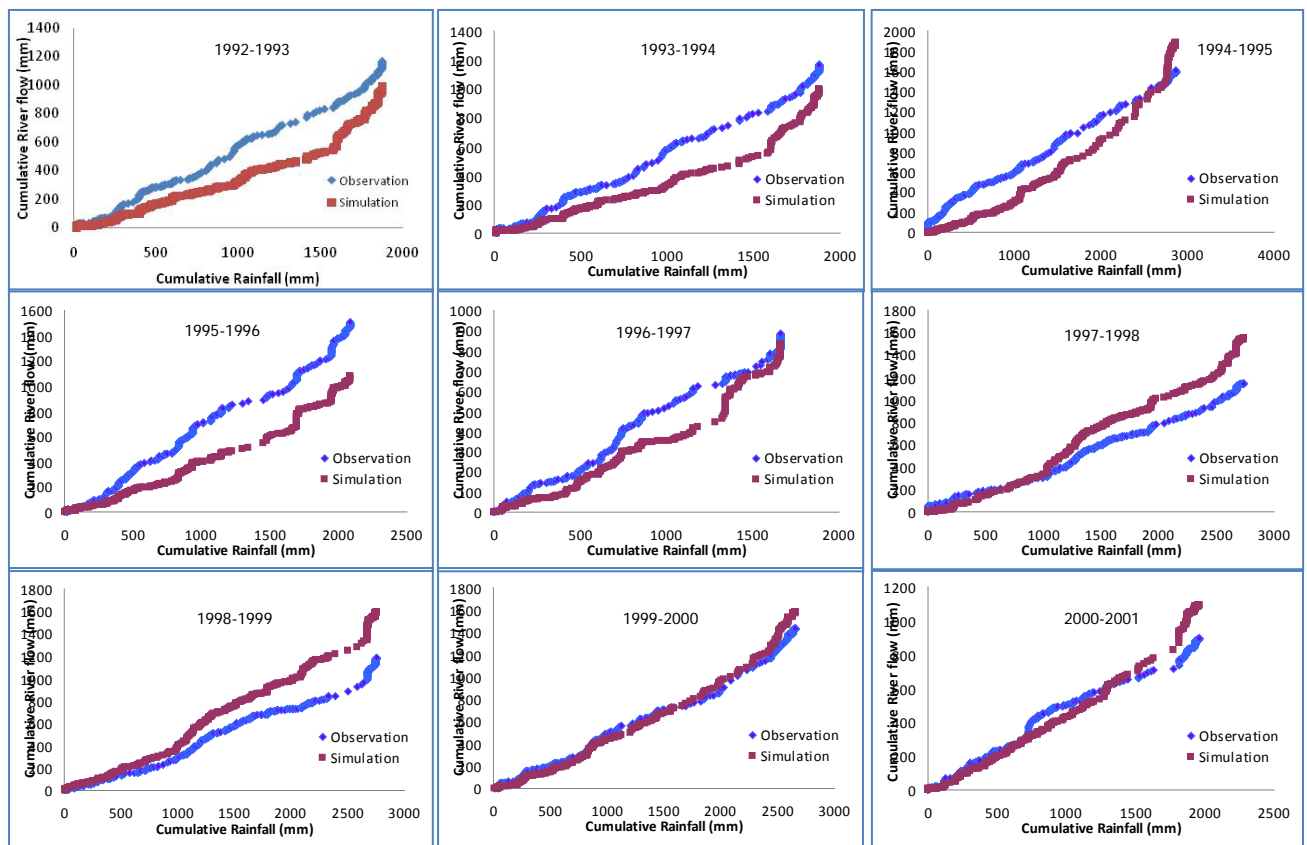
Indikator statistik yang digunakan untuk menguji kesesuaian model antara hasil simulasi dan pengukuran adalah koefisien Nash and Sutcliffe (1970) dan koefisien korelasi (Tabel 22), serta kurva kumulatif antara hujan dan debit (Gambar 19). Hasil analisis menunjukkan nilai antara satisfactory sampai Very good, berarti model dapat diterima dan dapat digunakan untuk mensimulasikan hasil air DAS Balantieng. Secara umum, hasil simulasi GenRiver dapat menggambarkan pola debit sungai Balantieng (Gambar 18).



Gambar 18. Hidrograf debit simulasi dan observasi

Tabel 23. Hasil indikator statistik

Tahun	n	Biased (%)	NSE	r	Biased (%)	NSE
1992/1993	365	-20,09	0,30	0,73	satisfactory	unsatisfactory
1993/1994	365	-24,17	-0,28	0,66	satisfactory	unsatisfactory
1994/1995	365	17,36	-0,06	0,85	satisfactory	unsatisfactory
1995/1996	365	-27,43	0,51	0,89	unsatisfactory	satisfactory
1996/1997	365	-4,92	0,29	0,70	Very good	unsatisfactory
1997/1998	365	43,15	-0,76	0,91	unsatisfactory	unsatisfactory
1998/1999	365	23,88	0,22	0,90	satisfactory	unsatisfactory
1999/2000	365	10,22	0,85	0,96	good	very good
2000/2001	365	39,55	-0,08	0,69	unsatisfactory	unsatisfactory



Gambar 19. Kurva kumulatif antara hujan dan debit (simulasi dan observasi)

Neraca air di DAS Balantieng

Neraca air DAS Balantieng yang dihitung selama 21 tahun (tahun 1989 – 2009) menunjukkan nilai evapotranspirasi berkisar antara 41 – 51 % dari curah hujan dengan nilai rata-rata sebesar 964,7 mm (46 %). Sedangkan nilai aliran permukaan sebesar 7 % dari total hujan yang jatuh atau 147,2 mm. Nilai aliran permukaan berkisar 3 – 12 % dari curah hujan yang jatuh. Nilai aliran permukaan yang kecil akan berpengaruh terhadap kualitas air sungai yang masih terjaga. Nilai aliran cepat tanah berkisar antara 1 – 6 % dan aliran dasar cukup stabil, berkisar antara 42 – 48 %. Secara umum fungsi DAS Balantieng masih cukup baik, dengan masih cukup stabilnya sumbangan debit sungai yang berasal dari aliran dasar.

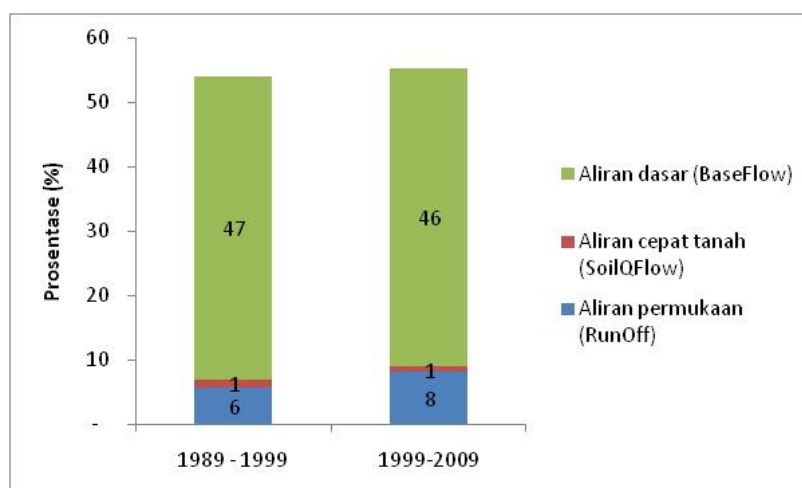
Tabel 24. Analisis neraca air DAS Balantieng Tahun 1989-2009

Indikator		Nilai minimal	Nilai rata-rata	Nilai maksimal
Curah hujan		1.581,1 mm	2.117,0 mm	3.198,6 mm
Evapotranspirasi		784,6 mm (50 %)	964,7 mm (46 %)	371,7 mm 1.299,8 (41 %)
RiverFlow:	<i>Run Off</i> (aliran permukaan)	51,8 mm (3 %)	147,2 mm (7 %)	371,7 mm (12)
	<i>Soil Quick Flow</i> (aliran cepat tanah)	0,0 mm (0 %)	21,5 mm (1 %)	177,9 mm (6 %)
	<i>Base Flow</i> (Aliran dasar)	661,3 mm (42 %)	987,1 mm (47 %)	1.528,4 mm (48 %)

Hasil analisis neraca air menunjukkan adanya peningkatan dan penurunan debit selama periode waktu 21 tahun (Tabel 25). Pada periode II (1999-2009) terjadi peningkatan debit yang lebih besar dibandingkan periode I (1989-1999), yaitu sebesar 2,03 % atau 0,20 % per tahun, dan terjadi penurunan evapotranspirasi sebesar 1,68 % atau 0,17 % per tahun. Hal ini disebabkan terjadi deforestasi yang cukup besar pada periode I dan periode II, sehingga menyebabkan penurunan evapotranspirasi dan peningkatan debit. Peningkatan debit ini perlu diwaspadai, karena penyumbang debit sungai terbesar berasal aliran permukaan dibandingkan aliran dasar pada periode II (Gambar 20).

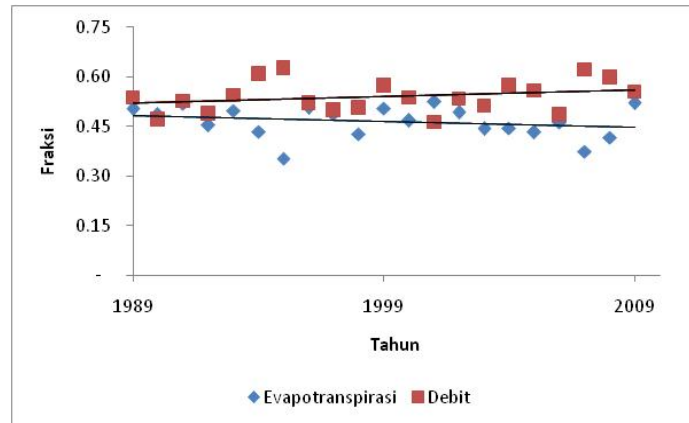
Tabel 25. Perubahan debit dan evapotranspirasi

Perubahan	Periode I	Periode II
	(1989 – 1999)	(1999 – 2009)
Evapotranspirasi (per tahun%)	- 0,01	- 0,17
(total %)	- 0,07	- 1,68
Debit (per tahun%)	- 0,38	0,20
(total %)	- 3.8	2.03



Gambar 20. Perbandingan aliran yang menyumbang debit sungai pada masing-masing periode

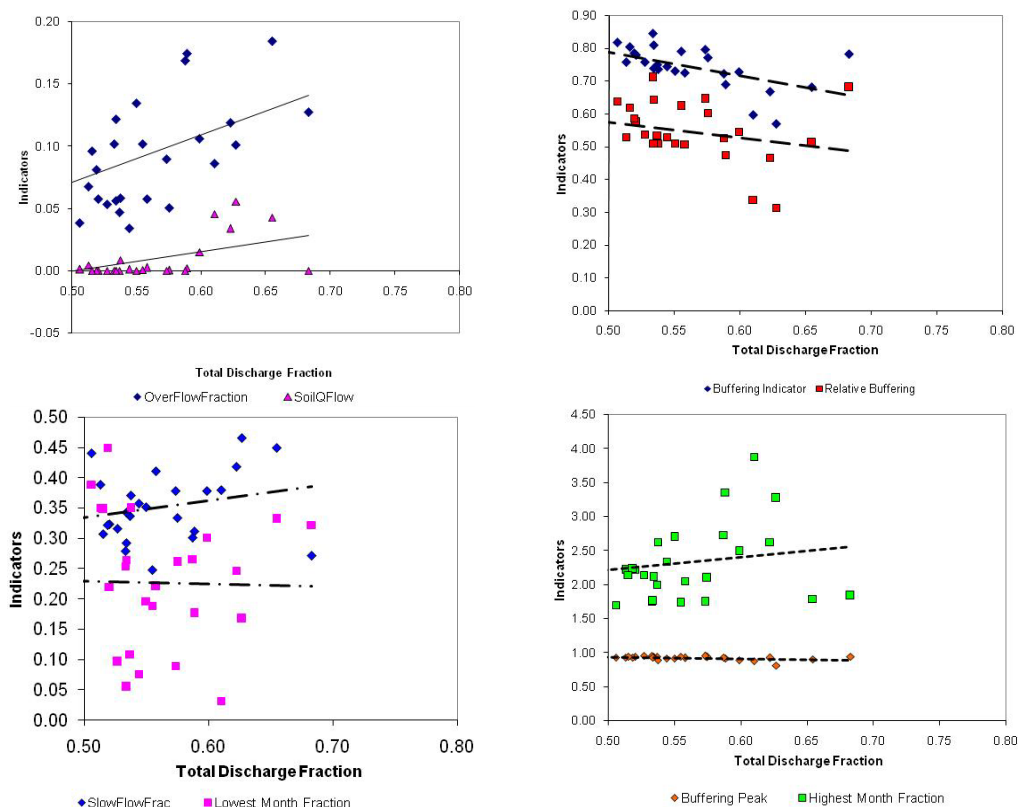
Gambar 21 menunjukkan fraksi evapotranspirasi dan debit per curah hujan tahunan untuk periode tahun 1989 – 2009. Untuk periode tahun 1989 – 1999 terjadi trend penurunan evapotranspirasi dan hal ini juga berlaku pada periode 1999 – 2009. Sedangkan untuk debit terjadi trend kenaikan debit untuk periode 1989 – 1999 dan trend kenaikan makin meningkat pada periode 1999 – 2009. Trend ini berbanding lurus dengan semakin tingginya tingkat deforestasi.



Gambar 21. Fraksi evapotranspirasi dan debit periode tahun 1989 – 2009

Kondisi hidrologi DAS Balantieng

Penilaian kondisi hidrologi melalui hubungan antara indikator fungsi-fungsi DAS dengan terjamahan pola hujan menjadi debit (fraksi debit). Pada periode 21 tahun pengukuran di DAS Balantieng agak terjadi penurunan kapasitas penyanggaan debit (*buffering capacity*) yang disebabkan oleh peningkatan debit oleh aliran permukaan (*surface flow*) dan aliran cepat tanah yang berkorelasi positif dengan kenaikan debit dan hujan. Secara umum kondisi hidrologi DAS masih cukup baik dengan diimbangnya isian air tanah (*Slow flow*) yang berkorelasi positif dengan kenaikan debit dan hujan. Demikian juga dengan kapasitas penyangga debit puncak masih cukup baik, tetapi perlu diwaspadai bila terjadi hujan dengan intensitas tinggi kadang-kadang dapat memicu banjir bandang (*flash floods*).



Gambar 22. Grafik Hubungan Indikator Fungsi DAS dengan fraksi debit total

3.7. Hasil Air dan Karbon pada beberapa Skenario Perubahan Penggunaan Lahan

Hasil air pada beberapa skenario perubahan penggunaan lahan

1. Skenario 1 (Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS) dan Skenario 2 (Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS)

Secara umum tidak terdapat perubahan yang berarti terhadap neraca air DAS Balantieng apabila tipe lahan agroforestri coklat-kopi menjadi agroforestri cengkeh dan monokultur karet. Namun perubahan tersebut dapat meningkatkan evapotranspirasi dan debit sungai (Tabel 26). Namun peningkatan debit berasal dari aliran permukaan dan aliran cepat tanah. Selain itu perubahan tipe dapat mengurangi simpanan air tanah.

Tabel 26. Analisis neraca air pada Skenario 1 dan Skenario 2

Indikator (mm)		Baseline	Skenario 1	Skenario 2
Curah hujan		2014,82 mm		
Evapotranspirasi		44,6 %	44,7 %	44,7 %
RiverFlow:	<i>Run Off</i> (aliran permukaan)	9,3 %	9,2 %	9,1 %
	<i>Soil Quick Flow</i> (aliran cepat tanah)	1,3 %	1,2 %	1,2 %
	<i>Base Flow</i> (Aliran dasar)	45,1 %	45,2 %	45,1 %

Secara umum perubahan tipe lahan agroforestri coklat-kopi menjadi agroforestri cengkeh dan monokultur karet tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap fungsi hidrologi DAS (Tabel 27). Hal ini diperkuat oleh nilai masing-masing kriteria penilaian fungsi hidrologi DAS, nilai perubahan indikator yang terjadi untuk masing-masing parameter masih berada dalam jangkaun perubahan lahan tipe baseline. Pada umumnya perlu diwaspadai satu hal, perubahan tipe penggunaan lahan ini akan memicu potensi terjadinya banjir bandang pada intensitas hujan tinggi, dilihat dari perubahan nilai *Highest Monthly Discharge Relative to Mean Rainfall*.

Tabel 27. Perubahan fungsi DAS yang dinyatakan dalam persentasi terhadap kondisi baseline

Kriteria	Indikator	Kisaran baseline	Rata-rata	
			Skenario 1	Skenario 2
Pengaliran air	<i>Total Discharge Fraction</i>	0,42 – 0,68	0,54	0,54
	<i>Buffering Indicator</i>	0,57 – 0,83	0,75	0,75
	<i>Relative Buffering Indicator</i>	0,31 – 0,71	0,55	0,55
Indikator daya penyangga DAS	<i>Buffering Peak Event</i>	0,81 – 0,93	0,93	0,93
	<i>Highest Monthly Discharge Relative to Mean Rainfall</i>	1,7 – 3,88	2,32	2,31
	<i>Overland Flow Fraction</i>	0,03 – 0,18	0,09	0,09
	<i>Soil Quick Flow Fraction</i>	0 – 0,06	0,01	0,01
Pelepasan aliran secara bertahap	<i>Slow Flow Fraction</i>	0,34 – 0,56	0,45	0,45
	<i>Lowest Month Fraction</i>	0,03 – 0,45	0,22	0,22

2. Skenario 3 (Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%) dan Skenario 4 (Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%)

Secara umum tidak terdapat perubahan yang berarti terhadap neraca air DAS Balantieng apabila tipe lahan agroforestri coklat-kopi menjadi agroforestri cengkeh dan monokultur karet, serta penurunan deforestasi 50 %. Namun pengurangan deforestasi, secara langsung dapat mengurangi aliran permukaan dan meningkatkan aliran dasar (Tabel 28).

Tabel 28. Analisis neraca air pada Skenario 3 dan Skenario 4

Indikator (mm)		Baseline	Skenario 3	Skenario 4
Curah hujan		2014,82 mm		
Evapotranspirasi		44,6 %	45 %	44,9 %
RiverFlow:	<i>Run Off</i> (aliran permukaan)	9,1 %	9,2 %	9,1 %
	<i>Soil Quick Flow</i> (aliran cepat tanah)	1,2 %	1,2 %	1,2 %
	<i>Base Flow</i> (Aliran dasar)	45,3 %	45 %	45,1 %

Secara umum perubahan tipe lahan agroforestri coklat-kopi menjadi agroforestri cengkeh dan monokultur karet serta penurunan 50 % deforestasi tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap fungsi hidrologi DAS (Tabel 27). Hal ini diperkuat oleh nilai masing-masing yang tidak terlalu signifikan selisihnya dengan nilai baseline. Demikian juga nilai perubahan yang terjadi untuk masing-masing parameter masih berada dalam jangkauan perubahan lahan tipe baseline. Pengaruh langsung pengurangan deforestasi, mengurangi terjadinya debit puncak pada saat hujan dengan intensitas tinggi.

Tabel 29. Perubahan fungsi DAS yang dinyatakan dalam persentasi terhadap kondisi baseline

Kriteria	Indikator	Kisaran baseline	Rata-rata	
			Skenario 3	Skenario 4
Pengaliran air	<i>Total Discharge Fraction</i>	0,42 – 0,68	0,54	0,54
Indikator daya penyangga DAS	<i>Buffering Indicator</i>	0,57 – 0,83	0,75	0,75
	<i>Relative Buffering Indicator</i>	0,31 – 0,71	0,55	0,55
	<i>Buffering Peak Event</i>	0,81 – 0,93	0,93	0,93
	<i>Highest Monthly Discharge Relative to Mean Rainfall</i>	1,7 – 3,88	2,32	2,32
	<i>Overland Flow Fraction</i>	0,03 – 0,18	0,09	0,09
	<i>Soil Quick Flow Fraction</i>	0 – 0,06	0,01	0,01
Pelepasan aliran secara bertahap	<i>Slow Flow Fraction</i>	0,34 – 0,56	0,44	0,45
	<i>Lowest Month Fraction</i>	0,03 – 0,45	0,22	0,22

Emisi karbon pada beberapa skenario perubahan penggunaan lahan

1. Skenario 1 (Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS)

Perhitungan emisi dengan skenario perubahan penggunaan lahan didasarkan pada matriks transisi tahun 1999-2009 dengan merubah baris pada matriks tersebut sesuai dengan skenario yang dibuat. Secara rinci, matriks transisi perubahan penggunaan lahan dengan skenario ini disajikan dalam Lampiran. Hasil dari perhitungan emisi dan sekuestrasi berdasarkan skenario 1 ini disajikan dalam Tabel 30.

Tabel 30. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 1

Variabel	1999-2009	2009-2019	2019-2029
1 Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	9,39	6,16	4,58
2 Sekuestrasi per-Ha Luasan (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	2,68	3,91	3,65
3 Total Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	190.107	124.723	92.603
4 Total Sekuestrasi (ton CO ₂ -eq/tahun)	54.227	79.050	73.870
5 Net Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	6,71	2,26	0,93
6 Net Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	135.880	45.673	18.734

Tabel 30 menunjukkan adanya penurunan laju emisi yang cukup tinggi yaitu dari 190.107 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 1999-2009 menjadi 124.723 ton CO₂ eq. per tahun dan 92.603 ton CO₂ eq. per tahun berturut-turut pada tahun 2009-2019 dan 2019-2029. Perubahan SPL AF kopi-coklat yang memiliki cadangan karbon lebih rendah dibandingkan SPL AF cengkeh dan monokultur karet menyebabkan tingginya sekuestrasi karbon pada simulasi ini, yaitu dari sebesar 54.227 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 1999-2009 menjadi 79.050 dan 73.870 ton CO₂ eq. per tahun berturut-turut pada tahun 2009-2019 dan 2019-2029. Selain tingkat sekuestrasi yang meningkat, laju emisi berdasarkan skenario ini juga menurun karena pada tingkat deforestasi yang sama dengan tahun 1999-2009, dengan luas hutan yang lebih rendah maka laju emisinya pun menurun. Keinginan masyarakat untuk merubah 50% SPL AF coklat-kopi menjadi AF cengkeh dan monokultur karet dapat menurunkan laju net emisi di DAS Balantieng dengan laju deforestasi yang tetap.

2. Skenario 2 (Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS)

Pada skenario ini, diasumsikan hanya 25% SPL AF coklat-kopi yang berubah menjadi AF cengkeh dan monokultur karet, mengingat kendala teknis dan ekonomi yang mungkin dihadapi oleh masyarakat dalam merubah SPL. Seperti halnya skenario 1, perhitungan perubahan emisi dan sekuestrasi yang terjadi dilakukan dengan merubah baris AF coklat-kopi pada matriks transisi sesuai skenario 2. Secara rinci, matriks transisi skenario 2 ini disajikan dalam Lampiran. Tingkat emisi dan sekuestrasi DAS Balantieng berdasarkan skenario 2 disajikan dalam Tabel 31.

Tabel 31. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 2

Variabel	1999-2009	2009-2019	2019-2029
1 Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	9,39	6,16	4,59
2 Sekuestrasi per-Ha Luasan (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	2,68	3,20	3,22
3 Total Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	190.107	124.723	92.800
4 Total Sekuestrasi (ton CO ₂ -eq/tahun)	54.227	64.812	65.168
5 Net Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	6,71	2,96	1,37
6 Net Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	135.880	59.910	27.632

Seperti halnya skenario 1, tingkat emisi total di DAS Balantieng menurun dari 190.107 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 1999-2009 berturut-turut menjadi 124.723 dan 92.800 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 2009-2019 dan tahun 2019-2029. Namun, karena hanya 25% dari AF coklat-kopi yang berubah menjadi AF cengkeh dan monokultur karet, dimana kedua SPL tersebut memiliki cadangan karbon yang lebih tinggi dibandingkan AF coklat-kopi, maka tingkat sekuestrasi pada skenario 2 lebih kecil dibandingkan skenario 1. Pada skenario 2, tingkat sekuestrasi di DAS Balantieng meningkat dari 54.227 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 1999-2009 menjadi berturut-turut sebesar 64.812 dan 65.168 pada tahun 2009-2019 dan 2019-2029. Net emisi pada skenario 2 menurun dari 135.880 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 1999-2009 menjadi berturut-turut 59.910 dan 27.623 ton CO₂ eq. per tahun pada tahun 2009-2019 dan 2019-2029. Penambahan penambatan karbon dengan merubah sebanyak 25% AF coklat-kopi menjadi AF cengkeh dan monokultur karet telah dapat menurunkan emisi di DAS Balantieng, tanpa mengurangi laju deforestasinya.

3. Skenario 3 (Perubahan 50% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%)

Pada skenario ini, selain merubah AF coklat-kopi menjadi AF cengkeh dan monokultur karet, juga diasumsikan laju deforestasi yang menurun sebesar 50% dari laju deforestasi pada tahun 1999-2009. Perhitungan dilakukan dengan merubah matriks transisi pada skenario 1 dari SPL hutan ke SPL lain menjadi setengahnya dan menambahkan jumlah pengurangan tersebut di SPL hutan ke SPL hutan. Secara rinci, matriks transisi perubahan SPL disajikan dalam Lampiran. Laju emisi dan sekuestrasi pada skenario 3 dapat disajikan dalam Tabel 32.

Tabel 32. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 3

Variabel	1999-2009	2009-2019	2019-2029
1 Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	9,39	5,55	4,41
2 Sekuestrasi per-Ha Luasan (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	2,68	3,91	3,63
3 Total Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	190.107	112.276	89.331
4 Total Sekuestrasi (ton CO ₂ -eq/tahun)	54.227	79.050	73.409
5 Net Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	6,71	1,64	0,79
6 Net Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	135.880	33.227	15.922

Tabel 32 menunjukkan penurunan total emisi dari pengurangan laju deforestasi cukup signifikan, yaitu dari 64.818 ton CO₂-eq/tahun menjadi 12.429 pada tahun 2009-2019, dan menurun menjadi 8.600 ton CO₂-eq/tahun pada tahun 2019-2029. Walaupun total sekuestrasi di DAS Balantieng pada skenario 3 sama dengan skenario 1, namun net emisi pada skenario 3 lebih kecil dibandingkan skenario 1 karena adanya pengurangan laju deforestasi.

4. Skenario 4 (Perubahan 25% AF coklat dan kopi menjadi AF cengkeh di hulu dan monokultur karet di tengah dan hilir DAS dengan penurunan laju deforestasi sebesar 50%)

Seperti halnya skenario 3, laju deforestasi diasumsikan turun sebesar 50%. Namun, jumlah SPL AF coklat-kopi yang dirubah menjadi SPL AF cengkeh dan monokultur karet hanya sebesar 25%. Matriks transisi perubahan SPL skenario 4 secara rinci disajikan dalam Lampiran. Tingkat emisi dan sekuestrasi DAS Balantieng berdasarkan skenario 4 disajikan dalam Tabel 33.

Tabel 33. Emisi dan sekuestrasi karbon di DAS Balantieng berdasarkan Skenario 4

Variabel	1999-2009	2009-2019	2019-2029
1 Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	9,39	5,55	4,42
2 Sekuestrasi per-Ha Luasan (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	2,68	3,20	3,20
3 Total Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	190.107	112.276	89.527
4 Total Sekuestrasi (ton CO ₂ -eq/tahun)	54.227	64.812	64.820
5 Net Emisi per Ha (ton CO ₂ -eq/(ha.tahun))	6,71	2,3	1,22
6 Net Emisi (ton CO ₂ -eq/tahun)	135.880	47.464,1	24.707

Tabel 33 menunjukkan penurunan total emisi dari pengurangan laju deforestasi cukup signifikan, yaitu dari 64.812 ton CO₂-eq/tahun menjadi 12.429 pada tahun 2009-2019, dan menjadi 8.600 ton CO₂-eq/tahun pada tahun 2019-2029. Walaupun total sekuestrasi di DAS Balantieng pada skenario 4 juga lebih kecil dibandingkan skenario 2, namun net emisi pada skenario 4 lebih kecil dibandingkan skenario 2. Hal ini menunjukkan bahwa skenario pengurangan laju deforestasi cukup efektif dalam mengurangi emisi yang terjadi.

4. Kesimpulan

Sistem penggunaan lahan agroforestri di DAS Balantieng cukup berkembang, mencapai 57 % dari total luas DAS Balantieng. Sistem penggunaan lahan ini tidak hanya menyediakan produk *tangible* baik kayu maupun bukan kayu yang memberikan manfaat ekonomi langsung bagi masyarakat, tetapi juga menyediakan produk jasa lingkungan air dan karbon.

Berdasarkan hasil analisis, secara umum kondisi hidrologi di DAS Balantieng masih cukup baik, belum menunjukkan terjadinya degradasi. Namun demikian tingkat deforestasi kawasan hutan alam yang terjadi (3,9 ha/th pada kurun 1989-1999 dan 98,3 ha/tahun pada kurun 1999-2009) dapat mempengaruhi neraca air dengan meningkatnya debit sungai yang berasal dari aliran permukaan. Peningkatan aliran permukaan akan menyebabkan degradasi.

Berdasarkan hasil survei pengetahuan ekologi lokal, dapat diketahui bahwa penurunan tingkat produksi kebun coklat akibat serangan hama penyakit menyebabkan petani tertarik untuk menggantinya dengan pola sistem cengkeh (*clove*) dan karet (*rubber*). Hasil analisa perubahan pola agroforestri coklat-kopi menjadi kebun cengkeh pada wilayah hulu DAS sebesar 25 % dan 50 %, serta perubahan pola agroforestri coklat-kopi pada wilayah DAS tengah dan DAS hilir menjadi kebun karet, menunjukkan kondisi hidrologi yang tidak jauh berbeda dengan kondisi baseline (jika tidak terjadi perubahan tipe lahan). Namun demikian, hasil analisa terhadap fungsi DAS, perubahan 50 % dikhawatirkan memicu terjadinya banjir bandang pada intensitas hujan tinggi. Sementara skenario pengurangan deforestasi 50 % pada wilayah ini dapat mencegah resiko terjadinya banjir bandang.

Sistem penggunaan lahan pola agroforestri di DAS Balantieng juga berkontribusi pada penyerapan karbon. Dengan total luas 57%, berbagai SPL agroforestri mampu menyerap 1.481.101 ton karbon atau 76 % dari cadangan karbon total di seluruh wilayah DAS Balantieng. Namun demikian perubahan penggunaan lahan secara keseluruhan di wilayah ini menyebabkan terjadinya emisi karbon sebesar 20.164 ton CO₂-eq/th pada kurun waktu 1989-1999 dan 136.193 ton CO₂-eq/th pada kurun waktu 1999-2009. Perubahan lahan yang secara dominan berkontribusi terhadap terjadinya emisi ini antara lain adanya deforestasi (dari hutan tidak terganggu dan hutan bekas tebangan menjadi beberapa

SPL lainnya) serta perubahan sistem kebun campuran menjadi beberapa SPL agroforestri dan padang rumput.

Skenario perubahan penggunaan lahan berdasarkan pilihan masyarakat untuk merubah kebun coklat-kopi menjadi sistem cengkeh dan sistem karet sebesar 50 % dapat menurunkan tingkat emisi karbon sampai kurun waktu tahun 2009-2029 di wilayah ini, dengan asumsi laju deforestasi yang tidak berubah. Perubahan hanya 25 % SPL AF coklat-kopi menjadi AF cengkeh dan monokultur karet juga menurunkan net emisi meskipun dengan tingkat yang lebih rendah. Penurunan emisi ini semakin efektif dengan skenario penurunan deforestasi sebesar 50 % dimana net emisi yang terjadi lebih rendah dibandingkan pada scenario yang sama tanpa perubahan laju deforestasi.

Daftar Pustaka

- Albrecht, A., Kandji, S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture Ecosystems and Environment* 99, 15-27.
- Andreassian, V., 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291, 1-24.
- Bruijnzeel, L.A., 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. UNESCO. International Hydrological Programme.
- Bruijnzeel, L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems and Environment* 104, 184-228.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111, 1-11.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87-99.
- Farida dan M. van Noordwijk. 2004. Analisis Debit Sungai Akibat Alih Guna Lahan Dan Aplikasi Model Genriver Pada Das Way Besai, Sumberjaya. *Jurnal Agrivita* Vol. 26 No.1. Maret 2004. p.:39 -47.
- Ginoga, K., Wulan, Y.C., Djaenudin, D., 2004. Potential of Indonesian smallholder agroforestry in the CDM: a case study in the upper Citanduy watershed area. In. Pusat Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan, Bogor Indonesia.
- Gregersen, H.M., Ffolliott, P.F., Brooks, K.N., 2007. Integrated watershed management: Connecting people to their land and water. CAB International.
- Hairiah, K., Ekadinata, A., Sari, R.R., Rahayu, S., 2011. Pengukuran cadangan karbon dari tingkat lahan ke bentang lahan. World Agroforestry Center, Bogor Indonesia.
- Hairiah, K., S. Rahayu, dan Berlian. 2006. Layanan lingkungan agroforestri berbasis kopi: Cadangan karbon dalam biomasa pohon dan bahan organik tanah (studi kasus di Sumberjaya, Lampung Barat). *AGRIVITA* 28 (3): 298-309.
- IPCC, 2006. IPCC Guideline 2006 Guidelines for national green house gas inventories. In. IPCC.
- Jeanes K, van Noordwijk M, Joshi L, Widayati A, Farida and Leimona B. 2006. Rapid Hydrological Appraisal in the context of environmental service rewards. Bogor, Indonesia. World Agroforestry Centre - ICRAF, SEA Regional Office. 56 p.

- Kimble, J.M., Lal, R., 2000. Watershed management for mitigating the greenhouse effect. CRC Press.
- Kobold, M., Suselj, K., Polajnar, j. dan Pogacnik, N., 2008, Calibration Techniques Used For HBV Hydrological Model In Savinja Catchment, *XXIVth Conference Of The Danubian Countries On The Hydrological Forecasting And Hydrological Bases Of Water Management*.
- Krisnawati, H., Adinugroho, W.C., Imanudin, R., 2012. Monograf model-model alometrik untuk pendugaan biomassa pohon pada berbagai tipe ekosistem hutan di Indonesia. Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi, Badan Litbang Kehutanan, Bogor-Indonesia.
- Kurniawan S, Prayogo C, Widiyanto, Zulkarnain MT, Lestari ND, Aini FK, Hairiah K. 2010. *Estimasi Karbon Tersimpan di Lahan-lahan Pertanian di DAS Konto, Jawa Timur: RACSA (Rapid Carbon Stock Appraisal)*. Working paper 120. World Agroforestri Centre (ICRAF) Southeast Asia Program.
- Lal, R., 2000. Rationale for watershed as a basis for sustainable management of soil and water resources. CRC Press.
- Lefroy, E.C., Stirzaker, R.J., 1999. Agroforestri for water management in the cropping zone of southern Australia. *Agroforestri systems* 45, 277-302.
- Lusiana, B., Van Noordwijk, M., Rahayu, S., 2005. Carbon stocks monitoring in Nunukan, East Kalimantan: A spatial and modelling approach: Report from FORMACS project. World Agroforestry Centre, Southeast Asia Regional Programme, Bogor, Indonesia. 91 p.
- Lusiana B, Widodo R, Mulyoutami E, Nugroho Adi D. and van Noordwijk M. 2008. Kajian Kondisi Hidrologis DAS Talau, Kabupaten Belu, Nusa Tenggara Timur (*waorking paper*). World Agroforestri Centre - ICRAF, SEA Regional Office.
- Markum, E. Arisoelaningsih, D. Suprayogo and K. Hairiah. 2013. Plant species diversity in relation to carbon stocks at Jangkok watershed, Lombok island. *AGRIVITA* 35 (3). Oktober 2013.
- Moriassi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., dan Veith, T.L., 2001, Model Evaluation Guidelines, For, Systematic Quantification Of Accuracy In Watersshed Simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 20(3):885-900
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M., Nair, V.D., 2009. Agroforestri as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition Soil Science* 172, 10-23.
- Roshetko, J.M., Delaney, M., Hairiah, K., Purnomosidhi, P., 2002. Carbon stocks in Indonesian homegarden systems: Can smallholder systems be targeted for increased carbon storage? *American Journal of Alternative Agriculture* 17, 138-148.
- Seng, O.D., 1990. Spesific Gravity of Indonesian Woods and Its Significance for Practical Use. Diterjemahkan oleh Suwarsono P.H. Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan. Departemen Kehutanan Indonesia. Bogor. Indonesia

- Smettem, K., Harper, R., 2009. Using trees to manage local and regional water balances. In: Nuberg, I., George, B., Reid, R. (Eds.), *Agroforestry for natural resource management*. CSIRO PUBLISHING, Australia.
- Swallow, B., Noordwijk, M.v., Dewi, S., Murdiyarso, D., White, D., Gockowski, J., Hyman, G., Budidarsono, S., Robiglio, V., Meadu, V., Ekadinata, A., Agus, F., Hairiah, K., Mbile, P., Sonwa, D.J., Weise, S., 2007. Opportunities for avoided deforestation with sustainable benefits. In, *An interim report of the ASB partnership for the Tropical Forest Margins*, Nairobi, Kenya.
- Noordwijk, M.v., Agus, F., Suprayogo, D., Hairiah, K., Passya, G., Verbist, B., Farida, 2004. Peranan agroforestri dalam mempertahankan fungsi hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS). *AGRIVITA* 26, 1-8.
- Van Noordwijk, M., Farida A, Suyanto DA and Khasanah N. 2003. Spatial variability of rainfall governs river flow and reduces effects on land use change at landscape scale: GenRiver and SpatRain simulations. MODSIM proceedings, Townsville (Australia) July 2003. Bogor, Indonesia. World Agroforestry Centre - ICRAF, SEA Regional Office.
- Van Noordwijk, M, Agus, F, Suprayogo, D, Hairiah, K., Passya, G., Verbist, B., dan Farida. 2004. Peranan Agroforestri Dalam Mempertahankan Fungsi Hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS) . *AGRIVITA* VOL. 26: 1-8
- van Noordwijk, M., Rahayu, S., Hairiah, K., Wulan, Y., Farida, A., Verbist, B., 2002. Carbon stock assessment for a forest to coffee conversion landscape in Sumber Jaya (Lampung, Indonesia) from allometric equations to land use change analysis. *Science in China (Series C)* 45, 75-86.
- Van Noordwijk, M., Widodo, R.H., Farida, A., Suyanto, D.A., Lusiana, B., Tanika, L. dan Khasanah, N., 2011. *GenRiver and FlowPer User Manual Version 2.0*. Bogor. Bogor Agroforestry Centre Southeast Asia Regional Program. hlm 117
- Wardah, Toknok, B., Zulkhaidah, 2011. Carbon stock of agroforestry systems at adjacent buffer zone of Lore Lindu National Park, Central Sulawesi. *Journal of Tropical Soils* 16, 123-128.
- Widianto, Suprayogo, D., Noveras, H., Widodo, R.H., Purnomosidhi, P., Noordwijk, M.v., 2004. Alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian: Apakah fungsi hidrologis hutan dapat digantikan sistem kopi monokultur.
- Zanne, A.E., G. Lopez-Gonzalez, G., D.A. Coomes, J. Ilic, S. Jansen, , S.L. Lewis, R.B. Miller, N.G. Swenson, M.C. Wiemann, and J. Chave,. 2009. Global wood density database. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>. Accessed in February 4th, 2013.

Lampiran

Lampiran 1. Matriks Transisi Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 1989 – 2009 DAS Balantieng (dalam ha)

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	TOTAL
Cacao-coffee agroforest	685	21	0	485	51	51	0	0	202	0	103	0	148	5	32	1	0	0	1.783
Cashew agroforest	378	81	1	10	43	122	0	0	220	0	99	0	220	1	84	9	0	0	1.269
Cleared land	18	1	1	19	18	2	0	0	78	0	51	0	13	0	3	0	0	0	202
Clove agroforest	1.587	20	0	1.338	93	188	0	0	542	0	100	0	361	0	39	2	0	0	4.270
Coconut agroforest	92	17	0	163	95	16	0	0	93	0	15	0	32	0	5	0	0	0	529
Grassland	30	2	0	29	2	72	0	0	43	0	11	0	34	1	5	7	0	0	236
Logged over forest-high density	8	2	0	257	13	4	823	171	218	0	104	0	52	0	1	0	0	0	1.653
Logged over forest-low density	79	5	0	210	33	29	0	88	132	0	106	0	122	0	34	0	0	0	839
Mix garden	830	55	0	515	116	84	0	0	675	0	99	0	196	6	76	10	0	0	2.664
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Other crops	24	2	0	14	4	6	0	0	18	0	451	0	70	2	4	0	0	0	596
Randu agroforest	0	0	0	77	0	11	0	0	9	0	0	0	1	1	0	0	0	0	101
Rice field	233	18	35	140	71	21	0	0	231	0	431	0	2.112	4	93	11	0	0	3.399
Rubber monoculture	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	77	0	1	0	0	79
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127	0	0	0	127
Shrub	141	20	11	53	36	14	0	0	119	0	83	0	102	0	8	1	0	0	588
Undisturbed forest	189	6	0	133	36	16	301	86	180	0	20	0	54	0	2	0	612	0	1.633
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	258
TOTAL	4.295	249	49	3.446	611	637	1.124	345	2.760	8	1.674	0	3.517	97	512	44	612	258	2.0236

Lampiran 2. Matriks Net Emisi DAS Balantieng Tahun 1989 – 2009 (ton CO₂)

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	TOTAL
Cacao-coffee agroforest	0	-83	0	-1.499	-289	987	0	0	-2.066	0	2.007	0	2.898	-96	473	20	0	0	2.351
Cashew agroforest	1.520	0	35	10	-69	2.869	0	0	-1.367	0	2.346	0	5.183	-19	1.576	179	0	0	12.263
Cleared land	-353	-15	0	-424	-443	0	0	0	-2.312	0	5	0	1	0	-12	0	0	0	-3.552
Clove agroforest	4.902	-19	0	0	-238	4.232	0	0	-3.878	0	2.271	0	8.168	0	686	37	0	0	16.161
Coconut agroforest	517	27	0	417	0	412	0	0	-429	0	372	0	815	-5	112	6	0	0	2.245
Grassland	-589	-38	0	-655	-53	0	0	0	-1.264	0	1	0	3	-54	-22	-28	0	0	-2.698
Logged over forest-high density	126	26	0	3.070	122	127	0	0	1.043	0	3.606	0	1.783	0	18	0	0	0	9.920
Logged over forest-low density	1.192	54	16	2.510	309	1.007	0	0	632	0	3.661	0	4.207	0	1.018	3	0	0	14.610
Mix garden	8.495	344	5	3.684	532	2.501	0	0	0	0	2.959	0	5.854	-54	1.892	272	0	0	26.484
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other crops	-477	-36	0	-324	-106	-1	0	0	-537	0	0	0	0	-77	-20	-1	0	0	-1.580
Randu agroforest	-6	0	0	-1.165	-5	82	0	0	-196	0	3	0	10	-31	0	0	0	0	-1.307
Rice field	-4.561	-424	-3	-3.181	-1.799	-2	0	0	-6.885	0	0	0	0	-137	-449	-42	0	0	-17.482
Rubber monoculture	5	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	4	0	0	33	0	0	86
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shrub	-2.216	-391	40	-1.001	-761	55	0	0	-3.095	0	322	0	394	-8	-7	0	0	0	-6.668
Undisturbed forest	6.101	172	0	3.894	956	825	5.213	1.484	3.972	0	1.023	0	2.805	0	88	0	0	0	26.534
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	14.657	-382	93	5.336	-1.844	13.139	5.213	1.484	-16.383	0	18.577	0	32.125	-479	5.352	478	0	0	77.367

Lampiran 3. Matriks Transisi Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 1989 – 1999 (dalam ha)

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	Grand Total
Cacao-coffee agroforest	1.194	23	14	230	92	19			33		14		125		5	35			1.783
Cashew agroforest	60	666	25	102	21	35			69		26	51	157	0	23	34			1.269
Cleared land	17		147	15	7	1			16		0								202
Clove agroforest	165	91	43	2.888	237	108			200		26	5	309		15	182			4.270
Coconut agroforest	10	4	3	46	428	1			8		2	0	16			11			529
Grassland		5				223			0				8						236
Logged over forest-high density	12	2	7	6			1.439	169	6		6	2	6						1.653
Logged over forest-low density	2	7	7	127	2			651	10		6	2	10		14	0			839
Mix garden	455	66	32	353	76	26			1.462		12	7	146	0	6	22			2.664
No data										8									8
Other crops		25	16	26	12	5			35		462		4		0	9			596
Randu agroforest				0		0						101							101
Rice field	6	121	103	132	44	31			85		41		2.788		10	38			3.399
Rubber monoculture														79					79
Settlement															127				127
Shrub	19	53	38	11	13	13			41		16		98		3	283			588
Undisturbed forest	10			3			0	10	3				6			6	1.595		1.633
Waterbody																		258	258
Grand Total	1.949	1.062	435	3.940	933	463	1.439	829	1.968	8	612	168	3.673	80	203	619	1.595	258	20.236

Lampiran 4. Matriks Emisi Akibat Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 1989 – 1999 (ton CO₂ eq)

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	Grand Total
Cacao-coffee agroforest	0	-91	267	-712	-520	366	0	0	-339	0	268	0	2.447	0	71	548	0	0	2.305
Cashew agroforest	241	0	594	95	-34	823	0	0	-430	0	620	814	3.700	-3	433	662	0	0	7.515
Cleared land	-330	0	0	-332	-186	0	0	0	-476	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.323
Clove agroforest	510	-85	971	0	-607	2.444	0	0	-1.430	0	597	80	6.990	0	268	3.411	0	0	13.150
Coconut agroforest	56	7	69	118	0	31	0	0	-38	0	49	3	406	0	0	225	0	0	926
Grassland	0	-123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-122
Logged over forest-high density	173	17	232	76	0	0	0	0	27	0	204	54	205	0	0	0	0	0	988
Logged over forest-low density	37	73	238	1.520	20	0	0	0	49	0	205	56	347	0	427	3	0	0	2.976
Mix garden	4.660	410	950	2.523	350	778	0	0	0	0	345	155	4.365	-1	145	581	0	0	15.260
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other crops	0	-600	-1	-589	-295	0	0	0	-1.055	0	0	0	0	0	-2	-35	0	0	-2.579
Randu agroforest	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Rice field	-114	-2.859	-9	-2.998	-1.107	-3	0	0	-2.523	0	0	0	0	0	-48	-145	0	0	-9.806
Rubber monoculture	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shrub	-291	-1.047	145	-200	-287	49	0	0	-1.051	0	63	0	380	0	-3	0	0	0	-2.241
Undisturbed forest	321	0	0	90	0	0	5	172	73	0	0	0	307	0	0	294	0	0	1.263
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grand Total	5.264	-4.297	3.456	-408	-2.666	4.488	5	172	-7.193	0	2.352	1.162	19.147	-4	1.291	5.543	0	0	28.312

Lampiran 5. Matriks Transisi Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 1999 – 2009 (dalam ha)

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	Grand Total
Cacao-coffee agroforest	1271	12		245	40	43			137		47	130	5	20	1			1949
Cashew agroforest	298	105	7	14	39	63			201		87	196	1	47	4			1062
Cleared land	35	1	9	23	12	12			95		121	115		10				435
Clove agroforest	1281	17		1584	68	119			442		90	326		13	2			3940
Coconut agroforest	134	22	0	286	176	35			130		29	111	0	9	0			933
Grassland	63	5		72	5	122			68		24	87	1	8	9			463
Logged over forest-high density	1			207	8	3	823	159	172		44	21		0				1439
Logged over forest-low density	75	5	0	152	34	24		102	158		145	118		17				829
Mix garden	413	25	1	305	56	72			736		93	193	6	66	4			1968
No data										8								8
Other crops	28	6	0	20	5	9			17		405	113	2	6	0			612
Randu agroforest	4	0		77	0	60			19		1	3	1	2	1			168
Rice field	329	31	30	196	93	40			321		526	1979	4	104	20			3673
Rubber monoculture	0					1						0	77		1			80
Settlement														203				203
Shrub	185	13	1	137	40	21			92		43	82	0	6	1			619
Undisturbed forest	178	6		128	35	14	301	83	172		19	45		2		612		1595
Waterbody																	258	258
Grand Total	4295	249	49	3446	611	637	1124	345	2760	8	1674	3517	97	512	44	612	258	20236

Lampiran 6. Matriks Emisi Akibat Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 1999 – 2009 (ton CO₂ eq)

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	Grand Total
Cacao-coffee agroforest	0	-100	0	-1.512	-451	1.656	0	0	-2.806	0	1.821	3.119	189	-760	21	0	0	0	1.177
Cashew agroforest	2.397	0	320	26	-128	2.938	0	0	-2.496	0	4.127	6.257	32	-1.455	167	0	0	0	12.185
Cleared land	-1.376	-50	0	-1.059	-616	0	0	0	-5.670	0	22	-1.728	0	-782	0	0	0	0	-11.259
Clove agroforest	7.911	-32	0	0	-346	5.357	0	0	-6.313	0	4.064	9.805	0	-420	70	0	0	0	20.096
Coconut agroforest	1.517	70	9	1.463	0	1.742	0	0	-1.197	0	1.472	3.910	18	-257	7	0	0	0	8.754
Grassland	-2.451	-244	0	-3.232	-240	0	0	0	-4.026	0	4	-1.301	0	-607	-86	0	0	0	-12.182
Logged over forest-high density	43	0	0	4.932	157	238	0	0	1.649	0	3.033	1.123	0	-2	0	0	0	0	11.173
Logged over forest-low density	2.242	105	31	3.633	635	1.666	0	0	1.506	0	10.036	6.350	0	-147	0	0	0	0	26.057
Mix garden	8.452	309	37	4.366	510	4.255	0	0	0	0	5.559	8.549	364	-1.208	196	0	0	0	31.390
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other crops	-1.108	-284	0	-906	-235	-2	0	0	-1.039	0	0	-1.718	0	-446	-3	0	0	0	-5.740
Randu agroforest	-99	-11	0	-2.330	-16	896	0	0	-837	0	12	0	15	-107	4	0	0	0	-2.472
Rice field	-12.881	-1.475	-5	-8.876	-4.705	-7	0	0	-19.135	0	0	-30.116	0	-8.089	-197	0	0	0	-85.488
Rubber monoculture	10	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	6	602 2	0	65	0	0	0	6.190
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13.887	0	0	0	0	-13.887
Shrub	-5.795	-494	9	-5.152	-1.696	158	0	0	-4.776	0	330	-611	2	-389	-2	0	0	0	-18.417
Undisturbed forest	11.508	345	0	7.470	1.859	1.481	10.427	2.885	7.610	0	2.000	3.957	0	46	0	58.787	0	0	108.376
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-26.845	0	-26.845
Grand Total	10.372	-1.862	400	-1.178	-5.272	20.466	10.427	2.885	-37.530	0	32.479	7.603	6.64 1	-28.509	243	58.787	-26.845	0	49.108

Lampiran 7. Matrik transisi perubahan lahan Skenario 1

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	TOTAL
Cacao-coffee agroforest	635	12	0	287	40	43	0	0	137	0	47	0	130	598	20	1	0	0	1.949
Cashew agroforest	298	105	7	14	39	63	0	0	201	0	87	0	196	1	47	4	0	0	1.062
Cleared land	35	1	9	23	12	12	0	0	95	0	121	0	115	0	10	0	0	0	435
Clove agroforest	1.281	17	0	1.584	68	119	0	0	442	0	90	0	326	0	13	2	0	0	3.940
Coconut agroforest	134	22	0	286	176	35	0	0	130	0	29	0	111	0	9	0	0	0	933
Grassland	63	5	0	72	5	122	0	0	68	0	24	0	87	1	8	9	0	0	463
Logged over forest-high density	1	0	0	207	8	3	823	159	172	0	44	0	21	0	0	0	0	0	1.439
Logged over forest-low density	75	5	0	152	34	24	0	102	158	0	145	0	118	0	17	0	0	0	829
Mix garden	413	25	1	305	56	72	0	0	736	0	93	0	193	6	66	4	0	0	1.968
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Other crops	28	6	0	20	5	9	0	0	17	0	405	0	113	2	6	0	0	0	612
Randu agroforest	4	0	0	77	0	60	0	0	19	0	1	0	3	1	2	1	0	0	168
Rice field	329	31	30	196	93	40	0	0	321	0	526	0	1.979	4	104	20	0	0	3.673
Rubber monoculture	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	77	0	1	0	0	80
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	203	0	0	0	203
Shrub	185	13	1	137	40	21	0	0	92	0	43	0	82	0	6	1	0	0	619
Undisturbed forest	178	6	0	128	35	14	301	83	172	0	19	0	45	0	2	0	612	0	1.595
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	258
TOTAL	3.660	249	49	3.488	611	637	1.124	345	2.760	8	1.674	0	3.517	691	512	44	612	258	20.236

Lampiran 8. Matrik transisi perubahan lahan Skenario 2

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	TOTAL
Cacao-coffee agroforest	953	12	0	266	40	43	0	0	137	0	47	0	130	301	20	1	0	0	1.949
Cashew agroforest	298	105	7	14	39	63	0	0	201	0	87	0	196	1	47	4	0	0	1.062
Cleared land	35	1	9	23	12	12	0	0	95	0	121	0	115	0	10	0	0	0	435
Clove agroforest	1.281	17	0	1.584	68	119	0	0	442	0	90	0	326	0	13	2	0	0	3.940
Coconut agroforest	134	22	0	286	176	35	0	0	130	0	29	0	111	0	9	0	0	0	933
Grassland	63	5	0	72	5	122	0	0	68	0	24	0	87	1	8	9	0	0	463
Logged over forest-high density	1	0	0	207	8	3	823	159	172	0	44	0	21	0	0	0	0	0	1.439
Logged over forest-low density	75	5	0	152	34	24	0	102	158	0	145	0	118	0	17	0	0	0	829
Mix garden	413	25	1	305	56	72	0	0	736	0	93	0	193	6	66	4	0	0	1.968
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Other crops	28	6	0	20	5	9	0	0	17	0	405	0	113	2	6	0	0	0	612
Randu agroforest	4	0	0	77	0	60	0	0	19	0	1	0	3	1	2	1	0	0	168
Rice field	329	31	30	196	93	40	0	0	321	0	526	0	1.979	4	104	20	0	0	3.673
Rubber monoculture	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	77	0	1	0	0	80
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	203	0	0	0	203
Shrub	185	13	1	137	40	21	0	0	92	0	43	0	82	0	6	1	0	0	619
Undisturbed forest	178	6	0	128	35	14	301	83	172	0	19	0	45	0	2	0	612	0	1.595
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	258
TOTAL	3.977	249	49	3.467	611	637	1.124	345	2.760	8	1.674	0	3.517	394	512	44	612	258	20.236

Lampiran 9. Matrik transisi perubahan lahan Skenario 3

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	TOTAL
Cacao-coffee agroforest	635	12	0	287	40	43	0	0	137	0	47	0	130	598	20	1	0	0	1.949
Cashew agroforest	298	105	7	14	39	63	0	0	201	0	87	0	196	1	47	4	0	0	1.062
Cleared land	35	1	9	23	12	12	0	0	95	0	121	0	115	0	10	0	0	0	435
Clove agroforest	1.281	17	0	1.584	68	119	0	0	442	0	90	0	326	0	13	2	0	0	3.940
Coconut agroforest	134	22	0	286	176	35	0	0	130	0	29	0	111	0	9	0	0	0	933
Grassland	63	5	0	72	5	122	0	0	68	0	24	0	87	1	8	9	0	0	463
Logged over forest-high density	1	0	0	207	8	3	823	159	172	0	44	0	21	0	0	0	0	0	1.439
Logged over forest-low density	75	5	0	152	34	24	0	102	158	0	145	0	118	0	17	0	0	0	829
Mix garden	413	25	1	305	56	72	0	0	736	0	93	0	193	6	66	4	0	0	1.968
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Other crops	28	6	0	20	5	9	0	0	17	0	405	0	113	2	6	0	0	0	612
Randu agroforest	4	0	0	77	0	60	0	0	19	0	1	0	3	1	2	1	0	0	168
Rice field	329	31	30	196	93	40	0	0	321	0	526	0	1.979	4	104	20	0	0	3.673
Rubber monoculture	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	77	0	1	0	0	80
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	203	0	0	0	203
Shrub	185	13	1	137	40	21	0	0	92	0	43	0	82	0	6	1	0	0	619
Undisturbed forest	89	3	0	64	17	7	150	42	86	0	10	0	22	0	1	0	1.103	0	1.595
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	258
TOTAL	3.660	249	49	3.488	611	637	1.124	345	2.760	8	1.674	0	3.517	691	512	44	612	258	20.236

Lampiran 10. Matrik transisi perubahan lahan Skenario 4

	Cacao-coffee agroforest	Cashew agroforest	Cleared land	Clove agroforest	Coconut agroforest	Grassland	Logged over forest-high density	Logged over forest-low density	Mix garden	No data	Other crops	Randu agroforest	Rice field	Rubber monoculture	Settlement	Shrub	Undisturbed forest	Waterbody	TOTAL
Cacao-coffee agroforest	953	12	0	266	40	43	0	0	137	0	47	0	130	301	20	1	0	0	1.949
Cashew agroforest	298	105	7	14	39	63	0	0	201	0	87	0	196	1	47	4	0	0	1.062
Cleared land	35	1	9	23	12	12	0	0	95	0	121	0	115	0	10	0	0	0	435
Clove agroforest	1.281	17	0	1.584	68	119	0	0	442	0	90	0	326	0	13	2	0	0	3.940
Coconut agroforest	134	22	0	286	176	35	0	0	130	0	29	0	111	0	9	0	0	0	933
Grassland	63	5	0	72	5	122	0	0	68	0	24	0	87	1	8	9	0	0	463
Logged over forest-high density	1	0	0	207	8	3	823	159	172	0	44	0	21	0	0	0	0	0	1.439
Logged over forest-low density	75	5	0	152	34	24	0	102	158	0	145	0	118	0	17	0	0	0	829
Mix garden	413	25	1	305	56	72	0	0	736	0	93	0	193	6	66	4	0	0	1.968
No data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Other crops	28	6	0	20	5	9	0	0	17	0	405	0	113	2	6	0	0	0	612
Randu agroforest	4	0	0	77	0	60	0	0	19	0	1	0	3	1	2	1	0	0	168
Rice field	329	31	30	196	93	40	0	0	321	0	526	0	1.979	4	104	20	0	0	3.673
Rubber monoculture	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	77	0	1	0	0	80
Settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	203	0	0	0	203
Shrub	185	13	1	137	40	21	0	0	92	0	43	0	82	0	6	1	0	0	619
Undisturbed forest	89	3	0	64	17	7	150	42	86	0	10	0	22	0	1	0	1.103	0	1.595
Waterbody	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	258
TOTAL	3.888	246	49	3.403	593	630	973	303	2.674	8	1.664	0	3.494	394	511	44	1.103	258	20.236

WORKING PAPERS WITH DOIs

2005

1. Agroforestry in the drylands of eastern Africa: a call to action
2. Biodiversity conservation through agroforestry: managing tree species diversity within a network of community-based, nongovernmental, governmental and research organizations in western Kenya.
3. Invasion of *prosopis juliflora* and local livelihoods: Case study from the Lake Baringo area of Kenya
4. Leadership for change in farmers organizations: Training report: Ridar Hotel, Kampala, 29th March to 2nd April 2005.
5. Domestication des espèces agroforestières au Sahel : situation actuelle et perspectives
6. Relevé des données de biodiversité ligneuse: Manuel du projet biodiversité des parcs agroforestiers au Sahel
7. Improved land management in the Lake Victoria Basin: TransVic Project's draft report.
8. Livelihood capital, strategies and outcomes in the Taita hills of Kenya
9. Les espèces ligneuses et leurs usages: Les préférences des paysans dans le Cercle de Ségou, au Mali
10. La biodiversité des espèces ligneuses: Diversité arborée et unités de gestion du terroir dans le Cercle de Ségou, au Mali

2006

11. Bird diversity and land use on the slopes of Mt. Kilimanjaro and the adjacent plains, Tanzania
12. Water, women and local social organization in the Western Kenya Highlands
13. Highlights of ongoing research of the World Agroforestry Centre in Indonesia
14. Prospects of adoption of tree-based systems in a rural landscape and its likely impacts on carbon stocks and farmers' welfare: The FALLOW Model Application in Muara Sungkai, Lampung, Sumatra, in a 'Clean Development Mechanism' context
15. Equipping integrated natural resource managers for healthy Agroforestry landscapes.
17. Agro-biodiversity and CGIAR tree and forest science: approaches and examples from Sumatra.
18. Improving land management in eastern and southern Africa: A review of policies.
19. Farm and household economic study of Kecamatan Nanggung, Kabupaten Bogor, Indonesia: A socio-economic base line study of Agroforestry innovations and livelihood enhancement.
20. Lessons from eastern Africa's unsustainable charcoal business.
21. Evolution of RELMA's approaches to land management: Lessons from two decades of research and development in eastern and southern Africa
22. Participatory watershed management: Lessons from RELMA's work with farmers in eastern Africa.
23. Strengthening farmers' organizations: The experience of RELMA and ULAMP.
24. Promoting rainwater harvesting in eastern and southern Africa.
25. The role of livestock in integrated land management.
26. Status of carbon sequestration projects in Africa: Potential benefits and challenges to scaling up.
27. Social and Environmental Trade-Offs in Tree Species Selection: A Methodology for Identifying Niche Incompatibilities in Agroforestry [*Appears as AHI Working Paper no. 9*]
28. Managing tradeoffs in agroforestry: From conflict to collaboration in natural resource management. [*Appears as AHI Working Paper no. 10*]
29. Essai d'analyse de la prise en compte des systèmes agroforestiers par les législations forestières au Sahel: Cas du Burkina Faso, du Mali, du Niger et du Sénégal.
30. Etat de la recherche agroforestière au Rwanda étude bibliographique, période 1987-2003

2007

31. Science and technological innovations for improving soil fertility and management in Africa: A report for NEPAD's Science and Technology Forum.
32. Compensation and rewards for environmental services.
33. Latin American regional workshop report compensation.
34. Asia regional workshop on compensation ecosystem services.

35. Report of African regional workshop on compensation ecosystem services.
36. Exploring the inter-linkages among and between compensation and rewards for ecosystem services CRES and human well-being
37. Criteria and indicators for environmental service compensation and reward mechanisms: realistic, voluntary, conditional and pro-poor
38. The conditions for effective mechanisms of compensation and rewards for environmental services.
39. Organization and governance for fostering Pro-Poor Compensation for Environmental Services.
40. How important are different types of compensation and reward mechanisms shaping poverty and ecosystem services across Africa, Asia & Latin America over the Next two decades?
41. Risk mitigation in contract farming: The case of poultry, cotton, woodfuel and cereals in East Africa.
42. The RELMA savings and credit experiences: Sowing the seed of sustainability
43. Yatich J., Policy and institutional context for NRM in Kenya: Challenges and opportunities for Landcare.
44. Nina-Nina Adoung Nasional di So! Field test of rapid land tenure assessment (RATA) in the Batang Toru Watershed, North Sumatera.
45. Is Hutan Tanaman Rakyat a new paradigm in community based tree planting in Indonesia?
46. Socio-Economic aspects of brackish water aquaculture (*Tambak*) production in Nanggroe Aceh Darrusalam.
47. Farmer livelihoods in the humid forest and moist savannah zones of Cameroon.
48. Domestication, genre et vulnérabilité : Participation des femmes, des Jeunes et des catégories les plus pauvres à la domestication des arbres agroforestiers au Cameroun.
49. Land tenure and management in the districts around Mt Elgon: An assessment presented to the Mt Elgon ecosystem conservation programme.
50. The production and marketing of leaf meal from fodder shrubs in Tanga, Tanzania: A pro-poor enterprise for improving livestock productivity.
51. Buyers Perspective on Environmental Services (ES) and Commoditization as an approach to liberate ES markets in the Philippines.
52. Towards Towards community-driven conservation in southwest China: Reconciling state and local perceptions.
53. Biofuels in China: An Analysis of the Opportunities and Challenges of *Jatropha curcas* in Southwest China.
54. *Jatropha curcas* biodiesel production in Kenya: Economics and potential value chain development for smallholder farmers
55. Livelihoods and Forest Resources in Aceh and Nias for a Sustainable Forest Resource Management and Economic Progress
56. Agroforestry on the interface of Orangutan Conservation and Sustainable Livelihoods in Batang Toru, North Sumatra.
57. Assessing Hydrological Situation of Kapuas Hulu Basin, Kapuas Hulu Regency, West Kalimantan.
58. Assessing the Hydrological Situation of Talau Watershed, Belu Regency, East Nusa Tenggara.
59. Kajian Kondisi Hidrologis DAS Talau, Kabupaten Belu, Nusa Tenggara Timur.
60. Kajian Kondisi Hidrologis DAS Kapuas Hulu, Kabupaten Kapuas Hulu, Kalimantan Barat.
61. Lessons learned from community capacity building activities to support agroforest as sustainable economic alternatives in Batang Toru orang utan habitat conservation program (Martini, Endri et al.)
62. Mainstreaming Climate Change in the Philippines.
63. A Conjoint Analysis of Farmer Preferences for Community Forestry Contracts in the Sumber Jaya Watershed, Indonesia.
64. The highlands: a shared water tower in a changing climate and changing Asia
65. Eco-Certification: Can It Deliver Conservation and Development in the Tropics.
66. Designing ecological and biodiversity sampling strategies. Towards mainstreaming climate change in grassland management.
67. Towards mainstreaming climate change in grassland management policies and practices on the Tibetan Plateau
68. An Assessment of the Potential for Carbon Finance in Rangelands
69. ECA Trade-offs Among Ecosystem Services in the Lake Victoria Basin.

69. The last remnants of mega biodiversity in West Java and Banten: an in-depth exploration of RaTA (Rapid Land Tenure Assessment) in Mount Halimun-Salak National Park Indonesia
70. Le business plan d'une petite entreprise rurale de production et de commercialisation des plants des arbres locaux. Cas de quatre pépinières rurales au Cameroun.
71. Les unités de transformation des produits forestiers non ligneux alimentaires au Cameroun. Diagnostic technique et stratégie de développement Honoré Tabuna et Ingratia Kayitavu.
72. Les exportateurs camerounais de safou (*Dacryodes edulis*) sur le marché sous régional et international. Profil, fonctionnement et stratégies de développement.
73. Impact of the Southeast Asian Network for Agroforestry Education (SEANAFE) on agroforestry education capacity.
74. Setting landscape conservation targets and promoting them through compatible land use in the Philippines.
75. Review of methods for researching multistrata systems.
76. Study on economical viability of *Jatropha curcas* L. plantations in Northern Tanzania assessing farmers' prospects via cost-benefit analysis
77. Cooperation in Agroforestry between Ministry of Forestry of Indonesia and International Center for Research in Agroforestry
78. "China's bioenergy future. an analysis through the Lens if Yunnan Province
79. Land tenure and agricultural productivity in Africa: A comparative analysis of the economics literature and recent policy strategies and reforms
80. Boundary organizations, objects and agents: linking knowledge with action in agroforestry watersheds
81. Reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD) in Indonesia: options and challenges for fair and efficient payment distribution mechanisms

2009

82. Mainstreaming climate change into agricultural education: challenges and perspectives
83. Challenging conventional mindsets and disconnects in conservation: the emerging role of eco-agriculture in Kenya's landscape mosaics
84. Lesson learned RATA garut dan bengkunt: suatu upaya membedah kebijakan pelepasan kawasan hutan dan redistribusi tanah bekas kawasan hutan
85. The emergence of forest land redistribution in Indonesia
86. Commercial opportunities for fruit in Malawi
87. Status of fruit production processing and marketing in Malawi
88. Fraud in tree science
89. Trees on farm: analysis of global extent and geographical patterns of agroforestry
90. The springs of Nyando: water, social organization and livelihoods in Western Kenya
91. Building capacity toward region-wide curriculum and teaching materials development in agroforestry education in Southeast Asia
92. Overview of biomass energy technology in rural Yunnan (Chinese – English abstract)
93. A pro-growth pathway for reducing net GHG emissions in China
94. Analysis of local livelihoods from past to present in the central Kalimantan Ex-Mega Rice Project area
95. Constraints and options to enhancing production of high quality feeds in dairy production in Kenya, Uganda and Rwanda

2010

96. Agroforestry education in the Philippines: status report from the Southeast Asian Network for Agroforestry Education (SEANAFE)
97. Economic viability of *Jatropha curcas* L. plantations in Northern Tanzania- assessing farmers' prospects via cost-benefit analysis.
98. Hot spot of emission and confusion: land tenure insecurity, contested policies and competing claims in the central Kalimantan Ex-Mega Rice Project area
99. Agroforestry competences and human resources needs in the Philippines
100. CES/COS/CIS paradigms for compensation and rewards to enhance environmental Services
101. Case study approach to region-wide curriculum and teaching materials development in agroforestry education in Southeast Asia

102. Stewardship agreement to reduce emissions from deforestation and degradation (REDD): Lubuk Beringin's Hutan Desa as the first village forest in Indonesia
103. Landscape dynamics over time and space from ecological perspective
104. Komoditisasi atau koinvestasi jasa lingkungan: skema imbal jasa lingkungan program peduli sungai di DAS Way Besai, Lampung, Indonesia
105. Improving smallholders' rubber quality in Lubuk Beringin, Bungo district, Jambi province, Indonesia: an initial analysis of the financial and social benefits
106. Rapid Carbon Stock Appraisal (RACSA) in Kalahan, Nueva Vizcaya, Philippines
107. Tree domestication by ICRAF and partners in the Peruvian Amazon: lessons learned and future prospects in the domain of the Amazon Initiative eco-regional program
108. Memorias del Taller Nacional: "Iniciativas para Reducir la Deforestación en la región Andino - Amazónica", 09 de Abril del 2010. Proyecto REALU Peru
109. Percepciones sobre la Equidad y Eficiencia en la cadena de valor de REDD en Perú – Reporte de Talleres en Ucayali, San Martín y Loreto, 2009. Proyecto REALU-Perú.
110. Reducción de emisiones de todos los Usos del Suelo. Reporte del Proyecto REALU Perú Fase 1
111. Programa Alternativas a la Tumba-y-Quema (ASB) en el Perú. Informe Resumen y Síntesis de la Fase II. 2da. versión revisada
112. Estudio de las cadenas de abastecimiento de germoplasma forestal en la amazonía Boliviana
113. Biodiesel in the Amazon
114. Estudio de mercado de semillas forestales en la amazonía Colombiana
115. Estudio de las cadenas de abastecimiento de germoplasma forestal en Ecuador
<http://dx.doi.org/10.5716/WP10340.PDF>
116. How can systems thinking, social capital and social network analysis help programs achieve impact at scale?
117. Energy policies, forests and local communities in the Ucayali Region, Peruvian Amazon
118. NTFPs as a Source of Livelihood Diversification for Local Communities in the Batang Toru Orangutan Conservation Program
119. Studi Biodiversitas: Apakah agroforestry mampu mengkonservasi keanekaragaman hayati di DAS Konto?
120. Estimasi Karbon Tersimpan di Lahan-lahan Pertanian di DAS Konto, Jawa Timur
121. Implementasi Kaji Cepat Hidrologi (RHA) di Hulu DAS Brantas, Jawa Timur.
<http://dx.doi.org/10.5716/WP10338.PDF>
122. Kaji Cepat Hidrologi di Daerah Aliran Sungai Krueng Peusangan, NAD, Sumatra
<http://dx.doi.org/10.5716/WP10337.PDF>
123. A Study of Rapid Hydrological Appraisal in the Krueng Peusangan Watershed, NAD, Sumatra.
<http://dx.doi.org/10.5716/WP10339.PDF>

2011

124. An Assessment of farm timber value chains in Mt Kenya area, Kenya
125. A Comparative financial analysis of current land use systems and implications for the adoption of improved agroforestry in the East Usambaras, Tanzania
126. Agricultural monitoring and evaluation systems
127. Challenges and opportunities for collaborative landscape governance in the East Usambara Mountains, Tanzania
128. Transforming Knowledge to Enhance Integrated Natural Resource Management Research, Development and Advocacy in the Highlands of Eastern Africa <http://dx.doi.org/10.5716/WP11084.PDF>
129. Carbon-forestry projects in the Philippines: potential and challenges The Mt Kitanglad Range forest-carbon development <http://dx.doi.org/10.5716/WP11054.PDF>
130. Carbon forestry projects in the Philippines: potential and challenges. The Arakan Forest Corridor forest-carbon project <http://dx.doi.org/10.5716/WP11055.PDF>
131. Carbon-forestry projects in the Philippines: potential and challenges. The Laguna Lake Development Authority's forest-carbon development project <http://dx.doi.org/10.5716/WP11056.PDF>
132. Carbon-forestry projects in the Philippines: potential and challenges. The Quirino forest-carbon development project in Sierra Madre Biodiversity Corridor <http://dx.doi.org/10.5716/WP11057.PDF>
133. Carbon-forestry projects in the Philippines: potential and challenges. The Ikalahan Ancestral Domain forest-carbon development <http://dx.doi.org/10.5716/WP11058.PDF>
134. The Importance of Local Traditional Institutions in the Management of Natural Resources in the Highlands of Eastern Africa <http://dx.doi.org/10.5716/WP11085.PDF>
135. Socio-economic assessment of irrigation pilot projects in Rwanda <http://dx.doi.org/10.5716/WP11086.PDF>

136. Performance of three rambutan varieties(*Nephelium lappaceum* L.) on various nursery media <http://dx.doi.org/10.5716/WP11232.PDF>
137. Climate change adaptation and social protection in agroforestry systems: enhancing adaptive capacity and minimizing risk of drought in Zambia and Honduras <http://dx.doi.org/10.5716/WP11269.PDF>
138. Does value chain development contribute to rural poverty reduction? Evidence of asset building by smallholder coffee producers in Nicaragua <http://dx.doi.org/10.5716/WP11271.PDF>
139. Potential for biofuel feedstock in Kenya. <http://dx.doi.org/10.5716/WP11272.PDF>
140. Impact of fertilizer trees on maize production and food security in six districts of Malawi. <http://dx.doi.org/10.5716/WP11281.PDF>

2012

141. Fortalecimiento de capacidades para la gestión del Santuario Nacional Pampa Hermosa: Construyendo las bases para un manejo adaptativo para el desarrollo local. Memorias del Proyecto. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12005.PDF>
142. Understanding rural institutional strengthening: A cross-level policy and institutional framework for sustainable development in Kenya <http://dx.doi.org/10.5716/WP12012.PDF>
143. Climate change vulnerability of agroforestry <http://dx.doi.org/10.5716/WP16722.PDF>
144. Rapid assesment of the inner Niger delta of Mali <http://dx.doi.org/10.5716/WP12021.PDF>
145. Designing an incentive program to reduce on-farm deforestation in the East Usambara Mountains, Tanzania <http://dx.doi.org/10.5716/WP12048.PDF>
146. Extent of adoption of conservation agriculture and agroforestry in Africa: the case of Tanzania, Kenya, Ghana, and Zambia <http://dx.doi.org/10.5716/WP12049.PDF>
147. Policy incentives for scaling up conservation agriculture with trees in Africa: the case of Tanzania, Kenya, Ghana and Zambia <http://dx.doi.org/10.5716/WP12050.PDF>
148. Commoditized or co-invested environmental services? Rewards for environmental services scheme: River Care program Way Besai watershed, Lampung, Indonesia. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12051.PDF>
149. Assessment of the headwaters of the Blue Nile in Ethiopia. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12160.PDF>
150. Assessment of the uThukela Watershed, Kwazulu. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12161.PDF>
151. Assessment of the Oum Zessar Watershed of Tunisia. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12162.PDF>
152. Assessment of the Ruwenzori Mountains in Uganda. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12163.PDF>
153. History of agroforestry research and development in Viet Nam. Analysis of research opportunities and gaps. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12052.PDF>
154. REDD+ in Indonesia: a Historical Perspective. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12053.PDF>
155. Agroforestry and Forestry in Sulawesi series: Livelihood strategies and land use system dynamics in South Sulawesi <http://dx.doi.org/10.5716/WP12054.PDF>
156. Agroforestry and Forestry in Sulawesi series: Livelihood strategies and land use system dynamics in Southeast Sulawesi. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12055.PDF>
157. Agroforestry and Forestry in Sulawesi series: Profitability and land-use systems in South and Southeast Sulawesi. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12056.PDF>
158. Agroforestry and Forestry in Sulawesi series: Gender, livelihoods and land in South and Southeast Sulawesi <http://dx.doi.org/10.5716/WP12057.PDF>
159. Agroforestry and Forestry in Sulawesi series: Agroforestry extension needs at the community level in AgFor project sites in South and Southeast Sulawesi, Indonesia. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12058.PDF>
160. Agroforestry and Forestry in Sulawesi series: Rapid market appraisal of agricultural, plantation and forestry commodities in South and Southeast Sulawesi. <http://dx.doi.org/10.5716/WP12059.PDF>

2013

161. Diagnosis of farming systems in the Agroforestry for Livelihoods of Smallholder farmers in Northwestern Viet Nam project <http://dx.doi.org/10.5716/WP13033.PDF>
162. Ecosystem vulnerability to climate change: a literature review. <http://dx.doi.org/10.5716/WP13034.PDF>
163. Local capacity for implementing payments for environmental services schemes: lessons from the RUPES project in northeastern Viet Nam <http://dx.doi.org/10.5716/WP13046.PDF>
164. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Agroforestry dan Kehutanan di Sulawesi: Strategi mata pencaharian dan dinamika sistem penggunaan lahan di Sulawesi Selatan <http://dx.doi.org/10.5716/WP13040.PDF>
165. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Mata pencaharian dan dinamika sistem penggunaan lahan di Sulawesi Tenggara <http://dx.doi.org/10.5716/WP13041.PDF>
166. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Profitabilitas sistem penggunaan lahan di Sulawesi Selatan dan Sulawesi Tenggara <http://dx.doi.org/10.5716/WP13042.PDF>

167. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Gender, mata pencarian dan lahan di Sulawesi Selatan dan Sulawesi Tenggara <http://dx.doi.org/10.5716/WP13043.PDF>
168. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Kebutuhan penyuluhan agroforestri pada tingkat masyarakat di lokasi proyek AgFor di Sulawesi Selatan dan Tenggara, Indonesia <http://dx.doi.org/10.5716/WP13044.PDF>
169. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Laporan hasil penilaian cepat untuk komoditas pertanian, perkebunan dan kehutanan di Sulawesi Selatan dan Tenggara <http://dx.doi.org/10.5716/WP13045.PDF>
170. Agroforestry, food and nutritional security <http://dx.doi.org/10.5716/WP13054.PDF>
171. Stakeholder Preferences over Rewards for Ecosystem Services: Implications for a REDD+ Benefit Distribution System in Viet Nam <http://dx.doi.org/10.5716/WP13057.PDF>
172. Payments for ecosystem services schemes: project-level insights on benefits for ecosystems and the rural poor <http://dx.doi.org/10.5716/WP13001.PDF>
173. Good practices for smallholder teak plantations: keys to success <http://dx.doi.org/10.5716/WP13246.PDF>
174. Market analysis of selected agroforestry products in the Vision for Change Project intervention Zone, Côte d'Ivoire <http://dx.doi.org/10.5716/WP13249.PDF>
175. Rattan futures in Katingan: why do smallholders abandon or keep their gardens in Indonesia's 'rattan district'? <http://dx.doi.org/10.5716/WP13251.PDF>
176. Management along a gradient: the case of Southeast Sulawesi's cacao production landscapes <http://dx.doi.org/10.5716/WP13265.PDF>

2014

177. Are trees buffering ecosystems and livelihoods in agricultural landscapes of the Lower Mekong Basin? Consequences for climate-change adaptation. <http://dx.doi.org/10.5716/WP14047.PDF>
178. Agroforestry, livestock, fodder production and climate change adaptation and mitigation in East Africa: issues and options. <http://dx.doi.org/10.5716/WP14050.PDF>
179. Trees on farms: an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics. <http://dx.doi.org/10.5716/WP14064.PDF>
180. Beyond reforestation: an assessment of Vietnam's REDD+ readiness. <http://dx.doi.org/10.5716/WP14097.PDF>
181. Farmer-to-farmer extension in Kenya: the perspectives of organizations using the approach. <http://dx.doi.org/10.5716/WP14380.PDF>
182. Farmer-to-farmer extension in Cameroon: a survey of extension organizations. <http://dx.doi.org/10.5716/WP14383.PDF>
183. Evaluating indicators of land degradation and targeting Agroforestry interventions in smallholder farming systems in Ethiopia <http://dx.doi.org/10.5716/WP14384.PDF>
184. Seri Agroforestri dan Kehutanan di Sulawesi: Kuantifikasi jasa lingkungan air dan karbon pola agroforestri pada hutan rakyat di wilayah sungai Jeneberang <http://dx.doi.org/10.5716/WP14391.PDF>

The World Agroforestry Centre is an autonomous, non-profit research organization whose vision is a rural transformation in the developing world as smallholder households increase their use of trees in agricultural landscapes to improve food security, nutrition, income, health, shelter, social cohesion, energy resources and environmental sustainability. The Centre generates science-based knowledge about the diverse roles that trees play in agricultural landscapes, and uses its research to advance policies and practices, and their implementation that benefit the poor and the environment. It aims to ensure that all this is achieved by enhancing the quality of its science work, increasing operational efficiency, building and maintaining strong partnerships, accelerating the use and impact of its research, and promoting greater cohesion, interdependence and alignment within the organization.



United Nations Avenue, Gigiri • PO Box 30677 • Nairobi, 00100 • Kenya

Telephone: +254 20 7224000 or via USA +1 650 833 6645

Fax: +254 20 7224001 or via USA +1 650 833 6646

Email: worldagroforestry@cgiar.org • www.worldagroforestry.org

Southeast Asia Regional Program • Sindang Barang • Bogor 16680

PO Box 161 • Bogor 16001 • Indonesia

Telephone: +62 251 8625415 • Fax: +62 251 8625416

Email: icraf-indonesia@cgiar.org • www.worldagroforestry.org/regions/southeast_asia